

229

KTBL-Schrift

**Wolfgang Baader
Erich Dohne
Michael Brenndörfer**

Biogas in Theorie und Praxis



KTBL



Biogas in Theorie und Praxis

**Behandlung organischer Reststoffe
aus der Landwirtschaft
durch Methangärung**

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Baader
Dipl.-Ing. Dr. Erich Dohne
Dipl.-Ing. Michael Brenndörfer



Herausgeber
Kuratorium für Technik und Bauwesen
in der Landwirtschaft e. V.
6100 Darmstadt-Kranichstein

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Baader, Institut für Landmaschinen-
forschung der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL),
Braunschweig-Völkenrode
z. Zt. Vorsitzender der KTBL-Arbeitsgemeinschaft
"Agrartechnik und Umweltschutz"

Dipl.-Ing. Dr. Erich Dohne, Kuratorium für Technik und Bauwesen
in der Landwirtschaft, Darmstadt

Dipl.-Ing. Michael Brenndörfer, Kuratorium für Technik und
Bauwesen in der Landwirtschaft, Darmstadt

© 1978 by Kuratorium für Technik und Bauwesen
in der Landwirtschaft (KTBL) e. V.
Bartningstraße 49 (Institutszentrum), Postfach 12 01 42,
6100 Darmstadt 12

Druck: Herbert Maurer, Repro-Gesellschaft mbH, 6000 Frankfurt/M.

Vertrieb und Auslieferung: KTBL-Schriften-Vertrieb
im Landwirtschaftsverlag GmbH,
Marktallee 89, Postfach 48 02 10, 4400 Münster-Hiltrup

Alle Rechte, auch die der Übersetzung und des Nachdrucks sowie
jede Art der fotomechanischen Wiedergabe, auch auszugsweise,
bleiben vorbehalten.

Printed in Germany

Vorwort

Auf dem Gebiet der Methangärung landwirtschaftlicher organischer Reststoffe begann in der Bundesrepublik Deutschland bereits im Jahre 1947 eine rege Forschungstätigkeit. Ausgehend von grundlegenden Arbeiten in- und ausländischer Wissenschaftler über die Mikrobiologie der Methangärung konnten aus gezielten Laboratoriumsuntersuchungen und aus den Erfahrungen, die mit zahlreichen innerhalb kurzer Zeit erstellter Versuchsanlagen verschiedener Systeme gewonnen wurden, wesentliche Aussagen über den Prozeßverlauf und über den Verfahrenserfolg und daraus auch wichtige Daten für die Dimensionierung und konstruktive Ausführung von Biogasanlagen abgeleitet werden. Das KTBL förderte seinerzeit intensiv all diese Bemühungen und stellte auch den jeweiligen Stand des Wissens dar. Die günstige Energiepreissituation brachte gegen Ende der fünfziger Jahre jedoch nicht nur die Aktivitäten in Forschung und Entwicklung auf diesem Gebiet wieder zum Erliegen, sondern führte auch zur Stilllegung nahezu aller Biogasanlagen. Lediglich eine Anlage aus jenen Jahren ist heute noch in Betrieb.

Neue Impulse wurden dann wieder während der letzten vier Jahre durch die wirtschaftspolitische Entwicklung in den Bereichen Energie, Rohstoffe und Umweltschutz ausgelöst. In der öffentlichen Diskussion über die Möglichkeiten einer Bereitstellung von Energie aus bisher nicht oder noch zu wenig genutzten Quellen wird seither dem Biogas eine hohe Bedeutung beigemessen. Dies um so mehr, als unter Hinweis auf die jährlich in der Landwirtschaft anfallenden Mengen an organischen Reststoffen immer wieder sehr optimistische Prognosen aufgestellt werden hinsichtlich des Umfangs der aus diesen Stoffen über Biogas zu gewinnenden Energiemengen. Dabei wird jedoch zu wenig berücksichtigt, daß diese Reststoffe nicht nur in Art, Zusammensetzung und Zustand sehr unterschiedlich sind, wodurch die Gasausbeute stark beeinflußt wird, sondern daß sie auch - insbesondere was die Reststoffe aus der pflanzlichen Produktion betrifft - in einem landwirtschaftlichen Betrieb zu verschiedenen Zeiten, an verschiedenen Orten und meist auch jeweils in unterschiedlicher Beschaffenheit und Menge anfallen.

Auf den Arbeits- und Kostenaufwand, der hierdurch für die Bereitstellung der Stoffe als Substrat für die biologische Gasgewinnung entsteht, wird ebenso wenig hingewiesen wie auf den erhöhten Aufwand, der mit einer weitgehenden Ausschöpfung des in diesen Stoffen gespeicherten Energiepotentials verbunden ist.

Eine Zwischenbilanz, die bei einem KTBL-Gespräch am 10. März 1974 gezogen worden war, zeigte erneut die engen Grenzen auf, die auch heute einer wirtschaftlichen Nutzung des Biogasverfahrens in der Landwirtschaft der Bundesrepublik Deutschland gesetzt sind. Diese Studie ergänzt und erhärtet die damals festgestellten Sachverhalte und Aussagen. Unter Berücksichtigung des im in- und ausländischen Fachschrifttum dargestellten Erkenntnisstandes

werden im ersten Teil Hinweise zur Verfahrenstechnik der Methangärung gegeben, insbesondere über die Faktoren und Zusammenhänge, die den Gasgewinnungsprozeß kennzeichnen, und über die hierdurch bestimmten Voraussetzungen für ein Betreiben des Biogasverfahrens mit landwirtschaftlichen Rest- und Abfallstoffen. Der zweite Teil gibt Auskunft über die Möglichkeiten der Biogasnutzung im landwirtschaftlichen Betrieb und die damit verknüpften betriebstechnischen und betriebswirtschaftlichen Fragen. Mit diesem Überblick soll die Einordnung und Bewertung des Biogasverfahrens mit seinen verschiedenen Gestaltungsformen als ein Mittel zur umweltgerechten Behandlung dieser Stoffe sowie auch zur Bereitstellung von Energie und damit zur Einsparung von Fremdenergie im landwirtschaftlichen Betrieb erleichtert werden.

Die Studie stellt eine Gemeinschaftsarbeit des Instituts für Landmaschinenforschung der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig-Völkenrode, (für den verfahrenstechnischen Bereich, Teil I) und des KTBL, Darmstadt, (für den betriebstechnisch-ökonomischen Bereich, Teil II) dar. Herrn Dr. Tietjen vom Institut für Pflanzenbau und Saatgutforschung der FAL und Herrn Dr. Loll vom Institut für Wasserversorgung, Abwasserbeseitigung und Raumplanung der TU Darmstadt sei für die kritische Durchsicht des Manuskriptes und für die zahlreichen wertvollen Hinweise besonders gedankt.

Die in dieser Arbeit berücksichtigte beziehungsweise genannte Literatur stellt lediglich eine Auswahl in- und ausländischer Veröffentlichungen dar. Auf einen umfassenden Nachweis des Schrifttums auf dem Gebiet der Biogastechnologie wurde jedoch verzichtet, da dieser von der Dokumentationsstelle "Landtechnik" in Kürze herausgegeben wird.

KTBL-Arbeitsgemeinschaft
'Agrartechnik und Umweltschutz'
Prof. Dr.-Ing. W. Baader
Der Vorsitzende

April 1978

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Einleitung	7
Teil I: Verfahrenstechnik der Methangärung	12
1. Grundlagen	12
1.1 Prozeßmerkmale	12
1.1.1 Biochemische Umwandlungsprozesse	12
1.1.2 Einflußfaktoren	13
1.2 Stoffliche Voraussetzungen	17
1.2.1 Stoffzusammensetzung	17
1.2.2 Teilchengröße der Feststoffe	21
1.2.3 Maximale Gasausbeute	21
1.3 Verfahrensmerkmale	24
1.3.1 Raumbelastung	24
1.3.2 Technische Faulzeit	25
1.3.3 Mischintensität	25
2. Produkte	26
2.1 Gas	26
2.1.1 Zusammensetzung	26
2.1.2 Eigenschaften	26
2.2 Faulschlamm	27
2.2.1 Zusammensetzung	27
2.2.2 Umweltbelastung	28
3. Verfahrensgestaltung	28
3.1 Betriebssysteme	28
3.2 Anlagenkomponenten	32
3.2.1 Reaktionsbehälter	32
3.2.2 Heizeinrichtungen	38
3.2.3 Mischeinrichtungen	40
4. Energiebedarf	41
4.1 Wärme	41
4.1.1 Aufheizen des Faulgutes	41
4.1.2 Ausgleich der Wärmeverluste	42

4.2	Mechanische Energie	42
4.2.1	Rühren	42
4.2.2	Pumpen	43
4.3	Deckung des Energiebedarfs	43
4.3.1	Gas	43
4.3.2	Wärmerückgewinnung	44
4.3.3	Sonstige Energiequellen	46
Teil II: Nutzung von Biogas		47
5.	Gasspeicherung	47
5.1	Technische Möglichkeiten	47
5.2	Rechtliche Belange	58
6.	Aufbereitung von Biogas	62
7.	Biogasverwertung	66
7.1	Geeignete Geräte und Maschinen	67
7.2	Kraft-Wärme-Kopplung	76
8.	Energiebedarf landwirtschaftlicher Betriebe, der durch Biogas gedeckt werden kann	85
8.1	Landwirtschaftlicher Haushalt	86
8.2	Pflanzliche Produktion	89
8.3	Tierische Produktion	95
8.4	Verschiedene Modellbetriebe	98
9.	Verwertung von Bioschlamm	102
10.	Wirtschaftlichkeit von bäuerlichen Biogas- anlagen	103
Zusammenfassung und Ausblick		110
Literatur		113
Anlagen - Datenblätter Gase (CH ₄ , H ₂ S, CO ₂)		124
- UVV-Vorschrift: Biogasanlagen		131
Weitere KTBL-Veröffentlichungen		134

Einleitung

Organische Rest- und Abfallstoffe in der landwirtschaftlichen Produktion sind in erster Linie tierische Exkremente sowie pflanzliche Stoffe, insbesondere Stroh und mitunter auch Rübenblätter, Kartoffelkraut und andere Pflanzenrückstände, sofern diese nicht unmittelbar wieder als Futter verwendet werden. Die in diesen organischen Substanzen enthaltenen Stoffkomponenten könnten zum größten Teil als Pflanzendünger wieder genutzt werden und ersetzen somit energie- und kostenaufwendige Mineraldünger. Wegen ihres verhältnismäßig hohen Brennwertes (Tab. 1) stellen diese Stoffe auch ein Energiepotential dar, das auf verschiedene Weise genutzt werden kann. Eine Möglichkeit hierzu bietet sich über die Erzeugung von Gas (Biogas) mit hohem Energie-Inhalt auf dem Wege der anaeroben Fermentation.

Über die zur Zeit in der Bundesrepublik Deutschland jährlich anfallenden Mengen tierischer Exkremente, gibt die Tabelle 2, über die Mengen einiger wesentlicher Reststoffe aus der Pflanzenproduktion die Tabelle 3 Auskunft.

Die biologische Zersetzung der überwiegend organischen Verbindungen sowie der vor allem bei tierischen Exkrementen bereits im frischen Zustand vorhandene Anteil leichtflüchtiger und geruchsintensiver Stoffe führt zu Geruchs- und Gasentwicklung. Anorganische Bestandteile können, je nach Art und Zusammensetzung und örtlichem und zeitlichem Mengenanfall, bei der Ausbringung nachteilige Wirkungen hervorrufen, sei es durch Ertrags- und Qualitätsminderung in der Pflanzenproduktion oder durch Verunreinigung der Gewässer. Weiterhin stellt der Besatz an Krankheitserregern eine latente Gefahr für Mensch und Tier dar.

Der Anlaß zur Behandlung von Reststoffen ergibt sich somit für den landwirtschaftlichen Betrieb in erster Linie aus Gründen des Umweltschutzes zur

- Beseitigung von Geruchsemissionen bei der Lagerung und Ausbringung,
- Vermeidung der Kontamination von Produkten, Menschen und Tieren mit Krankheitserregern,
- Vermeidung der Überlastung von Boden, Wasser und Pflanzen mit Schadstoffen.

Dabei können sich bei Verwendung anaerober Verfahren noch betriebs- und energiewirtschaftliche Vorteile ergeben, da eine gewisse Einsparung von Zukauf-Düngemitteln durch Ausnutzung des Düngewertes der Reststoffe sowie von Primärenergie durch Ausnutzung des Energiepotentials der Reststoffe unter Umständen möglich ist.

Tabelle 1: Energiegehalt landwirtschaftlicher Reststoffe und aus diesen gewonnener Kraftstoffe, im Vergleich zu herkömmlichen Energieträgern (4)

Reststoffe	Anteil org. Masse i. d. Trockenmasse (kg/kg)	Brennwert H_o (MJ/kg TM)
Pflanzen	0,95 - 0,98	16 - 19
Exkremete von Rindern	0,77	18 - 19
Schweinen	0,80	18 - 19
Hühnern	0,77	14 - 16
Kraftstoffe	Herkunft	Heizwert H_u (MJ/m ³)
Faulgas (Biogas)	tier. Exkremete mit/ohne pfl. Stoffe	20 - 25
Generatorgas	Holz, Stroh	5 - 7
Pyrolysegas	tier. Exkremete	18 - 20
Leuchtgas		18 - 20
Erdgas		33 - 38
Methan		36
Propan (gasförmig)		93
Diesekraftstoff, Heizöl, Benzin		41 - 45 MJ/kg
Propan (flüssig)		46 "
Steinkohle		30 - 33 "
Holz		14 - 19 "

KTBL-Modellvorhaben: Anwendung technischer Verfahren zur Verminderung von Umweltbelastungen aus Flüssigmistlagerung und -ausbringung sowie Stallabluft.

TEIL I: F L Ü S S I G M I S T B E H A N D L U N G

Kapitel 1:

Begründung und Ziele des Modellvorhabens "Flüssigmist" und der Umfrage "Flüssigmistbelüftung"

von Rudolf Thaer, Braunschweig +)

1. Umweltprobleme des Flüssigmistes

Vergrößerung der Tierbestände, insbesondere in der Schweine- und Geflügelproduktion, Veränderung der Struktur der Landbevölkerung und steigende Anforderungen an die Reinhaltung von Boden, Wasser und Luft führten dazu, daß der Umweltwirkung von Nutztierhaltungen wachsende Aufmerksamkeit geschenkt werden muß. Hierbei stehen Hygienefragen und die von der Futterlagerung und -aufbereitung, insbesondere aber die von den Ställen, der Dunglagerung und der Dungverteilung ausgehenden Geruchsstoffemissionen im Vordergrund.

Eine beträchtliche Zahl gerichtlicher Auseinandersetzungen beweist, daß die Geruchsfragen für den Nutztierhalter, insbesondere den Halter von Schweinen und Hühnern, starke wirtschaftliche Bedeutung haben, ja existenzentscheidend sein können (4). Es ist auch noch mit einer Zunahme ihrer Bedeutung zu rechnen.

Die Geruchsstoffemissionen des Stalles stammen vom Tier selbst und von der Zersetzung der im Stall befindlichen Exkrememente und Futterreste. Die Emissionen aus der Dunglagerung und -verteilung haben allein den Mist zum Ursprung. Der Übergang vom Festmist- zum Flüssigmistverfahren, der aus arbeitswirtschaftlichen Gründen in der Rinder- und Schweineproduktion noch weiter voranschreiten wird, verschärft das Geruchsproblem, obwohl auch das Festmistverfahren unter heutigen Gesichtspunkten von ihm frei ist.

+) Dipl.-Ing. Dr. Rudolf Thaer war bis zum Eintritt in den Ruhestand wissenschaftlicher Mitarbeiter des Instituts für Landmaschinenforschung (Dir.: Prof. Dr.-Ing. W. Baader) der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig-Völkenrode.

Tabelle 3: In der Bundesrepublik Deutschland im Jahr 1975 erzielte Mengen ausgewählter pflanzlicher Produkte und deren Reststoffe (146)

Produkte	Produktmenge 1000 t pro Jahr	Reststoffmenge			
		angefallen Stroh Blatt 1000 t pro Jahr		davon verfüttert Stroh Blatt 1000 t pro Jahr	
Weizen	7 014	11 433	}	3 830	
Roggen	2 125	3 974			
Gerste	6 971	8 853			
S. Menggetr.	1 067	1 440			
Hafer	3 445	5 030			
K.-Mais	531	797			
Kartoffeln	10 853		4 341		
Z.-Rüben	18 203		13 652		8 990
F.-Rüben	23 051		6 224		4 050

Die durch Umweltschutzaufgaben bestimmten Behandlungsziele lassen sich sowohl mit aeroben als auch mit anaeroben Verfahren erreichen. Entscheidend für die Wahl des Verfahrens sind in dieser Hinsicht die

Investitions- und Betriebskosten,
Betriebssicherheit,
Anforderungen an Bedienung und Wartung, und die
Wertschöpfung aus den Produkten.

Geht man von flüssigen Substraten aus, dann bietet das anaerobe Verfahren hinsichtlich der Betriebskosten den Vorteil, daß der Energiebedarf für die einzelnen Verfahrensschritte (z.B. Heizen) über das gewonnene Gas gedeckt werden kann und - bei entsprechender Prozeßführung - eine zusätzliche Kostenentlastung durch Verwertung des Überschußgases möglich ist. Ein weiterer Vorteil der anaeroben Fermentation ist in der Erhaltung des für die Pflanzenernährung wichtigen Stickstoffgehaltes des Substrates zu sehen (bei aerober Fermentation müssen Stickstoffverluste bis zu 40 % in Kauf genommen werden).

Für den landwirtschaftlichen Betrieb stellt das anaerobe Verfahren somit eine Alternative zur aeroben Behandlung dar, die mit verhältnismäßig geringen Energiekosten und niedrigen Wertstoffverlusten verbunden ist.

In welchem Umfang und mit welchem Aufwand bei diesem Verfahren aus dem Überschußgas zusätzlich noch Nutzenergie für den landwirtschaftlichen Betrieb oder sogar für betriebsexterne Verbraucher bereitgestellt werden kann, hängt von einer Vielzahl von verfahrenstechnischen, betriebstechnischen und betriebswirtschaftlichen Faktoren ab.

T e i l I

VERFAHRENSTECHNIK DER METHANGÄRUNG

W. Baader

1. Grundlagen

1.1 Prozeßmerkmale

1.1.1 Biochemische Umwandlungsprozesse (15, 17, 18, 58, 60, 91)

Bei der anaeroben Fermentation organischer Stoffe werden in einer ersten Prozeßstufe zunächst die hochmolekularen Verbindungen (Kohlenhydrate, Fette, Eiweißstoffe) durch eine biochemische Spaltung (Hydrolyse) in niedermolekulare organische Verbindungen abgebaut. In einer zweiten Stufe vollziehen säurebildende Bakterien den weiteren Abbau zu organischen Säuren und deren Salzen sowie zu Alkoholen, CO_2 und H_2 , ferner H_2S und NH_3 . In einer dritten Prozeßstufe (Methan-Gärung) erfolgt schließlich die bakterielle Umwandlung der organischen Stoffe zu CO_2 und CH_4 . Aus CO_2 und H_2 bilden sich ferner weitere Mengen CH_4 sowie H_2O .

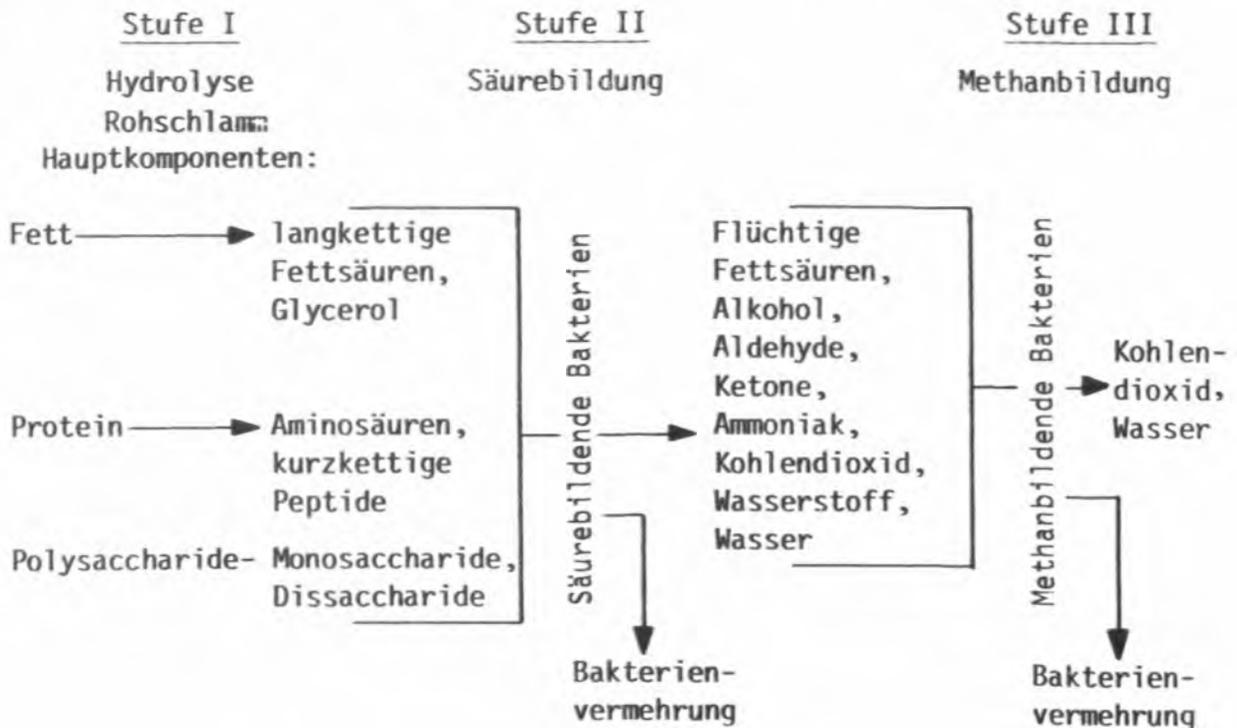


Abb. 1: Prozeßstufen der anaeroben Fermentation (44)

Diese Reaktionen verlaufen simultan ab, wobei die methanbildenden Bakterien im Vergleich zu den Säurebildnern wesentlich höhere Anforderungen an die Lebensbedingungen stellen. So verlangen sie insbesondere ein absolut anaerobes Milieu. Die Methanbakterien weisen ferner eine längere Reproduktionszeit auf als die säurebildenden Bakterien, weshalb die Geschwindigkeit und der Umfang der anaeroben Gärung von der Stoffwechsellleistung der Methanbakterien abhängen.

1.1.2 Einflußfaktoren

Temperatur (16, 19, 22, 27, 63, 91, 125)

Die Stoffwechsellleistung und die Reproduktionsrate von Mikroorganismen sind eine Funktion der Temperatur. Demzufolge beeinflußt die Temperatur die aus einer bestimmten Menge organischer Substanz insgesamt erzeugbare und die in einer vorgegebenen Zeit erzeugte Gasmenge sowie die technische Faulzeit, bei der ein bestimmter Anteil der bei der betreffenden Temperatur jeweils erzeugbaren Gasmenge freigesetzt ist (Abb. 2).

Zahlreiche ältere Arbeiten nennen zwei Temperaturbereiche (um 33⁰ C bzw. um 54⁰ C) mit Höchstwerten für die Stoffumsatzleistung. Die Unstetigkeit im Funktionsverlauf wird auf einen Wechsel des Bakterienstammes von mesophilen zu thermophilen Organismen zurückgeführt. Nach neueren Erkenntnissen besteht eine solche Unstetigkeit jedoch nicht, das heißt, die Bedingungen für die Gasgewinnung werden mit steigender Temperatur bis in den Bereich um 54⁰ C besser (62).

Die mikrobielle Aktivität kommt nahezu zum Erliegen, wenn die Temperatur unter etwa 15⁰ C abfällt. Auf Temperaturschwankungen, insbesondere auf plötzlichen Temperaturabfall, reagieren die Organismen sehr empfindlich mit geringerer Stoffwechsellleistung und Reproduktionsrate.

Die Temperatur wirkt sich ferner auf die Gasqualität aus. So wurde bei steigender Temperatur eine Abnahme des CH₄-Gehaltes festgestellt (Abb. 3).

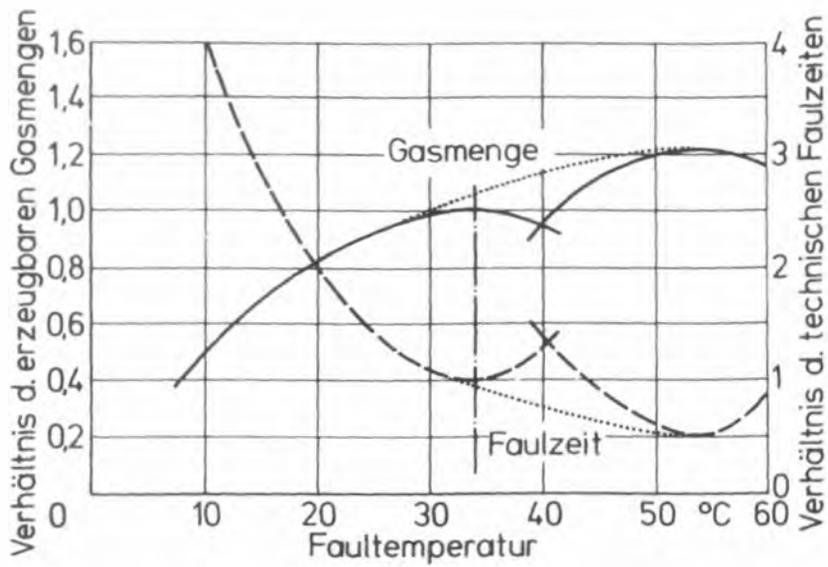


Abb. 2: Verhältnis der bei verschiedenen Faulraumtemperaturen erzeugbaren Gasmengen und dabei erforderlichen Faulzeiten zu den entsprechenden Werten bei 33° C

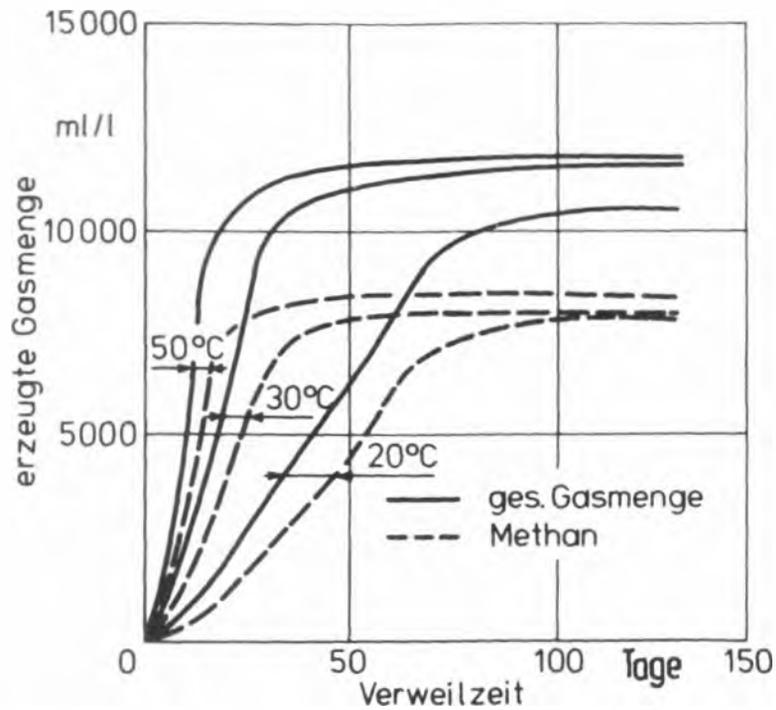


Abb. 3: Einfluß der Faultemperatur und der Verweilzeit auf Menge und Zusammensetzung des erzeugten Gases (63)

Säuregehalt, pH-Wert, Puffervermögen (Alkalität) (50, 54, 58, 71)

Da die Methanbakterien eine geringere Stoffwechselleistung und Reproduktionsrate aufweisen als die säurebildenden Bakterien, kann bei Steigerung des Angebotes an organischer Substanz ein Überschuß an flüchtigen Säuren entstehen, der die Aktivität der Methanbakterien hemmt, sobald der pH-Wert unter 6,5 abfällt. Normalerweise wird der pH-Wert bei schwankendem Säureanfall durch das Puffervermögen des Substrates stabil gehalten. Die Pufferung ergibt sich durch Bildung von Karbonaten über das bei der Fermentation freigesetzte CO_2 . Als optimale Bereiche gelten für

Alkalität:	1500 - 5000 mg CaCO_3 /l
pH-Wert:	6,5 - 7,5
flüchtige Säuren:	600 - 1500 mg/l

Zeichen für einen gestörten Ablauf der anaeroben Fermentation sind

- fallende Alkalität (gemessen in mg CaCO_3 /l Substrat),
- fallender pH-Wert,
- zunehmender Gehalt an flüchtigen Säuren,
- zunehmender Gehalt an CO_2 im Gas,
- abnehmende Gasfreisetzung.

Hemmstoffe (45, 58, 59, 64, 66, 69, 71, 134)

Zu den Stoffen, die bei zu hoher Konzentration die Lebenstätigkeit der Mikroorganismen hemmen, zählen insbesondere

- Schwermetalle und ihre Salze,
- Alkalimetalle,
- Erdalkalimetalle,
- Ammoniak,
- Nitrat,
- Sulfid,
- Detergentien,
- organische Lösungsmittel,
- Antibiotika.

Tabelle 4 zeigt für einige Stoffe die Konzentration, die zu einer wesentlichen Hemmung der Methanproduktion führt. Für Detergentien, organische Lösungsmittel und Antibiotika liegen keine genauen Angaben über kritische Konzentrationen vor. Es wird jedoch darauf hingewiesen, daß diese Stoffe bereits bei geringsten Mengen die Fermentation stören.

Tabelle 4: Grenzkonzentration von Hemmstoffen

Stoffart	Konzentration (mg/l)	Quelle
Kupfer	10	(69)
Calcium	8 000	(66)
Natrium		
Kalium		
Magnesium		
Ammoniak	1 500	(45)
Sulfid	200 (als S)	(66)
Nitrat	50	(59)

weitere Angaben in (134), S. 26 und S. 71

Nährstoffe (17, 65, 86, 91)

Eine ungehinderte Reproduktion der Bakterien setzt ein Nährstoffspektrum voraus, das sowohl Kohlenstoff und Sauerstoff zur Energieversorgung, Wasserstoff, Stickstoff, Schwefel und Phosphor zur Eiweißbildung sowie Alkalimetalle, Eisen und Spurenelemente enthält.

Das Verhältnis von Kohlenstoff zu Stickstoff bestimmt dabei im wesentlichen die mikrobielle Reaktion. Günstige Bedingungen liegen vor für

$$C/N = 10 - 16.$$

Überwiegen im Ausgangssubstrat die Kohlenhydrate gegenüber den Eiweißstoffen, so wird wenig Ammonium-N gebildet. Dadurch wird weniger CH_4 und mehr H_2 und CO_2 gebildet, was zur Anreicherung von Säuren, zur Abnahme des pH-Wertes und hierdurch zur weiteren Abnahme der CH_4 -Gärung führt. Andererseits verursacht ein Überangebot von Eiweiß und Aminosäuren ein Ansteigen des pH-Wertes über 8, wodurch die CH_4 -Produktion ebenfalls zum Erliegen kommt.

Gaszusammensetzung (17, 65, 86, 91)

Die Menge und die Zusammensetzung des bei vollständiger Zersetzung der organischen Substanz erzeugten Gases hängt vom Verhältnis C : H : O : N in den abzubauenen Grundstoffen und von der Faultemperatur ab. Von den wesentlichen Gruppen organischer Stoffe liefern

- Fette das meiste Gas mit hohem CH₄-Gehalt,
- Eiweißstoffe geringere Gasmengen mit ebenso hohem CH₄-Gehalt und
- Kohlenhydrate verhältnismäßig wenig Gas mit dem geringsten CH₄-Gehalt.

Der Mittelwert der bei optimaler Faultemperatur um 34⁰ C erreichbaren Gaszusammensetzung liegt für tierische Exkremente bei

$$\text{CH}_4/\text{CO}_2 = 2$$

Feststoffgehalt (45, 58, 124, 143)

Ein ungehinderter Stoffaustausch an den Phasen-Grenzflächen ist die Voraussetzung für eine hohe Reaktionsleistung, die durch eine ständige Grenzflächenerneuerung durch Rühren des Substrates erfüllt werden muß. Dies ist jedoch nur gewährleistet, wenn die Viskosität des Substrates eine freie Beweglichkeit zwischen Flüssigkeit, suspendierten Feststoffen, insbesondere Bakterien, und Gasblasen zuläßt. Die obere Grenze des Feststoffgehalts, bei dem noch eine einwandfreie Phasenbewegung gewährleistet ist, liegt für Substrate mit feinsuspendierten Feststoffen bei 10 - 12 %. Bei höheren Werten wird die Gasproduktion mehr und mehr eingeschränkt. Durch intensives Mischen mit entsprechendem Energieaufwand kann diesem Nachteil begrenzt entgegengewirkt werden.

1.2 Stoffliche Voraussetzungen und Gasausbeute

1.2.1 Stoffzusammensetzung

Unter den landwirtschaftlichen Rest- und Abfallstoffen enthalten tierische Exkremente die für die Methanfermentation notwendigen Nährstoffe. Sie weisen allerdings ein sehr weitgefächertes Stoffartenspektrum (Abb. 4) und auch große Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung auf, je nachdem, um welche Tierart es sich handelt und welches Futter verabreicht wurde (Tab. 5). Die Abgänge aus Tierhaltungen können zusätzlich, je nach Halteform, sehr unterschiedliche Mengen an Wasser, Einstreumaterial und Futterresten enthalten.

Abbaugeschwindigkeit im Fermentationsprozeß			
Herkunft	schnell ←	→	langsam
Nahrung	Stärke, Zucker	Zellulose	Lignin
	Glykogen	Hemizellulose	(verholztes Material)
	Fettsäuren	Pentosane	
	Eiweiß, Peptide	Pektin	Ligninkrustierte
	Aminosäuren	Chitin	Zellulose (Stroh)
	Vitamine	Fette	Keratin (Haare)
	Antibiotika	Öle	Kutin
			Suberin (Korkstoff)
			Wachse
Tierkörper	Schleim, Blut		
	Körperzellen		
	Fermente	Gallensäuren	Gallenfarbstoffe
	Hormone		
Mikroflora	Biomasse		
Zwischen-, End- und chemosyntheti- sche Folgeprodukte des tierischen und mikrobiellen Stoff- umsatzes	org. Säuren	Indol	Ligno-Protein- Komplexe
	Alkohol	Skatol	
		Phenole	Huminstoffe
		Polysaccharide	

Tabelle 5: Zusammensetzung (in % der Trockenmasse) tierischer Exkremente (13, 58, 98, 129)

Inhaltsstoffe	Mastrindern	Exkremente von		Hühnern
		Milchkühen	Schweinen	
org. Masse	77 - 85	77 - 85	77 - 84	76 - 77
Stickstoff	2,3-4,0	1,9-6,5	4,0-10,3	2,3-5,7
Phosphor	0,4-1,1	0,2-0,7	1,9-2,5	1,0-2,7
Kalium	1,0-2,0	2,4	1,4-3,1	1,0-2,9
Calcium	0,6-1,4	2,3-4,9		5,6-11,6
Magnesium	0,5-0,6			0,9-1,1
C/N-Verhältnis	9-15	9-15	9-15	9-15
Rohfaser (Zell.)		27,6-50,3	19,5-21,0	13,0-17,8
Rohfett		2,9- 4,3	3,5- 4,0	2,4- 5,0
Rohprotein		9,3-20,7	16,4-21,5	20,5-42,1
Lignin	16-30	16-30		9,6-14,3

Enthält das dem Gärprozeß zugeführte Substrat außer den Stallabgängen noch weitere pflanzliche Reststoffe, so muß deren Zusammensetzung besonders berücksichtigt werden (Tab. 6). Hierbei ist vor allem auf den unter Umständen hohen Gehalt dieser Reststoffe an Lignin zu achten, das mikrobiell so gut wie nicht abgebaut werden kann und somit nicht zur Gasproduktion beiträgt. Aus diesem Grunde ist die Gasausbeute aus Exkrementen von Wiederkäuern, die ein an Rohfaser reiches Futter benötigen, geringer als aus Exkrementen von Hühnern und Schweinen. Durch Aufschließen der Ligninkomplexe mit mechanischen, chemischen oder thermischen Verfahren können diese Stoffkomponenten zwar der biochemischen Zersetzung zugänglich gemacht werden, doch ist der damit verbundene Aufwand im landwirtschaftlichen Bereich nicht zu vertreten (45).

Zur Vergärung pflanzlicher Stoffe mit hohem Gehalt an abbaubaren C-Verbindungen ist die Zugabe N-reicher Stoffe, z.B. Hühner- oder Schweinemist erforderlich, um das C/N-Verhältnis auf den für einen störungsfreien Prozeß notwendigen Bereich einzustellen.

Tabelle 6: Zusammensetzung (in % der Trockenmasse) von Getreidestroh, Zuckerrübenblatt mit Köpfen und grünem Kartoffelkraut (76, 98, 120)

Inhaltsstoffe	Gersten- stroh	Weizen- stroh	Roggen- stroh	Hafer- stroh	Mais- stroh	Rübenblatt	Kartoffelkraut
organ. Masse	93,8	94,4	95,4	93,0	91,7	78,5	78,9
Stickstoff	0,56	0,46	0,46	0,54	1,20	2,00	2,34
Phosphor	0,08	0,09	0,12	0,19	0,16	0,26	0,20
Kalium	1,40	0,79	0,88	1,92	2,32	3,57	1,67
Calcium	0,29	0,14	0,19	0,29	0,69	1,40	2,57
Magnesium	0,10	0,07	0,05	0,09	0,30	0,60	0,83
C/N-Verhältnis	84	90-165	80-150	70-150	30-65	18	17
Rohfaser (Zell.)	43,5	45,5	47,5	44,5	33,3	11,5	23,8
Rohfett	1,7	1,6	1,5	1,9	1,7	1,5	3,2
Rohprotein	3,5	2,9	2,9	3,4	7,5	12,5	14,6
Lignin	15-20	15-20	15-20	15-20	5,5	-	-

1.2.2 Teilchengröße der Feststoffe (89, 116, 124)

Ein guter Stoffaustausch und damit eine hohe Reaktionsgeschwindigkeit des biochemischen Umsetzungsprozesses ist zu erzielen, wenn die Grenzflächen zwischen fester und flüssiger Phase möglichst groß gehalten und ständig erneuert werden.

Feste, insbesondere pflanzliche Stoffe, müssen daher mit Schneid- oder Reiß- beziehungsweise Quetscheinrichtungen aufbereitet werden, um kleinere Teilchengrößen und einen weitgehenden mechanischen Aufschluß der Halm- und Stengelteile zu erzielen. Der Anteil der in der Flüssigkeit suspendierten Feststoffe wird im wesentlichen von den technischen Mitteln bestimmt, die zur Erzielung einer einwandfreien Durchmischung, Entgasung und hydraulischen Förderung des Substrates eingesetzt werden. Nach dem heutigen Stand der Technik können in landwirtschaftlichen Biogasanlagen Substrate mit Feststoffgehalten bis etwa 12 % verarbeitet werden, sofern die Teilchenlänge der faserigen und halmartigen Feststoffe nicht mehr als 30 mm beträgt.

Grundsätzlich lassen sich organische Stoffe auch in fester Phase vergären, sofern ausreichende Feuchte vorhanden ist. Da jedoch die Umverteilung und innige Vermischung von Bakterien und Substrat sowie eine ausreichende Entgasung in der festen Phase nicht sichergestellt werden können, hat die technische Vergärung fester Stoffgemenge praktisch keine Bedeutung erlangt.

Feststoffe, deren Dichte von der der Flüssigkeit wesentlich abweicht, verursachen Sedimentation oder Schwimmdeckenbildung, die durch Flotation begünstigt wird; mechanisch-hydraulische Probleme und Behinderung der Gasentwicklung können die Folge sein, zu deren Vermeidung höherer technischer Aufwand und Energieeinsatz erforderlich sind. Diese Schwierigkeiten lassen sich umgehen, wenn diese Stoffe dem Substrat vor Eingabe in den Reaktor mit einer mechanischen Trenneinrichtung entzogen werden (53). Allerdings führt dies zu einer entsprechend geringeren Gasausbeute.

1.2.3 Maximale Gasausbeute

Über die aus den verschiedenen landwirtschaftlichen Rest- und Abfallstoffen und deren Gemenge unter optimalen Prozeßbedingungen freisetzbaren Gasemengen liegen aufgrund der Vielfalt in der stofflichen Zusammensetzung sehr unterschiedliche Angaben vor. Somit können allgemeingültige Zahlen hierüber nicht genannt werden.

Bezieht man die bei einer Faultemperatur von etwa 32⁰ C erzielbare Gasausbeute auf die abgebaute organische Masse, so liegen die Werte in einem Bereich von

$$V_G \text{ ges.} = 0,8 - 1,0 \text{ m}^3/\text{kg abgeb. org. Substanz.}$$

Dagegen werden je Einheit eingebrachter Masse organischer Substanz Werte für die freigesetzten Gesamtgas Mengen im Bereich von

$$V_G \text{ ges.} = 0,4 - 0,6 \text{ m}^3 / \text{kg eingebr. org. Substanz}$$

genannt. Somit werden, abhängig vom Anteil abbaubarer organischer Substanz, nur 40 - 50 % der dem Reaktor zugeführten organischen Masse abgebaut.

Das Verhältnis der Gas Mengen, die aus der organischen Substanz von Flüssigmist der Tierarten Milchkühe (K), Mastrinder (R), Schweine (S) und Hühner (H) bei Faulung mit 33° C erreichbar sind, kann in grober Schätzung mit

$$K : R : S : H = 5 : 7 : 8 : 10$$

angenommen werden (18).

Für die Freisetzung der Gesamtgasmenge werden bei den einzelnen Stoffgruppen spezifische Faulzeiten benötigt, wobei die Gasproduktion je Zeiteinheit mit fortschreitender Faulzeit zunächst stark ansteigt und nach einem Maximum allmählich wieder abnimmt. Die sich hieraus ergebenden Summenkurven sind für typische Stoffarten in Abbildung 5 dargestellt. Hieraus ist auch zu erkennen, daß Gras mit einem hohen Gehalt an Eiweißstoffen eine hohe Reaktionsgeschwindigkeit und große Gasausbeute aufweist, Stroh und Rinderkot dagegen wegen des hohen Ligningehaltes wesentlich langsamer reagieren und weniger Gas freisetzen (89). Dies wird auch aus den in Tabelle 7 zusammengestellten Werten über erzielbare Gas Mengen und die zur vollständigen Ausfäulung erforderlichen Faulzeiten für typische landwirtschaftliche Stoffe deutlich.

Auf die Erhöhung der Gasausbeute durch Steigerung der Prozeßtemperatur (bis 54° C) wurde bereits hingewiesen.

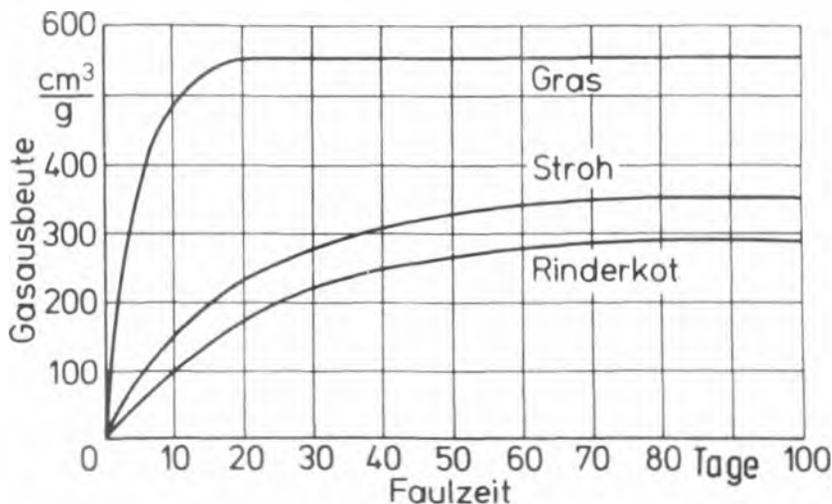


Abb. 5: Gasausbeute je Gramm organischer Trockensubstanz bei 30° C Faulraumtemperatur für typische Stoffe aus der Landwirtschaft (89)

Tabelle 7: Gasmengen und Faulzeiten für landwirtschaftliche Stoffe bei 30⁰ C Faulraumtemperatur (89)

Faulgut	bei vollständiger Ausfäulung			Gehalt CH ₄ %	Gasmenge in % der Gesamtmenge nach Faulzeit von Tagen		
	Gasmenge bezogen auf Gesamt- Trockenmasse	organische cm ³ /g	Faulzeit in Tagen		10	15	20
	cm ³ /g	cm ³ /g					
Rinderkot	237	315	117	80	24	36	48
Schweinekot	257	415	115	81	40	57	68
Stroh 30 mm lg.	357	383	123	80	29	38	45
Stroh 2 mm lg.	393	423	80	81	51	67	77
Kartoffelkraut	526	606	53	75	85	90	92
Z.-Rübenblätter	456	501	14	85	99	100	100
Gras	490	557	24	84	87	96	99

1.3 Verfahrensmerkmale

Die tatsächlich in einer technischen Anlage erzielbare Gasmenge hängt von zahlreichen Faktoren ab, deren Einfluß, je nach Anlagenausführung und Betriebsbedingungen, sehr unterschiedlich sein kann. Von wesentlicher Bedeutung sind zusätzlich zu den bereits unter Abschnitt 2.1.2 genannten Einflußfaktoren

- die Raumbelastung (= je Zeit- und Nettovolumeneinheit dem Reaktor zugeführte organische Masse),
- die technische Faulzeit (= Verweilzeit der eingebrachten organischen Masse im Reaktionsbereich),
- die Mischintensität.

