

Inhaltsverzeichnis

1	Grundlagen und Technik	4
1.1	Historischer Abriss	4
1.2	Grundlagen des Biogasverfahrens	6
1.3	Grundlagen der Biogasentstehung	7
1.3.1	Der anaerobe Abbauprozess	7
1.3.1.1	Hydrolyse	8
1.3.1.2	Acidogenese	9
1.3.1.3	Acetogenese	9
1.3.1.4	Methanogenese	9
1.3.1.5	Weitere Prozesse	10
1.3.2	Prozessprodukt „Biogas“	13
1.4	Substrate	17
1.4.1	Landwirtschaftliche Substrate	19
1.4.1.1	Flüssigmist (Gülle)	19
1.4.1.2	Festmist	19
1.4.1.3	Reststoffe der Pflanzenproduktion	20
1.4.1.4	Nachwachsende Rohstoffe	20
1.4.2	Stoffe nach der Nebenprodukte-Vo (EG) Nr. 1774/2002	25
1.4.3	Organische Reststoffe aus der Industrie	26
1.4.3.1	Prozessrückstände der Lebensmittelindustrie	26
1.4.3.2	Weitere Prozessrückstände der Industrie	28
1.4.4	Kommunale und gewerbliche Reststoffe	28
1.4.4.1	Biotonne	29
1.4.4.2	Gastronomiebereich	29
1.4.4.3	Grüngut aus Wertstoffhöfen und Landschaftspflegegrün	29
1.4.5	Stör- und Schadstoffe, Hygiene	30
1.4.5.1	Maßnahmen zur Risikominderung	31
1.5	Verfahrens-, Geräte- und Anlagentechnik	32
1.5.1	Anlieferung und Lagerung	34
1.5.2	Aufbereitung	34
1.5.2.1	Konservierung	34
1.5.2.2	Zerkleinerung	34
1.5.2.3	Pasteurisierung	35
1.5.3	Fermentertechnik	37
1.5.3.1	Fermenterbauarten	38
1.5.3.2	Einbringtechnik	45
1.5.3.3	Leitungen	50
1.5.3.4	Pumpen	50
1.5.3.5	Schwerstoffaustrag	52
1.5.3.6	Gärrestaustag	53
1.5.3.7	Heizung	53
1.5.3.8	Homogenisierung	54
1.5.3.9	Mess- und Regelungstechnik (MRT)	59

1.5.4	Gasführendes System	64
1.5.4.1	Gasableitung	64
1.5.4.2	Gasaufbereitung	65
1.5.4.3	Bildung von Schwefelwasserstoff	65
1.5.4.4	Verfahren zur Entschwefelung von Biogas	66
1.5.4.5	Gasspeicherung	68
1.5.5	Gasnutzung	70
1.5.5.1	Verstromung	70
1.5.5.2	Wärmenutzung	77
1.5.5.3	Einspeisung ins Erdgasnetz	80
1.5.6	Gärrestverwertung	81
1.5.6.1	Gärrestlagerung	81
1.5.6.2	Ausbringverfahren	83

Abkürzungsverzeichnis

°C	Grad Celsius
€	Euro
AKh	Arbeitskraftstunden
BHKW	Blockheizkraftwerk
BZ	Brennstoffzelle
CH ₄	Methan
CO ₂	Kohlendioxid
Ct	Cent
EEG	Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien
FM	Frischmasse
g	Gramm
GV	Großvieheinheit
H ₂	Wasserstoff
H ₂ S	Schwefelwasserstoff
hPa	Hektopascal
kg	Kilogramm
k-Wert	Wärmedurchgangskoeffizient
kWh	Kilowattstunde
kWh _{el}	Kilowattstunde elektrisch
kWh _{therm}	Kilowattstunde thermisch
l	Liter
l _N	Normliter - Liter bei Normbedingungen (1,013 bar, 0° C, 0% Luftfeuchte)
m ³	Kubikmeter
mg	Milligramm
m _N ³	Kubikmeter bei Normbedingungen (1,013 bar, 0° C, 0% Luftfeuchte)
MW	Megawatt
NawaRo	Nachwachsende Rohstoffe
NfE	Stickstofffreie Extraktstoffe
NH ₃	Ammoniak
oS	organische Substanz
oTM	organische Trockensubstanz
pH	neg. dekadischer Logarithmus der Wasserstoffionenkonzentration = Säuregrad
ppm	parts per million
Rfas	Rohfaser
Rfett	Rohfett
RiGV	Rinder-Großvieheinheit
RP	Rohprotein
t	Tonne
TS	Trockensubstanz
v.K.	variable Kosten
VQ	Verdauungsquotient
VQ _{NfE}	Verdauungsquotient der stickstofffreien Extraktstoffe
VQ _{Rfas}	Verdauungsquotient der Rohfaser
VQ _{Rfett}	Verdauungsquotient Rohfett
VQ _{RP}	Verdauungsquotient Rohprotein
WS	Wassersäule
ZS	Zündstrahl-Motor

