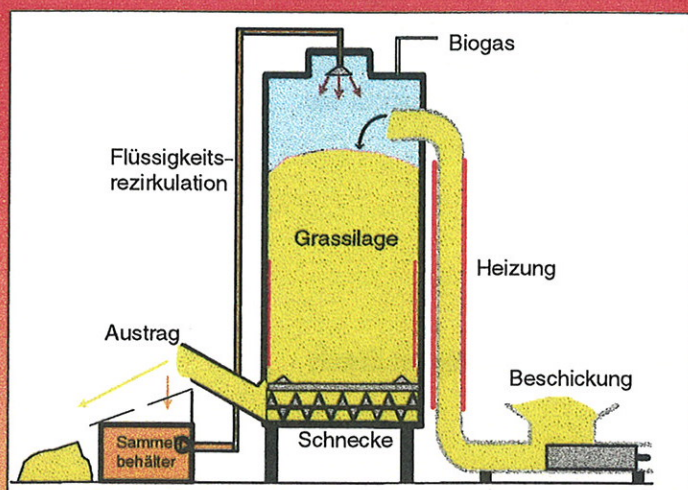


Energetische Nutzung landwirtschaftlicher Biomasse

Band 1

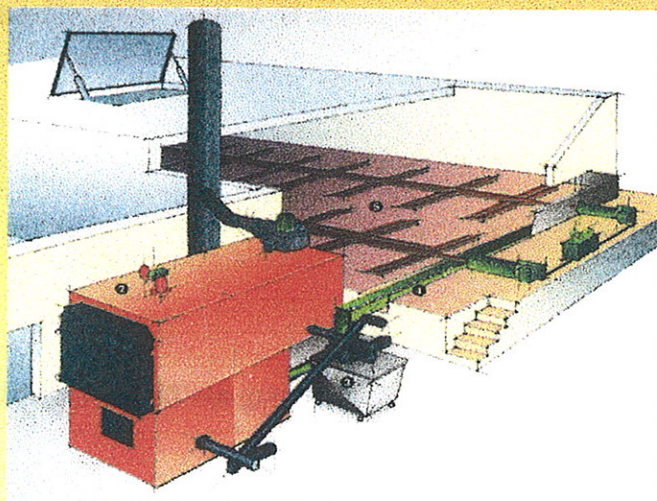
Wärme und Strom aus Energiegras und Feldholz

J.L. Hersener, U. Baserga



Vergärung
von Energiegras

Verbrennung von
Energiegras
und Feldholz



Dank

Unser Dank gebührt dem Bundesamt für Energie BFE, welches die Finanzierung für den vorliegenden Bericht übernommen hat. Ebenfalls danken wir der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik FAT für die Übernahme des Druckes und diverser Layoutarbeiten. Ein spezieller Dank geht zudem an die Firma Schmid AG, die uns verschiedene Graphikvorlagen zur Verfügung gestellt hat.

Dieser Bericht wurde ausgearbeitet durch

J.L. Hersener

Ingenieurbüro HERSENER, 8542 Wiesendangen

und

U. Baserga

Eidg. Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik (FAT), 8356 Tänikon

im Auftrag des Bundesamtes für Energie

Tänikon, November 1998

	Seite
1. VORWORT	2
2. ZUSAMMENFASSUNG.....	2
3. DAS ENERGIEGRASPROJEKT.....	3
3.1 Ausgangslage.....	4
3.2 Die Teilprojekte.....	5
3.3 Methodische Grundlagen.....	7
4. VERGÄRUNG VON ENERGIEGRAS	9
4.1 Technologie	10
4.2 Anlagenbeispiele	12
4.3 Anbau von Energiegras	17
4.4 Logistik	17
4.5 Ökonomie	19
4.6 Ökologie	19
5. VERBRENNUNG VON ENERGIEGRAS, CHINASCHILF UND FELDHOLZ	21
5.1 Technologie	22
5.2 Anlagenbeispiel.....	26
5.3 Anbau der Energiepflanzen.....	27
5.4 Logistik	27
5.5 Ökonomie	28
5.6 Ökologie	30
6. SCHLUSSFOLGERUNGEN	31
7. LITERATUR	31

1. VORWORT

Nachwachsende Rohstoffe erlebten Anfang der Neunziger Jahre einen grossen Aufschwung, die Erwartungen waren hoch, wurden jedoch nach einer Phase der Ernüchterung nur teilweise erfüllt. Die ausschlaggebenden Kriterien, welche von der Seite der Landwirtschaft zum Anbau von Nachwachsenden Rohstoffe geführt haben, sind noch weitgehend die gleichen. Es sind dies die Umnutzung landwirtschaftlicher Flächen zur Vermeidung von Überschüssen mit dem Ziel, zusätzliche Einkommensquellen zu schaffen bzw. diese Flächen als ökologische Ausgleichsflächen zu nutzen.

Der Bericht ist Teil einer zweibändigen Publikation zum Thema energetische Nutzung von landwirtschaftlicher Biomasse. Das Forschungsprojekt **"Energiegras/Feldholz"** befasste sich mit der energetischen Nutzung von Gras, Chinaschilf und Feldholz (Vergärung, Verbrennung). Es stellte die Grundlagen zur Verfügung, welche als Auslöser für weitere Forschungsarbeiten dienen. Im vorliegenden Band sind die Ergebnisse dieses Projektes zusammengefasst.

Das vom Kanton Luzern initiierte Projekt **"Energetische Nutzung von Hofdünger-Feststoffen"**, welches im zweiten Band beschrieben wird, befasst sich mit den Möglichkeiten der thermischen Nutzung von Hofdüngern wie Gülle und Mist. Die beiden Berichte geben einen guten Überblick über den derzeitigen Stand der Forschung und der Technik im Bereich der energetischen Nutzung landwirtschaftlicher Biomasse.

2. ZUSAMMENFASSUNG

Ziel des Projektes 'Energiegras/Feldholz' war abzuklären, ob die energetische Nutzung von Gras, Chinaschilf und Feldholz technisch machbar sowie ökologisch und ökonomisch sinnvoll ist. Beim Anbau wurden verschiedene Arten, Sorten und Bewirtschaftungsweisen untersucht. Bei den untersuchten Konversionswegen stehen die Verbrennung sowie die Biogaserzeugung im Vordergrund. Die Vergärungstechnologie im untersuchten Leistungsbereich von 0,5 bis 1,5 MW_{thermisch} ist für eine praktische Umsetzung noch zu wenig ausgereift.

Die energetische Nutzung von Energiegras, Chinaschilf oder Feldholz ist aufgrund der unterschiedlichen Biomasseeigenschaften technisch anspruchsvoll. Es gilt, das für die jeweilige Situation geeignete Verfahren auszuwählen. Die Resultate der Studie können folgendermassen zusammengefasst werden:

Anlagentechnik

Sowohl für die Linie Biogas als auch für die Verbrennung wurden die Anforderungen an die Anlagentechnik aufgezeigt, so dass eine Umsetzung in die Praxis realisierbar ist.

Ökonomie

Alle betrachteten Verfahren verursachen höhere Investitions- und Betriebskosten als Systeme, die fossile Energieträger nutzen. Vom betriebswirtschaftlichen Standpunkt aus gesehen sind heute nur die Konversionssysteme rentabel, welche Biomasse nutzen, für die kein Preis bezahlt werden muss oder für welche Einkünfte aus Entsorgungsgebühren erwirtschaftet werden können. Volkswirtschaftlich betrachtet ist die energetische Nutzung von Energiegras bereits heute sinnvoller als fossil betriebene Energiesysteme, wenn die Schadenvermeidungskosten berücksichtigt werden.

Ökologie

In bezug auf die Umweltauswirkungen ist die Art und Weise des landwirtschaftlichen Anbaus entscheidender als das gewählte Konversionsverfahren. Extensiv angebaute Energiekulturen weisen bezüglich Ökologie, Ökonomie und Verfahrenstechnik die meisten Vorteile auf. Selbst im Vergleich mit einer allfälligen Extensivierung der gesamten Schweizer Landwirtschaft ergibt die Nutzung nachwachsender Energieträger eine geringere Umweltbelastung.



3.1 AUSGANGSLAGE

Im Rahmen des interdisziplinären Projektes „**Energiegras/Feldholz**“, welches Ende 1996 abgeschlossen wurde, befassten sich mehrere Forscherteams mit der energetischen Nutzung von Gras, Chinaschilf und Feldholz sowie mit den daraus resultierenden Konsequenzen hinsichtlich **Verfahrenstechnik, Ökologie** und **Ökonomie** [1]. Die umfangreichen Ergebnisse wurden in einem rund 180-seitigen Schlussbericht publiziert. Dieser wissenschaftliche Bericht mit vielen Detailinformationen richtet sich an Fachleute und Forschungsinstitutionen. In der vorliegenden Broschüre werden die wichtigsten Resultate in allgemeinverständlicher und anschaulicher Form vorgestellt, wobei neue Erkenntnisse aus Folgeprojekten den Bericht ergänzen und den Stand des Wissens aktualisieren. Die Broschüre richtet sich in erster Linie an Entscheidungsträger der Bundesverwaltung, an Kantone und Gemeinden, an Planungsbüros und Anlagehersteller sowie an weitere interessierte Kreise.

Energie aus Biomasse

Bis zum Jahr 2000 sollen 3 % der für Heizzwecke genutzten Energie sowie 0,5 % der für Elektrizität genutzten Energie durch erneuerbare Energieträger zur Verfügung gestellt werden (ENERGIE 2000). Ein für die Zukunft möglicher und wichtiger Energieträger stellt dabei die Biomasse dar, die auf freiwerdenden Flächen der Futter- und Nahrungsmittelproduktion energetisch genutzt werden kann. Im Vordergrund steht dabei die **energetische Nutzung von Dauergrünland, mehrjährigen Kunstwiesen und Chinaschilf** auf Ackerland sowie die Nutzung von **Feldholz**, einem Gemisch von einheimischen, schnellwachsenden Busch- und Baumarten, das sowohl auf Ackerland als auch auf Grünland angebaut werden kann.

Ökologie

Aufgrund des zunehmenden Umweltbewusstseins müssen sowohl Energiesysteme als auch landwirtschaftliche Produktionsverfahren immer mehr ökologischen Kriterien gerecht werden. Bei der Evaluation von Produktionsverfahren und Energieanlagen müssen deren Auswirkungen auf die Umwelt wie z.B. der Treibhauseffekt, die Ozonbildung, der Einfluss auf Artenvielfalt oder die Nährstoffbelastungen von Luft, Boden und Wasser berücksichtigt werden.

Landwirtschaftliche Situation 1991

Nach Schätzungen des Schweizerischen Bauernverbandes bzw. des Bundesamtes für Landwirtschaft sollte zur **Vermeidung einer Überproduktion** bis 1996 eine Gesamtfläche von 80 000 Hektaren der landwirtschaftlichen Nutzfläche der Nahrungs- und Futtermittelproduktion entzogen werden, davon 40 000 ha Ackerland und 40 000 ha Grünland.

Energetische Nutzung von Grasland

Drei Viertel der schweizerischen landwirtschaftlichen Nutzfläche besteht aus Grasland. Das Landschaftsbild wird massgebend vom Grasland geprägt. Der Verzicht auf eine Nutzung bzw. die Vernachlässigung der Flächenbewirtschaftung haben eine Verbuschung und spätere Bewaldung zur Folge. Unabhängig von der Bewirtschaftungsintensität fällt Biomasse an, die - soll sie nicht als Futter dienen - energetisch genutzt werden kann.

Bei einer genutzten Fläche von 50 000 ha mit einem durchschnittlichen Ertrag von 6 t TS/ha ergibt die energetische Nutzung der Biomasse eine Erdölsubstitution von 83 000 Tonnen Heizöl. Dies entspricht rund **1,6 % des schweizerischen Heizölverbrauchs**.

Wald und Landwirtschaft

Der **Wald** wird heute deutlich unter seinem Energiepotential genutzt. Es fehlen leistungsfähige Energienutzungs- und Verteilzentralen. Im Projekt Energiegras/Feldholz sollten die Synergieeffekte zwischen Wald und Landwirtschaft ausgenutzt und gefördert werden. So kann der Bau von Feuerungsanlagen mit kombinierter Nutzung von Energiegras und Holz regional neue Absatzmärkte für Holzschnitzel schaffen. **Feldholz** stellt eine landwirtschaftliche Form des Holzanbaus dar. Im Gegensatz zum Wald können die Flächen jederzeit wieder in die Nahrungs- oder Futtermittelproduktion rückgeführt werden.

Aufbau des Berichtes

Im wissenschaftlichen Schlussbericht liegen die Resultate von zehn verschiedenen Teilprojekten als Einzelberichte vor. Im vorliegenden Bericht werden die beiden Verfahren **Verbrennung und Biogaszeugung** vorgestellt und die wichtigsten Ergebnisse unter Einbezug neuer Erkenntnisse aus Folgeprojekten [2-5] anhand von **Beispielen** veranschaulicht.

3.2 DIE TEILPROJEKTE

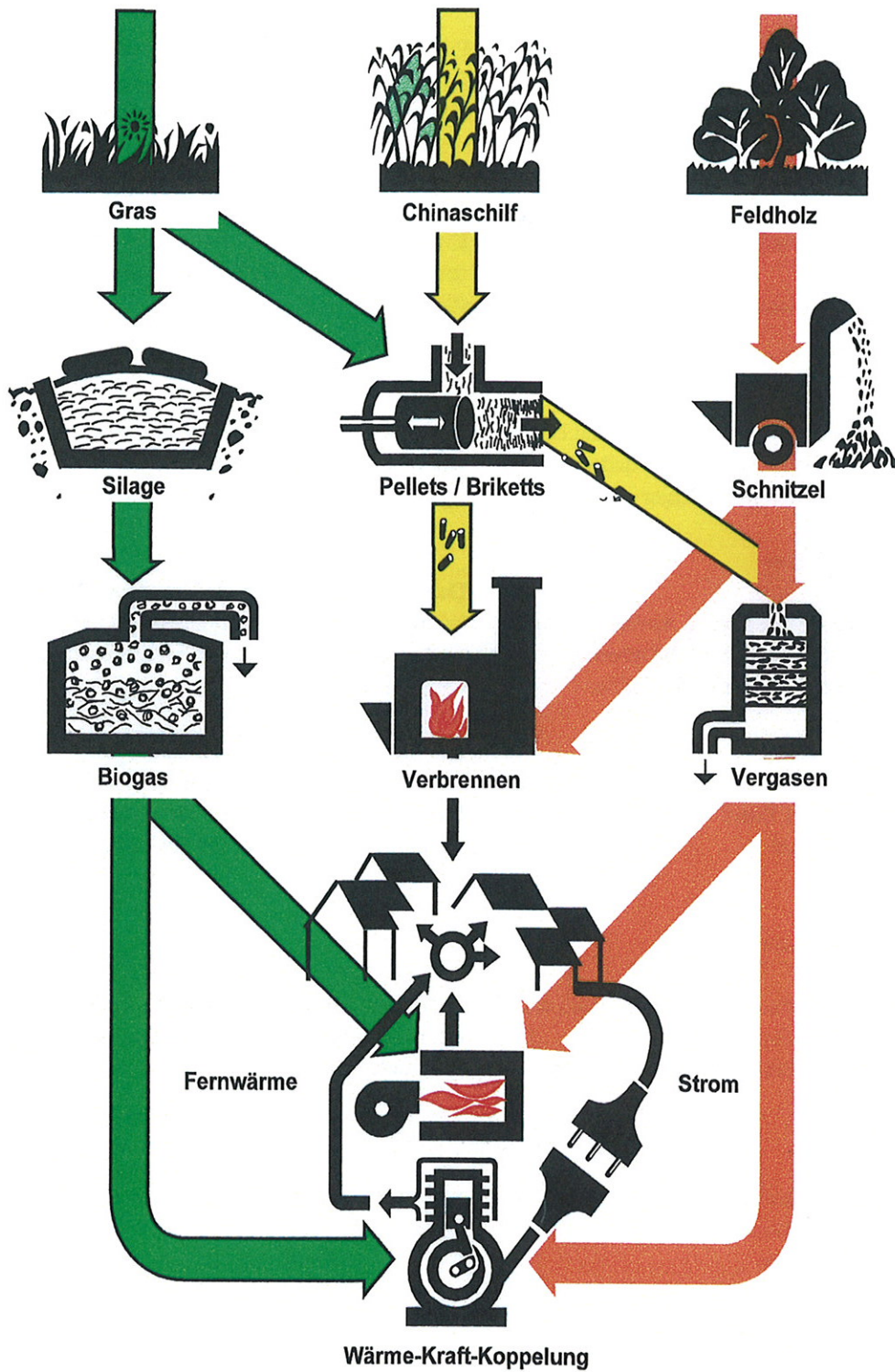


Abb. 1: Das Energiegrasprojekt im Überblick

Teilprojekt A: Energiegras

Eidg. Forschungsanstalt für landwirtschaftlichen Pflanzenbau, 8046 Zürich-Reckenholz
 Projektleiter: Dr. E. Meister

Ziele

Evaluation geeigneter Wiesentypen, die den landwirtschaftlichen, ökologischen und energetischen Anforderungen genügen. Vergleich zur Ackerkultur Miscanthus.