1.3.1 Raumbelastung

Bei einem kontinuierlich oder quasikontinuierlich betriebenen Fermentationsprozeß (siehe Abschnitt 3.1) wird dann die höchste Abbauleistung erzielt, wenn die Menge organischer Substanz, die in der Zeiteinheit dem im Reaktor bereits befindlichen Substrat zugeführt wird, der jeweils abgebauten Menge organischer Substanz entspricht. Höhere Zugaben führen zum Abgang weniger abgebauten Substrats und damit zu einer geringeren Gasausbeute (126); geringere Zugaben bedeuten eine schlechte Ausnutzung des vorhandenen Reaktorvolumens.

Werden diskontinuierlich betriebene Faulbehälter (siehe Abschnitt 3.1) zu schnell befüllt, dann entsteht ebenfalls ein Mißverhältnis zwischen der vorhandenen Menge aktiver Bakterien und der Menge der angebotenen Nährstoffe, wodurch die Umsetzung ebenfalls nicht optimal ablaufen kann und entsprechend weniger Gas je Zeit- und Masseinheit organischer Substanz freigesetzt wird. Nach den bisher vorliegenden Erfahrungen können - gute Durchmischung und geringe Viskosität des Reaktorinhaltes vorausgesetzt - aus den Exkrementen der verschiedenen Nutztierarten höchste Gasausbeuten mit Raumbelastungen erzielt werden, wie sie in Tabelle 8 aufgeführt sind.

Tabelle 8: Raumbelastung, Verweilzeit und Abbau der organischen Substanz bei Faultemperaturen um 33° C (111)

Exkremente der Tierart	Raumbelastung kg(o.S.)/m ³ -Tag	Verweilzeit in Tagen	Abbaugrad %
Milchkühe	6,0	15	40
Mastrinder	4,5	10	40
Schweine	3,0	10	50
Legehühner	1,5	50	55

Die Tabellenwerte zeigen, daß die Raumbelastung um so niedriger angesetzt werden muß, je höher der Anteil abbaubarer Stoffe in der eingebrachten organischen Substanz sowie der Gehalt an Ammoniak im Zulauf (bei Hühnermist) ist.

1.3.2 Technische Faulzeit (Verweilzeit) (89, 100)

Der Zeitbedarf für die völlige Ausfäulung ist in der Regel sehr groß, was zu entsprechend großen Faulbehältern führen würde. Die Verweilzeit wird daher aus wirtschaftlichen Gründen unter Verzicht auf die noch zu gewinnende restliche Gasmenge kürzer gewählt.

Die Wahl der Verweilzeit hängt einerseits von der Reaktionsgeschwindigkeit ab, die für das jeweils vorliegende Faulgut typisch ist (Tab. 7 und Abb. 5), andererseits von dem angestrebten Ausfäulungsgrad, der die Gasausbeute und die Geruchsminderung für den Faulschlamm bestimmt. Ferner ist zu berücksichtigen, daß mit der Faulzeit der CH_4 -Gehalt zunimmt - bei gleichzeitiger Abnahme des CO_2 -Gehaltes -, das heißt, die Gasqualität besser wird (Abb. 3 und Abb. 6).

Auch für die Verweilzeit lassen sich somit keine allgemeingültigen Werte nennen. Orientierungsdaten sind in Tabelle 8 aufgeführt (111). Die lange Verweilzeit bei Hühnerexkrementen ergibt sich aus dem verhältnismäßig hohen Gehalt an Ammoniak. Die Werte der Tabelle 8 gelten allerdings nur für gut durchmischte Substrate in Reaktoren, die nach dem Durchflußsystem (siehe Abschnitt 3.1) betrieben werden. Für absätzigen Betrieb müssen nach bisherigen Erfahrungen um etwa 20 - 25 % längere Faulzeiten angesetzt werden.

1.3.3 Mischintensität

Durch intensives Mischen des Reaktorinhalts wird der Kontakt der Bakterien mit dem Substrat über eine ständige Umorientierung und Erneuerung der Phasengrenzflächen erreicht und das Ansammeln von Zwischen- und Endprodukten des Abbauprozesses verhindert. Außer der Erfüllung dieser Grundvoraussetzung für eine hohe Reaktionsgeschwindigkeit dient diese Maßnahme der gleichmäßigen Verteilung der Nährstoffe im Reaktorvolumen. Sie wirkt damit auch der Sedi-ment- und Schwimmdeckenbildung entgegen und stellt einen ungestörten homogenen Massenfluß durch den Reaktor sicher.

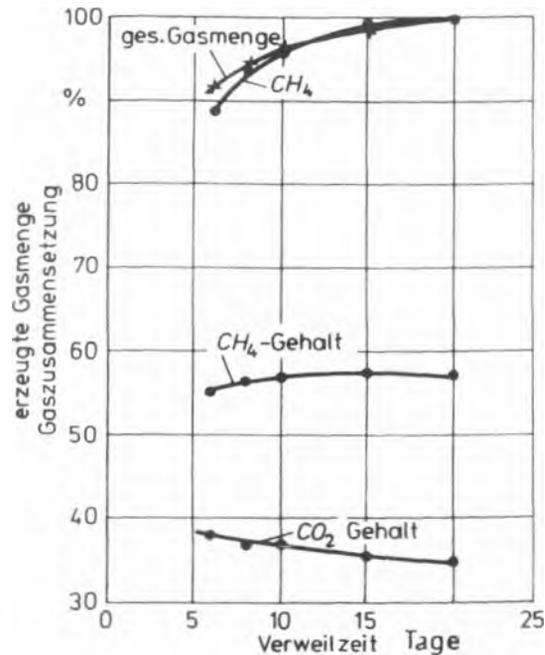


Abb. 6: Menge (obere Kurve) und Zusammensetzung des erzeugten Gases (100)

2. Produkte

2.1 Gas

2.1.1 Zusammensetzung

Wie bereits in den vorausgehenden Abschnitten dargelegt, sind die Hauptbestandteile von Biogas CH_4 und CO_2 , deren Anteile von der Zusammensetzung des Ausgangssubstrats und der Prozeßführung (Temperatur, Verweilzeit, Raumbelastung) abhängen. Neben diesen beiden wichtigsten Gaskomponenten enthält Biogas geringe Mengen an H_2 und H_2S (Tab. 9) und auch N_2 .

2.1.2 Eigenschaften

Die in Tabelle 9 aufgeführten physikalischen Eigenschaften der Komponenten und des Gemisches lassen auf die Nutzungsmöglichkeiten des Gases und auf die bei dessen Handhabung zu treffenden Maßnahmen schließen. Der Heizwert (H_u) richtet sich im wesentlichen nach dem CH_4 -Anteil, da sich die geringen Mengen an H_2 und H_2S praktisch nicht auswirken. Entsprechend hängen die Zündtemperaturen und die Zündgrenze vom CH_4 -Gehalt ab. Für die Verflüssigung des Gasgemisches müssen der kritische Druck und die kritische Temperatur der Einzelkomponenten beachtet werden (Tab. 9). Die Werte zeigen, daß eine Verflüssigung von Biogas praktisch nicht sinnvoll ist.

Beim Umgang mit Biogas ist auf die Dichteunterschiede zwischen den Komponenten zu achten. In begehbaren, nicht entlüfteten Räumen können diese zu einer für den Menschen gefährlichen Ansammlung von CO₂ und H₂S in unteren Schichten führen. Ein weiteres Unfallrisiko stellt die Explosionsgefahr bei CH₄-Ansammlung dar.

Tabelle 9: Zusammensetzung und Eigenschaften von Biogas
(23, 45, 58, 140)

Eigenschaft	Bestandteile				Gemisch (60 % CH ₄ /40 % CO ₂)
	CH ₄	CO ₂	H ₂	H ₂ S	
Vol.-Anteil %	55-70	27-44	< 1	< 3	100
Heizwert MJ/m ³	35,8	-	10,8	22,8	21,5
Zündgrenze					
Vol. % in Luft	5-15	-	4-80	4-45	6-12
Zündtemperatur °C	650-750	-	585	-	650-750
krit. Druck bar	47	75	13	89	75-89
krit.Temp. °C	-82,5	31,0	-	100,0	-82,5
Dichte normal g/l	0,72	1,98	0,09	1,54	1,2
krit. g/l	162	468	31	349	320
Dichteverhältnis zu Luft	0,55	2,5	0,07	1,2	0,83

2.2 Faulschlamm

2.2.1 Zusammensetzung (99, 101, 123)

Während des Faulprozesses reichert sich Ammoniak aus organischen Stickstoffverbindungen an und macht zusammen mit den schon im Zulauf vorhandenen P- und K-Verbindungen und den durch Substanzabbau verfügbar werdenden Nährstoffen den Gärrückstand zu einem nährstoffreichen organischen Dünger. Ferner vermindert sich, je nach Ausfaulungsgrad, der Kohlenstoffgehalt gegenüber dem Ausgangssubstrat. Die hierdurch verursachte Verringerung des C/N-Verhältnisses wirkt sich bei der Düngung ebenfalls günstig aus.

2.2.2 Umweltbelastung

Geruch (126, 130)

Sofern der Ausfäulungsgrad, das heißt, der Abbau der organischen Substanz, im Bereich von 30 - 40 % liegt und somit die Zersetzung der biologisch instabilen organischen Verbindungen im wesentlichen vollzogen ist, hat der Faulschlamm den belästigenden Geruch des Rohsubstrates verloren.

Krankheitserreger (2, 62, 75, 85, 115)

Die Hygienisierungswirkung der anaeroben Fermentation erfolgt in erster Linie durch Wärme-Einwirkung während einer bestimmten Zeitspanne. Für die einzelnen Erreger ist jeweils eine bestimmte Mindesttemperatur und Mindestverweilzeit unter dieser Temperatur zum Erreichen einer Abtötungswirkung erforderlich. In diskontinuierlich betriebenen Anlagen müssen bei Faulraumtemperaturen um 30° C Verweilzeiten von über 30 Tagen vorliegen, um eine weitgehende Abtötung von vegetativen Formen bakterieller Infektionserreger zu erreichen. Eine stärkere Wirkung in kürzeren Verweilzeiten zwischen 12 und 20 Tagen stellt sich erst bei Faulraumtemperaturen über 50° C ein. Eine absolut sichere Hygienisierung ist jedoch in keinem Fall zu erwarten, da immer das Risiko besteht, daß Keime in geringsten Mengen überleben und hierdurch dann eine Reinfektion stattfindet. Über das Verhalten von Viren bei diesem Prozeß liegen noch keine Angaben vor.

In kontinuierlich und quasikontinuierlich betriebenen Anlagen besteht das Risiko, daß geringe Teilmengen des Substrates nach kürzerer Zeit als der theoretisch vorgegebenen hydraulischen Verweilzeit den Reaktionsraum verlassen. Es besteht somit die Gefahr, daß pathogene Organismen nicht der für die Abtötung erforderlichen Wärme-Einwirkung unterliegen.

Auch in Faulanlagen nach dem Durchflußsystem ist es nach derzeitigen Erkenntnissen nicht möglich, sämtliche mit dem Flüssigmist eingebrachten Krankheitserreger abzutöten.

3. Verfahrensgestaltung

3.1 Betriebssysteme (Abb. 7)

Beim Durchflußsystem (kontinuierlicher beziehungsweise quasikontinuierlicher Betrieb) wird das Substrat dem Reaktor fortwährend oder in kurzen Zeitabständen (z.B. täglich) zugeführt und ein entsprechendes Volumen Faulschlamm abgezogen (Abb. 7 a und 8). Das stets konstante Füllvolumen ist auf die vorgegebene hydraulische Verweilzeit ausgelegt. Konstante Betriebsbedingungen hinsichtlich Massestrom, Feststoffkonzentration und Raumbelastung, das heißt, Konzentration der abbaubaren organischen Substanz beim Zulauf,

optimale Faultemperatur und gleichmäßige Vermischung vorausgesetzt, ermöglicht diese Betriebsart die höchste Gasausbeute bei konstantem Gasstrom.

Das Wechselbehältersystem (103, 116, 124) ist durch den diskontinuierlichen Betrieb von mindestens zwei gleich großen und gleichartig gestalteten Gärbehältern gekennzeichnet (Abb. 7 b und 9). Durch beispielsweise tägliche Zugaben frischen Substrats werden die Behälter, ausgehend von einer Restschlammmenge (Impfslamm), im Wechsel allmählich gefüllt und nach einer vorgegebenen Faulzeit (Verweilzeit) bis auf die Restschlammmenge entleert. Da bei konstanter Zulaufmenge die Raumbelastung, ausgehend von einem auf die anfangs vorhandene Restschlammmenge abgestimmten Optimalwert, während des Füllvorganges ständig abnimmt, wird die Leistungsfähigkeit des Systems nicht voll genutzt. Berücksichtigt man ferner das während der Füllzeit leere Behältervolumen, so erfordert dieses System einen größeren Volumenbedarf als das Durchflußsystem; nach amerikanischen Untersuchungen ist er etwa doppelt so hoch (45).

Ein weiteres Merkmal des Wechselbehältersystems ist der Zwang zu einem Gaspeicher mit einem ständig verfügbaren Gasvorrat, der ausreicht, um das beim Entleeren eines Faulraumes freiwerdende Behältervolumen auszufüllen und so das Eindringen von Luft zu verhindern.

Das Speichersystem (131) kommt mit nur einem Flüssigkeitsbehälter aus (Abb. 7 c). Dieser übernimmt die Aufgabe des Gärbehälters und speichert den Faulschlamm bis zu dessen Ausbringung auf das Feld. Er wird dann nicht völlig entleert; der Restschlamm dient zur Impfung der neuen Füllung. Bei ständigem Zulauf von frischem Substrat nimmt die jeweils verfügbare Faulzeit stetig ab. Somit wird das Gaspotential des gespeicherten Faulgutes nicht völlig ausgeschöpft.

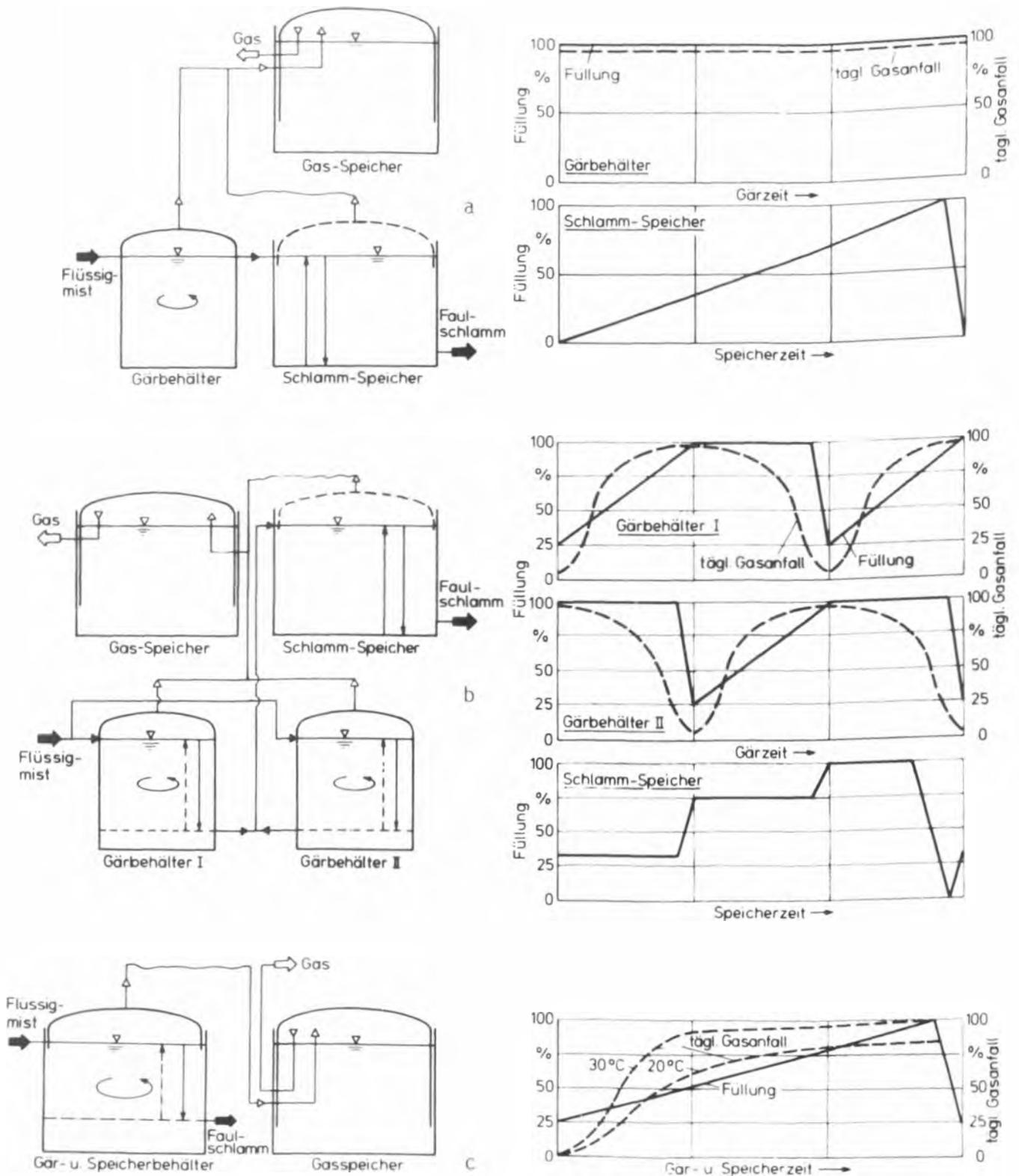


Abb. 7: Betriebssysteme von Biogasanlagen (8)

- a Durchflußsystem
- b Wechselbehältersystem
- c Speichersystem

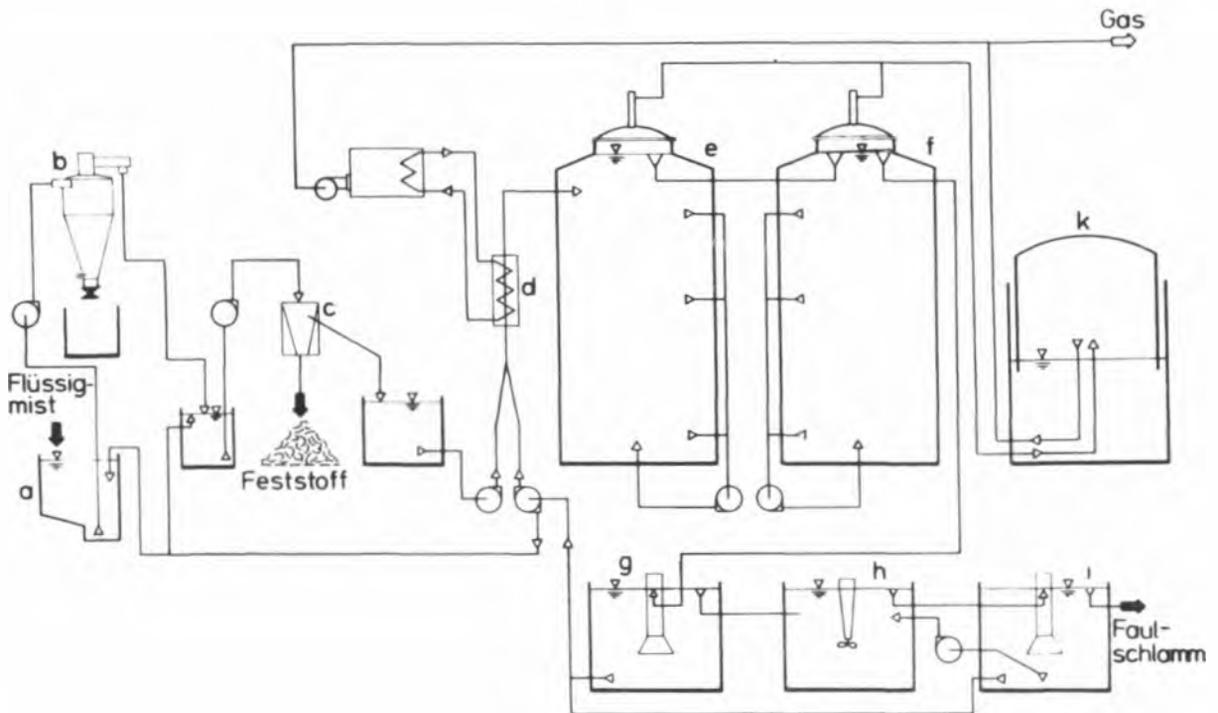


Abb. 8: Verfahren ROEDIGER/FERMENTECHNIK (53)
nach dem Durchflußsystem

- | | | | | | |
|---|-------------|------|--------------------------------|---|-------------|
| a | Sammelgrube | d | Heizaggregat und Wärmetauscher | h | Belüftung |
| b | Sandfang | e, f | Faulräume | i | Nachklärung |
| c | Zentrifuge | g | Vorklärung | k | Gasspeicher |

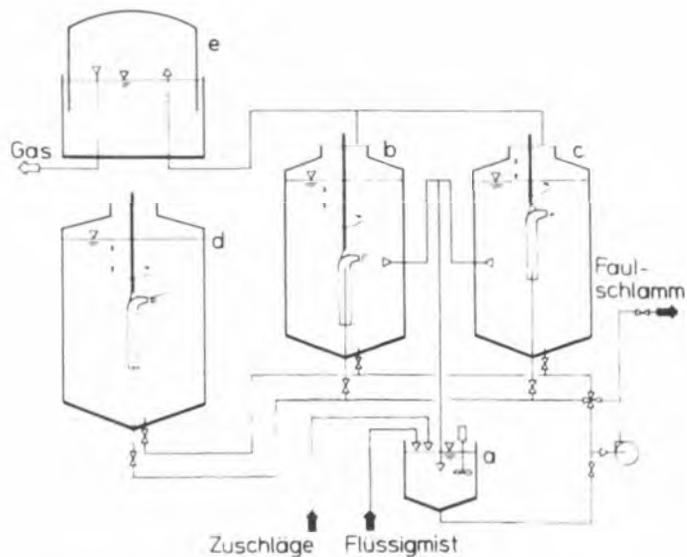


Abb. 9: Verfahren SCHMIDT/EGGERGLÜSS (103) nach dem Wechselbehältersystem

- | | |
|------|-------------|
| a | Vorbehälter |
| b, c | Faulräume |
| d | Dungsilo |
| e | Gasbehälter |

3.2 Anlagenkomponenten

3.2.1 Reaktionsbehälter

Ausgehend von den prozeßbedingten und arbeitstechnischen Grundvoraussetzungen wie

- absolute Verhinderung des Gasaustausches durch die Behälterwand,
- Dichtheit gegen Flüssigkeit,
- statische Sicherheit gegen Kräfte aus der Eigenmasse und der Füllung,
- weitgehende Wärmedämmung,
- Korrosionsbeständigkeit,
- sicheres Befüllen und Entleeren,
- Zugänglichkeit des Innenraumes für Wartungsarbeiten

sind für die Form, Größe und Ausführung der Reaktionsbehälter verschiedene weitere Einflußgrößen maßgebend, die sich aus den Betriebsbedingungen und Verfahrenszielen ableiten:

- anfallender Massenstrom beim Zufluß,
- angestrebte Gasausbeute beziehungsweise Ausfällungsgrad als Funktion von Feststoffkonzentration, Raumbelastung, Verweilzeit und Mischintensität,
- Betriebssystem,
- Mechanisierungsgrad.

Behälterform und Baustoffe (Abb. 10)

Hinsichtlich statischer Sicherheit, Strömungsverhältnissen (Energieaufwand für Rühren), Abziehen von Sediment und Schwimmdecke stellt der eiförmige Behälter (Abb. 10 a) die günstigste Lösung dar. In großen Einheiten wird er jedoch nur in Beton ausgeführt. Die hohen Herstellungskosten schränken daher den Einsatz großer Behälter dieser Bauform stark ein. Für kleinere Größen (etwa 30 m³) könnte jedoch diese Form auch mit glasfaserverstärktem Polyesterharz (GFK) hergestellt werden. Somit dürften auch für landwirtschaftliche Biogasanlagen derart ausgeführte Behälter in Zukunft an Bedeutung gewinnen.

Der zylindrische Behälter mit kegeligem Ober- und Unterteil (Abb. 10 b) bietet - wie der eiförmige Behälter - den Vorteil eines kleinen Gassammelraumes mit räumlich konzentrierter Schwimmdecke sowie des guten Schlammabzugs. Gegenüber der Eiform bietet diese Bauform jedoch weniger günstige Strömungsverhältnisse. Behälter dieser Bauform werden für kommunale Klärschlamm-Faulanlagen aus Beton hergestellt. Für die in der Landwirtschaft einzusetzenden kleineren Einheiten ist die Verwendung von Stahl kosten-

günstiger. Bei Ausführung in GFK ließen sich funktionelle Verbesserungen hinsichtlich der Strömungsbedingungen erreichen.

Der zylindrische Behälter (Abb. 10 c) weist im Vergleich zu den beiden erstgenannten Formen eine weitere Verschlechterung der Strömungsbedingungen sowie - wegen der größeren Sammelflächen - eine schwierigere Beseitigung des Sediments und der Schwimmdecke auf, verbunden mit einem größeren Aufwand für das Rühren. Von Vorteil ist die verhältnismäßig einfache Herstellung dieser Behälter, wobei auf umfangreiche Erfahrungen im landwirtschaftlichen Behälterbau (Stahl-, Beton-, GFK-Silos für die Futterkonservierung, Getreidespeicherung und Güllelagerung) zurückgegriffen werden kann.

Wird der zylindrische Behälter mit einer Querwand in zwei Kammern aufgeteilt, so können sich Kostenvorteile gegenüber der Erstellung von zwei Einzelbehältern ergeben (Wechselbehältersystem wie in Abbildung 10 d oder auch Durchflußsystem wie in Abbildung 11).

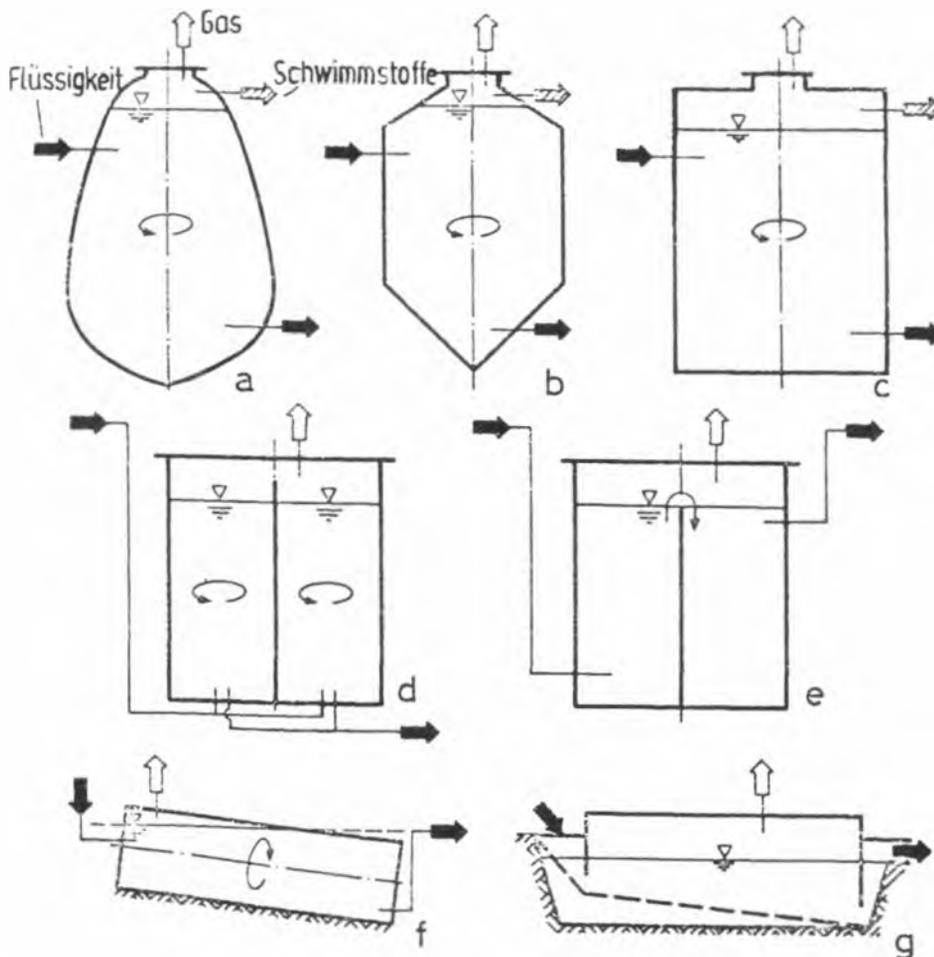


Abb. 10: Formen von Reaktionsbehältern für anaerobe Flüssigmistbehandlung

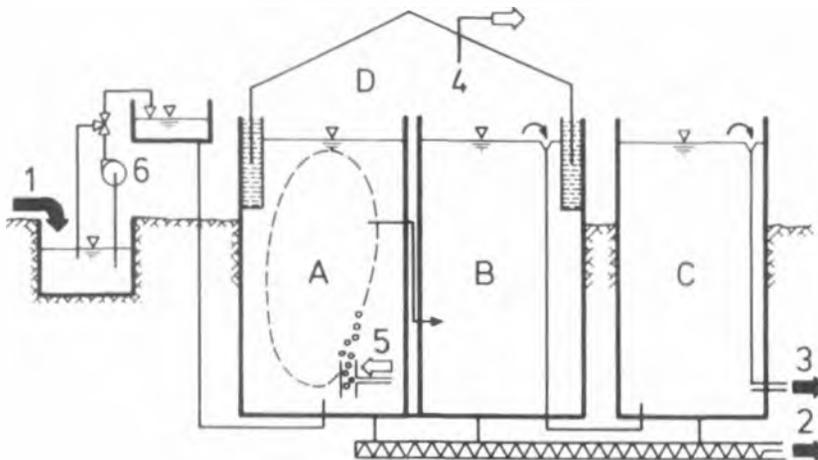


Abb. 11: Zweikammer-Faulanlage nach dem Durchflußsystem (82)

- | | |
|----------------------------|---------------------------|
| A Hauptfaulraum | B Nachgär- und Absetzraum |
| C Faulschlamm-speicher | D Gassammelraum |
| 1 Flüssigmistzulauf | 2 Dickschlamm-Abzug |
| 3 Dünnschlammüberlauf | 4 Gas-Entnahme |
| 5 Druckgas-Rühreinrichtung | |

Bei dieser Anordnung fallen nicht nur isolierte Außenwandflächen weg, sondern es wird auch durch eine in wärmeleitendem Material ausgeführte Querwand der Wärme-fluß zwischen den beiden Behältern begünstigt. Bei Einbau der Heizeinrichtung in die Querwand ergeben sich zusätzlich konstruktive und energetische Vorteile (82).

Einfache, meist kleine und im Selbstbau errichtete Anlagen lassen sich auch mit einem kubisch geformten Faulraum (Becken oder Grube mit Abdeckung) wie in Abbildung 10 e ausführen. Dieser kann ebenfalls unterteilt werden, so daß ein Hauptfaulraum und ein Absetzraum mit Nachgärung entsteht. Derartige Anlagen ermöglichen keinen hohen Ausfaulungsgrad, da weder eine gleichmäßige Durchmischung noch die Steuerung der Raumbelastung und der Verweilzeit im Hinblick auf eine große Gasausbeute gesichert ist. Die Beseitigung der Schwimmdecke und des Sediments ist mit großem Aufwand verbunden (Abb. 12).

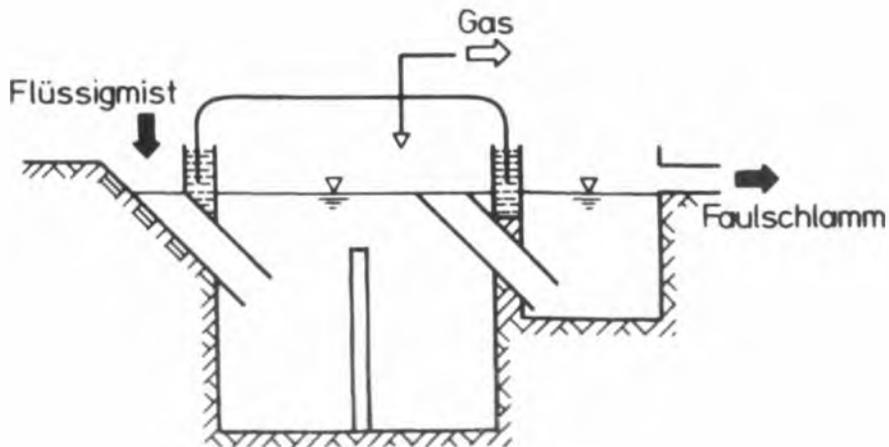


Abb. 12: Einfache Zweikammer-Biogasanlage (Philippinen (144)

Beim horizontalen Gärbehälter (Abb. 10 f) fließt das Substrat in Längsrichtung durch den Faulraum, der für kleinere Anlagen als zylindrischer Behälter in Stahl oder GFK ausgeführt werden kann (26).

Die Neigung der Achse erleichtert das Abfließen des Schlammes zum Auslaß hin. Die Bauform eignet sich zum Einbau einfacher Rührwerke (Abb. 13).

Der in den Boden eingelassene Gärkanal (Abb. 10 g und 14) ermöglicht die Behandlung größerer Substratmengen. Als Baustoff kommt in der Regel Beton in Frage. Mit geneigtem Boden und schwimmender Abdeckung wird das Gärkanalsystem zur Zeit in den USA weiterentwickelt (Abb. 15).

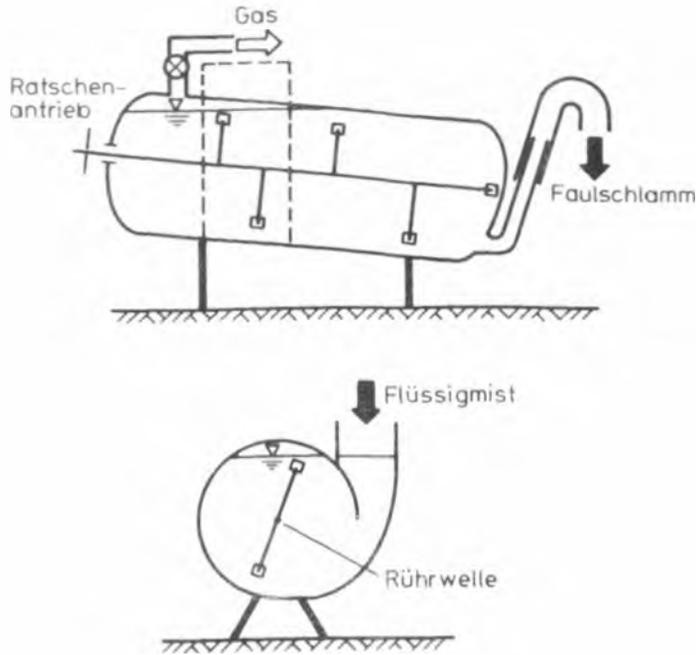


Abb. 13: Horizontaler Faulbehälter mit einfachem Rührwerk (11)

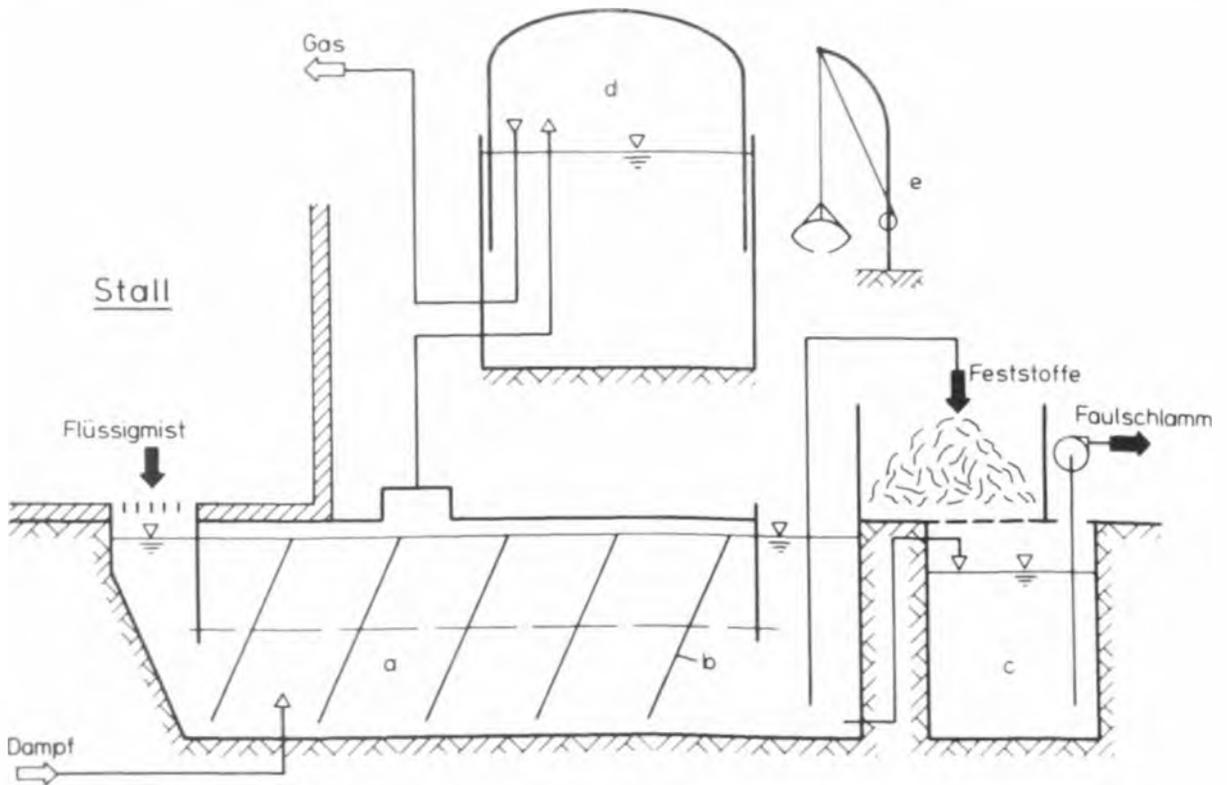


Abb. 14: Gärkanal-Faulanlage, System "Darmstadt" (116)

- | | | |
|---------------|--------------------|--------------------|
| a Gärraum | b Rührwerk | c Schlamm Speicher |
| d Gasspeicher | e Feststoffgreifer | |

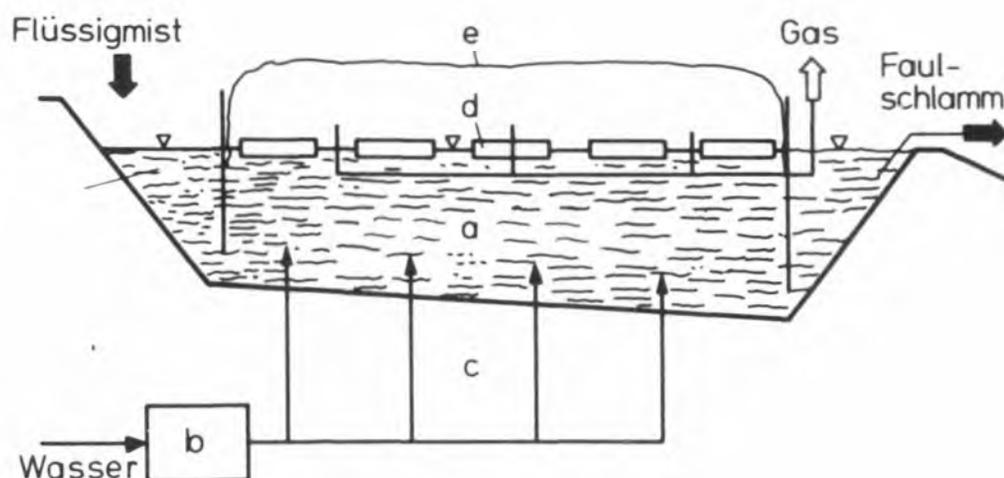


Abb. 15: Gärkanal-Faulanlage "PLUG FLOW DIGESTER" (45)

- | | | |
|---------------------------------|---------------------|---------------------|
| a Gärraum | b Wasserboiler | c Heißwassereintrag |
| d schwimmende Schaumstoffblöcke | e flexible Gashaube | |

Aus Kostengründen und wegen der besseren Zugänglichkeit zur Beseitigung der Schwimmdecke werden die Faulbehälter größerer Durchfluß-Anlagen meist mit einer festen Abdeckung, das heißt, ohne bewegliche Gashaube ausgeführt. Es ist zweckmäßiger, die Anpassung des Gasspeicherraumes an die anfallende Gasmenge und an den notwendigen Gasdruck in einem billigeren speziellen Gasspeicher vorzunehmen.

Bei Wechselbehälteranlagen mit fester Gashaube und ebenso bei entsprechend ausgeführten Anlagen nach dem Speichersystem muß sichergestellt sein, daß das beim Entleeren eines Faulbehälters freiwerdende Volumen mit aus dem Gasspeicher zurückströmenden Gas aufgefüllt wird. Hierdurch ergibt sich ein entsprechend größerer Raumbedarf für den Gasspeicher. Bei beiden Betriebssystemen ist im Einzelfall unter Berücksichtigung der Anlagengröße, der Betriebsbedingungen und der Herstellungskosten zu prüfen, ob der festen oder schwimmenden Faulraumabdeckung der Vorzug zu geben ist.

Eine Sonderstellung nehmen die aus Ostasien bekannten flexiblen Faulbehälter ein. Diese bestehen aus einer dichten und mit Gewebeeinlagen verstärkten blasenförmigen Kunststoff- oder Gummihülle, die zur Abstützung der statischen Kräfte entweder in eine kalottenförmige Erdgrube eingelassen (Abb. 16) oder ebenerdig von einer festen zylindrischen Einfassung umschlossen wird (35).

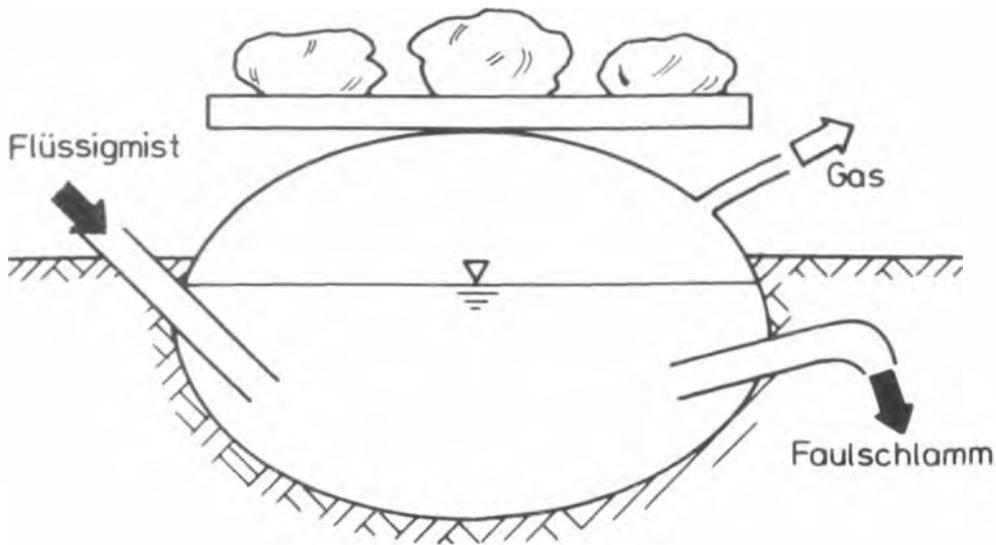


Abb. 16:Faulbehälter mit flexibler Umhüllung (Ostasien) (144)

3.2.2 Heizeinrichtungen

Um die geforderte Faultemperatur zu erreichen und möglichst konstant zu halten, muß zunächst das dem Faulbehälter zulaufende Substrat auf die Betriebstemperatur erwärmt werden; zusätzliche Wärme ist zum Ausgleich der Wärmeverluste notwendig. Grundsätzlich kann die Wärme auf das Substrat entweder

- im Reaktionsraum oder
- im Zulauf

übertragen werden.

Da Temperaturunterschiede den biologischen Prozeß beeinträchtigen, sollte die Wärmezufuhr möglichst mit einem intensiven Mischvorgang gekoppelt sein. Ferner muß von einem Wärmeübertragungssystem gefordert werden, daß sich an den Übertragungsflächen keine suspendierten Feststoffe ansetzen können (vorteilhaft sind z.B. hohe Substratgeschwindigkeiten entlang der Übertragungsflächen) oder daß sich diese Flächen auf einfache Weise säubern lassen. Schließlich muß ein Wärmetauscher gegen grobe Feststoffe (z.B. Strohhalme, Federn, Tierhaare) unempfindlich sein.

Heizen im Reaktionsraum

Für kleinere, mit Rührereinrichtung versehene Faulbehälter eignen sich Ein-tauch-Heizaggregate (z.B. Rohrschlangen, zylindrische oder flache Wärmeübertrager), die von Heißwasser ($\vartheta \cong 60^{\circ} \text{C}$) durchflossen sind und zum Säubern aus dem Faulraum herausgenommen werden können.

In die Behälterwand eingebaute Heizungen sind hinsichtlich des Wirkungsgrades nur dann sinnvoll, wenn sie nach beiden Wandseiten die Wärme an das Substrat abgeben können, wie dies bei einem Doppelkammer-Faulraum der Fall ist (Abb. 10 d, 10 e und 11).

Ohne Tauschereinrichtung ist die Erwärmung des Substrates auch direkt über Zugabe von heißem Wasser (Abb. 13) oder von Dampf möglich. Sofern das Wasser gleichzeitig zum Verdünnen und Aufwirbeln des im Zulauf noch sehr feststoffreichen Substrates dient, kann diese Methode sinnvoll sein.

