



Leitlinie

zur effizienten und umweltverträglichen Erzeugung von

Biogas bei Einsatz von Ko-Substraten

Besuchen Sie uns auch im Internet:
www.tll.de/ainfo

Impressum

1. Auflage 2005

Herausgeber: Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft
Naumburger Str. 98, 07743 Jena
Tel.: (03641) 683-0, Fax: (03641) 683 390
e-Mail: pressestelle@jena.tll.de

Autor: Dr.-Ing. Gerd Reinhold

Juni 2005

- Nachdruck - auch auszugsweise - nur mit Quellenangabe gestattet. -

1 Marktchancen und Stand in Thüringen

Thüringen verfügt mit 45 produzierenden landwirtschaftlichen Biogasanlagen (Stand: 01.01.05) über eine Fermentationskapazität von 132 000 m³. Insgesamt sind mit diesen Biogasanlagen 13 195 kW elektrische Leistung in Blockheizkraftwerken (BHKW) installiert und an das Stromversorgungsnetz angeschlossen.

Grundlage für die Biogaserzeugung bildet bisher vorrangig der Wirtschaftsdünger Gülle. Daneben erfolgt in steigendem Maße der Einsatz von Stallmist, Geflügelkot und betrieblichen organischen Stoffen. In deutlich steigendem Umfang findet seit der Novellierung des EEG der Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen (Feldfrüchte) als Ko-Substrat statt.

Die in Thüringen durchgeführte Erhebung an landwirtschaftlichen Biogasanlagen zeigt, dass 2003 rund 48 % der Anlagen ausschließlich auf Basis von Wirtschaftsdüngern betrieben wurde. Hierbei handelt es sich meist um solche, die erst seit einem oder zwei Jahren in Betrieb sind. In 41 % der Anlagen wurden zusätzlich zum Wirtschaftsdünger betriebliche Reststoffe und nachwachsende Rohstoffe eingesetzt. 2003 stammten in Thüringen ca. 12,5 % der für die Biogaserzeugung eingesetzten organischen Trockensubstanz (oTS) aus dem Anbau von Feldfrüchten.

Die Verfahrenstechnik in den landwirtschaftlichen Biogasanlagen in Thüringen weist eine große Spannweite auf. Einheitliche verfahrenstechnische Parameter als Indikator für eine erfolgte Optimierung sind bisher nicht deutlich zu erkennen (Tab. 1).

Tabelle 1: Verfahrensparameter landwirtschaftlicher Biogasanlagen in Thüringen (Stand: 2003, n = 30)

Parameter	Einheit	Mittelwert	Spannweite
Faulraumgröße	m ³	2 273	400 - 8 000
- mit Nachgärraum	m ³	3 088	673 - 16 000
Installierte Blockheizkraftwerkleistung	kW	289	43 - 900
Hydraulische Verweilzeit	d	38,3	6,1 - 91,4
- mit Nachgärraum	d	51,1	21,5 - 135,8
Mittlere Gärraumtemperatur ¹⁾	°C	38	28 - 45
Trockenmassegehalt Zusp eisung	%	12,6	4,38 - 26,6
Reaktorbelastung	kg/m ³ d	2,73	0,668 - 5,49
- mit Nachgärraum	kg/m ³ d	2,48	0,700 - 5,66

¹⁾ ohne thermophile Anlagen

Die zur Anwendung kommenden Reaktorbelastungen (ausgedrückt als Kilogramm organische Trockensubstanz pro Kubikmeter Reaktorvolumen und Tag - kg/m³ d) zeigen eine Vergärung auf niedrigem bis mittlerem Belastungsniveau. Auch an den gewählten Verweilzeiten der Anlagen ist zu erkennen, dass großes Augenmerk auf die Ausnutzung des substratspezifischen Gasbildungspotenzials gelegt wird.

Aufgrund der geltenden Rahmenbedingungen und des noch längst nicht ausgeschöpften Potenzials ist abzusehen, dass im Freistaat zahlreiche neue Anlagen in der nächsten Zeit entstehen werden. Realistisch ist ein Potenzial von 100 bis 200 Biogasanlagen in Thüringen.

Der Einsatz von Feldfrüchten als Ko-Substrate in landwirtschaftlichen Biogasanlagen wird deutlich steigen und deren Monovergärung wird perspektivisch zum Einsatz kommen.

Ausgehend von dieser Ist-Standanalyse besteht das Ziel dieser Leitlinie darin, durch die Erarbeitung und Zusammenstellung von verfahrenstechnischen und betriebswirtschaftlichen Richtwerten Hilfen für die Planung und die Auslegung von Anlagen bereitzustellen und Kontrollparameter für vergleichende Wirtschaftlichkeitsrechnungen anzubieten. Die Richtwerte

sichern eine Beschreibung des Standes der Verfahrens- und Anlagentechnik als Ausgangspunkt für einen wirtschaftlich erfolgreichen Anlagenbetrieb.

Die verfahrenstechnischen und betriebswirtschaftlichen Richtwerte für die landwirtschaftliche Biogaserzeugung basieren auf

- der Erhebung des Standes landwirtschaftlicher Biogasanlagen in Thüringen im Jahre 2003 durch die TLL,
- der Auswertung der fachspezifischen Literatur,
- der Arbeit und der Ergebnisse der KTBL-Arbeitsgruppe „Gaserträge“,
- dem Positionspapier „Gasausbeute in landwirtschaftlichen Biogasanlagen“ (KTBL Darmstadt, 2006) sowie
- eigenen Kalkulationen.

2 Verfahrenstechnik der landwirtschaftlichen Biogaserzeugung

2.1 Substrate

Die landwirtschaftliche Biogaserzeugung wurde ausgehend von dem Einsatz flüssiger Wirtschaftsdünger entwickelt. Schwerpunktmäßig kamen bisher hier Rindergülle aufgrund der größeren Anfallsmenge, des höheren Trockensubstanzgehaltes (TS) und damit des höheren Gasbildungspotenzials zum Einsatz.

Die wesentlichen, für den Biogasbildungsprozess entscheidenden Substratparameter sind der Trockensubstanzgehalt, der organische Trockensubstanzgehalt (oTS), die Methanausbeute und die Methankonzentration (Tab. 2).

Tabelle 2: Biogasrelevante Parameter der Wirtschaftsdünger

Art	TS %	oTS % d. TS	Methanausbeute m ³ /kg oTS x d	Methangehalt ¹⁾ %
Rindergülle	6 - 12	80	200	55
Schweinegülle	2 - 8	80	240	60
Geflügeltrockenkot	45 - 65	75	325	65
Rindermist	20 - 30	80	250	55

¹⁾ ohne Luftzufuhr infolge der biologischen Entschwefelung

Mit der Novellierung des Erneuerbaren-Energien-Gesetzes 2004 wurden ökonomische Rahmenbedingungen geschaffen, die den Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen in landwirtschaftlichen Biogasanlagen ermöglichen.

