

Abschlußbericht

des Forschungsprojekts

GRAS-KRAFT

Förderkennzeichen FKV 0026901R4

Januar 1995

Autoren:

Dipl.-Ing.agr. A. Krieg
Dipl. Betriebswirt M. Braun
Cand agr. R. Bugar

unter Mitwirkung von:

Dipl.-Ing. E. Schneider, München,
Prof. Dr. Hofmann,
Fachhochschule Weihenstephan Triesdorf,
J. Sedlmaier, Landmaschinenschule Triesdorf,
Dipl.-Ing. A. Rozittis, Jelgawa, Lettland,
G. Beck, A. Neubert, Biogastechnik, Kirchberg/J.

mit Unterstützung von:

Arbeitsgemeinschaft
industrieller Forschungsvereinigungen
„Otto von Guericke“ e.V. (AIF)

Ingenieurbüro Schneider

Schillerstr. 34
D-80336 München

Tel. (49) 89 595 393
Fax (49) 89 598 147



Hannah - Vogt - Str 1
D - 37085 Göttingen
Tel + 49 551 7 70 77 10
Fax + 49 551 7 70 77 12

Krieg & Fischer Ingenieure GmbH
Biogasanlagen - Planung - Optimierung

Inhaltsverzeichnis	SEITE
0. Zusammenfassung	2
1. Zielsetzung des Projekts.....	3
2. Verfahrensbeschreibung	4
2.1. Rahmenbedingungen	4
2.2. Verwendete Substrate	5
2.3. Versuchsaufbau.....	6
2.3.1. Verfahrensprinzip	6
2.3.2. Bauart und Größe des Fermenters.....	6
2.3.3. Substratbehandlung im Fermenter	6
2.3.4. Heizung.....	8
2.3.5. Beschickung und Entnahme	8
2.3.6. Gasfluß	8
3. Durchführung.....	9
3.1. Versuchsablauf.....	9
3.2. Grüngut/Silage-Aufbereitung.....	10
3.3. Meßgrößen und Analysen	10
4. Ergebnisse.....	10
4.1. Spezifische Biogaserträge.....	10
4.2. Biogasqualität.....	13
4.3. Analyse der Substratrückstände.....	14
5. Bewertung.....	14
5.1. Verfahrenstechnische Beurteilung.....	14
5.1.1. Substrataufbereitung	14
5.1.2. Substrattransport	15
5.1.3 Substratbehandlung im Fermenter	15
5.1.4 Stoffzulauf- und ablauf.....	16
5.2. Prozeßstabilität.....	16
5.3. Wirtschaftliche Betrachtung einer Modellanlage	17
5.3.1. Rahmenbedingungen der Modellanlage.....	17
5.3.2. Mengen und Parameter der Modellanlage	17
5.3.3. Veranschlagte Investitionskosten.....	17
5.3.4. Kosten-Nutzen-Analyse	18
6. Umsetzung der Versuchsergebnisse.....	20
6.1. Weiterer Entwicklungsaufwand	20
6.2. Transfer der Ergebnisse in die Praxis	20
6.3. Weitere Perspektiven	20
7. Literaturverzeichnis	22

0. Zusammenfassung

Mit der Extensivierung der Landwirtschaft, der zunehmenden Ausweisung von Wasserschutzgebieten, sowie der Zunahme kommunal bewirtschafteter Flächen mit Grasbewuchs nimmt die jährliche Menge an Mähgut zu, das nicht mehr über die Viehfütterung, sondern mit hohem energetischen Aufwand z.B. in Kompostierungsanlagen verwertet wird.

Als mögliche Alternative kann das Mähgut durch die Fermentation als nachwachsender Rohstoff einer energetischen Nutzung zugeführt werden.

Im Rahmen des Graskraft-Projektes sind die Ergebnisse aus Laborversuchen über die Vergärung von ausschließlich Grüngut auf einen halbtechnischen Maßstab übertragen worden, um die technische Auslegung einer Praxis-Graskraftanlage zu ermöglichen.

Auf dem Gelände der Landwirtschaftlichen Lehranstalten Triesdorf, Weidenbach, wurden mit dem Versuchsvermelter des Fachverbandes BIOGAS e.V. im Zeitraum von acht Monaten sechs Versuchsreihen mit Vergärung von ausschließlich Grüngut und Silage durchgeführt.

Insgesamt konnte ein stabiler Gärprozeß erreicht werden wobei sich keine signifikanten Unterschiede zwischen Grünschnitt und Silage zeigten. Die Gaserträge lagen im Mittel zwischen 425 und 473 l Biogas pro kg zugeführter Trockensubstanz bei guter Gasqualität.

Die herkömmlichen Verfahren zur Substrataufbereitung mittels hydraulischem Rühren sowie Propellerrühren sind allerdings nur bedingt einsetzbar. Beim Substrattransport erwies sich die Exzentrerschneckenpumpe wegen zu hoher Verstopfungsneigung als ungeeignet. Die eingesetzte Drehkolbenpumpe erbrachte eine ausreichende Förderleistung ohne Verstopfungen, zeigte aber nach Versuchsende einen sehr hohen Verschleiß. Hier besteht noch weiterer Entwicklungsbedarf, um Substrataufbereitung und -transport weiter zu optimieren.

Der liegende Stahlfermenter mit Haspelrührwerk und ausreichend großem Gasdom erwies sich als geeignet.

Die wirtschaftliche Bewertung der Versuchsergebnisse zeigen, daß eine Graskraft-Biogasanlage zur alleinigen Vergärung von Grünschnitt und Silage schon unter den heutigen Energiepreisen (0,16 DM pro kWh) wirtschaftlich betrieben werden kann, wenn keine Grüngutbergekosten anfallen.

1. Zielsetzung des Projekts

Aufgrund struktureller Verschiebungen in der Landwirtschaft sind große Agrarflächen aus der Nahrungsmittelproduktion herausgenommen worden, die nun einer alternativen Nutzung zur Verfügung stehen. Ein großer Teil entfällt auf Stilllegungsflächen. „Stilllegungsflächen müssen begrünt werden, und der Aufwuchs muß durch mechanische Bearbeitung am Aussamen verhindert werden. Hierzu sind Aufwendungen notwendig, die Energie verbrauchen, im Mittel 1000 MJ/HA“[2]. Es bietet sich an, zumindest einen Teil dieser Flächen sowie das freigewordene Leistungspotential der Landwirtschaft volkswirtschaftlich sinnvoll zu nutzen.