Die Erwärmung durch Einpressen von Dampf in das Substrat führt zu einem hohen Wassergehalt im Gas und zu zusätzlichen Maßnahmen bei der Gasaufbereitung, um diesen zu beseitigen. In großen Anlagen - insbesondere Faulanlagen für kommunalen Klärschlamm - wird dieser Nachteil zugunsten des höheren energetischen Wirkungsgrades des Wärmeeintrages in Kauf genommen.

Heizen im Zulauf

Die gleichmäßige Wärmeübertragung ist mit Wärmetauschern außerhalb des Faulraumes möglich. Sie lassen sich jedoch nur in Verbindung mit einem Substrat-Umpumpsystem einsetzen, das zwar einen entsprechenden Mehraufwand bedeutet, jedoch eine sichere Regelung der Faultemperatur ermöglicht. Dieses Heizsystem hat den Vorteil, daß durch gleichzeitiges Erwärmen und Vermischen von frischem und umlaufenden Substrat der Zulauf gegenüber dem Reaktorinhalt nur eine geringe Temperaturdifferenz aufweist. Ferner ist die zur Vermeidung des Festsetzens von Feststoffen an der Tauscherfläche erforderliche Strömungsgeschwindigkeit sicher einzuhalten. Schließlich ist der außenliegende Wärmetauscher für Wartungsarbeiten gut zugänglich.

Als Heizaggregat werden meist Rohrmantel-Wärmetauscher verwendet, als Wärmeträger Wasser mit Temperaturen $\vartheta \leq 60^{\circ} \text{C}$. Höhere Temperaturen, wie sie insbesondere bei thermophil betriebenen Anlagen erforderlich wären, erhöhen das Risiko des Anhaftens von suspendierten Feststoffen an den Tauscherflächen. Praktische Erfahrungen mit thermophilen Anlagen liegen noch nicht in ausreichendem Maße vor. Ebenfalls noch entwicklungsbedürftig sind Wärmetauscher zur Rückgewinnung der im ablaufenden Substrat gespeicherten Wärme für die Aufheizung des Zuflusses, sei es durch direkte Übertragung mit Schlamm/Schlamm-Wärmetauscher oder mit Wärmepumpen, deren Kondensator- beziehungsweise Verdampferausführung jeweils auf die physikalischen Eigenschaften des Substrates abgestimmt sein müssen (90, 124).

3.2.3 Mischeinrichtungen

Die ständige gleichmäßige Verteilung und Umorientierung von Flüssigkeit und der in dieser verteilten Feststoffe unterschiedlicher Größe, Form und Dichte ist Voraussetzung für einen ungestörten und wirkungsvollen Prozeßablauf.

Mechanische Rührer

Rotierende Rührelemente stellen hohe Anforderungen an die Behälterform, wenn die zur Verminderung von Sediment- und Schwimmdeckenbildung erforderliche Strömungsgeschwindigkeit und die zur intensiven Durchmischung des Substrates notwendige Turbulenz in allen Bereichen des Behälters erreicht werden soll. Sie lassen sich daher bei der Behandlung schwieriger Substrate nur in kleineren Behältern wirkungsvoll und mit erträglichem Energieaufwand einsetzen. Liegen jedoch niederviskose Substrate vor und enthalten diese wenig Stoffe, die zum Sedimentieren oder Aufschwimmen neigen, so zeigen mechanische Rühreinrichtungen auch in größeren Behältern eine ausreichende Wirkung. Für einfache Kleinanlagen mit geringeren Anforderungen an die Gasausbeute stellen mechanische Rührsysteme, die gegebenenfalls sogar von Hand betätigt werden, die sinnvolle Lösung dar.

Hydraulische Rührsysteme

Der Inhalt von Behältern größerer Abmessungen und insbesondere auch von zylindrischen Behältern kann mit hydraulischen Mitteln, das heißt, mit Hilfe eines Flüssigkeitsstrahles, bewegt werden. In zahlreichen, in der Bundesrepublik Deutschland vor 20 Jahren errichteten Biogas-Anlagen hat sich ein System mit einer beweglichen Düse (Abb. 9) sehr gut bewährt (103). Der Flüssigkeitsstrahl läßt sich mit der horizontal ausgerichteten Düse, die um die Behälterachse geschwenkt und längs dieser verschoben werden kann, in alle Zonen des Faulraumes richten.

Hydraulische Systeme mit festen Düsen erfordern dagegen eine sorgfältige Abstimmung auf die Größe und Form des Behälters, um sicherzustellen, daß in allen Zonen des Faulraums eine ausreichende Durchmischung stattfindet.

Rühren mit Gas

Eine gute Rührwirkung ist durch Einpressen von Faulgas in die Flüssigkeit zu erzielen (Abb. 11). Das Substrat darf jedoch keine zu große Viskosität aufweisen und nicht zur Bildung einer Schwimmdecke neigen, es sei denn, die aufschwimmenden Partikel werden ständig abgeführt (82) oder schwimmfähige Grobstoffe werden von dem Substrat vor Eintritt in den Reaktor abgetrennt (53).

Allgemeingültige genaue Aussagen über die optimale Ausführung, die Wirkung und den Energiebedarf der genannten Rührsysteme bei deren Einsatz in verschiedenen Behälterformen und -größen und in typischen landwirtschaftlichen Substraten unterschiedlicher Feststoffkonzentration liegen noch nicht vor.

4. Energiebedarf

4.1 Wärme

Zur Aufrechterhaltung der für den Faulprozeß erforderlichen Betriebstemperatur muß dem Faulgut ständig Wärme zugeführt werden. Der Wärmebedarf setzt sich zusammen aus der Wärmemenge zum Aufheizen des Faulgutes von der jeweils herrschenden Temperatur des Flüssigmistes auf die Faultemperatur und aus der Wärmemenge zum Ausgleich der Verluste, die durch Strahlung und Leitung entstehen.

Liegen die

- wärmetechnischen Stoffkennwerte für das Substrat und für das Behältermaterial,
- Abmessungen der Behälter,
- Stoffmengen,
- Temperaturwerte und die
- Verweilzeit

vor, so ist die Berechnung der jeweils erforderlichen Wärmemengen auf einfache Weise durchzuführen. Für landwirtschaftliche Biogasanlagen sind zahlreiche solcher Berechnungen veröffentlicht worden (28, 45, 77, 111).

4.1.1 Aufheizen des Faulgutes

Die Wärmemenge, die zum Anwärmen des dem Faulbehälter zufließenden Gutes auf die geforderte Prozeßtemperatur bereitgestellt werden muß, hängt ab von folgenden Größen:

- Masse des Faulgutes,
- mittlere spezifische Wärme des Faulgutes,
- Differenz zwischen Prozeßtemperatur und Temperatur des anfallenden Faulgutes.

Die Werte für die Masse und für die spezifische Wärme können für eine vorgegebene Tierzahl und Haltungsform als nahezu konstant angenommen werden. Dagegen ist die Temperaturdifferenz den jahreszeitlichen Temperaturschwankungen unterworfen, sofern die Exkrememente vom Stall bis zum Reaktor den Außentemperaturen ausgesetzt sind.

Setzt man die spezifische Wärme des flüssigen Faulgutes der des Wassers gleich, so ist zur Erwärmung von 1 kg Flüssigmist um 1 K (= 1°C) die Wärmemenge von 4,18 kJ notwendig.

4.1.2 Ausgleich der Wärmeverluste

Der Wärmeverlust eines Faulbehälters wird bestimmt durch die

- Differenz zwischen der Faulguttemperatur und der an den einzelnen Faulbehälterflächen jeweils anstehenden Außentemperatur,
- Größe der einzelnen Flächen zwischen
 - Faulgut und Außenluft,
 - Faulgut und Erde,
 - Gas (im Sammelraum über dem Faulraum) und der Außenluft,
- Wärmedurchgangszahl für das Material der jeweiligen Wand,
- Wärmeübergangszahl an den Grenzflächen zwischen den einzelnen Stoffen,
- Dicke der einzelnen Wandschichten.

Da mit zunehmender Behältergröße das Verhältnis der Fläche zum Volumen kleiner wird, sind bei größeren Behältern die auf das Behältervolumen bezogenen Wärmeverluste niedriger. Für zylindrische Faulbehälter (Durchflußsystem, 32,5° C Faultemperatur) verschiedener Größe, die aus Beton mit einer Polyurethan-Isolierschicht von 50 mm Dicke ausgeführt waren, wurden in einer amerikanischen Analyse tägliche Wärmeverluste ermittelt, die zwischen 8 % (für 400 m³), 11 % (für 124 m³) und 16 % (für 60 m³) der für das Aufheizen des täglich zufließenden Faulgutes benötigten Wärmemenge betragen (45). Berechnungen aus früheren Jahren ergaben für die entsprechenden Behältergrößen unter vergleichbaren Bedingungen Verlustwerte der dreifachen Höhe (77).

Sind die täglichen und jahreszeitlichen Schwankungen der Außentemperatur für den betreffenden Standort bekannt, und wird der Wirkungsgrad für die Bereitstellung der Wärme aus Gas und für deren Eintrag in das Faulgut berücksichtigt, so läßt sich die erforderliche Gasmenge bestimmen.

Der Gesamtwärmebedarf einer Anlage wird somit im wesentlichen von dem Bedarf für das Aufheizen des Faulgutes auf die Prozeßtemperatur bestimmt. Der Wärmebedarf für den Ausgleich der Verluste kann durch geeignete Isolierung auf wenige Prozente des Bedarfs für das Aufheizen gesenkt werden.

4.2 Mechanische Energie

4.2.1 Rühren

Der Energiebedarf für das Rühren des Substrates richtet sich nach

- dem Grad der geforderten Durchmischung,
- der Viskosität des Substrates,
- der Behälterform und -größe,
- der Bauart, Größe, Betriebsweise (z.B. Drehzahl) und Anordnung des Rührers.

Eine Vorausberechnung des Energiebedarfs ist zur Zeit nicht möglich, da allgemeingültige quantitative Aussagen über das Verhalten von Rührern unter den Betriebsbedingungen landwirtschaftlicher Biogasanlagen noch nicht verfügbar sind. Vorhandene Angaben aufgrund von Messungen oder praktischen Erfahrungen haben andererseits einen nur begrenzten Aussagewert, da sie sich auf die jeweils vorgelegenen Bedingungen stützen, die meistens nicht ausreichend definiert sind.

Besser gesicherte Daten über den Rührenergiebedarf liegen für Klärschlamm-Faulanlagen vor. Hier rechnet man heute bei Behältergrößen bis 500 m^3 mit einer elektrischen Anschlußleistung von 30 bis 60 W/m^3 sowie mit Einschaltzeiten von mindestens 4 h und Ruhepausen von höchstens 7 h (62).

4.2.2 Pumpen

Wichtigste Einflußgrößen bei der Bestimmung des Energiebedarfs für den Betrieb der Pumpen sind

- die Viskosität des Substrats,
- der jeweils zu fördernde Volumenstrom,
- die Bauart der Pumpe und
- der Querschnitt sowie die Anzahl und die Krümmung der Richtungsänderungen der Rohrleitungen.

Da die Pumpen für Flüssigmist einen hohen technischen Entwicklungsstand aufweisen, liegen für die verschiedenen, bei Biogasanlagen auftretenden Einsatzbedingungen die notwendigen Betriebserfahrungen und Energiebedarfs-werte vor. Dies gilt auch für Pumpen, die mit einer Einrichtung zum Zerkleinern von Faser- und Halmtteilen ausgerüstet sind.

4.3 Deckung des Energiebedarfs

4.3.1 Gas

Als Energiequelle für die Bereitstellung der Wärme dient zweckmäßigerweise das Biogas. Es kann entweder unmittelbar zum Erwärmen des Wassers eingesetzt werden, das dann durch die Wärmetauscher fließt; auf diese Weise treten die geringsten Energieverluste auf. Eine zweite Möglichkeit ist durch die Verwertung des Gases in einem Verbrennungsmotor (z.B. als Teil eines Stromerzeugungsaggregates) gegeben, dessen Kühlwasser dann den Wärmetauschern zugeführt wird. Die Abgaswärme des Motors läßt sich zusätzlich zur Heizung des Warmwasserbereiters verwenden. Ob die Abwärme des Gasmotors ausreicht, um zu jeder Jahreszeit den Wärmebedarf der Anlage zu decken, läßt sich noch nicht mit Sicherheit beantworten. Bei der Klärung dieser Frage müssen die Möglichkeiten der Rückgewinnung der Abwärme des Faulschlammes ebenfalls berücksichtigt werden.

4.3.2 Wärmerückgewinnung

Die in dem ablaufenden Faulschlamm enthaltene Wärme stellt einen weiteren Energiebetrag dar, der für die Erwärmung des zulaufenden Substrates und zum Ausgleich der Wärmeverluste des Faulbehälters möglichst zu nutzen ist. Die einfachste Möglichkeit zur Rückgewinnung ist die direkte Wärmeübertragung, bei der die Zulaufflüssigkeit über einen von der Abfließigkeit durch- oder umströmten Wärmetauscher erwärmt wird. Eine gute Ausnutzung der Abwärme ist dann zu erreichen, wenn die Abfließigkeit ohne Zwischenspeicher unmittelbar zum Wärmetauscher gelangt und dort ihre Wärme bis auf die Anfangstemperatur des Zulaufs - zum Beispiel über einen Gegenstrom-Wärmetauscher - abgibt (111). Lösungen, bei denen die Zulaufflüssigkeit durch den gespeicherten Faulschlamm geleitet wird, sind zwar einfacher zu gestalten (Abb. 17); doch ist die Energieausbeute wegen der Wärmeverluste des Schlammspeichers nicht sehr groß.

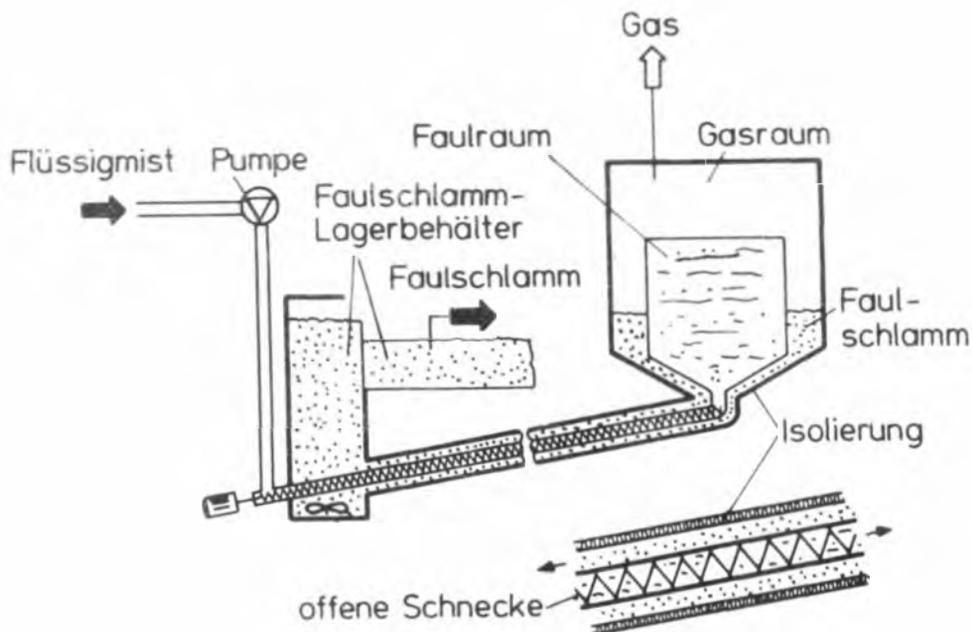


Abb. 17: Aufheizen des Zulaufs mit der Restwärme im Ablauf nach einem schwedischen Vorschlag (143)

Die indirekte Wärmeübertragung mit einer Wärmepumpe ist mit einem verhältnismäßig hohen Investitionsaufwand verbunden. Dieses Rückgewinnungssystem ermöglicht jedoch eine sehr gute Energieausnutzung, insbesondere dann, wenn die Wärmepumpe mit einem Gasmotor (mit Nutzung der Abwärme) betrieben wird (s. Teil II, Abschnitt 7.2) und Verdampfer beziehungsweise Kondensator unmittelbar mit dem Faulgut in Kontakt sind (Abb. 18).

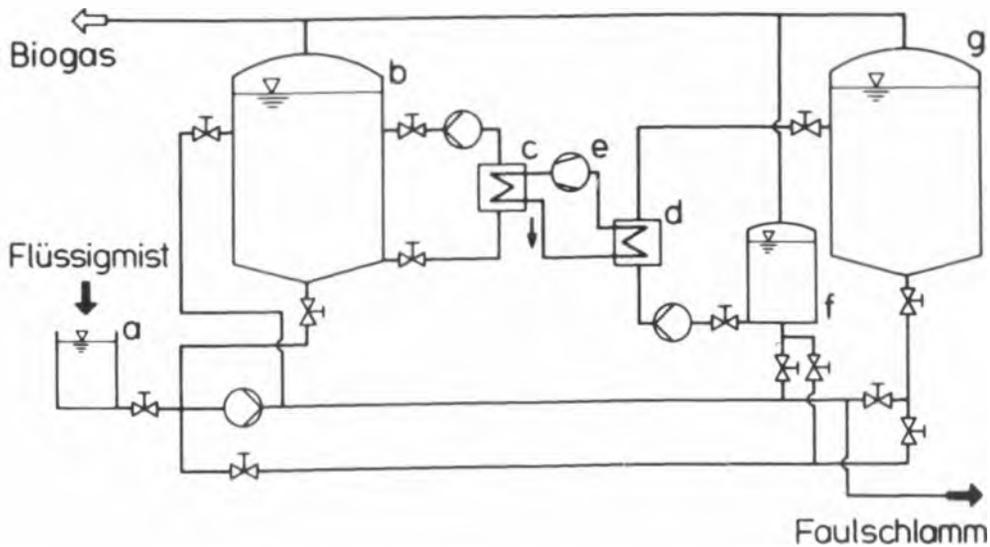


Abb. 18: Übertragung der Restwärme im Ablauf auf das Faulgut mit Wärmepumpe (124)

- | | |
|--------------------------|-------------------------------|
| a Misch- und Sammelgrube | d Verdampfer |
| b Faulbehälter | e Verdichter |
| c Kondensator | f isolierter Zwischenbehälter |
| | g Faulschlammbehälter |

Zur Vermeidung von Wärmeverlusten ist allerdings die Zwischenspeicherung der warmen Abflüssigkeit in einem besonderen, gut isolierten Behälter erforderlich, dessen Größe auf Verdampferleistung und Mengenstrom des Abflaufs abgestimmt ist. Größere Partikel sowie die in der Zu- und Abflüssigkeit suspendierten Feststoffe stellen an die Ausführung der Wärmetauscher besondere Anforderungen.

4.3.3 Sonstige Energiequellen

Eine Einsparung von Fremdenergie und Biogas ist durch Ausschöpfung weiterer Energiequellen möglich, die sich im Einzelfall anbieten können.

Stallwärme

Eine wesentliche Senkung des Energiebedarfs ist zu erreichen, wenn die Tierexkreme auf dem Weg zum Faulbehälter möglichst wenig von ihrer natürlichen Wärme verlieren. Kurze Entfernung zwischen Tier und Faulbehälter und gute Isolierung der Leitungen außerhalb des Stalles sind daher anzustreben. Wird schließlich der Faulbehälter innerhalb des Stalles errichtet, so reduzieren sich zusätzlich die Wärmeverluste (20, 29).

Oxidationswärme

Bei der aeroben Zersetzung organischer Stoffe wird Wärme freigesetzt, so daß bei günstigen Bedingungen Guttemperaturen bis 70⁰ C auftreten können (4). Da jedoch diese Energie aus denselben Stoffen stammt, die auch das Biogas liefern, ist eine zweistufige Behandlung, bei der zuerst zwecks Wärmegewinnung aerob und anschließend zur Gaserzeugung anaerob fermentiert wird, immer mit einer geringeren Gasausbeute verbunden. Ferner ist zu beachten, daß die aerobe Fermentation nur bei festem, feuchten organischen Material, das zur Sicherstellung des Gasaustausches eine porenreiche Struktur aufweist, ohne zusätzlichen Energiebedarf - von der Aufbereitung abgesehen - möglich ist (Kompostierung). Flüssige Substrate erfordern hingegen für das Eintragen der Luft bei gleichzeitigem intensiven Mischen einen hohen Energieaufwand, der die Gesamtenergiebilanz ungünstig beeinflusst. Auch ist der zusätzliche Investitionsaufwand verhältnismäßig hoch.

Die abschließende Beurteilung der Möglichkeit einer Nutzung von Oxidationswärme in Verbindung mit der Biogasgewinnung dürfte möglich sein, sobald die Ergebnisse laufender Forschungsarbeiten über die Nutzung biogener Wärme vorliegen.

Solarenergie

Das über den Tages- und Jahresablauf und unter dem Einfluß des Klimas sehr stark schwankende Angebot an Sonnenwärme würde aufwendige Wärmespeicher notwendig machen, wollte man damit den Wärmebedarf einer Biogasanlage decken. Von Nachteil ist ferner, daß Wärmeangebot und -bedarf in der Tendenz über das Jahr betrachtet sich nicht ergänzen. Deshalb dürfte in unseren Breiten - im Gegensatz zu Regionen mit hohem und gleichmäßigem Angebot an Sonnenwärme - die Einbindung der Solartechnik in Biogasanlagen von untergeordneter Bedeutung sein.

T e i l I I

NUTZUNG VON BIOGAS

E. Dohne und M. Brenndörfer

5. Gasspeicherung

Um Biogas sinnvoll in einem landwirtschaftlichen Betrieb nutzen zu können, ist eine Gasspeicherung in einem gewissen Umfang unumgänglich, da Gaserzeugung und Gasverbrauch nicht gleichsinnig verlaufen.

5.1 Technische Möglichkeiten

Die Gasspeicherung in öffentlichen Gasversorgungsnetzen dient seit jeher zum Ausgleich von

Verbrauchsschwankungen und Verbrauchsspitzen
Qualitätsunterschieden des Gases
Gasproduktionsschwankungen (vorübergehenden Störungen u.a.).

Dies gilt selbstverständlich auch für Biogasanlagen. Verbundsysteme sind bei Biogasanlagen, die nur der Versorgung des eigenen Betriebes dienen, nicht akzeptabel, müßten aber bei Großanlagen zur Versorgung mehrerer Abnehmer (ein ganzer Ort) mit in Erwägung gezogen werden. Die kontinuierliche Einspeisung und Beimischung in ein öffentliches Gasnetz wäre zwar für Großanlagen eine Möglichkeit, die Anlage ohne teure Eigenspeicherung zu betreiben, dürfte aber wegen der unterschiedlichen Gaszusammensetzung und der wechselnden Qualität kaum in Betracht kommen. Anpassung der Gasproduktion an wechselnden Bedarf ist nur bedingt möglich.

Verbrauchsspitzen entstehen

täglich (z.B. im Haushalt vormittags und gegen Abend zu den Mahlzeiten, im landwirtschaftlichen Betrieb beim Melken und Füttern)

wöchentlich (z.B. an Tagen mit besonders hohem Warmwasserbedarf für Waschen, Reinigen)

jahreszeitlich (z.B. Einkochperioden, Erntezeiten, Trocknen landwirtschaftlicher Ernteprodukte, Heizperioden in kalter Jahreszeit).

Der Energiebedarf der täglichen und wöchentlichen Verbrauchsspitzen läßt sich noch in etwa vorhersehen, der von Heizperioden nur sehr grob. Abbildung 19 zeigt die monatlichen Verbrauchsschwankungen eines öffentlichen Gasversorgungsunternehmens; niedrigster und höchster Monatsbedarf verhalten sich etwa wie 1 : 3 (36). Im vollgasversorgten landwirtschaftlichen Betrieb ist die Tendenz ähnlich mit zum Teil noch höheren Gegensätzen durch saisonale Verbrauchsspitzen. In Kapitel 8 werden für verschiedene Betriebstypen mögliche Gasverbrauchskurven erstellt.

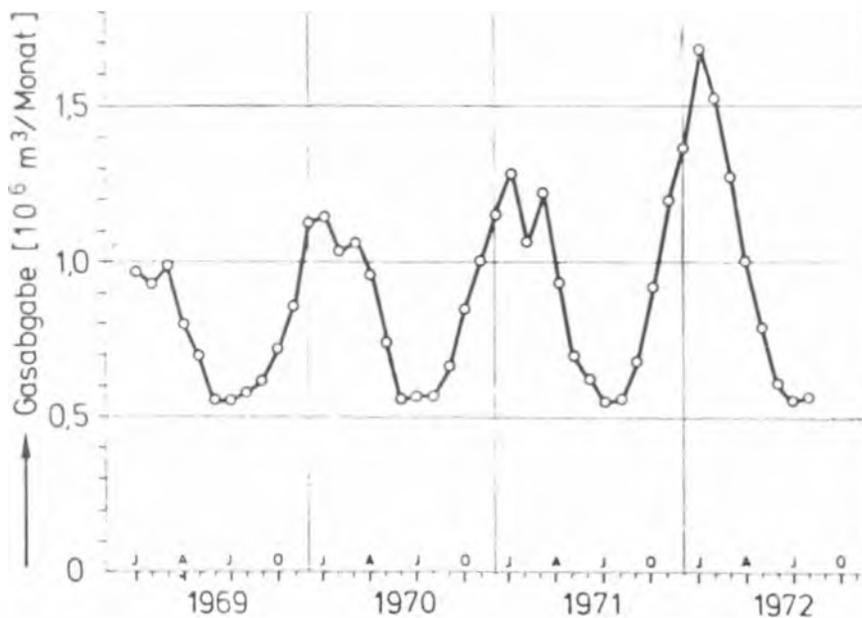


Abb. 19: Entwicklung der monatlichen Gasabgabe eines Gasversorgungsunternehmens 1969 bis 1972 (36)

Es gibt vier Möglichkeiten, die für einen Verbraucher notwendige Energie sicherzustellen:

- Die Gaserzeugung ist höher als der Gasbedarf, auch des Spitzenbedarfs. Das überschüssige Gas wird ungenutzt abgefackelt oder es müssen neue betriebseigene oder betriebsfremde Verwendungsmöglichkeiten gesucht werden.
- Der kontinuierlichen Gaserzeugung nur den hierzu passenden Grundverbrauch zuordnen. Ganz geringe Schwankungen durch einen kleinen Pufferspeicher ausgleichen. Darüber hinausgehenden Spitzenbedarf durch andere Energiearten decken. Auf elektrischen Strom wird wohl in keinem Fall in einem

Betrieb verzichtet werden. Versorgung über zwei Energieformen hat den Vorteil des geringeren Risikos gegenüber Störungen.

- c) Zusätzliche anderweitige Gasübernahme nur für Spitzenbedarf, um nur ein einziges Versorgungssystem zu haben, zum Beispiel aus einem Erdgasnetz. Propangas eignet sich nicht, da es sich um eine andere Gasfamilie (F) handelt. Für Kleinanlagen, wie es betriebseigene Biogasanlagen im allgemeinen sind, kommt dies aus wirtschaftlichen Gründen kaum in Betracht.
- d) In verbrauchsschwachen Zeiten Überschußgas speichern für Spitzenbedarfszeiten. Über einen längeren Zeitraum muß in diesem Fall Erzeugung und Bedarf ausgewogen sein. Der Speicher kann unter Umständen nur unwirtschaftlich genutzt sein.

Bei einer landwirtschaftlichen Biogasanlage wird es sich bei kleinen Viehbeständen vorwiegend um Möglichkeit b) handeln, bei großen Anlagen um die Möglichkeit a), kombiniert eventuell mit d). Man wird versuchen, den Verbrauch der Gaserzeugung anzupassen und Tages-, eventuell auch noch Wochenschwankungen durch Speicherung auszugleichen. Speicherung zum Ausgleich saisonaler Schwankungen ist für eine betriebseigene Anlage aus Kostengründen undiskutabel (36); siehe Tabelle 10. Liegt die mögliche Gaserzeugung unter dem durch Gas abdeckbaren Bedarf, kann nur eine Teilgasversorgung durchgeführt werden; liegt sie dagegen darüber, muß die Erzeugung gedrosselt oder das Gas nutzlos abgefackelt werden, gegebenenfalls nur in Schwachlastzeiten. Der nächste Schritt wäre, eine weitere sinnvolle Verwertung für das Gas zu schaffen. Alle Kostenrechnungen können sich nur auf die wirklich verwertete Gasmenge beziehen.

Die folgenden grundsätzlichen technischen Gasspeichermöglichkeiten sind aus den öffentlichen Gasversorgungen mit Stadtgas und Erdgas, aus Industriegasanlagen sowie aus früheren Biogasanlagen und heutigen Klärgasanlagen bekannt (Abb. 20). Für Biogasanlagen in landwirtschaftlichen Betrieben scheidet die ersten vier Speicherarten aus.

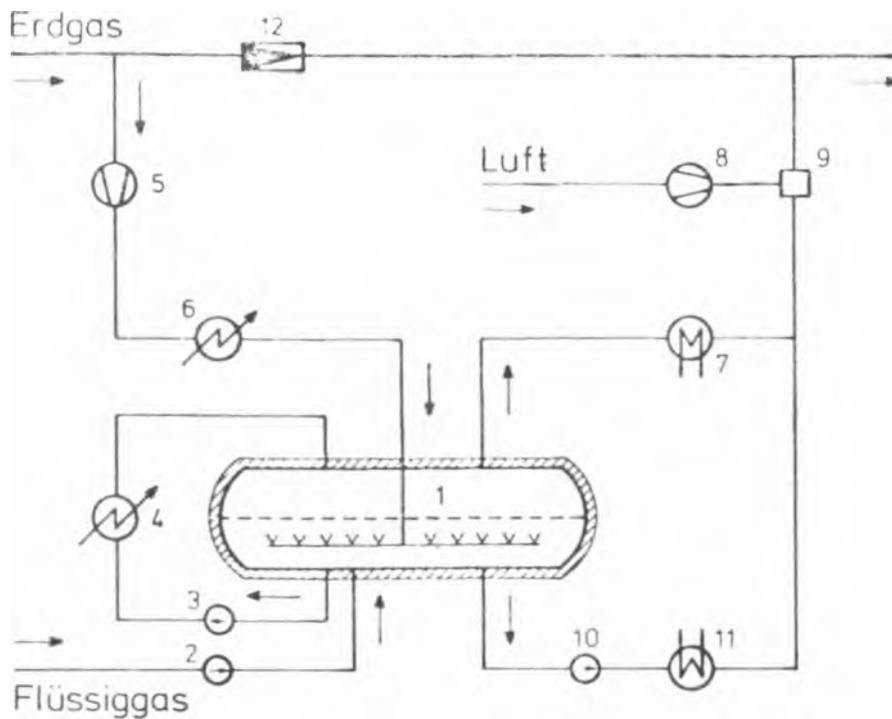
Tabelle 10: Anhaltswerte für Investitionskosten von Gasspeichern

	Zugrundeliegende Größe (m ³ Gas)	Spez. Anschaffungspreise je Speichervolumen (DM/m ³)	Jahreskosten (12% vom Anschaffungspreis) (DM/m ³)	Höchstbelastung des m ³ Biogas in DM bei Benutzung des Speichers zum Ausgleich von		
				Tagesspitzen	Wochenspitzen	Monatsspitzen
				365 x *	52 x *	12 x *
1. Porenspeicher	40 - 500 Mio.	0,4 - 0,02				
2. Kavernenspeicher	1 - 10 Mio.	5 - 1				
3. Flüssigerdgasspeicher	1 - 50 Mio.	2,4 - 0,6				
4. Absorptionspeicher	10.000 - 120.000	50 - 15				
5. Hochdruckkugelspeicher	10.000 - 100.000 4.000 - 5.000 10 - 50	30 - 20 120 1750 - 1500				
5.a Hochdruck-Röhrenspeicher	- 100.000					
6. Niederdruck-Naßspeicher	10.000 - 300.000 100 - 5.000	50 - 25 1000 - 120	6 - 3 120 - 14	0,02 - 0,01 0,33 - 0,04	0,12 - 0,06 2,30 - 0,27	0,50 - 0,30 10,00 - 1,20
7. Niederdruck-Trockenspeicher	100 - 5.000 (10.000) 3 - 125	1000 - 200 (100) 4000 - 1000	120 - 24 (12) 480 - 120	0,33 - 0,07 1,30 - 0,33	2,30 - 0,46 9,25 - 2,30	10,00 - 2,00 40,00 - 10,00
8. Niederdruck-Kissenspeicher	25 - 800	2000 - 250	240 - 30	0,65 - 0,08	4,60 - 0,58	20,00 - 2,50
9. Niederdruck-Gasspeicherballon	5 - 300	600 - 100	72 - 12	0,20 - 0,03	1,40 - 0,23	6,00 - 1,00

* Anzahl der Mindestausnutzungen je Jahr.
Bei zahlreicheren Belastungen sinkt die spezifische Belastung der m³ Biogases.

4. Absorptionsspeicher

Methangas lässt sich unter Druck in flüssigem Kohlenwasserstoff (Propan-Butan) lösen. Dabei lässt sich etwa die vier- bis sechsfache Menge der sonst beim gleichen Druck im gleichen Volumen speicherbaren Menge speichern. Bei der Gasabgabe wird ein Teil (ca. 4 %) des Speicher-Flüssiggases mit abgegeben. Die dadurch verursachte Heizwerterhöhung des Gases wird durch geregelte Luftzumischung korrigiert (36)



- | | | | |
|---|------------------------------|----|----------------------|
| 1 | Isolierter Hochdruckbehälter | 7 | Methanerwärmer |
| 2 | Fl.-G.-Ladepumpe | 8 | Luftverdichter |
| 3 | Fl.-G.-Umlaufpumpe | 9 | Mischer mit Regler |
| 4 | Fl.-G.-Kühler | 10 | Fl.-G.-Entnahmepumpe |
| 5 | Erdgasverdichter | 11 | Fl.-G.-Verdampfer |
| 6 | Erdgaskühler | 12 | Druckreduzierstation |

Abb. 20.4: Absorptionsspeicher (36)

5. Hochdruckspeicher

Es wird fast ausschließlich die Kugelform gewählt. Sie arbeiten im allgemeinen mit 8 - 10 bar Betriebsdruck (bis 18 bar Betriebsdruck werden Speicher gebaut) und besitzen ein Freigasvolumen von 10 000 - 100 000 m³. Natürlich sind auch Kleinbehälter von beispielsweise nur 10 - 20 m³ möglich. Vorteilhaft sind die relativ geringen Abmessungen und das Entfallen jeglicher beweglicher Teile, nachteilig ist der notwendige Verdichter. Das Biogas muß aus dem Faulraum abgesaugt werden. Für den Verbrauch als Brennstoff muß dann wieder eine Druckminderung auf 10 - 50 mbar (100 - 500 mm WS) erfolgen. Der Behälter fällt voll unter die hohen Sicherheitsauflagen eines Druckbehälters.

Röhrenförmig ausgebildete Hochdruckspeicher (Rohrbündelspeicher) werden mit einem Speicherinhalt bis 100 000 m³ Gas gebaut bei üblicherweise 70 bar Betriebsdruck.

6. Niederdruck-Naßspeicher als Glockengasbehälter

Die Regelgrößen liegen zwischen 500 und 300 000 m³ Nenninhalt, bis 1 500 m³ in der Regel einhübig, darüber mehrhübig. Stabiles Wasserbecken als Unter- teil. Nachteil: Gefahr des Einfrierens im Winter, daher Heizung nötig. Üblicher Betriebsdruck 50 mbar (200 - 500 mm WS). Die bei Biogasanlagen bisher eingesetzten Gasspeicher waren fast durchweg nasse Niederdruckspeicher. Die im ostasiatischen Raum existierenden Primitiv-Biogasanlagen (144) haben auch ausnahmslos schwimmende Gasspeicherglocken, die aber fast immer direkt über dem Faulbehälter schwimmen (Abb. 21), meistens sogar im Flüssigmist. Die geringen Rand-Gasverluste spielen keine Rolle.



Abb. 20.5: Hochdruck-
Kugelspeicher

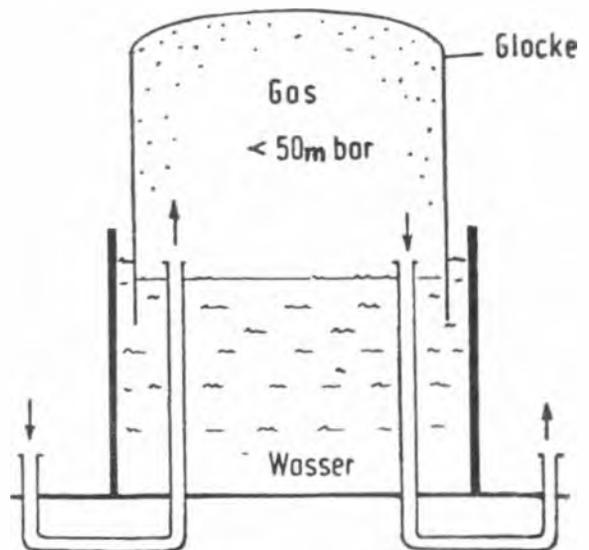


Abb. 20.6: Niederdruck-
Naßspeicher (einhübig)

7. Niederdruck-Trockenspeicher

als Scheiben-Gasbehälter oder Stulpmembranbehälter. Eine durch ein parallel geführtes Gewicht belastete Stulpmembran oder eine parallel geführte zur Wand abgedichtete Scheibe dient zur Aufrechterhaltung eines konstanten Druckes. Regelgrößen von 2 000 - 300 000 m³ Nenninhalt, aber Fertigung bereits ab 50 m³ Inhalt. Üblicher Betriebsdruck 20 - 50 mbar (200 bis 500 mm WS). Ein massives Fundament ist nicht notwendig. Bodenabdichtung kann durch eine Folie erfolgen. Im Durchschnitt etwa 20 % billiger als Naßspeicher.

8. Niederdruck-Kissenspeicher

Als Gasspeicher dient ein gasdichtes Kissen. Ein parallel geführtes Gewicht erzeugt einen konstanten Vordruck. Eine mittelfeste Fundamentplatte ist erforderlich. Kissenspeicher werden bereits in großem Umfang in Klärgasanlagen eingebaut. Zum Schutz gegen Beschädigungen muß um die Kissenspeicher ein Schutzhaus gebaut werden.

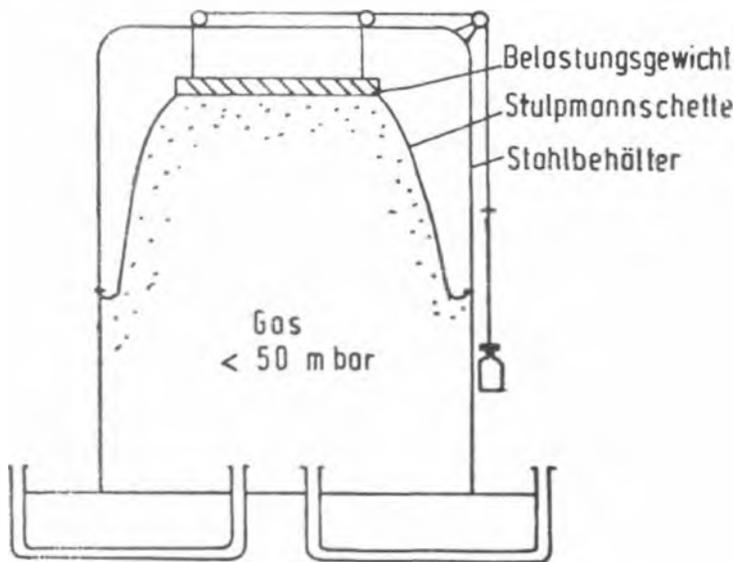


Abb. 20.7: Niederdruck-Trockenspeicher (Stulpmanschette)

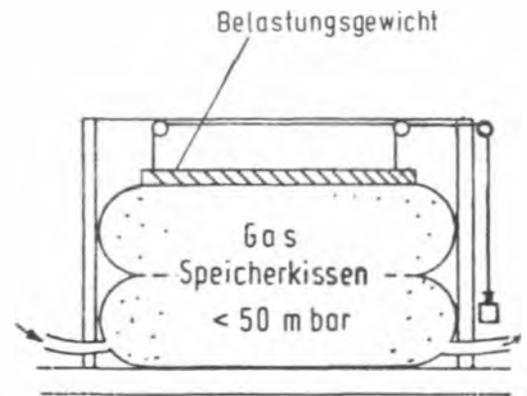


Abb. 20.8: Niederdruck-Kissenspeicher

9. Niederdruck-Gasspeicherballon

Ein einfacher zylinder- oder kugelförmiger Ballon aus beschichtetem Kunststoffgewebe dient als Speicher. Betriebsdruck üblicherweise 20 mbar (200 mm WS), nach Bedarf aber auch mehr. Größen zwischen 5 und 300 m³ werden bereits serienmäßig gefertigt. Mit zunehmender Größe reduziert sich der m³-Preis, der Preis je kg verarbeiteten Materials bleibt praktisch konstant zwischen 110 und 120 DM/kg. Diese Ballone sind mit Verankerungen versehen und müssen geschützt untergebracht werden. Sie können

sogar unter der Decke angeordnet werden. Es fehlt natürlich eine Vorrichtung zur Einhaltung eines konstanten Druckes über den ganzen Füllungsgrad.

Falt-Tanks (zwischen $0,5$ und 100 m^3) - für Flüssigkeiten bereits verwendet - gehören in die gleiche Gruppe.

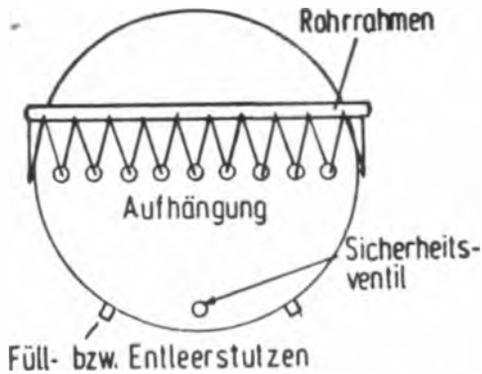


Abb. 20.9: Niederdruck-Gasspeicherballon
(in Rohrrahmen hängend)

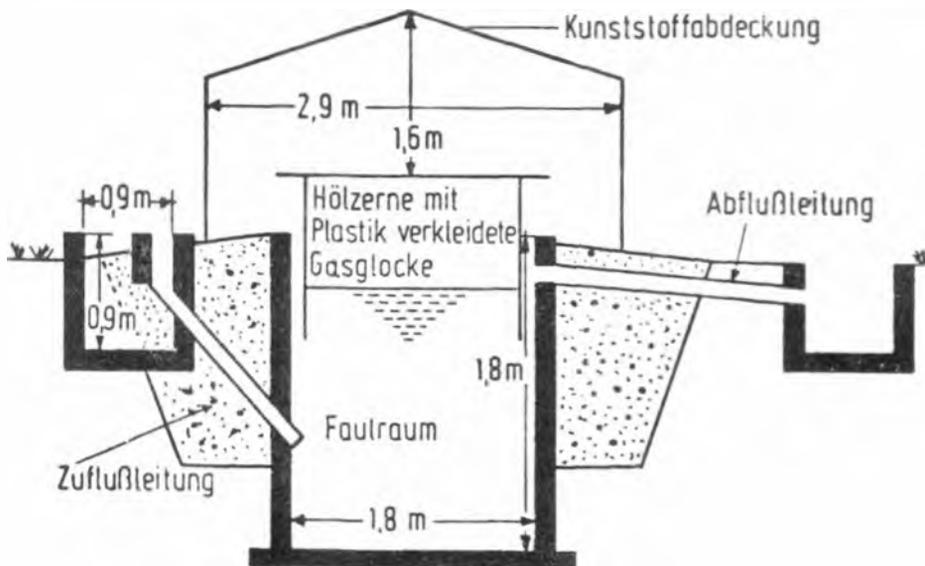


Abb. 21: Bauskizze einer einfachen Biogasanlage im asiatischen Raum,
Gasglocke schwimmend auf dem Faulbehälter (144)

Genaue vergleichbare Preisangaben für die verschiedenen Gasspeicher zu erstellen, ist sehr schwierig, da die Größen sowie die technischen und wirtschaftlichen Voraussetzungen wie auch der Erstellungszeitpunkt zu stark variieren. Tabelle 10, die auf teilweise umgerechneten Firmenangaben und Literaturhinweisen (36, 79, 95) basiert, mag als grober Anhalt betrachtet werden. Selbstverständlich steigen die spezifischen Preise mit sinkender Größe überproportional an, mitbedingt durch relativ höheren Lohn- und Materialanteil. Die vor Jahren auch außerhalb der Bundesrepublik errechneten Preiskurven (95) gelten in der Relation auch heute noch (Abb. 22), nicht jedoch in den Absolutwerten.