Beim Einsatz von Ko-Substraten in landwirtschaftlichen Biogasanlagen sind folgende Voraussetzungen von Bedeutung:

- zeitliche und mengenmäßige **Verfügbarkeit** (die Einsatzzeit eines Produktes sollte nicht unter sechs Wochen liegen, um eine Adaption des Prozesses zu ermöglichen);
- Kenntnis der wesentlichen **Produkteigenschaften**, wie organischer Trockensubstanzgehalt, Inhaltsstoffgehalte (Rohfaser, Rohprotein, Rohfett, flüchtige Fettsäuren, ...), Schwermetallgehalte und prozesshemmende Inhaltsstoffe, um die potenziell mögliche Gasausbeute (gemessen in l/kg org. Trockensubstanz) abschätzen zu können;
- Aussagen zur notwendigen **Aufbereitung** der Produkte (z. B. Zerkleinerung von Grassilage, Quetschen von Getreide, Hygienisierungsnotwendigkeit, ...);
- **Kosten** der Ko-Substrate (Herstellungskosten einschließlich Gewinnanspruch und Flächenzahlungen, Entsorgungserlöse bzw. Preise);

- **Nährstoffgehalte** der Ko-Substrate sind düngeseitig und ökonomisch zu berücksichtigen. Überschlägig kann mit einer 50 %-igen ökonomischen Wirksamkeit des Bruttostickstoffgehaltes kalkuliert werden. Der Wert als Grunddünger (P, K, Mg) ist unter Berücksichtigung der Versorgungsstufen der zu düngenden Flächen zu bewerten. Die ökonomische Nährstoffwirkung ist gegen die Ausbringungskosten zu saldieren.

Prinzipiell eignen sich alle Feldfrüchte für die Biogaserzeugung. Hohe Rohfettgehalte führen zu hohen Gasausbeuten. Zucker wird schneller konvertiert. Ungünstig sind Fruchtarten mit hohem Ligninanteil (z. B. Stroh) und mit geringem Futterwert (z. B. Landschaftspflegematerial). Aufgrund des langsamen Abbaus bzw. der reduzierten Ausbeute an Methan sind diese Stoffe wenig geeignet.

Verfahrenstechnische Unterschiede der Feldfrüchte lassen sich gut zwischen den Substraten Silage und Getreide erkennen. Beim Einsatz von Silage wird je Tonne Silageeinsatz eine beträchtliche Menge an Wasser (600 bis 700 kg/t) dem Prozess zugeführt. Zusätzlich sind die Konservierungsverluste (Silierverluste) zu beachten. Gegebenenfalls erfolgt die Einbeziehung des anfallenden Silosickersaftes in den Prozess.

Der Einsatz von Getreide erfordert geringere Trockensubstanzgehalte des Grundsubstrates. Besonders bei hohen Einsatzmengen ist oft eine zusätzliche Flüssigkeitszufuhr erforderlich. Zum Teil wird dies durch Rezirkulation von Biogasgülle ausgeglichen. Charakteristisch für den Einsatz von Getreide ist weiterhin der geringere Prozesswärmebedarf, da je Einheit organischer Trockensubstanz weniger Wasser erwärmt werden muss. Der Einsatz von hohen Getreideanteilen ist somit besonders geeignet für Grundsubstrate mit geringem Trockensubstanzgehalt (z. B. Schweinegülle) und für Anlagen, die über einen hohen Wärmebedarfsträger (Schweinezuchtanlagen) verfügen. Bei der Beurteilung von Feldfrüchten für den Biogasprozess ist neben dem Trockensubstanzgehalt auch die fruchtartspezifische Methanbildung zu beachten (Tab. 3). Weiterführende Aussagen zu Richtwerten des substratspezifischen Methanertrages einzelner Pflanzenarten und von Substraten aus der Weiterverarbeitung sind in der 2005 erschienenen KTBL Broschüre „Gasausbeute in landwirtschaftlichen Biogasanlagen“ nachzulesen.

Tabelle 3: Biogasspezifische Kennwerte von nachwachsenden Rohstoffen

Art	TS %	oTS % d. TS	Methanertrag m ³ /kg oTS	Methangehalt ¹⁾ %
Maissilage	32 (28 bis 35)	95	} 300 - 400	52 - 54
GPS-Silage	40 (bis 56)	95		
Getreide	86	95		

¹⁾ ohne Luftzufuhr infolge der biologischen Entschwefelung

Bei der Auswahl der verfahrenstechnischen Parameter, wie Verweilzeit und Reaktorbelastung, ist die Umsetzbarkeit der Stoffe im methanogenen Prozess zu beachten. Rüben verfügen z. B. aufgrund des Zuckergehaltes über eine sehr schnelle Abbaufähigkeit und können bei hoher Reaktorbelastung und kurzen Verweilzeiten vergoren werden. Demgegenüber ist z. B. bei Maissilage aufgrund des Rohfaseranteils eine längere Verweilzeit bei etwas geringeren Reaktorbelastungen zu empfehlen.

Die Substrataufbereitung z. B. durch Schrotten von Getreide oder Zerkleinern von Silagen ist vorteilhaft hinsichtlich der Abbaugeschwindigkeit und ermöglicht es, mit kleineren Faulräumen bei höheren Belastungsstufen zu arbeiten.

Dies gewinnt an Relevanz in Anbetracht der Kosten für die Feldfrüchte im Vergleich zum kostenneutral zur Verfügung stehenden Grundsubstratwirtschaftsdünger.

2.2 Verfahrenstechnische Parameter

2.2.1 Biogaserzeugung

Der **Trockensubstanzgehalt** im Reaktor ist hinsichtlich einer gleichmäßigen Erwärmung mit geringen Temperaturunterschieden und im Hinblick des Gasaustausches von Relevanz. Er ergibt sich aus dem mittleren TS-Gehalt des zugeführten Substrats abzüglich der zu Biogas konvertierten organischen Masse. Beachtet man, dass 1 m³ Biogas bei üblichen Methangehalten von 50 bis 60 % ca. 1,2 kg wiegt, so lässt sich der TS-Gehalt im Reaktor leicht ermitteln. Er sollte einen Wert von 8 bis 10 % nicht überschreiten, um noch eine ausreichende Homogenisierung als Voraussetzung für den Gasaustrag zu ermöglichen.

Der Einfluss von **hydraulischer Verweilzeit** und **Reaktorbelastung** auf die Methanbildung dagegen ist wesentlich. Verweilzeit und Reaktorbelastungen bedingen sich gegenseitig und werden über den Gehalt an organischer Trockensubstanz des zugeführten Substrates und der Substratmenge realisiert. Prinzipiell ist festzustellen, dass mit steigender Verweilzeit bis zu einer maximalen Gasausbeute der Gasertrag steigt. Mit zunehmender Belastung, ausgedrückt in kg oTS/m³_{Reaktorvolumen} d, ist ein Sinken der Gasausbeute festzustellen (Tab. 4).

Die mögliche **Einsatzmenge an Ko-Substrat** ist abhängig von vielfältigen Faktoren. Neben dem Trockensubstanzgehalt im Reaktor muss besonders auf die Reaktorbelastung geachtet werden. Da prinzipiell auch die Monovergärung von Silage bzw. Getreide möglich ist, sind in der Planungsphase einer Biogasanlage alle Mischungsverhältnisse realisierbar. Bei TS-reichen Substraten ist besonderes Augenmerk auf den Flüssigkeitshaushalt zu legen. Eine Rezirkulation von Biogassgulle reicht dann oft nicht aus um den Prozess aufrecht zu halten (Abb. 1).