Teilprojekt B: Feldholz

Eidg. Forschungsanstalt für Obst-, Wein- und Gartenbau, 8820 Wädenswil
 Projektleiter: Dr. J. Rüegg

Evaluation eines Gemisches verschiedener Baum- und Buscharten, welche den Anforderungen der Oekologie, Energie- und Landwirtschaft entsprechen.

Teilprojekte C & D: Verbrennen /Vergasen

Eidg. Technische Hochschule, Institut für Energietechnik, 8092 Zürich
 Projektleiter: Dr. Th. Nussbaumer

Evaluation geeigneter Verbrennungs und Vergasungsverfahren. Grundlagen der Biomasseverbrennung vervollständigen.

Teilprojekt E: Biogas

Eidg. Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik (FAT), INFOENERGIE, 8356 Tänikon
 Projektleitung: Dr. U. Baserga, K. Egger

Evaluation eines geeigneten Verfahrens zur Produktion von Biogas aus Energiegras.

Teilprojekt F: Stoffflüsse

Eidg. Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EAWAG), 8600 Dübendorf
 Projektleitung: Prof. Dr. P. Baccini, D. Müller

Darstellung der Energie- und Stoffflussbilanzen ausgewählter Elemente für Energiegras und Feldholz in einer typischen Mittellandregion. Grundlagenarbeit für Ökobilanzen.

Teilprojekt G: Ökobilanz

CARBOTECH AG, 4051 Basel
 Projektleiter: Dr. F. Dinkel

Erstellung von Ökobilanzen für verschiedene Nutzungsformen von Energiegras und Feldholz.

Teilprojekt H: Ökonomie

Eidg. Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik (FAT), 8356 Tänikon
 Projektleiterin: T. Trauboth-Müller

Volks- und betriebswirtschaftliche Beurteilung des Anbaus und der energetischen Nutzung von Energiegras und Feldholz.

Teilprojekt I: Logistik

Eidg. Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik (FAT), 8356 Tänikon
 Projektleiter: J.-L. Hersener

Sicherstellen des Handlings und der Logistik vom Anbau bis zur energetischen Umsetzung.

Teilprojekt K: Projektmanagement

FAT, 8356 Tänikon,
 Ingenieurbüro HERSENER, 8542 Wiesendangen
 Projektleiter: J.-L. Hersener

Projektkoordination

3.3 METHODISCHE GRUNDLAGEN

Neben der Abklärung der technischen und logistischen Fragen des Anbaus und der energetischen Nutzung der Biomasse ist die ökonomische und ökologische Beurteilung ein wichtiger Aspekt der Verfahrensevaluation. Zum besseren Verständnis der in den Anlagenbeispielen vorgestellten Resultate werden im folgenden Abschnitt die methodischen Grundlagen der ökologischen und ökonomischen Beurteilung zusammengefasst.

Ökobilanzen

Durch die **Erstellung von Ökobilanzen** soll abgeklärt werden, ob es aus ökologischer Sicht wünschbar ist, wenig intensiv angebaute Biomasse energetisch zu nutzen. Hiezu wurden verschiedene Szenarien definiert, die einen Vergleich mit dem heutigen intensiven als auch mit einem zukünftigen extensiveren Anbau ermöglichen.

Die **Festlegung von Szenarien** sollte gewährleisten, dass die energetischen, ökologischen und ökonomischen Auswertungen der Forschungsergebnisse von allen Teilprojekten auf den gleichen Annahmen aufbauen und in übersichtlicher Form präsentiert werden können. Die Szenarien umfassten sämtliche Prozesse vom Anbau der Energieträger bis zur Gewinnung von Wärme und Strom. Sie unterscheiden sich durch unterschiedliche Zielvorgaben: Einerseits soll der Energieverbrauch an nichterneuerbarer Energie durch den Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen verringert werden, andererseits ist aufgrund der Belastungen der Landwirtschaft eine Extensivierung der Nutzung notwendig.

Mit Hilfe der festgelegten Szenarien sollten im wesentlichen zwei Fragen beantwortet werden:

- Stellt die energetische Nutzung von Energiegras/Feldholz unter extensiven Anbaubedingungen gegenüber der heutigen Situation eine Verringerung der Umweltbelastung dar?
- Wie gross ist die Belastung der energetischen Nutzung von Energiegras/Feldholz gegenüber einer zukünftigen extensiven Bewirtschaftung mit Nutzung von fossilen Brennstoffen?

Insgesamt wurden sieben Verbrennungs-Szenarien und fünf Vergärungs-Szenarien betrachtet. In den Vergleichs-Szenarien wird die Energie jeweils aus nichtnachwachsenden Energieträgern bereitgestellt. Vor dem Hintergrund der politischen Absichtserklärung, Überschüsse zu reduzieren und die Landwirtschaft zu extensivieren (Agrarpaket 2002), wurde die Nutzung der heutigen Wiesen als Futter nicht mitberücksichtigt.

Als Beispiel sind in Tabelle 1 je ein Szenario der Verbrennungs- und der Vergärungslinie aufgeführt. In diesen Szenarien werden die Umwelteinwirkungen der energetischen Nutzung einer extensiven Naturwiese mit den Umweltbelastungen einer energetisch ungenutzten Naturwiese verglichen. In den **Vergleichsszenarien** wird die Energie durch fossile Energieträger bereitgestellt. Für die Berechnung der stofflichen Ökobilanz wird der Verwertung der Asche als Dünger (Verbrennung) bzw. der Verwertung des vergorenen Substrates als Dünger die Kompostierung des gemähnten Grases gegenübergestellt.

VERBRENNUNG		
Szenario 2	ENERGIEGRAS	VERGLEICHSSZENARIO
Kultur	Extensive Wiese	Extensive Wiese
Wärme	Wärme aus Verbrennung	Wärme aus Verbrennung von Heizöl
Strom	-	-
Verwertung	Asche für Düngung (Fremdfläche)	Kompostieren der Ernte (Düngung Fremdfläche)
Daten	Biomasseertrag: 3t TS pro ha und Jahr	Nutzenergie Wärme: 40 GJ pro ha und Jahr

VERGÄRUNG		
Szenario 7	ENERGIEGRAS	VERGLEICHSSZENARIO
Kultur	Extensive Wiese	Extensive Wiese
Wärme	Wärme aus Vergärung	Wärme aus Verbrennung von Heizöl
Strom	Strom aus Vergärung	Strom aus Netz
Verwertung	Gärssubstrat für Düngung (Fremdfläche)	Kompostieren der Ernte (Düngung Fremdfläche)
Daten	Biomasse-Ertrag: 3t TS pro ha und Jahr	Wärme: 14 GJ / Strom: 7 GJ pro ha und Jahr

Tabelle 1: Szenarienbeispiele der Verbrennung und der Vergärung

Ökonomie

Die ökonomischen Auswirkungen der energetischen Nutzung von Energiegras und Feldholz sind vielfältig. Die zentrale Fragestellung behandelt die Konzeption und ökonomische Bewertung eines wettbewerbsfähigen Energiesystems. Zusätzlich interessieren die Wettbewerbsfähigkeit der Energiekulturen im Vergleich zu den üblichen Agrarprodukten sowie der zu erwartende Einkommensbeitrag für den Bauern bzw. der staatliche Stützungsbedarf.

Die Berechnungen beruhen auf den üblichen Methoden des Wirtschaftlichkeitsvergleichs. **Investitionskosten** müssen im Laufe ihrer Nutzungsdauer wie-

fahrenskosten, der Brennstoffbereitstellung und den Nutzungskosten (entgangener Deckungsbeitrag der Vergleichskultur). Der Brennstoff wird mit einem Gleichgewichtspreis bewertet. Dies ist der Brennstoffpreis, der bezahlt werden muss, um mit einer Referenzanlage Kostengleichheit zu erlangen. Der Gleichgewichtspreis hängt im wesentlichen von den Mehrkosten der Biomasseanlage gegenüber einer Heizölanlage sowie vom Heizölpreis und dem Heizwert der verwendeten Biomasse ab (siehe Kasten).

Beim **Biomasse-Anbau** ist der Aufwand und Ertrag von der gewählten Energiepflanze abhängig. Tabelle 2 zeigt vier Beispiele ausgewählter Anbauvarianten von Energiegras. Auf der Datengrundlage von Ver-

VERBRENNUNG		Varianten G2 (Extensive Wiese) und G9 (Reinsaat)		
	Szenario	Schnitte pro Jahr	Düngung	TS-Ertrag pro Jahr
Extensive Naturwiese	2	1	keine	3
Reinsaat	9	2	2 x Gülle	14

VERGÄRUNG		Varianten BG3 (Extensive Wiese) und BG7 (Mittelintensive Wiese)		
	Szenario	Schnitte pro Jahr	Düngung	TS-Ertrag pro Jahr
Extensive Naturwiese	7	1	keine	3
Mittelintensive Wiese	6	3	1 x Gülle	10

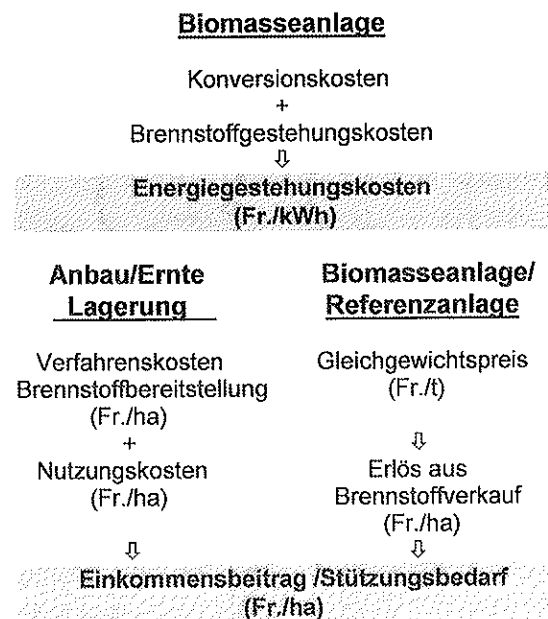
Tabelle 2: Beispiele von Energiegrasanbauvarianten

dergewonnen werden. Sie werden in jährliche Kosten über die Annuitätenrechnung aufgeteilt. Die **Verfahrenskosten des landwirtschaftlichen Anbaus** verstehen sich als erweiterte Deckungsbeitragsrechnung, ergänzt um die Nutzungskosten der Arbeit sowie alle im Vergleich zum üblichen landwirtschaftlichen Anbau zusätzlichen Aufwendungen.

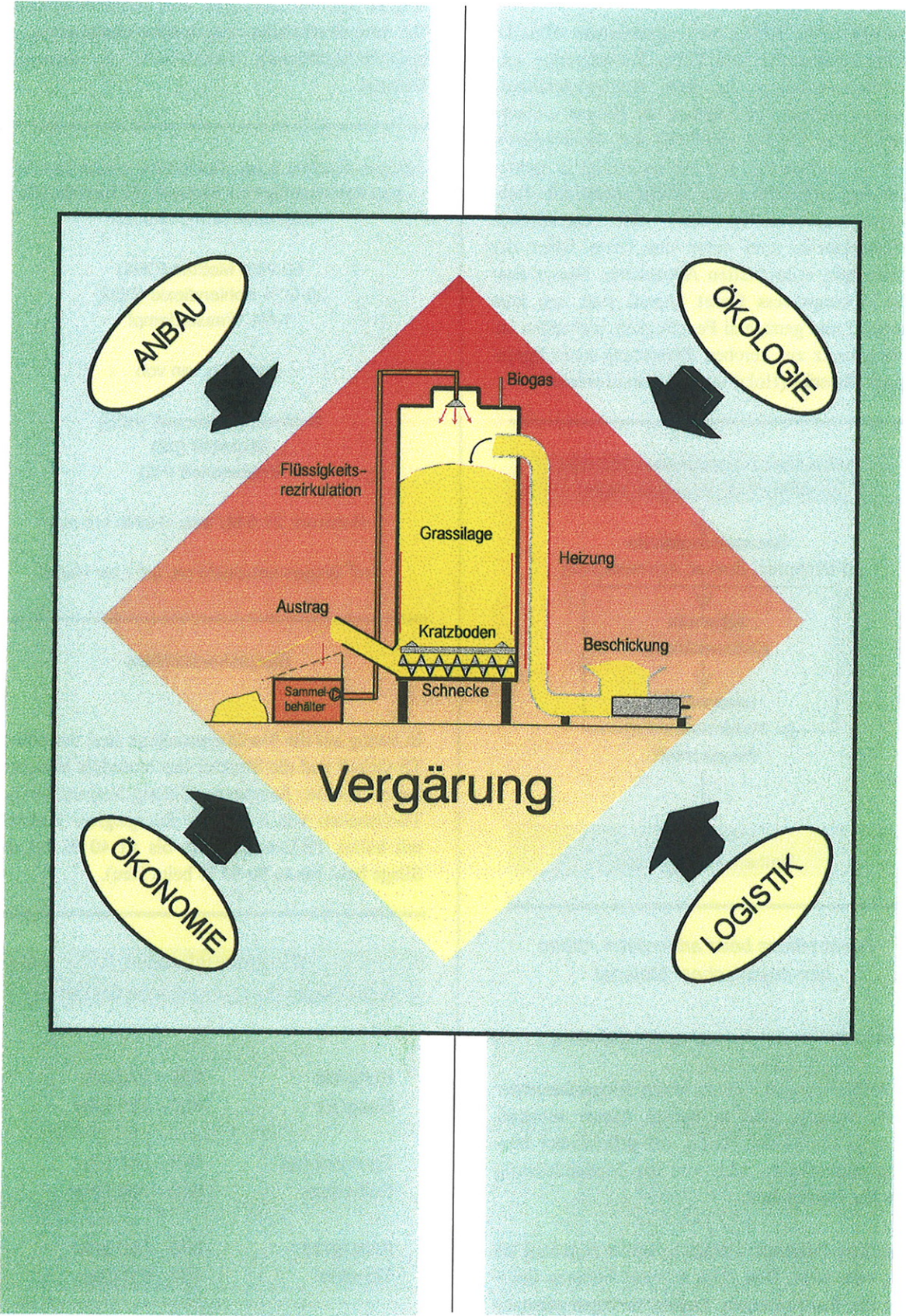
Die **Energiegestehungskosten in Fr./kWh Nutzenergie** sind eine wichtige Grösse aus energiewirtschaftlicher Sicht, da sie Auskunft über die Wettbewerbsfähigkeit des Energiesystems und der Energiekulturen untereinander geben. Sie setzen sich zusammen aus den Brennstoffgestehungskosten und den Konversionskosten (Kosten der Biomasseanlage). Langfristig ist diejenige Kultur am günstigsten, die mit dem geringsten Aufwand den höchsten Energieertrag erreicht.

Der **Einkommensbeitrag in Fr./ha** für den Landwirt bzw. der Stützungsbedarf in Fr./ha ergibt sich aus dem Erlös aus dem Brennstoffverkauf, den Ver-

suchergebnissen der technischen und agronomischen Teilprojekte sowie durch Literaturstudien wurden verschiedene ökonomische Aspekte herausgearbeitet und mehrere Szenarien durchgerechnet.