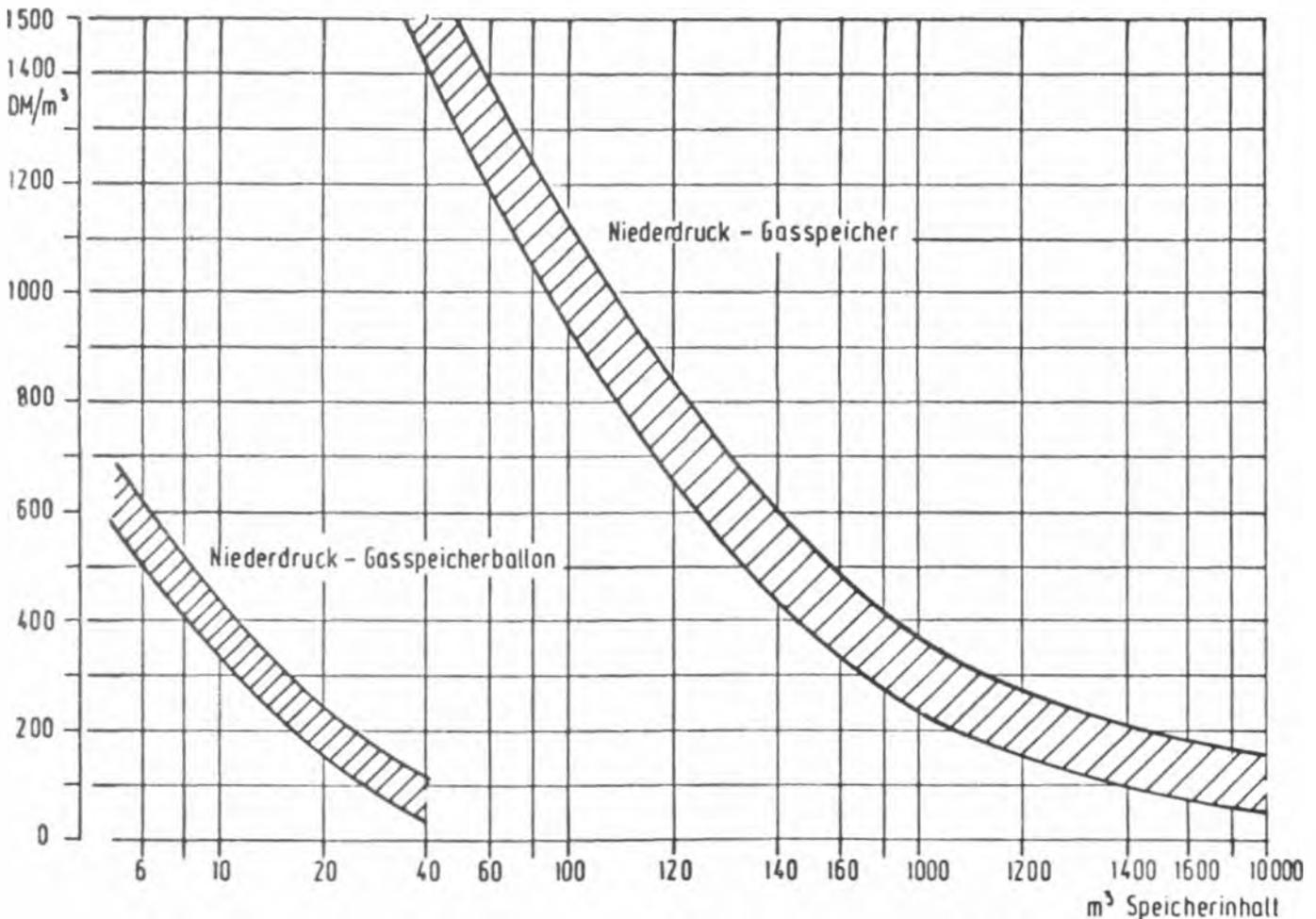


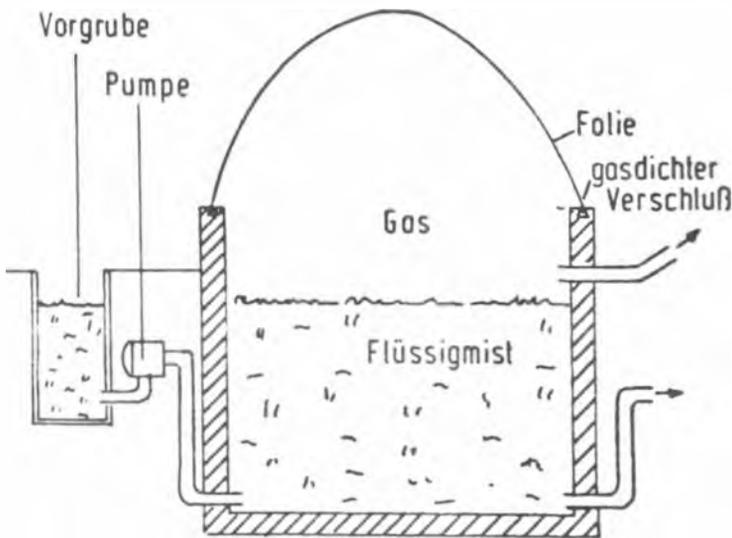
Abb. 22: Investitionskosten je m³ Speicherraum für Niederdruck-Gasspeicher

Aus Tabelle 10 und Abbildung 22 ist zu ersehen, daß die Kosten der bisher benutzten Gasspeicher in der für betriebseigene Biogasanlagen interessanten Größe bis ca. 200 m³ Nenninhalt außerordentlich hoch liegen; sie bewegen sich um etwa 20 - 30 % der Anlagenkosten. Aus Tabelle 10 ist zu entnehmen, daß aus Kostengründen eigentlich nur Tagesspitzen durch einen Speicher ausgeglichen werden sollten. Ziel muß es daher aus Kostengründen sein, den Gasspeicher nicht größer als unbedingt erforderlich zu machen, und hierzu muß man versuchen, den Gasverbrauch des Betriebes durch richtige Geräteauswahl möglichst gleichmäßig und ohne Spitzen zu planen (d.h. zu erwartende

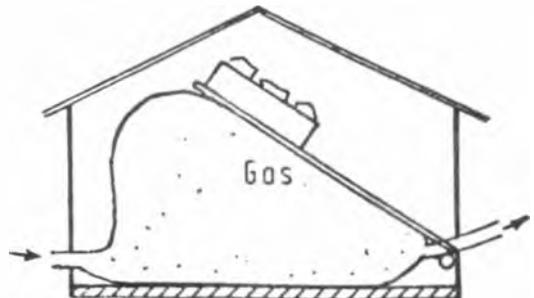
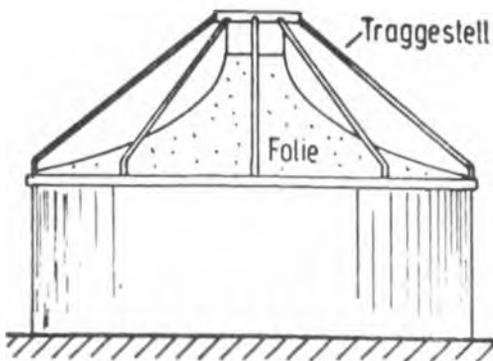
Verbrauchskurven aufstellen). Zum anderen müßte man nach neuen Lösungen suchen, die Anschaffungs- und Wartungskosten des Gasspeichers zu reduzieren, um so mehr, je kleiner die Anlage insgesamt ist. Eigenhilfe müßte in begrenztem Umfang möglich sein.

Drei mögliche Bauweisen für einfache Kleingasspeicher sollten näher auf ihre Realisierung hin untersucht werden (Abb. 23):

- a) gasdichte Folienglocke über dem Gärbehälter
- b) Schutzhaube mit gespannter Folie
- c) einfacher Foliensack, geschützt



a) gasdichte Folienglocke über Gärbehälter



b) Schutzhaube mit gespannter Folie c) einfacher Foliensack, geschützt
Abb. 23: Möglichkeiten für einfache Kleingasspeicher

Grundsätzlich ist bei Überlegungen hinsichtlich einfacher Gasspeicherung auf zwei Dinge zu achten:

Wind-, Regen- und Schneelasten
erforderlicher gleichmäßiger Betriebsdruck.

Bei ersterem haben einfache Folienhauben Nachteile. Ohne Gas (bei An- und Leerfahren sowie bei Störungen) sinken sie auf den Mist ab, ein starker Regenguß kann dann einige dt Wasser auf die Folie bringen. Andererseits werden große Traglufthallen durch 3 mbar Gasüberdruck sogar sturmfest gehalten. Die am Boden nicht dicht geschlossenen Traglufthallen kosten bei 1 000 m² Grundfläche etwa 30 - 85 DM/m². Gespannte Folienhauben werden bereits mehrfach zur Geruchsabdeckung von Gülle- und Klärbehältern eingesetzt. Durch Krümmung in jeweils zwei Richtungen ist die Folie völlig flatter- und geräuschfrei, die Tragkonstruktion liegt außen und so vor dem aggressiven Innenmedium geschützt. Nach Angaben der Industrie würde eine Abdichtung zum Silo, die bis zu 5 bar dicht ist, keine Schwierigkeiten bereiten, auch eine zusätzliche Wärmeisolierung nicht. Der Aufsatz für einen Silo mit 9 m Durchmesser kostet zur Zeit (nicht abgedichtet) 7 000 - 8 000 DM, das heißt, 110 - 120 DM/m² Grundfläche, eine Doppelfolie zur Wärmeisolierung würde alles etwa um 20 % verteuern.

Für einfache Foliensäcke werden Preise für den reinen Foliensack von etwa 4 000 DM für den 25-m³-Sack genannt und 5 000 DM für den 50-m³-Sack, entsprechend etwa den Preisen für Ballonspeicher; zum Teil werden Preise genannt von 15 - 20 DM/m² je abgewickelter Folienoberfläche.

Eine Belastung für die Erzielung eines gleichmäßigen Gasdruckes dürfte geringere Schwierigkeiten bereiten (Stein- oder Kieskästen auf gelenkig angebrachtem Brett).

5.2 Rechtliche Belange

Welche Gesichtspunkte und welche Auflagen müssen bei der Errichtung eines Gasspeichers beachtet werden? Mögliche Gefahren kommen von der Gasseite und der Speicherseite.

Gasseite (Gaszusammensetzung)

Der Methananteil ist praktisch ungiftig, leichter als Luft, leicht brennbar und bildet mit Luft (5 - 15 % Methan) oder Sauerstoff ein explosives Gemisch. Bei möglichen Leckagen kann das Gas bei entsprechender Lüftung nahezu gefahrlos entweichen. Geringe Luftbeimengungen sind unbedenklich, geregelte Beimischungen werden in der Praxis sogar bei Erdgas (36, 48) und Propangas (136) zur Konditionierung auf einen bestimmten Heizwert angewendet. H₂S ist zwar gesundheitsschädlich, aber nur in Spuren vorhanden,

außerdem durch Geruch in Spuren sofort wahrnehmbar. Da H_2S schwerer als Luft ist, muß jedoch darauf geachtet werden, daß sich bei Leckagen dieses Gas nicht in Vertiefungen (Kontrollgruben) sammeln kann. Es betäubt in hoher Konzentration sofort die Geruchsnerve und ist dann nicht mehr wahrnehmbar und kann tödlich wirken. Wegen seiner korrosiven Wirkung muß H_2S dem Gas vor seiner Verwendung entzogen werden (142) - siehe Anlage 1. H_2S fördert auch die Spannungsrißkorrosion bei Stahlbehältern. Auch der CO_2 -Anteil kann sich bei Undichtheiten im Gasspeicher- und Leitungssystem an tiefer gelegenen Stellen sammeln, da CO_2 schwerer als Luft ist - Erstickungsgefahr.

Eine mögliche Gefahr ist nur von der Explosivseite zu erwarten. Es muß also verhindert werden, daß ein explosives Gas-Luft-Gemisch im System entsteht. Propan und Erdgas, somit auch Biogas, bilden mit Luft nur in sehr engen Grenzen ein explosives Gemisch, im Gegensatz zu Wasserstoff und Kohlenmonoxid. Dadurch ist ein hoher Luftzusatz gefahrlos möglich, bis über 25 %. Natürlich sinkt dadurch der Heizwert.

Speicherseite (Gasüberdruck im Speicher)

Es besteht immer eine gewisse Gefahr, wenn Gas mit Überdruck plötzlich frei wird (z.B. Defekt). Daher sind grundsätzlich die Vorschriften für Druckbehälter zu beachten. Solange man jedoch im unteren Niederdruckbereich bleibt, ist hier eine Gefahr außerordentlich gering. Die Unfallverhütungsvorschrift "Druckbehälter" (VBG 17) nimmt Niederdruckgasbehälter für brennbare Gase, die der Versorgung dienen (149), beispielsweise extra aus; Biogasspeicher würden auch in keine der dort aufgestellten drei Druckbehälterklassen passen. Auch bezüglich der Terminologie dürfte es sinnvoll sein, nicht von einem "Biogasbehälter" zu sprechen, sondern nur von einem "Biogasspeicher".

Aus der Sicht der Gasverwendung im landwirtschaftlichen Betrieb sind an einen Biogasspeicher nur geringe Forderungen zu stellen: Haltung eines konstanten Mindestdruckes. Einen zu hohen Vordruck kann man gegebenenfalls auch über ein Druckminderventil regeln. Der Mindestgasarbeitsdruck muß zwischen 7 und 10 mbar (70 und 100 mm WS) liegen, damit die Gasgeräte einwandfrei arbeiten können. Die Bakterien produzieren Biogas unabhängig vom Systemdruck, so ist ein Gasdruck von mehreren bar im Speicher ohne zusätzliche Kompression möglich (87). Als Zubehör zwischen Gaserzeuger, Gasbehälter und Verbraucher kommen in Betracht (siehe Kapitel 6):

- Flammrückschlagsicherung als Kiesfilter
- Gastrockner (Entzug von Feuchtigkeit)
- Entschwefler (Entzug von H_2S)
- ggf. Druckminderer.

Grundsätzlich fällt eine Biogasanlage eines landwirtschaftlichen Betriebes zunächst unter den Zuständigkeitsbereich der landwirtschaftlichen Berufsgenossenschaft. In den UVV der landwirtschaftlichen Berufsgenossenschaften (148) behandelt der Abschnitt 5 (Anlage 2) Biogasanlagen. Diese Vorschriften bestehen zwar noch aus den fünfziger Jahren, haben jedoch weiterhin Gültigkeit. Sollte auf Grund neuer Erkenntnisse der Wunsch entstehen, die Bestimmungen zu vereinfachen oder zu verändern, wäre hierzu ein Antrag an den Bundesverband der landwirtschaftlichen Berufsgenossenschaften in Kassel notwendig, der dann über seinen UVV-Beirat entscheiden muß. In jedem Fall wird man sich aber dann an existierende Bestimmungen verwandter Berufsgenossenschaften und Organisationen anlehnen, zum Beispiel:

Berufsgenossenschaft der Gas- und Wasserwerke
Deutscher Verein der Gas- und Wasserfachmänner
Hauptverband der Gewerblichen Berufsgenossenschaften
Berufsgenossenschaft der chemischen Industrie
Bundesarbeitsgemeinschaft der gemeindlichen Unfallversicherungsträger (BAGUV), in deren Bereich Klärgasanlagen fallen.

Im Prinzip verwenden die meisten Berufsgenossenschaften für sie gemeinsam betreffende Details untereinander abgesprochene gleiche Einzelvorschriften.

Berücksichtigungsfähig erscheinen zunächst die Unfallverhütungsvorschriften (UVV), "Gaswerke" (VBG 52) - zur Zeit in Überarbeitung - und "Gase" (VBG 61).

Beide UVV-Bestimmungen sind nicht auf den Sonderfall "Biogasgewinnung" oder "Faulgasgewinnung" ausgerichtet. Lediglich die zur Zeit in Überarbeitung befindliche UVV Nr. GUV 17.5 der BAGUV ("Sicherheitsregeln für Abwasserbehandlungsanlagen - Bau und Ausrüstung") spricht speziell Faulgasanlagen an und könnte also als Vergleich herangezogen werden (145). Hieraus sind besonders zu erwähnen:

1. Als anerkannte Regeln der Technik gelten das "DVGW Regelwerk Gas" des Deutschen Vereins von Gas- und Wasserfachmännern, sowie entsprechende DIN-Normen.
2. Flammenrückschlagsicherung zwischen Faulbehälter und Speicher und Verbraucher und Speicher.
3. Abweichend vom DVGW Regelwerk Gas und DIN-Blättern dürfen in Abwasseranlagen auch geeignete Kunststoffleitungen (aus PE-hart oder schlagzähem PVC) als Faulgasleitungen verwendet werden.
4. Ausreichend groß dimensionierte Entschwefler. Eine zu hohe Anreicherung mit Schwefel ist wegen Selbstentzündungsgefahr beim Regenerieren zu vermeiden.

5. Wirksame Lüftung für alle Räume.

6. Explosionsgeschützte Installation.

Selbstverständlich müssen auch Bundesgesetze und Verordnungen beachtet werden (z.B. Explosionsschutzrichtlinien und das "Maschinenschutzgesetz"), die aber im allgemeinen laufend von den Berufsgenossenschaften bei Überarbeitungen in ihre UVV eingearbeitet werden.

In der UVV der landwirtschaftlichen Berufsgenossenschaft ist keine übertriebene Forderung zu erkennen. Hervorzuheben ist (Anlage 2):

- . Gültig nur für Behälterinhalte bis 100 m^3 .
Errichtung nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik.
Dies heißt zum Beispiel Berücksichtigung des "DVGW-Regelwerk Gas".
Der genaue Geltungsbereich dieser Formulierung müßte gegebenenfalls von der Berufsgenossenschaft genannt werden. Momentan war dies nicht möglich.
- . Errichtung durch eine Fachfirma. Selbstverständlich muß die Installation zum Gasverbrauchsort durch eine anerkannte Fachfirma erfolgen. Es konnte noch nicht geklärt werden, ob hier zum Beispiel Kunststoffleitungen zulässig sind, wie es bei Klärgasanlagen möglich ist, nicht jedoch bei sonstiger öffentlicher Gasversorgung.
- . Entlüftungseinrichtungen.
- . Grubensicherheitslampe.
- . Sicherheitsabstände, wie auch Rauchverbot in der Nähe.
- . Elektroinstallation gemäß für explosionsgefährdete Betriebsstätten.
- . Genaue Bedienungsanweisungen.

Nach den Vorschriften der Landwirtschaftlichen Berufsgenossenschaften gelten für Biogasbehälter über 100 m^3 Inhalt die Vorschriften der Berufsgenossenschaft der Gas- und Wasserwerke; dann kommt zum Beispiel auch die VBG-Richtlinie Nr. 61 "Gase" zur Anwendung. Für Niederdruckgasbehälter über 500 m^3 Inhalt und Betriebsdrücke 50 mbar (bis 500 mm WS) gelten die DVGW-Arbeitsblätter G 430 "Richtlinien für die Aufstellung und den Betrieb von Niederdruck-Gasbehältern" und G 431 "Richtlinien für die Herstellung von Niederdruck-Gasbehältern". All die genannten Regeln berücksichtigen aber nicht einfache Gasspeicher aus Kunststoff oder Folienblasen.

In den Unfallverhütungsvorschriften der landwirtschaftlichen Berufsgenossenschaft ist nichts zu finden, was gegen einen einfachen Blasen-Gasspeicher nach Abbildung 23 spricht. Eine einfache Schutzumkleidung gegen mechanische Beschädigungen ist wohl selbstverständlich. Ein Dach müßte nicht unbedingt vorhanden sein. Es erscheint denkbar, Lösungen für Kleinspeicher von etwa 25 m^3 Nenninhalt mit Anschaffungspreisen von 300 DM je m^3 zu erzielen. Als Speichergröße ist bisher üblich das 0,8- bis 1,5-fache der täglichen (79) Gasproduktion. Dieser Wert kann bei günstigen Verhältnissen verringert werden (nicht, wenn mehrere Faulbehälter absätzig im Wechsel gefahren werden), muß aber bei ungünstigen Verhältnissen eventuell erhöht werden.

Nach der Gewerbeordnung § 24 ist zunächst keine Anzeigepflicht für die Errichtung bäuerlicher Biogasanlagen zu erkennen. Selbstverständlich ist für die gesamte Anlage eine Baugenehmigung erforderlich.

6. Aufbereitung von Biogas

Im wesentlichen kommen bei der Aufbereitung von Biogas nur drei Dinge in Betracht:

- . Entzug von H_2S (Entschwefelung wichtig in erster Linie zur Verhinderung der Korrosion, besonders der Verbrennungsrückstände und als Entzug des geringen giftigen Anteiles).
- . Entzug von CO_2 (Erhöhung des Heizwertes und notwendig bei Verflüssigung).
- . Komprimierung und eventuell Verflüssigung (bei Verwendung als Treibstoff für Schlepper).

Die Kosten richten sich nach Gaszusammensetzung, Wünschen der Gasverbrauchsseite an Reinheit und nach der Auslastung der Einrichtung.

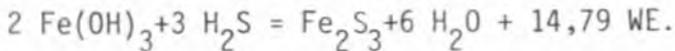
Entschwefelung

Fast alle in der chemischen Industrie angewendeten Entschwefelungsverfahren sind in eine Verbundwirtschaft eingebunden und daher nicht ohne weiteres auf Biogasanlagen übertragbar. Unseres Erachtens scheiden daher die folgenden Verfahren aus:

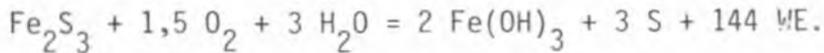
- . Absorptionsverfahren, in denen H_2S als Schwefelwasserstoff regeneriert wird (Carbonatverfahren oder Absorption mit Triäthanolamin).
- . Verfahren, die mit giftigen Stoffen arbeiten (Arsenoxidverfahren).
- . Verfahren, bei denen Explosionsgefahr durch entstehenden Schwefelkohlenstoff besteht (Aktivkohleabsorption).

. Clausverfahren (sehr teuer, Reduktion zu freiem Schwefel).

Es verbleibt eigentlich nur das alte katalytische Trockenverfahren mit $\text{Fe}(\text{OH})_3$ als Katalysator, das formelmäßig dargestellt werden kann:



Die Regeneration der Masse an der Luft stellt sich dar:



Es wird deutlich, daß sich die Katalysatormasse allmählich mit Schwefel anreichert (maximaler Anreicherungsgrad 25 %) und daß bei der Regeneration erhebliche Wärmemengen frei werden; dies kann sogar zur Entzündung stark mit Schwefel angereicherter Masse beim Regenerieren führen (frische Masse ist braun gefärbt, angereicherte Masse ist schwarz). Der Preis pro t beträgt etwa 600 DM. Der Masseverbrauch setzt sich aus dem Verbrauch durch Schwefelbindung ($\text{m}^3 \text{ Gas}/24\text{h} \times \text{g Schwefel}/\text{m}^3 \times 4 = \text{g Masse}/24 \text{ h}$) und dem Abriebverlust pro Durchgang dar. Übliche Masseverlörlagen betragen bei Schwefelgehalten von 0,1 bis 2,0 g S/ m^3 Biogas etwa 1,2 - 1,3 dt Masse/100 m^3 tägliche Gasproduktion. Die Industrie bietet Anlagen für verschiedenen Tagesdurchsatz und verschiedenen Mechanisierungsgrad an, so solche mit separaten Regenerationstürmen oder auch mit angebauten Regenerationskammern und einfacher Umschaltung. Ein kleiner, weitgehend mechanisierter Batterie-Entschwefler für Klärgas bis zu einem täglichen Anfall von 600 m^3 /Tag kostet etwa 30 000 DM. Natürlich kann man für kleine Gasmengen auch primitive Entschwefler für hohen Handarbeitsaufwand selbst bauen (Durchströmung immer von unten nach oben), aber eine tägliche sorgfältige Wartung ist notwendig!

CO₂-Gaswäsche

CO₂ wirkt im Biogas als inerte Anteil, reduziert also nur den Heizwert, stört sonst aber in keiner Weise die Verwertung. Lediglich bei Großanlagen, die das Gas an Fremdverbraucher abgeben, könnte eine CO₂-Gaswäsche notwendig werden, ist aber nur mit hohem Aufwand möglich und eigentlich nur bei sehr hohem täglichen Anfall bei Weiterverwendung des entzogenen CO₂ sinnvoll und wirtschaftlich.

Komprimierung von Biogas

In den fünfziger Jahren wurde versuchsweise bei einigen Biogasanlagen Biogas hoch komprimiert und, auf Druckgasflaschen gefüllt, zum Schlepperantrieb verwendet. Aus zwei Gründen dürfte dies heute nicht mehr interessant sein:

Hoher zusätzlicher Gewichtsballast durch die Druckgasflaschen.
Hohe Kosten der Komprimierung.

Die handelsübliche 50-l-Druckgasflasche für 200 bar Nenndruck wiegt etwa 65 kg und kann maximal 10 m³ Gas speichern, entsprechend etwa 6,2 l Dieselöl. Ein 50-kW-Schlepper benötigt für einen halben Arbeitstag durchschnittlich 32 l Dieselöl oder fünf Gasflaschen. Einschließlich notwendiger Halterungen würden diese ein Zusatzgewicht von mindestens 400 kg bedeuten, das laufend mitgenommen werden müßte. Bei einem Anschaffungspreis von ca. 3 000 DM für diese fünf Flaschen - Jahreskosten von etwa 18 % der Anschaffungskosten und 500 Einsatzstunden/Jahr - ergibt das eine zusätzliche Belastung von ca. 0,09 DM je m³ Biogas. Verwendung von Gasflaschen der nächstniederen Druckstufe - zum Beispiel Propangasflaschen - hat keinen Zweck, weil hiermit keine nennenswerten Gasinhalte erreicht werden können. Natürlich unterliegen diese Hochdruckflaschen strenger Prüfaufsicht, was wiederum zusätzliche Kosten verursacht. Außerdem muß die Druckgasverordnung berücksichtigt werden, weil ortsbewegliche Drucktanks hierunter fallen.

Nach Angaben der Industrie wird Hochdruck-Biogaskomprimierung erst ab sehr hohen Stundenleistungen der Kompressionsanlage und jährlichen Einsatzstunden wirtschaftlich. Die kleinste Kompressoranlage, die die Industrie bereits als unwirtschaftlich bezeichnet, kostet etwa:

Hochdruck-Kompressor (50 m ³ /h bei 200 bar)	ca. 50 000 DM
Vorratstank (30 m ³ , 40 bar - 1,50-1,75 DM/l) kann kostenmäßig unberücksichtigt bleiben, da in diesem Fall der Gasspeicher entfallen kann)	
Abfüllanlage für 2 x 5 Flaschen	ca. 30 000 DM
Grundstück, Gebäude, Fundamente, Sicherheitstechnik, Gebühren, Leitungen, Armaturen, Montage u.a.	ca. 100 000 DM
insgesamt	ca. 180 000 DM

Unberücksichtigt ist hierbei die Bereithaltung eines Ersatzkompressors für den Störfall, wie in der Industrie üblich, um hohe Ausfallkosten bei Störungen zu vermeiden.

Ein komplettes 12er Bündel von "50-l"-Flaschen kostet	ca. 7 500 DM
28er Bündel " " " "	12 - 14 000 DM.

Als jährliche Kosten sind für solch eine Anlage zu veranschlagen:

- Amortisation, Verzinsung, Versicherung, Reparatur, Gebühren - ca. 18 % der Anschaffungskosten ca. 32 000 DM
- Lohn für eine Fachkraft. Diese Spezialanlage muß fachmännisch betreut werden! Die Fachkraft könnte auch die Biogasanlage mit betreuen. ca. 40 000 DM
- Energieaufwand ca. 0,05 DM/m³ für Kompression.

Bei voller Auslastung von etwa 375 000 m ³ /Jahr würde das m ³ komprimierte Biogas belastet mit etwa zusätzlich	0,24 DM/m ³
bei Teilauslastung von nur 200 000 m ³ /Jahr	0,41 DM/m ³
100 000 m ³ /Jahr	0,77 DM/m ³ .

Komprimierung von Biogas ist demnach wegen zu hoher Kosten völlig uninteressant.

Biogasverflüssigung bei seinem kritischen Punkt (47 bar, -82,5⁰ C), oder drucklos bei -161⁰ C wäre eine Alternative. Eine entsprechende leistungsfähigere Erdgasanlage komplett mit Verflüssigung für eine Stundenleistung ("Kleinanlage") von 200 m³/h kostet nach Angaben der Industrie etwa 2,6 Mio. DM. Bei voller Leistung wird hier das m³ Gas mit ca. 0,35 DM belastet.

Als Nachteile einer eigenen Kompressionsanlage sind ferner noch zu nennen:

- . Platzbedarf
- . Fremdkörper im landwirtschaftlichen Betrieb
- . Hohe gesetzliche Sicherheitsauflagen (TÜV) - 500 DM/Prüftag sind zu veranschlagen
- . Erforderliche Fachkraft zur Betreuung
- . Hoher Aufwand für Reparatur und Ersatzteile
- . Notwendige Ausfallsicherung, um mögliche hohe Schäden in diesem Fall zu vermeiden
- . Zusatzversicherungen.

7. Biogasverwertung

Soweit bei späteren Aussagen keine Unterstellungen angegeben werden, ist für Rindergülle eine mittlere Biogausausbeute von 200 l/kg OTM

Schweinegülle

300 l/kg OTM

Geflügelgülle

400 l/kg OTM

(Organische Trockenmasse)

unterstellt und ein Energieinhalt von 22 MJ/m^3 Biogas (entsprechend etwa 60 % Methan). Für Umrechnung der alten nicht mehr zulässigen Maßeinheit kcal gilt: $1 \text{ kcal} = 4,19 \text{ kJ (Kilojoule)} = 1,16 \text{ Wh}$.

Sofern mit Biogas andere Energieträger ersetzt werden sollen, kann die Menge nicht ohne weiteres durch Umrechnung der spezifischen Energieinhalte bestimmt werden, sondern es muß gegebenenfalls auch ein unterschiedlicher Verwertungswirkungsgrad berücksichtigt werden. Mit folgenden Verwertungswirkungsgraden wird jeweils gerechnet (weitgehend übereinstimmend mit Angaben von FELDMANN (28)).

Tabelle 11: Wirkungsgrade

	Energieträger	Wirkungsgrad	Zusätzlicher Faktor bei Ersatz des Energieträgers durch Biogas
Für Heizzwecke (bei voller Leistung):	Koks, Kohle	0,6	0,73
	Erdgas, Biogas,		
	Stadtgas	0,82	1,0
	el. Strom	0,95	1,16
	Heizöl	0,78	0,95
Für Antriebszwecke:	Gas	0,28 ⁺⁾	1,0
	Dieselmotortreibstoff	0,31	1,13
	Benzin	0,25	0,9
	el. Strom	0,85	3,04

⁺⁾ Die Firma Jenbach gibt für ihre Gasmotoren 0,35 an, bezogen auf den H_u .

Bei Teilauslastung reduziert sich natürlich der Gesamtwirkungsgrad erheblich. Ähnlich sind auch die Wirkungsgrade für Kochen und Kühlen niedriger, aber nicht sehr unterschiedlich zwischen Verwendung von Elektrizität oder Gas, so daß hier bei Umrechnung die reinen Energieinhalte zugrunde gelegt werden können.

Grundsätzlich sind Gasgeräte, auf die Primärenergie bezogen, erheblich wirtschaftlicher als Elektrogeräte (verursacht durch die hohen Umwandlungsverluste bei der Stromerzeugung). Außerdem sind hier bei Heizgeräten sogenannte "Brennwert"-Geräte in der Entwicklung, bei denen die Abgase noch kondensiert werden und somit die Verdampfungswärme des Wassers aus dem Abgas noch zusätzlich gewonnen wird (47) und folglich bei Energiebilanzen anstelle des sonst üblichen Heizwertes (unterer Heizwert H_u) mit dem Brennwert (oberer Heizwert H_o) gerechnet werden kann.

Bei Erzeugung von elektrischem Strom über einen mit einem Gasmotor angetriebenen Generator gilt in etwa: 1 m^3 Biogas ergibt 1,6 kWh Elektrizität. Die Kühl- und Abgaswärme kann gegebenenfalls noch weiter genutzt werden (siehe Kapitel 7.2).

7.1 Geeignete Geräte und Maschinen

Der mittlere Heizwert von Biogas mit ca. 60 % Methananteil liegt bei 22 MJ/m^3 . Da der brennbare Anteil von Biogas aus Methan besteht, ist es der zweiten Gasfamilie "N" (Naturgase) zuzurechnen. Gegenüber reinem Erdgas wird durch den hohen Anteil an CO_2 die an sich schon sehr niedrige Zündgeschwindigkeit beziehungsweise Flammgeschwindigkeit des Methan-Luft-Gemisches von etwa 43 cm/s noch weiter herabgesetzt (Stadtgas-Luft-Gemisch 65 cm/s ; Wasserstoff-Luft-Gemisch 265 cm/s). Auch hat Methan die höchste Zündtemperatur der üblichen Brenngase, ca. 645°C . Bei allen Verwendungsmöglichkeiten wird sich Biogas ähnlich wie Erdgas verhalten, aber geringfügig schlechter. In DIN 3362 sind verschiedene "Prüfgase" zusammengestellt, an denen sich die Industrie orientiert. Beispielsweise müssen alle sogenannten "Allgasgeräte" für alle in DIN 3362 aufgeführten Testgase oder Prüfgasmischungen geeignet sein. Biogas selbst ist hierbei nicht vertreten. Am nächsten kommt es der Prüfgasmischung G 27 aus 82 % Methan und 18 % Inertanteil N_2 . Die untere Wobbezahl, die für den Vergleich der Austauschbarkeit von Gasen herangezogen wird, beträgt für Biogas mit einem Heizwert von 22 MJ/m^3 etwa 24,5. Gase mit gleichem Wobbe-Index und gleichem Fließdruck können normalerweise untereinander ohne Änderung des Brenners oder der Düsen ausgetauscht werden. Allerdings werden dabei Rückschlagneigung oder Flammenabhebenneigung nicht erfaßt. Die verschiedensten brenntechnischen Daten von Brenngasen können dem DVGW-Arbeitsblatt G 260 entnommen werden (135).

Im allgemeinen dürfte sich der Betriebsdruck von Biogas an der unteren Grenze des für die Geräte erforderlichen Mindestdruckes bewegen, das sind ca. 7 - 10 mbar (70 - 100 mm WS). Heutige Erdgasnetze arbeiten mit ca. 20 mbar (200 mm WS) am Gerät. Das heißt: Gegenüber Erdgas wird Biogas etwas schlechtere Zündeigenschaften haben, geringere Flammenstabilität und daher auch etwas schlechtere Flammenregelbarkeit, zum Beispiel zur Einstellung "kleine Flamme" bei Herden. Die Flamme neigt zum Abheben.

Dies entspricht auch den früheren Erfahrungen vom Biogaseinsatz (95). Heizwert und Arbeitsdruck können ohne große Mühe relativ konstant gehalten werden, zum Beispiel Belastungsgewicht auf Gasspeicher und bei zu hohem Gasvordruck Zwischenschalten eines Druckregelventiles. Hieraus ist zu schließen, daß wohl geringe Umstellungen an den Geräten gegenüber Methan vorgenommen werden müssen, zum Beispiel Verändern der Düsen, daß aber grundsätzlich keine gravierenden Probleme gegenüber Erdgasgeräten auftreten werden. Erste Gespräche mit Geräte-Herstellern haben dies bestätigt, auch wenn im allgemeinen keine Einsatzerfahrungen mit Biogas vorliegen. Brennversuche zur Bestätigung der Brennverhalten-Annahmen von Biogas wollen mehrere Firmen in Kürze durchführen. Die Anschaffungspreise von Biogasgeräten entsprechen daher auch im wesentlichen denen von Erdgasgeräten. Wegen der geringen Umstellungen und der fehlenden Großserie können sie geringfügig teurer sein.

Zum Vergleich zwischen Biogas und anderen Brennstoffen bezüglich des reinen Heizwertes und des Preises können Abbildung 24 und Tabelle 12 dienen (24). Wenn sich der Erzeugungspreis von Biogas zu den spezifischen Preisen anderer Energieträger genauso verhält wie die gegenseitigen Energieinhalte der Verkaufseinheiten beziehungsweise der wirksamen Energieinhalte, dann kann der Biogaspreis als wirtschaftlich bezeichnet werden.

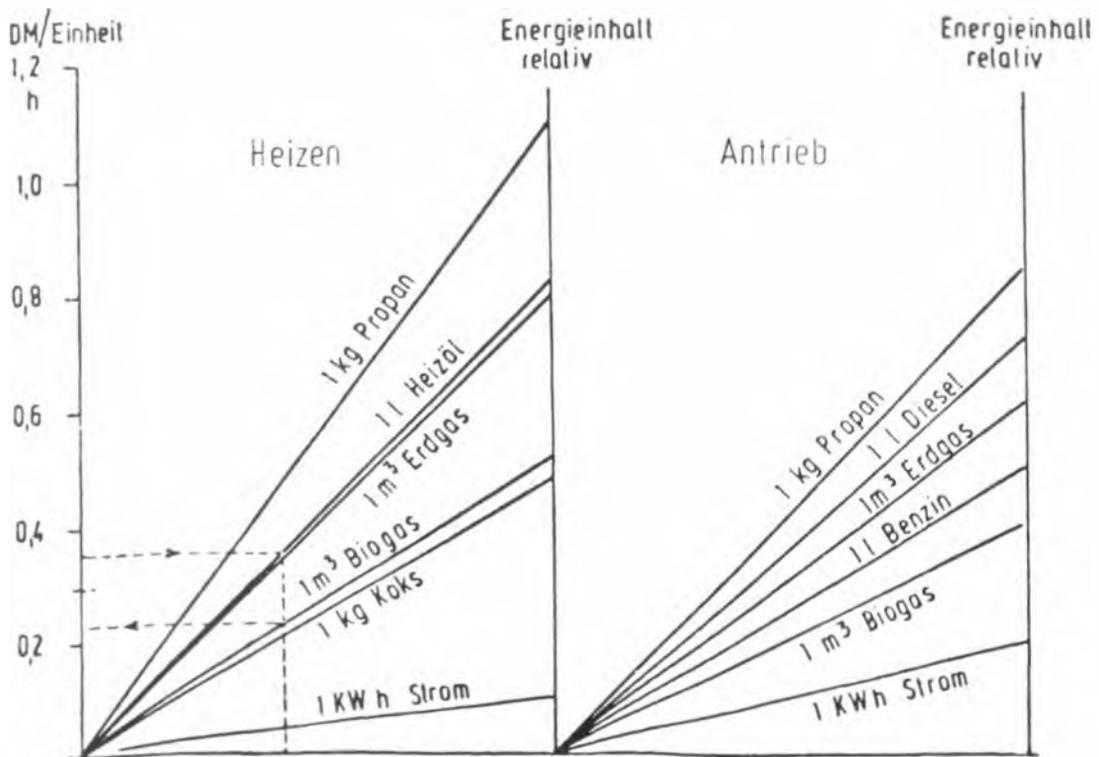


Abb. 24: Ermittlung des "Biogas-Vergleichspreises" (24):
z. B. dürfte bei einem Heizölpreis von 0,35 DM/l (einschl. Tankanteil) bei Forderung eines gleichen spezifischen Energiepreises Biogas nur ca. 0,24 DM/m³ kosten

Tabelle 12: Heizwertrelation (ohne Berücksichtigung von Wirkungsgraden)

Brennstoff	Heizwert H_U (MJ/Verkaufseinheit)	B i o g a s /m ³			Erdgas/m ³	Propan- gas/kg	Heiz- öl/l	Heiz- öl/kg	Diesel- öl/l	Benzin/l	Koks/kg	El.-Strom/ kWh
		56 %	62 %	70 %								
Biogas 56 %	20 MJ/m ³	1	0,91	0,8	0,60	0,44	0,56	0,47	0,56	0,66	0,72	5,6
62 %	22,1 MJ/m ³	1,11	1	0,88	0,66	0,48	0,61	0,52	0,61	0,72	0,80	6,1
70 %	25 MJ/m ³	1,25	1,13	1	0,75	0,54	0,69	0,59	0,69	0,82	0,90	6,9
Erdgas "L"	33,5 MJ/m ³	1,68	1,52	1,34	1	0,73	0,93	0,79	0,93	1,10	1,21	9,3
Stadtgas	16,8 MJ/m ³	0,84	0,76	0,67	0,50	0,36	0,47	0,40	0,47	0,55	0,61	4,7
Propangas	46 MJ/kg	2,3	2,08	1,84	1,37	1	1,28	1,09	1,28	1,50	1,66	12,8
Heizöl	36 MJ/l	1,8	1,63	1,44	1,07	0,78	1	0,85	1	1,18	1,30	10,0
	42,3 MJ/kg	2,12	1,91	1,69	1,26	0,92	1,17	1	1,17	1,39	1,51	11,7
Dieselöl	36 MJ/l	1,8	1,63	1,44	1,07	0,78	1	0,85	1	1,18	1,30	10,0
Benzin	30,5 MJ/l	1,53	1,38	1,22	0,91	0,66	0,85	0,72	0,85	1	1,10	8,50
Koks	27,6 MJ/kg	1,38	1,25	1,1	0,82	0,60	0,77	0,65	0,77	0,90	1	7,70
El.-Strom	3,6 MJ/kWh	0,18	0,16	0,14	0,11	0,07	0,1	0,08	0,1	0,12	0,13	1

Die Installationen für die Gasgeräte müssen von anerkannten Fachleuten unter Berücksichtigung der "Technischen Regeln Gasinstallation" (TRGI) durchgeführt werden. Die Gasgeräte müssen dem "Gesetz über technische Arbeitsmittel" (Maschinenschutzgesetz) mit seinem Anhang A und B entsprechen. Für die meisten Gasgeräte existieren bereits DIN-Blätter oder Arbeitsblätter des DVGW-VFG-Regelwerkes.

Zu den einzelnen Geräten, die mit Gas versorgt werden können, ist noch folgendes zu sagen:

Brenner für Heizungsanlagen

Einsatz in Wohnhausheizungen sowohl in Form von atmosphärischen Brennern wie auch als Gebläsebrenner. Weiter in verschiedenen Trocknern zur Lufterhitzung, zur Raumklimatisierung und in Brennereien. Einige Hersteller haben bereits für Klärgas Brenner (z.B. zur Beheizung öffentlicher Schwimmbäder) laufen, sowohl atmosphärische als auch Gebläsebrenner. Grundsätzlich werden keine Schwierigkeiten gesehen, sofern die Geräte in der Erdgasversion verwendet werden. Andere Firmen sind bereit, Brennversuche zu fahren, um ihre Brenner entsprechend anpassen zu können. Wegen der gegenüber Erdgas verringerten Zündgeschwindigkeit muß bei Gaskesseln die Belastung der Brenner eventuell etwas niedriger eingestellt werden, damit ein Abheben der Flammen vom Brennerkörper vermieden wird. Die maximalen Leistungen der Brenner werden damit etwas niedriger liegen. Für ordnungsgemäßen Betrieb von Gebläsebrennern wird ein Gasfließdruck am Brennereintritt von 10 - 15 mbar (100 - 150 mm WS) gefordert. Eine grundsätzliche Verteuerung ist nicht zu erwarten. Seriengeräte für Biogas erfordern eine spezielle DVGW-Zulassung. Die Industrie liefert übrigens auch Zweistoffbrenner für Verarbeitung von wahlweise Gas und Heizöl.

Warmwasserbereiter

Hier werden keine Betriebsschwierigkeiten erwartet. Die sogenannten "Allgas"-Geräte sind für alle in DIN 3362 aufgeführten Testgase oder Prüfgasmischungen geeignet.

Herde

mit Kochplatten und Backöfen. Auch hier handelt es sich im allgemeinen schon um "Allgas"-Geräte. Für die Backöfen wird mit keinerlei Schwierigkeiten gerechnet. Die Industrie ist teilweise der Meinung, daß die Kochstellenbrenner bei einem Biogas mit dem Heizwert von 22 MJ/m^3 bis herunter zu einem Arbeitsdruck von etwa 4 mbar (40 mm WS) arbeiten müßten bei modifizierten Brennerköpfen für sogenannte "Kletterflammen". Hiermit müßte auch "Klein"-Stellung bei offener Kochstellenbrennung möglich sein. Andere Hersteller sind der Meinung, daß ein Gasdruck von mindestens 7,5 - 8 mbar (75 - 80 mm WS) vorhanden sein müßte, da sonst infolge mangelnder Primärluftansaugung eine hygienisch einwandfreie Verbrennung nicht mehr gewährleistet ist. Dieser Druck kann immer erreicht werden. Nach oben bestehen

bei den Geräten bis zu 50 mbar (500 mm WS) - Propananlage - keine Schwierigkeiten. Vernünftigerweise sollte man sich auf einen einheitlichen Vorgabedruck einigen, auf den alle Gerätehersteller ihre Biogasgeräte einstellen. Zusätzliche Druckregler würden die Geräte sonst unnötig verteuern.

Kühlgeräte

Hier kommen Absorptionskältemaschinen in Betracht. "Allgas"-+++-Geräte werden gefertigt. Spezielle Versuche mit Biogas müssen durchgeführt werden. Mit Gasmotor betriebene Kompressorgeräte kleiner Leistung sind bisher nicht bekannt. Prinzipielle Schwierigkeiten für geeignete Gasmotoren dürften nicht bestehen, obwohl für diese allgemein erforderlichen geringen Leistungen große Serienfertigung nicht gegeben sein wird. Probleme sind beim automatischen Anlauf zu erwarten (siehe auch unter Gas-Wärme-Pumpe). Zur Zeit wird an der Entwicklung von direktgasbeheizten Absorptionswärmepumpen gearbeitet, die sowohl zur Wärmeversorgung als auch zur Kälteversorgung von Klimaanlage gedacht sind (113, 114).

Infrarotstrahler

Alle Infrarotstrahler sind abnahmepflichtig durch die zuständigen Gaswärmeinstitute und benötigen die DVGW-Anerkennung. Ein Hersteller von "Allgas"-Strahlern ist der Ansicht, daß durch Austausch der Keramik-Glühplatte und der Düse zufriedenstellende Arbeit möglich sein müßte. Andere Hersteller meinen, bei ihren Infrarotstrahlern, die auf Flüssiggas ausgelegt sind, habe Biogas keine Chance, da die hier bisher üblichen Strahler mit kürzesten Flammen und hohen Brenngeschwindigkeiten arbeiten und dies prinzipiell nicht zu Biogas passe. Hier können nur Einsatzversuche klar Auskunft geben, gegebenenfalls Abänderung der Brennerkonstruktion. Das wichtigste Kriterium für die DVGW-Anerkennung eines Gas-Infrarotstrahlers ist die CO-Freiheit der Abgase. Grundsätzlich müßten aber Allgas-Infrarotstrahler verwendbar sein. Die vorgeschlagene Lösung, zum Zünden der Brenner Flüssiggas zu verwenden und dann auf Biogas umzuschalten, dürfte nicht empfehlenswert sein.

Stationäre Verbrennungsmotoren

Erfahrungen mit durch Biogas betriebene Gasmotoren liegen bei verschiedenen Klärwerken vor, wo diese Motoren zum Antrieb von Belüftungsgebläsen und Generatoren meist höherer Leistung dienen.

