

## Strom oder Wärme aus Biogas?

### Ein Modell als Planungshilfe zur Ermittlung der in technisch-wirtschaftlicher Hinsicht optimalen Form der Gasverwertung

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 Art der Gasverwertung kann die Wirtschaftlichkeit einer Biogasanlage in entscheidender Weise beeinflussen. Dies ist bereits in der Planungsphase einer Anlage zu beachten, damit das beabsichtigte Vorhaben zum vollen Erfolg führt.

Eine Hilfe bei der Planung sind Methoden, die es gestatten, die Parameter von Biogasanlagen unter Berücksichtigung des Energiebedarfs eines beliebigen landwirtschaftlichen Betriebes optimal festzulegen. In Erweiterung eines früheren Modells [1] wird hier die Möglichkeit aufgezeigt, die in technisch-wirtschaftlicher Hinsicht beste Form der Gasverwertung – Elektrizitäts- und/oder Wärmeerzeugung – zu ermitteln.

Mit der Methode wird die Wirtschaftlichkeit verschiedener Alternativen unter ausgewählten Randbedingungen untersucht, und es werden die unter diesen Bedingungen sich ergebenden Einsatzgrenzen der betrachteten Gasverwertungsmöglichkeiten aufgezeigt.

4. Ermittlung des Kapitalwertes im Falle der Elektrizitäts- und Wärmeerzeugung
  - 4.1 Allgemeine Beziehung für die Berechnung
  - 4.2 Ermittlung der Bestimmungsgrößen
  - 4.3 Berechnung des Kapitalwertes an einem ausgewählten Beispiel unter verschiedenen Randbedingungen
    - 4.3.1 Berechnung nach der allgemeinen Beziehung
    - 4.3.2 Berechnung nach der vereinfachten Beziehung
5. Wirtschaftlichkeitsvergleich der beiden Gasnutzungsmöglichkeiten bei verschiedener Betriebsweise in unterschiedlichen Einsatzfällen
  - 5.1 Untersuchung ausgewählter Fälle der Energiebedarfsdeckung
  - 5.2 Veränderungsmöglichkeiten der Grenzen des wirtschaftlichen Einsatzes der zwei konkurrierenden Gasverwertungsmöglichkeiten
  - 5.3 Wirtschaftlichkeit der wechselweisen Wärme- bzw. Elektrizitäts- und Wärmeerzeugung
6. Zusammenfassung

#### Inhalt

1. Einleitung
2. Modellansatz zur Ermittlung der wirtschaftlichsten Form der Gasverwertung
3. Ermittlung des Kapitalwertes im Falle der Wärmebereitstellung
  - 3.1 Allgemeine Beziehung für die Berechnung
  - 3.2 Ermittlung der Bestimmungsgrößen
  - 3.3 Berechnung des Kapitalwertes an einem ausgewählten Beispiel unter verschiedenen Randbedingungen
    - 3.3.1 Berechnung nach der allgemeinen Beziehung
    - 3.3.2 Berechnung nach der vereinfachten Beziehung

#### 1. Einleitung

In einem landwirtschaftlichen Betrieb gibt es nur wenige Verbraucher mit einem über das Jahr gesehen relativ ausgeglichenen hohen Energiebedarf. Eine der interessantesten Möglichkeiten der Gasverwertung ist in der Erzeugung von Wärme zur Heizung des Wohnhauses und der Betriebsgebäude zu sehen, da der Energiebedarf für diese Zwecke, verglichen mit dem übrigen betrieblichen Energiebedarf, recht bedeutend ist. Es sind hierdurch nennenswerte Einsparungen an Energie zu erwarten. Während jedoch eine Biogasanlage eine relativ gleichbleibende Leistung abgibt, ist der Leistungsbedarf für Hausheizungszwecke starken jahreszeitlich bedingten Schwankungen unterworfen. Dies führt dazu, daß in solchen Fällen die von der Anlage bereitgestellte Leistung – selbst bei in techn.-wirtschaftlicher Hinsicht optimaler Anlagenauslegung – häufig nur zu 40–60 % genutzt werden kann [1].

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

Da ein derart schlechter Biogasnutzungsgrad die Wirtschaftlichkeit einer Anlage stark vermindert, erscheint es zweckmäßig, das auf diese Weise nicht nutzbare Gas einer anderweitigen sinnvollen Verwendung zuzuführen, um damit die Anlagenwirtschaftlichkeit zu erhöhen. Eine solche günstige Verwertungsmöglichkeit wird häufig in einer Verstromung des Biogases gesehen. Dies scheint besonders dann aussichtsreich zu sein, wenn der erzeugte Strom im eigenen Betrieb voll verwertet werden kann und nicht zu einem relativ niederen Tarif in das öffentliche Stromnetz eingespeist wird. Daneben kann die bei der Stromerzeugung anfallende Motor- und Generatorabwärme in hohem Maße ebenfalls zu Hausheizungszwecken genutzt werden.

Diese Fragestellung wurde bereits von mehreren Autoren untersucht [2 bis 7]. Der die Breite der Zusammenhänge zur Beantwortung dieser Frage modellmäßig am besten erfassende Ansatz stammt von *Kleinhanß*. Allerdings konnten aufgrund des damaligen Wissensstandes wesentliche biotechnologische Zusammenhänge, die einen großen Einfluß auf die Anlagenauslegung haben können, nur unzureichend berücksichtigt werden. Zudem zielte das Modell auf eine Abklärung des möglichen Einsatzbereiches der Biogastechnologie in der Landwirtschaft ab, während hier die technisch-wirtschaftliche Optimierung von Biogasanlagen im Vordergrund steht.

Deshalb wurde, in Weiterentwicklung der früher vorgestellten Methode [1], das im folgenden erläuterte Modell zur Unterstützung der Arbeit des Anlagenplaners aufgestellt. Damit läßt sich nun nicht nur, wie in [1] gezeigt wurde, die in technisch-wirtschaftlicher Hinsicht optimale Form der Anlagenauslegung bei einer bestimmten Gasverwertungsart, sondern auch die beste Form der Gasverwertung in einem beliebigen landwirtschaftlichen Betrieb bestimmen oder doch zumindest ein optimaler Lösungsbereich definieren. Dies wird an einem Beispiel anhand praxisnaher Daten dargestellt. Die dabei gewonnenen Aussagen lassen sich auf ähnlich strukturierte Betriebe übertragen, und durch Variation einiger im Modell enthaltener Parameter lassen sich die Einsatzgrenzen der jeweils betrachteten Gasverwertungsmöglichkeiten unter den dem Beispiel zugrunde liegenden Randbedingungen aufzeigen.

## 2. Modellansatz zur Ermittlung der wirtschaftlichsten Form der Gasverwertung

Auf eine sich fortwährend verändernde technische und wirtschaftliche Umwelt muß der Landwirt mit der Anpassung seiner Produktionsgrundlagen reagieren. Ein wichtiger Bereich der Anpassungsstrategie ist in dem Tätigen von Investitionen, wie beispielsweise im Bau einer Biogasanlage, zu sehen. Derartige Investitionen legen in vielen Fällen Art und Umfang der Produktion eines Betriebes langfristig fest. Rationelles Handeln vorausgesetzt, ist es deshalb notwendig, vor Durchführung einer solchen Maßnahme, die Vorteilhaftigkeit einer bestimmten oder die relative Vorzüglichkeit alternativer Investitionen zu beurteilen.

Hierzu gibt es verschiedene methodische Ansätze, die sich in statische und dynamische Verfahren der Investitionsrechnung und in umfassendere dynamische Planungsmethoden aufgliedern lassen. Da die statischen Verfahren wegen ihrer prinzipiellen Mängel nur als grobe Orientierung angesehen werden können [8], sind sie als Entscheidungshilfe wenig geeignet. Aber auch die klassischen Verfahren der dynamischen Investitionsrechnung (Kapitalwertmethode, Annuitätenmethode, Methode des internen Zinsfußes), deren Vorzüglichkeit zur Beurteilung von Investitionen für den Bereich der allgemeinen Betriebswirtschaft bereits von *Albach* [9], *Jacob* [10] und *Schneider* [11] u.a. kritisch analysiert worden ist, können nach dem Urteil von *Reisch u. Zeddies* [12] in der Landwirtschaft wegen folgender Kritikpunkte nur begrenzt eingesetzt werden:

1. Die Annahme vollkommener Kenntnis des Zeitpunktes und der Höhe der zukünftigen Ein- und Auszahlungen.
2. Die a-priori-Festlegung eines Kalkulationszinsfußes (Annahme des vollkommenen Kapitalmarktes).

3. Die Wiederanlageprämisse, die unterstellt, daß die frei werdenden Geldüberschüsse jeweils zum gleichen Zinsfuß reinvestiert werden können.
4. Die Annahme, daß Einzahlungen und Auszahlungen ausreichend genau aus dem Betriebsganzen isoliert werden können.

Gerade der letzte Punkt ist von außerordentlicher Bedeutung, da Investitionen in Biogasanlagen in landwirtschaftlichen Betrieben, die in der Regel eine Verbundproduktion betreiben, lediglich als ein Teil des Komplexes Viehhaltung/Futterbau einerseits und der Gasverwertungsmöglichkeiten andererseits betrachtet werden können. Weitere Querverbindungen über die Arbeitswirtschaft zu den übrigen Teilen des Betriebes kommen hinzu, deren Einbeziehung mittels der Kapitalwertmethode nicht oder nur unvollkommen möglich ist. Dies gilt ebenfalls für die Zurechenbarkeit von Fix- und Gemeinkosten der Produktion zu den Ein- und Auszahlungen der Investition. Ein- und Auszahlungen sind in den Fällen der Verbundproduktion stets das Ergebnis der gemeinsamen Aktivität der am Produktionsprozeß beteiligten Faktoren, was die Anwendung der klassischen Investitionskalküle problematisch erscheinen läßt.

Schließlich ist darauf hinzuweisen, daß die Kapitalwertmethode voraussetzt, daß keine Beschränkungen kapazitiver, absatzwirtschaftlicher, beschaffungswirtschaftlicher oder finanzieller Art vorliegen. Da auch diese Annahmen für die landwirtschaftliche Produktion in der Regel nicht gelten, kann die Beurteilung einer bestimmten Verwertungsform des Gasverbrauches mittels der Kapitalwertmethode unter Umständen zu falschen Aussagen führen.

Da Rentabilität, Liquidität und Stabilität als Kenngrößen des Produktionsprozesses stets nur im Zusammenhang mit dem Gesamtbetrieb gesehen werden können, wurden im Bereich der Betriebswirtschaft neuere Verfahren der Investitionsrechnung entwickelt. Mit diesen Verfahren ist es gegenüber den partiellen Ansätzen (Kapitalwert etc.) möglich, "simultan" alle wesentlichen Bedingungen und Engpässe, denen die Produktion unterliegt, zu berücksichtigen und gleichzeitig die optimale Kombination von Maschinen, Aggregaten, Arbeit etc. zu ermitteln. Zu diesen Verfahren gehören beispielsweise die lineare und nichtlineare Optimierung.

Nun kann es jedoch nicht Aufgabe des Anlagenplaners sein, eine Biogasanlage unter den jeweiligen betrieblichen Randbedingungen und Entwicklungschancen so auszuwählen, daß sie diesen Kriterien hinreichend Rechnung trägt.