1 Grundlagen und Technik

Volker Aschmann¹, Mathias Effenberger¹, Dr. Andreas Gronauer¹, Felipe Kaiser¹, Rainer Kissel¹, Hans Mitterleitner¹, Dr. Stefan Naser¹, Markus Schlattmann², Manfred Speckmaier², Gerald Ziehfrend²

1.1 Historischer Abriss

Die Entstehung von Faulgasen (CH₄, NH₃, H₂S, CO₂ u.a.) aus organischer Substanz sowie die Nutzung des Methans für energetische Zwecke ist seit langem bekannt. Im 16ten Jahrhundert führte der Naturforscher Alessandro Volta Verbrennungsversuche mit Sumpfgas durch. Im 17ten Jahrhundert erkannten Bechamp und Popoff die biogene Methanbildung. Im 19ten Jahrhundert führte Pasteur Versuche zur Biogasgewinnung aus Kuhmist durch und entdeckte mit Hoppe-Seyler die mikrobiologische Bildung von CH₄/CO₂ aus Acetat. 1897 ist der Bau einer Biogasanlage für ein Lepra-Krankenhaus in Bombay/Indien dokumentiert, in der organische Abfälle und pflanzliche Materialien als Ausgangssubstrat genutzt wurden (SCHULZ UND EDER, 2001). Das erzeugte Biogas wurde zur Beleuchtung (Gasbrenner) verwendet und ab 1907 zum Betrieb eines Motors für die Stromerzeugung genutzt.

1910 begann in Deutschland der Klärtechniker Imhoff mit dem Bau anaerober, zweistöckiger Abwasserreinigungsanlagen. 1937 hatten die Städte Halle, Pforzheim, Essen, Erfurt, Pörsneck, München und Heilbronn ihre städtischen Fuhrparks auf Biogasbetrieb umgestellt. Während des Zweiten Weltkriegs wurde in Deutschland versucht, die Gasproduktion mit organischen landwirtschaftlichen Abfallstoffen zu erhöhen, also Verfahren anzuwenden, die wir heute als Kofermentation bezeichnen. Erst in der Nachkriegszeit wurde die Landwirtschaft als potentieller Lieferant für Biogas entdeckt. Eine erste landwirtschaftliche Anlage wurde 1948 im Odenwald errichtet. 1950 ging die erste größere Biogasanlage in Allerhoop bei Celle/Niedersachsen nach dem System Schmidt-Eggersglüss in Betrieb. In den 50er Jahren wurden etwa 50 Biogasanlagen in Deutschland erstellt, wobei aber viele nach kurzer Betriebszeit wegen mangelhafter Funktion wieder stillgelegt wurden. Der sinkende Ölpreis in den 50er und 60er Jahren (Heizöl kostete damals ca. 0,10 €/l und fiel bis 1972 auf 0,04 €/l) führte zur Schließung vieler Biogasanlagen.

Mit der Ölkrise begann eine zweite Biogas-Bewegung im Jahre 1972 bzw. 1973. 1980 waren in Bayern wieder 15 landwirtschaftliche Anlagen in Betrieb. 1985 wurden in Deutschland 75 Anlagen erfasst. Im Gegensatz zur ersten Biogasbewegung in den 50er Jahren wurden die Anlagen nicht mehr mit Festmist, sondern mit einstreuloser Gülle beschickt. Inzwischen hatte sich die strohlose Aufstallung mit Gitterrosten, Spaltenböden und entsprechenden Flüssigmistverfahren durchgesetzt. In der Zeit von 1985 bis 1990 ging der Bau neuer Anlagen spürbar zurück. Ein dritter Aufschwung für die Biogasnutzung begann Anfang der 90er Jahre durch die gesetzliche Regelung der Einspeisevergütung für Strom aus Biogas und die Rahmenbedingungen des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes. Seit der Novellierung des Stromeinspeisegesetzes im Jahr 2000 in Form des "Erneuerbare Energien Gesetzes" (EEG) hält dieser Aufschwung bis heute an, wobei es im Jahr 2003 durch die Reduzierung der Fördermaßnahmen und die Unsicherheit im Vorfeld der Novellierung des EEG zu einer vorübergehenden Stagnation beim Bau landwirtschaftlicher Anlagen kam.

Die am 01.08.2004 in Kraft getretene Novelle des Gesetzes für den Vorrang Erneuerbarer Energien schuf deutlich verbesserte Rahmenbedingungen für die Zukunft – insbesondere für die Biogaserzeugung aus nachwachsenden Rohstoffen - und ließ die Zahl der Biogasanlagen im Laufe des Jahres 2005 rapide nach oben schnellen. Die verbesserten Vergütungssätze für

¹ Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Landtechnik und Tierhaltung

² ehemals Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft

Strom aus Biogas werden über einen Zeitraum von 20 Jahren mit einer Degressionsrate (auf einer Grundvergütung) von 1,5 % ab dem 01.01.2005 gewährt. Weiterreichende Informationen zum EEG finden sich im Kapitel 1.7 „Projektbeurteilung und Wirtschaftsanalyse“.