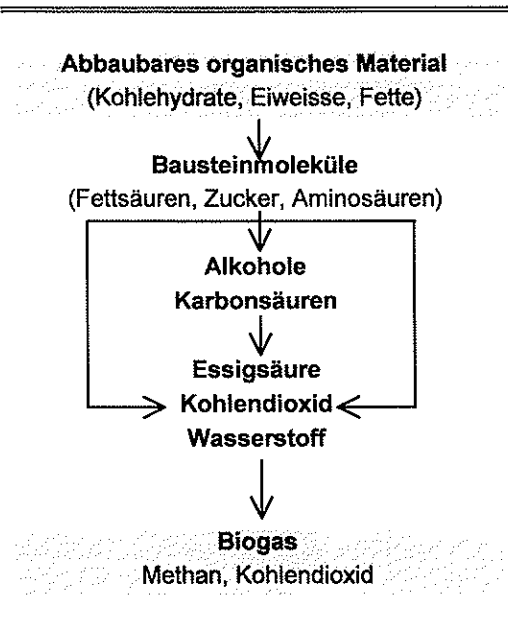
4. VERGÄRUNG VON ENERGIEGRAS



4.1 TECHNOLOGIE

Die Methangärung

Beim anaeroben Abbau von organischem Material werden Inhaltsstoffe wie Fette, Kohlehydrate und Eiweissverbindungen in ihre niedermolekularen Bausteine zerlegt und letztlich zu Biogas - einem Gemisch von Methan (50-70%) und Kohlendioxid (30-50%) - umgesetzt. Der Abbau erfolgt in mehreren Stufen, wobei für jeden Schritt spezifische Bakteriengruppen beteiligt sind. Die eigentlichen Methanbakterien sind dabei das letzte Glied der mehrstufigen mikrobiellen Abbaukette. Dieser anaerobe Abbauprozess findet überall statt, wo kein Sauerstoff und genügend Feuchtigkeit vorhanden ist. Im Gegensatz zur aeroben Zersetzung kann ligninhaltiges Material (Holz) nicht abgebaut werden.



Substratfluss beim anaeroben Abbau von organischem Material

Besonderheiten der Energiegrasvergärung

Die Anforderungen, die an einen Biogasfermenter gestellt werden, sind in hohem Masse substrat-abhängig. Die Methangärung von pflanzlicher Biomasse unterscheidet sich von der Methanisierung tierischer Exkrememente.

Pflanzliche Substrate werden schneller abgebaut als Gülle oder Mist. Dies führt zu einer höheren Belastung des Faulprozesses. Zudem verfügen pflanzliche Materialien über eine geringe Pufferkapazität. Im Gegensatz zur Biogaserzeugung aus Gülle- oder Mistsubstraten ist für die Gewährleistung eines stabilen

Gärprozesses, insbesondere bei hohen Belastungen, eine Pufferung notwendig. Für die Energiegrasvergärung bietet sich die Mitvergärung von Gülle oder Mist als sinnvolle Lösung an. Eine weitere Möglichkeit zur Aufrechterhaltung eines stabilen Faulprozesses ist auch die Rückführung (Rezirkulation) von vergorenem Material.

Biogas entsteht beim mikrobiellen anaeroben Abbau von organischem Material. Es besteht aus folgenden Komponenten:

- 50-70% Methan (CH₄)
- 30-50% Kohlendioxid (CO₂)
- 1-5% Wasserdampf

sowie Spuren von

- Schwefelwasserstoff (H₂S)
- Stickstoff (N₂)
- Wasserstoff (H₂)

Heizwert: 21.5 MJ bzw. 6 kWh pro m³

1m³ Biogas entspricht ca. 0.6 Liter Heizöl

Biogaskennzahlen

In Bezug auf die Verfahrenstechnik sind der höhere TS-Gehalt und die Struktur des Materials hervorzuheben (Gülle: homogene Flüssig-Suspension mit TS-Gehalten von 3-10 % / Energiegras: Feststoff mit hohen TS-Gehalten von bis zu 40 % bei der Silage bzw. bis zu 90-95 % beim Heu).

Biogasausbeuten

(Liter Biogas pro kg organische Substanz)

Kuhgülle	220 - 270 Liter
Sauggülle	430 - 470 Liter
Extensogras	500 - 550 Liter
Fettwiese	600 - 700 Liter
Knautgras	500 - 550 Liter
Timothe	480 - 500 Liter

Biogasausbeuten diverser Substrate

Komponenten einer Biogasanlage

Abbildung 2 zeigt die wichtigsten Komponenten einer Biogasanlage anhand des Beispiels einer Co-Vergärungsanlage. Grundsätzlich setzt sich eine Biogasanlage aus den Elementen **Vorbehandlung**, **Biogasproduktion** (Fermenter), **Gasaufbereitung und Gasspeicherung** (Gasnetz), **Gasumwandlung** (Strom und Wärmeerzeugung) sowie der **Lagerung** und Verwertung des vergorenen Materials zusammen.

Die Komponenten der **Vorbehandlung** hängen vom verwendeten Gärsubstrat ab. Für flüssige Substrate wie Gülle ist in der Regel nur eine Vorgrube notwendig, in welcher die Flüssigsubstrate vermischt und chargenweise in den Fermenter gepumpt werden. Bei der Verwendung von Feststoffen ist eine zusätzliche Zerkleinerung des Gärmaterials (Häcksler, Mixerpumpe, Mazerator) erforderlich.

Die zentrale Komponente einer Biogasanlage ist der **Fermenter**, in welchem die anaerobe Vergärung und die Biogasproduktion stattfindet. Wichtigste Elemente sind das Rührwerk (Durchmischung des

Fermenterinhalt, Verhinderung der Schwimmdecken- und Sedimentbildung), die Fermenterheizung und die Isolation des Gärbehälters.

Das **Gasnetz** besteht in der Regel aus verschiedenen Sicherheitsarmaturen (Über- und Unterdrucksicherung, Kondenswasserabscheider, Flammenrückschlagsicherung) und - falls erforderlich - Gasreinigungsinstallationen (Entschwefelung) sowie einem Gasspeicher.

Das produzierte Biogas wird in einem Blockheizkraftwerk (**Wärme-Kraft-Kopplungsanlage**) verbrannt. Dabei werden rund ein Drittel der im Biogas enthaltenen Energie in hochwertigen elektrischen Strom und zwei Drittel in Wärme (Warmwasser) umgewandelt.

Das vergorene Substrat muss vor der landwirtschaftlichen **Verwertung** gelagert werden können. Für Gülle werden dabei herkömmliche Lagergruben oder Güllesilos verwendet. Bei der Co-Vergärung fallen in der Regel auch Feststoffe an, die separat gelagert bzw. nachkompostiert werden können.

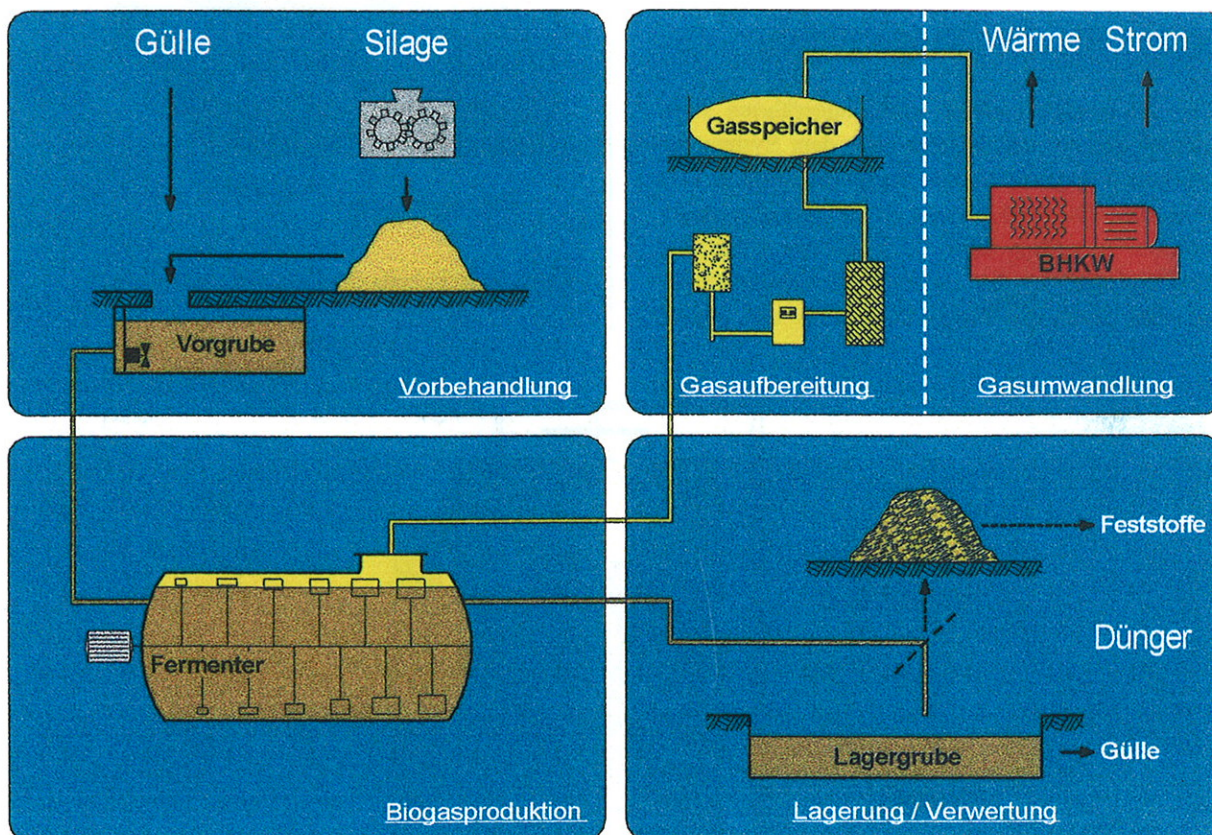


Abb. 2: Komponenten einer Biogasanlage

4.2 ANLAGENBEISPIELE

Im Labor wurden verschiedene kontinuierliche Gärverfahren für die Biogaszeugung aus Energiegras untersucht, Betriebsarten entwickelt und die Dimensionierungsgrundlagen geeigneter Verfahren bestimmt. Die batchweise Vergärung von Energiegras wurde in einem anderen Forschungs-Projekt untersucht [9]. Die besten Chancen für die technische Umsetzung wurden zwei Gärverfahren eingeräumt, die in der landwirtschaftlichen und kommunalen Praxis schon im Einsatz stehen: Bei der **Trockenvergärung** wird das Energiegras in einem speziellen Feststoff-Fermenter ohne Aufschlammung bzw. unter Zugabe von wenig Flüssigkeit bei einem Trockensubstanzgehalt von rund 25-35 % vergärt. Beim Verfahren der **Co-Vergärung** wird das Grasmaterial einer modifizierten Güllebiogasanlage zugegeben und in einem Flüssigkeitsfermenter zusammen mit der anfallenden Gülle vergärt (TS-Gehalt Fermenterinhalt: ca. 8-12 %). Beide Verfahren konnten durch Untersuchungen auf einer Pilotanlage und auf einer landwirtschaftlichen Co-vergärungsanlage auf ihre Praxistauglichkeit hin überprüft werden.

4.2.1 FESTSTOFF-PILOTANLAGE

Die Pilotanlage umfasst einen ungerührten Feststoff-Fermenter und arbeitet nach dem System der trockenen, kontinuierlichen Vergärung (Abb.3). Das Silagematerial wird benetzt in den Beschickungsstrichter eingefüllt. Eine Kolbenpresse presst das Frischsubstrat in das beheizte Beschickungsrohr, welches durch die Fermenterwand in den oberen

Teil des Gärbehälters führt. Die Silage bewegt sich von oben nach unten durch den Fermenter und wird dabei vergärt. Auf der Fermenterunterseite wird das vergorene Substrat mit einer Schnecke ausgetragen, welche von einem Kratzboden gespiesen wird. Zur Kompensation der Wärmeverluste ist die untere Hälfte des Fermenters mit einer Heizwand versehen. Das Biogas wird am Deckel des Fermenters entnommen, wo auch die Überdrucksicherung installiert ist. Zur Benetzung des Fermenterinhalt wird Gülle verwendet, welche in einem Flüssigkeitsbehälter gesammelt und mit einer Pumpe rezirkuliert wird.

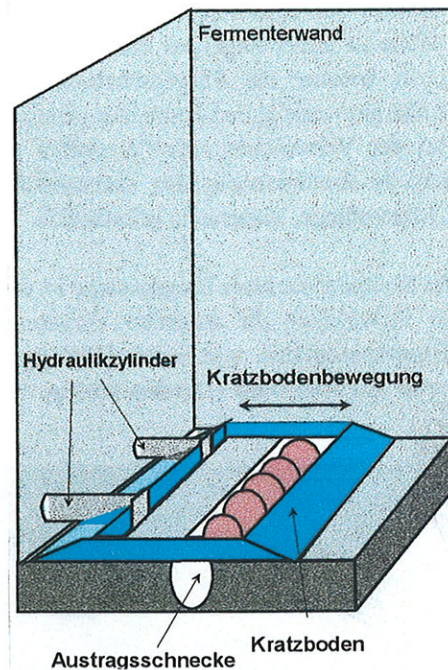
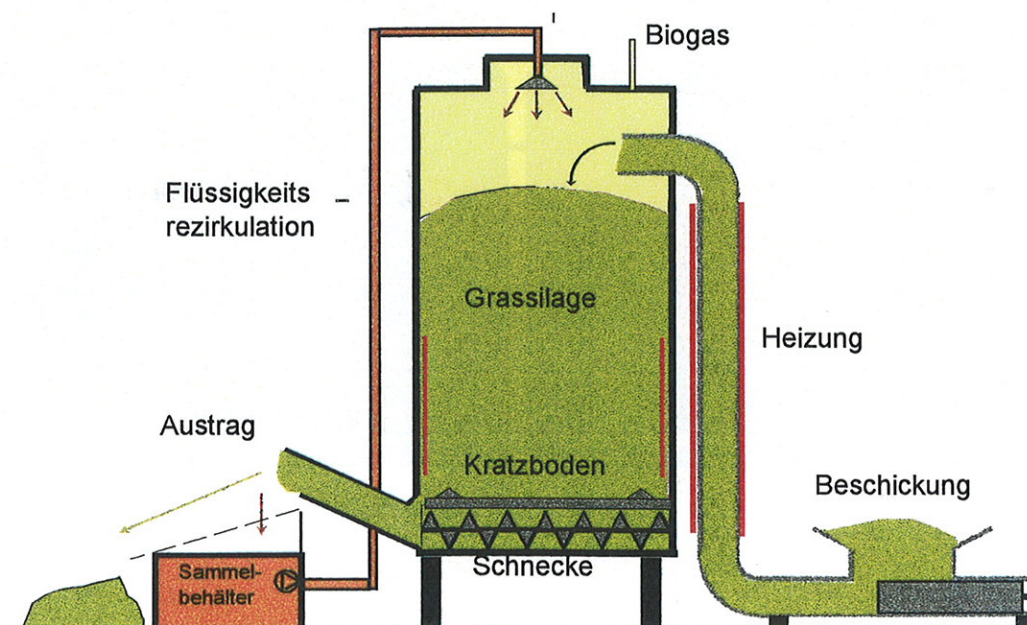


Abb. 3: Schemata der Feststoffpilotanlage



Betrieb der Anlage

Zum Anfahren der Anlage wird der Fermenter teilweise oder vollständig mit Festmist beschickt, welcher mit Gülle oder Faulschlamm angeimpft wird. Nach der Befüllung kann mit dem semikontinuierlichen Betrieb (tägliche Zugabe und Entnahme von frischem bzw. vergorenem Material) begonnen werden. Die Beschickung erfolgt mit Extensograssilage, die über Nacht in ein Wasser/Gülle-Gemisch eingetaucht wurde. Als Benetzungsflüssigkeit setzt man vorzugsweise Schweine oder Rindergülle ein, die direkt nach dem Silageeintrag in den Fermenter gepumpt wird.

