

kontinuierlichem Betrieb ist Wärmeproduktion und Wärmebedarf der Biogasanlage aufeinander abzustimmen, z.B. durch entsprechende Wahl der Zugabezeiten des Frischsubstrates.

Im Einzelfall kann die mechanische Energie direkt für den Antrieb von Pumpen oder Gebläsen genutzt werden. Auch gasmotorgetriebene Wärmepumpen werden sicherlich an Bedeutung gewinnen.

Der Einsatz in mobilen Motoren ist technisch möglich und aus Sicht der Biogasnutzung sehr interessant, scheitert aber bisher an den hohen Kosten für die erforderliche Verdichtung des Gases.

3. Zusammenfassung

Die Gegenüberstellung von Strukturen des Energiebedarfs und des über Biogasanlagen möglichen Energieangebots bildet die Grundlage für die Bemessung einer derartigen Anlage.

Aus dem Schrifttum verfügbare Daten über den Energiebedarf zeigen, daß am ehesten für den Wärmeverbrauch im Hausbereich allgemeine gültige Aussagen gemacht werden können. Für alle anderen Verbraucher von Energie, sei es Wärme, Elektrizität oder mechanische Antriebsenergie, sind allgemeingültige Aussagen nicht zu formulieren, da die Strukturen der einzelnen Betriebe zu sehr voneinander abweichen.

Hier sind Einzelanalysen erforderlich. Um diese Analysen zu erleichtern, muß eine Methodik entwickelt werden, mit welcher sich aus den Einzeldaten der verschiedenen Verbraucher eine für den untersuchten Betrieb zutreffende Verknüpfung erarbeiten läßt, aus der sich Energiebedarf und Substitutionsmöglichkeiten ergeben.

Ein möglichst hoher jahreszeitlicher Gas-Nutzungsgrad erscheint aus wirtschaftlichen Erwägungen heraus von großer Bedeutung.

Schrifttum

- [1] *Dudley, T.G.*: Sludge digestion and gas utilization in the metropolitan public health division of the Thames Water Authority. Vortrag, "Seminar über Anaerobe Vergärung" des Europarates, Dijon, 11.–19.12.1980.
- [2] *Baader, W., E. Dohne u. M. Brenndörfer*: Biogas in Theorie und Praxis. KTBL-Schrift 229, Münster-Hiltrup: Landwirtschaftsverlag 1978.
- [3] *Dohne, E.*: Stromerzeugung aus Biogas. Landtechnik Bd. 35 (1980) Nr. 8/9, S. 374/76.
- [4] *Picken, D.J. u. H.A. Soliman*: The use of anaerobic digester gas as an engine fuel. Journal Agric. Engng. Res. Bd. 26 (1981) S. 1/7.
- [5] *Reidat, R.*: Klimadaten für Bauwesen und Technik. Berichte des Deutschen Wetterdienstes Nr. 64, Bd. 9, Offenbach (Main): Selbstverlag d. dtsh. Wetterdienstes, 1960.
- [6] Anonym: Gesetz zur Einsparung von Energie in Gebäuden vom 22.7.1976, BGBl. I. S. 1873.
- [7] *Ayik, M.*: Analyse des elektrischen Leistungsbedarfs wichtiger Bereiche der Milchviehhaltung. AEL-Bericht 1, Essen, 1975.
- [8] MBB: Untersuchung zur Energieeinsparung in der Landwirtschaft. BMFT-Bericht ET (5064 A), Ottobrunn, 1979.
- [9] *Schäfer, R.*: Biologische und technische Grundlagen der Biogaserzeugung und Möglichkeiten der Biogasverwertung. Vortrag, Bayr. Landesanstalt für Landtechnik, Freising, 18.6.1980.
- [10] *Heyl, L. von, M. Ayik u. J. Boxberger*: Elektrischer Leistungsbedarf und Energieverbrauch verschiedener Arbeitsverfahren der landw. tierischen Produktion und energiewirtschaftliche Folgerungen. VDEW-Bericht, Frankfurt, 1975.

Planung von Biogasanlagen zur Energiebereitstellung am Beispiel eines Schweinemastbetriebes

Von Rolf Kloss, Braunschweig-Völkenrode*)

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

DK 631.862:662.767.1:658.232

Die Wirtschaftlichkeit einer Biogasanlage wird von den jeweiligen betriebstechnischen Rahmenbedingungen der sehr unterschiedlich strukturierten landwirtschaftlichen Betriebe eingeschränkt und durch die Güte der Planung bestimmt.

Für den Einzelfall sind diese Rahmenbedingungen zu analysieren, und es ist unter diesen Voraussetzungen die in technisch-wirtschaftlicher Hinsicht optimale Biogasanlage zu ermitteln. Diese Lösung ist abschließend einer Bewertung nach ökonomischen Kriterien zu unterziehen.

Eine derartige Entscheidungsvorbereitung erfordert wegen der Vielfalt und Wechselwirkung der zu berücksichtigenden Faktoren eine systematische Vorgehensweise, die am Beispiel der Planung einer Biogasanlage für einen Schweinemastbetrieb erläutert wird.

*) *Dipl.-Ing. R. Kloss* ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Institut für Technologie (Leiter: Prof. Dr.-Ing. W. Baader) der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig-Völkenrode.

Inhalt

- 1. Einleitung
 - 1.1 Abgrenzung des Anlagenumfangs
 - 1.2 Vorgehensweise bei der Planung einer Biogasanlage
- 2. Anlagenplanung
 - 2.1 Ermittlung des betrieblichen Energiepotentials und Energiebedarfs
 - 2.2 Verfahrens- und Reaktortypauswahl
 - 2.3 Anlagenbemessung unter technisch-wirtschaftlichen Gesichtspunkten
 - 2.3.1 Vorüberlegungen
 - 2.3.2 Anlagenbemessung bei gegenüber der bereitstellbaren Energiemenge höherem Energiebedarf
 - 2.3.2.1 Reaktorbemessung auf max. Energiebereitstellung aus einer gegebenen Substratmenge
 - 2.3.2.2 Reaktorbemessung auf max. Energiebereitstellung aus einer gegebenen Trockensubstanzmenge
 - 2.3.3 Anlagenbemessung für beliebige betriebliche Bedingungen
- 3. Zusammenfassung

1. Einleitung

1.1 Abgrenzung des Anlagenumfangs

Unter einer "Biogasanlage" soll in diesem Beitrag die Gesamtheit aller technischen Einrichtungen verstanden werden, die erforderlich sind, um einen landwirtschaftlichen Betrieb mit Energie aus Biogas bzw. im Anlagenstörfall mit anderen Energieträgern sicher versorgen zu können. Im einzelnen sind dies

- Infrastruktureinrichtungen, wie Vorgrube mit Zuspumpungspumpe inkl. Steuerung, Rohrleitungen zum Substrattransport, Beipäß, Warmwasser- und Gasleitung, Stromversorgung;
- Gärbehälter inkl. Armaturen, Rühr- u. Mischorgane, Sink- und Schwimmstoffausrüstungen, Wärmetauscher zur Beheizung, Sicherheitsvorkehrungen, Isolationen, Fundamente, Steuerung, Störmeldung;
- Gebäude für Maschinen, Regelungs- und Steuertechnik;
- Energiespeicher mit Steuerung zum Ausgleich von Schwankungen zwischen betrieblichem Energiebedarf und Energieangebot durch die Anlage;
- Einrichtungen für die Gasverwertung zur Energieversorgung des Reaktors;
- Einrichtungen für die Gasverwendung im Betrieb.

Aus Gründen der Redundanz muß der Betrieb bei Störungen der Biogasproduktion über ein zweites Energieversorgungssystem verfügen, das auch den Prozeßenergiebedarf der Biogasanlage abdeckt, bis diese wieder genügend Gas bereitstellen kann.

1.2 Vorgehensweise bei der Planung einer Biogasanlage

Ausgehend, **Bild 1**, von einer Analyse der betrieblichen Gegebenheiten hinsichtlich der verfügbaren Rohstoffarten und deren zeitlichen und mengenmäßigen Anfalls sowie der zeitlichen Verteilung des Energiebedarfs, der im Betrieb durch Biogas gedeckt werden soll, vergleicht man zunächst überschlägig das sich aus dem Substratanfall ergebende Energiepotential, d.h. die dem Betrieb tägl. bereitstellbare Netto-Energiemenge \dot{E}_{NET} mit dem Energiebedarf des Betriebes [1].

Entspricht das verfügbare Energiepotential weitgehend dem Energiebedarf, so kann man sich mit der Planung einer Biogasanlage näher befassen. Andernfalls sind die betrieblichen Gegebenheiten so zu verändern, daß eine bessere Übereinstimmung von Energieangebot und -bedarf erreicht wird.

Im nächsten Schritt sind kostengünstige Anlagenkonfigurationen zu ermitteln, die den betrieblichen Anforderungen in technischer Hinsicht gerecht werden. Diese Analyse schließt die Standortwahl für die einzelnen Anlagenteile und die Massenermittlung ein. Anhand eines Verzeichnisses aller zu erbringender Leistungen ist eine Kostenschätzung oder gar Kostenberechnung für die Lösungsalternativen vorzunehmen. Mit Hilfe technisch-wirtschaftlicher Kriterien läßt sich dann aus der Gesamtheit der Alternativen die Lösung bestimmen. Erst auf der Grundlage dieser Daten ist es möglich, über eine Wirtschaftlichkeitsberechnung zu entscheiden, ob diese Lösung für den Betrieb geeignet ist.

Dieses Optimierungsverfahren soll an einem Beispiel näher erläutert werden.

2. Anlagenplanung

2.1 Ermittlung des betrieblichen Energiepotentials und Energiebedarfs

Unterstellt sei ein Marktfrucht- und Veredelungsbetrieb mit einem Warmstall von 1 300 Schweinemastplätzen. Es besteht Bedarf an Wärme, Elektroenergie und Treibstoff für Verbrennungsmotoren. Aus heutiger Sicht kann man sagen, daß die in ökonomischer Hinsicht für die Biogasgewinnung aussichtsreichste Form der Gasverwertung lediglich in der Wärme- oder in der Strombereitstellung, kombiniert mit einer Abwärmenutzung eines stationären Verbrennungsmotors, zu sehen ist [2].