In Abb. 1 ist die Entwicklung des Bestandes landwirtschaftlicher Biogasanlagen von 1992 bis 2005 (sowie geschätzte Zahlen für 2006) nach Erhebungen des Fachverbandes Biogas e.V. dargestellt. Neben dem starken Zubau an Anlagen ist in den letzten Jahren auch eine Entwicklung hin zu Anlagen der höheren Leistungsklassen zu verzeichnen, was sich im überproportionalen Anstieg der elektrischen Anschlussleistung ausdrückt.

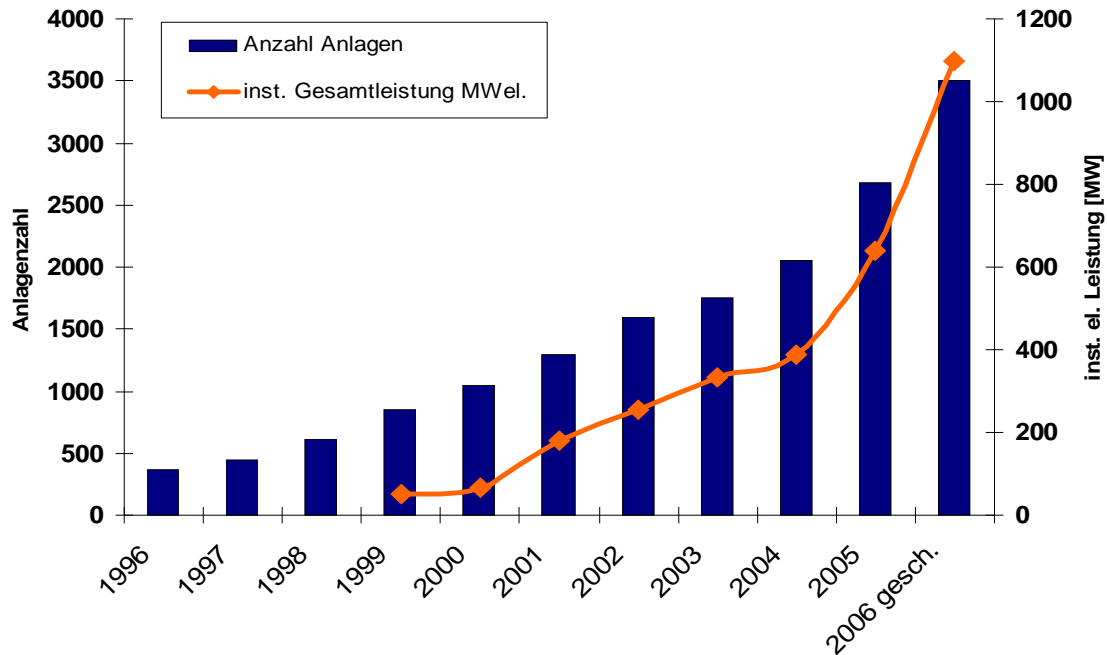


Abb. 1: Entwicklung der Anzahl und der elektrischen Anschlussleistung der Biogasanlagen in Deutschland (blau: Prognose) (FACHVERBAND BIOGAS E.V., 2007)

Entsprechend der unterschiedlichen Agrar- und Betriebsstruktur in den einzelnen Bundesländern weisen vor allem Bayern und Baden-Württemberg eine hohe Dichte an Biogasanlagen auf. Knapp 60 % der bundesdeutschen Anlagen stehen in diesen beiden Bundesländern (Abb. 2). Die Größe der Anlagen (durchschnittliche elektrische Leistung) liegt hier jedoch unter dem bundesdeutschen Durchschnitt.