Gasproduktion

Bei einer optimalen Betriebsweise wird bei der Vergärung von Extensograssilage im Feststoff-Fermenter eine **Biogasausbeute** von 500-550 Liter Biogas pro Kilogramm zugeführte organische Substanz erreicht. Die **Benetzung des Silagematerials** hat einen bedeutenden Einfluss auf die Gasproduktion. Eine Unterbrechung der Benetzung führt zu einer Austrocknung des Materials, was eine drastische Abnahme der Gasproduktion zur Folge hat. Für eine maximale Gasproduktion ist eine ausreichende Benetzung unerlässlich. Die täglich rezirkulierte Flüssigkeitsmenge soll rund 10% des Feststoffvolumens betragen.

Einen negativen Einfluss auf die Gasproduktion kann auch die Verwendung von stark komprimierter Silage haben. Damit ein optimaler Abbau stattfinden kann, muss das Silagematerial als lockere Schüttung in den Fermenter eingebracht werden. Dies bedingt eine gute mechanische Auflösung von komprimierten Silageballen.

Betriebszuverlässigkeit

Während der rund siebenmonatigen Versuchsdauer konnte die Pilotanlage ohne gravierende Probleme betrieben werden. Betriebsunterbrüche infolge technisch oder konzeptionell bedingter Mängel der Anlage blieben aus. Das Anlagenkonzept kann somit für die Vergärung von Silage empfohlen werden. Die hydraulisch betriebene Kolbenpresse hat sich für die Beschickung mit Festmist bestens bewährt. Die Beschickung von Grassilage ist mit der Kolbenpresse ebenfalls möglich. Das trockene Silagematerial muss jedoch vor dem Eintrag eingeweicht werden. Als vorteilhaft hat sich die sporadische Zugabe von Mist als „Schmierstoff“ erwiesen.

Beim **Austrag des vergorenen Silagematerials** traten keine nennenswerten Probleme auf. Das fermenterinterne Austragskonzept (Kratzboden mit versenkter Austragsschnecke) kann für die Vergärung von Silage empfohlen werden.

Prozess-Stabilität

Die Pilotanlage wurde mit Raumbelastungen zwischen 3 und 5 kg OS/m³ und Tag bei einer Verweilzeit von rund 30 Tagen und einer Gärtemperatur von rund 35° betrieben. Dabei stellte sich ein stabiler Gärprozess ein. Die biologischen Messwerte deuten darauf hin, dass in der Praxis mit noch höheren Belastungen gefahren werden kann, ohne dass Probleme mit der Prozessbiologie zu erwarten sind.

Hinweise für die Praxis

Die Pilotversuche haben gezeigt, dass Grassilage in einem Feststoff-Fermenter mit Flüssigkeitsrezirkulation vergoren und für die Biogaserzeugung genutzt werden kann.

Ausschlaggebender Faktor für eine hohe Gasausbeute ist eine ausreichende Benetzung des Fermenterinhaltens mit Gülle oder einer anderen puffernden Flüssigkeit. Eine Fermenterkonstruktion mit einem separaten Flüssigkeitskreislauf ist für den Betrieb einer Praxisanlage von Vorteil. Durch die Entkopplung von Feststoff- und Flüssigkeitsaustrag kann bei einem getrennten System die Benetzung (Rezirkulationsrate, Flüssigkeitsvolumen) unabhängig von der Feststoffentnahme betrieben werden.

Da das Fermenternutzvolumen im Gegensatz zu einer Flüssiganlage (Verdrängungssystem) variieren kann, sind in einer Feststoff-Praxisanlage sporadische Niveauekontrollen nötig. Zudem sollten zur Kontrolle des Verweilzeitverhaltens von Zeit zu Zeit einfache Kontrollmessungen durch Zugabe von farbigen (im vergorenen Material gut sichtbaren) Trinkhalmen erfolgen.

Für die landwirtschaftliche Ausbringung sind dieselben Gerätschaften wie für den Festmist verwendbar. Die vergorene Silage kann nach der Lagerung auf einer Mistplatte problemlos mit einem herkömmlichen Miststreuer ausgebracht werden.

4.2.2 COVERGÄRUNGSANLAGE

Für landwirtschaftliche Anlagen ist die Co-Vergärung von Silage in einer Flüssiganlage interessant, weil die ohnehin vorhandene Gülle zusätzlich mit dem Energiegras vergoren und für die Biogasproduktion genutzt werden kann. Durch die hohe Pufferkapazität der Güllesubstrate ist auch bei hohen Belastungen ein stabiler Gärprozess garantiert. Der technische Mehraufwand, der im Vergleich zur reinen Güllevergärung betrieben werden muss, hängt in erster Linie von der Art und der Menge des zu vergärenden Substrates ab:

Feststoffe, die sich gut mit der Gülle vermischen (Mistsubstrate mit geringem Strohanteil, Gemüseabfälle) sowie flüssige Co-Substrate wie Schotte oder Altfett können in bestehenden Flüssigbiogasanlagen ohne grössere Anpassungsarbeiten vergoren werden.

Bei stark schwimmdeckenbildenden Substraten wie **Grassilage** sind jedoch Anpassungen im Bereich der **Beschickung** (Einsatz eines Häckslers, einer Mixerpumpe oder eines Mazerators) und der Schwimmdeckenbeherrschung notwendig (effizientes Rührwerk, verstopfungsfreier Fermenterauslauf). Ebenso muss bei der **Wahl der Fermenterform** auf die Besonderheiten der Co-Vergärung geachtet werden. Bei einem hohen Anteil von schwimmdeckenbildenden Feststoffen ist in der Regel ein liegender Fermenter mit einem durchgehenden langsam drehenden Haspelrührwerk besser geeignet als ein stehender Behälter.

Betrieb einer Praxisanlage

In einem mehrmonatigen Versuch wurde auf einer Praxisanlage die technische Machbarkeit der Co-Vergärung von Energiegras untersucht (Abb.5).

Zudem sollte der Versuch darüber Aufschluss geben, wie gross der zusätzliche Arbeitsaufwand für den Energiegrasbetrieb ist.

Für den **Praxisversuch** verwendete man Rundballensilagen von extensiv bewirtschafteten Wiesen mit TS-Gehalten zwischen 26 und 32%. Die Halme werden mit einem Häcksler auf eine Schnittlänge von 1-3 cm verkürzt, in der Vorgrube mit der Schweinegülle vermischt und in den Fermenter gepumpt. Während des Versuchsbetriebes wurde die Anlage täglich mit **500-600 kg Silage** und **6-7 m³ Sauggülle** beschickt. Der Trockensubstanzgehalt der Suspension lag zwischen 8 und 10 %.

Gasproduktion

Wie aus Abbildung 4 ersichtlich ist, konnte die Gasproduktion durch die Zugabe des Silagematerials von 160 m³ auf über 250 m³ Biogas pro Tag gesteigert werden. Dies entspricht einer Zunahme von gegen 60 %. Die auf die Silage bezogene Gasausbeute beläuft sich auf 500-550 Liter/kg zugeführte organische Substanz. Nach dem Unterbruch des Silagebetriebes (zwischenzeitliche Zugabe von Weizenabgang mit Erhöhung der Gasproduktion auf rund 320 m³ pro Tag) wurde die Anlage Ende August nochmals mit Extensograssilage beschickt. Der Gasertrag pegelte sich nach einer Abklingzeit von wenigen Tagen wieder auf den ursprünglichen Wert von 250 m³ ein. Der starke Anstieg auf über 350 m³/d nach Abschluss des Silageversuchs ist auf die neuerliche Zugabe von Weizenabgang und von Rapsschrot zurückzuführen.

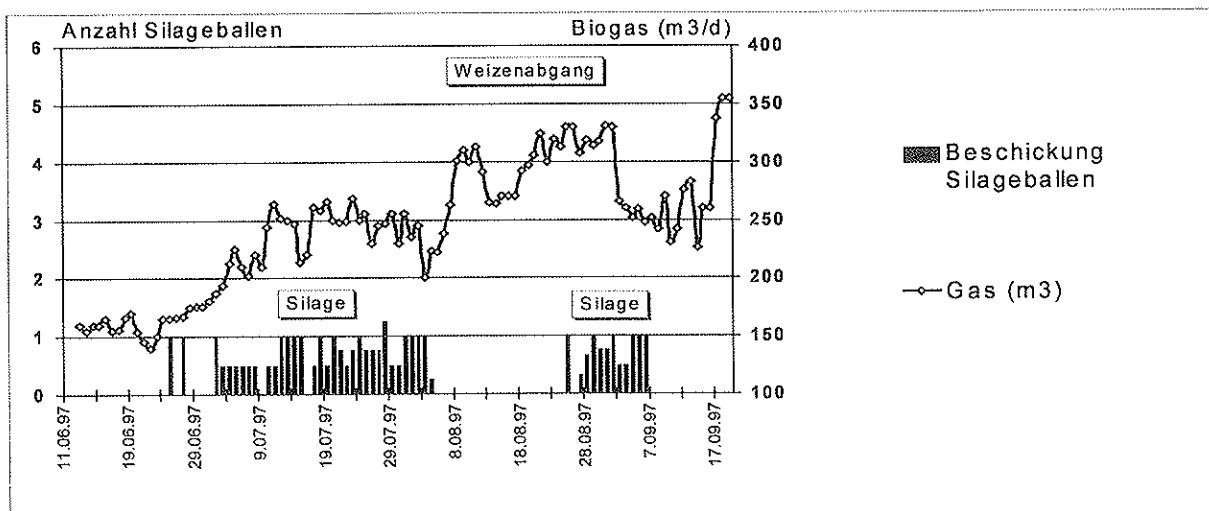


Abb. 4: Gasproduktionssteigerung durch Covergärung von Energiegrassilage

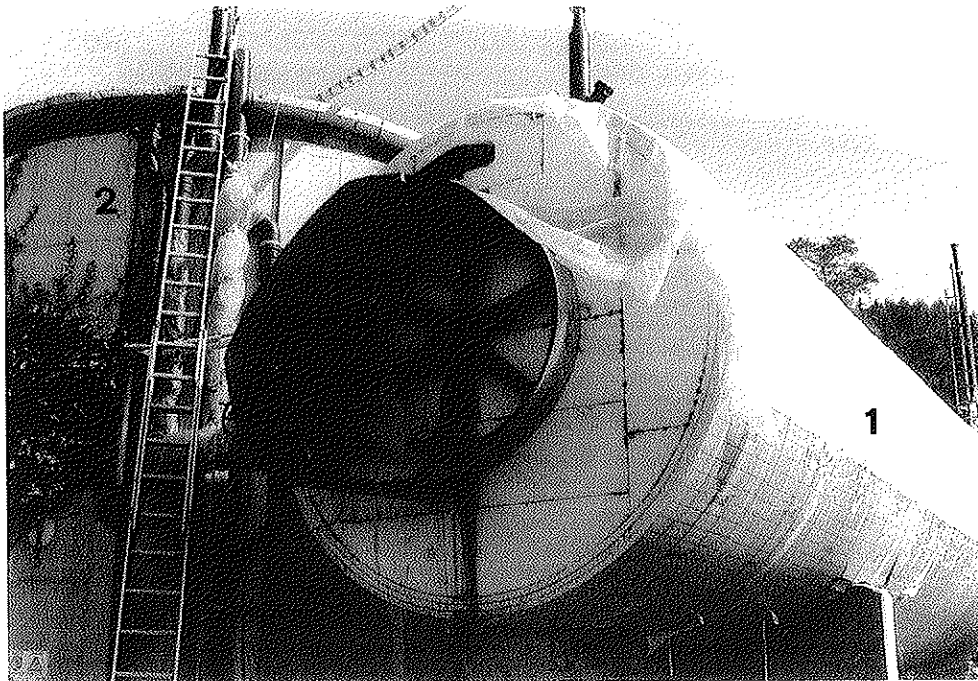


Abb. 5: Teilansicht der Covergärungsanlage

1) Liegender Fermenter mit Haspelrührwerk, 2) stehender, nachgeschalteter Flüssigkeitsfermenter

Silagezerkleinerung

Wichtigste Voraussetzung für einen möglichst problemlosen Betrieb der Biogasanlage ist die Vorzerkleinerung der Silage. Generell gilt, dass die Verstopfungsanfälligkeit und das Ausmass der Schwimmdeckenbildung mit zunehmendem Zerkleinerungsgrad der Silage abnimmt. Mit dem Häcksler wurden die Grashalme auf eine Länge von zwei bis drei Zentimeter verkürzt. Gemäss dem Anlagenbetreiber, welcher auch eine grosse Erfahrung mit der Co-Fermentation von anderen Feststoffen hat, sollte diese Schnittlänge nicht überschritten werden.

Feststoffzugabe

Während des Versuchsbetriebes wurden der Gülle rund 10 Gewichtsprozent Silage zugegeben. Dieses Mischverhältnis erwies sich als obere Grenze für einen verstopfungsfreien Betrieb der Anlage. Das durchgehende Haspelrührwerk verhinderte den Aufbau einer festen Schwimmdecke. Im Gegensatz zu Stroh, das auch nach der Vergärung eine kompakte, stark verfilzte Schimmdecke bildet, werden die Silagehalme relativ schnell abgebaut, so dass die Schwimmschicht leicht zu zerstören ist.

Arbeits- und Energieaufwand

Der zeitliche Mehraufwand für die Silagebeschickung beträgt rund 30-40 Minuten pro Tag (Öffnen der Silageballen, Zerkleinerung mit einem Häcksler, Beschickung der Vorgrube, vermehrte Kontrollen). Bei einer Praxisanlage mit optimierter Beschickungslogistik fällt der zusätzliche zeitliche Arbeitsaufwand weniger hoch aus (Fahrsilo anstatt Rundballen, Zerkleinerung nicht portionenweise, sondern in Wochenchargen, was vor allem im Winterhalbjahr gut möglich ist, da keine Gaseinbussen durch Lagerverluste zu erwarten sind). Der zusätzliche energetische Aufwand für die Silagezerkleinerung und den grösseren Pump- und Mischaufwand beträgt rund 5 % des aus der Silagevergärung erzeugten Bruttoenergieertrages.

Hinweise für die Praxis

Die Versuche auf der Praxisanlage haben gezeigt, dass die gemeinsame Vergärung von Gülle und Extensogras in einer landwirtschaftlichen Biogasanlage technisch machbar ist. Silage aus Extensograsflächen kann in Co-Vergärungs-Biogasanlagen vergoren und zur zusätzlichen Biogasproduktion genutzt werden.

Die Zugabe von 10 Gewichtsprozent Silage zur Gülle hatte eine Steigerung der täglichen Gasproduktion von 160 m³ auf 250 m³ zur Folge. Die Gefahr einer Überlastung der Prozessbiologie durch die Silagezugabe kann praktisch ausgeschlossen werden, da durch die puffernde Wirkung der Gülle sehr hohe Feststoff-Belastungen möglich sind. Limitierende Faktoren sind vielmehr die Pumpfähigkeit des Silage/Gülle-Gemisches sowie die Neigung des Substrates zur Schwimmdeckenbildung.

Voraussetzung für einen problemfreien Betrieb ist, dass das Silage/Gülle - Gemisch noch gut pumpbar ist und keine Verstopfungen in den Ein- und Austragsleitungen auftreten. Das Rührwerk des Fermenters muss so ausgelegt werden, dass es die Schwimmdecke zerstören kann. Zudem muss das Austragsrohr genügend gross dimensioniert werden, so dass Schwimmdeckenteile ohne Verstopfungsrisiko aus dem Fermenter ausgetragen werden können.

4.2.3 VERFAHRENSWAHL

Geht man vom heutigen Stand der Technik aus, so sind die **Trockenvergärung** und die **Co-Vergärung** von Energiegras in einer Güllebiogasanlage als zukunftssträchtige Verfahren einzustufen. In der Praxis hängt die Verfahrenswahl in hohem Masse vom Standort und der Grösse der zu installierenden Biogasanlage ab.