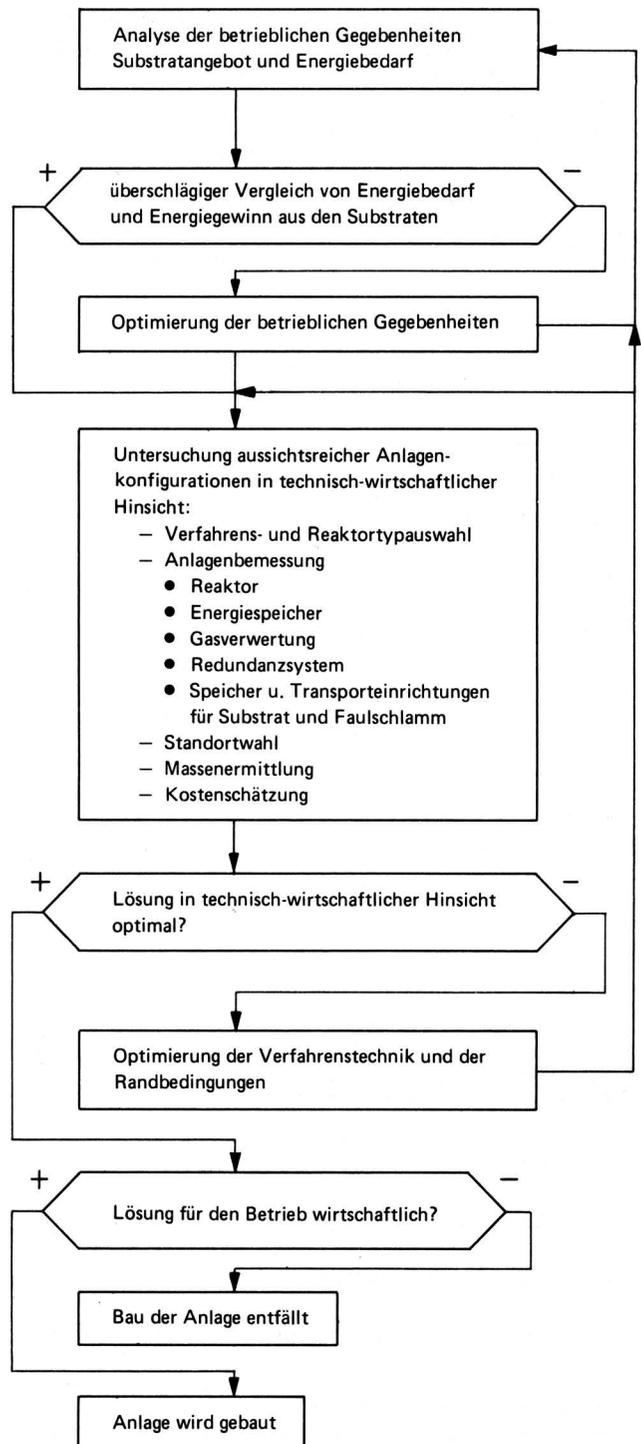


Bild 1. Methodisches Vorgehen bei der Planung einer Biogasanlage.

Im folgenden soll nur die Möglichkeit der Wärmebereitstellung für den Betrieb diskutiert werden, da die Vorgehensweise zur Definition einer optimalen Anlagenkonfiguration in beiden Fällen gleich ist.

Der Wärmebedarf dieses Betriebes ist anhand von Betriebsaufzeichnungen zu ermitteln (vgl. Bild 11), läßt sich aber auch theoretisch herleiten [3].

Die dem Betrieb durch die Vergärung der tierischen Exkremente bereitstellbare Energiemenge läßt sich aus Angaben im Schrifttum [3, 4] abschätzen, wenn man eine mesophile Vergärung des Substrates bei einer Aufenthaltszeit t_{th} von 20 Tagen im total durchmischten Reaktor annimmt.

Unterstellt man, daß 8 Mastschweine etwa einer Großvieheinheit (GV) entsprechen, dann ist für den Beispielsbetrieb ein Bestand von 160 GV anzusetzen. Bei einem Substratanfall von $37 \text{ l}/(\text{GV d})$ ergibt sich eine tägl. anfallende Substratmenge $\dot{V}_A = 6 \text{ m}^3/\text{d}$ und unter Berücksichtigung eines Trockensubstanzgehaltes $c_{\text{TS}} = 7,5 \%$ ein tägl. Trockensubstanzanfall $\dot{m}_{\text{TS,A}} = 450 \text{ kg/d}$. Die tägl. anfallende Gasmenge \dot{V}_G beläuft sich bei einer auf die Trockenmasse der Zugabe bezogenen Gasproduktion von $0,24 \text{ m}^3/\text{kg}$, die Bild 2 entnommen werden kann, auf $108 \text{ m}^3/\text{d}$. Da der Heizwert H_u von Methan etwa bei $10 \text{ kWh}/\text{m}^3$ liegt, ergibt sich bei einem Methangehalt des Gases von 70% eine tägl. produzierbare Brutto-Energiemenge $\dot{E}_{\text{Brut}} = 756 \text{ kWh/d}$.

Die dem Betrieb tägl. bereitstellbare Netto-Energiemenge \dot{E}_{NET} beträgt nach Abzug von etwa 30% zur Prozeßwärmeerzeugung $\dot{E}_{\text{NET}} = 530 \text{ kWh/d}$.

Vergleicht man dieses Energiepotential mit dem Energiebedarf in Bild 11, dann zeigt sich, daß der Energiebedarf des Betriebes in hohem Maße durch Biogas abgedeckt werden kann.

Deshalb scheint eine genauere Untersuchung der Biogasgewinnungsmöglichkeiten zur Wärmeversorgung des Betriebes sinnvoll zu sein.

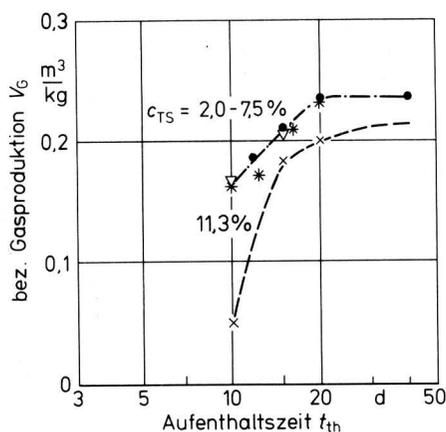


Bild 2. Auf die Trockenmasse der Zugabe bezogene Gasproduktion in Abhängigkeit von der Aufenthaltszeit t_{th} und dem Trockensubstanzgehalt c_{TS} ; Schweineflüssigmist im total durchmischten Reaktor bei $35 \text{ }^\circ\text{C}$ Prozeßtemperatur [5]; log. Maßstab der Aufenthaltszeit.

- ∇ x Werte aus Laborversuchen
- * Werte einer Anlage im techn. Maßstab

2.2 Verfahrens- und Reaktortypauswahl

Da die Einsatzmöglichkeiten von Biogasanlagen im Niedertemperaturbereich bei $15 \text{ }^\circ\text{C}$ sowie im Temperaturbereich bei $50 \text{ }^\circ\text{C}$ noch nicht hinreichend durch wissenschaftliche Untersuchungen abgeklärt sind, sollten Anlagen für den praktischen Betriebseinsatz auf den mittleren Temperaturbereich zwischen 30 und $35 \text{ }^\circ\text{C}$ (mesophil) ausgelegt werden. Alle Untersuchungen über das Abbauverhalten von Schweineflüssigmist wurden im wesentlichen an total durchmischten Systemen durchgeführt.

Es hat sich gezeigt, daß die Funktion dieser Anlagen unter Praxisbedingungen sehr zufriedenstellend ist. Deshalb wird für das Beispiel ein mesophil betriebener Reaktor mit vollständiger Durchmischung des Inhaltes gewählt.

2.3 Anlagenbemessung unter technisch-wirtschaftlichen Gesichtspunkten

2.3.1 Vorüberlegungen

Die Anlage ist unter den gegebenen Verhältnissen so auszulegen, daß der Nutzen der über die Abdeckung des betrieblichen Energiebedarfs erzielt wird, in einem optimalen Verhältnis zu den mit der Erstellung und dem Betrieb der Anlagen verbundenen Investitions-, Betriebsmittel- und Bedienung- und Reparaturkosten steht.

Es ist anzunehmen, daß die Anlagenbemessung und damit insbesondere die Reaktorbemessung sowie die Auslegung der Energieverbund- und Energieverwendungsseite sehr wesentlich davon abhängen, in welchem Verhältnis tägl. bereitstellbare Netto-Energiemenge \dot{E}_{NET} und Energiebedarf \dot{E}_{BED} zueinander stehen. Ist der tägl. Energiebedarf größer als die Größe \dot{E}_{NET} , so könnte eine Anlagenbemessung auf maximale Methanausbeute aus dem anfallenden Substrat interessant sein, während im umgekehrten Fall es unter Umständen sinnvoll ist, die Anlage auf einen Substratteilstrom oder kurze Aufenthaltszeiten auszulegen. Wegen dieser ganz allgemein interessierenden Fragestellung soll der Einfluß beider Fälle auf die Anlagenbemessung anhand des obigen Beispiels untersucht werden.

Zuerst wird, abweichend von den vorgenannten Bedingungen der etwas einfachere Fall betrachtet, daß der tägl. Energiebedarf des Betriebes die bereitstellbare Energiemenge ständig übersteigt.

2.3.2 Anlagenbemessung bei gegenüber der täglich bereitstellbaren Energiemenge höherem Energiebedarf

2.3.2.1 Reaktorbemessung auf max. Energiebereitstellung aus einer gegebenen Substratmenge

Bei vollständiger Verarbeitung der tägl. anfallenden Substratmengen \dot{V}_Z wird das zu bemessende Faulraumvolumen V_R von der Aufenthaltszeit t_{th} durch die Beziehung

$$V_R = \dot{V}_Z t_{\text{th}} \quad (1)$$

bestimmt. Zur Reaktorauslegung muß deshalb zunächst bekannt sein, wieviel Gas aus dem Substrat in Abhängigkeit von der Aufenthaltszeit und dem Trockensubstanzgehalt im Reaktor gewonnen werden kann. Entsprechende Untersuchungen mit Schweineflüssigmist wurden in großer Zahl durchgeführt. Hier sollen die von *Van Velsen* [5] und *Summers* und *Bousfield* [6] gefundenen Ergebnisse näher betrachtet werden.

Die zwischen den Meßwerten der beiden Veröffentlichungen bestehenden Differenzen dürften im wesentlichen auf unterschiedliche Betriebsbedingungen zurückzuführen sein. Gemeinsam ist beiden Untersuchungen die Aussage, daß die auf die Masse der Trockensubstanz der Zugabe bezogene Gasproduktion von der Trockensubstanzkonzentration unabhängig ist, wenn diese im Bereich von $2-7 \%$ liegt. Im darüber liegenden Bereich tritt jedoch eine Hemmung der Umsetzungstätigkeit der Mikroorganismen auf, so daß gegenüber den Verhältnissen bei niedriger Trockensubstanzkonzentration die auf die Trockenmasse der Zugabe bezogene Gasproduktion, betrachtet man Punkte gleicher Aufenthaltszeit, zurückgeht. Dies ist nach *Van Velsen* [5] auf steigende Ammoniumgehalte im Reaktor zurückzuführen.