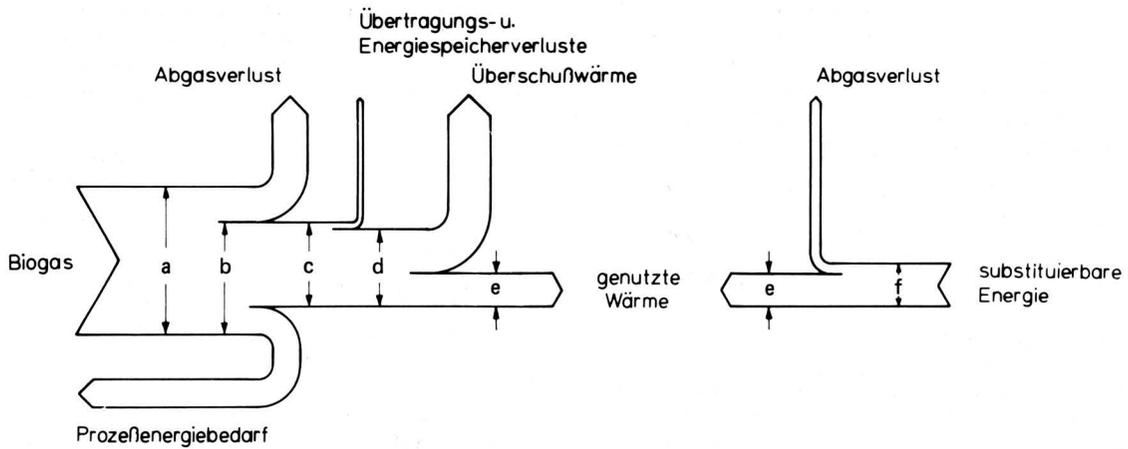
Vielmehr ist seine Aufgabe vorrangig darin zu sehen, aus der Vielzahl der unter den jeweiligen Randbedingungen denkbaren technischen Lösungen diejenigen herauszufiltern, die in technisch-wirtschaftlicher Hinsicht den optimalen Lösungsbereich darstellen, so daß dann der jeweilige Betriebsleiter allein oder mit Hilfe eines landwirtschaftlichen Fachberaters nach dieser Art der Entscheidungsvorbereitung durch den Anlagenplaner anhand vorliegender Daten seinen Entschluß treffen kann.

Betrachtet man die oben genannten Methoden der dynamischen Investitionsrechnung unter diesem Gesichtspunkt, dann verlieren die gegen diese Verfahren aufgeführten Argumente an Gewicht. Für ihre Anwendung im praktischen Planungsfall spricht zudem, daß sie auch weniger aufwendig sind als die umfassenderen neueren Planungsmethoden.

Von den oben genannten Methoden der dynamischen Investitionsrechnung wurde die Kapitalwertmethode deshalb gewählt, weil sie von allen dynamischen Methoden im Kreis der in Frage kommenden Planer für Biogasanlagen (z.B. Bereich Abwassertechnik) am weitesten eingeführt und verbreitet ist.

Nach der Kapitalwertmethode ist nach *Schneider* [11] eine Investition betriebswirtschaftlich gesehen dann vorteilhaft, wenn der Kapitalwert  $K_G$  dieser Investition größer oder zumindest gleich Null ist:

$$K_G \geq 0 \quad (1).$$



**Bild 1.** Aufteilung der Energieströme bei Verwertung des in einem landwirtschaftlichen Betrieb anfallenden Biogases über eine Gasfeuerung unter Zugrundelegung realer Werte.

- a  $\dot{E}_{BRUT}^*$
- b  $\dot{E}_{BRUT} \eta_{thBBR}$
- c  $\dot{E}_{BRUT} \eta_{thBBR} - \dot{E}_{PW}$
- d  $\dot{E}_{BRUT} \eta_{thBBR} - \dot{E}_{PW} - \dot{E}_{Ü,SP}$
- e  $(\dot{E}_{BRUT} \eta_{thBBR} - \dot{E}_{PW} - \dot{E}_{Ü,SP}) \nu_{th}$
- f  $(\dot{E}_{BRUT} \eta_{thBBR} - \dot{E}_{PW} - \dot{E}_{Ü,SP}) \nu_{th} / \eta_{thBBR}$

Der Kapitalwert setzt sich dabei aus der Summe der während der Lebensdauer  $t_L$  einer Anlage anfallenden abgezinsten jährlichen Einnahmen  $\dot{K}_{EI}$  und Ausgaben  $\dot{K}_{AU}$  abzüglich der erforderlichen Erstinvestition  $K_{I,erf}$  zusammen.

$$K_G = -K_{I,erf} + \sum_{n=1}^{t_L} \frac{\dot{K}_{EI,n} - \dot{K}_{AU,n}}{(1+i)^n} \quad (2)$$

mit  $t_L$  Lebensdauer der Anlage in ganzen Jahren.

Sollen mehrere Gasverwertungsmöglichkeiten im Hinblick auf ihre Wirtschaftlichkeit verglichen werden, um die bessere Alternative herauszufinden, so ist ein einfaches Beurteilungskriterium in der Betrachtung des Nutzens der Alternativen zu sehen. Ist der Kapitalwert einer der Lösungen negativ, so entfällt diese Gasverwertungsmöglichkeit gemäß Gl. (1).

Tritt dieser Fall nicht ein, so bietet sich in einem weiteren Schritt ein Vergleich des Verhältnisses von Nutzen zu Aufwand der Alternativen an. Dieses Verhältnis läßt sich vereinfacht durch den Quotienten aus dem Kapitalwert dieser Lösung und dem zugehörigen Bedarf an Investitionen für die Anlage beschreiben. Von n Alternativen besitzt diejenige die größte relative Vorzüglichkeit, bei der der Quotient den größten Wert aufweist.

Für:

$$\frac{K_{G,1}}{K_{I,erf} ANL1} > \frac{K_{G,2}}{K_{I,erf} ANL2} > \dots > \frac{K_{G,n}}{K_{I,erf} ANLn} \quad (3)$$

gilt

$$\frac{K_{G,1}}{K_{I,erf} ANL1}$$

als die wirtschaftlichste Lösung.

Die hier angegebenen Quotienten werden im folgenden bezogene Kapitalwerte genannt und mit  $K_G^*$  bezeichnet.

Bevor jedoch die verschiedenen Gasverwertungsmöglichkeiten verglichen werden können, ist ihr Kapitalwert im einzelnen detailliert herzuleiten.

\*) Zusammenstellung der Formelzeichen am Ende des Beitrags

### 3. Ermittlung des Kapitalwertes im Falle der Wärmebereitstellung

#### 3.1 Allgemeine Beziehung für die Berechnung

Der Kapitalwert  $K_G$  läßt sich im Falle der Wärmebereitstellung mit Hilfe der in Gl. (2) aufgeführten Beziehung ermitteln.

Als erforderliche Investition  $K_{I,erf}$  sind darin die Baukosten einer Anlage einzusetzen.

Die jährlichen Einnahmen  $\dot{K}_{EI}$  setzen sich aus den jährlichen Einsparungen  $\dot{K}_{EI,E_{th}}$  im Falle der Wärmebereitstellung und aus den von dem Betrieb der Anlage ausgehenden Einsparungsmöglichkeiten in den Bereichen Umweltschutz  $\dot{K}_{EI,UM}$ , Düngung  $\dot{K}_{EI,DÜ}$  und Tierhygiene  $\dot{K}_{EI,HY}$  zusammen. Die jährlichen Einnahmen  $\dot{K}_{EI,E_{th}}$  lassen sich, wie Bild 1 veranschaulicht, über die Beziehung

$$\dot{K}_{EI,E_{th}} = (\dot{E}_{BRUT} \eta_{thBBR} - \dot{E}_{PW} - \dot{E}_{Ü,SP}) \nu_{thBBR} K_{E_{sub}}^+ / \eta_{thU_{sub}} \quad (4)$$

herleiten.

Die jährlichen Ausgaben  $\dot{K}_{AU}$  setzen sich im wesentlichen aus den Kosten  $\dot{K}_{AU,BMK}$  für die Mittel zum Betrieb einer Anlage, den Lohnkosten  $\dot{K}_{AU,L}$  für die Anlagenbedienung und den Kosten  $\dot{K}_{AU,REP}$  für Anlagenunterhaltung und Reparatur zusammen.

Setzt man diese Beziehungen in Gl. (2) ein, dann erhält man einen erweiterten Ausdruck, mit dem sich der Kapitalwert einer Biogasanlage ermitteln läßt.

Dabei ist allerdings zusätzlich zu berücksichtigen, daß die jeweiligen jährlichen Einnahmen und Ausgaben aufgrund volkswirtschaftlicher Prozesse über die Lebensdauer einer Anlage betrachtet nicht konstant bleiben. Unterstellt man, daß sich derartige Veränderungen durch Aufzinsen der jeweiligen Beträge durch ihnen entsprechende konstant ansetzbare Steigerungsraten  $j$  abschätzen lassen, dann erhält man in diesem Fall als allgemeine Beziehung für den Kapitalwert den Ausdruck:

$$K_G = -K_{I,erf} + K_{EI,UM} + K_{EI,DÜ} + K_{EI,HY} + (\dot{E}_{BRUT} \eta_{thBBR} - \dot{E}_{PW} - \dot{E}_{Ü,SP}) \nu_{thBBR} \frac{1}{\eta_{thU_{sub}}} \cdot K_{E_{sub}}^+ \frac{c_1 (c_1^{t_L} - 1)}{c_1 - 1} + \dot{K}_{AU,BMK} \frac{c_2 (c_2^{t_L} - 1)}{c_2 - 1} + \dot{K}_{AU,L} \frac{c_3 (c_3^{t_L} - 1)}{c_3 - 1} + \dot{K}_{AU,REP} \frac{c_4 (c_4^{t_L} - 1)}{c_4 - 1} \quad (2a);$$

mit

mit

$$c_1 = \frac{1 + j_{E_{th}}}{1 + i}, \quad c_2 = \frac{1 + j_{BMK}}{1 + i} = \frac{1 + j_{E_{el}}}{1 + i},$$

$$c_3 = \frac{1 + j_L}{1 + i}, \quad c_4 = \frac{1 + j_{REP}}{1 + i}$$

und

$$\frac{c_1 (c_1^{t_L} - 1)}{c_1 - 1} = c_1 + c_1^2 + c_1^3 + \dots + c_1^{t_L}.$$

### 3.2 Ermittlung der Bestimmungsgrößen

Zur Berechnung des Kapitalwertes in einem konkreten Fall muß man zunächst die in Gl. (2a) aufgeführten Parameter ermitteln. Die Größe der tatsächlichen Investitionen  $K_{I,erf}$  kann man anhand von Kostenvoranschlägen abschätzen. Mittels einer Ausschreibung lassen sie sich genauer bestimmen.

Die Einsparungen  $K_{EI,UM}$ , die sich im Falle des Baues einer Biogasanlage durch den Fortfall von Umweltschutzmaßnahmen ergeben können, sind sehr stark von der jeweiligen betrieblichen Situation abhängig und müssen auf unterschiedlichen Wegen ermittelt werden. Ein allgemeiner Herleitungsansatz kann deshalb an dieser Stelle nicht gegeben werden.

Über die Höhe der möglichen Einsparungen in den Bereichen Pflanzenernährung und Tierhygiene  $K_{EI,DU}$  und  $K_{EI,HY}$  lassen sich bisher aufgrund mangelnder Untersuchungen und damit fehlender Daten keine Aussagen machen.

Die in dem o.g. Ausdruck aufgeführte tägliche Bruttoenergieerzeugung  $\dot{E}_{BRUT}$  eines Reaktors, sein täglicher Prozeßwärmebedarf  $\dot{E}_{PW}$  und die bei der Abdeckung des Prozeßwärmebedarfs entstehenden Übertragungs- und Energiespeicherverluste  $\dot{E}_{U,SP}$  können, wie in [1] gezeigt wurde, ebenso wie der Nutzungsgrad der von der Anlage bereitstellbaren thermischen Leistung anhand bestehender biotechnologischer und betriebstechnischer Zusammenhänge bestimmt werden.