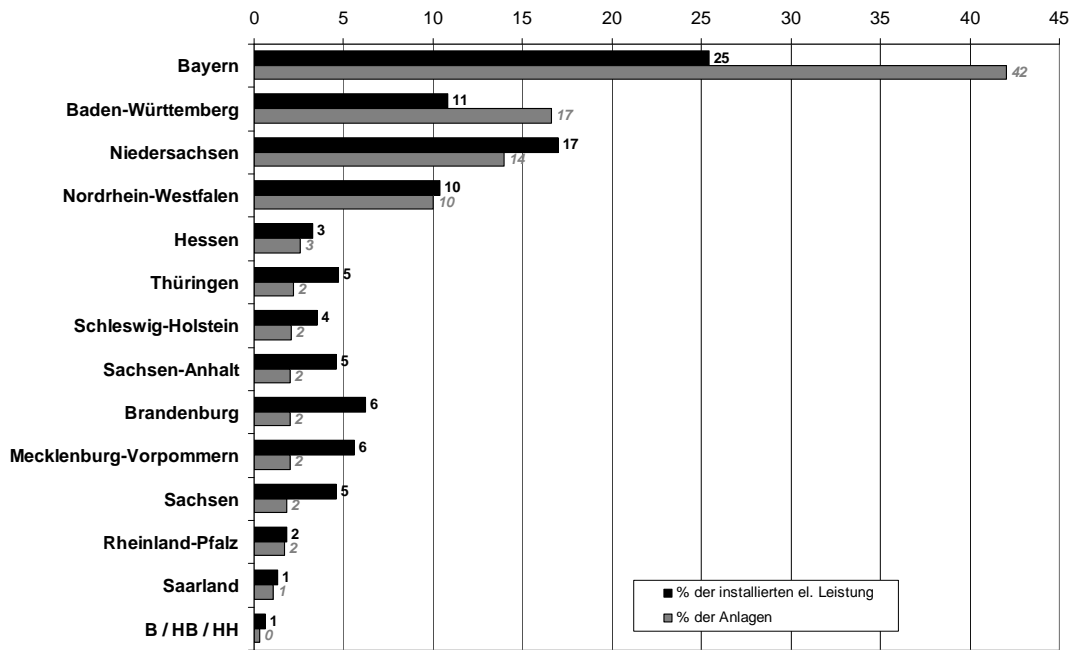


Abb. 2: Verteilung der Biogasanlagen und der installierten elektrischen Leistung auf die Bundesländer Deutschlands (Mai 2005; verändert nach SCHOLWIN, 2005)

1.2 Grundlagen des Biogasverfahrens

In Biogasanlagen werden unterschiedliche Substrate verschiedener Herkunft eingesetzt. Dem entsprechend sind verschiedene Techniken sowohl zur Substratvorbehandlung und Einbringung in den Fermenter, als auch hinsichtlich Fermenterbauarten und deren Betriebsweise vorzufinden. Je nach Anlagenart und Größe sowie den betrieblichen Rahmenbedingungen werden unterschiedliche Techniken zur Aufbereitung, Speicherung und Nutzung des Biogases eingesetzt. Die Techniken zur Lagerung und Verwertung des Gärrestes sollten sich maßgeblich nach dem betrieblichen Düngerbedarf und notwendigen Umweltschutzmaßnahmen richten. Grundsätzlich lässt sich der Verfahrensablauf entsprechend folgendem Schema in verschiedene Teilschritte und Techniken untergliedern (Abb. 3). Die kursiv dargestellten Bereiche sind derzeit entweder noch in Entwicklung, noch nicht als Stand der Technik definierbar oder aus wirtschaftlichen Gründen in landwirtschaftlichen Anlagen nicht verbreitet.

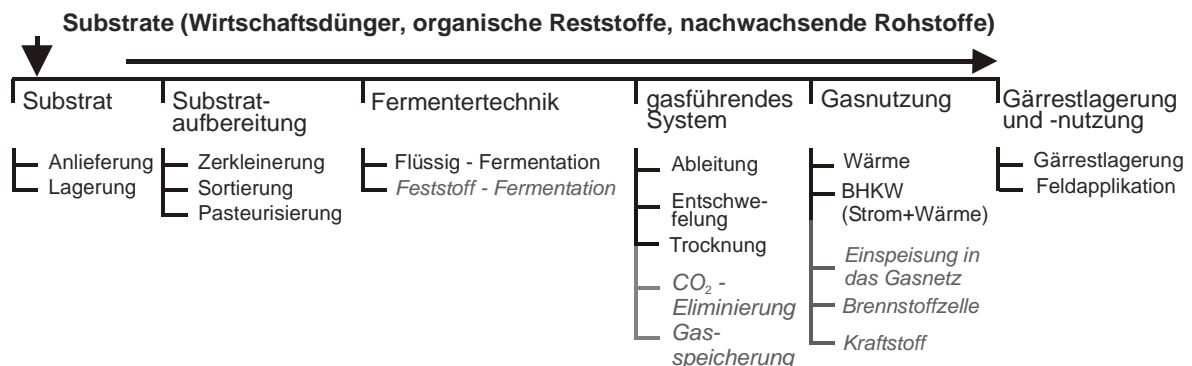


Abb. 3: Verfahrensschritte der Biogastechnologie

Die Unterscheidung in Flüssig- und Feststofffermentation wird auch oft mit den Begriffen Nass- bzw. Trockenfermentation vorgenommen. Aus fachlicher Sicht sind dies irreführende Begriffe, da der mikrobiologische Prozess in jedem Fall nur in der wässrigen Phase stattfinden kann. Grenzen zwischen Flüssig- und Feststofffermentation werden oft anhand der Pumpfähigkeit der Substrate gezogen. Ab einem Feststoffmassegehalt von ca. 16 % im Fermenter ist das Material i.d.R. nicht mehr pumpfähig. Unabhängig davon liegen bei Direkteinbringung in den Fermenter deutlich höhere TM-Gehalte in den Substraten vor.

In den folgenden Kapiteln werden die Grundlagen des mikrobiologischen Prozesses, die verfahrenstechnischen Teilschritte sowie die wesentlichen Technologien, verfahrenstechnischen Kennwerte und deren Bewertung dargestellt.