Trockene Vergärung

Die Vergärung in Feststoff-Fermentern wird sich dort als das passende Verfahren erweisen, wo keine oder zu geringe Mengen von geeigneten flüssigen Substraten zur Verfügung stehen. Aus wirtschaftlichen Gründen ist die gemeinsame Vergärung mit gebührenpflichtigen biogenen festen Abfällen anzustreben. Praxiserfahrungen mit landwirtschaftlichen Kleinanlagen liegen erst auf Ebene Pilotmassstab vor. Die Technik der Feststoffvergärung ist jedoch erprobt. Im kommunalen Bereich (Vergärung von Grünabfällen) sind schon eine Vielzahl von Feststoff-Grossanlagen in Betrieb.

Co-Vergärung mit Gülle

Die Co-Vergärung von Grassilage in einer Flüssigbiogasanlage hat sich als ein gut funktionierendes Gärverfahren erwiesen. Das Verfahren ermöglicht

die zusätzliche energetische Nutzung der in der Landwirtschaft anfallenden Gülle. Durch die hohe Pufferkapazität der Güllesubstrate kann auch bei hohen Belastungen ein stabiler Gärprozess mit Ausbeuten zwischen 500 und 600 Litern pro kg zugeführte organische Substanz garantiert werden (Nettoausbeute der Silage ohne den zusätzlichen Gasertrag der Gülle).

Co-Vergärung von Energiegras mit weiteren biogenen Abfallstoffen

In der Praxis haben sich in den letzten Jahren europaweit Biogasverfahren durchgesetzt, welche die gemeinsame Vergärung von unterschiedlichen festen und flüssigen organischen Substraten erlauben.

Die Co-Vergärung von Gülle mit zusätzlichen landwirtschaftlichen, kommunalen oder industriellen biogenen Abfallstoffen wird in kleineren landwirtschaftlichen Biogasfermentern als auch in grossen Gemeinschaftsanlagen mit Fermentervolumen von bis zu 7000 m³ angewendet. Als wichtigste Co-Substrate werden Reststoffe aus der Lebensmittelindustrie (Gemüseabfälle, Trester, Schlempe), Schlachthofabfälle (Panseninhalt, Flotatfette), Grossküchenabfälle und auch landwirtschaftliche Abfälle (Grasschnitt, Getreideabgänge) mitvergoren. Aus ökonomischen Gründen ist eine gemeinsame Vergärung des Energiegrases mit solchen Substraten anzustreben. Die zusätzlichen Einnahmen aus dem Erlös von Entsorgungsgebühren und die zusätzlichen Einkünfte aus der Energieproduktion verbessern die Wirtschaftlichkeit der Energiegrasvergärung in erheblichem Masse.

4.3 ANBAU VON ENERGIEGRAS

Je nach Zielsetzung lässt sich Energiegras auf unterschiedlichen Grünlandtypen und durch verschiedene Bewirtschaftungsweisen produzieren. Ein wesentlicher Vorteil bei der Vergärung ist, dass das Material nicht vollständig trocken sein muss, sondern auch als Silage gelagert werden kann. Dadurch werden mehr Erntezeitpunkte möglich, was aus arbeitswirtschaftlichen Gründen von den Landwirten geschätzt wird. Unterschiedliche Grasmischungen (artenreiche Wiesen bis Reinsaaten) und Bewirtschaftungsweisen (extensiv bis intensiv) wurden untersucht. Es zeigte sich, dass „Low Input“-Systeme von Dauergrünland und von Kunstwiesen am meisten Vorteile bezüglich Ökonomie, Ökologie und Verfahrenstechnik bieten.

Bei „Low Input“-Systemen wird nicht ein absolut maximaler Ertrag pro Flächeneinheit angestrebt, sondern ein Ertrag, der sich aus einem minimalen Einsatz aus Dünger, Arbeit und Verfahrenstechnik ergibt. Extensiv bewirtschaftete sowie wenig intensiv bewirtschaftete Wiesen erfüllen diese Anforderungen weitgehend. Um den ökologischen Ansprüchen bezüglich Eutrophierung gerecht zu werden, darf auf extensiven Wiesen kein vergorenes Substrat ausgebracht werden. Dies wirkt sich auf eine standortgerechte Pflanzensammensetzung und den Artenreichtum der Wiese aus. Wenig intensiv bewirtschaftete Wiesen bieten die Möglichkeit einer Rückführung des Substrates auf die gleiche Fläche oder die einmalige Düngung mit Hofdünger. Hierbei lassen sich höhere Erträge erzielen ohne grössere Auswirkungen auf die Umwelt zu verursachen.

4.4 LOGISTIK

Die Logistikkette der Energiegrasvergärung kann in folgende Glieder unterteilt werden:

- Ernte
- Aufbereitung
- Transport
- Konservierung / Lagerung
- Beschickung
- Ausbringung des vergorenen Materials

Für die Vergärung von Gras wurden die Feststoffvergärung und die Co-Vergärung mit Gülle untersucht. Aufgrund der hohen Feuchte des Ausgangsmaterials bietet sich die **Silierung** als Verfahrenskette an. Die Verwertung von **Heu** ist bei der Co-Vergärung ebenfalls möglich. Frischgras kann bei beiden Verfahren problemlos vergoren werden.

Ernte

Die wesentlichen Verfahrensschritte sind mähen, zetzen, schwaden und laden. Die Maschinen sind auf nahezu jedem Landwirtschaftsbetrieb vorhanden. Vorteil bei der Biogaslinie ist, dass das angelieferte Material feucht sein kann. Hierdurch verringert sich auch die Wetterabhängigkeit für die Ernte.

Aufbereitung und Transport

Das Gras wird entweder per Kurzschnittladewagen oder Ballenpresse mit Schneidwerk geborgen. Ballenpressen ermöglichen eine höhere Verdichtung des Materials (300-400 kg/m³). Zur Herstellung der Silage werden die Ballen mit Folie umwickelt. Der **Ballentransport** erfolgt mit Traktor und Anhänger. Geladen wird per Frontlader.

Konservierung

Der Einfluss der Graskonservierung und der Konservierungsart (Silieren, Trocknen) auf die Gasausbeute ist vernachlässigbar. Siliertes Extensogras, Heu und Frischgras liefern praktisch identische Endgasausbeuten. Ebenfalls hat die Grobzerkleinerung des Materials (untersuchte Schnittlängen: 3 mm, 3 cm, 15 cm) nur einen unbedeutenden Einfluss auf die maximal erreichbare Gasausbeute und die Abbaugeschwindigkeit. Ein schnellerer Abbau erfolgt bei der Vergärung von zerfasertem Material (Heumehl, Pellets).

Lagerung

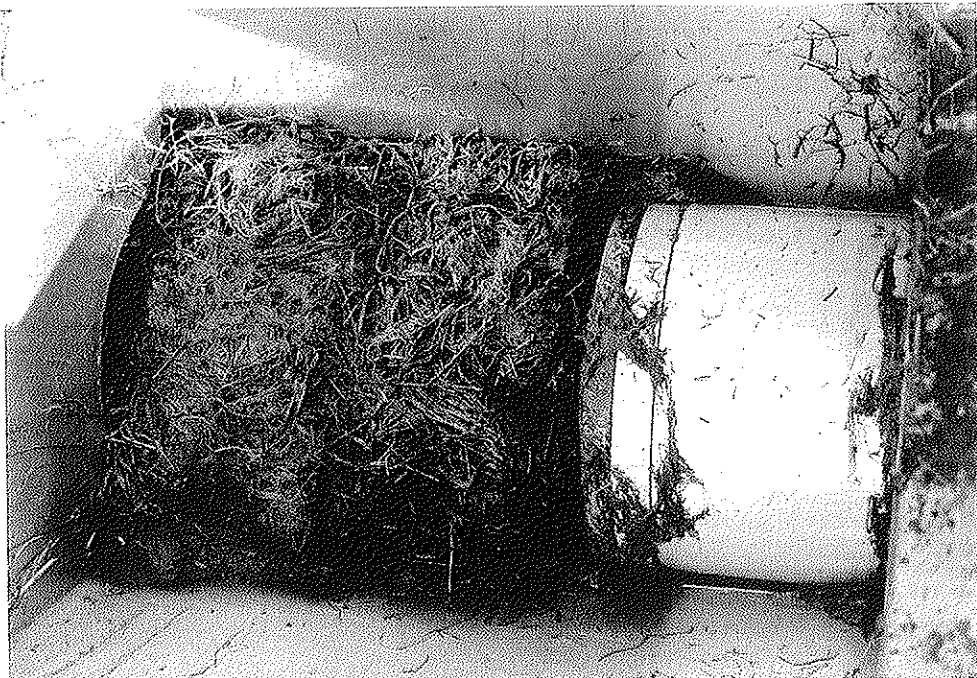
Die Silage wird in **Quaderballen** oder in **Fahrsilos** gelagert. Die Entnahme aus dem Silo erfolgt mit dem Siloblocksneider oder mit einem Greifer/Frontlader. Obwohl für die Vergärung nicht dieselbe **Silagequalität** wie bei der Futtersilage erreicht werden muss, ist strikte darauf zu achten, dass das Silieren fachgerecht durchgeführt wird. Die Verrottung des Materials infolge Lufteintrag kann zu massiven Gasertragseinbußen bei der Vergärung führen. Eine einfachere Technik (zum Beispiel durch Abdecken mit Plane usw.) darf nur dann angewendet werden, wenn eine Konservierung ohne Abbauverluste garantiert werden kann.

Ausbringung des vergorenen Materials

Für die landwirtschaftliche Verwertung des vergorenen Materials als Dünger können herkömmliche Gerätschaften verwendet werden. Die vergorenen Feststoffe werden nach der Lagerung auf einer Mistplatte mit einem **Miststreuer** ausgebracht. Die Gärgülle wird mittels **Güllefass** auf die Felder gebracht.



Verwendetes Substrat: Grassilage von Extensowiesen, siliert in Rund- und Quaderballen
(Trockensubstanz TS: 30-40 %, Organische Substanz OS: 90-95 % der TS)



Beschickung des Feststoff-Fermentes mit einer Kolbenpresse (Maulwurf).
Die eingeweichte Silage wird in das beheizte Beschickungsrohr eingepresst.

4.5 ÖKONOMIE

Die gemeinsame Vergärung von Energiegras mit flüssigen Hofdüngern, Ernterückständen und weiteren biogenen Abfallstoffen ist nicht nur aus prozess-technischen und ökologischen Gründen angebracht, sie ist auch ökonomisch sinnvoll.

Sowohl in landwirtschaftlichen Kleinanlagen als auch in regionalen zentralisierten Grossbiogasanlagen bringt die gemeinsame Vergärung von Energiegras mit Gülle und weiteren festen oder flüssigen Abfallstoffen **ökonomische Vorteile**: Einerseits wird durch die Co-Vergärung das Energiepotential der Gülle genutzt, welche im Vergleich zu den kommunalen und industriellen Abfällen das höchste theoretisch verfügbare Biogaspotential aufweist. Andererseits kann mit einer Co-Vergärungsanlage durch die höheren Gaserträge sowie durch **Einnahmen aus der Verwertung gebührenpflichtiger Substrate** ein wesentlich besseres Kosten/Nutzen-Verhältnis als bei einer Biogasanlage mit alleiniger Grasvergärung erzielt werden.

In einer bestehenden landwirtschaftlichen Co-Vergärungsanlage bringt die Zugabe von Energiegras einen höheren Gasertrag. Aus rein ökonomischer Sicht wird sich der Bauer für die energetische Nutzung entscheiden, wenn der finanzielle Gewinn aus der Biogasnutzung den Ertrag aus der nichtenergetischen Nutzung (Futtergras, Streumaterial) übersteigt. Die Vergärung kann sich lohnen, wenn das Grasmaterial eine schlechte Qualität (Extensoheu, Landschaftspflegeheu) aufweist und nur noch bedingt oder zu einem schlechten Preis als Futter verwendet werden kann.

Die Co-Vergärung von Energiegras mit Gülle in einer Flüssigbiogasanlage oder mit anderen biogenen Feststoffen in einer Feststoffanlage wird sich aus den erwähnten Gründen eher realisieren lassen als ein Verfahren mit alleiniger Vergärung des Grasmaterials. Für eine aussagekräftige Wirtschaftlichkeitsabschätzung ist jedoch, wie bei allen Co-Vergärungsanlagen, die einzelbetriebliche Analyse notwendig.

4.6 ÖKOLOGIE

Emissionen

Für die **ökologische Beurteilung des Biogasverfahrens** wurden die relevanten Daten durch Eigen- und Fremdanalysen ermittelt. In Tabelle 3 sind die wichtigsten Daten für die ökologische Bewertung der Luft- und Bodenbelastung zusammengefasst. Mit Ausnahme der BHKW-Emissionswerte (Klärgas) beruhen die Werte auf Messungen, die bei der Vergärung von Extensograss (Silage, Heu) durchgeführt wurden. Sie haben auch für die untersuchten Reinsaaten Rohrglanzgras, Knautgras und Thimothe Gültigkeit. Die unterschiedliche chemische Zusammensetzung verschiedener Grasarten wirkt sich in erster Linie auf die Nähr- und Schadstoffbilanz (**Bodenbelastung**) aus. Für die entsprechenden Bilanzierungen können die Transferkoeffizienten verwendet werden. Dieser Koeffizient gibt an, welcher Anteil eines Stoffes vom Frischsubstrat in das vergorene Substrat transferiert wird.

Gasausbeute und Gaszusammensetzung

500-600 Liter Biogas /kg organische Substanz

CH ₄ : 56-58%	CO ₂ : 38-40%
H ₂ S: 200-300 ppm	N ₂ : 1-2%

Emissionen BHKW

NO _x : 70-120 mg/Nm ³
CO: 500-600 mg/Nm ³
SO ₂ : 120-140 mg/Nm ³

Transferkoeffizient

N	95%
P	100%
K	100%
Ca	100%
Mg	100%
Schwermetalle	100%

Abbau der organischen Substanz 50-60 %

Tabelle 3: Kennwerte der Energiegrasvergärung

Bei der Biogaszusammensetzung sind vor allem beim H₂S-Gehalt substratabhängige Unterschiede möglich. Da jedoch für den Betrieb des BHKW's eine Entschwefelung des Biogases vorgesehen ist, kann für die entsprechenden Emissionen für die **Luftbelastung** ein konstanter Wert eingesetzt werden. Für die Berechnung der SO₂-Emissionen wurde von einem H₂S-Gehalt des entschwefelten Biogases von 50 ppm ausgegangen.

Ökobilanz

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass das Resultat der Ökobilanz sehr stark vom Vergleichsszenario, d.h. von den Umweltauswirkungen des Anbaus und der Ernte der Energiegraskultur sowie von der Vergleichskultur abhängt. Je nach Szenario fallen die Ergebnisse unterschiedlich aus. Generell kann jedoch ausgesagt werden, dass low-input Systeme gegenüber Systemen mit intensivem Anbau bessere Resultate in bezug auf die Umweltbelastungen liefern. Die Ökobilanz der Energiegrasvergärung von extensiven und wenig intensiven Wiesen schneidet gegenüber der heutigen Situation überwiegend positiv ab. Mit Ausnahme der Schwermetallbelastung des Bodens wird durch die Energiegrasvergärung eine deutliche Verbesserung der Umweltbelastung erreicht.