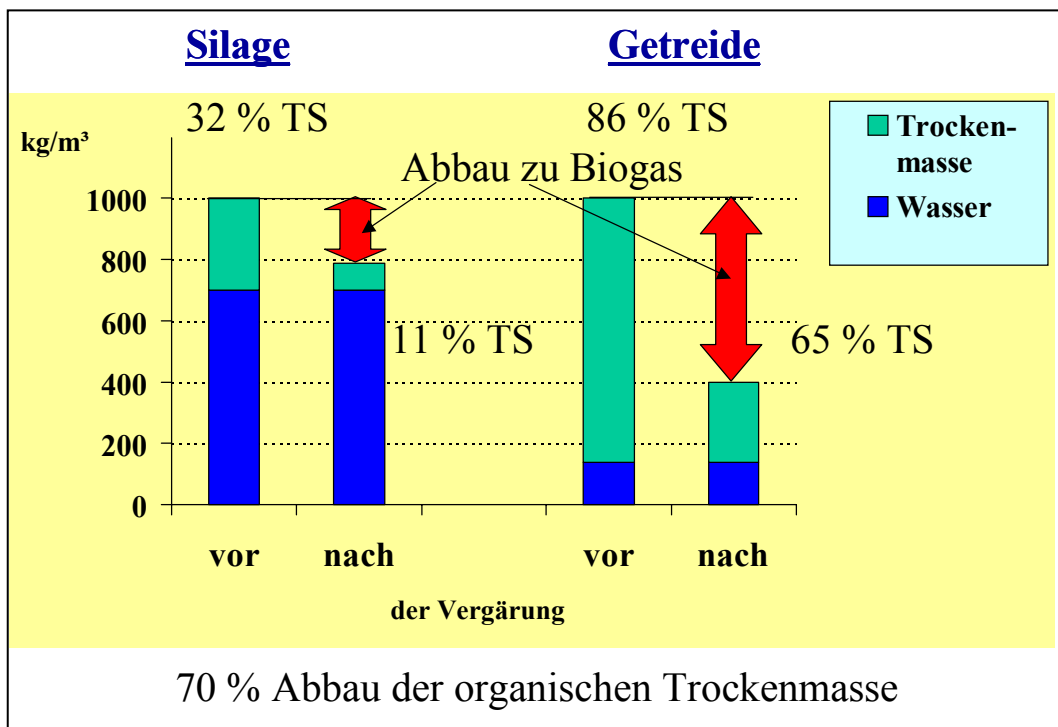


Abbildung 1: Vergleich der Monovergärung von Silage und Getreide

Bei der Monovergärung von Getreide ergibt sich bei 70 % Abbau ein TS-Gehalt von 65 %. Die Vergärung von Maissilage führt zu Biogasgülle mit ca. 11 % TS.

Für bestehende Anlagen ist eine Veränderung des Anteils an Ko-Substrat ökonomisch zu bewerten. Da mit zunehmender Reaktorbelastung die Gasausbeute fällt, führt eine Belastungssteigerung zur Verringerung der spezifischen Gasausbeute. Da hierdurch meist die Biogasmenge absolut noch steigt, ergibt sich eine besseren Ausnutzung der Investition. Dieser Weg ist prinzipiell zu empfehlen, wenn Ko-Substrate zu geringen Kosten verfügbar sind (Abb. 2). Für teure Ko-Substrate sollte besonders, wenn diese noch langsam umsetzbar sind, auf lange Verweilzeiten und somit auf eine geringe Belastung orientiert werden.

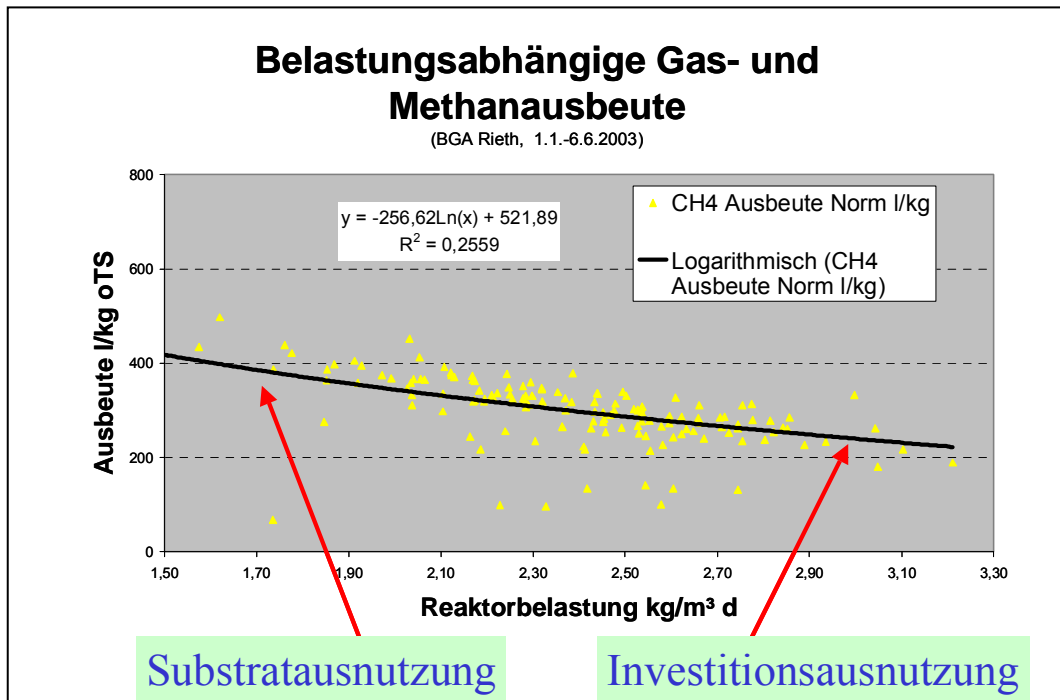


Abbildung 2: Auslegung von Biogasanlagen hinsichtlich Substrat- und Investitionsausnutzung am Beispiel von Prozessdaten der Biogasanlage in Rieth

Tabelle 4: Verfahrenstechnische Einflussfaktoren auf die Gasausbeute und Stabilität des Prozesses (Quelle: Nach KTBL AG „Gaserträge“ 2005)

Parameter	Einheit	verfahrenstechnisch möglich	Gasausbeute m ³ /kg oTS	Prozessstabilität	Einsatzbereich der Praxis	Bemerkungen
Reaktortemperatur	°C	bis 20	mit steigender Temperatur erhöht sich die Umsetzungsgeschwindigkeit	mit steigender Temperatur sinkt die Prozessstabilität	sehr selten	psychrophile Bakterien
	°C	30 bis 45			üblich	mesophile Bakterien
	°C	45 bis 55			vereinzelt	thermophile Bakterien
Innerhalb der Temperaturbereiche ist eine Wirkung auf Gasausbeute und Stabilität unter praktischen Bedingungen kaum nachweisbar. Temperaturschwankungen sind zu vermeiden, da sonst Gasausbeute und Prozessstabilität negativ beeinflusst werden.						
Verweilzeit	Tage	10 bis über 100	steigt mit längerer Verweilzeit bis zur maximalen Gasausbeute	steigt mit längerer Verweilzeit	25 bis 100	Mit steigender Temperatur sind kürzere Verweilzeiten anwendbar. Kurze Verweilzeiten (< 20 d) führen zu einer reduzierten Substratausnutzung sowie Geruchsproblemen. Auch durch Rücklaufvolumenstrom in den Fermenter sollte die kritische Verweilzeit (20 d) nicht unterschritten werden.
Reaktorbelastung	kg oTS/m ³ *d	0,5 bis 10	sinkt mit Steigerung der Belastung (Bereich 1 bis 3 kg oTS/m ³ d kann näherungsweise ein linearer Abfall um bis zu 10 % unterstellt werden, wenn Belastung um 1 kg/m ³ steigt)	sinkt ab 3 kg oTS/m ³ d mit Steigerung der Belastung	0,5 bis 5	Verweilzeit und Reaktorbelastung sind gemeinsam zu betrachten und bei der Planung zu berücksichtigen. In Abhängigkeit von Substrat und Abbaufähigkeit sind differenzierte Richtwerte anzuwenden. Bei Reihenschaltung von Reaktoren ist zusätzlich die Belastung des Einzelreaktors zu beachten.
Verweilzeit und Reaktorbelastung	Durch den Trockensubstanzgehalt werden Verweilzeit und Reaktorbelastung wechselseitig beeinflusst. Deshalb sind diese Parameter substratkonkret zusammen zu bewerten. Substratparameter wie Art, Wert, Menge, Konzentration und Abbaugeschwindigkeit sind bei der Festlegung der Verweilzeit und der Reaktorbelastung zu beachten. Bei Reihenschaltung ist eine gesonderte Berechnung der Faulraumbelastung notwendig. Substrat: Rindergülle + NAWARO Verweilzeit: ≥ 50 Tage max. Reaktorbelastung 3 bis 4 kg/m ³ d Schweinegülle + NAWARO ≥ 80 Tage 3 bis 4 kg/m ³ d NAWARO Monovergärung ≥ 80 Tage bis 3 kg/m ³ d					
Zuspeisefrequenz	d ⁻¹	1 bis 12	sinkt bei nicht substratangepasster Zuspeisefrequenz	schwer abbaubare Substrate	3 bis 12	Bei hoher Reaktorbelastung und kurzer Verweilzeit ist die Zuspeisefrequenz zu erhöhen. Bei Erhöhung der Zuspeisefrequenz muss die Tagesration gleich bleiben bzw. sinken. Kürzere Fütterungsintervalle können die H ₂ S-Belastung im Gas reduzieren
		bis zu 24			leicht abbaubare Substrate	
Schwimmschicht	Führt zur Behinderung des Gasaustausches und kann ab einer bestimmten Stärke mit den vorhandenen Rührwerken kaum zerstört werden. In Nachgärbehältern ist sie z. T. vorteilhaft als Träger der Bakterien für die biologische Entschwefelung.					