Auch an anderer Stelle werden mit Treibgas (Propan) oder Methangas betriebene stationäre oder Fahrzeugmotoren eingesetzt.

Hersteller von Gasmotoren:

Jenbacher Werke, Jenbach-Österreich (serienmäßige Gasmotoren zwischen 30 und 2200 kW-Antriebsleistung)

MWM, Mannheim (serienmäßige Motoren zwischen 65 und 1200 kW)

MAN, Augsburg (Erdgasmotoren von 99 - 130 kW-Leistung)
Daimler-Benz, Stuttgart (Erdgasmotor M 407 hG)
Fordwerke (15 - 36 kW, entwickelt aus Kleinlastermotor).

In den fünfziger Jahren wurden mehrere Ackerschlepper mit auf Flaschen hoch verdichtetem Biogas (bis 350 bar) betrieben, nachdem sie versuchsmäßig entsprechend ausgerüstet worden waren (108). Eine Hochverdichtung des Gases war zum Transport auf dem Schlepper notwendig, um überhaupt nennenswerte Mengen tanken zu können, ist aber aus heutiger Sicht unwirtschaftlich wegen der erforderlichen mehrstufigen Verdichteranlage und der sehr hohen Sicherheitsauflagen (siehe auch Kapitel 6), das heißt, heute kann nur eine Verwendung im stationären Niederdruckgasmotor in Betracht gezogen werden, zum Beispiel zum Antrieb von Gebläsen, Pumpen, Fördergeräten, Generatoren u.a. Zur Vermeidung von Korrosionsschäden muß das H_2S herausgefiltert werden.

Biogas hat eine Oktanzahl von 100 - 110 ($ROZ > 100$; $CZ < 10$; Methanzahl 135), das heißt, es eignet sich sehr gut in Motoren mit höherer Verdichtung, aber es hat sehr schlechte Selbstzündeeigenschaften. Übliche Verdichtungen zwischen 8 und 11. Grundsätzlich unterscheidet man zwischen zwei möglichen Gasmotorenbrennverfahren:

- . Gas-Otto-Verfahren (Fremdzündung)
- . Gas-Diesel-Verfahren (geringe Zünddieseleinspritzung).

Auf das Gas-Otto-Verfahren lassen sich vorhandene Ottomotoren verhältnismäßig leicht umstellen, die Vergaseranlage muß lediglich gegen eine Gasmischvorrichtung ausgetauscht werden (wird gelegentlich bei Pkw- und Kleinlastermotoren gemacht).

Das Gas-Diesel-Verfahren arbeitet ohne Fremdzündanlage. Etwa 10 - 15 % des benötigten Vollmengenkraftstoffes wird als Dieselkraftstoff zum Zünden des Gemisches in den Zylinder eingespritzt, der Zündpunkt des Gas-Luft-Gemisches liegt höher als der für den zerstäubten Dieselkraftstoff. Wechselbetrieb, Gas-Diesel-Betrieb oder auch reiner Dieselbetrieb, ist möglich, falls Biogas nicht in ausreichender Menge vorhanden ist. Allerdings ist das Gas-Otto-Verfahren billiger im Betrieb.

Bei Umstellung von vorhandenen Dieselmotoren, zum Beispiel Altschlepper, auf Gasbetrieb, wären nach Auskunft der Industrie folgende Veränderungen vorzunehmen:

Gas-Otto-Verfahren

- . Zylinderkopf - Austausch - Zündkerzen
- . Neue Kolben mit niedrigerem Verdichtungsverhältnis und anderer Brennraumgestaltung
- . Einspritzpumpe entfällt

- . Spritzversteller entfällt
- : Antriebsgehäuse für Regler und Zündverteiler neu hinzu
- . Gasmischanlage neu hinzu, im allgemeinen auf üblichem Diesel-Saugrohr aufmontierter Gasmischer mit Drosselklappe
- . Gasdruckregler neu hinzu - dem Gasmischer vorgeschaltet
- . Enddrehzahlregler neu hinzu - verhindert ein Überdrehen des Motors durch zusätzliche Drosselklappe in der Ansaugleitung
- . Zündanlage neu hinzu (Zündspule, -verteiler, -kabel, -kerzen).

Gas-Diesel-Verfahren

- . Kolben-Verdichtungsverhältnis
- . Gasmischer neu hinzu
- . Regelorgane - Zu-/Abluft neu hinzu
- . Gasdruckregler für konstanten Vordruck neu hinzu.

Ein Umbau von Dieselmotoren - zum Beispiel Altschlepper als stationären Antriebsmotor - ist also im Prinzip möglich, es existieren aber von den Herstellern bisher keine Umbausätze. Ein Interesse zur Entwicklung solcher Umbausätze ist erst bei sichtbaren Absatzchancen zu erwarten, andernfalls muß auf spezielle neue Gasmotoren ausgewichen werden. Ein Umbau ist verständlicherweise nur in großen, gut ausgerüsteten Fachwerkstätten oder beim Hersteller selbst vertretbar. Umbaukosten können bisher nicht genannt werden.

Umrüsten auf Gasbetrieb bringt eine Leistungsminderung mit sich. Die Angaben über die Höhe schwanken etwas und reichen bis zu 30 % insgesamt (Diesel auf Erdgas ca. 20 %; Biogas gegen Erdgas ca. 10 %). Der erforderliche Fließdruck des Biogases am Motor muß mindestens 4 mbar betragen. Der spezifische Kraftstoffverbrauch für ein Biogas von 60 % Methananteil beträgt etwa $0,65 \text{ m}^3/\text{kWh}$ ($0,47 \text{ m}^3/\text{PSh}$) bei Vollast. Das erfordert für einen 50-kW-Motor bei Dauerleistung immerhin $32,5 \text{ m}^3$ Biogas/h, bei mittlerer Motorauslastung noch etwa 60 m^3 je Halbtag. Ein m^3 Biogas entspricht etwa 0,5 kg Dieselkraftstoff. Die Reinheit des Biogases führt zu erheblich geringerem Verschleiß als bei Dieselbetrieb. Wartungs- und Reparaturkostenaufwand für Gasmotoren wird mit jährlich etwa 1 % der Anschaffungskosten angegeben.

Stromerzeugung mit stationären Gasmotoren

Immer wieder wird auf die Möglichkeit hingewiesen, Überschubbiogas auch in Mittel- und Kleinanlagen über Gasmotoren in elektrischen Strom umzuwandeln. Die Industrie (z.B. Jenbacher Werke, MWM) bietet hier komplette Gasmotor-Generatorsätze an mit Generatorleistungen von 30 - 220 kVA. Inwieweit in einem Biogas-Betrieb Stromerzeugung wirtschaftlich ist, kann nur von Fall

zu Fall über eine genaue Kostenberechnung für die erzeugte kWh festgestellt werden. Verschiedentlich wurden im Gespräch als unterste Grenze für die sinnvolle Stromerzeugung 100-kVA-Aggregate genannt. Mittlere spezifische Anschaffungspreise für Gasmotoren und Komplett-Aggregate einschließlich der Einrichtungen für Abwärmeverwertung sind in Abbildung 25 dargestellt. Mit diesen Preisen lassen sich Überschlagskostenrechnungen anstellen.

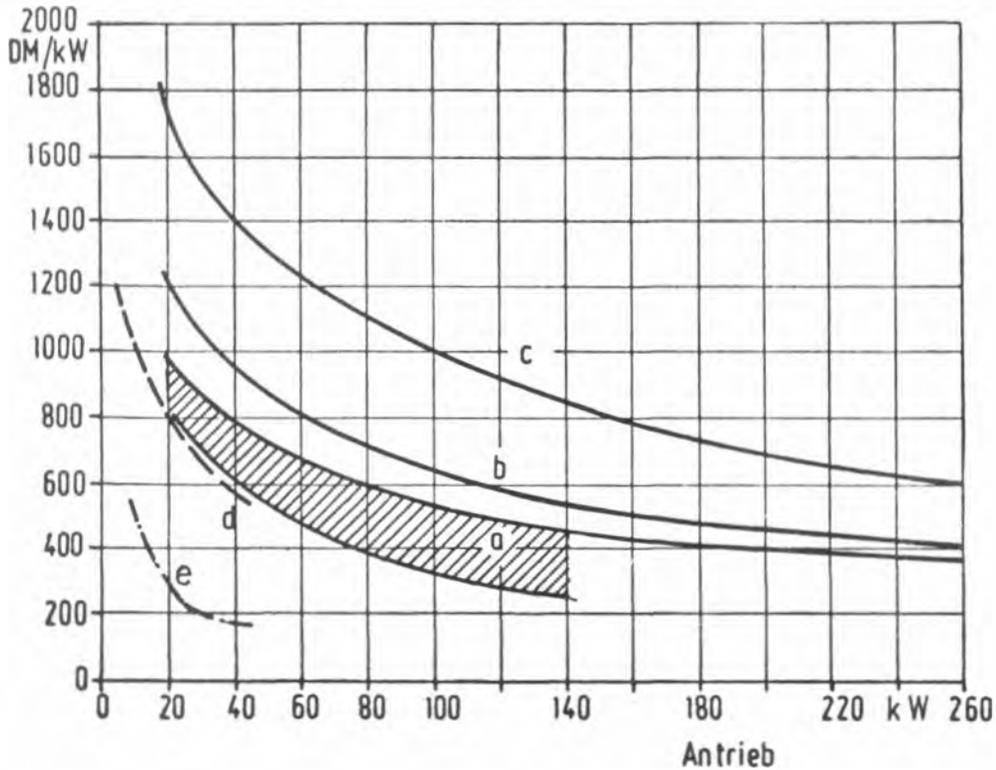


Abb. 25: Mittlerer spezifischer Anschaffungspreis von

- a Gasmotoren)
- b Gasmotoren mit Einrichtung zur Abhitzeverwertung) für
- c Gasmotor mit Einrichtung zur Abhitzeverwertung) Dauerbetrieb
- und Generator)
- d Diesel-Notstromaggregate
- e Otto-Gasmotoren

Bei Unterstellung, daß 1 m³ Biogas, je nach Wirkungsgrad, 1,6 - 1,9 kWh elektrischen Strom ergibt, ist die kWh schon von vornherein mit 52 - 65 % des Bereitstellungspreises eines m³ Biogases belastet. Dazu kommen dann die anteiligen Kosten für das Gas-Strom-Aggregat, je nach jährlicher Auslastung, mit 0,02 - 0,07 DM/kWh und auch noch ein Personalkostenanteil und eventuelle Kosten für Reservestromhaltung durch das EVU. Die Nutzung der Abwärme des Motors, wobei Gesamtwirkungsgrade von über 70 % möglich sind, reduziert die Kosten wieder. Näheres hierüber siehe im Kapitel "Kraft-Wärme-Kopplung". In jedem Fall muß eine Eigenstromversorgung und mögliche Einbindung ins öffentliche Netz (Parallelbetrieb) mit dem zuständigen EVU abgestimmt werden und auch die Art, wie der erzeugte Strom verwertet werden kann.

Folgende Verwertungsarten wären möglich:

1. 100 % Abgabe an EVU durch Einspeisung ins Netz (analog Laufwasserkraftwerk). Vergütung zur Zeit etwa mit 0,05 DM/kWh. Der Eigenstrombedarf wird völlig getrennt von der Stromabgabe wie üblich vom EVU bezogen. Kleinlieferanten werden vom EVU nicht besonders geschätzt wegen Schwierigkeiten bei der Netzregelung.
2. Inselbetrieb. Völlige Eigenstromversorgung. Keinerlei Reservehaltung vom EVU. Es ist hierbei schwierig, sich dem wechselnden Strombedarf des Betriebes anzupassen. Bei Defekten oder Gasmangel ist der Betrieb stromlos.
3. Eigenversorgung oder Teileigenversorgung mit Reservehaltung für Ausfall durch das EVU. Über einen Sonderabnehmervertrag muß diese Reservehaltung im allgemeinen relativ teuer bezahlt werden.

Daraus geht hervor, daß Stromerzeugung aus Biogas, wenn überhaupt, nur bei Dauerbetrieb der Generatoranlage sinnvoll sein kann. Dann müssen aber auch die entsprechenden Gasmengen zur Verfügung stehen, die in Tabelle 13 genannt sind. Stromerzeugung für den Eigenbedarf bei Einzelhoflage und fehlender Stromversorgung ist anders zu bewerten.

Tabelle 13: Erforderliche Biogasmengen für die Stromerzeugung

Generatorleistung (kVA)	30		100		200	
Jährliche Einsatzstunden (gleichmäßig auf das Jahr verteilt)	3 000	6 000	3 000	6 000	3 000	6 000
erforderliche Biogasmenge (m ³ /Tag)	160	320	540	1 080	1 080	2 160
bei Kraft-Wärme-Kopplung für Heizung nutzbar (MJ/Tag)	1 900	3 800	6 600	13 200	13 200	26 400

7.2 Kraft-Wärme-Kopplung

Kraft-Wärme-Kopplung ist die gleichzeitige Nutzung von mechanischer Energie (z.B. von einer Turbinen- oder Motorwelle) und der bei der Erzeugung dieser Energie entstehenden Wärmeenergie (Abwärme), zum Beispiel Nutzung der bei der Stromerzeugung in Kraftwerken entstehenden Abwärme zu Heizzwecken. Im industriellen Bereich wird dieses Prinzip zunehmend angewendet, um auf diese Weise den Wirkungsgrad der Primärenergieverwertung zu erhöhen (3, 97).

Im Zusammenhang mit der Biogasverwertung bestehen Möglichkeiten der Kraft-Wärme-Kopplung immer dort, wo Biogas zum Antrieb von Gasmotoren verwendet wird. Motoren nutzen im Durchschnitt nur etwa 30 % der Kraftstoffenergie an der Motorwelle aus, z.B. zum Antrieb von

- . Gebläsen
- . Wärmepumpen
- . Generatoren (Stromerzeugung).

Wenigstens ein Teil der Abwärme von etwa 70 % (Kühlung, Abstrahlung, Verbrennungsgase) läßt sich wieder nutzbringend einsetzen.

Kraft-Wärme-Kopplung bei Gebläseantrieb

Eine relativ einfache Kraft-Wärme-Kopplung ist möglich beim Antrieb von Gebläsen für die verschiedensten landwirtschaftlichen Trockner durch Gasmotoren. Bis auf einen geringen Abstrahlungsverlust von etwa 10 % kann die übrige Abwärme (60 % des Kraftstoffes) zur Erwärmung des Luftstromes genutzt werden - Kühlluft und Abgas können dem Luftstrom beigemischt werden. Schon heute arbeiten Heißlufttrockner sowie andere Trockner, die Flüssiggas zur Lufterwärmung verwenden, ohne Wärmetauscher, nur mit Direktlufterhitzung. Nach neueren Untersuchungen und Auswertung älterer Versuche (43) ist auch bei Verwendung des ungünstiger zu bewertenden Heizöls zur Direktlufterwärmung mit keinen schädlichen Auswirkungen auf das Trockengut zu rechnen, wenn entsprechende Sorgfalt angewendet wird.

Die möglichen Lufterwärmungen aus der Abwärme von Antriebsmotor und Gebläse sind aus Tabelle 14 zu entnehmen. Sie sind bei der hohen Luftleistung zwar nicht hoch, aber doch in dem bei der Heutrocknung üblichen Rahmen von 3 - 4° C. Zu beachten ist, daß auf diese Weise im allgemeinen nur in einer kurzen Kampagnezeit Biogas verbraucht werden kann, allerdings mit einem sehr guten Wirkungsgrad. Die Möglichkeiten für den Einsatz einer Gaswärmepumpe, die im Winter für die Wohnhausheizung Verwendung finden könnte, müßten genauer untersucht werden.

Tabelle 14: Biogasbedarf für Gebläseantrieb mit Gasmotor und mögliche Lufterwärmung aus der Abwärme

Antriebsleistung (kW)	Ø Volumenstrom des Gebläses bei Druck von		Biogasverbrauch für Antrieb (m ³ /h)	mögliche Lufterwärmung aus der Abwärme (°C)
	0,4 mbar (m ³ /h)	0,6 mbar (m ³ /h)		
10	44 000	36 000	6,5	2,5 - 3,0
20	68 000	58 000	13	3,1 - 3,7
30	93 000	82 000	19,5	3,4 - 3,9
50	142 000	125 000	32,5	3,8 - 4,3

Kraft-Wärme-Kopplung bei Wärmepumpen

Das Prinzip der Wärmepumpe ist seit langem bekannt. Sie erzeugt keine Wärme, sondern sie hebt die in Luft, Wasser, Erde vorhandene Wärme sowie auch die verschiedensten Formen der Abwärme auf ein höheres Temperaturniveau, so daß sie wieder nutzbar sind. Der Wärmepumpenprozeß erfordert zum Antrieb den Einsatz von mechanischer Energie in der Kompressionswärmepumpe oder von thermischer Energie in der Absorptionswärmepumpe. In beiden Fällen kann Biogas zum Einsatz kommen. Über den Aufbau (Abb. 26) und die Anwendung der Wärmepumpe ist verschiedentlich berichtet worden (33, 96, 127, 128, 129), ihre prinzipiellen Einsatzmöglichkeiten in der Landwirtschaft hat ORTH (81) eingehend untersucht. Je höher die Leistungsziffer ist, um so sinnvoller wird ihr Einsatz. Die Leistungsziffer hängt ab von der Temperaturdifferenz zwischen Umgebungswärme (Verdampfer) und Heizungs-vorlauf (Kondensator) - sie fällt mit steigender Temperaturdifferenz - sowie vom Wärmepumpensystem. Als mittlere Leistungsziffer rechnet man bei:

Luft/Luft-Wärmepumpe	$\epsilon = 2,5$
Luft/Wasser-Wärmepumpe	$\epsilon = 2,5$
Erde/Wasser-Wärmepumpe	$\epsilon = 3,0$
Wasser/Wasser-Wärmepumpe	$\epsilon = 4,0$
Abwärme-Wasser-Wärmepumpe	$\epsilon = \text{bis } 6,0.$

Antrieb der Wärmepumpe durch einen Gasmotor bietet durch die Möglichkeit der Kraft-Wärme-Kopplung, das heißt, weitgehende Ausnutzung der Motorabwärme mit hohem Temperaturniveau zum Beispiel in einem gemeinsamen oder getrennten Heizwasserkreislauf (Abb. 27) eine weit bessere Ausnutzung der Primärenergie als bei konventionellem Heizkessel oder Elektrowärmepumpe. Je nach erreichbarer Leistungsziffer schwankt die Höchstaussnutzung. BEYER (12) gibt für eine Luft-Wasser-Wärmepumpe die in Tabelle 15 aufgeführte nutzbare Wärmeenergie an.

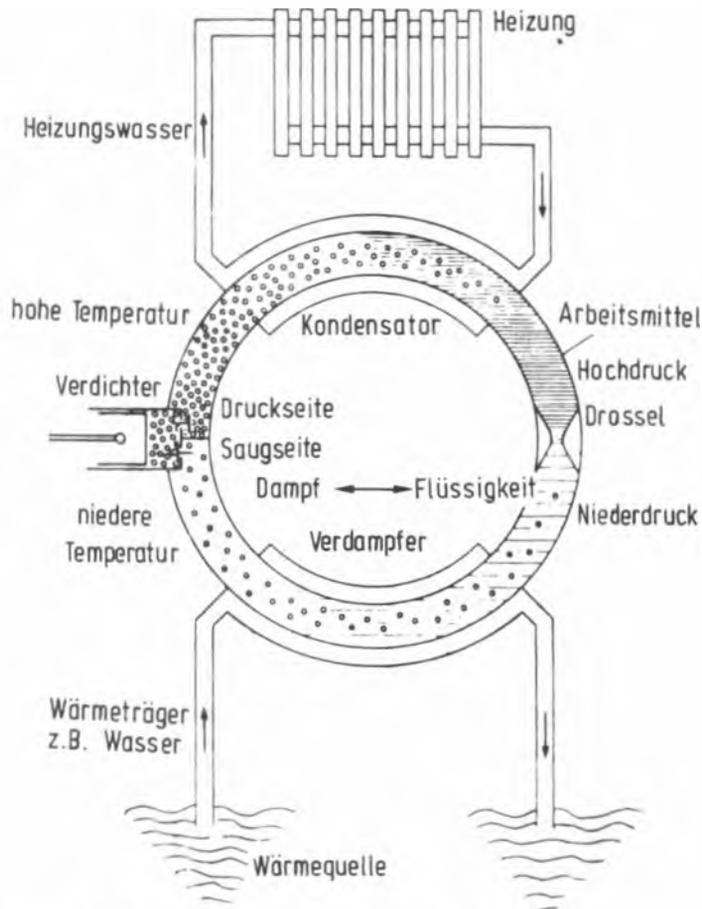


Abb. 26: Wärmepumpenkreislauf (128)

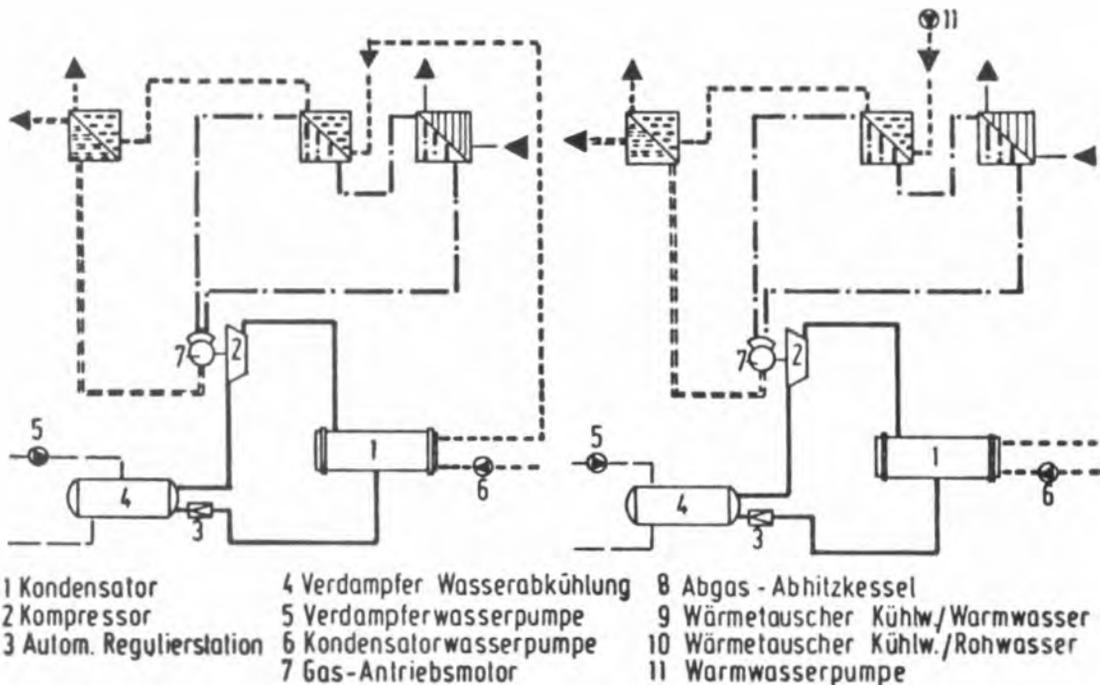


Abb. 27: Schema für Kraft-Wärme-Kopplung bei Gasmotor mit Wärmepumpe (Sulzer-Escher Wyss)

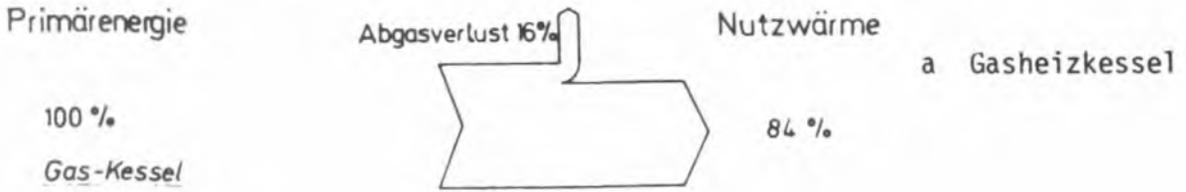
Tabelle 15: Vergleichende Energiebilanzen verschiedener Luft-Wasser-Wärmepumpen (12)

	Primär- energie	ergibt nutz- bare Wärme	für 100 % Nutzenergie erforderliche Primär- energie
	%	%	%
Klassischer Heiz- kessel (Gas)	100	75	133
Elektrowärmepumpe	100	97	103
Gas-Kompressions- wärmepumpe	100	179	56
Gas-Absorptions- wärmepumpe	100	120	83

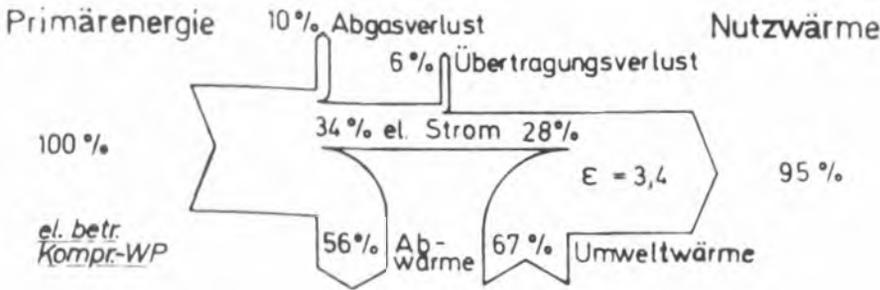
Die entsprechenden Energieflußbilder zeigt Abbildung 28.

Die Gas-Kompressions-Wärmepumpe bietet bei Kraft-Wärme-Kopplung eindeutig die höchste Primärenergieeinsparung. Gegenüber der Elektrowärmepumpe weist sie unter anderem folgende Vorteile auf (12):

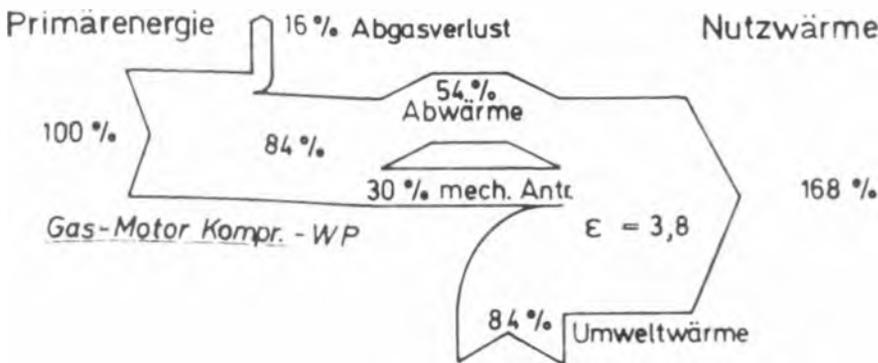
- . Zusätzlicher Wärmegewinn von ca. 58 % aus Motorwärme
- . Durch Abwärmenutzung niedrigere Kondensationstemperaturen möglich und damit höhere Leistungsziffern
- . Auch unter 0°C Außentemperatur wirtschaftliches Arbeiten ohne Zusatzheizung möglich
- . Für gleiche Nutzwärme ist kleinere Wärmepumpe erforderlich (in der Regel 30 - 50 % kleiner)
- . Mit dem üblichen Sicherheitskältemittel R 22 läßt sich lediglich eine Heizwassertemperatur von ca. 55°C erreichen, geeignet nur für Fußbodenheizung. Über die Motorwärmenutzung läßt sich die Heizwassertemperatur bis auf 90°C anheben und ist damit geeignet für herkömmliche Radiatoren
- . Stufenlose Leistungsregulierung durch Motordrehzahländerung im Bereich von ca. $900 - 1\,500\text{ min}^{-1}$. Weitere Leistungsregelung durch Ventilatlabhebungen bei den Kompressoren möglich, somit insgesamt stufenlose Leistungsregelung von 100 % - 15 % möglich. Die elektrische Wärmepumpe wird nur über Intervallschaltung geregelt, weil drehzahlregelbare Elektromotoren (z.B. Phasenausschnittsteuerung) wesentlich teurer sind und auch Anschlußprobleme verursachen.



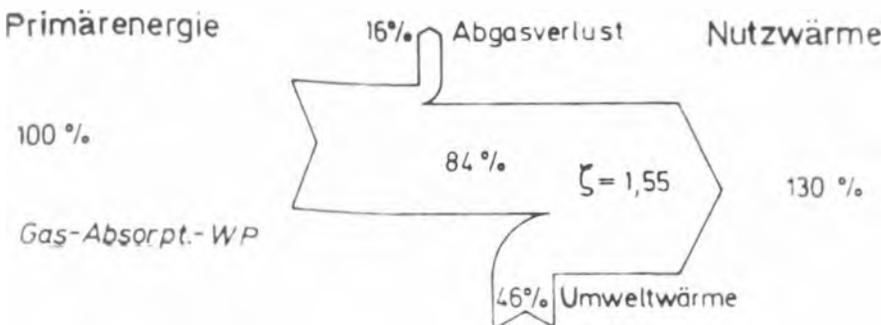
a Gasheizkessel



b Elektro-Kompressions-Wärmepumpe



c Gas-Kompressions-Wärmepumpe



d Gas-Absorptions-Wärmepumpe

Abb. 28: Energieflußbilder für Wärmepumpe (114)

Trotz der hohen Einsparungen an Primärenergie kann die Gas-Kompressions-Wärmepumpe jedoch nur dann mit anderen Heizsystemen konkurrieren, wenn sowohl die Wirtschaftlichkeit als auch die Störungsfreiheit gewährleistet ist. Die Wirtschaftlichkeit wird von der Energiekostenrelation (z.B. Strom, Heizöl) wesentlich beeinflusst, aber auch von den Investitionskosten. Durch zukünftige Serienproduktion ist hier durchaus noch eine Kostensenkung zu erwarten. Eine theoretische Kostenberechnung für den Wärmebedarf von 20 kW (Tab. 16) läßt besonders die Gaswärmepumpe schon recht günstig erscheinen (96). Abschreckend wirkt hier vielleicht noch die hohe Erstinvestition.

Tabelle 16: Vergleich der jährlichen Gesamtkosten verschiedener Heizverfahren ($Q_H = 21 \text{ kW}$, 1800 Betriebsstunden) in DM (96)

		Öl- heizung	Gas- heizung	Elektr. Wärmepumpe		Gas- Wärme- pumpe	
				monovalent	parallel		alternativ
Investition	Aggregat	7 000	3 000	17 000	8 200 1 000	8 200 4 500	13 000
	Baumaterial	5 000	2 000	-	2 000	3 000	2 000
	Gesamt	12 000	5 000	17 000	11 200	15 700	15 000
Kapitalkosten		1 226	469	2 533	1 487	1 992	2 100
Wartung und Bedienung		400	200	520	460	660	800
Energie- verbrauch		1 744	1 970	2 260	2 230	1 340	1 000
Totalkosten		3 370	2 639	5 313	4 177	3 992	3 900

Gas-Kompressions-Wärmepumpen ab 30 kW Antriebsleistung entsprechend über 450 bis etwa 650 MJ/h (125 - 175 kW) Heizleistung werden bereits von der Industrie serienmäßig mit ausgereiften Motoren angeboten, die ersten Anlagen sind im Einsatz. BEYER (12) rechnet bereits für diese Größe gemäß VDI-2067 geringere Gesamtkosten aus als für konventionelle Wärmeerzeuger. Die hier zum Einsatz kommenden Gasmotoren sind erfahrungsgemäß sehr robust. Zum Teil geben die Hersteller Garantien von mehreren Jahren. Der Biogasbedarf würde bei voller Leistung bei ca. 20 m³/h liegen.

Gas-Kompressions-Wärmepumpen über 175 kW Heizleistung (150 000 kcal/h entsprechend 30 kW-Antriebsleistung) lassen sich beim heutigen Stand der Technik grundsätzlich aus konventionellen Komponenten aufbauen. Anlagen bis zu 4 000 kW Heizleistung (700 kW Antriebsleistung) sind in Betrieb (12, 88). Neuentwicklungen sind jedoch erforderlich, wenn man kleine Gas-Wärmepumpen zur Heizung von Einfamilienhäusern einsetzen will, die konventionellen Heizungssystemen im Gebrauch ebenbürtig und in der Wirtschaftlichkeit möglichst überlegen sein sollen. Hier existiert noch keine befriedigende technische Lösung (Geräuscharm, Vibrationsarm, Kompaktheit, einfache Regelung, einfache Wartung, Störungsfreiheit). Mit Unterstützung des BMFT läuft zur Zeit ein Gemeinschaftsprojekt der Firmen Ruhrgas, Audi NSU und VW zur Lösung dieser Aufgaben (88), und es ist zu erwarten, daß hier in der Zukunft geeignete Lösungen gefunden werden. Bei Ruhrgas laufen zur Zeit die ersten Kleinstgaswärmepumpen (Luft/Wasser) auf Pkw-Serienmotoren aufbauend (Polo, Passat), wo zum Beispiel zwei Zylinder als Antrieb und zwei Zylinder als Kompressor benutzt werden. Es wird erwartet, daß die ersten Prototypen Ende 1978 zur Verfügung stehen. In der Landwirtschaft werden gerade diese Gas-Wärmepumpen niedriger Leistung Verwendung finden können. Denkbar ist auch der Einsatz der Gas-Wärmepumpe im Umluftbetrieb bei Getreide- und Heutrocknern. Die üblichen Satz- und Durchlaufgetreidetrockner haben eine Trockenleistung von 1 - 2 t Getreide/h und dabei eine installierte Heizleistung von 80 - 160 kW. Bei guter (überbetrieblicher) Auslastung sind 800 Einsatzstunden je Kampagne im Sommer möglich.

Kraft-Wärme-Kopplung bei Stromerzeugung

Bei einer Stromerzeugung aus Biogas werden nur etwa 30 % des Energieinhaltes in elektrischen Strom umgewandelt, der Rest ist Abwärme. 55 - 60 % des Energieinhaltes ließen sich also theoretisch noch verwerten über Wärmetauscher und Abhitzeessel, natürlich mit entsprechendem technischen und finanziellen Aufwand. Für den finanziellen Aufwand können keine Durchschnittswerte genannt werden. In Tabelle 13 ist für entsprechende Generatorleistungen die zusätzlich nutzbare Wärmeleistung angegeben. Diese Wärme könnte im landwirtschaftlichen Betrieb eingesetzt werden für:

- . Warmwasserbereitung für Haushalt und Viehhaltung
- . Wohnhausheizung
- . Warmluftbereitung für Trocknung (siehe auch Kraft-Wärme-Kopplung bei Gebläsen) oder Stallklimatisierung
- . Prozeßwärme für Faulbehälter
- . Heizung von Gewächshäusern.

Im Normalfall ist der Viehbestand über das Jahr konstant; damit könnten konstanter Strom und konstante Zusatzwärme erzeugt werden. Das Problem wird immer die sinnvolle gleichmäßige Verwertung sowohl der Elektrizität als auch der Wärme sein - um so mehr, je kleiner die Anlage. Jeder nicht

verwertbare Überschuß verteuert die genutzte Energieeinheit. Im gegebenen Fall müßte für den Betrieb ein Jahresdiagramm über voraussichtliche Biogaserzeugung und den Bedarf an Elektro- und Wärmeenergie aufgestellt werden, an Hand dessen man über die Verwertung des zeitlich anfallenden Überschusses oder der Beschaffung des zeitlichen Zusatzbedarfes Überlegungen anstellen müßte.

Abbildung 29 zeigt entsprechende Diagramme eines Klärwerkes (3) für 140 000 Einwohner (entsprechend ca. 5 000 GV). Hieraus ergibt sich, daß die mögliche Stromerzeugung immer höher ist als der Eigenstrombedarf und das Wärmeangebot aus der Stromerzeugung ebenfalls in zehn Monaten des Jahres höher liegt als der Eigenwärmebedarf. Eine Kostenvergleichsrechnung für die drei Varianten

- A. Stromversorgung 100 % EVU, Wärmeversorgung aus klärgasbefeuertem Heizkessel, Abfackelung des Überschuß-Klärgases (ca. 60 %);
- B. Eigenstromerzeugung (1 x 660 kW) bei 100 % Reservehaltung durch EVU, Klärgasspeicher zum Ausgleich von Tagesschwankungen, Grundwärmeversorgung aus Gasmotoren-Abwärme, Spitzenwärmeversorgung über Klärgasheizkessel, Abfackelung des Überschuß-Klärgases (ca. 20 %);
- C. Eigenstromerzeugung (3 x 330 kW) bei 50 % Reservehaltung durch EVU, Klärgasspeicher, Grundwärmeversorgung aus Gasmotoren-Abwärme, Spitzenwärmeversorgung über Klärgasheizkessel, Abfackelung des Überschuß-Klärgases (ca. 20 %);

ergab für Variante C zwar eine Absenkung der Energiekosten auf ca. 10 %, aber der Gesamt-Jahreskosten nur auf 85 %. Weitere Kostenreduzierung wäre zu erwarten bei echter Einbindung in das öffentliche Stromnetz (Parallelbetrieb) und Auffinden weiterer Wärmeabnehmer. Bei kleinen Biogasanlagen dürften Kosteneinsparungen in diesem Umfang nicht zu erwarten sein.

Fiat hat, aufbauend auf dem Motor des "Fiat 127", für Antrieb durch Erdgas oder Biogas eine kompakte Kraft-Wärme-Einheit entwickelt, "Totem", (138) die elektrischen Strom (15 kW 380 V Drehstrom) und Warmwasser (145 MJ/h bzw. 35 000 kcal/h) liefert. Der stündliche Bedarf an Biogas würde bei etwa 10 m³/h liegen. Die Stundenkosten werden mit 0,2 Dollar kalkuliert. Die gleiche Leistung als Strom vom EVU und Heizkesselkosten würden etwa 0,113 Dollar kosten, die Differenz entspricht gerade der Energieeinsparung. Abbildung 30 zeigt das Energie-Flußbild dieser Kompakteinheit, die auch Einsatzchancen in der Landwirtschaft hätte.

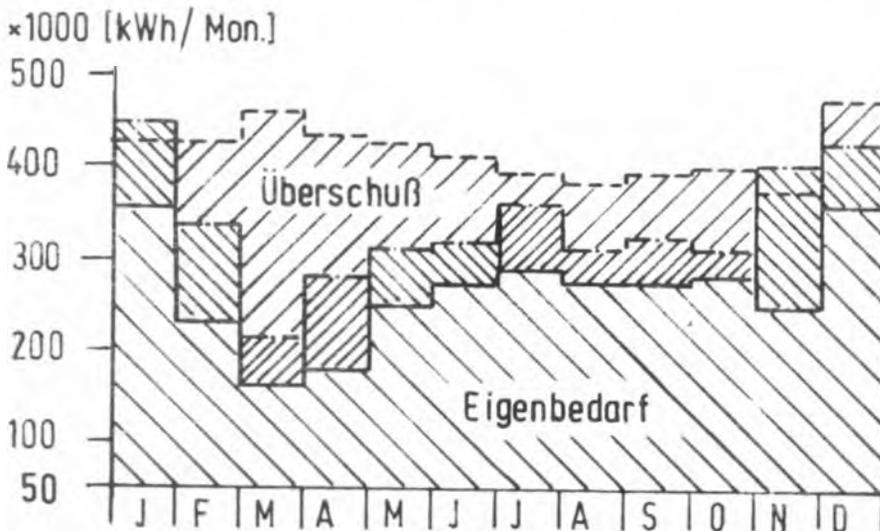
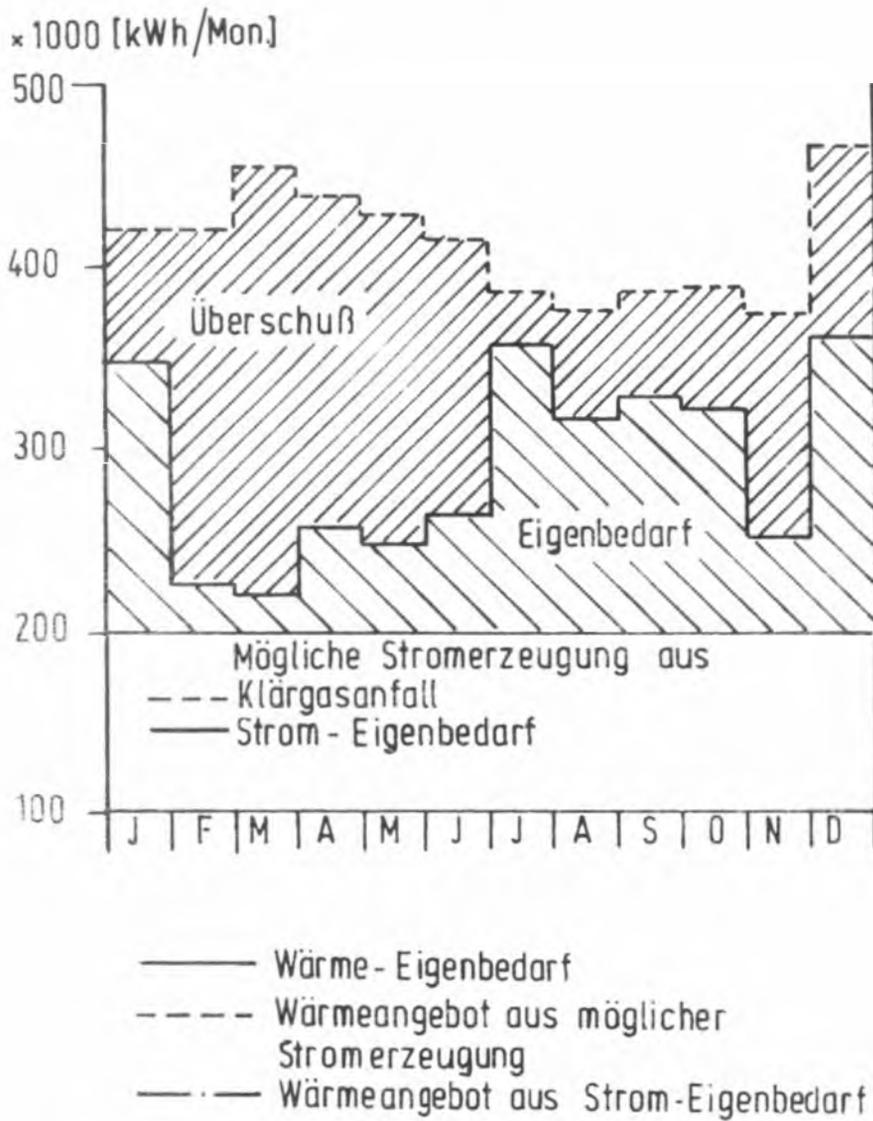


Abb. 29: Jahresverlauf für Elektroenergie (oben) und Wärmeenergie (unten) eines Klärwerks (3)

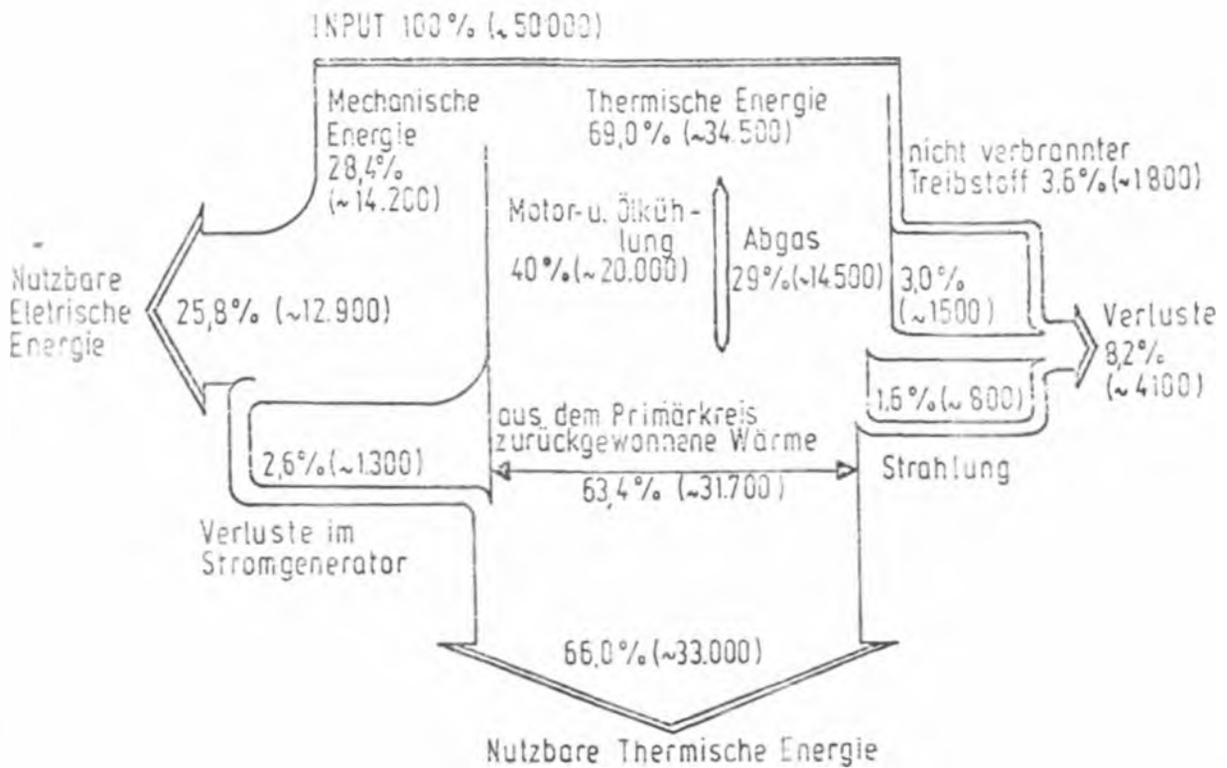


Abb. 30: Energie-Flußdiagramm des "Totem" (Total energy module) Kompaktgerätes der Fiat Automobilwerke (138). Zahlen in Klammern stellen die jeweiligen Energiewerte in kcal/h dar

8. Energiebedarf landwirtschaftlicher Betriebe, der durch Biogas gedeckt werden kann

Es soll unterschieden werden in Biogasbedarf für:

- landwirtschaftlichen Haushalt
- pflanzliche Produktion
- tierische Produktion
- verschiedene Modellbetriebe.