Energieressourcen	+++
Treibhauseffekt	++
Ozonbildung	+++
Schwermetalle Boden	+ -
Luft (Toxizität)	+ -
Überdüngung	+++
Wasser (Toxizität)	+
Flora/Fauna	+++

+ Reduktion /- Erhöhung der Umweltbelastung

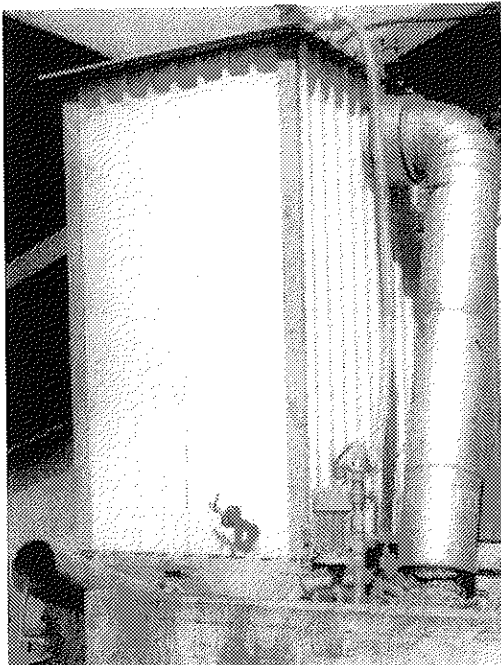
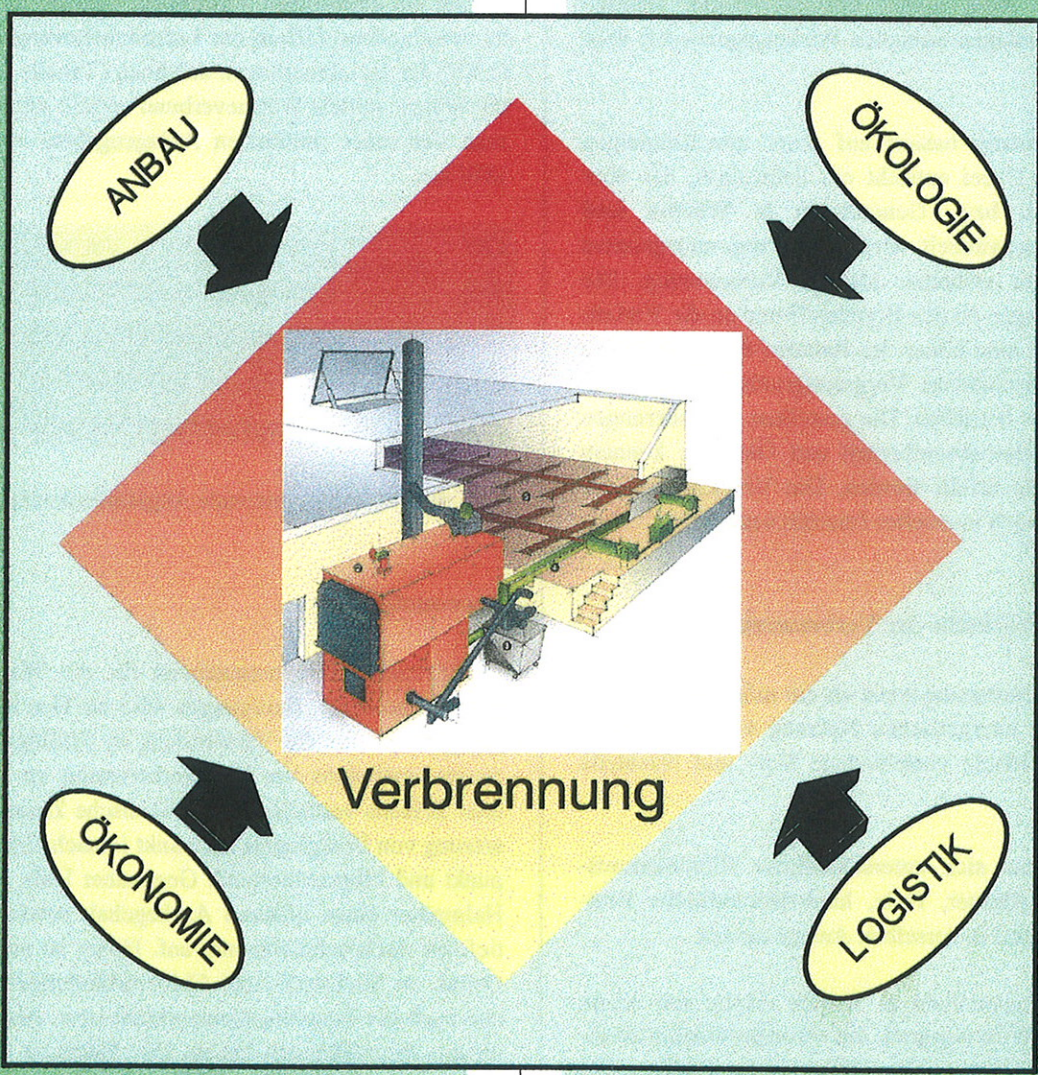


Abb. 6: Biogaserzeugung aus Energiegras in einer Feststoffanlage und in einer Covergärungsanlage



5.1 TECHNOLOGIE

Thermische Nutzung

Zielsetzung der Untersuchungen war abzuklären, ob und wie sich unterschiedliche Grasmischungen, Chinaschilf und Feldholz thermisch nutzen lassen. Generell werden zwei thermische Verfahren unterschieden: die Verbrennung und die Vergasung.

Bei der **Verbrennung** wird **Wärme** als Produkt gewonnen. Die Feuerungstechnik basiert auf einer möglichst vollständigen Oxidation des Brennstoffes und somit einer hohen Wärmeausbeute. Heutige Feuerungsanlagen erreichen Wirkungsgrade bis über 90 %.

Die **Vergasung** basiert auf einer unvollständigen Oxidation. Dabei entsteht ein Schmelgas, das über Gasmotoren bzw. Generatoren in **Wärme und Strom** umgewandelt wird. Der Vergasungsprozess ist schwerer steuerbar als die Verbrennung. Die Anforderungen an den Brennstoff und an die Verfahrenstechnik sind höher. Im Rahmen dieses Projektes wurden verschiedene Vergasungsanlagen mit pelletiertem Heu betrieben. Die gestellten Anforderungen bezüglich Betriebssicherheit und Ökologie konnten jedoch nicht erfüllt werden. Die Vergasung wurde daher nur noch in zweiter Priorität verfolgt.

Vor- und Nachteile der Verbrennung

- Die Verbrennung weist als ein mögliches Verfahren der energetischen Nutzung von Energiegras und Feldholz verschiedene Vor- und Nachteile auf:
- Es lassen sich unterschiedliche Biomassesortimente (Gräser, Holz, landwirtschaftliche Reststoffe etc.) in derselben Anlage nutzen.
- Die Umwandlung in Wärme erfolgt mit einem hohen Wirkungsgrad, die Stromproduktion ist jedoch nur bei grossen Einheiten (> 5 MW_{thermisch}) sinnvoll.
- Die Kosten für den Betreiber sind höher als bei fossilen Energieträgern. Die Kosten für die Allgemeinheit sind aufgrund der gesamthaft positiven Umweltauswirkung jedoch als geringer einzustufen.

- Die Asche kann leicht transportiert und an einer beliebigen Stelle wieder als Dünger in den Kreislauf rückgeführt werden.
- Schwermetalle, die sich separat im Filterstaub ansammeln, können aus dem Kreislauf entfernt werden.

Minimalanforderungen an die Verbrennung

Die gesetzlichen Emissionsgrenzwerte sind für Energiegras nicht definiert. Zur Erarbeitung entsprechender Grundlagen sollten die untersuchten Feuerungen die getroffenen Annahmen erfüllen, die sich an verschiedene Ziffern der Luftreinhalteverordnung (LRV) für Holzfeuerungen anlehnen (Tabelle 4). Da die Wärme mittels Wärmeverbund verteilt wird, geht man von einer minimalen Anlagengrösse von 0.5 MW aus.

CO	<250 mg/Nm ³ bei 11 Vol.% O ₂
NO _x	<250 mg/Nm ³ bei 11 Vol.% O ₂
Staub	<150 mg/Nm ³ bei 11 Vol.% O ₂
SO ₂	<250 mg/Nm ³ bei 11 Vol.% O ₂
HCl	<30 mg/Nm ³ bei 11 Vol.% O ₂

Tab. 4: Festgesetzte minimale Abgasanforderungen [1]

Brennstoff

Der Brennstoff ist massgebend für die Wahl der Feuerungstechnik. Energiegras wird als Heu trocken gelagert und für die Verwendung in Schüttgutfeuerungen spätestens vor der Verbrennung zu Pellets oder Briketts verdichtet. Die chemische Zusammensetzung von Energiegras schwankt je nach Erntezeitpunkt und Pflanzenbestand. Gegenüber Holz weisen Halmgüter einen höheren Aschegehalt sowie einen tieferen Ascheschmelzpunkt auf. Höher ist auch der Gehalt an Stickstoff- und Chlorverbindungen, welche auch die Feuerungskonstruktion bzw. Abgasreinigung Auswirkungen haben. Der Heizwert ist mit 16-17 MJ/kg mit jenem von Holz vergleichbar (Tabelle 5).

Versuche haben gezeigt, dass Feldholz keine speziellen Probleme darstellt und sich wie andere Holzsortimente verhält. Die halmgutartigen Brennstoffe wie Stroh, Chinaschilf, Gräser, Seggen etc. sind jedoch aufgrund ihrer Eigenschaften im Vergleich zu Holz als schwierigere Brennstoffe einzustufen.

		Holz	Gras	Miscanthus	Stroh
Aschegehalt	[Gew.%]	0,2	9,8	2,43	6,0
Heizwert	[MJ/kg atro]	18,5	16,8	17,9	17,5
Asche-Erweichungspunkt	[°C]	1470	970	880	940
Na	[Gew.%]	0,08	1,9	0,58	0,54
Cl	[Gew.%]	<0,001	0,44	0,15	0,37
K	[Gew.%]	0,11	2,45	0,47	1,2
Si	[Gew.%]	...	2,14	1,6	0,91

Tabelle 5: Eigenschaften halmgutartiger Brennstoffe im Vergleich zu Holz [Nussbaumer et al. in 1]

Verfahrenstechnik

Das Verbrennungsverfahren, welches sich für Energiegras, Chinaschilf oder Feldholz besonders eignet, hängt von verschiedensten Anforderungen ab, die ein zukünftiger Feuerungsbetreiber berücksichtigen muss. Die Wahl der einzelnen Komponenten wird beeinflusst durch Faktoren wie Standort, Wärmebedarf, Brennstoffanfall, Logistik etc. Die wichtigsten Komponenten sind:

- Brennstofflager
- Beschickung
- Feuerung
- Entaschung
- Abgasreinigung
- Wärmetauscher und Wärmebezügler

Das **Brennstofflager** muss ausreichend dimensioniert werden. Eine minimale Grösse verhindert bei allfälligen Brennstoffengpässen einen

Stillstand der Anlage. Wird Energiegras zu einem anderen Brennstoff zugemischt, sind zwei separate Lager notwendig. Um die Baukosten tief zu halten, können die Lagerkapazitäten in der Landwirtschaft genutzt werden.

Die **Beschickung** erfolgt je nach Feuerungsanlage und Brennstoffaufbereitung durch Schnecken, Schieber oder durch einen Kratzboden. Bei reinen Halmgutfeuerungen werden Ballenfördersysteme eingesetzt. Die Ballen werden mittels Krananlagen aus dem Lager der Feuerungsanlage zugeführt (Abb.7) und anschliessend durch eine Rückbrand-schleuse mittels Stempelpressen ganz oder teilweise in den Feuerraum geschoben.

In Bezug auf die **Feuerungstechnik** können für die Energiegrasverbrennung grundsätzlich zwei Feuerungstypen unterschieden werden. Die Ballenfeuerungen und die Schüttgutfeuerungen.

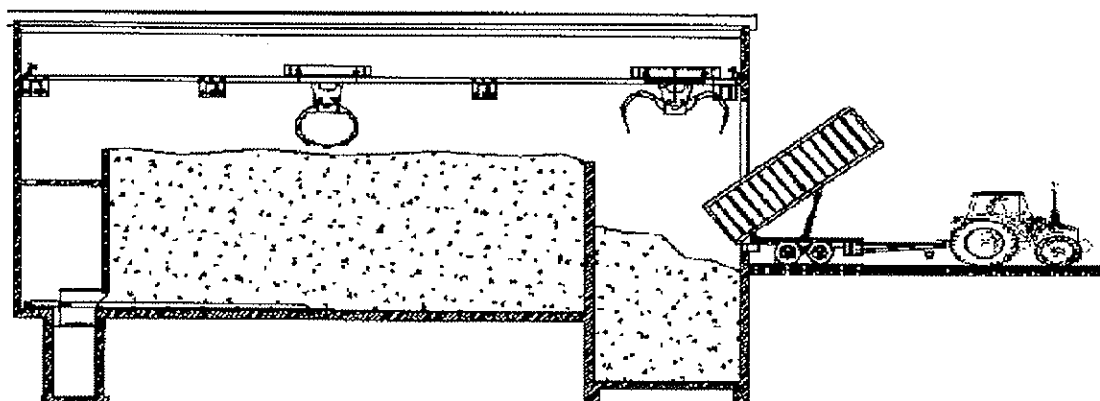


Abb. 7: Schüttgutlieferung ins Brennstofflager [8]

Ballenfeuerungen

Neben der Variante Schüttgutfeuerungen, sind auch Ballenfeuerungen möglich. Diese werden ausschliesslich mit halmgutartigen Brennstoffen betrieben. In Dänemark, wo Strohfeuerungen zur Wärmeversorgung von Fernheizwerken betrieben werden, setzt man reine Halmgutfeuerungen ein, die ausschliesslich mit diesem Brennstoff betrieben werden. Die Beschickung der Strohballen erfolgt mittels Kransystemen. Die Ballen werden nach der Beschickung durch ein Schleusensystem in den Feuerraum geschoben. Dieser Feuerungstyp ist generell auch für Energiegras geeignet, jedoch erst für Leistungen über 2-5 MW_{thermisch} erhältlich. Das Verbrennen von anderen Brennstoffen ist bei derart spezifischen Systemen nicht mehr möglich oder mit hohen zusätzlichen Kosten verbunden. Abbildung 9 zeigt die Skizze einer Ballenfeuerung.

Schüttgutfeuerungen

Für die Verbrennung von schüttfähigen, verdichteten Halmgutbrennstoffen, sind Rostfeuerungen am ehesten geeignet (Abb. 10). Durch die Bewegung des Rostes findet eine leichte Durchmischung des Brenngutes statt und die zugeführte Primärluft erreicht besser ihr Ziel. Dies mindert die Gefahr von Klumpenbildung (Sinterung) bei der Asche aufgrund des tieferen Schmelzpunktes und gewährleistet einen besseren Ausbrand. Durch einen gekühlten Rost bzw. Feuerraum sowie der richtigen Wahl der Wandmaterialien kann dem Anbacken von Aschepartikeln entgegengewirkt werden. Um eine vollständige Verbrennung zu gewährleisten, werden die Rauchgase mit Sekundärluft versorgt und gelangen durch die Nachbrennkammer über den **Wärmetauscher** (Abb. 8) zur Abgasreinigung.

Abgasreinigung

Die Reduktion der Stickoxide geschieht primär in der Nachbrennkammer. Aufgrund des schwierigen Brennstoffes muss zusätzlich eine sekundäre NOx-Minderungsmaßnahme vorgesehen werden. Nachdem die Abgase den Wärmetauscher passiert haben, müssen sie von Staub, feinen Partikeln bzw. Salzen gereinigt werden. Dies geschieht mittels Zyklonfilter und mit einem nachgeschalteten Elektro- oder Gewebefilter. Die Abreinigung des Wärmetauschers selbst erfolgt durch Druckluft, um ein Anbacken der Salze zu verhindern.

Ascheproblematik

Um im Sinne einer Kreislaufwirtschaft die Asche wieder als Dünger auf die Felder zurückführen zu können, dürfen nur naturbelassene Materialien wie Holz mitverbrannt werden. Würde Energiegras in einer Kehrichtverbrennungsanlage verbrannt, wäre die Asche durch Rückstände von nicht naturbelassenen Materialien verschmutzt und eine Rückführung ist ausgeschlossen. Bei der Verbrennung entstehen drei Aschefractionen: Rostasche, Zyklonasche und Filterasche. Der Anteil an Rost- und Zyklonasche beträgt über 80 Gewichtsprozent während Filterstaub nur rund 10-20% ausmacht. Die Verwertung der Asche soll auf landwirtschaftlichen Flächen erfolgen. Die beiden Fraktionen Rost- und Zykonasche sind dafür geeignet und enthalten die Nährstoffe Phosphor und Kali. Die Filterasche enthält Schwermetalle, die von den Pflanzen aufgenommen wurden. Sie ist daher als Dünger nicht geeignet. Durch die Deponierung der Filterasche werden dem Ökosystem Schwermetalle entzogen.