Aus dem Einsatz von Ko-Substraten folgt meist eine Steigerung des Trockensubstanzgehaltes im Reaktor. Bedingt durch die Gefahr der Bildung von Schwimm- und Sinkschichten ist die Intensität der **Durchmischung** des Reaktorraumes bei Ko-Substrateinsatz zu erhöhen. Bei der Vergärung von Wirtschaftsdüngern wurden vorrangig Tauchmotorrührwerke eingesetzt. Diese Rührwerke erfüllen die Forderungen an sichere Schwimmschichtverhinderung bei hohen Ko-Substratmengen (z. B. Maissilage) meist nicht ausreichend, so dass in der letzten Zeit verstärkt langsam laufende Großflügelrührwerke zum Einsatz kamen.

Unter praktischen Verhältnissen hat die **Reaktionstemperatur** einen kaum bestimmbaren Einfluss auf die Umsetzungsgeschwindigkeit. Somit ist der verfahrenstechnische Einfluss der gewählten Reaktortemperatur innerhalb eines Temperaturbereiches als gering einzuschätzen.

Die **Einbringung der Ko-Substrate** muss an die betrieblichen Bedingungen angepasst werden. Die täglich einzusetzende Menge bestimmt ebenfalls maßgeblich die notwendige Technik und den Automatisierungsgrad. Folgende Techniken stehen zur Verfügung:

- Einmischung in einer Vorgrube und Einbringung mit dem Grundsubstrat Gülle.
- Nutzung von Einspülschächten, die sowohl direkt über Trichter und Radlader (bei in der Erde versenkten Reaktoren) als auch über Futterverteilwagen bzw. Annahmedosierer und Steigschnecken (bei stehenden Reaktoren) beschickt werden. Die Öffnungen zum Feststoffeintrag sind seitlich an den Reaktoren bzw. oben (bei festen Reaktordecken) angebracht. In letzter Zeit finden oft Schnecken in den Schächten Verwendung, um die sichere Einbringung unter die Flüssigkeitsoberfläche zu erreichen.
- Einsatz von horizontal arbeitenden Presskolben, welche die Ko-Substrate in der Nähe des Reaktorbodens einbringen. Bei stehenden Reaktoren ist es somit erforderlich, eine Öffnung im unteren Bereich der Reaktorwand anzubringen.

Der Substratanfall bzw. die angestrebte Größe der Biogasanlage bestimmt das notwendige **Reaktorvolumen**. Bei der Größe der Einzelreaktoren ist festzustellen, dass bis ca. 1 000 m³ Faulraum meist nur ein Reaktor errichtet wird. Bis 2 500 m³ Faulraum sind es ein bis zwei Reaktoren und größer 2 500 m³ notwendiges Reaktorvolumen wird der Faulraum meistens auf mehrere Reaktoren aufgeteilt.

Während bei Reihenschaltung der Reaktoren den Vorteil einer besseren Substratausnutzung allerdings mit hoher Belastung des ersten Reaktors bringt, ermöglicht die Parallelschaltung besonders bei Störungen (z. B. Übersäuerungen) ohne wesentliche Einbußen eine schnelle Wiederinbetriebnahme der gestörten Reaktorreihe.

Nachgärbehälter werden eingesetzt, um die Restausgasung zu nutzen. Diese Nachgärbehälter haben meist auch die Funktion eines Lagerbehälters. Sie sollten besonders bei hohen Reaktorbelastungen und kurzen Verweilzeiten zum Einsatz kommen. Werden die Nachgärbehälter beheizt, so sind sie eindeutig als Reaktorraum zu bezeichnen.

2.2.2 Biogasverwertung

Bei der Auslegung und Planung landwirtschaftlicher Biogasanlagen ist ausgehend von der zu erwartenden Gaserzeugung bei Unterstellung des zu erwartenden Methangehaltes zum Teil eine **Gasaufbereitung** erforderlich.

Die notwendige **Entfeuchtung** des Biogases wird oft durch lange im Erdreich verlegte Gasleitungen erreicht. Das wasserdampfgesättigte Biogas kühlt sich dadurch ab und es kondensiert Wasser. Bei der anschließenden Gasverwertung steigt die Gastemperatur an, wodurch die relative Feuchte sinkt.

Biogas ist durch sehr unterschiedliche Gehalte an **Schwefelwasserstoff** (H_2S) gekennzeichnet. Da Schwefelwasserstoff zu schwefeliger- bzw. zu Schwefelsäure gewandelt wird sind Konzentrationen größer 500 ppm bei der Gasverwertung zu vermeiden. Ursachen für hohe Schwefelwasserstoffgehalte im Biogas können einerseits Standortfaktoren (hohe Schwefelgehalte im Boden bzw. im Grundwasser, die über den eigenen Brunnen und das Tränkwasser der Tiere zur Biogasanlage gelangen) sein und andererseits kann auch über den Einsatz von schwefelreichen Futtermitteln (Rapspresskuchen) eine Grundlage für hohe Schwefelgehalte gelegt werden.

Für die **Entschwefelung** des Biogases kommen folgende Verfahren zum Einsatz:

a) biologische Entschwefelung (intern)

Durch die Zuführung von Luft und der Verfügbarkeit ausreichender Besiedlungsfläche und Aufenthaltszeit des Gases im Gasraum entwickeln sich spezielle Bakterienkulturen, die eine Entschwefelung des Biogases realisieren. Kurze Gasverweilzeiten im Gasraum bzw. ungenügende Besiedlungsflächen führen zu einem sehr schlechten Wirkungsgrad der biologischen Entschwefelung.

b) biologische Entschwefelung (extern)

Hierfür wird in einem speziellen Reaktor durch Luftzufuhr und Nährmedium eine kontrollierte biologische Entschwefelung durchgeführt.

c) Einsatz von Eisenionen

Durch den Einsatz von Eisenionen in der Flüssigphase erfolgt eine chemische Bindung des Schwefels an das Eisen. Dadurch, dass nur ca. ein Drittel des Schwefels in die Gasphase übergeht, sind die Aufwendungen entsprechend höher.

d) Einsatz von Aktivkohlefiltern

Aktivkohlefilter wurden bisher nur als letzte Filterstufe bei sehr hohen Anforderungen an die Eliminierung des H_2S eingesetzt. Zurzeit befinden sich erste Lösungen als alleinige Filter in Erprobung. Die Entsorgung der beladenen Aktivkohle soll zusammen mit dem Wirtschaftsdünger erfolgen.