Ferner nehmen die kommunal bewirtschafteten Flächen mit Grasbewuchs (z.B. Park- und Sportanlagen, Straßenrandzonen) und das dort anfallende Mähgut jährlich zu. Dieses kann nicht über die Viehfütterung verwertet werden, sondern wird in der Regel unter energetischem Aufwand behandelt und außerhalb der Landwirtschaft untergebracht. Das geschieht vermehrt durch die aerobe Behandlung von Grüngut in Kompostierungsanlagen, was energieaufwendig und oft emissionsintensiv ist.

Als Alternative bietet sich die anaerobe, emissionsarme Behandlung unter Energiegewinn an, siehe Abbildung 1.

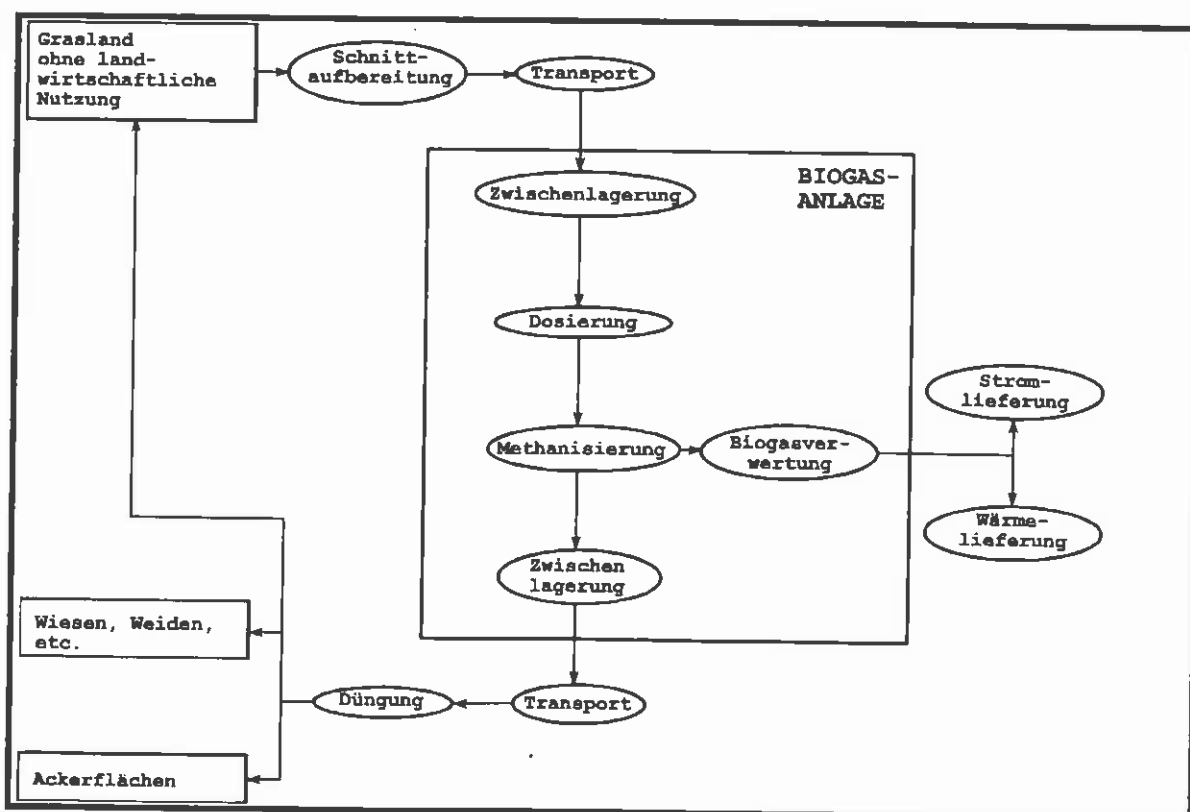


Abb. 1: Stofffluß des Verfahrens

Die Erzeugung von Biogas aus der alleinigen Fermentation von Grünpflanzen hat sich durch vorausgehende Laboruntersuchungen als durchführbar erwiesen [4 S. 298; 3 S. 66, 5 S. 570, 6 S. 55) et al.].

Die anhand der Laborwerte schätzbare Nettoenergieausbeute pro Tonne Grasschnitt fällt positiv aus. Eine Aufrechnung von Kosten und Nutzen nach Schätzungen aus Grasfermentationslaborversuchen in Verbindung mit Erfahrungswerten aus der Praxis herkömmlicher Biogasanlagen läßt die Rentabilität erwarten [6 S. 55, 7 S. 4, 8 Tab. 1].

Die sichere und prozeßgerechte Substratführung heterogen strukturierter Faserbreie (Pflanzenfasern, Stroh u.ä.) steht jedoch im Vergleich zu homogen strukturierten Schlämmen (Flüssigmist, Klärschlämme) noch vor technischen Problemen [3 S. 61 f.]. Erprobt wurde deshalb ein Verfahren zur ausschließlichen Grüngutfermentierung im halbtechnischen Maßstab, um die Übertragung von Laborforschungsergebnissen in die Praxis zu erleichtern. Den Schwerpunkt der Untersuchung bildeten die erzielbaren Gasausbeuten bei der Methanisierung von Grassilage und Frischgras, deren Substratführungen unter verschiedenen Betriebsbedingungen und die Beschreibung einer anwendbaren technischen Gestaltung des Gesamtverfahrens. Die im halbtechnischen Maßstab ermittelten Werte sollen mittels einer Modellrechnung auf ihre Rentabilität geprüft werden.

2. Verfahrensbeschreibung

2.1. Rahmenbedingungen

Für die Versuche stand die mobile Biogas-Anlage des Fachverbands BIOGAS e.V. zur Verfügung. Sie wurde 1986 am Institut für Landtechnik der TU München-Weihenstephan für anwendungsbezogenen Untersuchungen entwickelt und gebaut. Durchgeführt wurden die Versuche auf dem Gelände der Landwirtschaftlichen Lehranstalten Triesdorf, Weidenbach (Mittelfranken/Bayern) in Zusammenarbeit mit der Fachhochschule Weihenstephan-Triesdorf sowie der Landmaschinenschule Triesdorf. Der Versuchsfermenter stand neben der bereits bestehenden Biogasanlage und konnte in die dortige Infrastruktur eingebunden werden. Als Beschickungsmaterial wurde Frischgras sowie Grassilage verwendet. Das fermentierte und entwässerte Pflanzenmaterial fand im Stoffkreislauf des Gutsbetriebs Verwendung.