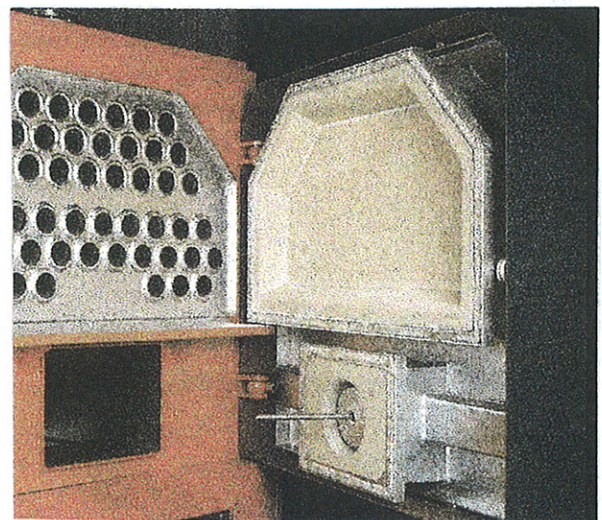
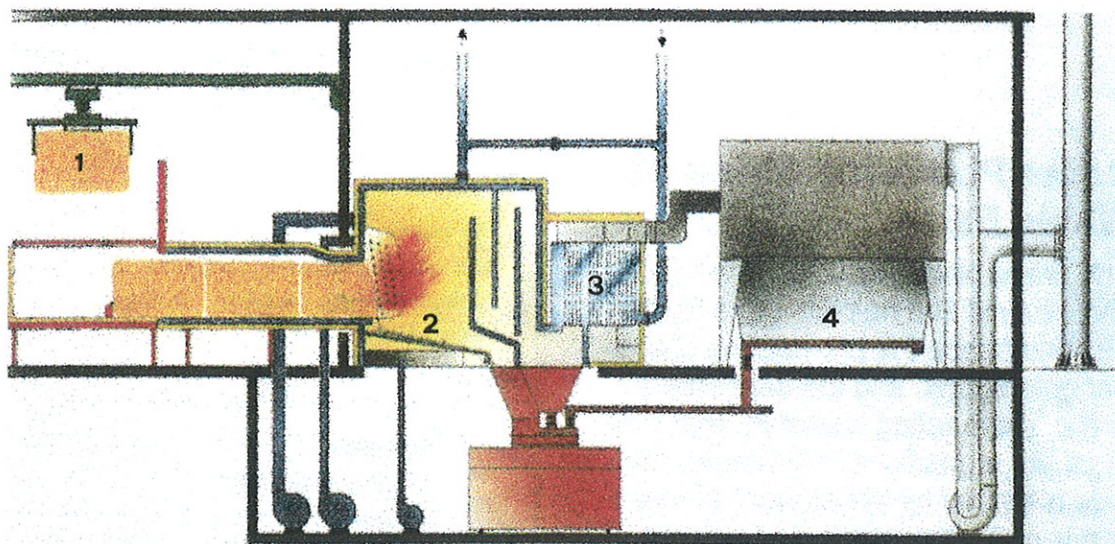


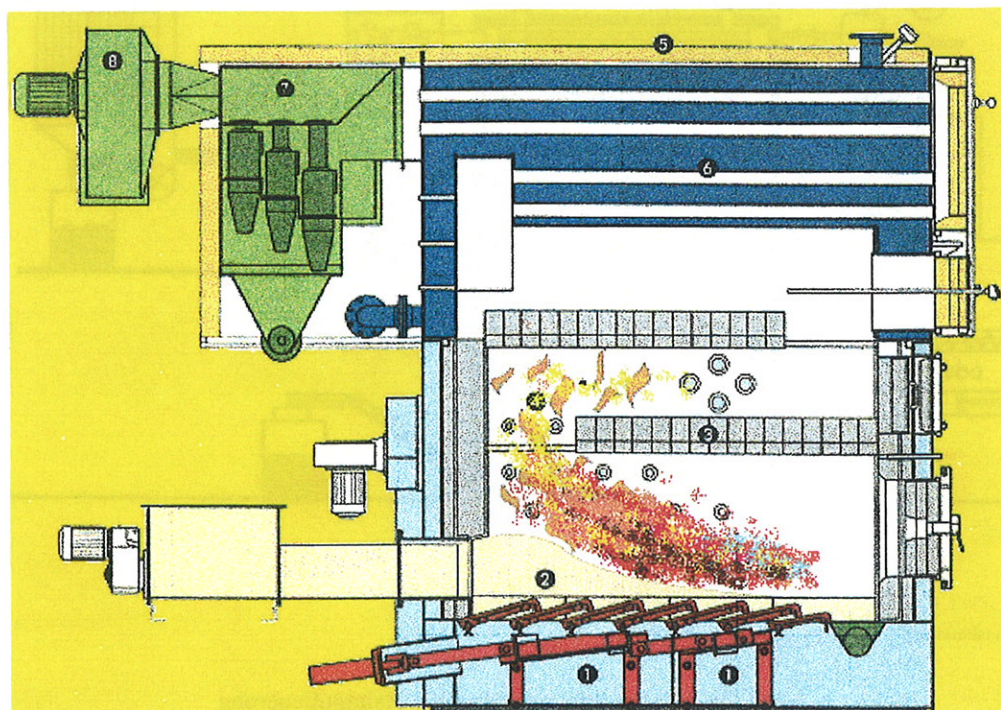
Abb.8: Innenansicht eines Wärmetauschers [6]



(Graphik vølund)

Legende: 1 Ballen, 2 Vorschubrost, 3 Wärmetauscher, 4 Abgasreinigung

Abb. 9: Schema einer Ballenfeuerung [7]



(Graphik Schmid)

Legende: 1 Primärluftzonen, 2 Vorschubrost, 3 Strahlungsdecke schamottiert, 4 Low-NOx Reaktionskammer, 5 Isolation, 6 Rauchrohrkessel, 7 Zyklonabgasentstaubung, 8 Abgasventilator

Abb. 10: Schnittbild durch eine Vorschub-Rostfeuerung [6]

5.2 ANLAGENBEISPIEL

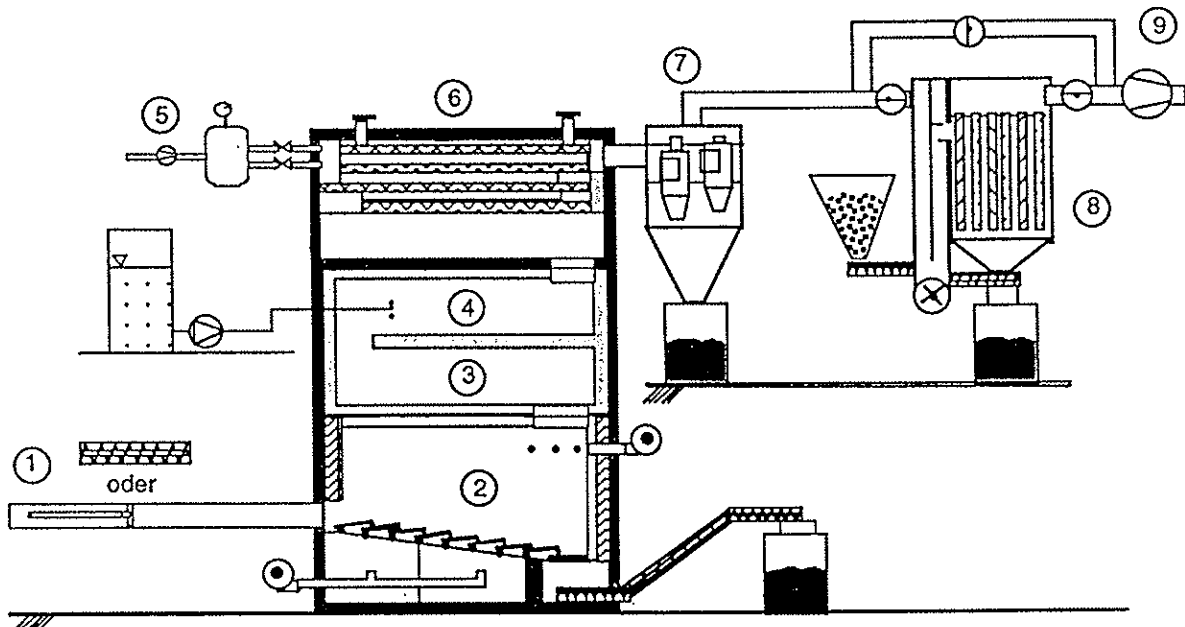
Zur Veranschaulichung der oben genannten Komponenten wird im folgenden eine **1MW Schüttgutfeuerung** beschrieben sowie die ökonomischen, ökologischen und technischen Wechselwirkungen auf das gesamte Verfahren aufgezeigt.

Das Verfahrensschema (Abbildung 11) zeigt die notwendigen Anlagenkomponenten, die für den Betrieb mit Energiegras notwendig sind. Folgende Annahmen werden getroffen:

- Leistung 1MW
- Vorschubrost gekühlt
- gekühlter Feuerraum
- Entstickungsverfahren (DeNOx)
- Beschickung durch Förderschnecke
- Druckluftabreinigung im Wärmetauscher
- Elektro bzw. Gewebefilter

Mit den obigen zusätzlichen Installationen werden die Anforderungen bezüglich Betriebssicherheit und Luftreinhaltung erfüllt. Die beschriebene Anlage kann ebenso andere Brennstoffe nutzen wie Holzschnitzel, Rindenschnitzel, feuchte, naturbelassene Biomasse (Feststoffe der Hofdüngerseparierung) oder trockene, naturbelassene Reststoffe.

Die beschriebene Anlage kann auch jederzeit Waldholz nutzen. Sie soll jedoch die Holznutzung nicht konkurrenzieren, sondern Synergien nutzen und bieten. Die zusätzlichen Investitionen für die Energiegrasnutzung sind für einfache Holzbrennstoffe zu hoch und wirken sich auf die Wärmegestehungskosten aus. Zur besseren Auslastung können jedoch auch Holzsortimente verbrannt werden. Das Ziel einer solchen Anlage sollte darin bestehen, möglichst die Sortimente zu nutzen, die andernorts höhere Entsorgungskosten (Kompostierung) verursachen.



(Graphik Nussbaumer)

Abb. 11: Anlagenkomponenten einer Halmgutfeuerung

- | | |
|-----------------------------|-------------------------|
| 1 Beschickung | 5 Druckstossabreinigung |
| 2 Wassergekühlter Feuerraum | 6 Rauchrohrkessel |
| 3 Nachbrennkammer | 7 Zyklon |
| 4 Entstickung | 8 Filter |

5.3 ANBAU DER ENERGIEPFLANZEN

Je nach Zielsetzung kann der Anbau von Energiegras, welches der Verbrennung zugeführt wird, extensiv oder intensiv erfolgen. Low-Input-Systeme auf Dauergrünland und Kunstwiesen bieten die meisten Vorteile bezüglich Ökonomie, Ökologie und Verbrennungseigenschaften. Die extensivere Bewirtschaftung und der damit verbundene spätere Erntezeitpunkt wirkt sich positiv auf die Verbrennungseigenschaften aus. Als Faustregel gilt: je verzögerter das Material, desto einfacher ist die Verbrennung.

Bei **extensiven Wiesen** wird keine Asche rückgeführt. Damit findet auch keine Nährstoffbelastung statt, was sich positiv auf die Ausbildung einer artenreichen, standortgerechten Wiese auswirkt. Wenig intensiv bewirtschaftete Wiesen bieten die Möglichkeit einer Rückführung der Asche auf diese Fläche. Auch die einmalige Düngung mit Hofdünger ist auf solchen Wiesen möglich. Hierbei lassen sich höhere Erträge ohne eine wesentliche Mehrbelastung der Umwelt erzielen.

Chinaschilf wird auf Ackerland angebaut. Im dritten Jahr nach der Aussaat steht der volle Ertrag mit rund 18 t/ha zur Verfügung. Dieser variiert je nach Bodenbeschaffenheit. Da nur die abgestorbenen Stängel geerntet werden und die restliche Pflanzenbiomasse dem Boden erhalten bleibt, ist der Bedarf an Dünger bei dieser Pflanze gering. Durch den späten Erntezeitpunkt (Winterende) erhöht sich der TS-Gehalt der Biomasse, wodurch eine allfällige Nachdrehung vermieden werden kann.

Als **Feldholz** wird ein Gemisch einheimischer Baum- und Buscharten bezeichnet, welches auf Grün- oder Ackerland angebaut wird und somit nicht dem gesetzlichen Nachteil unterworfen ist, dass das Land nach einer gewissen Zeit unwiederbringlich der landwirtschaftlichen Nutzung entzogen wird. Der Anbau erfolgt entweder extensiv oder wenig intensiv. Auch hier gilt, dass weniger der Ertrag mittels hohem Aufwand an Dünger, landtechnischen Massnahmen und Pflanzenschutz eingesetzt wird, sondern dass möglichst wenig Input aufgewendet wird. Die Vorteile von Feldholz liegen vor allem in seinen guten Verbrennungseigenschaften sowie im ökologischen Nutzen dieser Kultur.

5.4 LOGISTIK

Die Logistikkette für die Verbrennung beinhaltet folgende Glieder:

- Ernte
- Aufbereitung
- Transport
- Lagerung
- Beschickung
- Ausbringung der Asche

Als Brennstoff dient entweder Heu von extensiv bzw. wenig intensiv bewirtschafteten Wiesen, Chinaschilf oder Feldholz. Schüttgutfeuerungen sind in der Lage, alle drei Brennstoffe zu verbrennen, sofern diese zu Pellets oder Schnitzel aufgearbeitet werden. Die Beschickung von Ballenfeuerungen erfolgt in der Regel nur mit halmgutartigem Brennstoff in Ballenform. Die eingesetzte Logistikkette wird daher von der Wahl des Feuerungstyps mitbeeinflusst. Im Folgenden wird von einer 1MW Schüttgutfeuerung ausgegangen:

Pro Megawatt installierte Leistung ist mit einem Brennstoffverbrauch von rund 600 t TS zu rechnen. Hieraus lässt sich je nach Ertrag das Einzugsgebiet abschätzen. Die Anbaufläche für eine 1 MW-Feuerung (50% Holz/50% Heu) beträgt rund 150 Hektaren. Diese Fläche ist in der Regel nicht an einem Stück vorhanden. Sie verteilt sich auf z.B. 5% einer Region. Das Einzugsgebiet beläuft sich dadurch auf rund 3000 ha, was eine mittlere Transportdistanz von rund 2 bis 5 km ergibt.

Ernte

Gras wird als Bodenheu geerntet. Dies erspart den zusätzlichen Energiebedarf für die Heutrocknung. Die Ernte erfolgt mittels der üblichen Erntekette, die aus dem Futterbau bekannt ist. Eine Neuanschaffung zusätzlicher Maschinen ist nicht notwendig. Die Ernte besteht aus den Arbeitsschritten Mähen, Wenden und Zetten. Die Bergung des Heus erfolgt mittels Ladewagen oder direkt mit einer Quaderballenpresse.

Chinaschilf kann entweder gemäht und mit einer Ballenpresse geladen werden oder wird mittels selbstfahrendem Häcksler direkt in einen Kippanhänger geworfen. Da das Häckselgut nur über eine geringe Schüttdichte von rund 80 kg/m³ verfügt, sind pro Fahrt grosse Volumen zu transportieren. Lange Transportdistanzen verunmöglichen dieses Ernteverfahren.

Feldholz wird je nach Pflanzabstand mittels speziellen selbstfahrenden Häckslern geerntet. In Beständen, die sowohl aus jungen wie aus älteren Bäumen bestehen oder die in unwegsamem Gelände stehen, bleibt die Handerte mit der Kettensäge die einzige Lösung.

Aufbereitung zu Schüttgut

Für die Verwendung als schüttfähiger Brennstoff muss das Heu bzw. das Chinaschilf pelletiert werden. In Grastrocknungsanlagen, die dadurch besser ausgelastet werden können, erfolgt die Verdichtung (rund 600kg/m³). Für ein einfaches Handling können die Pellets im Kipper oder in grossen Transportsäcken (Big Bag's) transportiert und gelagert werden.