Zur Ermittlung der thermischen Wirkungsgrade der Biogasfeuerung  $\eta_{th,BBR}$  und der Umwandlungseinrichtung des im Betrieb substituierten Energieträgers  $\eta_{th,U,sub}$  reichen Annahmen anhand vorliegender Erfahrungswerte aus. Nach *Dohne* [2], *Wenzlaff* [7] u.a. liegen die Wirkungsgrade  $\eta_{th}$  guter Gas- und Ölbrenner in der Regel zwischen 0,7 und 0,9.

Die Betriebsmittelkosten  $\dot{K}_{AU,BMK}$  einer Anlage werden im wesentlichen durch den Bedarf an elektrischer Energie zum Rühren und Mischen des Faulrauminhaltes verursacht. Je nach Konstruktionsprinzip der Anlage muß hierfür pro  $m^3$  Faulraum mit einem Betrag zwischen 4 und 40  $Wh/m^3 d$  gerechnet werden [1, 13]. Zur Ermittlung der Betriebsmittelkosten einer Anlage ist dieser Betrag mit den jeweils aktuellen Preisen pro Energieträgereinheit  $K_E^+$  zu multiplizieren.

Die Lohnkosten  $\dot{K}_{AU,L}$  für die Anlagenbedienung und die Kosten für Anlagenunterhaltung und Reparatur  $\dot{K}_{AU,REP}$  können hingegen nicht so genau bestimmt werden. Man kann sie jedoch eingrenzen. Aufgrund erster Betriebserfahrungen kann man bei der Bedienung einer ca. 100  $m^3$  fassenden Anlage von einem täglichen Arbeitszeitbedarf zwischen 5 und 10 min ausgehen. Der Lohnansatz ist von Betrieb zu Betrieb unterschiedlich und richtet sich nach den jeweiligen Gegebenheiten.

Zur Abschätzung der Kosten für Anlagenunterhaltung und Reparatur  $\dot{K}_{AU,REP}$  bietet es sich an, zunächst auf Werte für ähnliche Anlagen aus dem Bereich der Abwassertechnik zurückzugreifen, solange für landwirtschaftliche Anlagen entsprechende Angaben noch nicht verfügbar sind. Bei Kläranlagen setzt man nach *Mönich u.a.* [14] Werte von 0,5–1 % der Gesamtinvestition an.

Da zwischen Anlagenunterhaltungs- und Reparaturkosten einerseits und den Investitionen andererseits ein linearer Zusammenhang besteht [14], könnten diese Werte auch hier zugrunde gelegt werden, zumal bei Biogasanlagen wie in der Klärtechnik das Ver-

hältnis der Investitionen für den bautechnischen Teil zu denen für den maschinentechnischen Teil etwa 7 zu 3 beträgt. Wegen der noch nicht ausgereiften Verfahrenstechnik erscheint es aber ratsam, die jährlichen Kosten hier mit 2 % der Gesamtinvestitionen zu veranschlagen.

Als kalkulatorischer Zinsfuß  $i$  darf nach Angaben der Baugeräteleiste [15] und von *Kleinhanß* [5] 6 bis 6,5 % angenommen werden.

Die Abschreibung einer Biogasanlage errechnet sich aus den Abschreibungssätzen für den bau- und den maschinentechnischen Anteil. Geht man in Anlehnung an [14] von einer gemittelten Lebensdauer der Bauwerksteile von 25 Jahren und der Maschinen von 13 Jahren aus, dann ergibt sich unter Berücksichtigung des obigen Investitionsverhältnisses ein Abschreibungssatz von 5,0 % entsprechend einer mittleren Lebensdauer  $t_L$  von 20 Jahren.

Das dynamische Verhalten, angegeben als mittlere jährliche Steigerungsrate, ausgewählter Preise, Löhne und Gehälter innerhalb des Zeitraumes von 1970 bis 1980 geht aus *Tafel 1* hervor. Die angenommene Entwicklung dieser Werte bis in das Jahr 2000 läßt sich ebenfalls dieser *Tafel* entnehmen.

Index		1	2
		Mittl. jährl. Steigerungsrate j	
		Werte der Statistik 1970–1980 %/Jahr	Angenommene Werte 1980–2000 %/Jahr
Lebenshaltungskosten		5,5	5,0
Stahlbetonbrückenbau		5,3	6,0
Maschineneinrichtungen aus Metallbauarbeiten <sup>1)</sup>		7,2	–
Starkstromanlagen in gewerbl. Betriebsgebäuden <sup>1)</sup>		6,6	–
Mischindex Maschinenbau <sup>2)</sup>		7,1	8,0
El. Energie	$j_{E_{el}}$	5,3	8,0
Heizöl	$j_{E_{th}}$	17,0	8,0
Personalkosten <sup>3)</sup>		7,4	7,0
Lohnkosten <sup>1)</sup>	$j_L$	–	8,0
Reparaturkosten <sup>4)</sup>	$j_{REP}$	7,3	8,0
kalkulatorischer Zinsfuß	$i$	6,0	6,0 (8,0)

1) Landwirtschaft

2) 80 % Maschineneinrichtungen und 20 % Starkstromanlagen

3) Angestellte, Leistungsgruppe II

4) 50 % Maschineneinrichtungen und 50 % Personalkosten

**Tafel 1.** Mittlere jährliche Steigerungsraten ausgewählter Indizes für den Zeitraum 1970–1980, nach [16], und angenommene Werte für den Zeitraum 1980–2000.

Dabei wird von folgenden Annahmen ausgegangen:

1. Die bisherige jährliche Steigerungsrate der Lebenshaltungskosten schwächt sich in Zukunft von 5,5 auf 5 % ab.
2. Bis in das Jahr 2000 steigen die Ölpreise wegen allgemeiner Verknappungserscheinungen auf dem Primärenergiesektor um etwa real 3 % jährlich stärker als die Steigerungsrate der Lebenshaltungskosten des Jahres 1980 an [17, 18].
3. Die Strompreise entwickeln sich ähnlich wie die Ölpreise.
4. Die Bau- und Maschinenkosten steigen in Abhängigkeit von dem zu ihrer Produktion erforderlichen Energiebedarf ebenfalls verstärkt an.
5. Die Personalkostenentwicklung verlangsamt sich.
6. Der kalkulatorische Zinsfuß bleibt konstant.

### 3.3 Berechnung des Kapitalwertes an einem ausgewählten Beispiel unter verschiedenen Randbedingungen

#### 3.3.1 Berechnung nach der allgemeinen Beziehung

Den folgenden Betrachtungen liegt der bereits in [1] vorgestellte und eingehend beschriebene 120 GV-Schweinemastbetrieb zugrunde.

Anhand der dort durchgeführten Betrachtungen konnte gezeigt werden, daß unter diesen betrieblichen Randbedingungen eine Anlagenauslegung auf 20 Tage Aufenthaltszeit bei vollem Substratdurchsatz in Höhe von 6 m<sup>3</sup>/d das Optimum darstellt, wenn das Gas zur Wärmebereitstellung verwendet werden soll. Die dort ermittelten und für die folgenden Überlegungen wesentlichen Daten lassen sich der **Tafel 2** entnehmen.

Abweichend von den in [1] getroffenen Kostenannahmen, stützen sich die in **Tafel 2** aufgeführten Baukosten nicht mehr auf Kostenschätzungen, sondern auf das preiswürdigste Angebot einer bundesweit durchgeführten Ausschreibung, so daß von den hier abgeleiteten Aussagen eine gewisse Realitätsnähe erwartet werden kann.

Als Arbeitszeitbedarf zur Anlagenbedienung wurden zur Ermittlung der jährlichen Lohnkosten  $\dot{K}_{AU,L}$  10 min/d bei einem Lohnansatz von 10 DM/h zugrunde gelegt. Zur Berechnung der Betriebsmittelkosten wurde von einem Rührenergiebedarf von 80 Wh/(m<sup>3</sup> d) ausgegangen.

Setzt man nun in Gl. (2a) die zuvor hergeleiteten Größen und die in **Tafel 2** aufgeführten Werte ein und geht man zunächst von einer, wenngleich in der Praxis kaum zu realisierenden, vollständigen Nutzung der durch die Anlage bereitstellbaren Wärme aus, so erhält man den in **Tafel 3a** aufgeführten Kapitalwert.

Dieses Verfahren ist jedoch rechnerisch sehr aufwendig, so daß sich die Frage nach einer Vereinfachung stellt.

#### 3.3.2 Berechnung nach der vereinfachten Beziehung

Vergleicht man das Verhältnis der in **Tafel 3a** aufgeführten Beträge der jährlichen Einnahmen und Ausgaben der einzelnen Abschreibungsjahre miteinander, so zeigen sich innerhalb des betrachteten Zeitraumes keine wesentlichen Verschiebungen. Dies liegt daran, daß die den jeweiligen Beträgen zugrunde liegenden Steigerungsraten voneinander nicht stark abweichen. Der Gedanke liegt deshalb nahe, im Hinblick auf eine Reduzierung des Berechnungsaufwandes für alle Bereiche die gleiche Steigerungsrate von 8 % anzusetzen. Das Rechenergebnis zeigt **Tafel 3b**, Spalte 7. Als Kapitalwert erhält man nun 176620 DM anstatt 184931 DM nach **Tafel 3a**. Dieser Unterschied ist, betrachtet man die Wirtschaftlichkeitsaussage, unbedeutend. Deshalb darf aus Gründen der rechentechnischen Vereinfachung tatsächlich von einer identischen Steigerungsrate aller Indizes ausgegangen werden. Man kann den Kapitalwert also einfacher nach der folgenden Gleichung berechnen:

$$K_G = -K_{I,erf} + K_{EI,UM} + \dot{K}_{EI,E_{th}} + \dot{K}_{AU,BMK} + \dot{K}_{AU,L} + \dot{K}_{AU,REP} \frac{z(z^{t_L} - 1)}{z - 1} \quad (2b);$$

mit

$$z = \frac{1 + j_\phi}{1 + i}; \quad \frac{z(z^{t_L} - 1)}{z - 1} = z + z^2 + z^3 + \dots + z^{t_L}$$

und

$$j_\phi = j_{E_{th}} = j_{E_{el}} = j_{BMK} = j_L = j_{REP}$$

Steigen die Indizes, die zueinander in einer volkswirtschaftlichen Beziehung stehen, abweichend von der obigen Prognose stärker oder weniger stark als angenommen, dann kann die Anlagenwirtschaftlichkeit hierdurch gravierend beeinflußt werden. Als für den

Betrieb nachteilig ist dabei eine geringe Indexsteigerungsrate anzusehen. Zur Abschätzung dieses Betriebsrisikos lassen sich die Auswirkungen einer solchen Entwicklung unter Zugrundelegung eines anderen kalkulatorischen Zinsfußes ermitteln.