1.3 Grundlagen der Biogasentstehung

Die Entstehung von Methan basiert auf einem natürlichen biologischen Zersetzungsprozess, der in sauerstofffreien Systemen stattfindet. Methan entsteht beispielsweise im Verdauungstrakt von Wiederkäuern, in Sümpfen, Ozeanen, Seen und Reisfeldern oder auch in Wirtschaftsdüngerlagern. Wenn Methan unkontrolliert entweicht, trägt es als klimarelevantes Gas zum Treibhauseffekt bei (Global Warming Potential: 23,0 (GWP 100) (IPCC, 2001)). Methan wird in der Atmosphäre nur sehr langsam abgebaut. Durch kontrollierte Gärprozesse lässt sich die Methanentstehung aber auch technisch nutzen. Dies geschieht heutzutage in kommunalen Kläranlagen (Klärschlammfäulung), Deponien oder Biogasanlagen. Je nach Herkunft des Gases spricht man dann von „Klärgas“, „Deponiegas“ oder „Biogas“. Aber auch in Industrie und Gewerbe des agroindustriellen Bereiches wird der anaerobe Prozess zum Abbau der organischen Substanz von Abwässern eingesetzt.

1.3.1 Der anaerobe Abbauprozess

Anaerobe Fermentation bedeutet, dass unter Ausschluss von Sauerstoff organische Stoffe durch mikrobiologische Aktivität abgebaut werden. Das Endprodukt dieses Prozesses ist ein brennbares Gas, welches im Wesentlichen aus Methan und Kohlendioxid besteht. Im Gegensatz zu aeroben Zersetzungsprozessen, wie z.B. der Kompostierung, wird beim anaeroben Abbau kaum Wärme erzeugt. Die Energie bleibt in Form von Methan im Gas erhalten. Dieses Gas wird in der Regel zur Strom- und Wärmeerzeugung genutzt.

Der Prozess der Biogasentstehung ist eine Folge von verketteten Teilschritten, bei denen das abbaubare Ausgangsmaterial fortlaufend zu kleineren Einheiten bis hin zum Methan und Kohlendioxid, den Hauptkomponenten des Biogases, abgebaut wird (Abb. 4). An den einzelnen Phasen des Abbaus sind jeweils verschiedene Gruppen von Mikroorganismen beteiligt. Diese Organismen verwerten jeweils die Produkte der vorangegangenen Schritte.

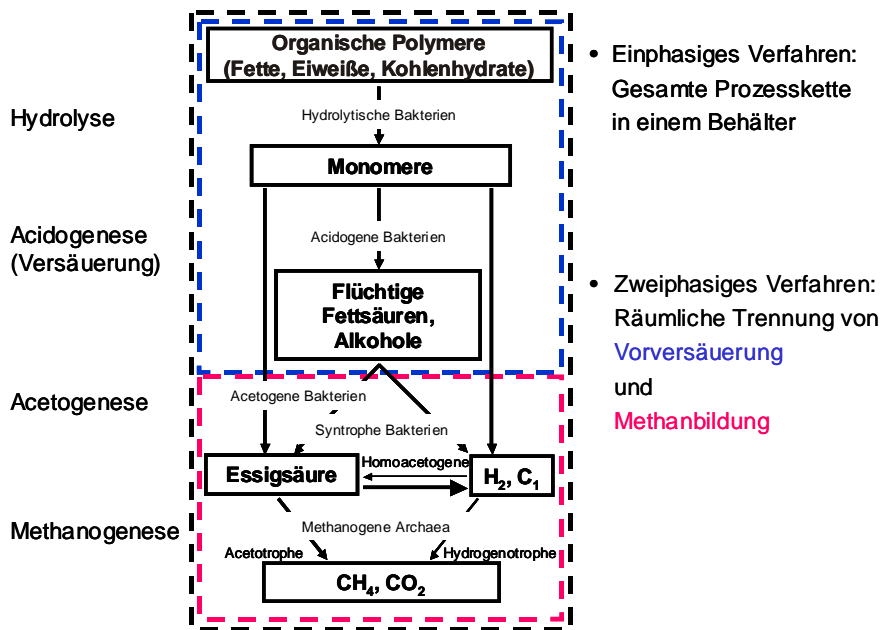


Abb. 4: Phasen der Biogasentstehung

1.3.1.1 Hydrolyse

Der anaerobe Abbau von organischem Material beginnt mit der Hydrolyse. In dieser Phase werden ungelöste biogene Polymere biochemisch unter Anlagerung von Wasser in niedermolekulare Verbindungen gespalten. Die folgende Tabelle gibt die wesentlichen Stoffumsetzungen wieder.

Tab. 1: Stoffumsetzungen in der hydrolytischen Phase und Beispiele beteiligter Mikroorganismen (nach SCHULZ ET AL., 1982; KUNST UND MURDACK in BÖHNKE ET AL., 1993)

Substrate	Beispiele Mikroorganismen	Produkte
Kohlenhydrate Proteine Fette	<i>Clostridium</i> spp. <i>Bacillus</i> spp. <i>Pseudomonas</i> spp.	Monosacharide Aminosäuren Kurz-kettige Peptide Lang-kettige Fettsäuren Glyzerin

Die zuvor dargestellte Prozesskette läuft in einem Fermenter räumlich und zeitlich parallel ab. Die Geschwindigkeit des Gesamtabbaus ergibt sich somit durch das langsamste Glied in der Kette. Im Falle von Biogasanlagen, in die viele pflanzliche Gerüstsubstanzen wie Cellulose, Hemicellulose und Lignin gelangen, ist die Hydrolyse der geschwindigkeitsbestimmende Prozess (KALTSCHMITT UND HARTMANN, 2001).