Voraussetzung ist nicht unbedingt, daß der Betrieb selbst Vieh hält, er könnte auch von einem Nachbarbetrieb versorgt werden. Biogasanlagen nur für pflanzliche Abfälle (z.B. Stroh) dürften nicht sinnvoll sein. Aus einem kg Stroh lassen sich über das Biogasverfahren nur etwa 4,2 MJ Energie erzeugen, ohne daß das Abfallproblem gelöst ist, über Direktverheizen dagegen das dreifache.

8.1 Landwirtschaftlicher Haushalt

In der Bundesrepublik Deutschland gibt es etwa 929 000 landwirtschaftliche Haushalte (147) mit etwa 3 258 300 erwachsenen Mitgliedern und 928 000 Kindern unter 14 Jahren. Das ergibt eine durchschnittliche Haushaltszusammensetzung von drei bis vier (3,5) Erwachsenen und einem Kind. Für die weiteren Berechnungen sind vier Modellhaushalte unterstellt (Tab. 17).

Tabelle 17: Modellhaushalte, Unterstellungen

Haushalt	A	B	C	D
Anzahl Erwachsene	3	3	4	5
Anzahl Kinder	-	1	2	3
Personen insgesamt	3	4	6	8
Wohnfläche (m ²)	100	120	150	200

Da keine genaue Statistik über die Zuordnung der beheizten Wohnfläche zu diesen Haushaltsmodellen bekannt ist, werden auf Grund von Erfahrungswerten folgende Wohnflächen und gerätetechnische Ausstattungen zugeordnet. Die Haushaltswohnfläche wurde etwa 10 % größer gewählt als für den nicht landwirtschaftlichen Wohnbereich (137).

Für einen Haushalt mit zentraler Warmwasserversorgung (106), wie heute in der Landwirtschaft üblich, kann für die Warmwasserbereitung einschließlich Waschen und Spülen bei Verwendung von Erdgas ein spezifischer Energiebedarf unterstellt werden von:

- 5 225 MJ/Jahr je erwachsene Person (1 248 Mcal/Jahr)
- 2 670 MJ/Jahr je Kind (638 Mcal/Jahr).

Dies ergibt für die Modellhaushalte einen Energie- und Biogasbedarf für die Warmwasserbereitung gemäß Tabelle 18.

Tabelle 18: Energie- und Biogasbedarf für Warmwasserbereitung

Haushalt	MJ/Jahr	MJ/Tag	(Mcal/Tag)	Biogas	
				m ³ /Jahr	m ³ /Tag
A	15 675	42,9	(10,24)	712	1,9
B	18 345	50,3	(12,00)	834	2,3
C	26 240	71,9	(17,15)	1 193	3,3
D	34 130	93,5	(22,32)	1 555	4,3

Für eine dezentrale Warmwasserversorgung (106) kann im allgemeinen ein etwa 16 - 17 % geringerer Energiebedarf angesetzt werden. Sie wird in der Landwirtschaft jedoch weniger angewendet.

Für die Raumheizung werden eine tiefste Außentemperatur von -15°C sowie 220 Heiztage unterstellt (106).

Nicht klar aufzugliedern ist die Bausubstanz in der Landwirtschaft. Nach dem Gesetz zur "Einsparung der Energie in Gebäuden" (Energieeinsparungsgesetz) vom Juli 1976 müssen neue beheizte Gebäude einen vollen Wärmeschutz aufweisen. Der spezifische Wärmebedarf von 116 W/m^2 ($100\text{ kcal/m}^2\cdot\text{h}$) darf nicht überschritten werden. Die in der Landwirtschaft vorhandenen älteren Gebäude haben einen höheren spezifischen Wärmebedarf.

Für drei Wärmedämmstufen gibt Tabelle 19 den Jahresbedarf an Heizenergie und Biogas für die Modellhaushalte an.

- Wärmedämmstufe I: gemäß Energieeinsparungsgesetz; spezifischer Wärmebedarf 116 W/m^2 ($100\text{ kcal/m}^2\cdot\text{h}$)
- Wärmedämmstufe II: bisher übliche gute Wärmedämmung; spezifischer Wärmebedarf 128 W/m^2 ($110\text{ kcal/m}^2\cdot\text{h}$)
- Wärmedämmstufe III: Altbauten mit geringer Wärmedämmung; spezifischer Wärmebedarf 191 W/m^2 ($165\text{ kcal/m}^2\cdot\text{h}$).

Tabelle 19: Energie- und Biogasbedarf für Hausheizung (Warmwasserzentralheizung mit Gasfeuerung) im konventionellen Gaskessel

Wärmedämmstufe	Energiebedarf für Haushalt				Biogasbedarf für Haushalt			
	A	B	C	D	A	B	C	D
	(MJ/Jahr)				(m ³ /Jahr)			
I	102 655	123 185	153 980	205 310	4 666	5 600	6 700	9 336
II	112 710	135 255	169 070	225 420	5 123	6 148	7 685	10 246
III	185 620	222 740	278 425	371 235	8 437	10 150	12 656	16 876

Beim Einsatz einer Gas-Kompressions-Wärmepumpe zum Heizen anstelle eines Gasheizkessels werden nur etwa 42 % Gas benötigt (siehe Kapitel 7).

Der durchschnittliche Biogastagesbedarf kann nur über die prozentuale Aufteilung des Jahresheizbedarfes auf die einzelnen Monate ermittelt werden (150). Tabelle 20 gibt diese Werte für den Modellhaushalt B in der Wärmedämmstufe II an.

Tabelle 20: Täglicher Biogasbedarf für die Wohnhausheizung in Abhängigkeit vom Heizmonat (Haushalt B, Wärmedämmstufe II)

Monat	Anteil der Jahres- heizenergie (150) %	Biogasbedarf	
		monatlicher Anteil (m ³ /Monat)	Tagesbedarf (m ³ /Tag)
Januar	16,5	1 014	33,0
Februar	15,0	922	33,0
März	12,5	768	25,0
April	8,0	492	16,5
Mai	5,0	307	10,0
Juni	1,8	111	3,5
Juli	1,5	92	3,0
August	1,2	74	2,5
September	4,0	246	8,0
Oktober	7,5	462	15,0
November	12,0	738	24,5
Dezember	15,0	922	30,0
insgesamt	100,0	6 148	-

Für Kochen und Backen ergibt sich bei Unterstellung durchschnittlicher Koch- und Backgewohnheiten und eines mittleren, gemischten Speisezettels (3 warme Mahlzeiten mit einem mittlerem Energieinhalt von 12,5 MJ/Person = 3 000 kcal/Person) ein Energietagesbedarf pro Person von 3,14 MJ bei Verwendung von Erdgasgeräten (106). Damit ergibt sich der in Tabelle 21 genannte Biogasbedarf zum Kochen. Er entspricht auch in etwa dem angegebenen Kochstromverbrauch (133). Der Wirkungsgrad von Gas und elektrischem Strom ist beim Kochen in etwa gleich.

Tabelle 21: Energie- und Biogasbedarf zum Kochen

Haushalt	A	B	C	D
Kochstrombedarf (kWh/Tag)	2,26	2,70	3,30	5,70
Energiebedarf bei Gas (MJ/Tag)	9,50	12,6	15,7	25
Biogasbedarf (m ³ /Tag)	0,5	0,6	0,7	1,2

Für den Betrieb von Haushalts-Kühl- und Gefriergeräten mit Biogas kommen nur Absorptions-Kühlgeräte in Betracht, die auch auf dem Markt sind. Die Ausrüstung der Haushalte ist hier sehr unterschiedlich. Die Zuordnung (105) mit dem entsprechenden Energie- und Biogasbedarf ist in Tabelle 22 angegeben. Allerdings gelten die in der Literatur genannten Verbrauchswerte für Kompressorkühlgeräte. Der Verbrauch von Absorptionsgeräten ist mit 100 % höher anzusetzen, dies ist bei der Umrechnung auf Biogas berücksichtigt.

Tabelle 22: Energie- und Biogasbedarf für Kühl- und Gefriergeräte

Haushalt		A	B	C	D
Kühlschrank	(1)	150	200	250	300
Tiefkühltruhe	(1)	400	500	500	800
Strombedarf					
Kühlschrank	(kWh/Tag)	1,1	1,8	2,4	3,0
Tiefkühltruhe	(kWh/Tag)	2,7	3,2	3,2	4,2
	insgesamt	3,8	5,0	5,6	7,2
Biogasbedarf	(m ³ /Tag)	1,4	1,9	2,1	2,7

Zusammenfassend wird in Tabelle 23 für den Haushalt der mögliche Gesamt-Biogas-Tagesbedarf in Abhängigkeit von dem Monat genannt, und zwar für den Haushalt B, Wärmedämmstufe II. Dieser Haushalt wird auch in Kapitel 8 für die Modellbetriebe zugrundegelegt.

8.2 Pflanzliche Produktion

In der pflanzlichen Produktion können mit Biogas folgende Teilbereiche ganz oder teilweise versorgt werden:

Grüngut-Heißlufttrocknung, Heu-Unterdachttrocknung, Getreidetrocknung, landwirtschaftliche Brennereien, Gewächshäuser.

Der Energiebedarf in der Grünfütter-Heißlufttrocknung ist abhängig vom notwendigen Wasserentzug, um das bei sehr unterschiedlicher Feuchtigkeit geerntete Gut auf eine die Lagerung ermöglichende Endfeuchtigkeit zu bringen. 1972 gab es im Bundesgebiet 83 Heißluft-Trockner mit einer durchschnittlichen Wasserverdampfungskapazität von 4,48 t/h (141).

Für eine Überschlagsrechnung des Energieverbrauchs und dessen mögliche Abdeckung mit Biogas dienen die Durchschnittswerte der Tabelle 24.

Tabelle 23: Möglicher Biogasverbrauch im Haushalt (Haushalt B, Wärmedämmstufe II) in Abhängigkeit vom Monat in m³/Tag

	Jan.	Febr.	März	Apr.	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.
Warmwasserbereitung	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
Wohnhausheizung	33,0	33,0	25,0	16,5	10,0	3,5	3,0	2,5	8,0	15,0	24,5	30,0
Kochen und Backen	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Kühlen und Gefrieren	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9
insgesamt	37,8	37,8	29,8	21,3	14,8	8,3	7,8	7,3	12,8	19,8	29,3	34,8

Tabelle 24: Leistungsdaten und Energiebedarf von Grünfütter-Heißluft-Trocknungsanlagen

Wasserverdampfung (t/h)	Ø Frischgutmenge bei 80 % Feuchte (dt/h)	Ø Trockengutmenge bei 14 % Feuchte (dt/h)	Heizölbedarf (l/h)	Biogasbedarf		
				(m ³ /h)	tägl. Trockendauer 10 h (m ³ /Tag)	24 h (m ³ /Tag)
2,7	23,7	7,2	259	405	4 050	9 750
10	88,1	26,7	801	1 250	12 500	30 000
35	307,8	93,3	2 426	3 790	37 900	91 000

1) Bei einem Wasserentzug von 330 kg H₂O/dt Trockengut und einer tatsächlichen Wasserverdampfungsleistung der Anlage von ca. 89 %

Die Kampagne dauert ungefähr drei Monate, wobei kleine Anlagen eine Auslastung von ca. 1 000 h und große Anlagen von ca. 2 400 h aufweisen.

Die Heu-Unterdachtrocknung als Belüftungstroeknung sowie auch mit geringer Luftvorwärmung (3-4⁰ C) über Öl- oder Gasluftherhitzer ist sehr verbreitet. Mit 1 kJ Heizleistung kann 1 m³ Luft etwa um 1⁰ C erwärmt werden. In zunehmendem Maße werden auch Trockner mit höherer Luftanwärmung (bis etwa 20⁰ C) eingesetzt, die innerhalb 24 Stunden das Gut lagerfähig troeknen. Aus Tabelle 25 sind die wichtigsten Daten über Energiebedarf und erforderliches Biogas zu entnehmen. Man kann mit Gas nur die Luftherwärmung durchführen, man kann aber auch über einen Gasmotor die Gebläse antreiben und die Abwärme gleichzeitig zur Luftherwärmung verwenden (siehe Tabelle 14), die dann gerade etwa 4⁰ Luftanwärmung ergibt.

Tabelle 25: Energie- und möglicher Biogasbedarf für die Warmluft-Unterdachtroeknung (Einfahrfeuchte 30 - 40 %)

Einfahr- menge (dt/ Woche)	Volumenstrom des Gebläses für mittlere Klimazone ¹⁾ 0,4 mbar (m ³ /h)	notwendige Antriebs- leistung für das Gebläse (kW)	mittlere Heizleistung für 4 ⁰ C Luftherwärmung (MJ/h)	Biogasbedarf nur für die Luftherwärmung 10 h/Tag (m ³ /Tag)	Biogasbedarf für Gebläse- antrieb mit Gasmotor (m ³ /h)
40	14 400	2,5	60	27,5	-
60	21 600	4,5	90	41,0	-
80	28 800	5,5	120	55,0	(3,6)
100	36 000	7,0	150	68,5	(4,6)
120	43 200	10,0	180	82,0	6,5

¹⁾ Für die mittlere Klimazone sind 100 h/Woche mit ≤ 70 % Luftfeuchtigkeit unterstellt. Schwankungen von 80 bis 125 h/Woche rechtfertigen auch Gebläseleistungen mit ± 20 %.

Für Unterdachtroeknungsanlagen, die mit höherer Luftanwärmung arbeiten, sind in Tabelle 26 Angaben gemacht worden.

Tabelle 26: Energiebedarf für Heu-Unterdachtrocknung mit verschieden hoher Luftanwärmung und verschiedenen Füllmengen (49)

Einfahrfeuchtigkeit (%)		30 - 40	40 - 50	50 - 60	> 60
Luftanwärmung (°C)		bis 10	10 - 20	20 - 30	30 - 40
Trocknungsdauer für eine Füllung (h)		100-200	50 -100	20	10 - 20
Heizölbedarf (l/dt Heu)		3 - 5	7 - 9	13 - 16	22 - 27
Elektr.Energiebedarf (kWh/dt Heu)		7 - 8	8 - 9	9 - 10	10 - 12
Biogasbedarf nur für Luftanwärmung					
40 dt/Füllung	m ³ /Füllung	250	500	930	1 560
	m ³ /Tag	30	125	900	1 560
	m ³ /h	1,7	6,7	45	75
80 dt/Füllung	m ³ /Füllung	500	1 000	1 860	3 120
	m ³ /Tag	60	250	1 800	3 120
120 dt/Füllung	m ³ /Füllung	750	1 500	2 790	4 680
	m ³ /Tag	90	375	2 700	4 680

Getreidetrockner in bäuerlichen Betrieben benutzen üblicherweise Heizöl oder Flüssiggas zur Lufterwärmung. Einfache Belüftungstrocknung mit ca. 4°C Lufterwärmung wird noch in großem Umfang angewendet. Hierfür sind die Werte aus der Heubelüftung zu übertragen. Zunehmend setzt sich aber die Trocknung mit Warmluft-Satz- und Durchlauf Trocknern durch. Energieaufwand und mögliche Biogasverwendung sind aus Tabelle 27 zu entnehmen. Die Unterschiede zwischen Satz- und Durchlauf Trocknern im Energiebedarf können bei dieser Überschlagsberechnung vernachlässigt werden. Als spezifischen Wärmeaufwand zum Entzug von 1 kg Wasser benötigen gute Trockner etwa 5 MJ/kg H₂O (bei Mais nur ca. 4,6 MJ/kg) entsprechend einer Heizleistung von 250 MJ für den 1-t-Trockner.

Die Trocknungskampagne bei Getreide und Mais wird mit je drei bis vier Wochen angegeben.

Tabelle 27: Energie- und möglicher Biogasbedarf für die Trocknung von Getreide und Mais

Nennleistung Trockengut (dt/h)	Wasserentzug (kg H ₂ O/h)	Durchschnitt- liche Heiz- leistung (MJ/h)	B i o g a s b e d a r f		
			tägl. Trockendauer 10 h (m ³ /Tag)	20 h (m ³ /Tag)	
Getreide (ca. 4 % Feuchteentzug)					
5	24	125	5,5	55	110
10	49	245	11,0	110	220
20	98	490	22,5	225	450
30	146	730	33,0	330	660
Mais (ca. 25 % Feuchteentzug)					
5	200	1 000	46	460	920
10	400	2 000	91	910	1 820
20	800	4 000	182	1 820	3 640

Die Anlagendurchschnittsgröße landwirtschaftlicher Brennereien beträgt 560 hl Weingeisterzeugung pro Jahr. Nach Angaben aus dem Institut für Gärungstechnik, Berlin, ist für die Erzeugung eines Hektoliters Weingeist ein Energiebedarf von etwa 2 500 MJ (70 l Heizöl/hl) notwendig. Theoretisch wäre in optimalen Anlagen eine Reduzierung des Energiebedarfes bis auf etwa 1 450 MJ/hl Weingeist (40 l Heizöl/hl) denkbar. Da die Brennkampagne zum Teil sehr lang ist, wäre hier eine gute und gleichmäßige Abnahmequelle. Über den Energie- und möglichen Biogasbedarf von Brennereien gibt Tabelle 28 Auskunft.

Einen hohen Wärmebedarf hat der Unterglas-Gartenbau. Neben Heizöl wird auch schon in großem Umfang Erdgas zur Beheizung eingesetzt. Zur Zeit laufen Versuche auch gerade bei der Erdgasbeheizung zur Heizkostensenkung durch neuartige "Brennwert-Heizanlagen", das heißt, mit Kondensation der Abgase. Je nach Nutzungsart der Gewächshäuser bestehen große Unterschiede im spezifischen Heizbedarf. Tabelle 29 gibt mittlere Werte für Energie (107) und möglichen Biogasbedarf an. Grundsätzlich werden im Gartenbau sehr hohe Energiemengen je Betrieb benötigt. Im Durchschnitt rechnet man mit einem Heizölbedarf von 100 l/m² Glasfläche und Jahr.

Tabelle 28: Energie- und möglicher Biogasbedarf von Brennereien

Spezifischer Energiebedarf der Anlagen (MJ/hl Alkohol)	Brennrecht (hl/Jahr)	Gesamt-Heizenergiebedarf (MJ/Kampagne)	Biogasbedarf bei Kampagnedauer von		
			4	6 Monaten (m ³ /Tag)	8
2 500 (entsprechend 70 l Heizöl/hl)	100	250 000	90	60	45
	300	750 000	270	180	135
	500	1 250 000	450	300	225
	700	1 750 000	630	420	315
1 450 (entsprechend 40 l Heizöl/hl)	100	145 000	52	35	26
	300	435 000	156	105	78
	500	725 000	260	175	130
	700	1 015 000	364	245	182

Tabelle 29: Energie- und möglicher Biogasbedarf für verschiedene Unterglasflächen

Installierte Anlagewärmekapazität (MJ/h) (ca. Mcal/h)		beheizbare Glasfläche (ca. m ²)	Heizölbedarf (l/Jahr)	Biogasbedarf (m ³ /Jahr)
420	(100)	1 200	120 000	186 000
4 200	(1 000)	12 000	1 200 000	1 860 000
8 400	(2 000)	24 000	2 400 000	3 720 000

Um den möglichen Tages-Biogasbedarf zu ermitteln, muß man ähnlich wie bei der Wohnhausheizung die prozentuale Verteilung des Jahresenergiebedarfes auf die Monate zu Grunde legen. Im Gartenbau ist es üblich, sogar auf den Halbmonat zu beziehen (132). Für die Jahresbedarfswerte aus Tabelle 29 gibt Tabelle 30 die entsprechende Aufteilung.

Tabelle 30: Prozentuale Verteilung der Heizenergie für den Unterglasbau (nach 132)

	Aufteilung der Heizenergie		Biogas-Tagesbedarf für 1200 m ² Glasfläche (Tab. 29)	
	1. Monats- hälfte (%)	2. Monats- hälfte (%)	1. Monats- hälfte (m ³ /Tag)	2. Monats- hälfte (m ³ /Tag)
Januar	9,8	10,6	1 220	1 230
Februar	9,1	7,3	1 210	975
März	6,5	5,0	755	620
April	3,5	2,6	435	320
Mai	1,8	1,4	210	170
Juni	0,7	0,3	87	37
Juli	0,2	0,2	24	24
August	0,2	0,5	24	62
September	0,8	1,6	100	200
Oktober	2,9	4,0	360	465
November	5,4	7,2	665	895
Dezember	8,4	10,0	1 050	1 160
	100 %			

8.3 Tierische Produktion

In der Nutztierhaltung könnte der Energiebedarf einiger Teilbereiche auch mit Biogas bestritten werden, die heute im wesentlichen mit elektrischer Energie versorgt werden. Die Landtechnik Weihenstephan hat über den Energiebedarf bei der Viehhaltung umfangreiche Untersuchungen (40) durchgeführt, deren Ergebnisse in den folgenden Tabellen verwendet wurden.

Spülautomaten für Melkmaschinen könnten mit Gas-Durchlauferhitzern betrieben werden, siehe Tabelle 31.

Tabelle 31: Energie- und möglicher Biogasbedarf für Melkmaschinen-Spülautomaten (40)

Kuhbestand	Elektrischer Anschlußwert		Energieverbrauch		möglicher Biogasbedarf (m ³ /GV·Tag)
	(GV)	(kW)	(MJ/Jahr)	(MJ/GV·Tag)	
Anbindestall	20	7,5	8 817	1,2	0,06
	40	9,0	11 222	0,8	0,04
Laufstall	40	6,0	6 412	0,43	0,02
	60	7,5	8 817	0,4	0,02
	80	9,0	10 420	0,36	0,02

Für die Milchkühlung wird kontinuierlich das ganze Jahr über Energie benötigt. Für Gasbetrieb kommen aber nur Absorptionsgeräte in Betracht, die speziell für Milchkühlanlagen noch nicht auf dem Markt sind. Geschätzter Verbrauch in dieser Leistungsklasse etwa 50 % höher als Kompressor-Kühlgeräte. Für tägliche Milchabholung, eine durchschnittliche Milchleistung von 5 000 l/Kuh, einen spezifischen Energieverbrauch von 7 MJ/100 l Milch und 75prozentige Auslastung gibt Tabelle 32 den Energie- und möglichen Biogasbedarf an. Bei zweitägiger Abholung liegt der Energiebedarf etwa 15 % höher.

Tabelle 32: Energie- und möglicher Biogasbedarf für die Milchkühlung (40)

Kuhbestand	Elektrischer Anschlußwert		Energieverbrauch		möglicher Biogasbedarf	
	(GV)	(kW)	(MJ/Jahr)	(MJ/GV·Tag)	(m ³ /GV·Tag)	(m ³ /Tag)
20		1,2	7 000	0,96	0,07	1,4
40		2,4	14 000	0,96	0,07	2,8
60		3,6	21 000	0,96	0,07	4,2
80		4,8	28 000	0,96	0,07	5,6

Warmwasser wird in der Milchvieh- und Schweinehaltung vielfältig benötigt. Energie- und möglichen Biogasbedarf für Warmwasserspeicher mit Aufheizung von 10 auf 60° C in Abhängigkeit von verschiedenen Viehbestandsgrößen enthält Tabelle 33 (nach 40).

Tabelle 33: Energie- und möglicher Biogasbedarf für die Warmwasserbereitung in Speichern

Tierbestand	(Stück/GV)	Speichergröße (l)	notwendiger Energiebedarf (MJ/GV·Jahr)	möglicher Biogasbedarf	
				(m ³ /GV·Jahr)	(m ³ /GV·Tag)
Milchviehhaltung					
Anbindestall	20	120	566	30	0,08
	40	200	407	21	0,06
Laufstall	40	300	593	31	0,09
	60	500	558	29	0,08
	80	600	533	28	0,08
Mastschweinehaltung					
	300/36	120	78	4,1	0,011
	600/72	200	42	2,2	0,006
	1000/120	300	27	1,4	0,004
Zuchtschweine					
	100/46	300	94	4,9	0,013

Eine Stallheizung ist nur im Sauen- und Aufzuchtstall notwendig (40). Der Heizbedarf ist insgesamt relativ niedrig. Für Sauen mit einem Durchschnittsgewicht von 200 kg ergibt sich bei Außenlufttemperaturen bis -10° C und einer Heizdauer von 60 Heiztagen ein spezifischer Wärmebedarf von 1 950 MJ/GV und Jahr und ein entsprechender Biogasbedarf von ca. 1,8 m³/GV und Tag. Für kälteres Klima kann der Biogasbedarf sich verdoppeln.

Im Vormaststall ergibt sich hierbei für

Tiergewichte von	10	20	30	kg
ein Wärmebedarf von	2 800	1 500	1 300	MJ/GV·Jahr
entsprechend ein Biogasbedarf von	147	80	68	m ³ /GV·Jahr
	2,5	1,3	1,1	m ³ /GV·Tag

Ein Melkstand sollte möglichst in irgendeiner Form beheizt werden können. Auch hier wäre Biogaseinsatz möglich. Heizperiode etwa 150 Tage. Energie- und möglicher Biogasbedarf sind Tabelle 34 zu entnehmen.

Tabelle 34: Energie- und möglicher Biogasbedarf für Melkstandheizung

Anzahl Milchkühe		40	60	80
<u>mittlere Klimazone</u>				
Energiebedarf	MJ/Jahr	3 600	4 680	5 760
mögl. Biogasbedarf	m ³ /Jahr	164	212	262
	m ³ /Heiztag	1,1	1,4	1,7
<u>rauhe Klimazone</u>				
Energiebedarf	MJ/Jahr	7 200	9 000	10 800
mögl. Biogasbedarf	m ³ /Jahr	327	410	490
	m ³ /Heiztag	2,2	2,7	3,3

In der Geflügelhaltung ist die Raumheizung während der Winterzeit der Bereich, der auch mit Biogas versorgt werden könnte. Für Außentemperaturen bis -10⁰ C, Innentemperaturen von 18⁰ C für Jung- und Legehennen (Ø-Gewicht 1,13 kg/Tier) und 26⁰ C für Hühnerküken (Ø-Gewicht 0,16 kg/Tier) sowie Abluftraten von 0,49 und Zulufraten von 0,44 m³/h und Tier (bei Jung- und Legehennen) ergibt sich (73) eine

Lüftungswärmemenge von	entsprechender Biogasbedarf von
26,8 kJ/h·Legehenne (6,4 kcal/h)	1,2 m ³ /h·1000 Tiere (29 m ³ /Tag·1000 Tiere)
6,2 kJ/h·Küken (1,5 kcal/h)	0,3 m ³ /h·1000 Tiere (7 m ³ /Tag·1000 Tiere).

8.4 Verschiedene Modellbetriebe

Mit den vorgenannten verschiedenen Einzelwerten für möglichen Biogasverbrauch lassen sich für Modellbetriebe deren Gesamt-Biogasverwertungen ermitteln. Im folgenden wird dies für drei Modellbetriebe durchgeführt und graphisch über das Jahr dargestellt (Abb. 31 bis 33). Die wichtigsten Daten sind Tabelle 35 zu entnehmen. Interessant ist der Vergleich zwischen zu erwartender Biogasproduktion und möglicher Verwertung im eigenen Betrieb. Ungenutzte Biogasmengen verteuern die spezifischen Kosten. Es entstehen hier auf der einen Seite große ungenutzte Überschüsse, auf der anderen Seite langt das Gas nicht für die energieintensive Trocknung, trotz zugeordneter unterster Leistungsgrenze der Trockner.

Eine der Hauptschwierigkeiten für wirtschaftlichen Biogaseinsatz im durchschnittlichen landwirtschaftlichen Betrieb dürfte in solch unausgeglichene Bilanzen zwischen Gasproduktion und möglicher Gasverwertung liegen; Langzeitspeicherung entfällt aus Kostengründen (Tab. 10 - siehe auch Kapitel 5). Hier müssen daher in besonderem Maße zukünftige Forschungsvorhaben ansetzen. Denkbar wären zum Beispiel veränderte Trocknungsverfahren oder auch bivalente Lufterwärmung. Nachbarn, auch nichtlandwirtschaftliche, werden sich nur zur Abnahme bereit erklären, wenn die Energieeinheit Biogas billiger, zumindest kostengleich wie die bisherige Energieart ist und auch die kontinuierliche Bereitstellung gewährleistet wird. Auch hierfür müssen noch erhebliche Routine-Erfahrungen gesammelt werden. Bei Spezialbetrieben, zum Beispiel Geflügelschlachtereien, Brennereien, entsteht dieses Problem nicht.

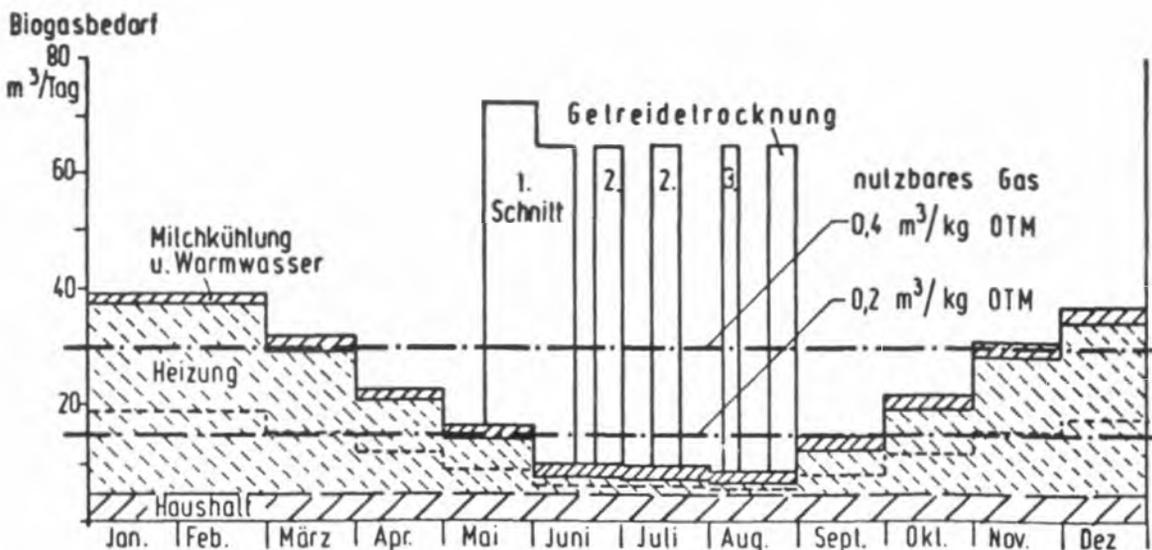


Abb. 31: Modellbetrieb I (Angaben s. Tab. 35) im Bereich "Heizung" gilt die obere Linie für üblichen Gaskessel, die mittlere gestrichelte für Gas-Kompressions-Wärmepumpe

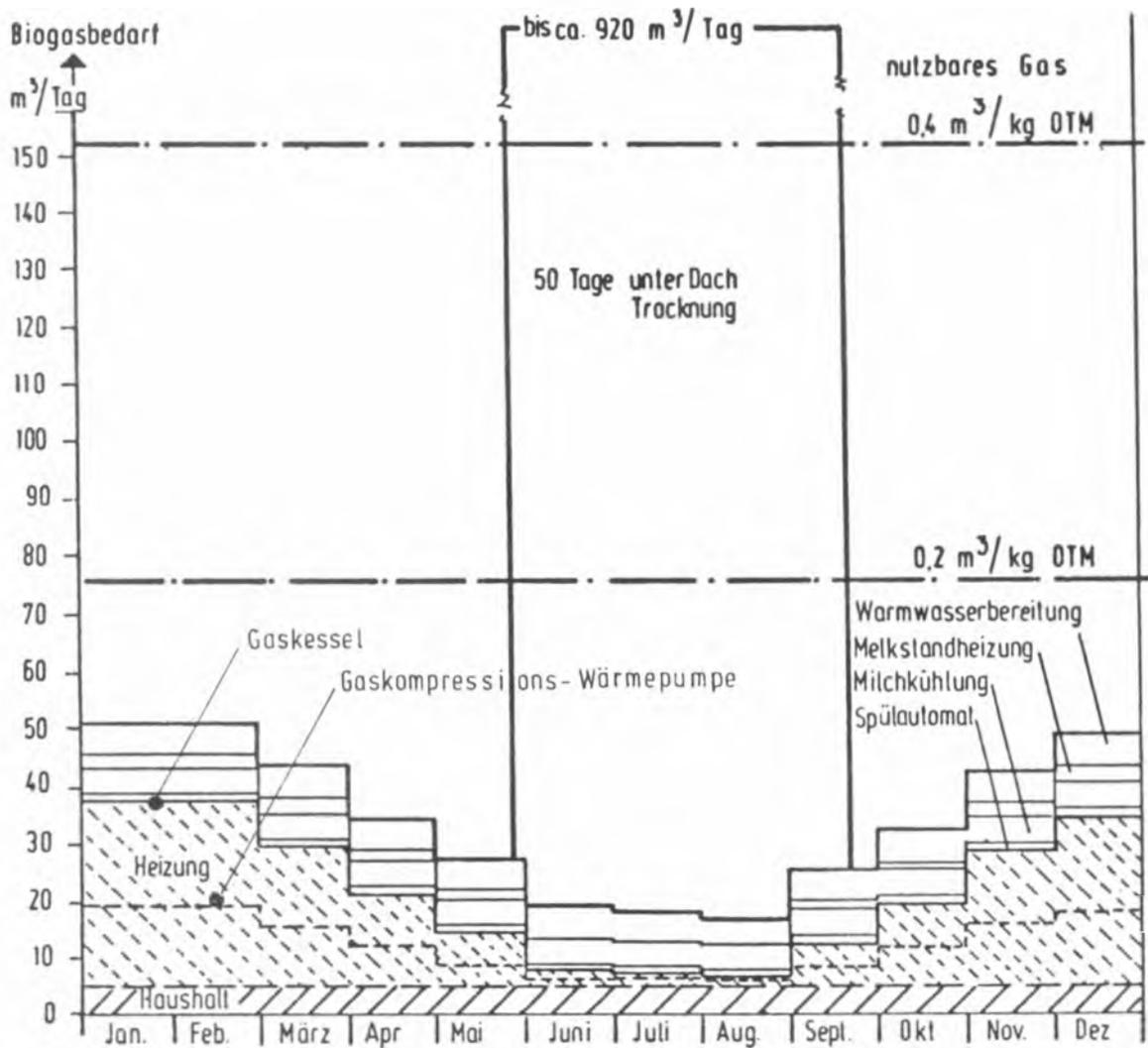


Abb. 32: Modellbetrieb II (Angaben s. Tab. 35)

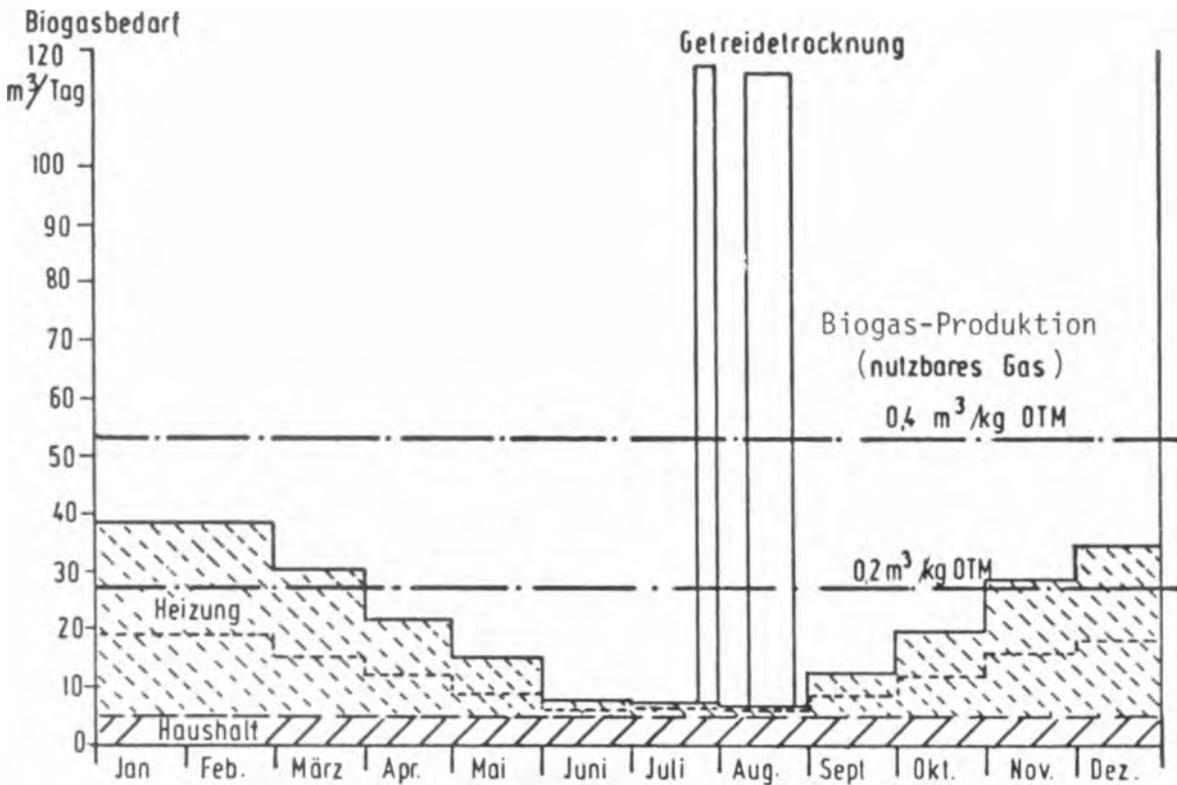


Abb. 33: Modellbetrieb III (Angaben s. Tab. 35)

Tabelle 35: Daten von drei Modellbetrieben und deren möglicher Biogas-Umsatz (s. Abb. 31 - 33)

	Dim.	Modellbetrieb		
		I	II	III
Typ		Futterbau	Grünland	Getreidebau
Lage		Mittelgebirge	Allgäu	Westfalen
Haushaltsgröße gem. Kapitel 8.1	Pers.	4	4	4
Landw. Nutzfläche	ha LF	15	40	40
- Grünland	ha LF	10	40	-
davon UDT-Heu	ha LF	5	20	-
- Getreide	ha LF	5	-	40
Viehbestand	GV	15	76	36
- Milchvieh (ganzj. Stallh.)	Stück	10	60	-
Nachzucht	GV	5	16	-
- Mastschweine	Stück	-	-	300
Heutrocknung	Typ	gem. Tab. 24	gemäß Tab. 26	-
Luftanwärmung	° C	4	30	-
Kapazität	dt	80	40	-
Trocknungsdauer/Charge		1 Woche	1 Tag	-
Getreidetrocknung	Typ	gem. Tab. 27	-	gem. Tab. 27
Leistung	dt/h	5	-	10
Trocknungsdauer/Tag	h	10	-	10
Verbrauch an Biogas				
Heutrocknung	m ³ /Tag	55	900	-
an ... Tagen in Betrieb	Tagen	36	50	-
im Zeitraum vom ... bis ...		15.5.-30.9.	25.5.-30.9.	-
Getreidetrocknung	m ³ /Tag	55	-	110
an ... Tagen in Betrieb	Tagen	5	-	20
im Zeitraum vom ... bis ...		15.7.-1.9.	-	10.7.-4.9.
Stalleinrichtungen				
Spülautomat (Tab. 31)	m ³ /Tag	-	1,2	-
Milchkühlung (Tab. 32)	m ³ /Tag	1,1	4,2	-
Warmwasser (Tab. 33)	m ³ /Tag	1,2	5,4	0,4
Melkstandheizung (Tab. 34)	m ³ /Tag	-	2,7	-
Haushalt (Tab. 23)	m ³ /Tag	7,3 - 37,8 mit monatlichen Schwankungen		
Zur Verfügung stehendes Biogas bei Nutzbarmachung von				
0,2 m ³ /kg OTM	m ³ /Tag	15	76	27
0,4 m ³ /kg OTM	m ³ /Tag	30	152	54

9. Verwertung von Bioschlamm

Alle zur Zeit im Einsatz befindlichen Biogasanlagen arbeiten aus technologischer Sicht mit flüssigem Substrat. Damit ist auch der Bioschlamm flüssig und wird wie üblicher Flüssigmist gehandhabt: mit Pumpen und Tankwagen. Er wird auch im Normalfall wie Flüssigmist als organischer Dünger wieder auf das Feld und Grünland des landwirtschaftlichen Betriebes oder der Nachbarbetriebe zurückgebracht. Das schließt nicht aus, daß man im Sonderfall, den Bioschlamm in flüssige und feste Phasen auftrennt und diese jeweils getrennt weiterverwertet, die feste Phase zum Beispiel pelletiert und trocknet, um ein Verkaufsgut zu erhalten.

Das Biogasverfahren ist nicht als Lösung des Mengenproblems anzusehen. Die Massenreduzierung ist so gering, daß sie vernachlässigt werden kann. Abgebaut werden durch den Prozeß im Mittel nur etwa 30 % der organischen Substanz, die jedoch nur rund 10 % des Flüssigmistes ausmacht, das heißt, die Gesamtmenge wird um nur etwa 3 % reduziert.

Mit der Energiekrise ging eine Verteuerung der Mineraldünger, die sehr energieintensiv erzeugt werden, einher. Dies ist mit ein Grund dafür, daß die im Betrieb selbst erzeugten organischen Dünger wieder sehr begehrt sind und daß man auch bemüht ist, sie optimal einzusetzen. Hierzu gehören in erster Linie das Vermeiden von Nährstoffverlusten und Tendenz zu größeren Lagerkapazitäten, damit der Einsatz zum Zeitpunkt der höchsten Wirksamkeit erfolgen kann. Dies gilt für den normalen Flüssigmist, im verstärkten Maße auch für Bioschlamm.

Der Düngewert richtet sich nach der stofflichen Zusammensetzung. Durch den Faulprozeß wird nur der Kohlenstoffgehalt reduziert und damit das C/N-Verhältnis eingeengt. Phosphor und Kali finden sich vollständig im Bioschlamm wieder, auch der Stickstoff nahezu vollständig, lediglich Spuren können hier im Gas enthalten sein. Bei anschließender längerer Lagerung in offenen Behältern entstehen jedoch wieder Stickstoffverluste, die als Ammoniak entweichen. Häufig wurde und wird behauptet, Bioschlamm habe eine viel bessere Wirkung als üblicher Mist. Es gibt hierüber keine exakten und repräsentativen Vergleichsuntersuchungen zu Flüssigmist, die dies belegen würden oder zu aus Umweltschutzgründen aerob behandeltem Flüssigmist, denn nur hiermit kann Bioschlamm gerechterweise verglichen werden. Ein Vergleich mit Festmist (hohe Nährstoffverluste) ist nicht richtig. Eine bessere Düngewirkung kann durch das engere C/N-Verhältnis entstehen und dadurch, daß aller Stickstoff erhalten bleibt. Es ist auch denkbar, daß durch den Faulprozeß der Phosphor in eine besser pflanzenverfügbare Form gebracht wird und daß sich Spuren von Wirkstoffen bilden, die positiv auf das Pflanzenwachstum wirken. Ähnlich hat ABELE (1) nachgewiesen, daß durch Belüftung sowie durch Zusätze von Bentonit und bestimmten Kompostpräparaten der Stickstoff gegenüber unbehandeltem Flüssigmist um 10 - 25 % besser ausgenutzt wird. Somit darf vielleicht unterstellt werden, daß Bioschlamm gegenüber unbehandeltem Flüssig-

mist eine um 15 % bessere Düngewirkung hat. Exakte Untersuchungen müßten dies aber erst bestätigen. Nach HOYER (42) beträgt der Wert des unbehandelten Flüssigmistes, 30prozentige Nutzung durch die Pflanze unterstellt:

7,20 DM/m³ Rinderflüssigmist
8,55 DM/m³ Schweineflüssigmist
16,80 DM/m³ Hühnerflüssigmist.

Eine um 15 % bessere Düngewirkung erhöht den Wert um 1,08 beziehungsweise 1,28 beziehungsweise 2,52 DM/m³.

Die Geruchsminderung ist abhängig von dem Grad der Ausfäulung, der wiederum mit der Faulbehältergröße und damit mit den Anschaffungskosten der Anlage zusammenhängt. Ein objektiver Maßstab über mögliche Geruchsminderungen existiert bisher nicht, er müßte noch ermittelt werden. Lediglich subjektiv wird eine weitgehende Beseitigung lästiger Gerüche gegenüber unbehandeltem Flüssigmist angegeben, so daß das Biogasverfahren mit hohem Ausfäulungsgrad hinsichtlich der Umweltfreundlichkeit gleichwertig neben die verschiedenen aeroben Behandlungsverfahren gestellt werden kann. Der Grad der Hygienisierung des Bioschlammes ist von der Art des Biogasverfahrens und der folgenden Lagerzeit abhängig. Eine sichere Hygienisierung ist bei keiner anaeroben Verfahrensvariante gegeben.

Zur Frage, wieweit das in der Biomasse des Bioschlammes festgelegte Eiweiß einen verwertbaren Futterwert darstellt oder wieweit der Bioschlamm als Nährsubstrat für Algen, Hefen und Pilze verwendet werden kann, kann noch nicht Stellung genommen werden.

10. Wirtschaftlichkeit von bäuerlichen Biogasanlagen

Die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit einer Biogasanlage wird verschieden ausfallen müssen, je nachdem, welchen Hauptzweck die Anlage erfüllen soll. Umgekehrt muß entsprechend der Zielrichtung die Technik der Anlage ausgerichtet sein und dementsprechend Aufwand betrieben werden. Drei hauptsächliche Zielrichtungen können genannt werden:

1. Erzeugung von Biogas als Energiequelle. Der Biodung ist ein Nebenprodukt.
2. Gewinnung eines hochwertigen "Biodunges" und Erhaltung der in den Reststoffen des landwirtschaftlichen Betriebes enthaltenen Nährstoffe. Biogas ist Nebenprodukt.
3. Erfüllung von Umweltschutzaufgaben, das heißt, Reduzierung und Vermeidung von Belästigungen der Umwelt durch Emissionen des landwirtschaftlichen Betriebes.