2.2. Verwendete Substrate

- Grasgrünschnitt

In der Vegetationsperiode wurde Grasgrünschnitt in verschiedenen Schnittlängen verwendet. Geworben wurde das Versuchsmaterial auf Stilllegungsflächen des Gutsbetriebes, sowie Grünschnitt aus Pflegemaßnahmen des Betriebsgeländes und Streuobstwiesen. Die jahreszeitlich bedingte Schwankung der Inhaltsstoffe des Frischgrases wurde nicht berücksichtigt bzw. analytisch erfaßt.

- Silage

Um unabhängig von der Vegetationsperiode ganzjährig Energie erzeugen zu können, ist die Lagerung des Grünschnitts als Silage notwendig. Darum soll auch die Vergärung von Silage durchgeführt und vorangegangene Forschungsarbeiten, die keinen negativen Einfluß der Silage auf den Fermentationsprozeß zeigten [8 S. 2], im halbtechnischen Maßstab überprüft werden. Die Silage stammte von dem Gutsbetrieb der LLA Triesdorf. Es wurde eine Futtermittelanalyse nach dem WEENDER Verfahren durchgeführt:

Tab. 1: WEENDER-Analyse, Versuchs-Silage, LLA Triesdorf

Inhaltsstoff	Probe A (TS%)	Probe B (TS%)	Mittelwert
Rohfett	6,38	6,34	6,4
Rohasche	13,18	13,23	13,2
Rohprotein	12,36	12,54	12,5
Rohfaser	33,20	35,05	34,1
NFE	---	---	23,4

2.3. Versuchsaufbau

2.3.1. Verfahrensprinzip

Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 2 schematisch dargestellt. Die Versuchsanlage wurde im einstufigen, quasikontinuierlichen Betrieb gefahren. Verwendet wurde ein horizontaler Kanalreaktor mit mechanischer Paddelrührung quer zur Längsströmung. Die Substrat-Führung erfolgte in einem annähernd geschlossenen Prozeßwasserkreislauf. Das ausgegorene Substrat wurde dafür separiert und das Preßwasser zum Anmischen des Beschickungsmaterials verwendet. Nur überschüssiges Prozeßwasser wurde in die neben der Anlage befindlichen Güllegrube abgeleitet.

2.3.2. Bauart und Größe des Fermenters

Es handelt sich um einen isolierten (k-Wert: 0,3), liegenden Stahltank mit einem Durchmesser von 1,2 m und einer Länge von 4 m. Das Volumen des Versuchsreaktors beträgt 4,5 m³. Auf den Fermenter ist ein Gasdom mit durchsichtiger Abdeckplatte zur Probenentnahme und Gasabfuhr sowie zur Beobachtung des Gärverhaltens aufgesetzt.

2.3.3. Substratbehandlung im Fermenter

Zur Begrenzung von Flotation und Sedimentation des Substrates befindet sich im Fermenter ein Haspelrührwerk. Die axiale Welle ist im ersten Drittel mit schlaufenförmig angeordneten Rührarmen, dahinter mit einem auf ganzer Länge wirkenden Paddel bestückt. Ein Elektromotor mit Kettenübersetzung treibt das Rührwerk an. Die Drehzahl des Rührwerkes beträgt $n = 4 \text{ min}^{-1}$.

Zu Beginn des Versuchs wurde halbstündig je 5 Minuten gerührt. Im späteren Verlauf wurde die Rührintensität aufgrund starker Schwimmschichtbildung erhöht.