An dem Prozess der Hydrolyse sind eine Vielzahl von Bakteriengruppen beteiligt. Die Hydrolyse erfolgt mittels von Bakterien abgesonderten Exoenzymen, welche das ungelöste, partikuläre Material angreifen können (GRAF, 1999). Die Hydrolyseprodukte werden von den in der Abbaukette nachfolgenden Organismen aufgenommen und im eigenen Stoffwechsel weiter abgebaut.

1.3.1.2 Acidogenese

In dieser Phase entstehen aus den Produkten der Hydrolyse niedermolekulare organische Säuren und Alkohole. Außerdem entstehen mit Acetat, Wasserstoff und Kohlendioxid bei der Acidogenese bereits Ausgangsprodukte für die Methanbildung.

Tab. 2: Stoffumsetzungen in der acidogenen Phase und Beispiele beteiligter Mikroorganismen (nach SCHULZ ET AL., 1982; GRAF, 1999; OTTOW, 1997)

Substrate	Beispiele Mikroorganismen	Produkte
Monosaccharide Aminosäuren Kurzketten Peptide Langkettige Fettsäuren Glyzerin	<i>Clostridium</i> spp. <i>Bacteroides</i> spp. <i>Butyrivibrio</i> spp.	flüchtige Fettsäuren (Acetat, Propionat, Butyrat) Aldehyde, Alkohole Ketone, Ammoniak Kohlendioxid, Wasserstoff

Das Verhältnis der in dieser Phase entstehenden Produkte zueinander ist vom Wasserstoffpartialdruck, d.h. der Konzentration an elementarem Wasserstoff, abhängig. Je niedriger dieser ist, desto höher ist der Anteil an entstehendem Acetat (GRAF, 1999; KALTSCHMITT UND HARTMANN, 2001).

1.3.1.3 Acetogenese

Während der Acetogenese wird aus den niedermolekularen organischen Säuren und Alkoholen der Acidogenese Essigsäure, Wasserstoff und Kohlendioxid gebildet.

Die Produktion von Wasserstoff lässt den Wasserstoffpartialdruck ansteigen. Dieser hemmt als „Abfallprodukt“ der Acetogenese den Stoffwechsel der acetogenen Bakterien. Während der Methanogenese wird Wasserstoff zur Methanbildung verbraucht, so dass diese beiden Prozesse voneinander abhängig sind und nebeneinander in einer Art Symbiose der beteiligten Organismengruppen ablaufen (GRAF, 1999).

Tab. 3: Stoffumsetzungen in der acetogenen Phase und Beispiele beteiligter Mikroorganismen (nach SCHULZ ET AL., 1982, KLEEMANN UND MELIß, 1993; WENZEL 2002)

Substrate	Beispiele Mikroorganismen	Produkte
flüchtige Fettsäuren (Propionat, Butyrat) Aldehyde Alkohole Ketone	<i>Clostridium</i> spp. <i>Eubacterium</i> spp.	Acetat Kohlendioxid Wasserstoff

1.3.1.4 Methanogenese

In der letzten Phase des anaeroben Abbaus erzeugen methanogene Bakterien schließlich das Methan. Die Methanbildung basiert zu 70% auf der Verwertung von Acetat durch acetotrophe Methanbakterien auf dem Wege der Decarboxilierung (KALTSCHMITT UND HARTMANN, 2001). Etwa 30% des erzeugten Methans entstammt der Methanisierung von Kohlendioxid und Wasserstoff durch hydrogenotrophe Organismen ($\text{CO}_2 + 4 \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2 \text{H}_2\text{O}$) wie z.B. *Methanobacterium bryanti* (GRAF, 1999).

Tab. 4: Stoffumsetzungen in der methanogenen Phase und Beispiele beteiligter Mikroorganismen (nach KALTSCHMITT UND HARTMANN, 2001; WENZEL 2002)

Substrate	Beispiele Mikroorganismen	Produkte
Acetat	<i>Methanosarcina</i> spp.	Methan
Wasserstoff	<i>Methanosaeta</i> spp.	Kohlendioxid
Kohlendioxid	<i>Methanobacterium</i> spp.	

Methanbakterien sind strikt anaerob und reagieren sehr empfindlich auf Sauerstoff (GRAF, 1999). Somit ist ein Sauerstoffeintrag in den Gärprozess unbedingt zu vermeiden. Im Gegensatz zu aeroben Bakterien kann diese Bakteriengruppe nur in flüssiger Phase bei einem Wassergehalt von mindestens 50% existieren (SCHULZ ET AL., 1982). Methan entsteht auch in Seen, jedoch ist dort die Reaktionsgeschwindigkeit durch die geringe Temperatur deutlich eingeschränkt (KALTSCHMITT UND HARTMANN, 2001). Es sollten deshalb bei der gezielten Biogaserzeugung Temperaturen von mindestens 20°C eingehalten werden, wobei auch hier gilt, dass höhere Temperaturen schnellere Umsetzungsprozesse zur Folge haben. In der Biogastechnologie sind Prozesstemperaturen von 35°C bis 40°C üblich. Der akzeptable pH-Bereich für methanogene Organismen liegt zwischen 6,5 und 8,1 (GRAF, 1999). Hieraus erklärt sich, dass eine Versäuerung des Prozesses, z.B. durch fehlerhafte Substratzugaben, unbedingt zu vermeiden ist.