Das notwendige **Gasspeichervolumen** in einer landwirtschaftlichen Biogasanlage wird durch die Gasverwertungseinrichtung bestimmt. Üblich sind Speicherkapazitäten von zwei bis sechs Stunden.

Die Gasverwertungskapazität ist entsprechend des geplanten Gasanfalls auszulegen. Hierbei empfiehlt sich die Umrechnung auf **Normbedingungen**, um überzogene Erwartungen bei der Beurteilung der Gaserträge zu vermeiden (Tab. 5).

Hinsichtlich der **Verfügbarkeit der BHKW-Anlagen** ist auf 6 000 bis 8 000 Stunden/Jahr zu orientieren. Selbst bei Vollastlaufzeiten von über 7 000 Stunden können prozessbedingte Schwankungen in der Gaserzeugung zu Gasverlusten führen. In diesem Fall sind größere Gasspeicher erforderlich, die zu hohen ökonomischen Aufwendungen führen.

Bei der Gasverwertung über Blockheizkraftwerke ist zwischen dem Einsatz von Zündstrahl und Gasotomotoren zu entscheiden.

Zündstrahlmotoren (ZüStrM) werden meist im Leistungsbereich < 150 kW eingesetzt und sind durch eine kürzere normative Nutzungsdauer (Lebenslaufleistungen) und eine höhere Emissionslast charakterisiert. Der Einsatz von Heizöl als Zündöl erfolgt in einer Größenordnung von ca. 10 %. Für ab 01.01.2007 in Betrieb zu nehmende Anlagen ist nur noch der Einsatz von Pflanzenöl bzw. von Biodiesel als Zündöl gestattet. Im hohen Leistungsbereich werden oft **Gasotomotoren** (GOM) eingesetzt, die dann ähnliche Wirkungsgrade wie Zündstrahlmotoren erreichen. Die in Tabelle 5 angegebenen Wirkungsgrade stellen das Niveau der Prüfstandsergebnisse mit Erdgas dar. Für ökonomische Aussagen ist die Einfügung eines Korrekturfaktors

dringend angeraten, da ein bereits um 3,3 % zu hoch unterstellter Wirkungsgrad zu Erlösverlusten von ca. 10 % führt.

Tabelle 5: Verfahrenstechnische Kennwerte der Biogasverwertung in BHKW-Anlagen

Parameter	Wert	Bemerkungen
Normgasmenge (Koeffizient zur Umrechnung von m ³ _{gemessen} in m ³ _{Normzustand})	0,88 / 0,86 0,91 / 0,89 0,94 / 0,92	Gastemperatur 35 °C, Druck 10 / 30 mm Wassersäule Gastemperatur 25 °C, Druck 10 / 30 mm Wassersäule Gastemperatur 15 °C, Druck 10 / 30 mm Wassersäule
BHKW Laufzeit	6000 bis 8000 VLh	
BHKW-Wirkungsgrade bei Voll- lastbetrieb	max. 34 % / 36 % max. 36 % / 38 % max. 39	50 bis 150 kW GOM/ZüStrM 150 bis 500 kW GOM/ZüStrM > 300 kW GOM (Quelle: Adolph DKB 2005)
Wirkungsgradreduzierung im Jahresdurchschnitt	80 bis 90 %	Anteil am Volllastwirkungsgrad (aufgrund Teillastbetrieb, Gasqualitätsschwankung, ...)

Die Auslegung der **BHKW-Anlage** als Ein- oder Mehrmotoranlage ist den betrieblichen Bedingungen anzupassen (Tab. 6).

Tabelle 6: Vor- und Nachteile unterschiedlicher Auslegungsvarianten der BHKW-Anlage

Anlagenauslegung	Vor- und Nachteile
Einmotoranlage	hoher Wirkungsgrad, Betrieb im Nennlastbereich nur durch Ein- und Ausschalten möglich, da mindestens 20 % Leistungsreserven erforderlich sind; große Gasspeicher für Wartungsmaßnahmen und Gasfackeln erforderlich.
Zweimotorenanlage - symmetrisch geteilt - asymmetrisch geteilt	Störreserve vorhanden, schlechterer Wirkungsgrad als Einmotoranlage, da kleinere Motoren reduzierter Aufwand für Wartungsmittel und Ersatzteile größerer Motor verströmt die Hauptbiogasmenge mit höherem Wirkungsgrad
Mehrmotorenanlagen	schlechterer Wirkungsgrad, da kleine Motoren, gesteigerter Wartungsaufwand, kaum Totalausfall möglich, reduzierter Aufwand für Gasspeicher und Gasfackel

Entsprechend des gewählten Temperaturbereichs für die Methanherzeugung und der Substrattemperatur ergibt sich der notwendige **Prozessenergiebedarf**. Bereitstellung dieser Wärme erfolgt üblicherweise aus der Abwärme der BHKW-Anlagen. Zur Vereinfachung wird bei den verfahrenstechnischen Kennwerten zur Berechnung des Prozesswärmebedarfs das Substrat wie Wasser behandelt. Die Unterstellung, dass eine Tonne einem m³ entspricht gilt auch für Substrate wie Silage und Getreide, da bei der Nassvergärung die Hohlräume mit Wasser aufgefüllt werden (Tab. 7).

Tabelle 7: Verfahrenstechnische Richtwerte zur Berechnung des Prozesswärmebedarfs

Parameter	Wert	Bemerkungen
Substratdichte	1 t/m ³	zur Vereinfachung
Wärmeleistungsbedarf Sub- strataufheizung (kW)	= Güllemenge (m ³ /h) x 1,163 x (Reaktortemperatur-Gülletemperatur) (zur Vereinfachung wird die spez. Wärme von Wasser unterstellt)	
Wärmeübertragungswir- kungsgrad	80 - 95 %	entsprechend der betrieblichen Bedingungen
K-Wert	< 0,4 W/m ² K	Mindestisoliationsqualität des Reaktors
Gülletemperatur	= Erdtemperatur	z. T. höhere Temperaturen möglich bei direk- ter Zuführung aus dem Stall

Bei Anlagen mit hohen Wärmenutzungsanteilen ist in der Planungsphase mindestens eine monatliche Wärmebilanz zu erstellen. Weiterhin sind täglich temperaturbedingte Leistungsspitzen zu beachten und der Gleichzeitigkeitsfaktor der Wärmebedarfsträger zu berücksichtigen. Da die meisten landwirtschaftlichen Biogasanlagen mit Wärmeüberschuss betrieben werden, ist auf einen effizienten Wärmeeinsatz und die Entwicklung geeigneter Planungsverfahren und Verfahrenstechnik wenig Wert gelegt worden.