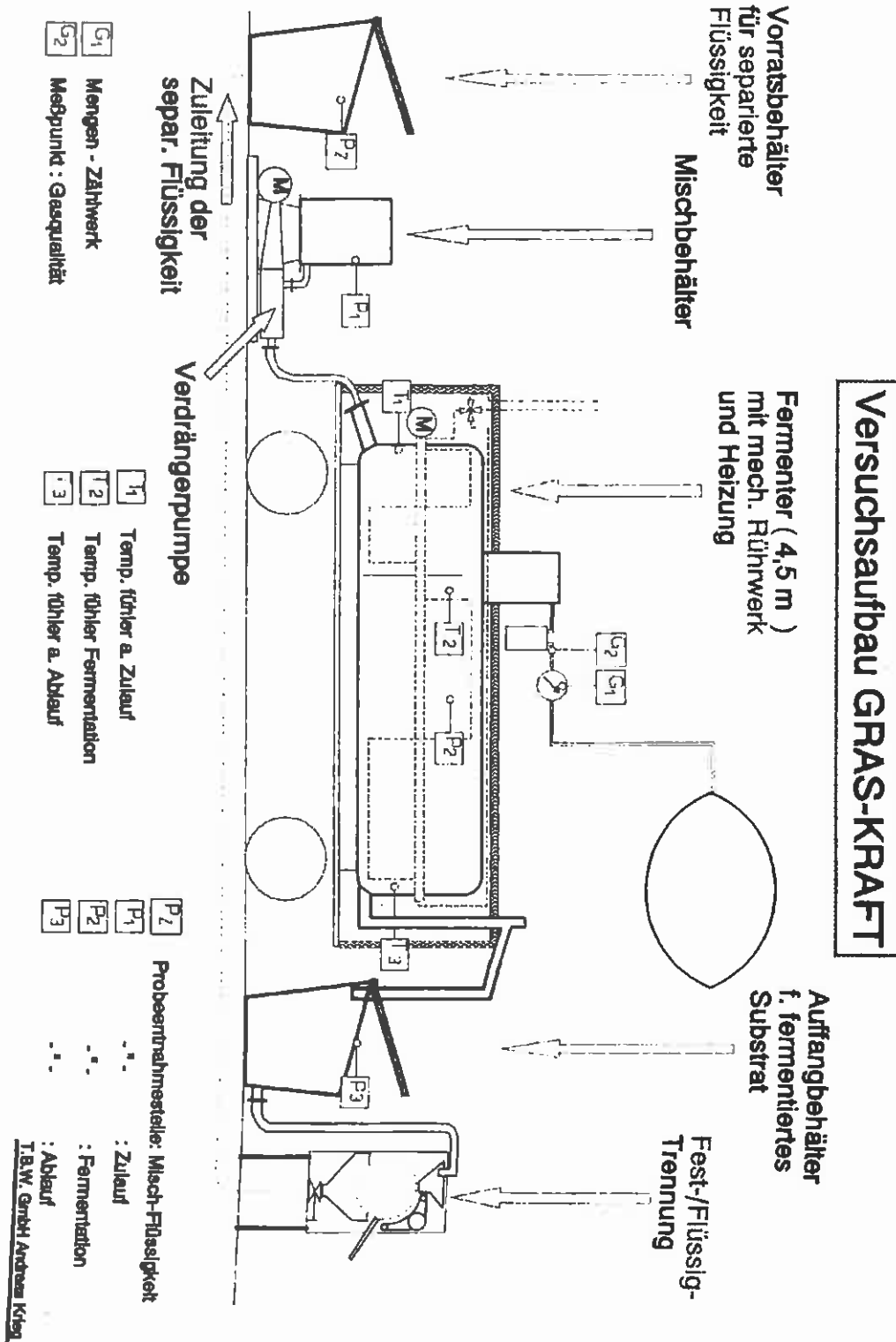


Abb. 1: Schema des Versuchsaufbaues

2.3.4. Heizung

Im Fermenter befindet sich ein ca. 3 m² großes beheizbares Innenwandsegment. Des Weiteren sind die Rührwelle und die Rührarme beheizbar. Angeschlossen wurde die Anlage an den bestehenden Betriebsheizkreislauf der Landwirtschaftlichen Lehranstalten Triesdorf. Die Vorlauftemperatur betrug 55 - 80 °C und wurde durch eine im Heizungsbau handelsübliche, selbsttätig regelnde Mischarmatur so eingestellt, daß die Temperatur 35 °C ± 0,5 °C betrug.

2.3.5. Beschickung und Entnahme

Der Fermenter wurde an 6 Tagen pro Woche 2mal täglich (8.00 und 17.00 Uhr) aus dem Anmisch/Vorratsbehälter beschickt. Zu Beginn des Versuches geschah dies mittels einer Exzentrerschneckenpumpe. Im Versuchsverlauf wurde aufgrund ungenügender Pumpleistung bei Gras und Silage auf eine EISELE Drehkolbenpumpe für Gülle umgestellt. Der Durchmesser des Zulaufrohres des Fermenters beträgt 80 mm.

Der Abfluß des fermentierten Substrates erfolgt nach dem Überlaufprinzip durch den erzeugten hydraulischen Druck beim Befüllen des Fermenters über ein Überlaufrohr. Der Durchmesser beträgt 125 mm. Das fermentierte Substrat wurde in einem 1,5 m³ großen Auffangbehälter zwischengelagert.

Die Separation des ausgegorenen Substrates erfolgte mit einem SÜDSTALL Siebtrommelseparator.

Einmal wöchentlich wurde die vorgesehene Wochenration an Gras bzw. Silage in dem Vorrats- und Anmischbehälter eingefüllt und anschließend mit der flüssigen Phase des Separats verdünnt sowie überschüssiges Prozeßwasser abgeleitet. Die feste Phase lagerte bis zur Ausbringung auf einer betonierten Freifläche mit Sickerwasserableitung in die Güllegrube.

2.3.6. Gasfluß

Durch den entstehenden Eigendruck während des Fermentationsprozesses sammelt sich das Gas im aufgesetzten Gasdom und wird daraus verdrängt. Anschließend wird das entstandene Biogas zur Aufbereitung durch einen kombinierten Kondensatabscheider/Drucksicherungsbehälter geleitet. Die Sicherung ist mit einer Wassersäule von 5 cm auf einem Unter- sowie Überdruck von 5 mbar eingestellt. Anschließend wird das Gas über einen Balgengaszähler mit Kammerentwässerung volumetrisch erfaßt, in einem

Niederdruckfoliengasspeicher zwischengelagert und zuletzt in der Heizzentrale der LLA Triesdorf thermisch genutzt.

3. Durchführung

3.1. Versuchsablauf

Zum „Anfahren“ des Fermentationsprozesses wurde Rindergülle der im Betrieb befindlichen Biogasanlage der LLA Triesdorf verwendet und auf die Betriebstemperatur von 35°C eingestellt. In der anschließenden Adaptionphase ist der Prozeß schrittweise auf konserviertes Grüngut umgestellt worden.

Es folgten je fünfwöchige Versuche. Während der Versuchsdauer wurden alle Versuchsparameter möglichst konstant gehalten. Nach jeweiligem Durchlauf wurde unter Beibehaltung aller sonstigen Variablen nur die Raumbelastung bzw. das Fermentationsgut geändert. Bei Störungen verlängerte sich der Versuchszeitraum entsprechend. Die Versuchsdauer betrug insgesamt 240 Tage.

Befüllt wurde der Reaktor mit 2 * 100 l täglich. Dies entspricht einer theoretischen Verweilzeit von 22,5 Tagen mit einer anschließenden Meßergebnisabsicherungsdauer von 5,5 Tagen.

Tab. 2: Substrate, Versuchszeiträume und angestrebte Versuchsparameter

Versuch Nr.	Zeitraum	Substrat	Angestrebte Raumbelastung B_R (kg TS/m ³ *d)
1	16.05 - 19.06	Silage I	2,5
2	20.06 - 17.07	Silage II	3,0
3	18.07 - 21.08	Grüngut I	2,5
4	22.08 - 25.09	Grüngut II	3,0
5	26.09 - 30.10	Grüngut III	3,5
6	31.10 - 04.12	Silage III	3,5

3.2. Grüngut/Silage-Aufbereitung

„Bei Mischsubstraten, die sich aus homogen strukturiertem Schlamm und grob-zerkleinerter Pflanzensubstanz zusammensetzen, stellt sich in erster Linie das Problem der Flotation“ [3 S63]. Um das fluidmechanisch/physikalische Verhalten sowie den biochemischen Abbau günstig zu beeinflussen, erfolgte die Entnahme aus dem Fahrsilo mittels einer handelsüblichen Siloentnahmefräse. Die mittlere Teilchenlänge beträgt bei diesem Verfahren etwa 15 mm, der natürliche Aufbau des Stützgewebes bleibt jedoch weitgehend erhalten. Die Grüngutwerbung erfolgte mit einem Anbau-Schlegelmähwerk sowie einem Handrasenmäher mit Fangsack. Die durchschnittliche Strukturierung des Frischgrases war vergleichbar mit derer der Silage.

Zur Homogenisierung und weiteren Feinstrukturierung des Fasermaterials wurde das einzupumpende Substrat im Vorrats- und Anmischbehälter mittels eines Propellerrührwerkes (SUMA-Mixer $n = 1.500 \text{ min}^{-1}$) aufbereitet.

3.3. Meßgrößen und Analysen

Die bei der Durchführung der Analysen angewendeten Meß- und Analysemethoden sind in der Tabelle Nr. 3 dargestellt.