Wird frisches Substrat zugegeben, so setzen rasch Hydrolyse und Versäuerung ein. Sinkt der pH-Wert zu stark ab, verringert sich die Abbauleistung der methanogenen Bakterien und es konzentriert sich Acetat auf. Dies bewirkt eine weitere Absenkung des pH, wodurch der Prozess zum Erliegen kommen kann. Man spricht dann von einer Versäuerung des Reaktors. Mit einer rechtzeitigen Unterbrechung der Substratzufuhr kann diesem Prozess entgegengewirkt werden. In extremen Fällen ist die Zugabe von neutralisierenden Stoffen wie Kalk oder Natronlauge notwendig (KALTSCHMITT UND HARTMANN, 2001).

1.3.1.5 Weitere Prozesse

Neben der Methanogenese beeinflussen weitere Prozesse die Gasqualität. Hinsichtlich des Schwefelwasserstoffgehaltes spielt die Sulfatreduzierung eine Rolle. Dieser Prozess findet insbesondere bei Zugabe von schwefelhaltigem Ausgangsmaterial statt. Der z.B. in Aminosäuren enthaltene Schwefel wird von sulfatreduzierenden Mikroorganismen zu Schwefelwasserstoff abgebaut. Dieser Prozess bringt zwei Nachteile mit sich. Einerseits verbraucht diese Reaktion Wasserstoff. Somit stehen die sulfatreduzierenden Mikroorganismen in direkter Konkurrenz zu den methanogenen Organismen, welche Wasserstoff und Kohlendioxid zu Methan verarbeiten (WENZEL, 2002). Andererseits ist Schwefelwasserstoff ein Schadgas, das sowohl für den Menschen gesundheitsschädlich ist als auch in den Einrichtungen der Biogasanlage zu Korrosionsschäden führt. Die Standzeit der Motoren der BHKWs wird hierdurch negativ beeinflusst (SCHNEIDER ET AL., 2002).

Derzeit wird in der Biogasproduktion ein Verfahren zur biologischen Entschwefelung des Gases eingesetzt, die so genannte Schwefelwasserstoffoxidation. Diesem Verfahren liegt ein weiterer mikrobiologischer Prozess zu Grunde, der nicht direkt der Biogasproduktion zuzuordnen ist, sondern bereits der Gasaufbereitung angehört. Bei diesem Verfahren wird der im Biogas unerwünschte Schwefelwasserstoff durch aerobe Bakterien, die sich durch Einblasen geringer Mengen Luft in den Gasraum des Fermenters (3,5 – 4,5% der erzeugten Gasmenge) entwickeln können, zu elementarem Schwefel oxidiert und somit aus dem Biogas entfernt (GRAF, 1999).

Weitere Prozesse, welche die Biogasentstehung nachteilig beeinflussen, sind z.B. Schwimmdecken, Sinkschichten, Abweichungen von der vorgegeben Solltemperatur im Fermenter sowie erhöhte Ammonium- oder Fettsäurekonzentrationen (GRAF, 1999). Diesen Störeffekten kann mit technischen Maßnahmen wie Rührwerken, Beheizungseinrichtungen, Mess-, Steuerungs- und Regeltechnik und einer angepassten Substratzufuhr entgegengewirkt werden. Auf diese technischen Aspekte wird im Kap. 1.5 eingegangen. Zur gezielten Biogaserzeugung sind für die Mikroorganismen geeignete Rahmenbedingungen zu schaffen. Das Wachstum und die Aktivität der Bakterien wird wesentlich durch Sauerstoffausschluss, Gärtemperatur, pH-Wert, Nährstoffangebot, Durchmischungsintensität und den Gehalt an Hemmstoffen beeinflusst. Insbesondere die methanbildenden Bakteriengruppen sind obligat anaerob, somit ist der Sauerstoffeintrag in den Gärprozess unbedingt zu vermeiden. Bezüglich der Temperatur werden drei Thermiestufen (Tab. 5) unterschieden, in denen jeweils der Temperatur angepasste Bakterienstämme aktiv sind:

Tab. 5: Thermiestufen und typische Verweilzeiten

Thermiestufe	Typische Temperatur	Anzustrebende Verweilzeit
psychrophil	<20 °C	70-80 Tage
mesophil	30-42 °C	30-40 Tage
thermophil	48-55 °C	15-20 Tage

Mit den in Tab. 5 angegebenen Temperaturen und Verweilzeiten erfolgt eine Zersetzung von etwa 50% der abbaubaren Inhaltsstoffe üblicher landwirtschaftlicher Substrate. Das Temperaturniveau bestimmt maßgeblich die Geschwindigkeit des Abbauprozesses. Generell gilt, dass bei einer höheren Temperatur der Abbau schneller erfolgt. Höhere Abbaugrade sind zwar prinzipiell möglich, führen in Biogasanlagen aber zu unverhältnismäßig längeren Verweilzeiten, größeren Fermentervolumina und damit entsprechend höheren Kosten.