Tabelle 8: Temperaturrichtwerte (Monatsmittelwerte) für die Berechnung des Wärmebedarfs zur Substrataufheizung

Monat		Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Erdtemperatur = Gületeperatur	°C	9	10	11	13	15	17	18	17	16	14	11	10
Lufttemperatur	°C	-1	0	3	7	12	16	17	16	13	9	4	1

3 Finanzielle Leistungen der landwirtschaftlichen Biogaserzeugung

Entsprechend § 8 des novellierten EEG sind folgende **Mindestvergütungen für die Verstromung** von Biomasse in nach dem 01.01.2004 in Betrieb genommenen Anlagen wirksam:

- bis 150 kW 11,5 Cent/kWh
- über 150 kW - 500 kW 9,9 Cent/kWh
- über 500 kW - 5 MW 8,9 Cent/kWh
- über 5 MW - 20 MW 8,4 Cent/kWh

Die Mindestvergütung wird im Inbetriebnahmejahr 2004 über einen Zeitraum von 20 Jahren garantiert. Mit jedem späteren Jahr sinkt die Mindestvergütung um 1,5 %. Somit ergibt sich in Abhängigkeit des Inbetriebnahmejahres eine für 20 Jahre fixe anlagenspezifische Vergütung.

- NAWARO-Bonus bis 500 kW 6 Cent/kWh
über 500 kW - 5 MW 4 Cent/kWh
- Bonus für die Kraftwärmekopplung 2 Cent/kWh und
- Bonus für innovative Verfahren (Technologiebonus)
in Verbindung mit KWK-Bonus bis 5 MW 2 Cent/kWh

Die Ermittlung der entsprechend des Inbetriebnahmejahres und der einzelnen Bonusbeträge gültigen Vergütung ist unter zu Hilfenahme des von der TLL entwickelten EEG-Stromrechners (www.tll.de/AINFO) möglich.

Weitere Leistungen entstehen durch **Nutzung von Wärme**. Bei ihr sind nur die eingesparten Brennstoffkosten relevant, da die vorhandene Wärmeerzeugungsanlage meist nicht vollständig ersetzt werden kann (Tab. 9).

Tabelle 9: Verfahrenstechnische Richtwerte zur Berechnung der Wärmeverwertung

Parameter	Wert	Bemerkungen
Heizölpreis	40 Cent/l	Stand: 01/2005
Wärmepreis	4 Cent/kWh + 0 - 2 Cent/kWh	Ablösung des Eigenbedarfs (Ersatz der Brennstoffkosten) bei Vermeidung der Investition in eine Wärmeerzeugungsanlage
Wärmepreis-Verkauf	4 - 6 Cent/kWh	bei Verkauf an Dritte (Beachtung der Wärmetransportaufwendungen)

Die **Düngewirkung** der aus dem Einsatz der Ko-Substrate entstandenen Biogasgülle ist entsprechend den Entzugswerten der Feldfrüchte zu berechnen. In ökonomischer Hinsicht wird für Stickstoff eine Nährstoffwirksamkeit von 50 % angesetzt. Die Bewertung von Phosphor, Kalium und Magnesium erfolgt entsprechend betrieblicher Bedingungen (Versorgungsstufen der zu düngenden Flächen). Prinzipiell ist allerdings eine ökonomische Bewertung nur möglich, wenn Kosten der Grunddüngung eingespart werden.

Gegen den Düngewert sind gegebenenfalls notwendige Lagerungskosten und in jedem Fall die Transport- und Ausbildungskosten zu saldieren (2,50 bis 3,50 €/m³). Die Lagerkosten sollten nur bei der Feldfrüchtevergärung belastend wirken. Bei Wirtschaftsdüngern besteht auch ohne Biogas eine Mindestlagerkapazität von sechs Monaten.

Ko-Substrate bringen mit der Zuführung zusätzlicher Substratmengen eine Reduzierung der Verweilzeiten in der Biogasanlage. Die sich ergebende Erhöhung des Lagerraumbedarfes für den Landwirt muss beachtet werden. In Abhängigkeit vom Ko-Substrat Trockensubstanzgehalt ist der zusätzliche Lagerbedarf wie folgt abzuschätzen:

- **TS-arme Stoffe:** wie Silage, Grüngut, Fettabscheider (TS < 40 %) Die jährliche Ko-Substratmenge ist mit 70 bis 100 % als zusätzlicher Wirtschaftsdünger in die Berechnung des Lagerraumbedarfs aufzunehmen.
- **TS-reiche Stoffe:** wie Getreide, Verwurfgewächse, Stroh usw. (TS > 70 %) Für die Ermittlung des notwendigen Lagerraumbedarfs braucht die Ko-Substratmenge nur zu 30 bis 50 % angerechnet werden, da aufgrund des geringeren Wassergehaltes eine deutliche Volumenreduzierung erfolgt.

Der Düngewert der eingesetzten Wirtschaftsdünger ist ökonomisch nicht in Ansatz zu bringen, da die Nährstoffe der Wirtschaftsdünger unabhängig von der Biogaserzeugung vorhanden sind. Düngewirksame Veränderungen in der Bindungsform des Stickstoffs vom organisch gebundenen Stickstoff zur Ammoniumform werden gegen potenziell mögliche höhere Ausbringungs- und Lagerungsverluste aufgrund des höheren pH-Wertes saldiert.

4 Kosten der landwirtschaftlichen Biogaserzeugung

Für die Beurteilung der Kosten der landwirtschaftlichen Biogaserzeugung gelten die in Tabelle 10 zusammengefassten Richtwerte.

Tabelle 10: Richtwerte zur Berechnung der Kosten der landwirtschaftlichen Biogaserzeugung

Position/Kostenart	Wert	Bemerkungen
1. Investitionsbedarf		
Biogasanlage	Größendegression ist zu beachten (besonders beim BHKW). Die Degression wird aber bei Bau mehrerer Reaktoren (ab 1 000 m ³) bzw. mehrerer BHKW's teilweise nicht wirksam.	
- faulraumbezogen	200 - 400 €/m ³	bezogen auf das Reaktorvolumen
- leistungsbezogen	2 - 4 T€/kW	bezogen auf die installierte elektrische Leistung
BHKW-Anlage	600 - 800 €/kW	Größendegression ist zu beachten
Entschweflungsanlage		
Extern biologisch	70 - 80 T€	Richtwerte für H ₂ S-Konzentrationen von ca. 2 200 ppm und Volumenströme zwischen 50 und 210 m ³ (Quelle: Polster TU Dresden, 2005)
Extern chemisch	30 - 40 T€	
Nutzungsdauer		
- Gesamtanlage	16 Jahre	steuerrechtlich
- Bauteil	20 Jahre	
- Ausrüstungsteil	10 Jahre	(ohne BHKW)
- BHKW	5 bis 8 Jahre	bei zeitbezogener Abschreibung
- GOM-BHKW	bis 50 000 Bh	bei einmaliger Generalinstandsetzung bzw. Tausch des Verbrennungsmotors (Herstellerangaben beachten)
- ZüSt-BHKW	bis 30 000 Bh	
2. Versicherung		
Richtwert	0,5 - 1 % v. Invest	ohne Versicherung der „Prozessbiologie“
3. Substrat		
Wirtschaftsdünger	0 €/m ³	Gegebenenfalls sind die zusätzlichen Transportkosten zur BGA bzw. Aufbereitungsaufwendungen zu beachten. Eine Düngewertverbesserung ist ökonomisch nicht anrechenbar.
Ko-Substrate Feldfrüchte	Markpreise bzw. angestrebter Produkterlös	vgl. Leitlinien der TLL (www.tll.de/ainfo) bzw. Tabelle 11
4. Personal		
Arbeitszeitbedarf für die BGA-Betreuung	60 bis 300 min/d	entsprechend Anlagengröße und Automatisierungsgrad
Zeitbedarf für Ko-Substratzufuhr	>10 min/t	entsprechend Automatisierungsgrad
Personalkosten	7,71 €/AKh	plus 50 % Nebenkosten = 11,56 €/AKh
5. Unterhaltung		
BHKW	1,0 bis 2,0 Cent/kWh	Größendegression beachten
Anlage	1 % v. Invest	in Abhängigkeit vom technischen Stand
6. Energie und Material		
Elektroenergiebedarf - faulraumbezogen - erzeugungsbezogen	6 - 10 W/m ³	Abhängig von Durchmischungsverfahren, Feststoffeinsatz und Reaktorbauform. Bei Einsatz von NAWARO sind die höheren Werte anzuwenden.
Elektroenergiebedarf - erzeugungsbezogen	5 - 10 %	aufgrund der höheren Gasbildung gelten für NAWARO Einsatz die niedrigeren Werte
Zündölbedarf	10 %	Z. T. sind in der Praxis auch deutlich höhere Werte anzutreffen.
Zündölkosten	Heizölpreis Biodieselpreis	Rückerstattung der Heizölsteuer möglich (20,45 €/1 000 l bei 60 bis 70 % bzw. 61,35 €/1 000 l bei > 70 % Gesamtwirkungsgrad) bei Inbetriebnahme ab 01.01.2007
Strompreis-Bezug	10 Cent/kWh	bei bäuerlichen Anlagen z. T. deutlich höher
Entschwefelung durch		
Eisensalzeinsatz	1,2 Cent/m ³ Biogas	Richtwerte inklusive Abschreibung für H ₂ S-Konzentrationen von ca. 2 200 ppm und Volumenströme zwischen 50 und 210 m ³ (Quelle: Polster TU Dresden, 2005)
Eisenhydroxideinsatz	0,6 Cent/m ³ Biogas	
7. Sonstige Kosten		
Leitung u. Verwaltung	15 % der Personalkosten	
Externe biologische Prozesskontrolle	bis 0,5 Cent/kWh	entsprechend der Betreuungsintensität