Für die weiterführende Betrachtung werden die von *Van Velsen* gefundenen Werte unter Berücksichtigung dieses Einflusses der Trockensubstanzkonzentration verwendet. Sie wurden im Bild 2 aufgetragen und unter Beachtung von aus dem anaeroben Abbau bekannten Zusammenhängen durch entsprechende Kurvenverläufe verbunden [7 bis 9].

Unter Berücksichtigung des Methangehaltes, Bild 3, läßt sich dann für verschiedene Trockensubstanzgehalte der auf die Zugabemenge bezogene Methanertrag V_{G,CH_4} und durch Multiplikation mit dem Heizwert des Methans von $10 \text{ kWh}/\text{m}^3$ der entsprechende Brutto-Energieertrag E_{BRUT} errechnen, Bild 4.

Will man eine Aussage darüber erhalten, wieviel Methan, bzw. Energie aus dem tägl. Frischsubstratanfall \dot{V}_A des Beispielbetriebes gewonnen werden kann, so sind die jeweiligen Werte aus Bild 4 mit dem tägl. Substratanfall \dot{V}_Z des Betriebes, der der Anlage zugeführt werden soll, zu multiplizieren und man erhält die in Bild 5 für $\dot{V}_Z = 6 \text{ m}^3/\text{d}$ aufgetragenen Brutto-Energiemengen \dot{E}_{BRUT} . Diese Brutto-Energiemengen können jedoch nicht voll der Wärmebedarfsdeckung für die Hausheizung, die Warmwasserbereitung und für sonstige Zwecke zugeführt werden, denn ein Teil dieser Energie (\dot{E}_{HS}) muß tägl. zum Aufheizen des Frischsubstrates auf Prozeßtemperatur und ein weiterer (\dot{E}_{KON}) zum Ausgleich der

Wärmeverluste des Reaktors verwendet werden. Die Aufheizenergiemenge läßt sich nach

$$\dot{E}_{HS} = c \dot{V}_Z (\vartheta_R - \vartheta_S) \quad (2)$$

und die dem Reaktor durch Konvektion und Strahlung verlorengehende Wärmemenge nach

$$\dot{E}_{KON} = k A (\vartheta_R - \vartheta_A) \quad (3)$$

ermitteln.

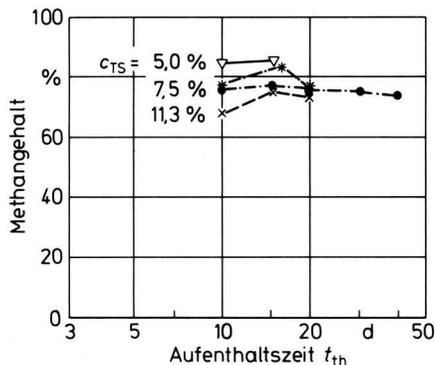


Bild 3. Methangehalt des Biogases in Abhängigkeit von der Aufenthaltszeit und dem Trockensubstanzgehalt der Zugabe; Betriebsbedingungen wie Bild 2.

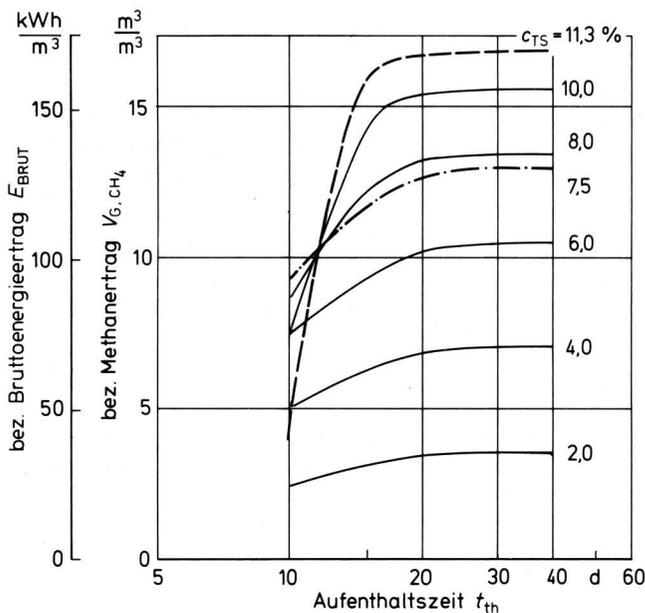


Bild 4. Auf die Zugabemenge bezogener Methan- und Bruttoenergieertrag (V_{G,CH_4} bzw. E_{BRUT}) in Abhängigkeit von der Aufenthaltszeit und dem Trockensubstanzgehalt; Betriebsbedingungen wie Bild 2.

Berücksichtigt man, daß diese Wärmemengen über ein Heizsystem mit dem Wirkungsgrad η_{HEIZ} bereitgestellt werden müssen, dann verbleibt für den Einsatz im Betrieb tägl. folgender Betrag \dot{E}_{NET} :

$$\dot{E}_{NET} = \dot{E}_{BRUT} - (\dot{E}_{HS} + \dot{E}_{KON}) \eta_{HEIZ} \quad (4)$$

Durch Einführen von

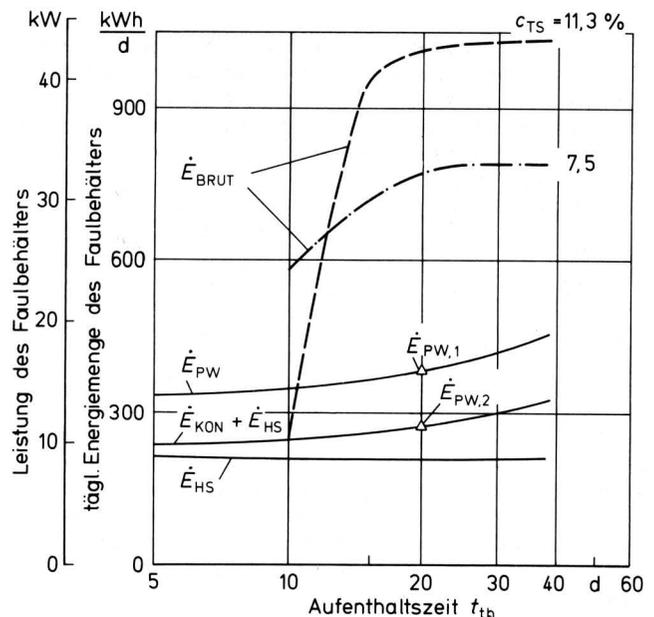


Bild 5. Tägl. als Biogas anfallende Energiemenge \dot{E}_{BRUT} und tägl. für den Prozeß aufzuwendende Energiemengen (\dot{E}_{HS} , \dot{E}_{KON} , \dot{E}_{PW}) für einen Reaktor mit einer tägl. Zugabemenge $\dot{V}_Z = 6 \text{ m}^3/\text{d}$ in Abhängigkeit von der Aufenthaltszeit und dem Trockensubstanzgehalt; Betriebsbedingungen wie Bild 2.

$$\begin{aligned} c &= 1,163 \text{ kWh/m}^3\text{K} & \vartheta_R &= 35 \text{ }^\circ\text{C} \\ \dot{V}_Z &= \dot{V}_A = 6 \text{ m}^3/\text{d} & \vartheta_S &= 5 \text{ }^\circ\text{C} \\ V_R &= \dot{V}_Z t_{th} & \eta_{HEIZ} &= 0,7 \end{aligned}$$

$$A = \frac{3}{2} \pi (4 V_R / \pi)^{2/3} \quad (\text{für einen Zylinder mit } h/d = 1)$$

läßt sich Gl. (3) schreiben als

$$\dot{E}_{KON} = \frac{3}{2} k \pi (4 \dot{V}_Z t_{th} / \pi)^{2/3} (\vartheta_R - \vartheta_A) \quad (3a)$$

und es ergibt sich der in Bild 5 dargestellte Verlauf des tägl. Prozeßwärmebedarfs \dot{E}_{PW} . Die in Abhängigkeit von der gewählten Aufenthaltszeit für die gegebene Zugabemenge \dot{V}_Z tägl. erzielbare Menge an bereitstellbarer Energie \dot{E}_{NET} wird bestimmt durch den Abstand einander entsprechender Kurvenpunkte von \dot{E}_{BRUT} und \dot{E}_{PW} . Zur Gewinnung dieser Energie bedarf es aber noch eines zusätzlichen Energieeinsatzes zur Durchführung verschiedener Verfahrensschritte wie Mischen des Frischschlammes, Ausgleich von Temperaturdifferenzen im Reaktor und Austrag von Schwimm- und Sinkschichten.

Der hierfür benötigte Energiebedarf total durchmischter Systeme nach dem Prinzip des aus der Abwassertechnik bekannten Schlaufenreaktors liegt gemäß Herstellerangabe bei $40 \text{ Wh}/(\text{m}^3 \text{ d})$ [10]. Dies wäre unter den Bedingungen des Beispiels bei einer Reaktoraufenthaltszeit t_{th} von 20 Tagen und dementsprechend 120 m^3 Faulraumvolumen $4,8 \text{ kWh}/\text{d}$.

Bei Reaktoren mit horizontaler Rührwelle beträgt dieser Bedarf an Rührenergie etwa $120 \text{ m}^3 \cdot 5 \text{ Wh}/(\text{m}^3 \text{ d}) = 0,6 \text{ kWh}/\text{d}$ [11, 12].

Daneben wird Energie zum Betreiben einer Warmwasserumwälzpumpe, die für die Anlagenbeheizung erforderlich ist, benötigt. Für den 120 m^3 -Reaktor beträgt der Energiebedarf etwa $0,5 \text{ kWh}/\text{d}$ bei einer geschätzten tägl. Laufzeit von 10 Stunden und einer Leistungsaufnahme von 50 W . Ist es nicht möglich, von der Biogasanlage mit nur geringem Höhenverlust im Freigefälle den Lagerbehälter zu beschicken, so wird ein zusätzlicher Pumpenergiebedarf erforderlich. Er hängt sehr von der zwischen Anlagenauslauf und dem Niveau im Flüssigmistlagerbehälter des ausgefaulten Substrates bestehenden Höhendifferenz ab. Ist dieser Punkt in hydraulischer Hinsicht gut gelöst, dann kann der Pumpenergiebedarf vernachlässigt werden.

Betrachtet man abschließend die zur Durchführung dieser Verfahrensschritte notwendigen tägl. Energiemengen, so zeigt sich, daß sie im Vergleich zu den durch das Biogas bereitstellbaren Energiemengen unbedeutend sind. Sie spielen deshalb bei der Wahl des optimalen Anlagenauslegungspunktes eine untergeordnete Rolle.