In der Praxis werden alle Aspekte in gewissem Umfang zum Tragen kommen. Bei einer Wirtschaftlichkeitsberechnung müßten also alle drei Aspekte berücksichtigt werden, ebenso die Frage, ob in irgendeiner Form Baukostenzuschüsse zum Beispiel als Pionier- oder Energieeinsparhilfen gegeben werden für die Einsparung an Primärenergie (Heizöl und Elektrizität). Der technische Aufwand für eine Anlage gemäß Ziel 2) kann wahrscheinlich geringer, der für Ziel 3) muß wahrscheinlich höher sein als für Ziel 1).

Der Rechengang an sich ist klar. Das Problem ist nur, die jeweils wirklichkeitsgerechten Unterstellungen für die zukünftige Anlage zu finden, und zwar besonders für :

- Lebensdauer
- Reparaturaufwand
- Wartungsaufwand
- Eigenenergieverbrauch
- Bedienungszeitaufwand und damit Lohnaufwand
- Bewertung des Umweltschutzaspektes
- mögliche Einsparung an Mineraldünger
- wirkliche Erzeugung an verwertbarem Gas, das heißt, inwieweit erfüllen zum Beispiel Heizvorrichtungen, Rührvorrichtungen und die Isolierung wirklich die in sie gesetzten Erwartungen?

Im folgenden wird versucht, für Investitionspreise zwischen 1 000 und 5 000 DM/Dünger-GV - in diesem Rahmen kann sich eine Biogasanlage sinnvollerweise nur bewegen - und nutzbare Biogasmengen zwischen 0,2 und 0,6 m³/kg OTM unter Einbeziehung von Umweltschutz und Düngeraufwertung, die sich ergebenden Biogaspreise zu bestimmen (Abb. 34). Man kann dann umgekehrt aus dieser Abbildung in Verbindung mit Abbildung 24 jeweils ablesen, wie teuer eine Anlage im bestimmten Fall nur gebaut werden darf, um noch wirtschaftlich zu sein. Durch die Rechnung mit Dünger-GV = DGV (man könnte auch eine "Biogas-GV" bilden) gleichen sich die Unterschiede zwischen der spezifischen Gasausbeute der verschiedenen Mistarten (Tab. 7) in etwa aus.

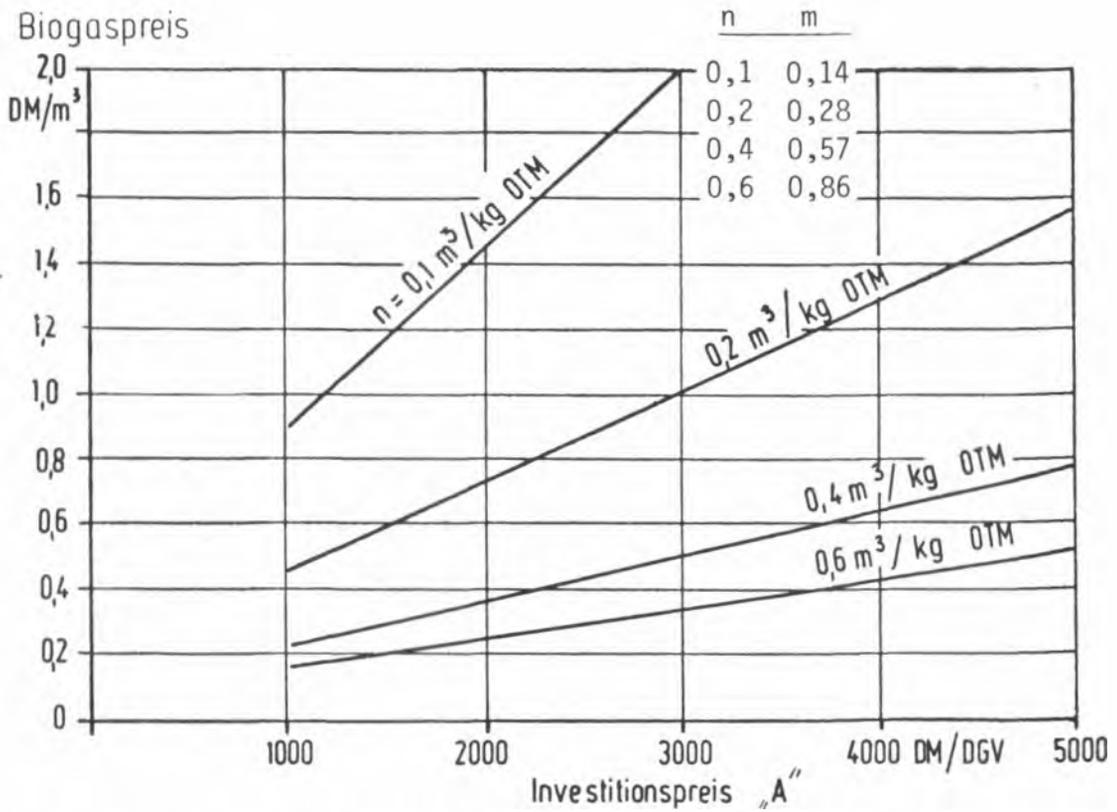


Abb. 34: Biogaspreis in Abhängigkeit vom Investitionspreis und der spezifisch nutzbaren Gasausbeute "n" oder der spezifischen Gesamtgasausbeute "m"

Für die Berechnung des Biogaspreises gilt:

$$\text{Biogaspreis} = \frac{\text{Jahreskosten} - (\text{Kosten notwendiger} + \text{Dünger-} + \text{Zuschüsse})}{\text{nutzbare Gasmenge}}$$

Umweltschutzmaß-
nahmen
 einspa-
rung

$$G = \frac{K - (U + D + Z)}{N}$$

$$G = \frac{\frac{x}{100} \cdot A + L + M \cdot b - (U + D + Z)}{N}$$

- G = Gaspreis DM/m³
- K = Jahreskosten DM
- x = Festkostenanteil in % von A %
(Abschreibung, Verzinsung, Reparatur und Wartung, Versicherung)
- A = Anlagenpreis DM
- L = Jahreslohnkosten DM
- M = jährliche Gesamtgasmenge m³

b =	spezifische Betriebsmittelkosten (Elektro-Energiebedarf für Pumpen u.a.)	DM/m ³
U =	jährliche Einsparung einer sonst notwendigen Umweltschutzmaßnahme	DM
D =	jährliche Einsparung von Mineraldünger	DM
Z =	jährlicher Investitionszuschuß	DM
N =	jährliche freiverfügbare Gasmenge	m ³

Die Berechnung kann für den Gesamtbetrieb erfolgen, aus Zweckmäßigkeitsgründen aber auch in den spezifischen Werten je DGV. Zu den einzelnen Rechnungsposten kann noch folgendes gesagt werden:

x: Als Festkostenanteil werden 10 % gerechnet
5 % Abschreibung (20 Jahre Lebensdauer)
3,5 % Verzinsung
1,5 % Reparatur, Wartung, Versicherungen

A: Als Anlagenpreis werden 1 000 - 5 000 DM/DGV eingesetzt.
Zum Anlagenpreis gehört nicht die anschließende Lagerung des Bioschlammes, bedingt nur die Vorgrube mit Pumpe, denn beides wird auch für das normale Flüssigmistverfahren benötigt.

L: Ein Stundenlohn beziehungsweise Lohnanspruch von 12 DM/h wird zugrundegelegt und ein Arbeitsaufwand für Kontrollen, Wartung und dergleichen von 0,025 AKh/DGV und Tag, entsprechend 108 DM/DGV und Jahr. Genau genommen müßte dieser Wert in Abhängigkeit von der Viehzahl gewählt werden. Grundsätzlich wird man auf weitgehende Wartungsfreiheit hinarbeiten. Genaue Angaben in Abhängigkeit der Anlagenart und -größe fehlen noch.

M/N: Die jährliche Gesamtgasmenge ist das wirklich produzierte Gas. Im allgemeinen wird aber hiervon ein Teil zur Aufrechterhaltung der optimalen Faulraumtemperatur verwendet (wenn nicht, muß der Faulbehälter fremd beheizt werden), nur der Rest ist die freiverfügbare Gasmenge. Dieser Wärmebedarf der Faulbehälter ist abhängig von der Faulraumgröße und der Behälterisolierung. Für die Behälter früherer Anlagen hat ROSEGGER (93) den Wärmebedarf ermittelt (Abb. 35). Bei entsprechender Isolierung läßt sich auch für kleine Behälter dieser Bedarf auf 30 % der erzeugten Gesamtgasmenge begrenzen (eine Behälterisolierung mit 5 cm Spritz-Polyurethanschaum kostet heute etwa 40 DM/m² bei 400 m² Gesamtfläche). M und N ergeben sich aus dem täglichen Düngeranfall je DGV von 5 kg Organischer Trockenmasse (OTM) und der nutzbaren Gasmenge von 0,2 - 0,6 m³/kg OTM. Für die prinzipielle Berechnung und Beurteilung des Biogaspreises kann diese Unterstellung ausreichen. In Wirklichkeit sind Gasproduktion, Gasanteil für Eigenwärmebedarf der Anlage und damit auch das verfügbare Gas je kg OTM über das Jahr nicht konstant, sondern zum Beispiel von der Jahreszeit abhängig.

Wärmebedarf in % der erzeugten Gasmenge

nach Rosegger

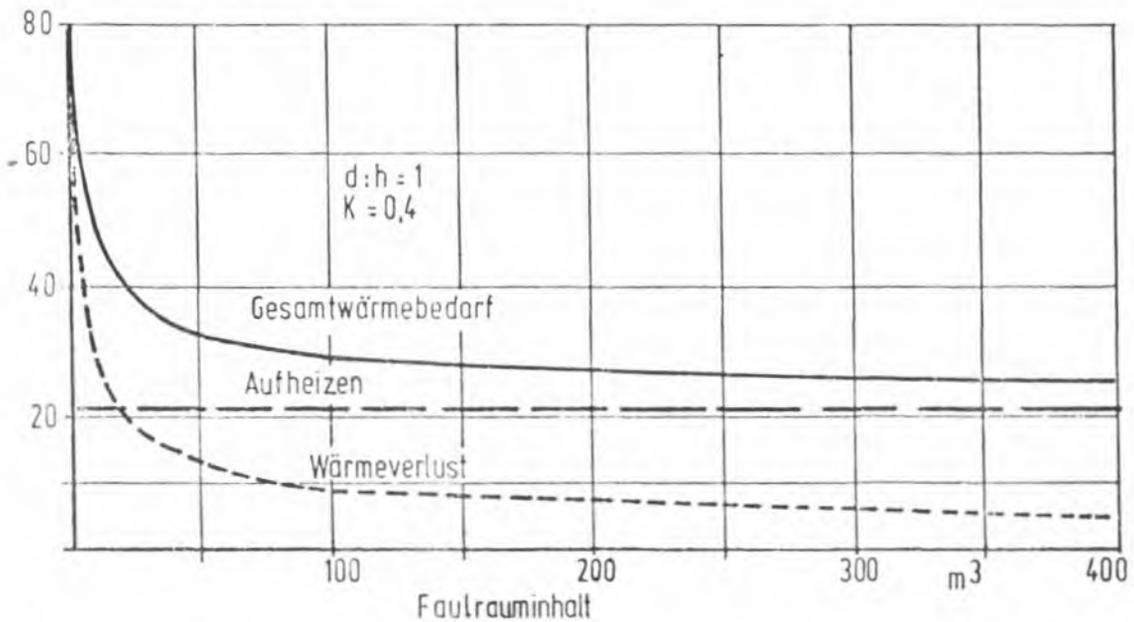


Abb. 35: Wärmebedarf bei zylindrischem Faulraum, abhängig von der Faulraumgröße, ohne Wärmeverluste durch Spülen (24)

- b: Die spezifischen Betriebsmittelkosten sind nur sehr ungenau vorher zu bestimmen, sie sind stark verfahrensabhängig, genaue Werte fehlen. Bei früheren Anlagen wurde $0,2 \text{ kWh/m}^3$ Biogas ermittelt. Kommunale Kläranlagen mit etwas anderer Aufgabenstellung verbrauchen bis zu $0,5 \text{ kWh/m}^3$ Gas (62). Dies erscheint für moderne bäuerliche Biogasanlagen aber sehr hoch. Es werden $0,05 - 0,1 \text{ kWh/m}^3$ geschätzt. Bei einem durchschnittlichen Preis von $0,15 \text{ DM/kWh}$ ist der m^3 Biogas mit 1 Dpf. zu belasten ($b = 0,01$).
- U: In zunehmendem Maße sind die Betriebe gezwungen, Aufwendungen für den Umweltschutz, praktisch zur Geruchsbeseitigung, zu betreiben. Für den Fall, daß der Betrieb von seiner Lage her zu diesen Umweltschutzaufwendungen gezwungen ist, kann man sich hier nur an bisher üblichen Aufwendungen für ähnliche Maßnahmen orientieren, zum Beispiel geschlossene Lagerbehälter gegen Geruchsbelästigung während der Lagerzeit (9 DM/DGV und Jahr) und Belüftung vor dem Ausbringen gegen Geruchsbelästigung beim Ausbringen ($14 - 21 \text{ DM/DGV}$). Zusammen könnten etwa 25 DM/DGV und Jahr angesetzt werden. Für ein alternatives Direkteindrillgerät ergeben sich nach HÜFFMEIER auch etwa 30 DM/DGV und Jahr.

- D: Ein etwaiger Mehrwert gegenüber Normalflüssigmist läßt sich nicht genau angeben. HOFFMANN (41) gibt für Festmistlagerung durchschnittliche Verluste von 25 % Trockenmasse und 33 % N an, für Normalgülle 0 - 15 % Lagerungsverluste. Bei angenommener 15prozentiger besserer Nährstoffausnutzung ergibt sich ein Gewinn von etwa 1,2 DM/m³ Bioschlamm und etwa 19 DM/DGV und Jahr.
- Z: Investitionsbeihilfen sollen an dieser Stelle unberücksichtigt bleiben. Im gegebenen Fall könnte man in Abbildung 34 die Beihilfe je DGV direkt zum Investitionspreis addieren, aber aus den Werten des niedrigeren Investitionspreises den Biogaspreis bestimmen.

Nach Abbildung 24 dürfte Biogas, wenn es Heizöl ersetzen soll, das zur Zeit ca. 0,30 DM/l kostet, mit Anteil für den Öltank etwa 0,35, nur etwa 0,24 DM/m³ kosten. Aus Abbildung 34 ist zu ersehen, daß dies bei einer durchaus optimistischen Rechnungsweise nur bei sehr hohen nutzbaren Gasausbeuten und sehr niedrigen Investitionspreisen gegeben ist. Investitionspreise über 1 500 DM/DGV sind kaum zu akzeptieren ohne Investitionshilfen. Dies kann eine Orientierungshilfe für die Industrie sein, aber auch Ansatzpunkt für zukünftige Forschungen. Darüber hinaus muß beachtet werden, daß dies nur gilt, wenn alles nutzbare Biogas auch wirklich verwertet wird (Abb. 31-33), andernfalls kann der echte Gaspreis erheblich ansteigen.

Die Auswirkung der Veränderung einzelner Rechnungsposten der vorgenannten Biogaspreisbestimmung wird in Abbildung 36 dargestellt, hier nur für nutzbare Gasausbeute von 0,2 m³/kg OTM. Verändert werden zum Beispiel:

1. jährlicher Festkostenanteil auf 12 % (geringere Lebensdauer oder höherer Wartungsanteil).
2. Jahreslohnkosten auf 72 DM/DGV und 216 DM/DGV.
3. Spezifische Betriebsmittelkosten auf 0,02 DM/m³.

Hieraus wird deutlich, wie stark der Biogaspreis schwanken kann und wie wichtig andererseits die Kenntnis genauer Einzeldaten des Verfahrens sind.

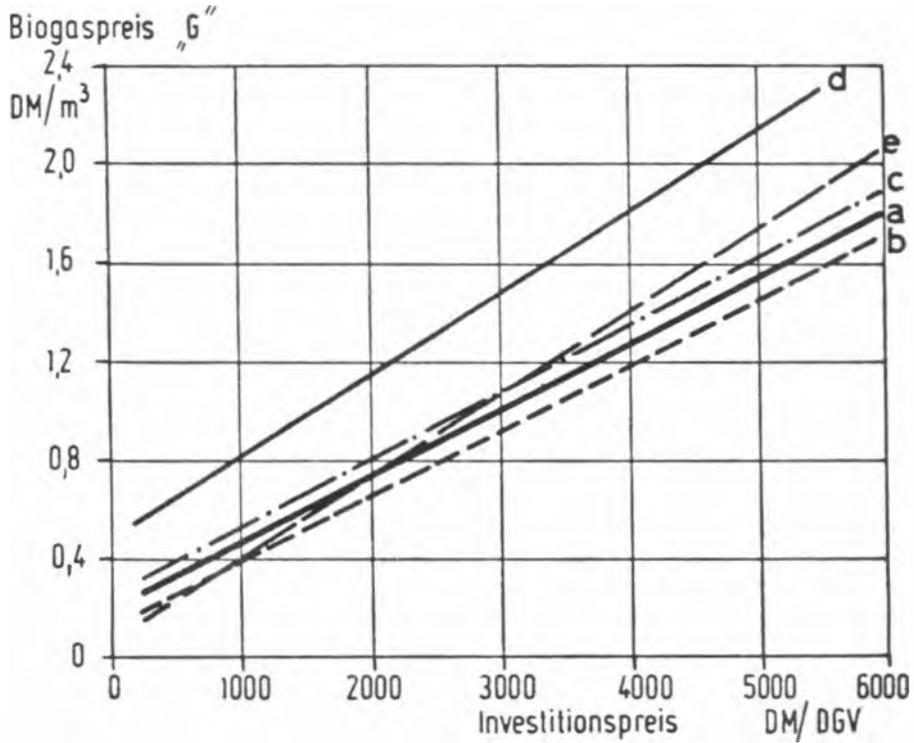


Abb. 36: Biogaspreis in Abhängigkeit vom Investitionspreis für nutzbare Gasausbeute von "n" = 0,2 m³/kg OTM bei variierten Rechnungsposten

	Festkostenanteil %	Jahreslohnkosten DM/DGV	spez. Betriebsmittelkosten DM/m ³
a =	10	108	0,01
b =	10	72	0,01
c =	10	108	0,01
d =	12	216	0,02
e =	12	72	0,02

(c = ohne Bewertung der Umweltschutzwirkung)

Zusammenfassung und Ausblick

Im ersten Teil der Arbeit wurde eine systematische Übersicht über das heutige Wissen zum Stand der Verfahrenstechnik der Methangärung gegeben unter Auswertung der wesentlichen in- und ausländischen Literatur. Hierbei werden auch Wissenslücken mit aufgezeigt.

Im zweiten Teil werden die für die Wirtschaftlichkeit einer bäuerlichen Biogasanlage wichtigen Gesichtspunkte einer eingehenden Betrachtung unterzogen. Dazu wurden insbesondere die verfügbaren Daten über die Biogasspeicherung, Biogasaufbereitung sowie die Biogasverwertung im landwirtschaftlichen Betrieb nach Art und Menge zusammengetragen. Über die Aufstellung einer Gasbilanz für drei Modellbetriebe mit Biogasanlagen und eine theoretische Wirtschaftlichkeitsrechnung für Biogasanlagen wird versucht, deutlich zu machen, wo die Hauptschwierigkeiten einer praktischen Anlage neben der grundsätzlich sicheren technischen Funktion liegen werden. Zwei Hauptschwierigkeiten sind hier erkennbar:

- . Die im Vergleich zu heutigen Energiepreisen an sich sehr kritische Wirtschaftlichkeit
- . Die schwer ausgleichbare Bilanz zwischen Produktion und Verwertung von Biogas.

Nach dem heutigen Wissensstand ist die Errichtung und der Betrieb von Biogasanlagen für alle in der Bundesrepublik Deutschland vorhandenen Betriebsgrößen technisch durchführbar. Eine Vorherbestimmung der Wirtschaftlichkeit solcher Anlagen scheitert jedoch an dem noch unzureichenden Angebot an Daten über minimale Anlagen- und Betriebskosten, die bei Ausschöpfung des Standes der Technik für typische landwirtschaftliche Betriebsbedingungen und unter Berücksichtigung der Betriebsgröße ermittelt worden sind. Auch die eventuellen Vorteile des Biogasverfahrens gegenüber aeroben Verfahren zur Behandlung von Reststoffen, insbesondere aus der tierischen Produktion, nach den Forderungen des Umweltschutzes sind noch nicht quantifizierbar, da systematische Untersuchungen in dieser Richtung noch nicht durchgeführt worden sind.

Ausbeute an Gas und dessen Energieinhalt können in weiten Grenzen schwanken, da sie von der Art, der Zusammensetzung und dem Zustand der verfügbaren Ausgangsstoffe sowie von der Gestaltung und Steuerung des Faulprozesses sehr stark abhängen. Ferner erfordert eine Biogasanlage, die einen hohen energetischen Wirkungsgrad aufweisen soll, konstante und an das betreffende Faulgut angepaßte optimale Betriebsbedingungen hinsichtlich Zugabemengen an organischer Substanz, Faulzeit, Faultemperatur und Durchmischung des Faulgutes. Je höher die Anforderungen an den Wirkungsgrad einer Biogasanlage gestellt werden, desto aufwendiger ist die technische Ausstattung. Leistungsfähige Biogasanlagen können daher nur bei größerer Kapazität wirtschaftlich betrieben werden.

Die Wirtschaftlichkeit orientiert sich am heutigen Heizölpreis - da im wesentlichen Heizöl ersetzt werden wird - und wird mit unterstellten Faktoren ermittelt, die so gut wie möglich der Wirklichkeit entsprechend gewählt wurden. Hier wird die vorher schon aufgezeigte Schwierigkeit deutlich, daß noch verschiedene eindeutige Daten für neuere Anlagen fehlen, die einer Klärung bedürfen:

- Energieeigenbedarf zur Erwärmung des Substrates
- Energieeigenbedarf zum Rühren und Umpumpen (kW/m^3)
- Lebensdauer der technischen Einrichtungen
- Reparatur- und Wartungskosten (DM/Jahr)
- spezifischer Arbeitsaufwand (DM/m^3 oder AKh/GV)
- Umweltschutzbewertung (DM/GV)
- mögliche Düngeraufwertung (DM/GV).

Mit der Änderung der unterstellten Faktoren ändert sich auch die Wirtschaftlichkeit. Besonders ist für die Zukunft mit steigenden Energiepreisen zu rechnen. Je teurer die Vergleichsenergie Öl (oder auch Elektrizität) wird, um so interessanter werden Biogasanlagen. Unter dem Aspekt einer sicheren Energieversorgung ist auch die Rechtfertigung von Bauzuschüssen zu prüfen. Momentan scheint eine Wirtschaftlichkeit aber nur in ganz engen Grenzen gegeben zu sein:

- Spezifische Investitionskosten zwischen 1 000 und 2000 DM/GV. Dies dürfte bei Kleinanlagen eine Tendenz zur kontinuierlichen Einbehälteranlage andeuten.
- Hohe spezifische nutzbare Gasausbeute von mindestens $0,4 \text{ m}^3$ Biogas/kg OTM. Eine Erhöhung der nutzbaren Gasausbeute erscheint möglich durch Nutzung anderer Abfallenergien, Wärmerückführung und Alternativenenergien zumindest teilweise zum Erwärmen des Substrates.

Zur Senkung des Energieeigenbedarfs einer Anlage müssen an die Ausführung der Behälter (Form und Isolierung) und der Röhreinrichtungen hohe Anforderungen gestellt werden. Maßnahmen zur Nutzung der Abwärme im Faulschlamm über Wärmerückführung sind dabei zusätzlich zu treffen.

Eine unausgeglichene Gasbilanz berührt sofort die Wirtschaftlichkeit. Der Durchschnittsbetrieb hat zunächst eine unausgeglichene Gasbilanz, nur Spezialbetriebe werden eine ausgeglichene Bilanz haben. Entscheidend ist die Schaffung von ausgeglichenen Gasbilanzen für eine Anlage. Verschiedene Ansatzpunkte für in diese Richtung weitergehende Untersuchungen wurden angedeutet. Ohne eine gewisse Gasspeicherung ist kaum auszukommen. Absätzig arbeitende Mehrbehälteranlagen erfordern größere Speicher.

Bei der Planung einer landwirtschaftlichen Biogasanlage ist zu prüfen, ob der im Betrieb tatsächlich zu erwartende Bedarf an Biogas eine hohe Gasausbeute aus den anfallenden Reststoffen rechtfertigt, da sich bei einer eingeschränkten Nutzung des Gaspotentials Anlagen- und Betriebskosten einer Biogasanlage wesentlich senken lassen.

Um künftig Biogasanlagen besser kalkulieren und planen zu können, wäre es sinnvoll, zu folgenden Detailpunkten klare Aussagen zu schaffen:

- Senkung des Energiebedarfs durch
 - . systematische Untersuchungen über das Rühren von Faulgut unterschiedlicher Viskosität und Grobstoffanteile unter Berücksichtigung der Behälterform und -größe.
 - . Ermittlung der optimalen Auslegung des Gasmotor/Generators unter Berücksichtigung der Deckung des Anlagen-Eigenbedarfs an Wärme (Kühlsystem des Motors) und elektrischer Energie für mechanische Systeme einschließlich Wärmepumpe für Wärmerückgewinnung aus Ablauf.
 - . Bewältigung der Schwimmdecke bei energiesparender Betriebsweise.
- Vereinfachung der Bedienung (Überwachung, Steuerung, Regelung)
- Erhöhung der Lebensdauer (Verminderung von Korrosions- und Abrieb-schäden durch Verwendung geeigneter Werkstoffe und Konstruktionsprinzipien)
- Senkung der Investitionskosten durch Verwendung neuer kostengünstiger Konstruktionsprinzipien, unter anderem Entwicklung einfacher und kostengünstiger abnehmbarer Behälterabdeckungen zum Sammeln des Gases bei Anlagen nach dem Speichersystem
- Entwicklung von Modellen für definierte Verfahrenslösungen hinsichtlich Verfahrensziel (Verwendung der Produkte, Umweltschutz) und betrieblicher Zuordnung der Anlage:
landwirtschaftliche Einzelbetriebe verschiedener Größenklassen, Betriebsgemeinschaft (z.B. Dorf).
- Errichtung von Pilotanlagen nach ausgewählten Modellen und Durchführung von Nutzwert-Analysen an derartigen Anlagen.

Literatur

- (1) Abele, U.: Ertragssteigerung durch Flüssigmistbehandlung. KTBL-Schrift Nr. 224. KTBL-Schriftenvertrieb im Landwirtschaftsverlag, Münster-Hiltrup, 1978.
- (2) Ahrens, W.: Experimentelle Untersuchungen zur Frage der seuchenhygienischen Unbedenklichkeit von ausgegastem Schlamm (Methangärung). Wiss. Zeitschrift d. TH Dresden 1956/57, H. 6.
- (3) Amberg, H.F.: Dezentrale Kraft-Wärme-Kopplung in einem Klärwerk. Energie 29 (1977), H. 11, S. 374 ff.
- (4) Baader, W.: Freisetzung von Wärme aus organischen Reststoffen der landwirtschaftlichen Produktion. Landbauforsch. Völkenrode 26 (1976), H. 3, S. 171 - 176.
- (5) Baader, W., D. Bardtke, K. Grabbe u. C. Tietjen: Behandlung tierischer Exkrememente. In: Strauch, D., W. Baader u. C. Tietjen: Abfälle aus der Tierhaltung. Verlag E. Ulmer, Stuttgart, 1977, S. 76-157.
- (6) Baader, W., F. Schuchardt, R. Thaer u. E. Dohne: Behandlung organischer Reststoffe aus der landwirtschaftlichen Produktion in biologischen Prozessen. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes für die Europäische Wirtschaftsgemeinschaft, 1977.
- (7) Baader, W.: Aussichten der Biogasgewinnung aus organischen Rest- und Abfallstoffen aus der landwirtschaftlichen Produktion, Kongreßbericht 1. Deutsches Sonnenforum, Hamburg, (1977) Bd. 3, S. 133 - 142.
- (8) Baader, W.: Biogasgewinnung im landwirtschaftlichen Bereich - Technische Voraussetzungen und Konsequenzen. Landtechnik 33 (1978), H. 2, S.61-63.
- (9) Baader, W., R. Thaer u. H. Traulsen: Verfahren zur Behandlung von Abfällen der tierischen Produktion. Ber. Ldw. 50 (1972), S. 612 - 627, Verlag Paul Parey, Hamburg u. Berlin, 1972.
- (10) Bartlett, H.D., S. Persson, R.W. Regan u. A.E. Branding: Experiences from operating a full size anaerobic digester. ASAE Paper 77-4053. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, Michigan, 1977.
- (11) Besler, H.: Kleinbiogasanlage, 1977. Pers. Mitteilung v. Herrn Maurer, Landesanstalt für Maschinenwesen, Hohenheim.
- (12) Beyer, K.: Gasbetriebene Wärmepumpe. Gasverwendung 28 (1977), H. 9/10, S. 335 ff.

- (13) Böhme, H.: Pers. Mitteilung, Institut für Tierernährung der FAL Braunschweig, 1978.
- (14) Bremer, P.: Le potentiel énergétique suisse des gaz des fumier. Etude No. 17, Commission fédérale de la conception globale de L'énergie, Vevey, 1976.
- (15) Bryant, M.P.: The microbiology of anaerobic degradation and methanogenesis with special reference to sewage. In: Schlegel, H.G. u. J. Barnea: Microbial energy conversion. Verlag E. Goltze KG, Göttingen, 1976, S. 107-117.
- (16) Bryant, M.P., Varel, V.H., Frobish, R.A. u. H.R. Isaacson: Biological potential of thermophilic methanogenesis from cattle wastes. In: Schlegel, H.G. u. J. Barnea: Microbial energy conversion. Verlag E. Goltze, KG, Göttingen, 1976, S. 347 - 359.
- (17) Buswell, A.M.: Fundamentals of anaerobic treatment of organic wastes. Sewage Ind. Wastes, 29 (1957).
- (18) Buswell, A.M. u. C.S. Boruff: The correlations between the chemical composition of organic compounds and the amount and quality of gas from sludge digestion. Sewage Works Journal, 454, 1932.
- (19) Converse, J.C.; Graves, R.E. u. G.W. Evans: Anaerobic degradation of dairy manure under mesophile and thermophilic temperatures. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers 20 (1977), S. 336 - 340.
- (20) Converse, J.C.; Evans, G.W.; Verhoeven, C.R.; Gibbon, W. u. M. Gibbon: Performance of a large size anaerobic digester for poultry manure. ASAE-Paper 77-0451. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, Michigan, 1977.
- (21) Converse, J.C. u. R.E. Graves: Facts on methane production from animal manure. Fact sheet Univ. of Wisconsin, 1974.
- (22) Cooney, C. u. Wise, D.: Thermophilic anaerobic digestion of solid waste for fuel gas production. Biotechnol. Bioeng. 17 (1975), S. 1119.
- (23) D'ans, J. u. E. Lax: Taschenbuch für Chemiker und Physiker, Bd. 1: Makroskopische physikalisch-chemische Eigenschaften, Verlag Springer Berlin, Heidelberg, New York, 3. Aufl., 1967.
- (24) Dohne, E. u. M. Brenndörfer: Wie aktuell ist heute Biogas? Landtechnik 29 (1974), H. 7, S. 302-307.
- (25) Dohne, E. u. F. Feldmann: Landtechnik I - Feldwirtschaft. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 1969.
- (26) Eyser, E.: Biogas, eine Studie über die Aktualität der Biogasgewinnung. Abschlußarbeit, Gesamthochschule Kassel, 1976.

- (27) Fair, G.M. u. Moore, E.W.: Observations on the digestion of a sewage sludge over a wide range of temperature. Sewage Works J. 9 (1937) S. 3.
- (28) Feldmann, F.: Biogas - energiewirtschaftlich gesehen. Landtechnische Forschung, 4 (1954), H. 3, S. 65 - 78.
- (29) Fischer, J.R.; Iannotti, E.L.; Porter, J.H. u. A. Garcia: Producing methane gas from swine manure in a pilot-size digester. ASAE Paper MC 77-604. American Society of Agricult. Engineers, St. Joseph, Michigan, 1977.
- (30) Fischer, J.R.; Meador, N.E.; Sievers, D.M.; Fulhage, C.D. u. E.L. Iannotti: Design and operation of a farm-size anaerobic digester for swine. ASAE Paper 77-4052. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, Michigan, 1977.
- (31) Gaertner, A. u. S.D. Ikonomoff: Faulschlamm (Gasanlage) "System Berlin". Städtehygiene 7 (1956), S. 110 - 113.
- (32) Ghosh, S.; Conrad, J.R. u. D.L. Klass: J. Water Pollut. Control Fed. 47 (1975), H. 1, S. 30.
- (33) Göricke, P.; Bivalente Heizungen - Gedanken zur Wärmepumpenanwendung. Flüssiggas-Dienst 23 (1977), H. 2, S. 95 ff.
- (34) Götz, G.: Die Biogasgewinnung ohne Schwimmdecke "System München", In: Liebmann, H.: Gewinnung und Verwertung von Methan aus Klärschlamm und Mist, Verlag R. Oldenbourg, München, 1956, S. 269-278.
- (35) Gooding, B.: Power from pigs. New Zealand Farmer, April 1976, S. 14/15.
- (36) Heike, T.: Speicherung von Erdgas. Sonderdruck aus der Festschrift 100 Jahre SVGW des Schweiz. Vereins von Gas- und Wasserfachmännern, Zürich 1973.
- (37) Hein, K.: Betriebserfahrungen mit einer Mehrmotoren-BHKW-Anlage zur Beheizung eines Hallenbades. VDI-Berichte Nr. 287 (1977), S. 25 ff.
- (38) Hein, M.E.; Smith, R.J. u. R.L. Vetter: Anaerobic digestion of beef manure and corn stover. ASAE Paper 75-4542. American Society of Agric. Engineers, St. Joseph, Michigan, 1975.
- (39) Hein, M.E.; Smith, R.J. u. R.L. Vetter: Some mechanical aspects of anaerobic digestion of beef manure. ASAE Paper 77-4056. American Society of Agric. Engineers, St. Joseph, Michigan, 1977.
- (40) Heyl, L.v.; Ayik, M. u. J. Boxberger: Elektrischer Leistungsbedarf und Energieverbrauch verschiedener Arbeitsverfahren der landwirtschaftlichen tierischen Produktion und energiewirtschaftliche Folgerungen. Forschungsbericht des Instituts und der Bayerischen Landesanstalt für Landtechnik der TU München, Freising-Weihenstephan, VDEW, Frankfurt/M., 1975.

- (41) Hoffmann, H.: Gülle verbessert die Bodenfruchtbarkeit. Hannoversche Land- und forstwirtschaftliche Zeitung 130 (1977), H. 29, S. 12 - 15.
- (42) Hoyer, H.: Verfahren der Flüssigmistausbringung. KTBL-Schrift Nr. 209. Landwirtschaftsverlag, Münster-Hiltrup, 1977.
- (43) Hutt, W. u. W. Oelschläger: Einfluß der Brenneremissionen auf die Gehalte an anorganischen Ablagerungen auf Körnerfrüchten bei direkt-beheizten Trocknungsanlagen. Grundlagen der Landtechnik 26 (1976), Nr. 4, S. 134 ff.
- (44) Inden, P.P.: Mikrobielle Methanerzeugung aus Biomasse durch anaerobe Fermentation im technischen Maßstab. Diss. TH Aachen, 1977. In: Berichte der Kernforschungsanlage Jülich Nr. 1463, 1977.
- (45) Jewell, W.J. (Herausgeber): Bioconversion of agricultural wastes for pollution control and energy conversion, TID-27164, Cornell Univ. Ithaca, N.Y., 1977.
- (46) Jones, D.D.; Dale, A.C.; Nye, J.C. u. R.B. Harrington: Fiber wall reactor digestion of dairy cattle manure. ASAE Paper Nr. 77-4054.
- (47) Joos, L u. Rostek: Mit neuen Gasgeräten Energie sparen. Gasverwendung 28 (1977), H. 9/10, S. 314 ff.
- (48) Jung, W. u. W.W. Moritz: Einsatz von Flüssigerdgas zur Ersatzgasversorgung. Gaswärme international 26 (1977), Nr. 8, S. 378 ff.
- (49) Keiser, v. H.: Planungsdaten für die Heutrocknung. RKL, Kiel, 1977.
- (50) Kirsch, E.J. u. R.M. Sykes: Anerobic digestion in biological waste treatment. Progr. Ind. Microbiol. 9, 1971, S. 155-236.
- (51) Kolbusch, P. u. W. Schäfer: Beurteilung verschiedener biologisch-technischer Systeme zur Energie-Gewinnung, Dornier-System. Forschungsbericht Bundesministerium für Forschung und Technologie.
- (52) Konstandt, H.G.: Engineering, operation and economics of methane gas production. In: Schlegel, H.G. u. J. Barnea: Microbial energy conversion. Verlag E. Goltze KG, Göttingen, 1976, S. 379-398.
- (53) Konstandt, H.G.: Die technische Anwendung der Kontaktfäulung zur Behandlung eines organisch hochbelasteten Substrates am Beispiel von Mischgülle aus Massentierhaltungen, Industrieabwässer (Kommunalwirtschaft) 5 (1975), S. 13 - 16.
- (54) Kotze, J.F.; Thiel, P.G. u. W.H.J. Hattingh: Anaerobic digestion - II. The characteristics and control of anaerobic digestion. Water research, 3 (7), 1969, S. 459 - 493.
- (55) Koelliker, J.K. u. J.R. Miner: Desorption of ammonia from anaerobic lagoons. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 16 (1973), S. 148 - 151.

- (56) Kroeker, E.J.; Lapp, H.M.; Schulte, D.D. u. A.B. Sparling: Cold weather energy recovery from anaerobic digestion of swine manure. In: Energy, agriculture and waste management (Proceedings, Cornell Agricultural Waste Management Conf.), 1975, S. 337 - 352.
- (57) Liebmann, H.: Der neueste Stand der Kenntnisse über die Biologie der Methanbakterien. In: Liebmann, H.: Die Gewinnung und Verwertung von Methan aus Klärschlamm und Mist. Verlag R. Oldenbourg, München 1956, S.9-22.
- (58) Ljunggren, H. u. F. Petré: Metangasframställningens Mikrobiologij. rapport fr. Institutionen för Mikrobiologie, Nr. 7, Uppsala, 1976.
- (59) Loehr, R.C.: Management of waste from agricultural industries. Problems, Processes and Approaches. New York, London, 1974.
- (60) Loehr, R.C.: Anaerobic treatment of wastes. Devel. Ind. Microbiol. 9 (1968), S. 160.
- (61) Loll, U.: Engineering, operation and economics of biodigestion. In: Schlegel, H.G. u. J. Barnea: Microbial Energy Conversion. Verlag E. Goltze KG, Göttingen, 1976, S. 361 - 378.
- (62) Loll, U.: Persönliche Mitteilung, 1978.
- (63) Maly, J. u. H. Fadrus: Influence of temperature on anaerobic digestion. J. Water Pollut. control Fed. 43 (1971), S. 641.
- (64) McCarty, P.L. u. R.E. McKinney: Salt toxicity in anaerobic digestion. J. Water Pollution Control Federation, 33 (1961) 4, S. 399 - 415.
- (65) McCarty, P.L.: Anaerobic waste treatment fundamentals. II. Environmental requirements and control. Public Works. 94, 1964, S. 123.
- (66) McCarty, P.L.: Anaerobic waste treatment fundamentals. III. Toxic materials and their control. Public Works, 95, 1964, S. 91.
- (67) McCarty, P.L.: Anaerobic waste treatment fundamentals. IV. Process design. Public Works, 95, 1974, S. 95.
- (68) McCarty, P.L.: Energetics and kinetics of anaerobic treatment. In: Anaerobic Biological Treatment Processes. Pine, M.J. u. Polhalnd, F.G.: Adv. Chem. Series, 105, 1971, S. 91.
- (69) McDermott, G.N.; Moore, W.A.; Post, M.A. u. M.B. Ettinger: Copper and anaerobic sludge digestion. Journal Water Pollut. Control Federation, 35 (1963), S. 644 - 662.
- (70) Meenaghan, G.F.; Wells, D.M.; Albin, R.C. u. W. Grub: Gas production from beef cattle wastes. ASAE 70-907. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, Michigan, 1970.
- (71) Miner, J.R. u. R.J. Smith (Herausgeber): Livestock waste management with pollution control. North Central Regional Research Publication 222. Midwest Plan Service Handbook MWPS-19. Midwest Plan Service, Iowa State University, 1975.

- (72) Miner, J.R. (Herausgeber): Farm animal - waste management. North Central Regional Research Publication 206, Iowa Agricultural Experiment Station Spec. Rep. 67, Ames, Iowa, 1971.
- (73) Mölbert, H.: Landtechnik 2 - Veredelungswirtschaft. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart 1975.
- (74) Morris, G.R.; Jewell, W.J. u. G.L. Casler: Alternative animal waste anaerobic fermentation designs and their costs. In: Energy, Agriculture and Waste Management. Ann Arbor Science Publishers. Inc., 1975, S. 317 - 336.
- (75) Müller, W. u. D. Strauch: Ist es sinnvoll, aus hygienischen Gründen bei Faultürmen eine Verlängerung der Schlammfauzeiten zu fordern? Ges. Ing. 89 (1968), S. 118 - 121.
- (76) Nehring, K.: Futtermitteltabellenwerk 2. Aufl. Deutscher Landwirtschaftsverlag, Berlin 1972.
- (77) Neuling, S.: Der Wärmeaufwand für den Betrieb von Biogasanlagen. Agrartechnik 5 (1955), H. 6, S. 203 - 205.
- (78) Neuling, S.: Gestaltungsmöglichkeiten für den Bau von landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Agrartechnik 7 (1957), H. 10, S. 467 - 471, 479.
- (79) Neuling, S.: Untersuchungen zur wirtschaftlichen Speicherung von Biogas. Agrartechnik 6 (1956), H. 2, S. 64 ff.
- (80) Noack, W.: Biogas in der Landwirtschaft. Verlag Elsner, Darmstadt 1955.
- (81) Orth, H.W.: Möglichkeiten des Einsatzes von Wärmepumpen in der Landwirtschaft. Institut für Landmaschinenforschung der FAL. Bericht 77/1, Braunschweig 1977.
- (82) Persson, S.: Progress report from the first year of operation of the Penn State Anaerobic Digester. Meeting of the North Atlantic Region of the ASAE at Rutgers University, New Jersey, 18. August 1976.
- (83) Pfeffer, J.T. u. K.A. Kahn: Microbial production of methane from municipal refuse. Biotechnology and Bioengineering, Vol. XVIII, 1976, S. 1182.
- (84) Pigg, D.L.: Commercial size anaerobic digester performance with dairy manure. ASAE Paper 77-4055. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, Michigan, 1977.
- (85) Poch, M. u. L. Häncke: Die biologisch-thermische Desinfektion von Gülle mit Hilfe der thermophilen Methangärung. Z. Gesundh. Hygiene, 14 (1968), S. 553 - 555.
- (86) Pöpel, F.: Das Wesen der Vergärung organischer Stoffe bei der Kompostierung. In: Kumpf, W.; Maas, K. u. H. Straub: Müll- u. Abfallbeseitigung, Band 3, Kap. 5305. Erich Schmidt Verlag, Berlin 1964.

- (87) Poetsch, W.: Entwicklung und Erprobung einer handwerklich gefertigten Biogas-Anlage aus Holz. Techn. Hochschule Hannover. Arbeitsber. 13, 1963.
- (88) Pohle, J.; Rostek, H. u. G. Wilmers: Gaswärmepumpen - Erste Ergebnisse einer Versuchsanlage. VDI-Bericht Nr. 259, 1976.
- (89) Reinhold, F. u. W. Noack: Laboratoriumsversuche über die Gasgewinnung aus landwirtschaftlichen Stoffen. In: Liebmann, H.: Gewinnung und Verwertung von Methan aus Klärschlamm und Mist. Verlag R. Oldenbourg, München, 1956, S. 252-268.
- (90) Robertson, A.M.; Burnett, G.A.; Hobson, P.N.; Bousfield, S. u. R. Summers: Bioengineering Aspects of anaerobic digestion of piggery wastes. In: Managing Livestock Wastes (Proceedings, International Symposium), S. 544 - 548. American Society of Agricultural Engineers PROC-275, 1975.
- (91) Roediger, H.: Die anaerobe alkalische Schlammfäulung. - Wasser - Abwasser, H. 1, Verlag R. Oldenbourg, München, 3. Auflage, 1967.
- (92) Roediger, H. u. H.G. Konstandt: Schlammbehandlung - Die zentrale Stellung der Schlammfäulung mit Faulgasverwertung in Bezug auf Abwasserreinigung und Schlammbehandlung. Schweiz. Maschinenmarkt, 47 (1972), S. 34 - 37.
- (93) Rosegger, S.: Energetische Fragen bei der biologischen Gaserzeugung in der Landwirtschaft. Agrartechnik 5 (1955), H. 10, S. 388 - 393.
- (94) Rosegger, S. u. S. Neuling: Wege zur Berechnung von landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Agrartechnik 7 (1957), H. 1, S. 14 - 17.
- (95) Rosegger, S.: Der Entwicklungsstand von Biogasanlagen und Perspektiven für die landwirtschaftliche Praxis. Agrartechnik 7 (1957), H. 12, S. 545 ff.
- (96) Rudolf, F.: Wärmepumpen - Einsatzmöglichkeit und Wirtschaftlichkeit. Tagungsbericht: Rationelle Energieverwendung im Wohnungsbau. Batelle-Institut Frankfurt, 3. Juni 1977.
- (97) Rudolph, M.: Unkonventionelle Arten der Kraft-Wärme-Kopplung. Energie 29 (1977), H. 11, S. 368 ff.
- (98) Sauerlandt, W. u. C. Tietjen: Humuswirtschaft des Ackerbaues. DLG-Verlag, Frankfurt/M., 1970.
- (99) Sauerlandt, W. u. E. Groetzner: Eigenschaften und Wirkungen der bei der biologischen Gasgewinnung aus Stallmist anfallenden organischen Dünger. In: Liebmann, H.: Gewinnung und Verwertung von Methan aus Klärschlamm und Mist, Verlag R. Oldenbourg, München, 1956.
- (100) Sawyer, C.N. u. J.S. Grumbling: Fundamental consideration in high rate digestion. J. San. Eng. Div. Proc. American Society Agricultural Engin. 86, 1960, S. 49.