Die eingesetzten landwirtschaftlichen Ko-Substrate sind mit Kosten belastet. Bei Einsatz marktgängiger Produkte wie Getreide und ähnliches können die Marktpreise zur Anwendung kommen. Da eine Biogasanlage von 20 Jahren Nutzungsdauer ausgeht, sollten bei der Kostenbeurteilung in der Planungsphase mittlere mehrjährige Preise zum Ansatz gebracht werden, um die jährlichen Ertragsunterschiede und die sich daraus ergebenden Preisunterschiede auszugleichen. Zusätzlich sind eventuell anfallende Lagerungs- und Aufbereitungskosten, wie z. B. das Schroten oder Quetschen des Getreides zu beachten.

Die zum Einsatz kommenden Silagen sind nicht marktgängig. Somit existiert auch kein Marktpreis. Aus landwirtschaftlicher Sicht ist die Kostenkalkulation aus Abbildung 3 anwendbar. Ausgehend von den Kosten und den Erlösen der marktgängigen Produkte eines Landwirtschaftsbetriebes ergibt sich bei Kenntnis der Prämiensituation ein mittlerer Gewinn der Marktfrüchte.

Beim Einblick in die Herstellungskosten, z. B. der Silage, lässt sich relativ einfach der anzustrebende Erlös je ha ermitteln. Hierzu ist der mittlere Gewinn der Marktfrüchte, welche sich als Nutzungskosten darstellen, einzubeziehen. Dieser anzustrebende Erlös wird bei einer eigenen Biogasanlage als Innenumsatzbuchung bzw. bei Produktverkauf als Preis wirksam.

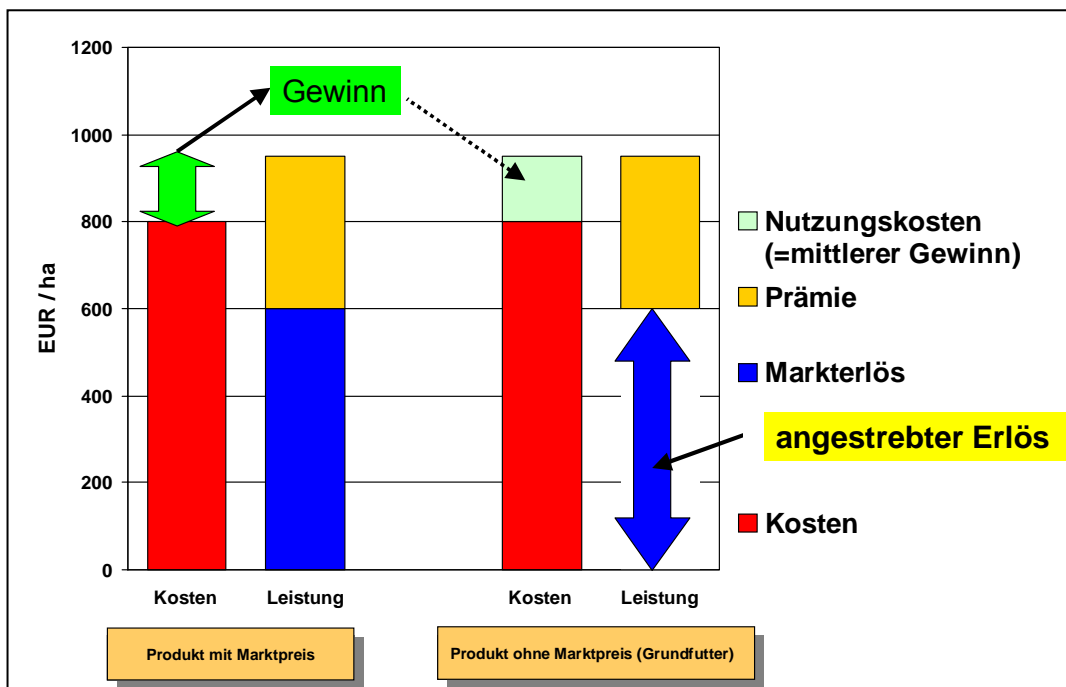


Abbildung 3: Schema zur Ermittlung der Wertschöpfung bei nicht marktgängigen Produkten

Bei der Kostenkalkulation sind folgende Grundsätze zu beachten:

- Ermittlung realer Nettoerträge frei Biogasanlage durch repräsentative Wägungen, Probenahmen (TM-Gehalt) und betriebliche Futterabrechnung zur Energie- und Trockenmasseverlustbestimmung;
- Berücksichtigung von Ansaat- und Umbruchjahren bei der Ermittlung der Flächenerträge;
- Umlage der Arbeiterledigungskosten in der Kostenstelle Pflanzenproduktion durch Aufteilung aller Zweige unter Berücksichtigung der technologisch nicht gebundenen Arbeitszeit und des Bereichs- und Betriebsleitungsaufwandes;
- Beachtung der Wiederbeschaffungswerte Technik und Silo, der Entzugswerte für abgefahrene Nährstoffe sowie ortsübliche Pachtpreise und Allgemeynkostenumlage;
- Realisierung des Durchschnittsgewinns verdrängter Marktfrüchte bei Beachtung arbeitswirtschaftlicher Fragen und der Fruchtfolgewirkungen sowie
- Beachtung des Zusatzaufwands z. B. für Silageumschlag und Transport bzw. Zerkleinerung.

Ausgehend von diesen Grundsätzen ergeben sich nach Leitlinien der TLL für die relevanten Ko-Substrate die in Tabelle 11 dargestellten angestrebte Erlöse (Herstellungskosten einschließlich Nutzungskosten). Bei der Beurteilung ist der Trockensubstanzgehalt von hoher Relevanz. Die Bewertung der Produkte erfolgt meist auf Basis der Frischmasse.