Damit wird die Auslegung einer Biogasanlage im Hinblick auf die eingangs dargestellte Zielfunktion ausschließlich durch den Kurvenverlauf bestimmt, der von der auf die tägl. Zugabemenge bezogenen tägl. Netto-Energieproduktion in Abhängigkeit von der Aufenthaltszeit beschrieben wird (Bild 5).

Man erkennt aus dieser Darstellung, daß der höchste Netto-Energieertrag aus der gegebenen Substratmenge bei einer Aufenthaltszeit von 20 Tagen erzielt werden kann. Wählt man längere Aufenthaltszeiten, so nehmen die Wärmeverluste \dot{E}_{KON} deutlich zu, und der Energiebedarf für Antriebe steigt leicht an. Wählt man kürzere Verweilzeiten, so nimmt die Netto-Energiemenge wegen des steilen Abfalls der Gasproduktion \dot{E}_{BRUT} schnell ab. Eine Aufenthaltszeit von 20 d stellt daher das Auslegungsoptimum dar. Es zeigt sich jedoch, daß in diesem Fall und unter diesen Bedingungen ($c_{\text{TS}} = 7,5\%$) nur etwa 50 % des gewonnenen Gases genutzt werden können (Bild 5, Pkt. $\dot{E}_{\text{PW},1}$).

Ein Ansatz zur Steigerung des Anlagenwirkungsgrades läßt sich nur durch eine Optimierung der Gl. (4) in Verbindung mit Gln. (2) und (3) finden. Danach haben Substratanfangstemperatur, Isolierung, Reaktoroberfläche und Wirkungsgrad des Heizsystems einen großen Einfluß auf den Prozeßwärmebedarf und damit auf den Netto-Energieertrag. Da die letztgenannten Parameter optimal gewählt wurden, wird man in erster Linie danach streben, die tägl. anfallende Substratmenge dem Reaktor möglichst warm zuzuführen und die Behälterisolierung zu verstärken. Wird z.B. durch Wärmedämmung der Vorgrube im vorliegenden Beispiel die Temperatur des aus dem Warmstall kommenden Flüssigmistes auf 15 °C und der k-Wert der Reaktorisolierung – unter Berücksichtigung der Ergebnisse ökonomischer Betrachtungen zur Isolierung von Faulbehältern von Stamm [13] und Perwanger [14] – auf 0,3 W/(m²K) erhöht, so läßt sich der Anteil der tägl. bereitstellbaren Netto-Energiemenge \dot{E}_{NET} von 49 auf 66 % steigern (Bild 5, Pkt. $\dot{E}_{\text{PW},2}$).

Eine weitere Verminderung des Prozeßwärmebedarfs wäre durch die Rückführung von Wärme aus dem ausgegorenen Faulschlamm zu erreichen.

2.3.2.2 Reaktor bemessung auf maximale Energiebereitstellung aus einer gegebenen Trockensubstanzmenge

Da für die zu erwartende Gasmenge nicht das Substratvolumen \dot{V}_Z , sondern die Trockensubstanzmasse $\dot{m}_{\text{TS},Z}$ und -konzentration c_{TS} die bestimmenden Größen sind, soll im folgenden gezeigt werden, wie sich eine Veränderung des Trockensubstanzgehaltes des Substrates bei gleichem Tierbestand, d.h. bei konstanter Masse der zugeführten Trockensubstanz auf die Reaktor bemessung auswirkt.

Für das Beispiel wird wieder der bereits im Abschnitt 2.1 ermittelte Trockensubstanzanfall von 450 kg/d verwendet.

Bei einer Erhöhung des Trockensubstanzgehaltes von 7,5 auf 11,3 %, ein Wert der in der Praxis bei Flüssigfütterung durchaus erreichbar ist [15], ist dann nicht mehr wie zuvor ein Substratvolumen von 6 m³/d, sondern lediglich von 4 m³/d dem Reaktor zuzuführen.

Die aus 4 m³/d mit 11,3 % Trockensubstanzgehalt unter den optimalen Bedingungen des vorigen Abschnittes bereitstellbare tägl. Netto-Energiemenge läßt sich mit Hilfe von Bild 6 ermitteln. Diese Darstellung zeigt die auf die Zugabemenge bezogene Brutto-Energiemenge \dot{E}_{BRUT} in Abhängigkeit von Aufenthaltszeit t_{th} und Trockensubstanzkonzentration c_{TS} und die auf die Zugabemenge bezogenen Prozeßwärmebedarfsmengen E_{PW} für verschiedene tägl. Zugabemengen \dot{V}_Z . Die auf die Zugabemenge bezogene Netto-Energiemenge ist die Differenz von Brutto-Energiemenge \dot{E}_{BRUT} und Prozeßwärmebedarf E_{PW} . Die tägl. Netto-Energiemengen für verschiedene tägl. Zugabemengen ergibt sich durch Multipli-

kation der über Bild 6 ermittelten Werte mit dem vorgesehenen Wert von \dot{V}_Z . Im Beispiel wäre daher \dot{E}_{NET} für $c_{\text{TS}} = 11,3\%$ zu ermitteln und mit $\dot{V}_Z = 4 \text{ m}^3/\text{d}$ zu multiplizieren und \dot{E}_{NET} für $c_{\text{TS}} = 7,5\%$ zu ermitteln und mit $\dot{V}_Z = 6 \text{ m}^3/\text{d}$ zu multiplizieren. Da, wie Bild 6 zeigt, im betrachteten Bereich der Einfluß der tägl. Zugabemenge auf den darauf bezogenen Prozeßwärmebedarf relativ gering ist, darf vereinfachend die auf die Zugabemenge bezogene Netto-Energiemenge als von der tägl. Zugabemenge unabhängig angesehen werden. Für die weiteren Ausführungen wird die jeweils bei einer Zugabemenge von 5 m³/d erzielbare Netto-Energiemenge unterstellt.

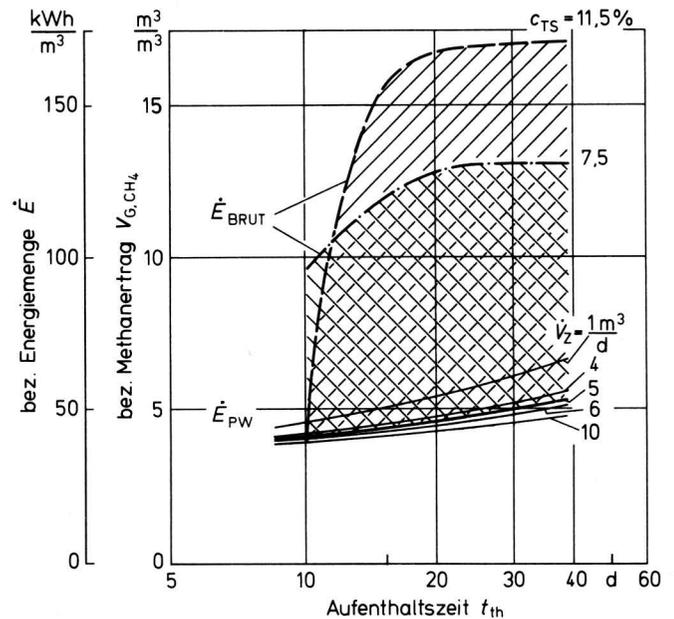


Bild 6. Auf die Zugabemenge \dot{V}_Z bezogene tägl. gewinnbare Energiemenge \dot{E}_{BRUT} und für den Prozeß aufzuwendende Energiemenge \dot{E}_{PW} in Abhängigkeit von der Aufenthaltszeit, dem Trockensubstanzgehalt und der tägl. Zugabemenge \dot{V}_Z ; Betriebsbedingungen wie Bild 2.

Durch Multiplikation der aus Bild 6 ablesbaren Netto-Energiemengen für die Trockensubstanzgehalte von 7,5 bzw. 11,3 % mit den obigen Zugabemengen ergeben sich dann die tägl. Netto-Energiemengen \dot{E}_{NET} in Bild 7 und 8.

Dies wurde auch für andere Zugabemengen durchgeführt, so daß man den Darstellungen ganz allgemein entnehmen kann, welche tägl. Netto-Energiemengen aus unterschiedlichen tägl. Zugabemengen oder Faulraumvolumina gem. Gl. (1) bei verschiedenen Trockensubstanzgehalten in Abhängigkeit von der Aufenthaltszeit erwartet werden können. Außerdem läßt sich diesen Bildern entnehmen, welche tägl. Netto-Energiemengen von Reaktoren bestimmten Rauminhaltes bei verschiedenen tägl. Zugabemengen in Abhängigkeit von den vorstehenden Variablen gewonnen werden können.

Es zeigt sich, daß aus der tägl. Zugabe an Trockenmasse von 450 kg/d bei einem Trockensubstanzgehalt von 7,5 % 520 kWh/d, bei einem Trockensubstanzgehalt von 11,3 % aber nur 490 kWh/d erwartet werden können (vgl. Pkt. a₁₂ in Bild 7 und Pkt. b₁₂ in Bild 8). Hierzu ist allerdings auch nur ein Faulraumvolumen von 80 m³ gegenüber 120 m³ bei 7,5 % Trockensubstanz erforderlich.

Die optimale Aufenthaltszeit liegt in beiden Fällen bei 20 Tagen. Untersucht man auf analoge Weise die tägl. Netto-Energiemenge bei einem Trockensubstanzgehalt von 2–3 %, so ergibt sich, wie sich bereits aus Bild 4 in Verbindung mit Bild 5 schließen läßt, daß in einem solchen Fall außer zur Prozeßwärmebereitstellung kein Gas verfügbar ist. Zielt man also auf eine maximale tägl. Netto-Energiemenge aus einer gegebenen Trockensubstanzmenge ab, so ist es sinnvoll, einen möglichst hohen Trockensubstanzgehalt anzustreben.