4. Ergebnisse

4.1. Spezifische Biogaserträge

Bei der Durchführung der verschiedenen Meßreihen wurden bis auf die Raumbelastung alle anderen Betriebsparameter (Verweilzeit, Temperatur usw.) konstant gehalten. Schwankungen der stofflichen Zusammensetzung der Gärsubstrate und der sich daraus ergebenden substratspezifischen Parameter wie Rohfaser, Rohfett, Rohprotein, Aschegehalt usw. konnten aus Kostengründen nicht vermieden werden. Diese Schwankungen können aber bei gegebener Aufgabenstellung vernachlässigt werden.

Tab. 3: Meßgrößen und Analysen

Parameter	Meß-/Analysemethode	Zeitpunkt
Vs /d (l/d)	100 l Skalierung am Vorratsbehälter (± 5%)	2x tägl. (8 ⁰⁰ , 17 ⁰⁰ h)
T (°C)	Bimetall-Thermometer, ± 1°C	täglich
TS (% FS)	Trocknung bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz (nach DE)	bei jeder Befüllung
oTS (% FS)	Veraschung bei 600°C bis zur Gewichtskonstanz (nach DE)	nach Bedarf
pH	pH-mV-Meter (Fa. WTW, Typ 191) mit Temperaturabgleichung	täglich
V _{bg} /d (m ³ /d)	Balgengaszähler mit Kammerentwässerung, Anschluß 3/4"	2x täglich
CO ² (Vol %)	BRIGON CO ₂ Indikator	täglich
CH ₄ (Vol %)	gaschromatographisch Fa. Linde	einmal je Versuchsabschnitt
NH ₃ (ppm)	gaschromatographisch Fa. Linde; DRÄGER-Röhrchen für Ammoniak	einmal je Versuchsabschnitt sowie nach Bedarf
Rohfett Rohprotein Rohfaser Rohasche NFE	WEENDER Futermittelanalyse	einmal im Versuchszeitraum
H ₂ S (ppm)	gaschromatographisch Fa. Linde; DRÄGER-Röhrchen für Schwefelwasserstoff	einmal je Versuchsabschnitt sowie nach Bedarf

Die in der Projektierung angestrebten Raumbelastungen konnten aus verfahrenstechnischen Gründen bei der Substratsaufbereitung nicht erreicht werden (siehe Kapitel 5.1.1.).

In der Tabelle 4 und der Abbildung 3 sind die spezifischen Biogasausbeuten der einzelnen Versuchsreihen in Abhängigkeit der erreichten Raumbelastung dargestellt. Es können folgende Aussagen getroffen werden:

1. Mit zunehmender Raumbelastung nimmt der substratspezifische Gasertrag [l Biogas pro kg TS zugeführt] ab.
2. Die ermittelten spezifischen Biogaserträge aus der Silage sind geringfügig höher als die spezifischen Erträge aus dem Frischgras.
3. Aufgrund der Versuchsbedingungen kann dies zwar nicht als statistisch abgesichert gelten, deckt sich aber mit den Ergebnissen früherer Laborversuche.

Tab. 4: Spezifische Gaserträge der Versuche 1 - 6.

Substratart	TS-gehalt im Frischschlamm (%)	Raumbelastung B_R (kg TS/m ³ d)	Spezifischer Biogasertrag (l/kg TS zugef.)
Silage I	2,25	1,0	473
Silage II	3,38	1,5	465
Grüngut I	1,35	0,6	462
Grüngut II	1,80	0,8	455
Grüngut III	3,38	1,5	425
Silage III	5,85	2,6	436

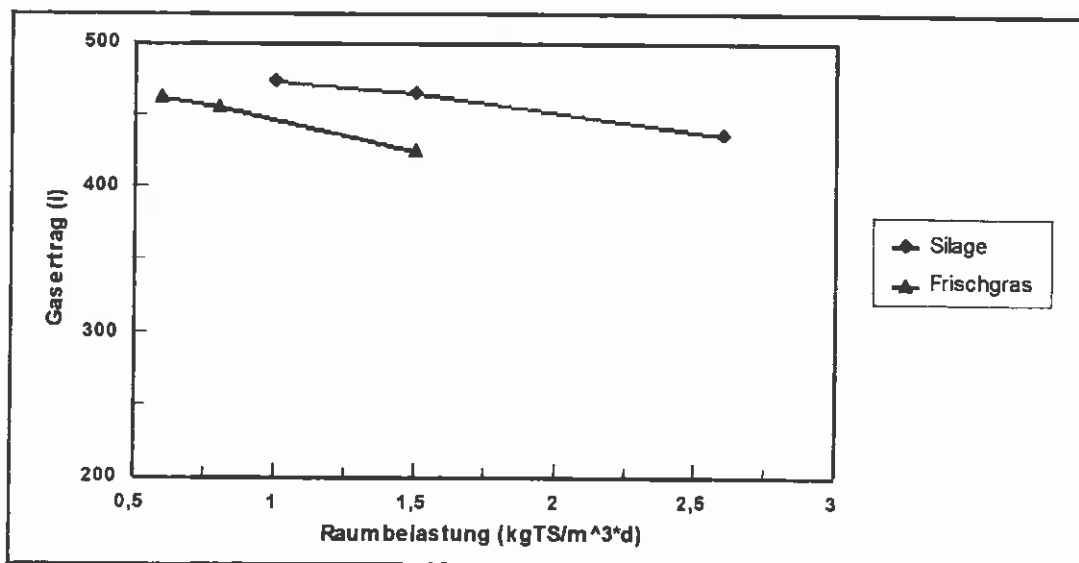


Abb. 3: Spezifischer Gasertrag in Abhängigkeit von B_R

4.2. Biogasqualität

Zur Beurteilung der Gasqualität ist zu beachten, daß die Gasmenge sowie der CH₄-Gehalt zyklischen Schwankungen, abhängig von Befüllungszeitpunkt und Häufigkeit, unterworfen ist [3 S63]. Jedoch war ein kontinuierliches Monitoring aus Kostengründen nicht durchführbar. Aus diesem Grunde wurde der Zeitpunkt zur Biogasprobenentnahme für die gaschromatographischen Untersuchungen auf 2 Stunden nach dem Befüllen des Fermenters festgelegt.

Tab. 5: Gasqualität

Parameter	Konzentration
CH ₄	65 %
CO ₂	>30 %
H ₂ S	250 ppm
NH ₃	n.n.

Die chromatographisch gemessenen 250 ppm H₂S sind repräsentativ. Bei den wöchentlich mittels Drägerröhrchen durchgeführten Messungen schwankte der H₂S Gehalt zwischen 140 und 280 ppm.