Kostenminderungsmöglichkeiten bestehen betriebspezifisch ggf. durch Nutzung von vorhandenem Siloraum und durch Reduzierung der Düngemittelkosten bei der Grunddüngung. Eine Gegenrechnung des Düngewertes der Biogäulle darf in diesem Fall aber nicht erfolgen.

Tabelle 11: Richtwerte für Ko-Substraterlöse vom Ackerland (Herstellungskosten plus 150 €/ha Nutzungskosten und abzüglich der mittleren regionalen AL-Prämie, ohne Energiepflanzenprämie (DEGNER, 2004))

Silageart	TM-Gehalt %	Frischmassebezug in €/t FM		
		voll €/t	ohne AfA Silo- raum €/t	ohne AfA, reduzierte Dünge- mittelkosten €/t
Maissilage	32	32,30	28,90	28,00
Wintergerste GPS	40	33,40	29,00	28,40
Sommergerste GPS	40	36,00	32,50	30,90
Luzerne AWS	40	44,80	41,10	36,70
		Trockenmassebezug in €/t TM		
Maissilage	100	101,00	90,40	87,50
Wintergerste GPS	100	83,50	72,50	71,00
Sommergerste GPS	100	90,00	81,30	77,30
Luzerne AWS	100	112,00	102,80	91,80

GPS - Ganzpflanzensilage
AWS - Anwelksilage

5 Ergebnis einer Beispielsanlagenkalkulation

Die Beispielskalkulation erfolgt an einer 2005 zu errichteten Biogasanlage. Grundlage für die Varianten A, B und C stellt jeweils der Anfall von 10 000 m³ Rindergülle dar (Tab. 12).

Durch den Einsatz von Maissilage (Anlage B) bzw. Getreide (Anlage C) wird die Anlagenleistung auf 224 kW gesteigert. Bei Varianten D und E erfolgt eine Monofermentation ohne Gülleinsatz, so dass ebenfalls 224 kW erreicht werden. Aus Gründen der Flüssigkeitsbilanz erfolgt bei der Getreidevergärungsanlage E der Einsatz von 2 000 m³/a Wasser.

Tabelle 12: Substrateinsatz in der Beispielskalkulation

Variante	ME	A	B	C	D	E	
Tierart		Rindergülle					(Wasser)
Menge	m ³ /a	10 000	10 000	10 000	0	2 000	
TS-Gehalt	%	8,0	8,0	8,0	0,0	0,0	
Koferment 1		Maissilage					
Anbaufläche	ha		100		135		
Frischmasseertrag	dt/ha		400		400		
Siliverluste	%		13		13		
TS-Gehalt	%		32		32		
Koferment 2		Getreide					
Menge	t/a			1 225		1 648	
TS-Gehalt	%			86		86	

Die Reaktorgröße wurde einheitlich auf 1 500 m³ festgelegt, wodurch sich Unterschiede in der Verweilzeit und der Reaktorbelastung ergeben (Tab. 13). Eine belastungsabhängige Variation der substratspezifischen Methanausbeuten erfolgt aufgrund des geringen Schwankungsbereichs der Belastung zwischen den Varianten B bis E nicht.

Tabelle 13: Anlagen- und Verfahrensparameter

Variante	ME	A	B	C	D	E
hydraulische Verweilzeit	d	54,75	40,62	48,78	116,92	150,08
Reaktorbelastung	kg oTS/m ³ d	1,17	3,10	3,00	2,60	2,46
Methangehalt	%	55	53	53	53	53
Methanbildungsgeschwindigkeit	m ³ CH ₄ /m ³ d	0,234	0,910	0,910	0,910	0,910
Methanausbeute	m ³ CH ₄ /kg oTS	0,200	0,293	0,304	0,350	0,370
Biogasproduktion	m ³ Biogas/d	638	2 576	2 575	2 575	2 575

Die Einsatzmengen der Ko-Substrate wurden so bemessen, dass zwischen den Varianten B bis E keine Unterschiede in der Gaserzeugung auftreten. Die Wärmenutzung erfolgte einheitlich mit 15 kW und der Prozessstrombedarf auch mit 15 kW (8 W/m³ Faulraum) für die Varianten B bis E.

Alle weiteren Parameter wurden vereinheitlicht um nur die substratbedingten ökonomischen Unterschiede in den Anlagenkonzepten darzustellen. Die wichtigsten, das Ergebnis deutlich beeinflussende Parameter, sind neben der Höhe der Investitionssumme (344 T€ ohne BHKW) und den Finanzierungs- und Abschreibungsbedingungen (5 % Zinssatz bei 100 % Fremdfinanzierung über 16 Jahre für die Anlage und fünf Jahre für das BHKW), die Kosten der Ko-Substrate. Maissilage wird mit 3 €/dt und Getreide mit 9 €/dt bewertet.

Von den Verfahrensparametern hat in der Praxis der BHKW-Wirkungsgrad einen dominanten Einfluss auf das Ergebnis. Die Höhe des Wirkungsgrades wird neben dem Motorhersteller deutlich durch die Größe des BHKW beeinflusst. Im Beispiel wurde dieser mit 33 % vereinheitlicht.

Im Ergebnis der Kalkulation zeigt sich, dass durch die Ko-Vergärung von Getreide bzw. Gülle (Variante B und C) bei den unterstellten Preisbedingungen die Rentabilität der Biogaserzeugung gesteigert wird. Unterschiede zwischen Maissilage und Getreide ergeben sich bedingt durch die vereinheitlichte Nettogaserzeugung nur durch andere Nährstoffgehalte (Düngewerte) (Tab. 14).

Die Monovergärung von Getreide bzw. Maissilage führt zu einem schlechteren ökonomischen Ergebnis. Im Fall von Getreide wird durch den notwendigen Einsatz von Prozesswasser das wirtschaftliche Ergebnis negativ. Durch den um die Ausbringungskosten saldierten Düngewert der Ko-Substrate wird das Ergebnis ökonomisch verbessert. Entsprechend der betrieblichen Bedingungen ist zu prüfen, ob dieser Düngewert realisierbar scheint.

Zur Abschätzung der Wirtschaftlichkeit in den Varianten wird eine Beispielskalkulation bewertet. Nur durch Unterstellung der vorherrschenden betrieblichen Bedingungen ist eine konkrete Abschätzung der Rentabilität und die Bestimmung des verfahrenstechnischen und ökonomischen optimalen Auslegung der Anlage möglich.

Tabelle 14: Leistungen und Kosten der Beispielanlage

Variante	ME	A	B	C	D	E
Leistungen						
Wärmenutzung	T€/a	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26
Stromverkauf	T€/a	73,7	275,9	275,8	275,8	275,8
Kosten						
Ko-Substrate	T€/a	0,0	104,4	110,2	140,5	157,3
Summe Elektroenergie u. Hilfsstoffe	T€/a	9,4	12,0	12,0	12,0	12,0
Wartung und Instandhaltung	T€/a	9,5	28,0	27,9	27,9	27,9
Personal	T€/a	8,4	15,2	10,3	17,5	11,0
Leitung und Verwaltung	T€/a	1,3	2,3	1,5	2,6	1,6
Versicherung	T€/a	1,8	2,6	2,6	2,6	2,6
Afa u. Zinsen	T€/a	39,1	70,5	70,5	70,5	70,5
Ergebnis						
Summe Leistungen	T€/a	79	281	281	281	281
Summe Aufwendungen	T€/a	69	235	235	274	283
Saldo (Überschuss)	T€/a	10	46	46	8	-2
sald. Düngewert der NAWARO's	T€/a	0	4	11	5	15