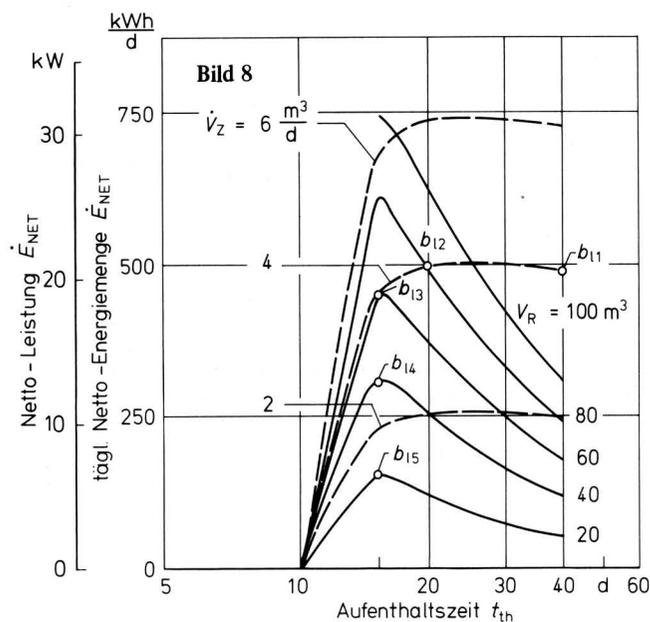
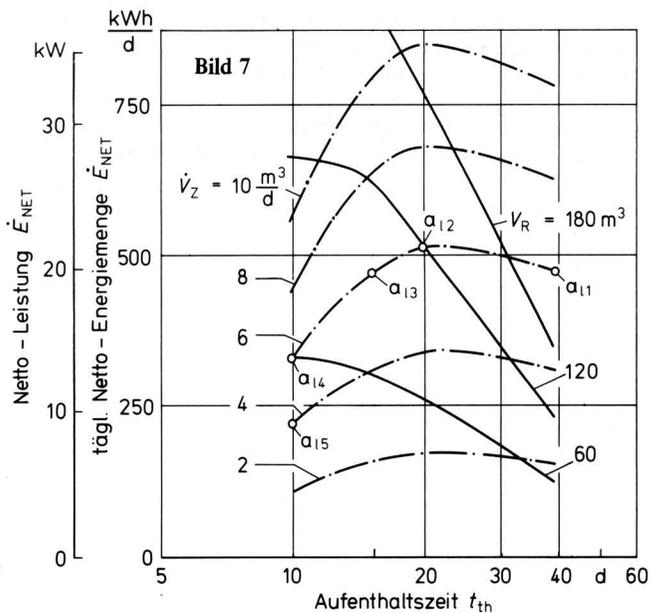


Bild 7 und 8. Tägl. Netto-Energiemenge in Abhängigkeit von der Aufenthaltszeit für verschiedene tägl. Zugabemengen \dot{V}_Z und verschiedene Faulraumvolumen V_R . Tägl. Zugabe an Trockenmasse 450 kg/d, Betriebsbedingungen wie Bild 2. Die Punkte a_{lm} , b_{lm} mit $l = 1; 2$ und $m = 1, 2, \dots, 5$ kennzeichnen die verschiedenen in Text und Tafeln genannten Beispiele.

Bild 7 Trockensubstanzgehalt $c_{TS} = 7,5\%$

Bild 8 Trockensubstanzgehalt $c_{TS} = 11,3\%$

Andererseits ist, wie in Bild 2 gezeigt, bei Schweineflüssigmist ab Trockensubstanzgehalten von 6–7 % eine Hemmung des Abbaus zu erwarten. Deshalb nimmt oberhalb dieser Werte die aus einer gegebenen Trockensubstanzmenge erzielbare Netto-Energiemenge geringfügig ab. Dieser Rückgang an Netto-Energie kann in ökonomischer Hinsicht in Kauf genommen werden, wenn sich die durch den hohen Trockensubstanzgehalt bedingte, nicht unerhebliche Verminderung des Faulraumvolumens von 120 m³ der Bemessungsvariante a auf 80 m³ der Variante b (vgl. Bild 7 und Bild 8) auch in einem entsprechenden Rückgang der Investitionskosten auswirkt. Jedoch sind hier nicht die Investitionskosten für den Reaktorbehälter allein zu erfassen, sondern man muß die Kosten der gesamten Anlage berücksichtigen.

Hierzu sind zunächst die technischen Einrichtungen für den Energieverbund zwischen Anlage und Betrieb, für die Gasverwendungsseite und für das Redundanzsystem sowohl auf die Netto-Gasmenge, die je nach Auslegung des Reaktors zu erwarten ist, als auch auf den Bedarf der einzelnen Gasverbraucher abzustimmen. Für den Fall, daß sich der Energiebedarf des Betriebes und das Energieangebot der Anlage nicht decken, ist dem Energiespeicher besondere Beachtung zu schenken.

Speicher zum Ausgleich langzeitiger Schwankungen (Monats- und Jahresschwankungen) sind unwirtschaftlich, weil die einsparbaren Energiemengen nur einen verhältnismäßig geringen Kostenaufwand rechtfertigen. Angesichts der Energiespeicherkosten [3] weist dies auf eine – wenn es überhaupt sinnvoll ist – sehr geringe Speicherdimensionierung hin.

Da zur Zeit jedoch keine Speicherbemessungsgrundlagen bekannt sind, wurde für den Beispielbetrieb auf im Bereich der Abwassertechnik bestehende Erfahrungen zurückgegriffen und sicherheits halber ein die halbe tägl. Brutto-Energieproduktion der Anlage fassender Energiespeicher in Form eines Warmwasserspeichers gewählt [16]. Die Auslegung der Gasverwendungsseite bereitet hingegen keine Schwierigkeiten. Sie richtet sich ausschließlich nach den durch die Reaktor bemessung zu erwartenden Gasmengen.

Das Redundanzsystem muß im Falle der Unterbrechung der Biogasversorgung die Energiebereitstellung sowohl für den Betrieb als auch für den Prozeßwärmebedarf der Anlage übernehmen. Wegen der klar umrissenen Aufgabenstellung ergeben sich hierbei keine Auslegungs- und Planungsprobleme.

Wählt man nach diesen Vorarbeiten und weiteren Bemessungsdetails, die hier im einzelnen nicht angesprochen werden können, den günstigsten Standort für die verschiedenen Anlagenteile aus und erstellt daraufhin eine Massenermittlung und ein Leistungsverzeichnis, so erhält man über eine sich anschließende Kostenschätzung einen ersten Hinweis auf die im Zusammenhang mit dem Bau einer Biogasanlage zu erwartenden Investitionskosten. Dies wurde für die beiden Bemessungsvarianten des Beispiels überschlägig durchgeführt. Da zur Beurteilung der Varianten nach Wirtschaftlichkeitsgesichtspunkten neben den Kapitalkosten auch die Kosten für Bedienung, Reparatur und Betriebsmittel zu berücksichtigen sind, sollen diese im folgenden ermittelt werden. Hierzu werden für die beiden Varianten a bzw. b (Bild 7 und 8) als weitere Bedingungen zugrundegelegt:

- Heizölpreis von 0,7 DM/l = 0,07 DM/kWh
- jährliche kalkulatorische Lohnkosten K_L für die Überwachung und die Bedienung der Anlage:
 $K_L = (1/6) \text{ h/d} \cdot 365 \text{ d/a} \cdot 10 \text{ DM/h} \approx 600 \text{ DM/a}$
- jährliche Betriebsmittelkosten K_B für Variante a mit 7,5 % Trockensubstanzgehalt:
 $10 \text{ kWh/d} \cdot 0,07 \text{ DM/kWh} \cdot 365 \text{ d/a} \approx 260 \text{ DM/a}$
 Betriebsmittelkosten für Variante b mit 11,3 % Trockensubstanzgehalt:
 $7,1 \text{ kWh/d} \cdot 0,07 \text{ DM/kWh} \cdot 365 \text{ d/a} \approx 180 \text{ DM/a}$
- Annuität a_{ij} bei einer großzügig angenommenen Lebensdauer t_L von 20 Jahren und einem kalkulatorischen Zinssatz von 6 %:
 $a_{ij} = 0,086 \text{ a}^{-1}$
- Reparaturkostensatz b_{rep}
 $b_{rep} = 0,03 \text{ a}^{-1}$.

Damit ergibt sich für den Fall a ein jährlicher Erlös von $520 \text{ kWh/d} \cdot 0,07 \text{ DM/kWh} \cdot 365 \text{ d/a} = 13\,290 \text{ DM/a}$.

Im Fall b handelt es sich um 12520 DM/a.

Die tragfähigen Investitionskosten $K_{I,trag}$ beider Fälle lassen sich nach der Beziehung [2]

$$K_{I,trag} = \frac{\dot{K}_E - \dot{K}_L - \dot{K}_B}{a_{ij} + b_{rep}} \quad (5)$$

herleiten und der **Tafel 1** entnehmen.

Diesen stehen die in Anlehnung an Herstellerangaben ermittelten tatsächlichen Investitionskosten gegenüber. Ein Vergleich dieser Beträge (Spalte 4 und 5 in Tafel 1) zeigt, daß keine der beiden Varianten deutliche Wirtschaftlichkeitsvorteile aufweist.

Variante	1 Punkt der Bilder	2 tägl. bereitstellbare Netto-Energiemenge \dot{E}_{NET} kWh/d	3 jährlicher Ertrag \dot{K}_E DM/a	4 Investitionskosten tragfähige $K_{I,trag}$ DM	5 Investitionskosten erforderliche $K_{I,erf}$ DM
a	a ₁₂	520	13290	107155	108000
b	b ₁₂	490	12520	101210	102000

Tafel 1. Zusammenstellung der erforderlichen und Bestimmung der tragfähigen Investitionskosten.

Dieses Verfahren zur Ermittlung der besten Bemessungsvarianten ist jedoch verhältnismäßig aufwendig. Analysiert man Gl. (5) in Verbindung mit den zuvor eingeführten Bedingungen, so sieht man, daß die jährlichen kalkulatorischen Lohn- und Betriebsmittelkosten in dem betrachteten Bereich gegenüber den jährlichen Erträgen von untergeordneter Bedeutung sind. Annuität und Reparaturkosten sind konstant. Damit läßt sich Gl. (5) vereinfacht schreiben als:

$$K_{I,trag} = e_1 \dot{K}_E \quad \text{mit } e_1 = 1/(a_{ij} + b_{rep}) \quad (6)$$

oder da der Nutzen gleichbedeutend ist mit den durchschnittlich tägl. im Betrieb nutzbaren Energiemengen $\dot{E}_{NUTZ,\emptyset}$

$$K_{I,trag} = e_2 \dot{E}_{NUTZ,\emptyset} \quad \text{und mit } e_2 = \frac{\dot{K}_E}{\dot{E}_{NUTZ,\emptyset}}$$

$$\frac{\dot{K}_E}{\dot{E}_{NUTZ,\emptyset}} = \frac{K_{I,trag}}{\dot{E}_{NUTZ,\emptyset}} \quad (7)$$

Ist der Quotient $\frac{\dot{K}_E}{\dot{E}_{NUTZ,\emptyset}}$ aus den tatsächlichen erforderlichen Investitionen $K_{I,erf}$ und der durchschnittlich tägl. im Betrieb nutzbaren Energiemenge $\dot{E}_{NUTZ,\emptyset}$ einer Bemessungsvariante kleiner als die auf die durchschnittlich nutzbare Energiemenge $\dot{E}_{NUTZ,\emptyset}$ bezogenen tragfähigen Investitionskosten $K_{I,trag}$, so ist die Lösung wirtschaftlich. Für die beste Lösung weist der Quotient $\frac{\dot{K}_E}{\dot{E}_{NUTZ,\emptyset}}$ ein Minimum auf. Die für die Varianten a₁₂ und b₁₂ ermittelten Quotienten $\frac{\dot{K}_E}{\dot{E}_{NUTZ,\emptyset}}$ sind in Bild 9 eingetragen.