NH₃ war gaschromatographisch nicht nachweisbar. Drägerröhrchenmessungen ergaben einen geringen oder keinen Ammoniakgehalt.

Die in unregelmäßigen Abständen jedoch mindestens zweimal wöchentlich durchgeführte Gasbrennprobe war in allen Fällen positiv.

4.3. Analyse der Substratrückstände

Von der festen Phase der fermentierten und separierten Silage wurde eine Futtermittelanalyse nach dem WEENDER-Verfahren durchgeführt.

Tab. 6: Qualität des fermentierten Substrats

Inhaltsstoff	Probe A (TS %)	Probe B (TS %)	Mittelwert
Rohfett	1,02	1,04	1,0
Rohasche	15,09	15,26	15,2
Rohprotein	11,80	11,90	11,9
Rohfaser	37,28	36,89	37,1
NFE	---	---	27,9

Die separierte feste Phase hat bei dem hier verwendeten Siebtrommel-Separationsverfahren einen TS-Gehalt von 15 bis 25 %. Von der flüssigen Phase wurde der chemische Sauerstoffbedarf (CSB) mit 18.200 mg O₂/l bestimmt.

5. Bewertung

5.1. Verfahrenstechnische Beurteilung

Das wichtigste Ziel des Versuches, den Beweis der verfahrenstechnischen Durchführbarkeit der Vergärung von ausschließlich Grüngut, wurde erreicht. Allerdings müssen die Verfahrenskomponenten hinsichtlich ihrer Eignung unterschiedlich bewertet werden.

5.1.1. Substrataufbereitung

Im Vorrats- und Anmischbehälter erwies sich das Frischgras aufgrund seiner starken Neigung zur Flotation als sehr schwierig zu homogenisieren. Aus diesem Grund mußte das anfangs praktizierte Verfahren zur Homogenisierung des Substrates unter Verwendung einer Drehkolbenpumpe schon bei Versuchsbeginn aufgegeben werden. Daraufhin wurde in den Anmischbehälter ein Propeller-rührwerkes ($n = 1.500 \text{ min}^{-1}$, ohne Gegenschneide) eingebaut. Rührwerke dieser Art funktionieren nur, wenn eine Strömung im Anmischraum erzeugt werden kann. Aber auch das konnte bei steigendem TS-Gehalt (über 3 % TS) nicht immer

sichergestellt werden. Dadurch war es nicht möglich, die geplanten Raumbelastungen zu erreichen.

Silage zeigte sich in der Handhabung aufgrund der geringeren Neigung zur Entmischung als verfahrenstechnisch unproblematischer. Aber auch bei der Homogenisierung der Silage konnte bei hohem TS-Gehalt nicht immer eine Strömung erzeugt und somit das „Leerlaufen“ des Propellers unterbunden werden.

Des Weiteren konnte aufgrund der hohen Entmischungsneigung nur während des Aufrührens eingepumpt werden. Zur Ausscheidung von Fremdkörpern ist aber eine Absetzpause zum Absinken eben dieser Störstoffe notwendig.

Das hier angewendete Homogenisierungsverfahren mittels hydraulischem Rühren sowie Propellerrühren ist bei geringem TS-Gehalt des Gärsubstrates praktikierbar. Aus ökonomischen Gründen sollte eine höhere Raumbelastung im Fermenter erreicht werden. Dazu ist eine Substrataufbereitung mit höheren TS-Gehalten sowohl bei Frischgras wie auch bei Silage notwendig. Somit muß das hier praktizierte Homogenisierungsverfahren als nicht ausreichend verfahrensgerecht bezeichnet werden.

5.1.2. Substrattransport

Die zuerst verwendete Exzentrerschneckenpumpe, die üblicherweise zur Förderung von Gülle eingesetzt wird, erwies sich als ungeeignet. Die Verstopfungsneigung, die sich durch Einquetschen des Faserbreis zwischen Rotor und Stator ergibt, war zu hoch. Auch mit reversem Lauf durch Drehrichtungsänderung des Motors konnte die Verstopfung oft nicht behoben werden, wodurch Öffnung und Reinigung der Pumpe notwendig wurde.

Die Exzentrerschneckenpumpe wurde daraufhin durch eine Drehkolbenpumpe ersetzt. Ihre Förderleistung war ausreichend und es entstanden keine Verstopfungsprobleme. Wünschenswert wäre aber eine Möglichkeit zur Drehzahlregulierung, um beim Einpumpen ein Ansprechen der Überdrucksicherung zu vermeiden. Beim Öffnen der Drehkolbenpumpe nach Versuchsende zeigte sich allerdings ein hoher Verschleiß sowohl an den Gummikolben wie auch am Gehäuse. Dies führen wir auf die hohe Sandfraktion im Frischgras zurück, welche sich im Vorratsbehälter aufgrund des Einpumpens während des Aufrührens nicht absetzen konnte.

5.1.3 Substratbehandlung im Fermenter

Auch im Fermenter zeigt sich die starke Entmischungsneigung des Substrates. Um eine zu starke Schwimmschichtbildung zu vermeiden, wurde der anfängliche Rührintervall (2 mal pro Stunde je 5 Minuten Rühren) erhöht. Aus energetischen Gründen sollte der Rühraufwand jedoch so gering wie möglich gehalten werden.

Das verwendete Paddelrührwerk erwies sich aufgrund der auf großer Fläche gleichzeitig wirkenden Kraft beim Durchdringen der Schwimmdecke als ungünstig. Aufgrund vorliegender Erfahrungen aus der Festmistvergärung ist zu erwarten, daß dieses technische Problem mit dem Einbau eines Haspelrührwerkes mit versetzt angeordneten Einzelarmen beseitigt werden kann.

5.1.4 Stoffzulauf- und ablauf

Die im Versuchsaufbau beschriebenen Rohrdurchmesser (80 mm Zulauf, 125 mm Ablauf) erwiesen sich aufgrund der Verstopfungsneigung als an der unteren machbaren Grenze. Bei einer Neuplanung eines Fermenters zur Vergärung von faserbreiigem Fermentationsgut werden größere Durchmesser vorgesehen.

5.2. Prozeßstabilität

Die verwendeten Substrate zeigten kurz nach dem Einpumpen, also in der Hydrolyse/Ansäuerungsphase, eine starke Neigung zur Schaumbildung im Fermenter. Es muß auf einen ausreichend großen Gasdom sowie Wasserabscheider geachtet werden, um einen Übertritt von Schaum in den Gasvorratsbehälter zu vermeiden.