Transport

Der Transport des Erntegutes erfolgt mittels Traktoranhänger zur Pelletieranlage (Heu und Chinaschilf) oder direkt zur Feuerung (Feldholz)

Lagerung

Um die Lagerkapazitäten in der Landwirtschaft zu nutzen, können sowohl die Pellets als auch die Grossballen zwischengelagert werden. Eine Lieferung zum richtigen Zeitpunkt ermöglicht es, die Lagerkapazität der Feuerungsanlage klein zu halten und damit Kosten zu sparen. Für die Lagerung muss das halmgutartige Material einen TS-Gehalt von mindestens 88% aufweisen, da sonst biologische Abbauprozesse einsetzen. Wird dies nicht erreicht, kann sich Schimmel bilden.

Bei Feldholz spielt die Feuchte eine geringere Rolle. Wird das Material direkt verfeuert, sind Feuchtegrade bis 50% TS möglich. Die Gefahr der Schimmelbildung ist weniger gross, jedoch kann bei der Lagerung des feuchten Materials ebenfalls ein biologischer Abbauprozess einsetzen, was einen geringeren Heizwert des Brennstoffes zur Folge hat.

Beschickung

Mittels Schnecken, Stempeln oder Kratzboden wird das Schüttgut aus dem Brennstoffsilo ausgetragen und der Feuerung zugeführt. Bei Ballenfeuerungen werden die ganzen Ballen oder Teilstücke davon mit automatischen Krananlagen in den Feuerungsraum eingebracht.

Ausbringung der Asche

Die Asche enthält geringe Gehalte an Nährstoffen (P, K) und kann mittels Kalkstreuer ausgebracht werden. Die Zumischung zu Gülle oder Mist ist nicht sinnvoll, da wegen der basischen Wirkung NH₃ aus den Hofdüngern ausgetrieben wird.

5.5 ÖKONOMIE

Die beschriebene Technik ermöglicht die Verbrennung von Energiegras, Feldholz oder Chinaschilf. Die Umsetzung dieser Technologie in die Praxis wird neben den technischen Aspekten aber massgebend von ökonomischen Überlegungen geprägt.

Beim Energiegras handelt es sich um einen technisch schwierig zu handhabenden Brennstoff. Es braucht zusätzliche technische Einrichtungen mit entsprechenden Kostenfolgen. Die Betriebskosten verteuern sich durch die Brennstoffaufbereitung ebenfalls. Allein die Pelletierungskosten belaufen sich auf über 110 Fr. /t TS. Die Wärmegestehungskosten bei einer 1 MW Energiegras-Schüttgutfeuerung betragen rund 17 Rp. pro kWh. Bei einer gleich grossen Holzfeuerung betragen die Kosten rund 11 Rp. pro kWh. Die Wärmegestehungskosten beider Systeme liegen damit weit über den entsprechenden Kosten der Wärmeerzeugung aus fossilen Brennstoffen (Tabelle 6). Verschiedene Möglichkeiten der Kostensenkung können jedoch in Betracht gezogen werden:

- Je grösser die Anlagen und deren Investitionskosten, um so kleiner wird der Anteil zusätzlicher Kosten für den Betrieb mit Energiegras. Bei einer 4 MW Schüttgutfeuerung verringern sich z. B. die Wärmegestehungskosten gegenüber einer 1 MW-Anlage um 25%.
- Wird von einer reinen Halmgutfeuerung ausgegangen, fallen die Pelletierungskosten sowie das zweite Brennstofflager weg. Dies ergibt dann Wärmegestehungskosten von 16 Rp pro kWh (1MW-Anlage) bzw. von 10 Rp/kWh bei einer 4MW Anlage.
- Ausgehend von einer 4 MW Ballenfeuerung, die neben Energiegras aus landwirtschaftlicher Produktion (Fr. 283.-/t TS) zu 50% Landschaftspflegematerial (0.-/t TS) zu feuert, können die Kosten für den Brennstoff halbiert werden. Unter Berücksichtigung sämtlicher Kosten hat das zur Folge, dass sich die Wärmegestehungskosten auf 4-10 Rp pro kWh senken lassen [4].

Brennstoff		Holz			Gras Ballen			Gras Pellets		
		1	2	4	1	2	4	1	2	4
Anlagengrösse (Kesselleistung)	[MWth]									
Investitionskosten (Wärmeerzeuger und Gebäude)	[kFr.]	779	991	1352	1302	1660	2283	1088	1422	2014
Kapitalkosten	[Rp./kWh]	3,50	2,20	1,51	6,10	3,90	2,69	4,94	3,24	2,30
Brennstoffkosten	[Rp./kWh]	6,07	6,07	6,07	6,07	6,07	6,07	9,39	9,39	9,39
Betriebsnebenkosten	[Rp./kWh]	2,00	1,35	0,91	3,87	2,48	1,71	3,09	2,04	1,46
Wärmegestehungskosten ab Heizwerk	[Rp./kWh]	11,6	9,6	8,5	16,0	12,5	10,5	17,4	14,7	13,2
Äquivalenzwert										
Grasballen vor Pelletierung	[Fr./t]				46	92	117	3	21	33
Graspellets	[Fr./t]							107	131	143

Annahmen:

- Pelletierungskosten 110.- Fr./t TS
- Brennstoffpreis Heizöl 33.- Fr./t 3,50 Rp./kWh
- Brennstoffpreis Holz basierend auf 40.- Fr./Sm³ Laubholz 4,25 Rp./kWh
- Brennstoffpreis Graspellets 173.- Fr./t TS plus Pelletieren 283.- Fr./t TS
- Brennstoffpreis Landschaftspflegematerial 0.- Fr./t TS
- Brennstoffpreis Landschaftspflegematerial statt Kompostieren minus 30.- Fr./t TS

Tabelle 6 : Vergleich der Investitions- und Wärmegestehungskosten einer monovalenten Einkesselanlage für Holz, Graspellets und Grasballen mit den Brennstoffkosten gemäss den untenstehenden Annahmen. In den letzten Zeilen ist der Äquivalenzwert von Gras vor und nach der Pelletierung angegeben, welcher für eine Grasfeuerung die gleichen Wärmegestehungskosten wie für eine Holzfeuerung ergibt [1].

Die Möglichkeit konkurrenzfähige Wärmegestehungskosten zu erreichen ist somit theoretisch gegeben. Die dafür notwendigen Anforderungen wie hoher Anfall von Material von ökologischen Ausgleichsflächen, zusätzliche Verbrennung von Grasmaterial aus der Landschaftspflege und von Naturschutzflächen sowie geringer Rinderbestand (Futterbedarf konkurriert mit Energiegras), sind jedoch hoch und schränken die Anzahl möglicher Standorte stark ein.

Die betriebswirtschaftlich berechneten Kosten lassen sich unter den getroffenen optimistischen Annahmen mit denen von Holzfeuerungen vergleichen.

Die volkswirtschaftlichen Kosten finden beim Kaufentscheid keine Berücksichtigung, obwohl gegenüber der Nutzung fossiler Energieträger Schäden in der Höhe von über 40 Rp./kWh_{in} vermieden werden können [1]. Würde man die volkswirtschaftlichen Berechnungen ebenfalls berücksichtigen, so ist die Verbrennung von Energiegras sogar wirtschaftlicher als die Nutzung fossiler Energieträger.

5.6 ÖKOLOGIE

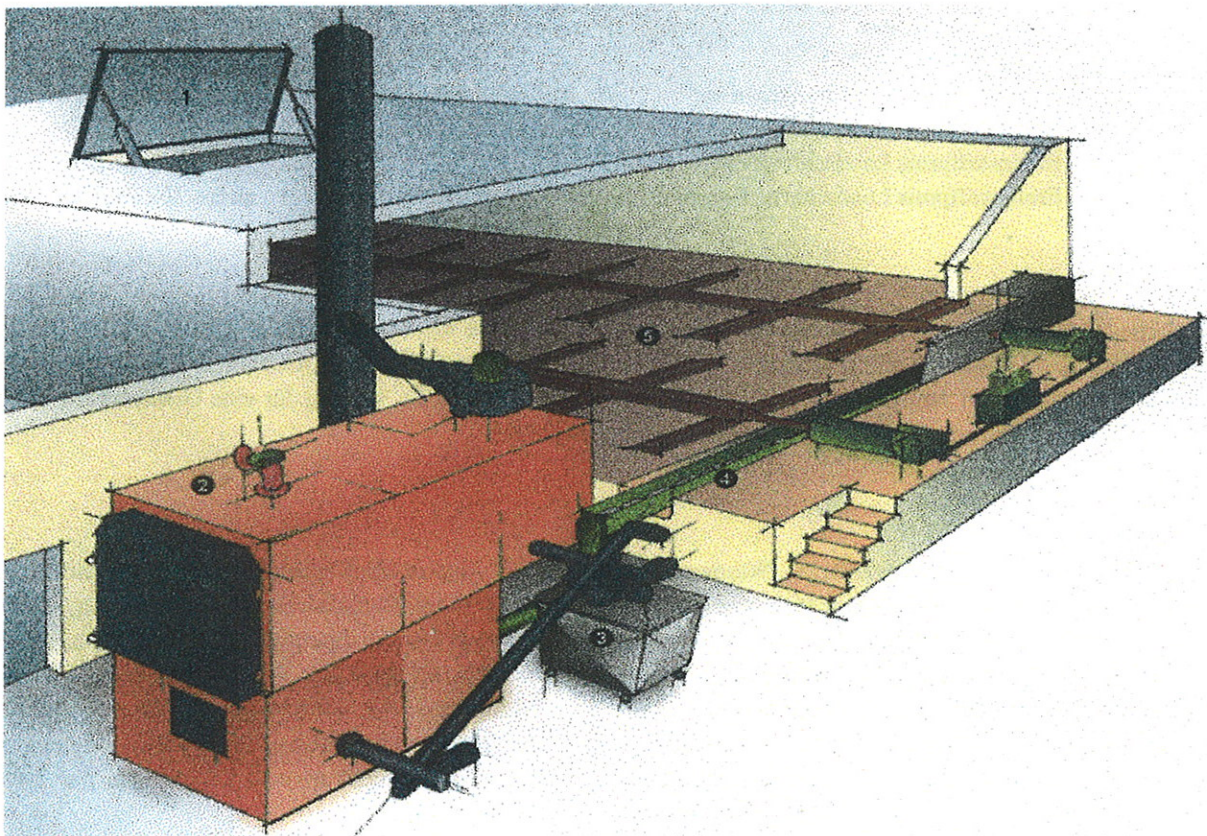
Für die Bewertung von Wärme und Strom aus Energiegras, Chinaschilf und Feldholz wurden die untenstehenden Kriterien bzw. Auswirkungen berücksichtigt.

- Energetische Ressourcen
- Treibhausrelevanz
- Schadenskostenvermeidung
- Schwermetall Boden
- Flora und Fauna

Betrachtet wurde der Vergleich fossile Energie und Futterbau mit der Energiegrasproduktion auf unterschiedlichen Flächen. Es zeigte sich, dass die Umweltauswirkungen in hohem Masse von der landwirtschaftlichen Produktion des Brennstoffes beeinflusst wird. Der Einfluss des Verbrennungsprozess ist weit geringer. Extensive Wiesen liefern die besseren Resultate als wenig intensiv genutzte Wiesen.

Intensiv bewirtschaftete Flächen schneiden aus ökologischer Sicht schlecht ab. Im Vergleich zu Wiesen werden mit der Feldholznutzung bessere Ergebnisse erreicht, während Chinaschilf und Reinsaat die schlechtesten Resultate liefern.

Die ökologische Beurteilung der Verbrennung ist schwierig, da die Datengrundlage einiger Abgaswerte nicht genügend gesichert ist. Untersuchungen haben gezeigt, dass der Bau einer Feuerungsanlage nicht in einem NOx-Massnahmegebiet ausgeführt werden soll [4]. Die Relevanz von Transporten spielt im Umkreis von 15 km bezüglich Ozonbildung eine untergeordnete Rolle. Ein Zusatznutzen bei der Verbrennung von Energiegras ist die Abscheidung von Schwermetallen, welche so dem Boden entzogen werden können.



- Legende:**
- 1 Befahrbarer Silodeckel
 - 2 Vorschubrostfeuerung
 - 3 Automatische Entaschung
 - 4 Brennstofftransport
 - 5 Silo

Abb. 12: Für Energiegras geeignete Holzfeuerungsanlage (Graphik Schmid)

6. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die energetische Nutzung von Gras, Chinaschilf und Feldholz ist grundsätzlich technisch machbar und je nach getroffenen Annahmen ökologisch sinnvoll sowie ökonomisch möglich.

Die Verfahrenswahl (Biogaserzeugung oder Verbrennung) hängt von den örtlichen Begebenheiten und den Präferenzen des Anlagenbetreibers ab. Die Biogaserzeugung und die Verbrennung von Energiegras bringen im Vergleich zu fossilen Energienutzungslinien volkswirtschaftliche Vorteile. Betriebswirtschaftlich betrachtet sind beide Linien jedoch nur in Spezialfällen kostenneutral oder gegebenenfalls rentabel. Zusätzlich sind mit Null oder negativen Preisen bewertete Biomassesortimente erforderlich (Entsorgung), um die Kosten für den Energiegrasbetrieb zu decken.

Aus ökologischer Sicht ist der landwirtschaftliche Teil, welcher der Verbrennung oder der Biogaserzeugung vorgeschaltet ist, relevanter als die Wahl der Konversionsprozesse. Verglichen mit der heutigen Landwirtschaft bringt die Substitution fossiler Energieträger mittels intensiv angebaute Biomasse

keine Vorteile, bei extensivem Anbau der Energiekulturen wird jedoch eine markante Verbesserung erreicht. Selbst im Vergleich zu einer Extensivierung der gesamten schweizerischen Landwirtschaft bringt die energetische Nutzung von extensivem Grünland oder Feldholz noch einen kleinen Vorteil.

Die technische Machbarkeit ist bei beiden Verfahrenslinien weitgehend gegeben. Während für die Biogaslinie bereits eine Umsetzung auf Stufe Pilotanlage und Praxisanlage realisiert werden konnte, ist dies bei der Verbrennungslinie noch nicht gelungen. Die Ursachen hierfür sind einerseits ökonomischer Natur, andererseits aber auch durch die landwirtschaftliche Situation geprägt. Solange ein Bauer auf einer möglichen Energiegraswiese mehr verdient, indem er andere Kulturen anbaut, wird die Umsetzung nur schwer zu realisieren sein. Da sich die gewonnenen Erkenntnisse aber teilweise auch auf andere Biomassebrennstoffe übertragen lassen, besteht die Möglichkeit, dass Energiegras zusammen mit anderen, günstiger anfallenden Biomassesortimenten genutzt wird. Diese Synergien sollen bei der Suche nach einer Pilotanlage berücksichtigt werden.

7. LITERATUR

- [1] Hersener, J.L. et al.: Projekt Energiegras/Feldholz, Schlussbericht. Januar 1997, 164 Seiten
- [2] Baserga, U., Egger, K.: Vergärung von Energiegras zur Biogaserzeugung. Bundesamt für Energie, Forschungsprogramm Biomasse, Juni 1997, 45 Seiten
- [3] Baserga, U: Vergärung von Extensograss-Silage in einer Feststoff-Pilotanlage und in einer landwirtschaftlichen Covergärungs-Biogasanlage, Bundesamt für Energie, Forschungsprogramm Biomasse, Januar 1998, 26 Seiten
- [4] Hersener, J.L., Dinkel, F., Nussbaumer Th.: Pflichtenheft Energiegrasfeuerung, Bundesamt für Energie, 1998, 40 Seiten
- [5] Hersener, J.L., Bühler, R.: Energetische Nutzung landwirtschaftlicher Biomasse Band 2: Energetische Nutzung von Hofdüngerfeststoffen, November 1998, 43 Seiten
- [6] Schmid AG: Automatische Holzfeuerungssysteme Pyrotronic Modular. (Prospekt 6.98)
- [7] Nikolaisen, L. et al.: Straw for Energy Production. Technology-Environment-Economy. Danish Energy Agency, 1998, 53 p.
- [8] Schmid AG (Fachtagung): Holzfeuerung (Tagungsunterlagen), 1998, 47 Seiten
- [9] Membrez, Y.: Digestion en discontinu d'herbes énergétiques. Rapport. Office Fédéral de l'Énergie (OFEN), 1996, 40 p.