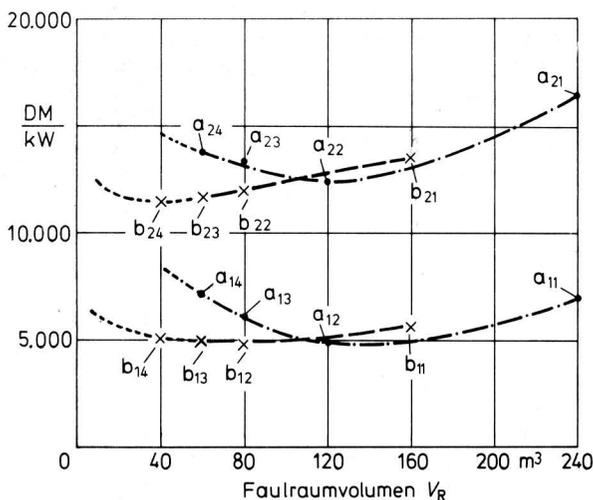


Bild 9. Auf die tägl. durchschnittlich nutzbare Energiemenge $\dot{E}_{NUTZ,\emptyset}$ bezogene erforderliche Investitionskosten $K_{I,erf}$ verschieden bemessener Biogasanlagen in Abhängigkeit von dem Faulraumvolumen.

Neben der Auslegung einer Anlage auf maximale Netto-Energieausbeute aus der gegebenen Trockenmasse ist auch der Fall denkbar, daß man sie auf eine maximale Netto-Energieproduktion pro m³ Faulraum auslegt. Angesichts der hohen Investitionskosten für den Reaktor einer Biogasanlage könnte auf diese Weise ein maximaler Nutzen pro Volumeneinheit des Faulraumes erzielt werden.

Auch hier ist wie unter 2.3.2.1 dafür zu sorgen, daß Isolierung, Frischsubstrattemperatur, Reaktorform und die anderen dort aufgeführten Parameter optimal gewählt werden, um den Prozeßenergiebedarf der Anlage möglichst gering zu halten und deren Produktivität zu erhöhen.

Legt man die Anlage wie in dem dort aufgeführten Beispiel aus, so bedeutet dies für die Variante a mit 6 m³/d Substratanfall, daß der Reaktor, wie Bild 7 Pkt. a₁₄ entnommen werden kann, am günstigsten auf eine Aufenthaltszeit von 10 Tagen auszulegen ist. Im Fall b würde man gemäß Bild 8 Pkt. b₁₃ eine Aufenthaltszeit von 15 Tagen wählen. Das Faulraumvolumen beträgt dann in beiden Fällen 60 m³.

Die in Anlehnung an die Kostenvorstellung eines Herstellers entwickelte Kennlinie der Investitionskosten in Abhängigkeit vom Faulraumvolumen gibt Bild 10 wieder.

Das sich daraus ergebende Verhältnis von Investitionskosten zur tägl. im Betrieb einsetzbaren Energie \dot{E}_{NUTZ} läßt sich unter Berücksichtigung eines Nutzungsgrades des Biogases η_{VG} von 100 % der Tafel 2 entnehmen.

Zum Vergleich sind hier außerdem noch weitere Auslegungsmöglichkeiten aufgeführt und in Bild 9 aufgetragen worden. Es zeigt sich dabei, daß die auf maximale tägl. Netto-Energieproduktion pro m³ Faulraum ausgelegten Anlagen gegenüber den auf maximale Netto-Energieproduktion aus dem gegebenen Substrat ausgelegten Anlagen keine wirtschaftlichen Vorteile aufweisen.

Dies zumindest in diesem Fall überraschende Ergebnis kommt dadurch zustande, daß der mit der Faulraumverkleinerung verbundene Investitionskostenrückgang aufgrund des hohen Fixkostenanteils der Anlageinvestition verhältnismäßig gering ist. Bei Reaktoren, die bei Auslegung auf maximale tägl. Netto-Energieproduktion nur einen Teil des tägl. anfallenden Frischsubstrates vergären, nimmt die Wirtschaftlichkeit im Vergleich zu den anderen Auslegungsmöglichkeiten aufgrund der Kostenstruktur ebenso deutlich ab wie bei einer Reaktorauslegung auf eine Aufenthaltszeit von 40 Tagen.

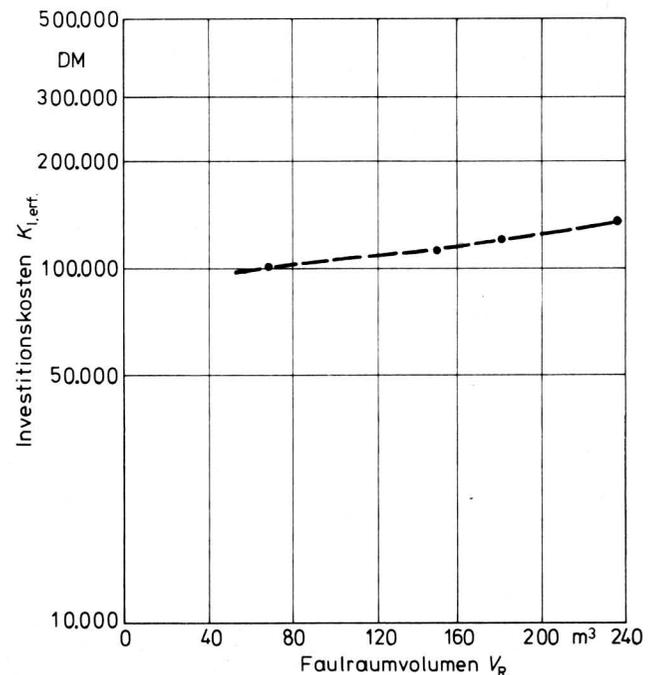


Bild 10. Erforderliche Investitionskosten $K_{I,erf}$ von Biogasanlagen in Abhängigkeit vom Faulraumvolumen.

1 Punkte der Bilder	2 Trocken- masse- gehalt c_{TS} %	3 Tägl. Zugabe- menge \dot{V}_Z m^3/d	4 Tägl. Trocken- masse- zugabe $\dot{m}_{TS,Z}$ kg/d	5 Aufent- halts- zeit t_{th} d	6 Reaktor- volumen V_R m^3	7 Biogas- Nutzungs- grad $\eta_{\dot{V}_G}$ %	8 Auf nutzbare Leistung bez. Investitions- kosten $\dot{K}_{I,erf}$ DM/kW
a ₁₁	7,5	6	450	40	240	100	6940
a ₁₂	7,5	6	450	20	120	100	4990
a ₁₃	7,5	6	450	—	80	100	6120
a ₁₄	7,5	6	450	10	60	100	7127
a ₁₅	7,5	6	300	10	40	100	—
b ₁₁	11,3	4	450	40	160	100	5632
b ₁₂	11,3	4	450	20	80	100	4896
b ₁₃	11,3	4	450	15	60	100	4900
b ₁₄	11,3	2,6	300	15	40	100	—
b ₁₅	11,3	1,3	150	15	20	100	—

Tafel 2. Ermittlung der auf die im Betrieb nutzbare Leistung bzw. tägl. nutzbare Energiemenge \dot{E}_{NUTZ} bezogenen erf. Investitionskosten K_I .

2.3.3 Anlagenbemessung für beliebige betriebliche Bedingungen

Um im Hinblick auf die Entwicklung einer Vorgehensweise zur Anlagenbemessung für beliebige betriebliche Bedingungen neue Erkenntnisse sammeln zu können, soll der Einfluß einer veränderten Energiebedarfsstruktur auf die Anlagenbemessung untersucht werden.

Da Betriebe mit einem Viehbestand von 1 300 Mastschweinen — wie im Beispiel unterstellt — bei denen der tägl. Energiebedarf ganzjährig größer ist als die von der Biogasanlage bereitgestellte Energiemenge, nicht die Regel sind, bietet es sich an, eine Anlagenbemessung für den tatsächlichen tägl. Wärmebedarf \dot{E}_{BED} des Betriebes, wie er in Bild 11 vorgestellt wird, durchzuführen.

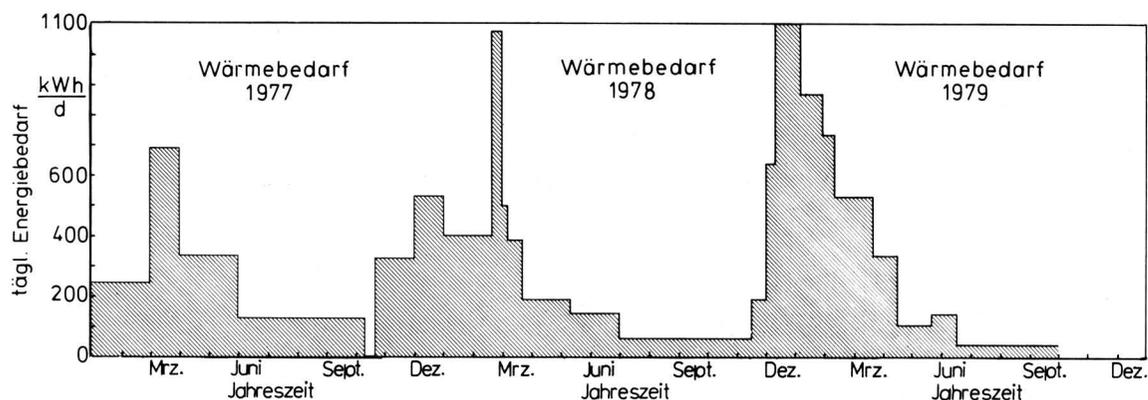


Bild 11. Tägl. Wärmebedarf \dot{E}_{BED} des Beispielbetriebes in Abhängigkeit von der Jahreszeit für Jahre 1977 bis 1979.

Dieser tägl. Wärmebedarf des Beispielbetriebes setzt sich zusammen aus dem Bedarf zur Warmwasserbereitstellung sowie zur Heizung von Wohnhaus und Vornaststall und bezieht sich auf den Zeitraum von 1977—1979. Bild 12 zeigt die Verteilung der jeweiligen Bedarfsdauer des nach Klassen geordneten Energiebedarfs für diese Periode. Der gesamte Energiebedarf des Betriebes $E_{BED,ges}$ während dieser Zeit ergibt sich durch Integration des über der Zeitachse aufgetragenen tägl. Energiebedarfs \dot{E}_{BED} . Nach Division durch die Energiebedarfsdauer der betrachteten Periode erhält man den durchschnittlichen tägl. Energiebedarf $\dot{E}_{BED,0}$.