Wählt man den kalkulatorischen Zinsfuß gleich der Indexsteigerungsrate, so kommt man zwar durch diesen Schritt zu einem in bezug auf die Wirtschaftlichkeit der Investition weniger optimistischen, andererseits jedoch das Betriebsrisiko mindernden und rechnerisch noch einfacheren Ansatz, durch den sich die Wirtschaftlichkeit dieser Form der Gasverwertung ausreichend genau ermitteln läßt: Aufgrund gleicher Zinsfüße heben sich die Vorgänge des Auf- und Abzinsens der jährlich veränderlichen Einnahmen und Ausgaben gegeneinander auf, und der Ausdruck (2b) läßt sich schreiben als:

$$K_G = -K_{I,erf} + K_{EI,UM} + t_L (\dot{K}_{EI,E_{th}} + \dot{K}_{AU,BMK} + \dot{K}_{AU,L} + \dot{K}_{AU,REP}) \quad (2c),$$

mit

$$\lim_{z \rightarrow 1} \frac{z(z^{t_L} - 1)}{z - 1} = t_L;$$

1	2	4	
		Gasverwertung durch	
Kurzzeichen	Einheit	Biogasbrenner	Motor-Generator-Satz
$K_{I,erf} ANL$	DM	76000	125000
$\dot{E}_{BRUT}$	kWh/d	768	768
$\eta_{thBBR}$	—	0,80	—
$\eta_{thMOT}$	—	—	0,51
$\dot{E}_{PW}$	kWh/d	192	192
$\dot{E}_{Ü,SP}$	kWh/d	24	24
$\nu_{thBBR}$	—	0,65	—
$\nu_{thMOT}$	—	—	0,55
$\eta_{thUsub}$	—	0,80	0,80
$K_{E,thsub}^+$	DM/kWh	0,07	0,07
$\eta_{elMOT}$	—	—	0,21
$\nu_{elMOT}$	—	—	1,00
$K_{E,elsub}^+$	DM/kWh	—	0,13
$\dot{K}_{AU,L}$	DM/Jahr	600	600
$\dot{K}_{AU,BMK}$	DM/Jahr	260	400
$\dot{K}_{AU,REP}$	DM/Jahr	1520	2000
$\dot{K}_{AU,BK,MOT}$	DM/Jahr	—	2803
$t_{L,ANL}$	Jahr	20	20
$i$	%/Jahr	6	6
$K_{i,erf} MOT$	DM	—	15000
$m$	—	—	2
$t_{L,MOT}$	Jahr	—	7

Tafel 2. Rahmenbedingungen des betrachteten Beispiels.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
	jährl. Einn.	jährliche Ausgaben			Diskontierungs-fakt. für i = 6 %	jährl. abgez. Einn.Übersch. $\dot{K}_{\dot{U}}$	Diskontierungs-fakt. für i = 8 %	jährl. abgez. Einn.Übersch. $\dot{K}_{\dot{U}}$
		$\dot{K}_{EI,E_{th}}$ DM/Jahr	$\dot{K}_{AU,L}$ DM/Jahr	$\dot{K}_{AU,BMK}$ DM/Jahr				
Tafel 3a	1	13742	642	302	1611	0,943	10554	
	2	14847	687	327	1708	0,890	10786	
	.	.	.	.	.	.	.	
	20	59306	2322	1305	4875	0,312	15841	
	Summe d. abgezinsten Einnahmenüberschüsse $K_{I,tragb}$ ANL					DM	260931	
	abzüglich der Anschaffungsausgabe					$K_{I,erf}$ ANL	DM	- 76000
	Kapitalwert					$K_G$	DM	184931
Tafel 3b	1	13741	652	302	1642	0,943	11150	0,926
	2	14847	700	327	1774	0,890	12046	0,857
	.	.	.	.	.	.	.	.
	20	59306	2791	1305	7069	0,312	15020	0,215
	Summe d. abgezinsten Einnahmenüberschüsse $K_{I,tragb}$ ANL					DM	252620	
	abzüglich der Anschaffungsausgabe					$K_{I,erf}$ ANL	DM	- 76000
	Kapitalwert					$K_G$	DM	176620
Tafel 3c	1	7558	652	302	1642			0,926
	2	8162	700	327	1774			0,857
	.	.	.	.	.			.
	20	32617	2791	1305	7069			0,215
	Summe d. abgezinsten Einnahmenüberschüsse $K_{I,tragb}$ ANL					DM		
	abzüglich der Anschaffungsausgabe					$K_{I,erf}$ ANL	DM	
	Kapitalwert					$K_G$	DM	

Tafel 3. Ermittlung des Kapitalwertes für den Fall der reinen Wärmebereitstellung.

Berechnungsgrundlagen:

Tafel 3a: Jährliche Einnahmen und Ausgaben steigen gemäß den Prognosewerten in Tafel 1, Spalte 2; vollständige Nutzung der bereitstellbaren Wärme

Tafel 3b: Jährliche Einnahmen und Ausgaben steigen mit einem einheitlichen Wert von  $j = 8\%$ ; vollständige Nutzung der bereitstellbaren Wärme

Tafel 3c: Vereinfachtes Berechnungsverfahren n. Gl. (2c); Nutzungsgrad der bereitstellbaren Wärme 55 %.

wenn

$$i = j_{E_{th}} = j_{E_{el}} = j_{BMK} = j_L = j_{REP}$$

Durch diese Beziehung kann man die Wirtschaftlichkeit dieser Gasverwertungsmöglichkeit schnell abschätzen, und es ergibt sich für den vorliegenden Fall der in Tafel 3b, Spalte 9 ermittelte Kapitalwert in Höhe von 130488 DM.

Berücksichtigt man allerdings, daß der Nutzungsgrad der bereitstellbaren Wärme in dem Beispielbetrieb in Wirklichkeit nur 55 % betragen kann, so ergibt sich der in Tafel 3c, Spalte 9 dargestellte Kapitalwert.

#### 4. Ermittlung des Kapitalwertes im Falle der Elektrizitäts- und Wärmeerzeugung

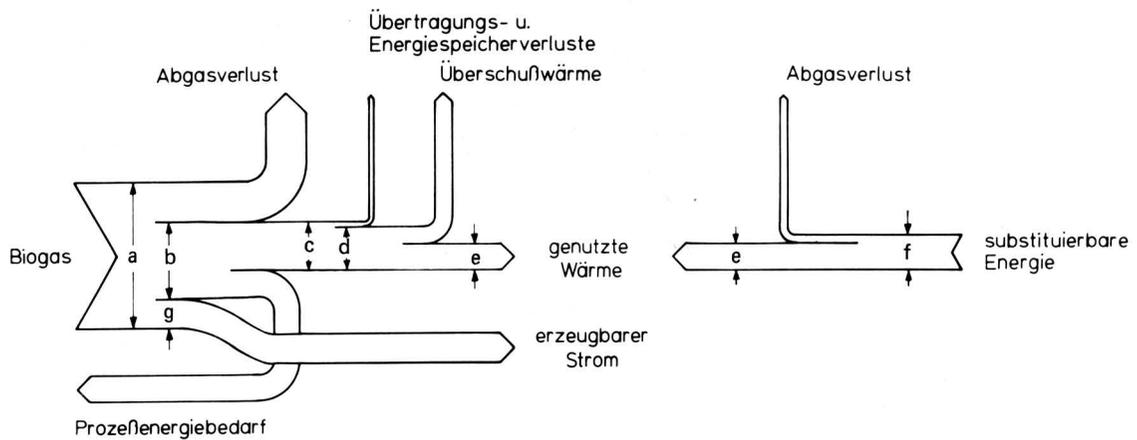
##### 4.1 Allgemeine Beziehung für die Berechnung

Die Vorgehensweise zur Berechnung des Kapitalwertes  $K_G$  dieser Gasverwertungsmöglichkeit deckt sich mit dem in Abschn. 3 geschilderten Fall der Wärmebereitstellung. Die wenigen bestehenden Unterschiede werden im folgenden erläutert. Die Herleitung der Beziehungen auf der Einnahmenseite  $\dot{K}_{EI}$  veranschaulicht Bild 2:

$$\begin{aligned} \dot{K}_{EI} &= \dot{K}_{EI,E_{th}MOT} + \dot{K}_{EI,E_{el}MOT} \\ &= (\dot{E}_{BRUT} \eta_{thMOT} - \dot{E}_{PW} - \dot{E}_{\dot{U},SP}) \nu_{thMOT} \cdot \\ &\quad \cdot K_{E,th,sub}^+ (1/\eta_{thUsub}) + \dot{E}_{BRUT} \nu_{elMOT} \eta_{elMOT} K_{E,el,sub}^+ \end{aligned} \quad (5)$$

Die jährlichen Ausgaben  $\dot{K}_{AU}$  sind prinzipiell wie bei der Wärmebereitstellung geartet. Hinzu kommen die Ausgaben  $\dot{K}_{AU,BK}$  für Wartung, Bedienung und Reparatur des Motors.

Damit ist zur Ermittlung des Kapitalwertes die für den Fall der Wärmeerzeugung hergeleitete allgemeine Berechnungsgleichung (2a) durch einen entsprechenden Term für die Summe der abgezinsten jährlichen Betriebskosten der kombinierten Elektrizitäts- und Wärmeerzeugung zu ergänzen und der Term für die jährlichen Einnahmen in Form von jährlichen Energiekosteneinsparungen der Wärmeerzeugung durch den Ausdruck Gl. (5) für die jährlichen Einnahmen zu ersetzen.



**Bild 2.** Aufteilung der Energieströme bei Verwertung des in einem landwirtschaftlichen Betrieb anfallenden Biogases über eine kombinierte Elektrizitäts- und Wärmeerzeugung unter Zugrundelegung realer Werte.

- a  $\dot{E}_{BRUT}$
- b  $\dot{E}_{BRUT} \eta_{thMOT}$
- c  $\dot{E}_{BRUT} \eta_{thMOT} - \dot{E}_{PW}$
- d  $\dot{E}_{BRUT} \eta_{thMOT} - \dot{E}_{PW} - \dot{E}_{\dot{U},SP}$
- e  $(\dot{E}_{BRUT} \eta_{thMOT} - \dot{E}_{PW} - \dot{E}_{\dot{U},SP}) \nu_{th}$
- f  $(\dot{E}_{BRUT} \eta_{thMOT} - \dot{E}_{PW} - \dot{E}_{\dot{U},SP}) \nu_{th} / \eta_{thBBR}$
- g  $\dot{E}_{BRUT} \eta_{elMOT}$

#### 4.2 Ermittlung der Bestimmungsgrößen

Die Bestimmungsgrößen der kombinierten Elektrizitäts- und Wärmeerzeugung lassen sich ebenso wie im Fall der ausschließlichen Wärmeerzeugung ermitteln.

Zu berücksichtigen sind jedoch einige weitere Größen wie die Motorwirkungsgrade  $\eta_{thMOT}$  und  $\eta_{elMOT}$ . Nach Wenzlaff [7] betragen sie für das derzeit kleinste in der Bundesrepublik im Einsatz befindliche Aggregat mit 65 kW Leistungsaufnahme:

$$\eta_{thMOT} = 0,51 \text{ und } \eta_{elMOT} = 0,21.$$

Die Betriebskosten  $\dot{K}_{AU,BK,MOT}$  (ohne Treibstoff) für diese Maschine betragen nach Herstellerangaben [19] 0,65 DM pro Betriebsstunde. Diese Kosten dürften sich nach den Erfahrungen der Baugeräteliste 1981 [15] zu 50 % aus Personal- und zu 50 % aus Sachmitteln zusammensetzen.

Über einen aus beiden Kostenarten gebildeten Mischindex läßt sich für die Betriebskosten des Motors eine jährliche Steigerungsrate  $j_{REP} = 8\%$  annehmen (vgl. Tafel 1).

Die Lebensdauer  $t_{L,MOT}$  des kompletten Aggregates beträgt nach Herstellerangabe 30000 Betriebsstunden. Hinweise bezüglich der Daten für andere Aggregate finden sich in [20] und [21].

#### 4.3 Berechnung des Kapitalwertes an einem ausgewählten Beispiel unter verschiedenen Randbedingungen

##### 4.3.1 Berechnung nach der allgemeinen Beziehung

Geht man für den Fall des Beispielbetriebes, wie in Abschn. 3.3.1 gezeigt wurde, so vor, daß man zunächst nach der in [1] vorgestellten Methode die günstigste Anlagenauslegung bestimmt, dann erhält man, wie an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt werden kann, die gleiche Lösung wie im Falle der Wärmebereitstellung.