- (101) Scheffer, F. u. G. Kemmler: Biologische Gasgewinnung aus Stallmist. Mitt. d. DLG 78 (1953), H. 2, S. 27 - 29.
- (102) Schlegel, H.G. u. J. Barnea: Microbial energy conversion. Verlag Erich Goltze KG, Göttingen, 1976.
- (103) Schmidt, F. u. W. Eggersglüss: Die Bihugasanlage Allerhop. DEFU-Mitt. Heft 9, Verden, 1951.
- (104) Schmidt, L.A. u. R.I. Lipper: Swine wastes, characterization and anaerobic digestion. In: Animal waste management, Cornell University, Ithaca, New York, 1969, S. 50 - 57.
- (105) Schneider, U.: Energiewirtschaftliche Bedarfswahlen. Berichte über Landwirtschaft Nr. 73, Teil II (1962).
- (106) Schneiderhöhn, R. u. U. Schneider: KTBL-Datensammlung für die Kalkulation der Kosten und des Arbeitszeitbedarfs im Haushalt. Landwirtschaftsverlag Hiltrup 1975.
- (107) Schürmer, E.: Preis- und Kostenkalkulation für Heizanlagen im Gartenbau. KTBL-Berichte über Landtechnik 144, Landwirtschaftsverlag, Hiltrup 1971.
- (108) Seifert, A.: Biogas als Kraftstoff für Motoren und Ackerschlepper. Landtechnik 10 (1955), H. 2, S. 29 ff.
- (109) Smith, R.J.; Fehr, R.L.; Miranowski, J.A. u. E.R. Pidgeon: The role of an anaerobic digester on a typical central-Iowa farm. In: Food, fertilizer and agricultural residues (Proceedings, Cornell Agricultural Waste Management Conf.), 1977.
- (110) Smith, L.W.; Goering, H.K. u. C.H. Gordon: Influence of chemical treatments upon digestibility of ruminant feces. In: Animal Waste Management, Cornell University, Ithaca, New York, 1969, S. 88 - 104.
- (111) Smith, R.J.; Hein, M.E. u. T.H. Greiner: Experimental methane production from animal excreta. Journal Paper No. J-8917 of the Iowa Agr. and Home Economics Exp. Station, Ames, Iowa, 1977.
- (112) Smith, R.J. u. J.R. Miner: Livestock waste management with pollution control. Midwest Plan Service. Iowa State Univ. Ames, Iowa, 1975.
- (113) Sauer, K.-L.: Kühlen und Heizen mit direktgasbeheizten Absorptionsgeräten. Gasanwendung 28 (1977); S. 186 ff.
- (114) Sauer, K.-L.: Wärmeerzeuger der Zukunft - die direktgasbeheizte Absorptionswärmepumpe als Alternative. Gasverwendung 28 (1977), H. 9/10, S. 341 ff.
- (115) Strauch, D.: Hygienische Probleme bei der Gewinnung, Behandlung und Verwertung tierischer Exkremente. In: Abfälle aus der Tierhaltung, Kap. F, Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 1977, S. 246-276.

- (116) Stauss, W.: Der heutige Stand der Biogasgewinnung aus landwirtschaftlichen organischen Stoffen. In: Liebmann, H.: Gewinnung und Verwertung von Methan aus Klärschlamm und Mist, Verlag R. Oldenbourg, München, 1956, S. 216-251.
- (117) Summers, R. u. S. Bousfield: Practical aspects of anaerobic digestion. Process Biochemistry, Juni 1976.
- (118) Tabasaran, O.: Über Maßnahmen zur Beschleunigung der Schlammfäulung. 33. Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, München, 1967.
- (119) Taiganides, E.P.; Hazen, T.E.; Baumann, E.R. u. H.P. Johnson: Properties and pumping characteristics of hog wastes. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers 7 (1964), S. 123, 124, 127 u. 129.
- (120) Theune, H.H.: Pers. Mitt., Institut für Grünlandwirtschaft, Futterbau u. Futterkonservierung der FAL, Braunschweig, 1978.
- (121) Tietjen, C.: From biodung to biogas - historical review of European experience. In: Jewell, W.J. (Herausgeber): Energy agriculture and waste management; Ann Arbor Sci. Publishers, Inc., Ann Arbor, Michigan, 1975.
- (122) Tietjen, C.: Pers. Mitteilung, 1977.
- (123) Tietjen, C.: Bilanzuntersuchungen bei Stallmistaufbereitung in Biogasanlagen. Pflanzenern., Düngung, Bodenkunde 77 (1957), S. 1988 ff.
- (124) Tschierschke, M.: Die Erzeugung von Biogas im landwirtschaftlichen Betrieb. Archiv für Landtechnik 3 (1961/62), S. 243 - 277.
- (125) Varel, V.H.; Isaacson, H.R. u. M.P. Bryant: Thermophilic methane production from cattle waste. Applied and Environmental Microbiology 33 (1977), S. 298 - 307.
- (126) Velsen, van, A.F.M.: Anaerobic digestion of piggery waste. 1. The influence of detention time and manure concentration. Neth. J. agric. Scie. 25 (1977), S. 151 - 169.
- (127) Vielhaber, K.: VDI-Statusbericht Wärmepumpe, Düsseldorf, VDI-Verlag 1976.
- (128) Vielhaber, K.: Wärmepumpen mit Gas-Zusatzheizungen. Flüssiggas-Dienst (1977), H. 4, S. 9 ff.
- (129) Vogt, H.: Pers. Mitt., Institut für Kleintierzucht der FAL, Celle, 1978.
- (130) Waart, de, J.; v.d. Most, M.M. u. W. Knol: Production of energy and non-offensive smelling sludge from liquid pig manure. Abstracts Fifth Intern. Fermentation Symposium, Berlin, 1976.

- (131) Weber, F.: Neue Erkenntnisse in der Düngewirtschaft. Eigenverlag F. Weber, 7311 Bissingen, 1977.
- (132) Wickermann, E.: Die Kalkulation der Heizmaterialkosten für Gewächshäuser ...
Forschungsberichte aus Institut für gärtnerische Betriebslehre und Marktforschung. TU-Hannover, Nr. 4, 1969.
- (133) AEG-Hilfsbuch, Handbuch der Elektrotechnik. X. Auflage, AEG-Telefunken, 1967.
- (134) ATV-Abwassertechnik, Bd. III. Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, München, 1969.
- (135) DVGW-Arbeitsblatt G 260. Technische Regeln für die Gasbeschaffenheit.
- (136) Energie Gas - allgemeine Grundlagen (V). Gasverwendung 28 (1977), H. 7/8, S. 283.
- (137) Familie und wohnen. Schriftenreihe des Bundesministers für Jugend, Familie und Gesundheit, Band 20, Verlag Kohlhammer, Stuttgart, 1976.
- (138) Fiat Auto Group - Totem, Total energy module, September 1977.
- (139) Gaswärmepumpe für Heizung und Warmwasser. Ruhrgas-AG, Essen 1976.
- (140) Hütte, Taschenbuch des Ingenieurs. Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin.
- (141) Landwirtschaftliche Trocknungswerke in der Bundesrepublik. Der Kartoffelbau 23 (1972), H. 12, S. 302.
- (142) Merkblätter gefährliche Arbeitsstoffe, Blatt Nr. M 09 Methan, Blatt Nr. S 14 (Schwefelwasserstoff), Blatt Nr. K 19 (Kohlendioxid).
- (143) Metangas ur gödsel, framställning och användning. Jordbrukstekniska Institutet-Rapport 18, Uppsala, 1976.
- (144) Report of the Preparatory Mission on Bio-Gas Technology and Utilization. Economic and Social Commission for Asia and the Pacific, Manila/Bangkok 1975.
- (145) Sicherheitsregeln für Abwasserbehandlungsanlagen - Bau und Ausrüstung. GUV 17.5.1969. Bundesarbeitsgemeinschaft der gemeindlichen Unfallversicherungsträger.
- (146) Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten der Bundesrepublik Deutschland 1976. Landwirtschaftsverlag GmbH., Münster-Hiltrup, 1976.
- (147) Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten der Bundesrepublik Deutschland 1977. Landwirtschaftsverlag GmbH., Münster-Hiltrup, 1977.

- (148) Unfallverhütungsvorschrift der land- und forstwirtschaftlichen Berufsgenossenschaften.
- (149) Unfallverhütungsvorschrift "Druckbehälter" (VBG 17) des Hauptverbandes der gewerblichen Berufsgenossenschaften.
- (150) VDI-Richtlinie 2067, Blatt 2, Jan. 1974.
Wirtschaftlichkeitsberechnungen von Wärmeverbrauchsanlagen, betriebstechnische und wirtschaftliche Grundlagen.

Anlagen

Anlage 1: Merkblätter gefährliche Arbeitsstoffe
Kühn-Birett.
Verlag Moderne Industrie
Wolfgang Dummer & Co.
Ehrenbreitsteiner Str. 36
8000 München 50

Merkblatt Nr. M 09 Methan

Merkblatt Nr. K 31 Kohlendioxid

Merkblatt Nr. S 14 Schwefelwasserstoff

Anlage 2: Unfallverhütungsvorschriften der
land- und forstwirtschaftlichen
Berufsgenossenschaft Rheinhessen-Pfalz

Abschnitt 5 "Biogasanlagen"

Gefahrenbereich 	Methan handelsüblich in Druckbehältern (verdichtet) Grubengas, Sumpfgas, Erdgas	
Arbeitsplatz 	Farbloses, wasserunlösliches, geruchloses, ungiftiges, leicht entzündliches Gas, viel leichter als Luft. Mit Sauerstoff oder Luft explosionsfähiges Gemisch. Mit bläulicher Flamme brennend. Stickgas! Schwach narkotische Wirkung. Intoxikationen durch Verunreinigung möglich.	  
A. Hinweise zur Sicherheit <ol style="list-style-type: none"> 1. Gute Raumbelüftung und Deckenabsaugung vorsehen. Explosionsgefährdeter Bereich. Wasserschleier über Anlagen und Behältern. Maßnahmen gegen elektrostatische Aufladungen und Zündquellen treffen. Alarmplan aufstellen! 2. Feuerlöscher der Brandklasse C und Feuerlöschdecke im Arbeitsraum bereitstellen. Standorte durch Hinweisschilder kennzeichnen. 3. Vor Betrieb Luft aus den Anlagen entfernen. Geschlossene, geerdete Apparaturen verwenden, an Absaugung anschließen und Absaugleitung ins Freie führen. Leitungen kennzeichnen und an ungefährdeter Stelle absperrbar machen. Einstempelung "Methan" vorgeschrieben. Regelmäßige Dichtheitsprüfung (Quittungsbuch). Apparaturen und Öfen im heißen Zustand nicht öffnen, vorher mit Stickstoff spülen. Bei Gasaustritt Arbeitsraum schnellstens verlassen. Wiederbetreten des Raumes nur mit schwerem Atemschutzgerät. Undichte Flaschen sofort ins Freie bringen und vorsichtig unter Aufsicht entleeren. Beim Umgang mit größeren Mengen sowie bei Abfüllarbeiten an Transportbehältern ist eine Sicherheitszone gegen unbeteiligte Personen abzugrenzen und Zündquellen in diesem Bereich auszuschließen. Keine Vorratsflaschen im Arbeitsraum lagern. Flaschenbatterie und -Bündel mit Hauptabsperrventil versehen. 4. Von elektrischen Geräten, offenen Flammen und Funken fernhalten. Rauch- und Schweißverbot im Arbeitsraum. Wenn Gasaustritt in der Schutzzone möglich, dürfen auch außerhalb keine Zündquellen sein. Im Freien Gasflaschen der Einwirkung von Sonnenstrahlung entziehen, evtl. Wasserberieselung vorsehen. 5. Keine gefährliche Reaktion unter 2 Vol% Sauerstoff. Größte Explosionskraft hat Gas-Luftgemisch bei 9,4% Methan. Nicht mischen mit Acetylen, Chlor, Distickstoffoxid, Fluor, Stickstofftetroxid. 6. Bei der Lagerung und im Betrieb auf Dichtheit der Behälter achten und an einem gut gelüfteten Ort aufrecht aufbewahren. Nicht mit leicht entzündlichen Stoffen zusammen lagern. Nicht in Fluchtwegen und Arbeitsräumen aufbewahren. Ab- und Umfüllen von Flaschen in Lagerräumen verboten. Behälter dürfen nur bis 95% mit Flüssigphase gefüllt sein. Von anderen Gasen absondern, so aufstellen, daß austretendes Gas wirksam bekämpft werden kann. Die Füllung muß frei von Cyanwasserstoff und Schwefelverbindungen sein. 7. Beim Transport Schutzkappen und Blindmuttern fest aufschrauben. 8. Gasflaschen mit Absperrventil W 21, 80 x 1/14" Linksgewinde vorgeschrieben. Ventile nicht mit Gewalt öffnen. Beim Auswechseln der Flaschen stets Ventile von gefüllten und auch leeren Flaschen auf Dichtheit prüfen. Schläuche mindestens 1/2 jährlich überprüfen. An Leitungen zusätzlich Rückströmsicherungen, wenn die Verbrennung fördernde Gase eindringen können. 9. Bei Änderung der Füllung und Gemischen über 2 Vol. % die Aufschrift "Methan" nicht entfernen, sondern nur durchkreuzen. 10. Essen, Trinken und Aufbewahren von Nahrungsmitteln im Arbeitsraum verboten. 11. Bei Auftreten von Gasen in geschlossenen Räumen nur schweres Atemschutzgerät einsetzen. Kontrolle der Gaskonzentration in Luft mit Dräger Erdgastest. 12. Turnusmäßige Belehrung der Beschäftigten mit Eintragung ins Quittungsbuch erforderlich. Beschäftigungsbeschränkung nach ArbStoffV § 15 beachten. 13. <u>Behälterkennzeichnung nach TRG durchführen mit Gefahrensymbol "Flamme" und Stoffnamen sowie Flaschen mit rotem Anstrich versehen.</u> 		
Kühn-Birett	Merkblätter Gefährliche Arbeitsstoffe	Blatt-Nr. M 09

B. Hinweise zum Brand- und Schadensfall

1. Sand oder Pulverlöscher verwenden! Austretendes Gas kann mit Wasserstrahl abgedrängt werden. Umliegende Behälter und Flaschen gründlich mit Sprühwasser kühlen. Explosionsgefahr!
Nur explosionssichere Hilfsgeräte einsetzen.
2. Schweres Atemschutzgerät einsetzen.
3. Beim Straßentransport größerer Mengen (s. -Gefahrgut VStr-) das entsprechende Unfallmerkblatt nach CEFIC mitführen und im Schadensfall beachten.

C. Hinweise zum Gesundheitsschutz

1. Wirkungscharakter und Toxizität: Methan ist ohne nennenswerte Eigenwirkung und unter normalen Bedingungen ein einfaches Stickgas, das durch Sauerstoffabspernung Atemstillstand bewirkt.
Narkotische Wirkung tritt nur bei Einatmung unter Druck ein. Mehrstündiges Einatmen eines Gemisches von 5 Vol. Methan und 1 Vol. Sauerstoff rief noch keine Narkose hervor.
Etwa 330 - 520 mg/l erzeugen Kopfschmerz und Schläfrigkeit (Dauer der Einwirkung nicht angegeben). Unterschied zwischen narkotischen und toxischen Dosen gering.
2. Erste Hilfe: Nach Einatmen rasche Entfernung aus dem Raum. Ruhe. In leichten Fällen Frischluft tief atmen lassen, sonst Atemwege frei halten, Horizontallagerung, Kopf nach hinten legen und evtl. Beginn der künstlichen Beatmung. Transport in stabiler Seitenlage.
3. Arzt: ggf. Sauerstoffbeatmung, Lobelineinspritzung evtl. Gegenmittel wie bei CO

Braun/Dönhardt (1970) S. 335; Ludewig/Lohs (1971) S. 109, 140.

Formel:	CH ₄	MAK:	
Molekulargewicht:	16,0	krit. Punkt:	
Gaszustand:		Temperatur:	-82,5°C
Dichte:	0,72 kg/Nm ³	Druck:	46,3 bar
rel. Gasdichte: (Luft=1)	0,55	Dichte:	0,162 kg/l
Zündpunkt:	595°C	Löslichkeit in Wasser 20°C:	
Explosionsgrenzen in Vol. %:	5 - 15		0,0349 nm ³ /m ³
<u>flüssiger Zustand</u>		1 mg/m ³	= 1,500 ppm
Schmelzpunkt:	-182°C	1 ppm	= 0,667 mg/m ³
Siedepunkt:	-161°C		
Dichte:	0,42 kg/l		
	1,704 l/Nm ³		

D. Weitere Hinweise

IMCO-Code S: 2170; U. N. Nr. 1971

VBG 1, 1a; 61; ZH 1/10, 119, 200, 310, 400 der BG TRG 101-1/1.2 und 104-1c, 102-1/1.2, 102-2B; EVO Id/1; VDE-Vorschriften; EX-RL; DIN 477; Ullmann: Bd. 10, S. 7, 39; Römpf: Bd. 3, S. 4003.

Gefahrenbereich 	Kohlendioxid Kohlensäure (in Druckgasflaschen verflüssigt bzw. in fester Form als Trockeneis)	<table border="1"> <tr><td>20</td></tr> <tr><td>1013</td></tr> </table>	20	1013	
20					
1013					
Arbeitsplatz  	Farbloses, unsichtbares, beständiges, reaktionsfähiges Gas, nicht brennbar, schwerer als Luft mit schwach säuerlichem Geruch. Freiwerdende Flüssigkeit erstarrt zu fester Form - Trockeneis. Kaltes Gas bildet mit feuchter Luft Nebel. Je nach eingeatmeter Konzentration wirkt das Gas erregend, betäubend oder erstickend. Resorption erfolgt in geringem Maße auch durch die Haut. Flüssiges Kohlendioxid und Trockeneis führen bei Berührung zu schweren Erfrierungen.	<table border="1"> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table>			

A. Hinweise zur Sicherheit

1. Gute Be- und Entlüftung des Raumes vorsehen. Bei der Möglichkeit des Auftretens größerer Mengen von Kohlendioxid Absaugung an der Austritts- bzw. Entstehungsstelle erforderlich. Schächte und Kanäle müssen gegen das Eindringen des Gase geschützt sein.
2. Feuerlöscher auf die brennbaren Stoffe der Umgebung abstimmen. Evtl. Augenspülflasche im Arbeitsraum sichtbar bereitstellen. Standorte und Fluchtwege durch Hinweisschilder kennzeichnen. Türen und Fenster für Fluchtwege müssen nach außen aufschlagen. Große Schiebetüren müssen eine Schlupftür haben.
3. Im Betrieb möglichst geschlossene Apparate verwenden. Regelmäßige Dichtheitskontrolle vornehmen. Bei Undichtheiten oder Ausfall der Anlage sofort Arbeitsraum verlassen und erst wieder mit umluftunabhängigem Atemschutzgerät betreten. Dabei Anwesenheit von mindestens 2 Personen erforderlich.
4. Flaschen von offenen Flammen und Wärmequellen fernhalten. Im Freien der Sonneneinwirkung entziehen. Behälter die Mängel aufweisen, durch die Beschäftigte oder Dritte gefährdet werden, sind unverzüglich zu entleeren.
5. Kohlendioxid kann mit verschiedenen Stoffen, besonders bei höheren Temperaturen heftig reagieren und ist daher kein universelles Löschmittel. Bei Mischungen mit Ammoniak, Äthylamin, Methylamin, Dimethylamin und Trimethylamin sind gefährliche Reaktionen möglich. Bei rascher Entspannung auf Normaldruck erstarrt flüssiges Kohlendioxid unter Abkühlung auf -79°C zu Trockeneis, das rasch verdampft, ohne zu schmelzen.
6. Bei der Lagerung und im Betrieb Druckgasbehälter dicht geschlossen halten und an einem gut gelüfteten Ort aufbewahren. Nicht mit leicht entzündlichen Stoffen zusammen und nicht in Fluchtwegen und Arbeitsräumen und in deren unmittelbarer Nähe lagern. Ab- und Umfüllen von Flaschen in Lagerräumen verboten. Behälter dürfen nur bis 95% mit Flüssigphase gefüllt sein. Wird flüssiges Kohlendioxid in Gebäuden abgefüllt, so müssen die Räume gut belüftbar sein und ebenerdig oder in Rampenhöhe liegen.
7. Kohlendioxid wird in verflüssigter Form in Druckbehältern befördert. Beim Transport Schutzkappen und Blindmuttern fest aufschrauben.
8. Anschlußgewinde des Gasflaschenventils W 21. 80 x 1/14 in und für Feuerlöschanlagen auch R 1. Ventile nicht mit Gewalt öffnen. Beim Auswechseln der Flaschen stets Ventile von gefüllten und auch leeren Flaschen auf Dichtheit prüfen. Abblasen von Kohlendioxid nicht in geschlossenen Räumen vornehmen. Zur Entnahme von Gas Flaschen nur aufrecht halten. Schläuche mindestens 1/2 jährlich überprüfen. Werkstoffe müssen den zu erwartenden mechanischen, chemischen und thermischen Beanspruchungen genügend widerstehen. Nachweis mit Dräger Prüfröhrchen für verschiedene Konzentrationen.
9. Essen, Trinken und Aufbewahren von Nahrungsmitteln am Arbeitsplatz verboten.
10. Schutzkleidung und Handschuhe aus Leder oder dickem Stoff tragen. Bei Auftreten des Gases in geschlossenen Räumen nur umluftunabhängiges Atemschutzgerät einsetzen. Bei Umgang mit Trockeneis Kälteschutz beachten.
11. Turnusmäßige Belehrung der Beschäftigten mit Eintragung ins Quittungsbuch. Beschäftigungsverbote nach ArbStoffV § 15 beachten.
12. Behälterkennzeichnung mit dem Namen des Stoffes durchführen. Nur behördlich zugelassene Behälter verwenden.

Kühn · Birett	Merkblätter Gefährliche Arbeitsstoffe	Blatt-Nr. K 31
---------------	---------------------------------------	-------------------

B. Hinweise zum Brand- und Schadensfall

1. Kohlendioxid selbst brennt nicht. Löschmaßnahmen auf Umgebung abstimmen. Im Brandbereich befindliche Behälter mit Sprühwasser kühlen, aus der Gefahrenzone bringen, Berstgefahr! Austretendes Gas breitet sich am Boden aus und bildet mit feuchter Luft Nebel. Auslaufende Flüssigkeit ist sehr kalt und erstarrt sofort zu schneeähnlicher Masse die rasch verdampft. Erstikungsgefahr, besonders in geschlossenen und tiefliegenden Räumen! Auf Erfrierungen an Körperteilen achten. Auf windzugewandter Seite bleiben.
2. Umluftunabhängiges Atemschutzgerät erforderlich.
3. Kein wassergefährdender Stoff.
4. Nach GefahrgutVStr ist beim Straßentransport größerer Mengen eine Fahrzeugkennzeichnung durch orangefarbene Warntafeln mit Kennzeichnungsnummern und das Mitführen von Unfallmerkbältern vorgeschrieben.

C. Hinweise zum Gesundheitsschutz

1. Wirkungscharakter und Toxizität: Kohlendioxid wirkt in hohen Konzentrationen lähmend auf das Atemzentrum. Bei niederen Konzentrationen spielt eine ausreichende oder fehlende O₂-Zufuhr für den Schweregrad und Verlauf der CO₂-Vergiftung eine entscheidende Rolle. Je nach Dauer der Inhalation, ohne genügende Sauerstoffzufuhr bei etwa 8-10 Vol. %, Kopfschmerzen, Ohrensausen, Schwindelgefühl, Blutdruckanstieg, Tachykardie, Tachypnoe bzw. Dyspnoe, Zyanose, Erregungszustände, Nausea. Über 10 Vol. % Ataxie, mitunter epileptiforme Krämpfe, Bewußtlosigkeit, Blutdruckabfall. Bei rechtzeitiger Frischluftzufuhr rasche Erholung, sonst Erstickung! Über 18-20 Vol. % apoplektiformer Verlauf. Nach Hautkontakt mit der Flüssigkeit bzw. mit Trockeneis Rötung und Schwellung, evtl. Blasenbildung. Unter Umständen mehr oder weniger tiefe Zerstörung des Gewebes. Starke Schmerzen.
2. Erste Hilfe: Nach Inhalation Betroffenen sofort aus dem Gefahrenbereich bringen. Für frische Luft sorgen. In geschlossenen Räumen Atemschutzgerät tragen. Ruhe, Wärme, wenn nötig künstliche Atmung, Atemwege freihalten. Kreislauf überwachen, evtl. Herzmassage. Bei Bewußtlosigkeit Lagerung und Transport in stabiler Seitenlage.
3. Arzt. Nach Inhalation künstliche Sauerstoffbeatmung (Cave Aspiration bei Erbrechen), allenfalls Intubation und Kontrolle der Blutgase bzw. des Säure-Basen-Gleichgewichtes erforderlich; entsprechende Therapie durch Infusion von (Tris-hydroxymethylaminomethan) oder Trispuffer u. ä. Weiter symptomatisch. Bei starken Schmerzen auf der Haut Hydromorphonhydrochlorid 1 Amp. unter die Haut spritzen. Atmung und Kreislauf überwachen. Methylprednisolon 2 Amp. in den Muskel spritzen.

Literatur: Ludewig/Lohs (1974) S. 237; Braun/Döhnhardt (1975) S. 221; Moeschlin (1972) S. 196.

Formel:	CO ₂	MAK:	5000 ppm
Molekulargewicht:	44,01	<u>fester Zustand</u>	
<u>Gaszustand:</u>		Sublimationstemp.	-78,5°C
Dichte	1,98 g/l	Dichte (-79°C)	1,56
rel. Gasdichte:	1,53	<u>kritischer Punkt</u>	
Löslichk. in Wasser (0°C)	171ml/100	Temperatur:	31,0°C
(25°C)	75,7ml/100	Druck :	74 bar
<u>flüssiger Zustand</u>		Dichte:	0,47 kg/l
Tripelpunkt: Temp.	-56,57°C (216,6K)	Dampfdruck bei 20°C	57,2 bar
Druck:	5,09 bar	(flüssiger Zustand)	
Dichte:	0,81 kg/l	1 mg/m ³ = 0,545 ppm	
	1,545 l/Nm ³	1 ppm = 1,833 mg/m ³	

D. Weitere Hinweise

IMDG-Code S. 2110; U. N. Nr. 1013

VBG 1,61; ZH 1/119, 400 der BG; TRG 101-2/2, 1 und 102-2/H; EVO Id/9; Auer Technikum Nr. 418; DIN 477; Ullmann:(3) Bd. 9, S. 748; Römpf: Bd. 2, S. 3315; Hommel Merkblatt Nr. 115; CEFIC Merkblatt Nr. 186; Messer-Griesheim: Gase Handbuch; Matheson/ Gas-Data-Book.

<p>Gefahrenbereich</p> 	<p>Schwefelwasserstoff aus Druckbehältern, gilt sinngemäß z. Tl. auch für den Betrieb von Kipp'schen Gasentwicklern. Hydrothionsäure, Wasserstoffsulfid</p>	
<p>Arbeitsplatz</p> 	<p>Giftiges, wasserlösliches Flüssiggas, farblos, sehr leicht entzündlich, bildet mit Luft explosionsfähiges Gemisch. Gas etwas schwerer als Luft, in best. Konzentration nach faulen Eiern riechend. Geruchswarnung kann bei längerer Einwirkung und höherer Konzentration aussetzen, nicht zuverlässig! Reizwirkung auf Augen und Atemwege. Geringe Hautresorption, schweres Atemgift, Lungenödem möglich.</p>	<p>* </p> <p>* </p> <p>* nicht nach VO</p>
<p>A. Hinweise zur Sicherheit</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Sehr gute Lüftung des Arbeitsraumes und Bodenabsaugung vorsehen. Gas an der Entstehungsstelle wirksam absaugen. Explosionsgefährdeter Bereich. Maßnahmen gegen elektrostatische Aufladungen treffen. Evtl. Sprinkleranlage ! 2. Feuerlöscher der Brandklasse C und Feuerlöschdecke sowie Augenspülflasche bereitstellen. Ggf. beim Umgang mit größeren Mengen Personendusche vorsehen. Standorte mit Hinweisschildern kennzeichnen. 3. Im Betrieb geschlossene, geerdete Apparaturen verwenden und Absaugung vorsehen. Abgas über Abscheider ins Freie führen. Immissionswerte beachten. Entlüfter mit Warnsymbol "Gift" kennzeichnen. Regelmäßige Dichtheitskontrolle! Bei Gasaustritt Arbeitsraum schnellstens verlassen. Wiederbetreten des Raumes nur mit schwerem Atemschutzgerät. Keine Vorratsflaschen im Raum lagern. Betrieb u. Reinigung von H₂S-Gasentwicklern nur unter Absaugung. 4. Von elektrischen Geräten, offenen Flammen, Wärmequellen und Funken fernhalten. Strenges Rauch- und Schweißverbot im Raum. 5. In feuchter Luft und bei erhöhter Temperatur werden fast alle Metalle unter Sulfidbildung angegriffen. Silber, Kupfer, Mangan, Blei und deren Legierungen sind als Konstruktionswerkstoffe ungeeignet. Elektrische Kontaktstellen regelmäßig auf Korrosion überprüfen. Reagiert mit Oxidationsmitteln zum Teil bis zur Entzündung (SO₂-Bildung). Beim offenen Entspannen des Gases entstehen große Mengen kalten Nebels. H₂S kann auch aus Sulfiden in Kontakt mit Säuren in gefährlichen Mengen entstehen. Gefährliche Reaktionen möglich mit: Äthylamin, Äthylenoxid, Ammoniak, Chlor, Dimethylamin, Distickstoffoxid, Fluor, Methylamin, Schwefeldioxid, Stickstofftetroxid, Trimethylamin. Mit O₂ nur unter 2 Vol. % keine gefährliche Reaktion. 6. Bei der Lagerung und im Betrieb auf Dichtigkeit der Flaschen achten und an einem verschlossenen, kühlen Ort aufbewahren. Gegen Umfallen sichern, nicht werfen! Nicht mit brennbaren und leicht entzündlichen Stoffen zusammen lagern. Nicht in Treppenhäusern, Fluren, und Durchgängen aufbewahren. Ab- und Umfüllen der Flaschen in Lagerräumen verboten. 7. Beim Transport Schutzkappen und Blindmuttern fest aufschrauben. 8. Vorgeschriebenes Anschlußgewinde des Flaschenventils 1 in links. Ventile nicht mit Gewalt öffnen. Beim Auswechseln der Flaschen stets Ventile von gefüllten und auch leeren Flaschen auf Dichtigkeit prüfen. 9. Essen, Trinken und Aufbewahren von Nahrungsmitteln am Arbeitsplatz verboten. 10. Flammensichere Schutzkleidung tragen. Vergaste Kleidung sofort wechseln und durchlüften. Evtl. Schutzhandschuhe und Schutzbrille benutzen. Ggf. Atemschutzgerät mit Filter B (Kennfarbe grau) einsetzen. Bei Gefahr höherer Konzentrationen und bei Hilfeleistungen nur schweres Atemschutzgerät anlegen. Kontrolle der Gaskonzentration in Luft mit Prüfröhrchen Dräger CH 298, 281, 282, 291 oder einfacher Nachweis mit Bleiacetatpapier möglich. 11. Turnusmäßige Belehrung der Beschäftigten mit Eintragung ins Quittungsbuch Beschäftigungsverbote nach ArbStoffV § 15 beachten. Beschäftigungsverbot für Augen- und Nervenranke. 12. <u>Behälterkennzeichnung</u> nach IMCO mit Gefahrensymbolen "<u>Gift</u>" und "<u>Flamme</u>" durchführen sowie Behälter mit dem Stoffnamen in Druckbuchstaben dauerhaft beschriften und mit <u>rotem</u> Farbanstrich versehen. 		
<p>Kühn · Birett</p>	<p>Merkblätter Gefährliche Arbeitsstoffe</p>	<p>Blatt-Nr. S 14</p>

B. Hinweise zum Brand- und Schadensfall

1. CO₂-Feuerlöscher einsetzen. Größeren Brandherd mit Sprühwasser oder Wasser bekämpfen. Umliegende Behälter und Flaschen gründlich mit Sprühwasser kühlen, Explosionsgefahr! Bei Brand starke Reizwirkung auf Augen und Atemwege durch Bildung des sehr giftigen Schwefeldioxids. Auf Rückzündung achten. Nur explosions sichere Hilfsgeräte einsetzen.
2. Umluftunabhängiges Atemschutzgerät und dichten Chemie-Schutzanzug tragen.
3. Nach Ablöschung des Brandes auf Vergiftungsgefahr achten. Weiteres Auslaufen, Eindringen von Flüssigkeit oder Gas in Keller, Gruben und Kanalisation unbedingt vermeiden. Wassergefährdender Stoff.
4. Nach Gefahrgut VStr ist beim Straßentransport größerer Mengen eine Fahrzeugkennzeichnung durch orangefarbene Warntafeln und das Mitführen von Unfallmerkblättern vorgeschrieben. Der Transport ist erlaubnispflichtig!

C. Hinweise zum Gesundheitsschutz

1. Wirkungscharakter und Toxizität: Bei kleinen Konzentrationen (etwa bis 200 ppm) Reizung der Schleimhäute (Augen, Atemwege), Übelkeit, Erbrechen, Kopfschmerzen, Durchfälle, Atemnot, Zyanose, Bewußtlosigkeit, Delirien, Krämpfe. Auch Erregungszustände sind bekannt. Exitus durch Atemlähmung, die, je höher die Konzentration um so schneller eintritt und im Extremfall als einziges Symptom beim sogenannten "apoplektiformen" Verlauf der Vergiftung vorhanden ist. (etwa bei 1400 ppm). Störungen des ZNS und des Herzens können bei einer überstandenen Vergiftung noch lange Zeit fortbestehen. Gewöhnlich bleibt auch eine Überempfindlichkeit gegenüber dem H₂S zurück. Chronische Symptome: Schleimhautreizungen, Hornhauttrübungen, Lichtscheu, Bronchitis, allgemeine Schwäche, Appetitlosigkeit mit Gewichtsverlust und Kreislaufstörungen. Auch Hautjucken und Hautausschläge kommen vor.
2. Erste Hilfe: Frischluft, bei Atemstillstand Atemspende. Wärme. Ruhe, liegender Transport. Bei Gefahr der Bewußtlosigkeit Lagerung und Transport in stabiler Seitenlage.
3. Arzt: Bei Inhalation schnellstens künstliche (Sauerstoff)atmung einleiten, dabei an Selbstschutz denken! Zentrale Analeptika. Weiter symptomatisch, insbesondere Kreislauf- und Lungenfunktion kontrollieren. Cave Glottisödem. Bei Bronchitis Codeinzufuhr erlaubt, sobald das asphyktische Stadium überwunden ist. Bei Lungenödem während der Latenzzeit prophylaktisch hohe Prednisolgaben i. v. Dazu Infusionen von insgesamt etwa 0,5 g THAM/kg. Absolute Ruhe, Wärme. Infektionsprophylaxe. Atemwege durch Absaugen frei halten. Morphin darf nur in kleinen Mengen angewandt werden. Bluteindickung durch perorale Flüssigkeitszufuhr oder Tropfklistier, nicht aber durch weitere i. v. Infusionen beheben. Sauerstoffzufuhr. Nach Einwirkung von Brandgasen Behandlung wie bei SO₂-Vergiftung.

Literatur: Ludewig/Lohs (1974) S. 388; Braun/Dönhardt (1975) S. 340.

Moeschlin (1972) S. 150.

Überwachungsuntersuchungen nach "Berufsgenossenschaftlichen Grundsätzen für arbeitsmedizinische Vorsorgeuntersuchungen" Register G 11

Formel:	H ₂ S	MAK:	10 ppm
Molekulargewicht:	34,1	Immissionswerte: IW1	0,0050 mg/m ³
Gaszustand		IW2	0,010 mg/m ³
Dichte:	1,54 kg/Nm ³	<u>krit. Punkt</u>	
rel. Gasdichte:	1,2	Temperatur:	100°C
Zündpunkt:	270°C	Druck:	90.1 bar
Explosionsgrenzen in Vol. %:	4,3-45,5	Dichte:	0,35 kg/l
<u>flüssiger Zustand</u>		Wasserlöslichkeit:	2,723 nm ³ /m ³
Schmelzpunkt:	-86°C	Geruchsschwelle:	0,025 - 0,1 ppm
Siedepunkt:	-60°C		
Dichte:	0,796 kg/l ₃	1 mg/m ³	= 0,706 ppm ³
Verdampfungswärme:	1,98 kcal/Nm ³	1 ppm	= 1,416 mg/m ³
Dampfdruck:	18,1 bar		

D. Weitere Hinweise

IMCO-Code S: 2163; U.N.Nr. 1053

VBG 1, 1a, 61; ZH 1/10, 119, 121, 200, 310, 400, 401 der BG; TRG 101-3/3.2; 102-2F; VDE 0165/0171; BKVO Nr. 19; EVO Id/5; Fa. Auer "Atemgifte"; WHG; EX-RL; DIN 477; Ullmann: Bd. 12, S. 17; Bd. 15, S. 500; Römpf: Bd. 4, S. 5776; EBKL Merkblatt Nr. A 12b; Hommel Merkblatt Nr. 185; TA-Luft.

Anlage 2:

Abschnitt 5

Biogasanlagen

Vorbemerkung

Beim Ausfaulen von organischen Massen (Stalldung, Humus, Futterreste) in Jauchegruben, Kanälen usw. entwickelt sich bei Sauerstoffabschluß ein brennbares Gas, das zum großen Teil aus Methan (CH_4) und Kohlendioxyd (CO_2) besteht und als Sumpf-, Klär-, Mist-, Faul- und Biogas bekannt ist. Das Gas kann zum Heizen und als Brennstoff für Verbrennungsmotoren verwendet werden und wird daher in besonderen Anlagen, den Biogasanlagen, gewonnen. Biogas enthält kein Kohlenoxyd (CO) wie Stadtgas und ist infolgedessen nicht giftig. Es führt aber zum Erstickungstod, da es keinen Sauerstoff enthält. Im Gemisch mit Luft (Sauerstoff) ist Biogas explosionsgefährlich. Vor dem Betreten von Gäräumen zum Reinigen, zu Ausbesserungsarbeiten und dergl. sind die Behälter durch geeignete Einrichtungen, z. B. Gebläse, so lange zu belüften, bis die Flamme einer hineingelassenen Grubensicherheitslampe ruhig brennt und damit anzeigt, daß Atemluft in genügender Menge zum Aufenthalt von Personen vorhanden ist. Eine Lichtprobe bei offener Flamme ist wegen Explosionsgefahr verboten. Gasmasken bieten keinen Schutz, da die Gasmasken nur benutzt werden kann, wenn atembare Luft vorhanden ist. Der Einsteigende ist auch stets von zwei Personen an einem Seil zu halten und zu beobachten, damit er im Gefahrfalle — Ausgehen der Grubensicherheitslampe — herausgezogen werden kann, ohne daß eine weitere Person einsteigen muß. Das richtige Anseilen zeigen die Abbildungen im Abschnitt 3.

Vorschriften

§ 1. Geltungsbereich

Die nachstehenden Unfallverhütungsvorschriften gelten für Biogasanlagen mit einem Behälterinhalt bis zu 100 cbm. Bei größeren Anlagen gelten die Unfallverhütungsvorschriften der Berufsgenossenschaft der Gas- und Wasserwerke.

Einrichtung

§ 2. Biogasanlagen müssen nach den ^{anerkannten} Regeln der Technik errichtet werden.

§ 3. Der Unternehmer muß die Herstellung der Biogasanlage einer mit dem Bau derartiger Anlagen erfahrenen Fachfirma mit der Bedingung übertragen, daß die Anlage den Bestimmungen des § 2 und den nachstehenden Unfallverhütungsvorschriften entspricht und eine eingehende Bedienungsanweisung mit übergeben wird.

§ 4. (1) Die Gär- und Pumpenräume sind mit Entlüftungseinrichtungen zu versehen, die ein gründliches Lüften in Kürze ermöglichen.

(2) An dem Gärraum ist eine Tafel mit folgendem Aufdruck anzuschlagen:

„Erstickungs- und Explosionsgefahr!

Betreten nur nach gründlicher Entlüftung und nach Lichtprobe mit Grubensicherheitslampe. Der Einsteigende ist anzuseilen und von 2 Personen zu beobachten.“

(3) An geeigneter Stelle sind eine Grubensicherheitslampe und Seile zum Anseilen (Sicherheitsgurt) bereitzuhalten.

(4) Die Gasbehälter sind in genügendem Abstand von Wohnhäusern, Stallungen, Lagerräumen und von öffentlichen Straßen zu errichten. Als Mindestabstand gelten bei Weichdächern 10 m, bei Hartdächern 5 m, bei öffentlichen Straßen 5 m, sofern die Genehmigungsbehörde nichts anderes bestimmt. Behälteranlagen sind, sofern sie nicht innerhalb des Hofes liegen, gegen Zutritt Unbefugter durch Einfriedigung zu sichern.

(5) Durch dauerhafte Anschläge ist Rauchen und offenes Feuer in der Nähe der Gasbehälter zu verbieten.

§ 5. Elektrische Anlagen in explosionsgefährdeten Räumen müssen den Vorschriften des Verbandes Deutscher Elektrotechniker für die Errichtung elektrischer Anlagen in explosionsgefährdeten Betriebsstätten — VDE 0165 — und für explosionsgeschützte elektrische Betriebsmittel — VDE 0171 — entsprechen.

Betrieb

§ 6. Das selbständige Bedienen und Warten von Biogasanlagen darf nur zuverlässigen, mit dieser Arbeit vertrauten Personen übertragen werden.

§ 7. Die Wartungsvorschriften (Bedienungsanweisungen) sind zu beachten. Sie müssen in den Betriebsräumen oder an der Anlage angeschlagen sein.

§ 8. Der Wasserstand in den Tassen der Glockengasbehälter und die Beweglichkeit der Behälter sind regelmäßig zu prüfen. Im Winter ist Eisbildung zu verhindern.

§ 9. (1) Vor dem Betreten der Gärbehälter zur Vornahme von Reparaturen, Anstricharbeiten, Auswerfen der Sinkstoffe sind die in dem Raum angesammelten Biogase durch gründliches Lüften mit den hierfür vorgesehenen Einrichtungen zu entfernen. Der Raum ist erst zu betreten, wenn durch eine Grubensicherheitslampe festgestellt ist, daß genügend Atemluft vorhanden ist. Das Betreten ist nur unter Mitnahme der brennenden

Grubensicherheitslampe im Beisein von zwei Personen gestattet, die den Hineinsteigenden an einem Seil (Sicherheitsgurt) halten und ständig das Brennen der Grubensicherheitslampe und den Hineingestiegenen beobachten.

(2) Bei Unfällen ist Abschnitt 3 § 3 Abs. 3 zu beachten.

§ 10. Instandsetzungen an Behältern und Rohrleitungen dürfen nur durch einen Fachkundigen (Herstellerfirma der Biogasanlage) erfolgen. Dies gilt insbesondere für alle Brenn- und Schweißarbeiten an dem Gasbehälter und den Rohrleitungen.

§ 11. Das Rauchen, der Gebrauch von offenem Licht und Feuer im Umkreis von 10 m der Gasbehälter ist verboten.

§ 12. Bei Erneuerung von Schutzanstrichen in den Behältern gilt Abschnitt 3 § 2 entsprechend.

Weitere KTBL-Veröffentlichungen

KTBL-Schriften

- Nr. 200 Schirz, St. Abluftreinigungsverfahren in der Intensivtierhaltung - Ein Beitrag zur Lösung von Nutzungskonflikten im ländlichen Raum
198 S., 70 Abb., 29 Tab., 1975, 28 DM
- Nr. 209 Hoyer, H. Verfahren der Flüssigmistausbringung
68 S., 9 Abb., 20 Tab., 1976, 8 DM
- Nr. 211 Eysel, H. Rechtsfragen zum Umweltschutz in der Landwirtschaft
128 S., 1976, 26 DM
- Nr. 219 Blanken, G.,
Gregor, E.,
Greif, G. Verwertung von Mistüberschüssen in der Landwirtschaft
94 S., 32 Abb., 17 Tab., 1977, 15 DM
- Nr. 224 Abele, U. Ertragssteigerung durch Flüssigmistbehandlung
134 S., 28 Abb., 38 Tab., 1978, 19 DM

KTBL-Bauschriften

- Nr. 11 Tager, K. Th. Abwassertechnische und wasserwirtschaftliche Probleme der Massentierhaltung
181 S., 4 Abb., 42 Tab., 1971, 15 DM (vergriffen)
- Nr. 13 Schirz, St. Geruchsbelästigungen durch Nutztierhaltung und die Möglichkeiten der Vermeidung und Abhilfe
282 S., 1971, 15 DM

KTBL-Arbeitspapiere

- Schirz, St. Umweltschutz und Abfallbeseitigung bei der konzentrierten Tierhaltung
96 S., zahlr. Abbildungen und Tabellen,
DIN A 4, 1975, 8 DM

KTBL-Arbeitsblätter

- Nr. 0143 Geräte zur Direkteinbringung von Flüssigmist, Bauarten und Typentabelle
- PL.0.10 Abwasser aus landwirtschaftlichen Betrieben
- 3022 Immissionsschutz bei der Standortplanung für die Intensivtierhaltung