Der Bedarf an Energie einer bestimmten Klasse ist das Produkt von Klassenbreite und Energiebedarfsdauer. Bildet man den Quotienten aus dem Bedarf an Energie der einzelnen Klassen und der Größe $E_{BED,ges}$, dann erhält man eine Aussage über den prozentualen Anteil dieser Klassen am langjährigen Energiebedarf $E_{BED,ges}$ des Betriebes. Summiert man diese sich für die einzelnen Klassen ergebenden Beträge auf, so ergibt sich die in Bild 13 dargestellte Kurve η_{BED} , über die abzulesen ist, zu welchem Teil der betriebliche Energiebedarf $E_{BED,ges}$ durch ein Energieangebot von tägl. gleichbleibender Größe \dot{E}_{NET} (Skala an der vertikalen Achse) abgedeckt werden kann.

Bild 14 in Verbindung mit Tafel 3 Spalte 1—7 zeigt die bei verschiedenen Faulraumvolumen V_R , unterschiedlichen Zugabemengen \dot{V}_Z und Trockensubstanzgehalten c_{TS} tägl. erzeugbaren Energiemengen \dot{E}_{NET} und in Verbindung mit Bild 13 die diesen entsprechenden Energiebedarfsdeckungsgrade η_{BED} . Die im Betrieb als Biogas durchschnittlich tägl. nutzbare Energie $\dot{E}_{NUTZ,0}$ ist das Produkt aus dem langjährigen durchschnittlichen tägl. Energiebedarf $\dot{E}_{BED,0}$ und der Größe η_{BED} (Tafel 3, Spalte 10 und Bild 15).

Teilt man die in Bild 10 aufgeführten Investitionskosten durch diese Beträge, dann erhält man wie im Beispiel zuvor als Quotienten die auf die nutzbare tägl. Energiemenge bezogenen erforderlichen Investitionskosten $\dot{K}_{I,erf}$ (Tafel 3, Spalte 12). Sie sind in Bild 9 aufgetragen. Diesmal ergeben sich für die Variante b gegenüber der Variante a leichte Vorteile. Die Ursache hierfür ist, daß der Quotient aus den Größen $E_{NUTZ,0}$ und E_{NET} , der Biogasnutzungsgrad $\eta_{\dot{V}_G}$, bei kleineren Anlagen größer ist (vgl. Bild 11 und Tafel 3; Spalte 7, 9, 10).

Dies führt neben einer Verschiebung des für das Beispiel des vorangegangenen Kapitels gefundenen Kurvenpaares zu einer leichten Verdrehung entgegen dem Uhrzeigersinn. Das hat weiterhin zur Folge, daß in diesem Fall die Auslegung eines Reaktors auf maximale tägl. Netto-Energieproduktion pro m^3 Faulraum gegenüber einer Reaktor bemessung auf maximale Energieproduktion aus dem gegebenen Substrat geringe Vorteile aufweist.

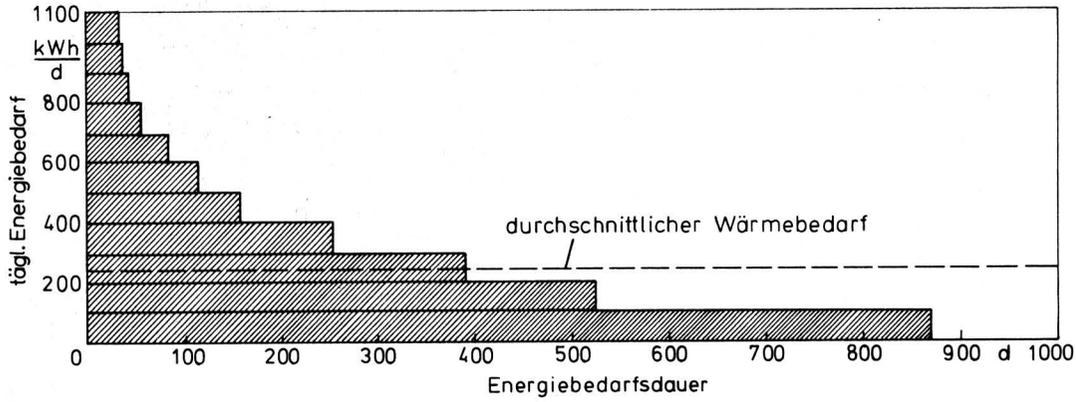


Bild 12. Verteilung des tägl. Wärmebedarfs, dargestellt als Bedarfsdauer des nach Klassen geordneten tägl. Energiebedarfs \dot{E}_{BED} .

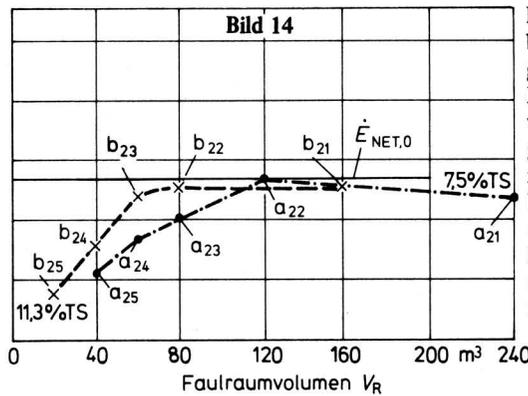
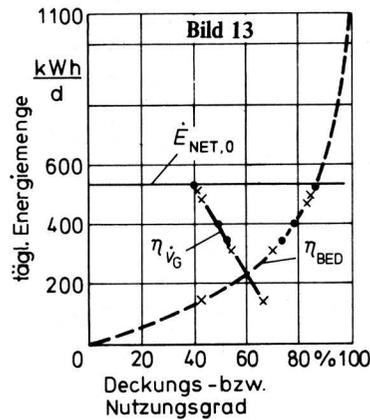


Bild 13 und 14. Nutzungsgrad η_{VG} des bereitstellbaren Biogases und Deckungsgrad η_{BED} des durchschnittlichen tägl. Energiebedarfs $\dot{E}_{BED,0}$ in Abhängigkeit von der dem Betrieb in Form von Biogas tägl. bereitstellbaren Netto-Energieerzeugung \dot{E}_{NET} sowie die tägl. bereitstellbare Netto-Energieerzeugung \dot{E}_{NET} verschiedener bemessener Reaktoren in Abhängigkeit vom Faulraumvolumen; Obergrenze der in diesem Beispiel tägl. bereitstellbaren Netto-Energieerzeugung $\dot{E}_{NET,0}$.

1 Punkte der Bilder	2 Trocken- masse- gehalt c_{TS} %	3 Tägl. Zugabe- menge \dot{V}_Z m^3/d	4 Tägl. Trocken- masse- zugabe $\dot{m}_{TS,Z}$ kg/d	5 Aufent- halts- zeit t_{th} d	6 Reaktor- volumen V_R m^3	7 Tägl. Netto- Energie- menge \dot{E}_{NET} kWh/d	8 Durchschn. tägl. Energie- bedarf $\dot{E}_{BED,0}$ kWh/d	9 Biogas- Nutzungs- grad η_{VG} %	10 Durchschn. tägl. nutz- bare Energie- menge $\dot{E}_{NUTZ,0}$ kWh/d	11 Erforderliche Inve- stitionskosten bez. auf nutzb. Lstg. $K_{I,erf}$ DM	12 Erforderliche Inve- stitionskosten bez. auf nutzb. Lstg. $K_{I,erf}$ DM/kW
a_{21}	7,5	6	450	40	240	470	240	42	200	136000	13750
a_{22}	7,5	6	450	20	120	520	240	39	206	108000	13300
a_{23}	7,5	6	450	15	80	400	240	46	184	102000	12580
a_{24}	7,5	6	450	10	60	330	240	52	171	98000	13750
a_{25}	7,5	4	300	10	40	210	240	60	144	—	—
b_{21}	11,3	4	450	40	160	500	240	41	204	114000	13411
b_{22}	11,3	4	450	20	80	500	240	41	204	102000	12000
b_{23}	11,3	4	450	15	60	480	240	43	200	98000	11760
b_{24}	11,3	2,6	200	15	40	310	240	54	167	—	—
b_{25}	11,3	1,3	150	15	20	155	240	66	102	—	—

Tafel 3. Ermittlung der auf die im Betrieb nutzbare Leistung bzw. tägl. nutzbare Energiemenge \dot{E}_{NUTZ} bezogenen erf. Investitionskosten $K_{I,erf}$.

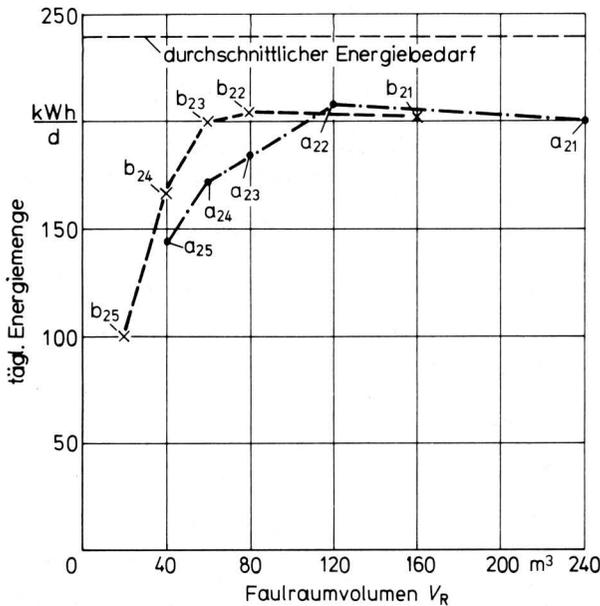


Bild 15. Im langjährigen Durchschnitt tägl. nutzbare Energiemenge $\dot{E}_{\text{NUTZ},\emptyset}$ verschieden bemessener Biogasanlagen in Abhängigkeit vom Faulraumvolumen und durchschnittlicher tägl. Energiebedarf $\dot{E}_{\text{BED},\emptyset}$.

Es ist anzunehmen, daß der Kurvenzug der Variante b im Bereich kleiner Faulraumvolumen — wie in Bild 9 dargestellt — ein Minimum aufweist. Deshalb scheint eine Reaktorauslegung auf max. tägl. Netto-Energieproduktion pro m^3 Faulrauminhalt vorteilhaft, bei der nur ein Teilstrom des insgesamt anfallenden Frischsubstrates \dot{V}_A , wie Punkt b_{24} zeigt, durch den Reaktor geführt wird. Damit wäre dies die in technisch-wirtschaftlicher Hinsicht beste Lösung.