Unterstellt man zunächst abweichend von Tafel 2 eine vollständige Nutzung der erzeugten Elektrizität und Wärme und setzt dies und die in dem vorstehenden Kapitel hergeleiteten Werte unter Berücksichtigung der in Tafel 2 aufgeführten betrieblichen Randbedingungen und der in Tafel 1 für die jeweiligen Ausgaben und Einnahmen angenommenen Indexsteigerungen in die durch Gl. (5) ergänzte allgemeine Berechnungsgleichung (2a) ein, dann ergibt sich ein Kapitalwert von 21958 DM, **Tafel 4a**, Spalte 9.

Bei der dieser Rechnung zugrunde liegenden Betriebskostenermittlung wurde berücksichtigt, daß das kleinste zur Verwertung von Biogas auf dem Markt befindliche und im Praxisbetrieb erprobte Aggregat 65 kW Leistung aufnimmt und damit zur Versorgung des Betriebes nicht im Dauereinsatz betrieben werden kann. Auch die nach Herstellerangaben nach 30000 Stunden Lebensdauer des Aggregats erforderlich werdenden Neubeschaffungskosten in Höhe von 15000 DM sind in der Rechnung enthalten.

Die gegenüber dem Fall der Wärmebereitstellung sich ergebenden höheren erforderlichen Investitionen werden verursacht durch zusätzliche Baumaßnahmen in Höhe von 30000 DM für einen auf die halbe Tagesgasproduktion ausgelegten Gasspeicher nebst Maschinenraum und durch Kosten in Höhe von 25000 DM für Maschinen und elektrotechnische Anlagen. 5000 DM für den Fortfall einer Gastherme inkl. Installationskosten wurden davon abgezogen.

Tafel 4b, Spalte 9 zeigt nun analog zu Tafel 3b den sich bei einer vollständigen Nutzung der bereitstellbaren Energieformen ergebenden Kapitalwert der kombinierten Elektrizitäts- und Wärmeerzeugung, wenn für die jährlichen Einnahmen und Ausgaben nicht mit jeweils unterschiedlichen Steigerungsraten, sondern mit einem einheitlichen Anstieg in Höhe von 8 % jährlich gerechnet wird.

Daß diese, wie im Falle der Wärmebereitstellung, rechentechnisch vorteilhafte Art der Wirtschaftlichkeitsabschätzung von der Aussage her ebenso eindeutige Ergebnisse erzielt wie eine Wirtschaftlichkeitsabschätzung unter Berücksichtigung unterschiedlicher gemäß der Prognosewerte in Tafel 1, Spalte 2 steigender Einnahmen und Ausgaben, zeigt ein Vergleich der Kapitalwerte beider Verfahren in Höhe von 20402 DM und 21958 DM (Tafel 4a). Es bietet sich deshalb zur schnelleren Wirtschaftlichkeitsabschätzung der zuletzt aufgeführte Ansatz an.

##### 4.3.2 Berechnung nach der vereinfachten Beziehung

Zur Abschätzung der Wirtschaftlichkeit der kombinierten Elektrizitäts- und Wärmeerzeugung kann man auch wie in Abschn. 3.3.2 noch einen Schritt weitergehen, indem man gleiche kalkulatorische Zinsfüße und Preissteigerungsraten zugrunde legt.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11										
											jährliche Einnahmen		jährliche Ausgaben				Diskontierungsfakt. für i = 6 %	jährl. abgez. Einn.Übersch. $\dot{K}_{\dot{U}}$	Diskontierungsfakt. für i = 8 %	jährl. abgez. Einn.Übersch. $\dot{K}_{\dot{U}}$
											$\dot{K}_{EI, E_{th}}$ DM/Jahr	$\dot{K}_{EI, E_{el}}$ DM/Jahr	$\dot{K}_{AU, L}$ DM/Jahr	$\dot{K}_{AU, BMK}$ DM/Jahr	$\dot{K}_{AU, REP}$ DM/Jahr	$\dot{K}_{AU, BK, MOT}$ DM/Jahr				
1	6059	8265	642	432	2120	3027	0,943	7641												
2	6543	8926	687	467	2247	3269	0,890	7831												
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.										
8	10384	14165	1031	740	3188	5188 27764	0,627	-8379												
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.										
15	17799	24277	1655	1269	4793	8892 47583	0,417	-9222												
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.										
19	24211	33028	2170	1726	6051	12097	0,330	11614												
20	26148	35670	2322	1864	6414	13065	0,312	11904												
Summe d. abgezinsten Einnahmenüberschüsse $K_{I, tragb} ANL$								DM	146958											
abzüglich der Anschaffungsausgabe $K_{I, erf} ANL$								DM	-125000											
Kapitalwert $K_G$								DM	21958											
1	6059	8265	648	432	2160	3027	0,943	7597	0,926	7460										
2	6543	8926	700	467	2333	3269	0,890	7747	0,857	7460										
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.										
8	10384	14165	1221	740	3702	5188 27764	0,627	-8755	0,540	-7540										
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.										
15	17799	24277	1903	1269	6344	8892 47583	0,417	-9981	0,315	-7540										
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.										
19	24211	33028	2589	1726	8631	12097	0,330	10611	0,232	7460										
20	26148	35670	2797	1864	9322	13065	0,312	10826	0,215	7460										
Summe d. abgezinsten Einnahmenüberschüsse $K_{I, tragb} ANL$								DM	145402	119200										
abzüglich der Anschaffungsausgabe $K_{I, erf} ANL$								DM	-125000	-125000										
Kapitalwert $K_G$								DM	20402	-5800										

Tafel 4. Ermittlung des Kapitalwertes für den Fall der kombinierten Elektrizitäts- und Wärmeerzeugung.

Berechnungsgrundlagen:

Tafel 4a: Jährliche Einnahmen und Ausgaben steigen gemäß den Prognosewerten in Tafel 1, Spalte 2; vollständige Nutzung der bereitstellbaren Energie

Tafel 4b: Jährliche Einnahmen und Ausgaben steigen mit einem einheitlichen Wert von  $j = 8\%$ ; vollständige Nutzung der bereitstellbaren Energie

Der Kapitalwert der kombinierten Elektrizitäts- und Wärmeerzeugung läßt sich damit durch die Beziehung ermitteln:

$$K_G = -K_{I, erf} + K_{EI, UM} + t_L [(\dot{E}_{BRUT} \eta_{thMOT} - \dot{E}_{PW} - \dot{E}_{U, SP}) \cdot \nu_{thMOT} (1/\eta_{thUsub}) K_{E, thsub}^+ + \dot{E}_{BRUT} \nu_{elMOT} \eta_{elMOT} \cdot K_{E, elsub}^+ - \dot{K}_{AU, L} - \dot{K}_{AU, BMK} - \dot{K}_{AU, REP} - \dot{K}_{AU, BK, MOT}] \quad (2d),$$

wenn

$$i = j_{E_{th}} = j_{E_{el}} = j_{BMK} = j_L = j_{REP}$$

Nach diesem Ansatz ergibt sich ein Kapitalwert von -5800 DM (Tafel 4b, Spalte 11).

In Wirklichkeit jedoch läßt sich die bereitstellbare Energie im betrachteten Bereich als Wärme nur zu 65% und als Strom zu 100% nutzen. Damit verringern sich die jährlichen Einnahmen erheblich

und diese Art der Gasverwertung wird, wie man aus der Betrachtung des Kapitalwertes in Tafel 5a, Spalte 9 ersehen kann, unwirtschaftlich.

Zu einem weitaus negativeren Ergebnis kommt man, wenn eine Einspeisung des erzeugten Stromes zu einem Preis von 0,06 DM/kWh in das öffentliche Netz erfolgt, weil die erzeugte Elektrizität nicht im Betrieb verwendet werden kann (Tafel 5b, Spalte 9).

Nachdem die Grundlagen zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit der beiden angesprochenen Gasnutzungsmöglichkeiten für verschiedene Bedingungen hergeleitet worden sind, ist es möglich, nach den in Abschn. 2. aufgeführten Kriterien die wirtschaftlichere Form der Gasnutzung zu bestimmen.

## 5. Wirtschaftlichkeitsvergleich der Gasnutzungsmöglichkeiten bei verschiedener Betriebsweise in unterschiedlichen Einsatzfällen

### 5.1 Untersuchung ausgewählter Fälle der Energiebedarfsdeckung

Zuerst soll der Sonderfall untersucht werden, daß die bereitstellbare Energie vollständig genutzt werden kann.

Ermittelt man den Kapitalwert beider Gasnutzungsmöglichkeiten nach dem vereinfachten Ansatz der Abschn. 3.3.2 bzw. 4.3.2 und vergleicht beide Alternativen unter den Kriterien von Abschn. 2. miteinander, dann erweist sich die reine Wärmebereitstellung der kombinierten Elektrizitäts- und Wärmeerzeugung überlegen (vergl. Tafel 3b, Spalte 9 mit Tafel 4b, Spalte 9).

1 Jahr	2	3	4	5	6	7	8	9	
	jährliche Einnahmen		jährliche Ausgaben				Diskontierungsfakt. für $i = 8\%$	jährl. abgez. Einn.Übersch. $\dot{K}_{\dot{U}}$	
	$\dot{K}_{EI,E_{th}}$ DM/Jahr	$\dot{K}_{EI,E_{el}}$ DM/Jahr	$\dot{K}_{AU,L}$ DM/Jahr	$\dot{K}_{AU,BMK}$ DM/Jahr	$\dot{K}_{AU,REP}$ DM/Jahr	$\dot{K}_{AU,BK,MOT}$ DM/Jahr			
Tafel 5a	1	3938	8265	648	432	2160	3027	0,926	5498
	2	4253	8926	750	467	2333	3269	0,857	5498
	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	20	16995	35670	2797	1864	9322	13065	0,215	5498
	Summe d. abgezinsten Einnahmenüberschüsse $K_{I,tragb}$ ANL						DM		79955
	abzüglich der Anschaffungsausgabe						$K_{I,erf}$ ANL	DM	- 125000
	Kapitalwert						$K_G$	DM	- 45045
Tafel 5b	1	3938	3815	648	432	2160	3027	0,926	1377
	2	4253	4120	750	467	2333	3269	0,857	1377
	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	20	16995	16463	2797	1864	9322	13065	0,215	1377
	Summe d. abgezinsten Einnahmenüberschüsse $K_{I,tragb}$ ANL						DM		- 2459
	abzüglich der Anschaffungsausgabe						$K_{I,erf}$ ANL	DM	- 125000
	Kapitalwert						$K_G$	DM	- 127459
Tafel 5c	1	3647	7653	600	400	2000	1400	—	6900
	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	10	3647	7653	600	400	2000	1400 15000	—	- 8100
	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	20	3647	7653	600	400	2000	1400	—	6900
	Summe d. abgezinsten Einnahmenüberschüsse $K_{I,tragb}$ ANL						DM		123000
	abzüglich der Anschaffungsausgabe						$K_{I,erf}$ ANL	DM	- 125000
	Kapitalwert						$K_G$	DM	- 2000

Tafel 5. Ermittlung des Kapitalwertes für den Fall der kombinierten Elektrizitäts- und Wärmeerzeugung.

Berechnungsgrundlagen:

- Tafel 5a: Vereinfachtes Berechnungsverfahren n. Gl. (2d); Nutzungsgrad der bereitstellbaren Wärme 65 %, der el. Energie 100 %
- Tafel 5b: Vereinfachtes Berechnungsverfahren n. Gl. (2d); Nutzungsgrad der bereitstellbaren Wärme betriebsintern 65 % und vollständige Einspeisung der el. Energie in das öffentliche Netz
- Tafel 5c: Vereinfachtes Berechnungsverfahren n. Gl. (2d); Nutzungsgrad der bereitstellbaren Wärme 65 %, der el. Energie 100 %; Motor techn.-wirtschaftlich verbessert; auf Auf- und Abzinsen der in der Tafel aufgeführten Werte wurde wegen des Kompensationseffektes verzichtet.