Insgesamt erwies sich der Prozeß sowohl bei Gras als auch bei Verwendung von Silage als sehr stabil.

Aufgrund der in der Silage bereits abgelaufenen Hydrolyse und Säurebildung weist diese einen pH-Wert deutlich unter 5 auf, was sich aber ebenfalls nicht negativ auf die Prozeßstabilität auswirkt [8 S2]. Auch in unserem Versuch konnte dies bestätigt werden. Der pH-Wert des Substrates im Fermenter schwankte zwischen neutral bis leicht alkalisch (7 bis 7,5 pH) und sank auch bei Verwendung von Silage nicht.

Auch ein versuchsweise mehrtägiges (4 Tage) Nichtbeschicken hatte keinen negativen Einfluß auf die Prozeßstabilität.

Der Methanisierungsprozeß brachte über den ganzen Versuchszeitraum ein brennbares Gas mit ca. 65 % Methangehalt, was ebenfalls als Indikator für eine ausreichende Prozeßstabilität gewertet werden kann.

5.3. Wirtschaftliche Betrachtung einer Modellanlage

Die technischen und ökonomischen Ergebnisse der durchgeführten Versuche im halbtechnischen Maßstab ermöglichen die technische Auslegung einer Praxis-Biogasanlage.

5.3.1. Rahmenbedingungen der Modellanlage

Für die Modellanlage wird von einem landwirtschaftlichen Betrieb ausgegangen, der die Rindviehhaltung aus ökonomischen und arbeitswirtschaftlichen Gründen zugunsten einer Spezialisierung im Bereich Ackerbau aufgibt. Der Betrieb nimmt kommunalen Grünschnitt bzw. Grüngut aus landschaftspflegerischen Maßnahmen zur Vergärung an. Die Biogasanlage und Lagereinrichtungen können auf dem bestehenden Grundstück gebaut und das fermentierte Substrat kann auf der vorhandenen landwirtschaftliche Nutzfläche ausgebracht werden.

Der landwirtschaftliche Betrieb erhält einen Investitionszuschuß für die Biogasanlage in Höhe von 30 %.

5.3.2. Mengen und Parameter der Modellanlage

Die Prozeßparameter der Modellanlage wurden folgendermaßen konzipiert:

Tab. 7: Verfahrenstechnische Parameter der Modellanlage

Fermentergröße (V)	300 m ³
Prozeßtemperatur (t)	35° C
Raumbelastung (B _R)	2,6 kg TS/m ³ *d
Hydraulische Verweilzeit (HRT)	21 d
Durchsatz	1.168 t/a Grünschnitt, entsprech. 0,8 t/d TS

5.3.3. Veranschlagte Investitionskosten

Aus der Anlagenkonzeption ergeben sich folgende Investitionskosten für die Modellanlage:

Tab. 8: Investitionsvolumen

Gewerk	DM
Umbau zu Fermenter 300m ³	109.000
Versorgungstechnik	59.500
Gastechnik	12.800
Wärmeverteilung	18.000
Blockheizkraftwerk	65.000
Lagerung	126.500
Baunebenkosten	85.080
Summe der Investitionskosten	475.880

5.3.4. Kosten-Nutzen-Analyse

Aufgrund der im Versuch ermittelten spezifischen Biogaserträge und der Kostenansätze bei bestehenden Biogasanlagen konnte eine Kosten-Nutzen-Analyse erstellt werden. Die ermittelten Betriebskosten und Erträge sind in der Tabelle 9 sowie im Anhang dargestellt.

Der Modellbetrieb weist einen Jahresgewinn vor Steuern von DM 44.249,- mit 30 % Investitionszuschuß und einen Gewinn von DM 28.431,- ohne Zuschuß aus. Die Rentabilität beträgt 26,6 % bzw. 11,9 %. Die ausschließliche Vergärung von zu entsorgendem kommunalem Grünschnitt bzw. Grüngut aus landschaftlichen Pflegemaßnahmen kann somit wirtschaftlich betrieben werden (s. erste Tabelle im Anhang). Die Amortisationszeiten von 4,1 bzw. 5,8 Jahren werden im landwirtschaftlichen Bereich ansonsten kaum erreicht.

Bei einem Investitionszuschuß von 30 % wird auch ohne die Einnahme von Entsorgungsgebühren etwa die Wirtschaftlichkeitsgrenze erreicht.

Durch die in den Kapiteln 5.1.1 und 5.1.2. beschriebenen technischen Probleme bei Substrataufbereitung und -transport konnte die erwünschte Raumbelastung im Fermenter nicht erreicht werden. Können diese Probleme gelöst werden und die geplante Raumbelastung erreicht werden, so ist davon auszugehen, daß der Modellbetrieb auch ohne einen Investitionszuschuß und ohne die Einnahme von Entsorgungsgebühren die Wirtschaftlichkeitsgrenze erreichen wird.

Tab. 9: Kosten-Nutzen-Analyse

	mit Zuschuß (DM)	ohne Zuschuß (DM)
Kosten:		
Kapitaldienst (Abschreibung und Zinsen)	37.143	53.061
Wartung, Instandhaltung	9.380	9.380
Versicherung	1.954	1.954
Zündöl	3.157	3.157
Personalkosten	4.500	4.500
Summe der Kosten	56.134	72.052
Erträge:		
Wärmeertrag	2.053	2.053
Stromkostensparnis	2.277	2.277
Stromeinspeisung	49.433	49.433
Entsorgungseinnahmen	46.720	46.720
Summe der Erträge	100.483	100.483
Jahresgewinn	44.349	28.431
Rentabilität	26,6 %	11,9 %
Amortisationszeit	4,1 Jahre	5,8 Jahre

Durch die Extensivierung der Landwirtschaft und die Aufgabe vieler kleiner landwirtschaftlicher Betriebe entstehen zunehmend Restgrünflächen, deren Mähgut nicht mehr über Viehfutter verwertet wird. Verwendet ein landwirtschaftlicher Betrieb dieses Mähgut zur Biogasproduktion, so entfallen nicht nur die Entsorgungseinnahmen, es entstehen noch zusätzlich Bergungskosten für das Mähgut in Höhe von DM 890,- pro ha. Dies bedeutet, daß eine reine Vergärung von landwirtschaftlichem Mähgut ohne Subvention der Bergungskosten unter gegebenen Rahmenbedingungen nicht wirtschaftlich betrieben werden kann (vgl. zweite Tabelle im Anhang).