Es kann bei dieser Lösungsvariante aber wegen der kurzen Aufenthaltszeit von 15 Tagen nur eine mäßige Geruchsreduktion erwartet werden [5]. Auch ist die Sicherheit gegen Störungen des Prozeßablaufs im Vergleich zu auf höhere Aufenthaltszeiten ausgelegten Anlagen geringer. Da die Anlage nur mit einem Teilstrom des tägl. anfallenden Frischsubstrates beschickt wird, bietet sie zudem keine Reservekapazität im Hinblick auf zukünftige betriebliche Entwicklungen.

Diesen Randaspekten kommt die Variante b_{22} wesentlich mehr entgegen, ohne daß sich hierdurch die Wirtschaftlichkeit deutlich verschlechtert. Deshalb wird dieser Lösung b_{22} der Vorzug gegeben.

Betrachtet man dieses Ergebnis und das des vorangegangenen Abschnittes, dann wird deutlich, daß das Auslegungsoptimum einer Biogasanlage von den jeweiligen betrieblichen Bedingungen abhängt. Durch die vorgestellte Vorgehensweise läßt sich das Optimum eindeutig bestimmen.

Im Hinblick auf eine breitere Anwendung dieser Vorgehensweise bei der Planung von Biogasanlagen ist es notwendig, repräsentative Daten über die Brutto-Energieproduktion bei verschiedenen Substraten, über die Energiebedarfsverteilung und über Investitionskosten typischer Einsatzfälle zu ermitteln.

3. Zusammenfassung

Bei der Bemessung einer Biogasanlage im Hinblick auf eine hohe Wirtschaftlichkeit ist zuerst die Energiebilanz des Biogasreaktors so gut wie möglich zu gestalten. Folgende Forderungen sind durch entsprechende Maßnahmen zu erfüllen:

- möglichst hohe Frischsubstrattemperatur
- Wärmedurchgangszahl des Reaktors $k < 0,3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
- kleine volumenbezogene Reaktoroberfläche
- geringer Energiebedarf für Antriebe.

Große Bedeutung kommt daneben der Abbaubarkeit des Substrates und dem Trockensubstanzgehalt zu. Für Schweineflüssigmist sollte der Trockensubstanzgehalt mindestens 7–8 % betragen. Die Ausbeute an nutzbarem Gas wird dadurch groß und das erforderliche Volumen des Reaktionsbehälters klein. Bei Trockensubstanzgehalten von 2–3 % ist selbst bei optimaler Reaktorauslegung die Energiebilanz negativ. Durch Wärmerückgewinnung aus dem ausgegorenen Substrat läßt sich die Energiebilanz weiter verbessern.

Welche Aufenthaltszeit und welcher Substratdurchsatz gewählt werden sollen, richtet sich nach

- dem zeitlichen Verlauf des Brutto-Energieertrags für das Substrat, das dem Reaktor zugeleitet werden soll (Bild 4)
- dem Verlauf der Energiebedarfsverteilungskurve (Bild 12)
- den Investitionskosten in Abhängigkeit vom Faulraumvolumen (Bild 10).

Hat man diese 3 Funktionen ermittelt, so kann man, wie in einem Beispiel gezeigt wird, durch Berechnung der auf die im Betrieb tägl. nutzbaren Energiemengen bezogenen erforderlichen Investitionskosten eine Varianteneingrenzung bzw. bereits eine Variantenauswahl treffen (Bild 9). Sollte dies hiermit nicht möglich sein, so muß man im Detail einen Wirtschaftlichkeitsvergleich durchführen. Mit Hilfe der an einem Beispiel vorgestellten Methodik wird gezeigt, daß es prinzipiell möglich ist, für beliebig strukturierte landwirtschaftliche Betriebe eine zur Wärmebedarfsdeckung optimal angepaßte Biogasanlage zu definieren. Dies gilt aber auch dann, wenn das Gas nicht ausschließlich zur Wärmebereitstellung, sondern zur Elektrizitätsversorgung mit Wärme-Kraft-Kopplung eingesetzt werden soll.

Verwendete Formelzeichen

A	m^2	Reaktoroberfläche
a_{ij}	a^{-1}	Annuität
b_{rep}	a^{-1}	Reparaturkostensatz
c	$\text{kWh}/(\text{m}^3 \text{K})$	Volumenbezogene Wärmekapazität des Frischsubstrats
c_{TS}	%; g/g	Konzentration an Trockensubstanz; Trockensubstanzgehalt
d	m	Reaktordurchmesser
E	kWh	Energiemenge
\dot{E}	$\text{kWh}/\text{d}; \text{kW}$	tägl. Energiemenge; Leistung*)
E_{BED}	kWh	Energiebedarf des Betriebes
$\dot{E}_{\text{BED},\emptyset}$	$\text{kWh}/\text{d}; \text{kW}$	durchschnittlicher tägl. Energiebedarf
E_{BRUT}	kWh	Brutto-Energiemenge
\dot{E}_{HS}	$\text{kWh}/\text{d}; \text{kW}$	tägl. Energiemenge zum Aufheizen des Frischsubstrates; bzw. Aufheizleistung
\dot{E}_{KON}	kWh/d	tägl. Wärmeverlust des Reaktors als Folge von Konvektion und Strahlung
E_{NET}	kWh	Netto-Energiemenge
$\dot{E}_{\text{NET},\text{O}}$	$\text{kWh}/\text{d}; \text{kW}$	Obergrenze der tägl. bereitstellbaren Netto-Energiemenge; bzw. Netto-Leistung
E_{NUTZ}	kWh	vom Betrieb nutzbare Energiemenge
$\dot{E}_{\text{NUTZ},\emptyset}$	kWh/d	durchschnittlich tägl. vom Betrieb nutzbare Energiemenge
\dot{E}_{PW}	kWh/d	tägl. Prozeßwärmebedarf unter Berücksichtigung des Wirkungsgrades des ges. Heizsystems

h	m	Reaktorhöhe
H_u	kWh/m ³	Heizwert für Gas im Normzustand
i	%	kalkulatorischer Zinsfuß
k	W/m ² K	Wärmedurchgangszahl
\dot{K}_B	DM/a	jährliche Betriebsmittelkosten
\dot{K}_E	DM/a	jährlicher Erlös
$K_{I,trag}$	DM	tragfähige Investitionskosten
$K_{I,erf}$	DM	erforderliche Investitionskosten
$\dot{K}_{I,trag}^*$	DM/kW	auf die im Betrieb durchschnittlich nutzbare Leistung $E_{NUTZ,\theta}$ bezogene tragfähige Investitionskosten
$\dot{K}_{I,erf}^*$	DM	auf die im Betrieb durchschnittlich nutzbare Leistung $E_{NUTZ,\theta}$ bezogene erforderliche Investitionskosten
\dot{K}_L	DM/a	jährliche kalkulatorische Lohnkosten
$\dot{m}_{TS,A}$	kg/d	tägl. anfallende Trockenmasse an Substrat
$\dot{m}_{TS,Z}$	kg/d	tägl. Zugabe an Trockenmasse
t_L	a	kalkulatorische Lebensdauer einer Biogasanlage
t_{th}	d	theoretische Aufenthaltszeit
V_A	m ³	Frischsubstratmenge
V_G	m ³	Biogasmenge (unter Normbedingungen)
V_{G,CH_4}	m ³	Methanmenge (unter Normbedingungen)
V_R	m ³	Reaktornettovolumen; Faulraumvolumen
V_Z	m ³	Zugabemenge
ϑ_A	°C	Temperatur der Außenluft
ϑ_R	°C	Temperatur des Reaktors
ϑ_S	°C	Temperatur des Frischsubstrats
η_{BED}		Energiebedarfsdeckungsgrad
η_{HEIZ}		Wirkungsgrad des Wärmeerzeugers; (Gasbrenner, Kessel und Rohrleitungen)
$\eta_{\dot{V}_G}$		Biogasnutzungsgrad

*) Mit Punkt versehene Größen sind zeitbezogen; z.B. tägl. Energiemenge \dot{E}

Schrifttum

Bücher sind durch ● gekennzeichnet

- [1] *Würrch, H.H.*: Zur betriebstechnischen Einordnung von Biogasanlagen. *Grundl. Landtechnik* Bd. 31 (1981) Nr. 2, S. 55/60.
- [2] *Kleinhanss, W.*: Wirtschaftlichkeit der Biogaserzeugung aus tierischen Exkrementen. *Berichte über Landwirtschaft* Bd. 58 (1980) Heft 4, S. 560/97.
- [3] ● *Baader, W., E. Dohne u. M. Brenndörfer*: Biogas in Theorie und Praxis. *KTBL-Schrift* Nr. 229, Münster-Hiltrup: Landwirtschaftsverlag 1978.
- [4] ● *Ruhr-Stickstoff Aktiengesellschaft*: Faustzahlen für Landwirtschaft und Gartenbau. Münster-Hiltrup: Landwirtschaftsverlag 1978.
- [5] *Van Velsen, A.F.M.*: Anaerobic digestion of piggery waste. *Neth. J. Agric. SCI.* 25 (1977) S. 151/69.
- [6] *Summers, R. u. S. Bousfield*: A detailed study of piggery-waste anaerobic digestion. *Agricultural Waste* (1980) Nr. 2, S. 61/78.
- [7] *Chen, Y.R. u. A.G. Hashimoto*: Kinetics of methane fermentation biotechnology and bioengineering. *Symp. No. 8*, (1978) S. 269/82.
- [8] *Kayser, R.*: Vorlesungsumdruck über Siedlungswasserwirtschaft. Braunschweig, 1978.
- [9] *Kandler, O., J. Winter u. U. Temper*: Methane fermentation in the thermophilic range. *Inter. Conference "Energy from Biomass"*, Brighton Nov. 1980, Vortragsmanuskript.
- [10] *Agro-Fermenttechnik AG*: Firmenunterlagen 1980; unveröffentlicht.
- [11] *Maurer, K.*: Anlage Bernloch seit 1959 in Betrieb. *Sonnenenergie und Wärmepumpe* Jg. 5 (1980) Nr. 1, S. 37/38.
- [12] *Göbel, W.*: Biogasanlagen. Interner Bericht, Eidgenössische Forschungsanstalt Tänikon, 1980; unveröffentlicht.
- [13] *Stamm, A.*: Baukosten verschiedener Biogasanlagentypen unter besonderer Berücksichtigung der Isolation. *Diplomarbeit ETH Zürich* 1979; unveröffentlicht.
- [14] *Perwanger, A. u. H. Mitterleitner*: Biogas. Auszug aus erstem Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben des bayrischen Staatsministeriums. *Landtechnik Weihenstephan*, Eigendruck 1980; unveröffentlicht.
- [15] *Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Umwelt Baden Württemberg*: Versuchs- und Erfahrungsbericht 1978. Landesanstalt für Schweinezücht, Forchheim, 1978.
- [16] ● *Abwassertechnische Vereinigung*: Lehr- und Handbuch der Abwassertechnik. Bd. 3. Berlin: Verlag Wilhelm Ernst u. Sohn 1978.