Dies liegt daran, daß der energetische Gesamtwirkungsgrad beider Systeme und der damit verknüpfte Nutzen in etwa gleich sind (vgl. Tafel 4b, Spalten 2 u. 3 und Tafel 3b, Spalte 2), wohingegen der Investitions- und Betriebskostenbedarf der reinen Wärmeerzeugung wesentlich geringer ist.

Die reine Wärmebereitstellung ist daher einer kombinierten Elektrizitäts- und Wärmeerzeugung stets vorzuziehen, wenn der Wärmebedarf eines landwirtschaftlichen Betriebes so geartet ist, daß ein hoher Gasnutzungsgrad bzw. ein hoher Nutzungsgrad der bereitstellbaren thermischen Energie erzielt werden kann.

Dies kann, wie das Beispiel zeigt, auch noch der Fall sein, wenn der Nutzungsgrad der bereitstellbaren Wärme lediglich 55 % beträgt (vgl. Tafel 3c, Spalte 9 mit Tafel 5a, Spalte 9).

Die kombinierte Elektrizitäts- und Wärmeerzeugung wird erst bei geringerem Nutzungsgrad der durch den Brenner erzeugten Wärme konkurrenzfähig.

Soll sie allerdings schon bei hohem Wärmenutzungsgrad interessant werden, dann muß insbesondere der oben kalkulierte Motor in

technisch-wirtschaftlicher Hinsicht verbessert werden. Gelingt es, seine Lebenserwartung ohne wesentliche Erhöhung des Investitionsbedarfes um 50 % zu steigern und die Betriebskosten um die Hälfte zu senken, dann tritt bei dem obigen Beispiel ähnlich strukturierten Betrieben die kombinierte Elektrizitäts- und Wärmeerzeugung in engere Konkurrenz zur Wärmebereitstellung (Tafel 5c).

Dies wird auch deutlich, wenn man die für dieses Beispiel in Abhängigkeit von dem Wärmenutzungsgrad in Bild 3 dargestellten bezogenen Kapitalwerte betrachtet. Darin werden die Funktionen  $K_{G1}^* = f_1(\nu_{th})$  für den Fall der reinen Wärmebereitstellung und  $K_{G2}^* = f_2(\nu_{th})$  für die Gasverwertung durch den Motor durch die folgenden Geradengleichungen beschrieben:

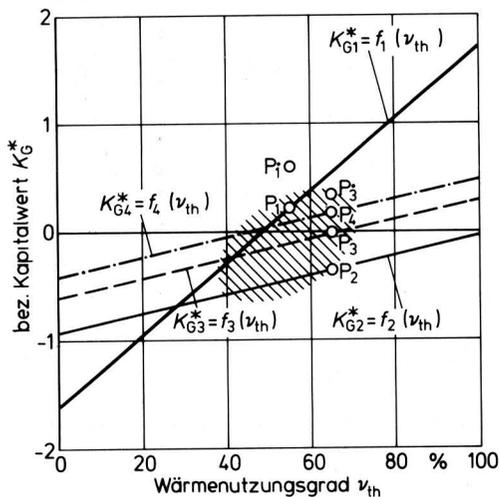
$$K_{G1}^* = [(12724 \nu_{thBRR} - 2400) \cdot 20 - 76000] / 76000 = 3,348 \nu_{thBRR} - 1,632 \quad (6)$$

und

$$K_{G2}^* = [(5610 \nu_{thMOT} + 7653 - 5803) \cdot 20 - 30000 - 125000] / 125000 = 0,898 \nu_{thMOT} - 0,944 \quad (7)$$

Man erhält sie, indem man wie in den vorstehenden Beispielen die entsprechenden Werte in die Gln. (2c) und (2d) einsetzt. Die Funktion

$$K_{G3}^* = [(5610 \nu_{thMOT} + 3253) \cdot 20 - 15000 - 125000] / 125000 = 0,898 \nu_{thMOT} - 0,600 \quad (8)$$



**Bild 3.** Bezogener Kapitalwert in Abhängigkeit vom Wärmenutzungsgrad bei verschiedenen unter ausgewählten Randbedingungen betrachteten Gasverwertungsmöglichkeiten; der durch optimale Anlagenauslegung gewöhnlich erreichbare Bereich ist schraffiert dargestellt.

stellt die Geradengleichung für den Fall des technisch-wirtschaftlich verbesserten Gasmotors dar.

Die in den Tafeln 3c, 5a und 5c ermittelten Werte sind auf den Geraden durch die Punkte  $P_1$ ,  $P_2$  und  $P_3$  abgebildet.

Anhand dieser Funktionen läßt sich über die bereits getroffenen Aussagen hinaus analysieren, wie sich eine Änderung der dort aufgeführten Einflußgrößen qualitativ und quantitativ auf die Wirtschaftlichkeit einer Gasverwertungsform auswirkt und wie sich dadurch die Wirtschaftlichkeitsgrenzen zwischen den hier angesprochenen alternativen Gasverwertungsmöglichkeiten verschieben können. Während die erste Frage im wesentlichen Gegenstand von am Beispiel der Wärmebereitstellung in [1] durchgeführten Betrachtungen war, soll nun an dieser Stelle auf den letztgenannten Punkt weiter eingegangen werden.

## 5.2 Veränderungsmöglichkeiten der Grenzen des wirtschaftlichen Einsatzes der zwei konkurrierenden Gasverwertungsmöglichkeiten

Verringern sich die erforderlichen Investitionen für die kombinierte Elektrizitäts- und Wärmeerzeugung gegenüber der reinen Wärmeerzeugung, so führt dies zu einer Verschiebung der Geraden  $K_{G2}^*$  in negativer Ordinateurichtung.

Im Gegensatz hierzu verschiebt sich die Gerade in positiver Ordinateurichtung, wenn die jährlichen Gesamtkosten aus Kapitaldienst und Betrieb der Anlage zur Elektrizitäts- und Wärmeerzeugung reduziert werden. Dadurch werden auch alle durch die Gerade beschriebenen bezogenen Kapitalwerte gleichmäßig erhöht. Zusätzlich verdreht sich die Funktion entgegen dem Uhrzeigersinn und die Gerade wird steiler. Im Bereich hoher Nutzungsgrade der thermischen Energie liegende positive bezogene Kapitalwerte erhöhen sich dadurch um größere Beträge als die im Bereich des Schnittpunktes der Funktion mit der Abszisse liegenden Werte.

Zur realistischen Abschätzung der quantitativen Einflußmöglichkeiten dieses Faktors soll nun untersucht werden, an welcher Stelle sich gegenüber der reinen Wärmeerzeugung Kosteneinsparungsmöglichkeiten eröffnen.

Der aussichtsreichste Ansatzpunkt zur Reduktion der Investitionen dürfte in einer besseren Energiespeicherung zu sehen sein, da die Energiespeicher häufig, wie auch hier, rein intuitiv bemessen werden. Wenzlaff [7] hingegen konnte im Praxisbetrieb nachwei-

sen, daß man auch mit sehr kleinen Speichervolumina auskommen kann. Man darf deshalb im vorliegenden Fall von einer möglichen Reduktion der Investitionen auf der Gasspeicherseite in Höhe von etwa 8000 DM ausgehen. Dadurch verbessert sich der bezogene Kapitalwert des unter den Bedingungen von Tafel 2 betrachteten Betriebes von  $-0,360$  auf  $-0,356$  (s. Tafel 5a und Gl. 2d).

Auf anderen Gebieten wie z.B. bei der Maschinenunterbringung wird kaum mit einer Kostenreduktion gerechnet werden können. Sehr schwer läßt sich abschätzen, ob bei den Blockheizkraftwerken eine Kostenreduktion erzielt werden kann. Vermutlich werden, da die Abschreibungskosten der Aggregate, verglichen mit ihren Betriebskosten, wesentlich kleiner ausfallen, die aus technisch-wirtschaftlicher Perspektive größten Chancen der Weiterentwicklung in einer Erhöhung der Anlagenstandzeit und einer Minimierung der Betriebskosten zu sehen sein.

Dies erscheint aussichtsreich, weil es sich bei den bislang verwendeten Aggregaten um nur geringfügig modifizierte aus dem Fahrzeugbau stammende Serienmotoren handelt. Sie lassen sich zwar aufgrund ihrer hohen Stückzahl recht preisgünstig herstellen, jedoch zielt die Konstruktion dieser Motoren nicht auf den hier gewünschten langen Dauereinsatz im stationären Betrieb, sondern auf ein geringes Leistungsgewicht ab. Aus dem Schiffsbau, aber auch aus dem Betrieb von Gasmotoren in der Klärtechnik ist hingegen bekannt, daß Motoren nach entsprechender konstruktiver Veränderung durchaus die im vorstehenden Abschn. angesetzten Werte für den in technisch-wirtschaftlicher Hinsicht verbesserten Motor erreichen können.

Damit dürfte sich zur Verstärkung der Konkurrenzfähigkeit der kombinierten Elektrizitäts- und Wärmeerzeugung gegenüber der reinen Wärmeerzeugung für den konstruktiven Ingenieur noch eine große Entwicklungsperspektive eröffnen.

Eine Verschiebung der anhand des Beispiels aufgezeigten Grenzen zwischen beiden Alternativen kann natürlich auch dann auftreten, wenn es sich um wesentlich größere und damit leistungsfähigere Biogasanlagen handelt. Bei solchen Anlagen nehmen die Investitionen im Verhältnis zu den anderen Beträgen stark ab, da – bezogen auf die durch die Anlage bereitstellbare Leistungseinheit – mit einem Rückgang der Investitionen zu rechnen ist [1, 21]. Dies wirkt sich natürlich für beide Gasverwertungsalternativen ähnlich günstig aus.

Zusätzlich ist jedoch zu berücksichtigen, daß bei einem Anstieg des Tierbestands im Bereich großer Viehbestände der Wärmebedarf in der Mehrzahl der Betriebe kaum noch zunimmt, da er häufig nur aus dem Wärmebedarf für Hausheizungszwecke besteht und damit von der Größe des Viehbestandes unabhängig ist. Hingegen korreliert der Stromverbrauch stark mit der Größe des Viehbestands [4, 22, 23, 24]. Dadurch kann es natürlich zu einer Verschiebung der Einsatzgrenzen zugunsten der kombinierten Elektrizitäts- und Wärmeerzeugung kommen, zumal auch für ausreichend leistungsfähige Anlagen bewährte Aggregate aus dem Bereich der Abwassertechnik zur Verfügung stehen. Aufgrund mangelnder Daten über Anlagen dieser Größenordnung lassen sich jedoch hierüber an dieser Stelle keine quantitativen Aussagen machen.

Abschließend soll neben diesen Betrachtungen zum Einfluß technischer, wirtschaftlicher und betrieblicher Einflußgrößen auf die wirtschaftlichen Einsatzgrenzen der konkurrierenden Gasverwertungsmöglichkeiten auch noch der Einfluß anderer im wesentlichen volkswirtschaftlicher Faktoren untersucht werden. So können die Energiepreise, wenn ihre Steigerungsraten stärker wachsen als die anderen in Tafel 1 angenommenen Werte, eine Verschiebung der wirtschaftlichen Einsatzgrenzen verursachen. Beispielsweise verschieben sich die auf den Geraden  $K_{G1}^*$  bis  $K_{G3}^*$  liegenden Punkte  $P_1$  und  $P_3$  (Bild 3 für die Beispiele in Abschn. 5.1) bei Annahme einer 10 %igen Steigerungsrate der Energiepreise – bei sonst gleichbleibenden Bedingungen – zu den Punkten  $P_1^*$  und  $P_3^*$  (Bild 3). Es ergeben sich bezogene Kapitalwerte von 0,616 bzw. 0,355, und es zeigt sich, daß die zwischen den Verwertungsmöglichkeiten bestehenden Einsatzgrenzen nur unwesentlich berührt werden.