6. Umsetzung der Versuchsergebnisse

6.1. Weiterer Entwicklungsaufwand

Insgesamt müssen die verwendeten Verfahren der Substrataufbereitung und des Substrattransportes als nicht ausreichend verfahrensgerecht bewertet werden. Mit der eingesetzten Technik konnten die geplanten Trockensubstanzgehalte des Substrates und damit die aus ökonomischen Gründen erwünschte Raumbelastung im Fermenter nicht erreicht werden. Zur Lösung dieser Verfahrensprobleme müssen weitere Versuche unter Einsatz der Preßkolben- bzw. Förderschneckentechnik durchgeführt werden.

6.2. Transfer der Ergebnisse in die Praxis

Daß sich die ausschließliche Vergärung von zu entsorgendem kommunalen Grünschnitt bzw. Grüngut aus landschaftspflegerischen Maßnahmen durchaus als wirtschaftlich darstellt, die Vergärung von reinem landwirtschaftlichen Mähgut nicht, muß bei der weiteren Markterschließung berücksichtigt werden.

Aufgrund der Versuchsergebnisse im halbertechnischen Maßstab wurde bereits eine Biogasanlage im Maßstab 1:1 konzipiert, wobei die unter 6.1. genannten technischen Probleme allerdings noch gelöst werden müssen. Geplant ist, im Laufe des nächsten Jahres die erste Praxis-Graskraft-Anlage mit einem Fermentervolumen von 300 m³ zu errichten.

6.3. Weitere Perspektiven

Die durch die Extensivierung der Landwirtschaft und die Aufgabe vieler kleiner landwirtschaftlicher Betriebe entstehenden Restgrünflächen, deren Mähgut nicht mehr über Viehfutter verwertet wird, müssen aber schon aus landschaftspflegerischen Gründen gemäht werden.

Durch die Grüngutterfermentierung wird die Entsorgung des Mähgutes mit der Gewinnung regenerativer Energie verknüpft. Bei der Verwertung des Grasaufwuchses von 2 Millionen ha Stilllegungsflächen durch die Grüngutterfermentierung bestände ein theoretisches Energiepotential in Deutschland von 110 PJ/a.

Die Grüngutterfermentation bietet erhebliche ökologische Vorteile gegenüber anderen Biomassenutzungen zur regenerativer Energiegewinnung wie z.B. dem Rapsanbau.

Die Grüngutfermentation ermöglicht geschlossene, kurze Stoffkreisläufe:

- Die CO₂- sowie die Nährstoffbilanz ist annähernd ausgeglichen.
- Das in der Biogasanlage vergorene Substrat stellt einen hochwertigen landwirtschaftlichen Dünger dar. Dadurch sichert die Grüngutfermentation die nachhaltige Schonung von Boden und Grundwasser, da Mineraldünger- und Pestizideinsatz überflüssig werden.
- Wiesengras oder Grünbrache bestehen aus ökologisch unproblematischen und weit verbreiteten heimischen Pflanzengesellschaften die keine Fruchtfolgeprobleme kennen. Im Gegensatz zum Anbau von anuellen Monokulturen für die regenerative Energiegewinnung führt die Grüngutfermentierung nicht zur einseitigen Nährstoff- oder Spurenelementeverarmung der Böden, erhöhtem Dünger- und Pestizideinsatz.

Durch eine Subvention in einer Höhe von DM 900,- pro ha würde die Vergärung von landwirtschaftlichem Mähgut die Wirtschaftlichkeitsgrenze erreichen. Die Grüngutfermentation ist damit z.Zt. flächenbezogen die „günstigste“ Art der Gewinnung regenerativer Energie aus Biomasse.

Wie volkswirtschaftlich „günstig“ die Grüngutfermentation im Vergleich zu anderen Formen regenerativer Energiegewinnung wie z.B. Solarenergie ist, zeigt folgende ökonomische Kennzahl. Die Vergärung von landwirtschaftlichem Mähgut erreicht ohne Bezuschussung in irgendeiner Form ihre Wirtschaftlichkeitsgrenze bereits bei einer Einspeisevergütung von 27,7 Pfennigen pro kWh. Die Differenz zur momentanen Einspeisevergütung bei Biogas (15,36 Pf/kWh) beträgt 12,34 Pf/kWh. Bei einem Investitionszuschuß von 30 % ist eine Vergütung von 23,0 Pf/kWh zur Erreichung der Wirtschaftlichkeitsgrenze notwendig.

Durch das hohe Energiepotential, den ökologischen Vorteile und den relativ niedrigen Subventionsbedarf von 900,- DM/ha bzw. 12,34 Pf/kWh Strom stellt, die Grüngutfermentation einen hohen volkswirtschaftlichen Nutzen dar.

7. Literaturverzeichnis

1. Roustan, J.L. et.al. (1984): Methanogenic fermentation of solid agricultural residues; in: Ferrero,G.L. et al.: Anaerobic Digestion and Carbohydrate Hydrolysis of Waste, S. 457-463
2. UFOP, Scharmer, K./ Golls, G./ Muschalek,I.: Pflanzenölkraftstoffe und ihre Umweltauswirkungen, Argumente und Zahlen zur Umweltbilanz, S. 16.
3. Baader (1982): Stoff-Führung in Reaktoren für die Erzeugung von Biogas aus heterogenen feststoffreichen Substraten; in: 5. Symposium Technische Mikrobiologie S. 61-67.
4. J. Stewart: Energy From Crop-Grown Biomass; Waste Technoloy Group, Invermay Agricultural Centre Ministry of Agriculture and Fisheries, Dunedin, New Zealand, S. 293-310
5. Baader, W. (1985): Biogas from green and silaged plants in a digester with internal liquid circuit; in: Palz, W. et al. (eds.) (1985): Energy from Biomass, S. 567-571
6. Kaltwasser, B. J. (1980): Biogas, Regenerative Energieerzeugung durch anaerobe Fermentation organischer Abfälle in Biogasanlagen; Wiesbaden
7. Schuchardt, F. (1981): Study of the fermentation process in animal excrement and plants; Translated by Reilly N.M., Glasshouse & Scientific Information Division, National Institute of Agricultural Engineering, Bedford
8. Baader, W. (1985): Biogas production from green materials; presented at the FAO Technical Consultation of the European Cooperative Network on Rural Energy „Biomass Conversion of Energy“, Freising
9. Zauner, E.(1985) Biogasgewinnung aus Pflanzenstoffen in LANDBAU-FORSCHUNG VÖLKERODE, Heft 2, S67-74
10. Wellinger, A. et al.(1991) Biogashandbuch, 2. Auflage, Verlag Wirz