Daneben kann sich eine Verschiebung der Grenzen zugunsten der Elektrizitätserzeugung dann ergeben, wenn die Elektrizitätspreise gegenüber den Ölpreisen stärker ansteigen. Dieser Fall ist durchaus möglich, da der relativ kurz zurückliegende Preisschub beim Öl aufgrund von Dämpfungseffekten der Marktmechanismen der Elektrizitätserzeugung erst verzögert weitergereicht werden wird. Aus der Entwicklung der Öl- und Elektrizitätspreise in der Vergangenheit ist zu schließen, daß zur Zeit die Elektroenergie gegenüber der Ölergie um 15 % unterbewertet wird [16]. Betrachtet man unter diesem Gesichtspunkt die Bestimmungsgleichungen  $K_{G1}^*$  und  $K_{G3}^*$  des Beispiels, so zeigt sich, daß hierdurch Verschiebungen des Einsatzbereichs zugunsten der kombinierten Elektrizitäts- und Wärmeerzeugung erfolgen können. Der bezogene Kapitalwert verbessert sich von -0,0163 auf 0,168 und kommt damit dem bezogenen Kapitalwert der Wärmebereitstellung sehr nahe (Bild 3, Punkte  $P_1$  und  $P_4$ ).

Wesentliche Einflüsse zur Verbesserung der Konkurrenzfähigkeit der kombinierten Elektrizitäts- und Wärmeerzeugung können somit, abgesehen von den meistens nicht weiter beeinflussbaren betrieblichen Rahmenbedingungen, nur durch eine gezielte technisch-wirtschaftliche Optimierung des Gasmotors, der Gasspeicherung als Energieanspassungssystem zwischen Gaserzeugung und -verbrauch und durch Veränderungen der Energiepreissituation zwischen Heizöl und Elektrizität bewirkt werden.

Nur bei gleichsinniger Entwicklung aller dieser Faktoren kann ein breites Einsatzfeld für die kombinierte Elektrizitäts- und Wärmeerzeugung in der Landwirtschaft erwartet werden.

### 5.3 Wirtschaftlichkeit der wechselweisen Wärme- bzw. Elektrizitäts- und Wärmeerzeugung

Der Wärme- und der Strombedarf landwirtschaftlicher Betriebe unterliegt jahreszeitlich bedingten Veränderungen. So ist in einem Schweinemastbetrieb der Bedarf an Elektroenergie zur Stalllüftung im Sommer wesentlich größer als im Winter. Beim Wärmebedarf ist es hingegen umgekehrt.

Damit verändern sich auch in Abhängigkeit von der Jahreszeit fortlaufend die Nutzungsgrade der verschiedenen bereitstellbaren Energieformen für die diskutierten Gasverwertungsmöglichkeiten. Während der Nutzungsgrad der erzeugten Wärme im Falle der ausschließlichen Wärmebereitstellung im Winter sehr hoch ist, ist er im Sommer vergleichsweise gering. In dieser Jahreszeit ist dagegen der Nutzungsgrad der durch die kombinierte Elektrizitäts- und Wärmeerzeugung bereitstellbaren Energie wesentlich größer.

Da die Wirtschaftlichkeit der Gasnutzung – wie zuvor gezeigt – im wesentlichen durch den Nutzungsgrad der bereitstellbaren Energie bestimmt wird, ist es durchaus denkbar, Brenner und Motor in Abhängigkeit vom Nutzungsgrad im Wechsel zu betreiben, zumal dann, wenn der Gesamtinvestitionsbedarf dieser Lösung nur um 5000 DM höher ist und somit geringfügig über der Investition bei der alleinigen Elektrizitäts- und Wärmeerzeugung liegt.

Dieser Fall ist deshalb für das Beispiel durchgerechnet worden, und Tafel 6 zeigt in Spalte 2 und 4 die Wärmenutzungsgrade der jeweiligen Gasverwertungsmöglichkeiten in Abhängigkeit von der Jahreszeit. Mit Hilfe dieser Werte und der aus den Tafeln 3c und 5c läßt sich über die Gleichungen (2c) und (2d) der Kapitalwert beider Alternativen berechnen und durch das Entscheidungskriterium Gl. (3) die Art der Gasverwertung während der jeweiligen Jahreszeit bestimmen.

Es ergeben sich die Beziehungen:

$$K_{GBRR} = (12724 \nu_{thBRR} - 2400) \cdot 20 - 130000 \quad (9)$$

$$K_{GMOT} = (5610 \nu_{thMOT} + 4400) \cdot 20 - 15000 - 130000 \quad (10),$$

die sich entsprechend Gl. (3) gegenüberstellen und weiter umformen lassen zu:

1	2	3	4	5
Monate	$\nu_{thBRR}$	$\dot{K}_{ÜBRR}$	$\nu_{thMOT}$	$\dot{K}_{ÜMOT}$
–	–	DM/Mon	–	DM/Mon
Jan., Dez.	1,00	860	1,00	772
Febr., Nov.	0,90	754	1,00	772
März, Okt.	0,65	489	0,70	631
Apr., Sept.	0,35	171	0,50	538
Mai, Aug.	0,25	65	0,40	491
Juni, Juli	0,20	12	0,35	468

Tafel 6. Wärmenutzungsgrade und monatl. Einnahmeüberschüsse alternativer Gasverwertungsmöglichkeiten des Beispielbetriebes in Abhängigkeit von der Jahreszeit.

$$\begin{aligned} & (12724 \nu_{thBRR} - 2400) \cdot 20 = \\ & = (5610 \nu_{thMOT} + 4400) \cdot 20 - 15000 \end{aligned} \quad (11).$$

Dividiert man diesen Ausdruck durch die Anzahl der Monate in dem Abschreibungszeitraum, dann erhält man die in Tafel 6, Spalte 3 und 5 dargestellten abgezinsten monatlichen Einnahmeüberschüsse. Die Zahlen weisen aus, daß nur während der Monate Januar und Dezember der Betrieb des Biogasbrenners in Frage kommt. Während der anderen Monate ist der Betrieb des Motors wirtschaftlicher.

Summiert man die sich aus solch einem Wechselbetrieb ergebenden Einnahmeüberschüsse auf und zieht hiervon die tragbaren Investitionen ab, so erhält man für diese Form der Gasverwertung einen Kapitalwert in Höhe von 20400 DM. Dieser Betrag liegt ebenso wie der bezogene Kapitalwert dieser Verwertungsalternative unter dem des Beispiels von Bild 3, Punkt  $P_4$ .

Daraus ergibt sich, daß im vorliegenden Fall die wechselweise Wärme bzw. Elektrizitäts- und Wärmeerzeugung die geringere relative Vorzüglichkeit aufweist. Sie kann die gegenüber der ausschließlichen kombinierten Elektrizitäts- und Wärmeerzeugung höheren Gesamtinvestitionen nicht durch die im Winter etwas größeren Einnahmeüberschüsse erwirtschaften. Unter anderen betrieblichen Randbedingungen mit längerem Gasbrennerbetrieb ist es denkbar, daß sich diese Situation umkehrt.

## 6. Zusammenfassung

Es werden Beziehungen angegeben, mit deren Hilfe der Anlagenplaner entscheiden kann, ob das in einer Biogasanlage gewonnene Gas unter den Randbedingungen eines beliebig strukturierten landwirtschaftlichen Betriebes besser zur Wärmeerzeugung und/oder zur kombinierten Elektrizitäts- und Wärmeerzeugung verwendet werden soll. Nach dieser Art der Entscheidungsvorbereitung kann der Betriebsleiter anhand nun vorliegender konkreter Zahlen endgültig entscheiden, ob er Investitionen zur Biogasnutzung vornehmen soll und welcher Art von Investitionen er im Rahmen anpassungstechnischer Erfordernisse in seinem Betrieb den Vorzug geben sollte. Dabei muß er auf jeden Fall die Verknüpfungen der Biogasanlage mit dem Gesamtsystem "Landwirtschaftlicher Betrieb" hinreichend berücksichtigen.

Anhand praxisnaher Beispiele wird die Anwendbarkeit dieses Verfahrens gezeigt. Aus den Ergebnissen lassen sich allgemeine Aussagen hinsichtlich der Rangfolge der Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen in Abhängigkeit von der Form der Gasverwertung ableiten.

So stellt im Bereich hoher Gasnutzungsgrade die Wärmebereitstellung aus Biogas die beste Form der Gasnutzung dar. Im Bereich von Tierbeständen mit 100 GV ist sie derzeit selbst bei Wärmeeinsatzgraden um 50 % der kombinierten Elektrizitäts- und Wärmezeugung weit überlegen. Der Einsatz einer kombinierten Elektrizitäts- und Wärmezeugung oder der wechselweisen Wärme- bzw. Elektrizitäts- und Wärmezeugung kann in diesem Fall nur dann konkurrenzfähig werden, wenn technische Verbesserungen eine erhebliche Verringerung des Reparaturaufwandes und eine Erhöhung der Lebensdauer bei unwesentlicher Steigerung des Investitionsbedarfs erwirken. Darüber hinaus muß die erzeugte elektrische Energie vollständig von dem Betrieb verwertet werden können. Die Einspeisung der elektrischen Energie in das öffentliche Netz ist eine wesentlich ungünstigere Variante.

Bezieht man in die vorstehenden Überlegungen die spezifischen Gegebenheiten landwirtschaftlicher Betriebe mit ein und betrachtet man gleichzeitig die derzeitige Marktsituation für Gasmotoren, so kann man sagen, daß eine Erzeugung elektrischer Energie im Vergleich zur reinen Wärmebereitstellung bei Betrieben, deren elektrischer Leistungsbedarf bei 7 kW liegt, nicht interessant ist. Um diese Leistung erzeugen zu können, muß der Betrieb zudem über einen Tierbestand von etwa 120 GV verfügen.

Diese Aussagen treffen nicht nur auf Schweinemastbetriebe zu, sondern gelten auch für Milchvieh, Bullen und Rinder haltende Betriebe, da sich die Leistung von mit den Exkrementen aus diesen Tierhaltungen beaufschlagten Reaktoren durchaus mit denen Schweineflüssigmist verarbeitender Anlagen messen kann [25 bis 30].

#### Verwendete Formelzeichen

$\dot{E}_{BRUT}$	kWh/d	tgl. Brutto-Energiemenge
$\dot{E}_{PW}$	kWh/d	tgl. Prozeßwärmebedarf
$\dot{E}_{U,SP}$	kWh/d; kW	tgl. Energieverluste durch Energieübertragung und -speicherung
$i$	%/Jahr	kalkulatorischer Zinsfuß
$j$	%/Jahr	Indexsteigerungsrate
$\dot{K}_{AU}$	DM/Jahr	jährl. Ausgaben
$\dot{K}_{AU,BK,MOT}$	DM/Jahr	jährl. Betriebskosten für die Kraft-Wärme-Kopplung
$\dot{K}_{AU,BMK}$	DM/Jahr	jährl. Betriebsmittelkosten
$\dot{K}_{AU,L}$	DM/Jahr	jährl. kalkulatorische Lohnkosten
$\dot{K}_{AU,REP}$	DM/Jahr	jährl. kalkulatorische Reparaturkosten
$K_{E,sub}^+$	DM/kWh	Preis einer substituierten Energieträgereinheit
$K_{E,el,sub}^+$	DM/kWh	Preis einer substituierten Elektroenergieeinheit
$K_{E,th,sub}^+$	DM/kWh	Preis einer substituierten Energieträgereinheit zur Wärmezeugung
$\dot{K}_{EI}$	DM/Jahr	jährl. Einnahmen
$\dot{K}_{EI,E_{th}}$	DM/Jahr	jährl. Einnahmen aus der Wärmezeugung
$\dot{K}_{EI,E_{th}MOT}$	DM/Jahr	jährl. Einnahmen infolge der Wärmebereitstellung durch einen Motor
$\dot{K}_{EI,E_{el}MOT}$	DM/Jahr	jährl. Einnahmen infolge der Elektrizitätsbereitstellung durch einen Motor
$\dot{K}_{EI,DÜ}$	DM/Jahr	jährl. Einnahmen durch Düngemittelsparungen
$\dot{K}_{EI,HY}$	DM/Jahr	jährl. Einnahmen durch Hygieneeffekte
$\dot{K}_{EI,UM}$	DM/Jahr	jährl. Einsparungen durch Fortfall von Umweltschutzmaßnahmen
$K_G$	DM	Kapitalwert

$K_G^*$	DM	bezogener Kapitalwert
$K_{I,erf}$	DM	erforderliche Investition
$K_{I,erfANL}$	DM	erforderliche Investition für eine Biogasanlage
$K_{I,erfMOT}$	DM	erforderliche Investition für einen Biogasmotor mit Generator und Wärmebereitstellung
$K_{I,tragbANL}$	DM	tragbare Investitionskosten der Biogasanlage
$K_{U,m}$	DM/Jahr	jährl. Überschüsse
$t_L$	Jahr	kalkulatorische Lebensdauer
$t_{L,ANL}$	Jahr	kalkulatorische Lebensdauer einer Biogasanlage
$t_{L,MOT}$	Jahr	kalkulatorische Lebensdauer eines Motors
$\eta_{elMOT}$		elektrischer Wirkungsgrad des Gasmotor-Generator-Satzes
$\eta_{thBBR}$		thermischer Wirkungsgrad des Biogabrenners
$\eta_{thMOT}$		thermischer Wirkungsgrad des Gasmotors
$\eta_{thUsub}$		thermischer Wirkungsgrad der Umwandlungseinrichtung des substituierten Energieträgers
$\nu_{el}$	d/Jahr; %	Nutzungsgrad der durch die Wärme-Kraftkopplung bereitgestellten Elektroenergie
$\nu_{th}$	d/Jahr; %	Wärmeeinsatzgrad
$\nu_{thBBR}$	d/Jahr; %	Nutzungsgrad der durch den Biogabrenner erzeugten Wärme
$\nu_{thMOT}$	d/Jahr; %	Nutzungsgrad der durch den Motor erzeugten Wärme

#### Schrifttum

Bücher sind durch • gekennzeichnet

- [ 1 ] *Kloss, R.:* Planung von Biogasanlagen zur Energiebereitstellung am Beispiel eines Schweinemastbetriebes. *Grundl. Landtechnik* Bd. 31 (1981) Nr. 2, S. 64/74.
- [ 2 ] • *Baader, W., E. Dohne u. M. Brenndörfer:* Biogas in Theorie und Praxis. *KTBL-Schrift* Nr. 229, Münster-Hiltrup: Landwirtschaftsverlag 1978.
- [ 3 ] *Göbel, W. u. R. Kaufmann:* Zur Planung von Biogasanlagen. *Landtechnik* Bd. 35 (1980) Nr. 8/9, S. 377/79.
- [ 4 ] • *Kaufmann, R.:* Biogas in der schweizerischen Landwirtschaft – Möglichkeiten und Grenzen. *Schriftenreihe der Eidg. Forschungsanstalt für Betriebswirtschaft und Landtechnik Tänikon*, Heft 11, 1980.
- [ 5 ] *Kleinhanß, W.:* Wirtschaftlichkeit der Biogaserzeugung aus tierischen Exkrementen. *Ber. über Landwirtschaft* Bd. 58 (1980) H. 4, S. 560/97.
- [ 6 ] *egger, K.:* Energiefluß von Biogasanlagen. *Inst. für Verfahrens- und Kältetechnik, ETH Zürich 1981:* Studienarbeit, unveröffentlicht.
- [ 7 ] • *Wenzlaff, R.:* Erfahrungen mit Biogas im praktischen Betrieb – Funktion und Effizienz einer Biogasanlage. *KTBL-Schrift* Nr. 266, Münster-Hiltrup: Landwirtschaftsverlag 1981.
- [ 8 ] • *Wöhe, G.:* Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre. 10. Auflage, München: Franz Vahlen 1970.

- [ 9 ] ● *Albach, H.*: Investition und Liquidität. Wiesbaden: Gabler 1962, S. 48/64.
- [ 10 ] *Jacob, H.*: Neuere Entwicklungen in der Investitionsrechnung. Z. f. Betriebswirtschaft Bd. 34 (1964) H. 8, S. 490/507.
- [ 11 ] ● *Schneider, E.*: Wirtschaftlichkeitsrechnung – Theorie der Investition. 7. Aufl., Zürich: Schulthess 1968.
- [ 12 ] ● *Reisch, E. u. J. Zeddies*: Einführung in die landwirtschaftliche Betriebswirtschaftslehre. Bd. 2, spezieller Teil, Stuttgart: Eugen Ulmer 1977.
- [ 13 ] *Papke, J. u. H. v. Blöh*: Strömungsuntersuchungen an einem horizontal durchströmten Biogasreaktor. Inst. f. Landmaschinen TU Braunschweig 1982: Studienarbeit, unveröffentlicht.
- [ 14 ] ● *Mönnich, K.H., G. Förch, K.A. Möhle u. C.F. Seyfried*: Untersuchungen über Investitionen und Betriebskosten von vollbiologischen kommunalen Kläranlagen und maschinellen Schlammwässerungsanlagen. Veröffentl. Inst. f. Siedlungswasserwirtschaft, TH Hannover Heft 43, 1976.
- [ 15 ] ● *Baugeräteliste 1981 (BGL)*: Technisch-wirtschaftliche Baumaschinendaten. Wiesbaden/Berlin: Bauverlag GmbH 1981.
- [ 16 ] Statistisches Bundesamt: Reihen 2, 4, 5 und 17. Stuttgart: Kohlhammer, 1981.
- [ 17 ] Esso: Welt Energie Ausblick. Hamburg: Presse und Informationsabt. der Esso AG 1980.
- [ 18 ] *Pearce, D.*: World energy demand and crude oil prices to the year 2000. Journ. agric. economics Bd. 32 (1981) Nr. 3, S. 341/54.
- [ 19 ] *Pes Pruneddu, F.*: Pers. Information Okt. 1981.
- [ 20 ] *Dohne, E.*: Stromerzeugung aus Biogas. Landtechnik Bd. 35 (1980) Nr. 8/9, S. 374/76.
- [ 21 ] ● *Abwassertechnische Vereinigung*: Gewinnung und Verwertung von Klärgas. Lehr- und Handbuch der Abwassertechnik, Bd. 3, S. 482/502, Berlin: W. Ernst u. Sohn 1978.
- [ 22 ] *Heyl, L. v.*: Analyse des elektrischen Leistungs- und Energiebedarfs wichtiger Bereiche der Rinder- und Schweinehaltung. AEL-Bericht 2, Essen 1975.
- [ 23 ] *Heyl, L. v., M. Ayik u. J. Boxberger*: Elektrischer Leistungsbedarf und Energieverbrauch verschiedener Arbeitsverfahren der landw. tierischen Produktion und energie-wirtschaftliche Folgerungen. VDEW-Bericht, Frankfurt 1975.
- [ 24 ] *Würrch, H.H.*: Zur betriebstechnischen Einordnung von Biogasanlagen. Grundl. Landtechnik Bd. 31 (1981) Nr. 2, S. 55/60.
- [ 25 ] *Maurer, K. u. G. Enssle*: Biogasanlage Erlenhof – Ergebnisse und Erfahrungen aus einjähriger Betriebszeit. Landtechnik Bd. 36 (1981) Nr. 7/8, S. 349/53.
- [ 26 ] *Gosch, A., Agostini, G. u. W. Weber*: Anaerobe Behandlung von Flüssigmist aus Massentierhaltung (Rindergülle). Firmenschrift der Agro-Fermenttechnik AG (AFAG), Ahlen, Westfalen, 1980.
- [ 27 ] *Baader, W.*: Erste Erfahrungen mit einem vollständig gefüllten vertikal durchströmten Biogasreaktor. Grundl. Landtechnik Bd. 31 (1981) Nr. 2, S. 50/55.
- [ 28 ] ● *Van Velsen, A.F.M.*: Anaerobic digestion of piggery waste. Neth. J. Agric. Sci. Bd. 25 (1977) S. 151/69.
- [ 29 ] *Summers, R. u. S. Bousfield*: A detailed study of piggery waste anaerobic digestion. Agricultural Waste (1980) Nr. 2, S. 61/78.
- [ 30 ] *Summers, R. u. S. Bousfield*: Anaerobic digestion of farmwastes – experimental experiences. Seminar on Anaerobic Digestion of Farm Wastes, 18./20. Oktober 1978, Cardington, U.K.

## Ein Beitrag zur Fahrmechanik des Ackerschleppers – Reifenschlupf, Schleppermasse und Flächenleistung

Von Heinz Dieter Kutzbach, Stuttgart-Hohenheim\*)

DK 631.372:631.51:65.015

Die Flächenleistung von Schlepper und Gerät läßt sich durch Arbeitsgeschwindigkeit und Arbeitsbreite beeinflussen. In der Bodenbearbeitung führen breite Geräte zu hohen Zugkräften und dementsprechend zu hohen Schlupfwerten zwischen Reifen und Boden. Da mit steigendem Schlupf der Laufwerkwirkungsgrad stark abnimmt, bei geringen Schlupfwerten jedoch nur eine geringe Zugkraft vom Schlepper auf das Gerät übertragen werden kann, hat der Schlupf erheblichen Einfluß auf die Flächenleistung. Dieser Einfluß wird rechnerisch untersucht und im folgenden für Pflug und Grubber in Abhängigkeit von weiteren Parametern dargestellt.

\*) Prof. Dr.-Ing. H.D. Kutzbach ist Inhaber des Lehrstuhls für Grundlagen der Landtechnik des Instituts für Agrartechnik der Universität Hohenheim.

### 1. Einleitung

Schlepper mit hoher Motorleistung werden besonders für die Bodenbearbeitung eingesetzt. Ziel ist das Erreichen hoher Flächenleistungen, um die Bodenbearbeitung in der zur Verfügung stehenden, kurzen Zeitspanne vor der Aussaat der Folgefrucht sicher abzuschließen. Neben einer hohen Motorleistung beeinflussen jedoch weitere Parameter die mögliche Flächenleistung von Schlepper und Gerät. Insbesondere sind dies der Zugkraftbedarf des Bodenbearbeitungsgerätes, Bodenart und Bodenzustand, Gesamtmasse von Schlepper und Gerät, Kraftschlußverhältnisse zwischen Reifen und Boden und schließlich Arbeitsbreite des Gerätes und Fahrgeschwindigkeit des Schleppers. Wegen dieser vielen Einflußfaktoren ist es für den Benutzer nicht einfach, die besten Kombinationen dieser Parameter auszuwählen. Manche Parameter wie beispielsweise die Bodenart lassen sich vom Benutzer nicht, andere wie Bodenzustand und Kraftschlußverhältnisse nur indirekt über die Wahl eines günstigen Zeitpunktes für die Bearbeitung beeinflussen.