Im thermophilen Temperaturbereich ist die Hydrolyserate im Vergleich zum mesophilen Temperaturniveau erhöht, was zu einem Anstieg des Gehalts an organischen Säuren führt. Thermophile Gärprozesse reagieren bereits auf Temperaturschwankungen von +/- 1 °C und benötigen eine gewisse Zeit, sich an ein neues Temperaturniveau anzupassen und die ursprüngliche Leistung wieder zu erreichen.

Bei der mesophilen Prozessführung werden i. d. R. Temperaturschwankungen von +/- 3 °C toleriert, ohne dass es zu einem größeren Einbruch in der Gasbildungsrate kommt. Aufgrund der erhöhten Reaktionsgeschwindigkeit sind bei höheren Temperaturen geringere Verweilzeiten des Substrates im Faulraum zur Erreichung desselben Abbaugrades erforderlich (Abb. 5).

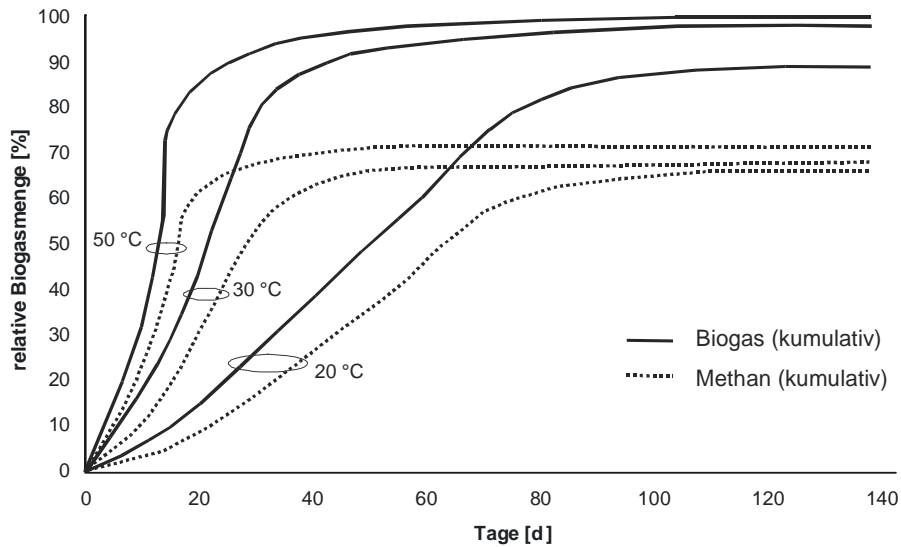


Abb. 5: Relative Biogasmenge in Abhängigkeit von Temperatur und Verweilzeit (verändert nach MALY ET AL., 1971 in BAADER ET AL., 1978)

In der Praxis erfolgte bisher kaum eine systematische Anpassung der Fermentertemperatur an die eingesetzten Substrate. In Bayern werden die meisten Anlagen im mesophilen Temperaturbereich betrieben (Abb. 6), die mittlere Fermentertemperatur liegt bei 41°C. Beheizt werden diese Fermenter größtenteils mit Fußboden- und/oder Wandheizungen.

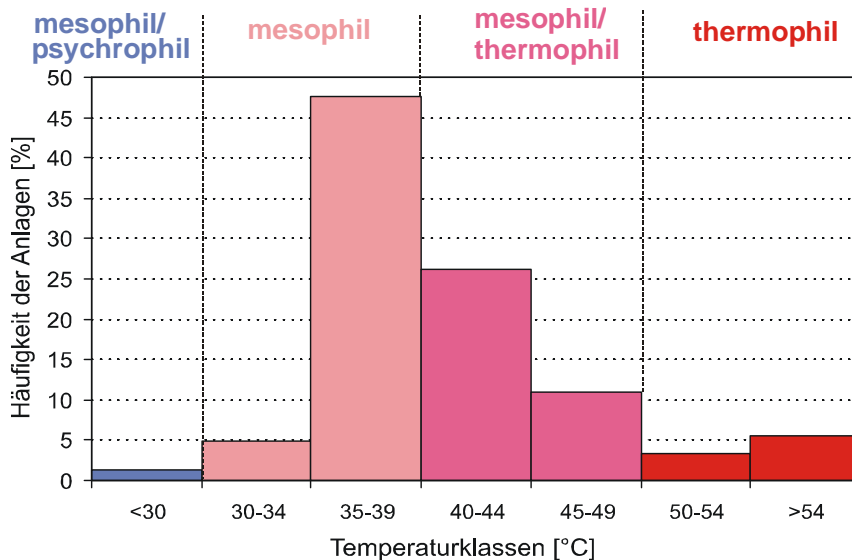


Abb. 6: Prozesstemperatur von Biogasanlagen, Umfrage Bayern 2002 (nach GRONAUER ET AL., 2003)

Für die Methanbildung gilt ein pH-Wert im schwach alkalischen Bereich bis 7,5 als optimal. Der TM-Gehalt in voll durchmischten Gärbehältern sollte zwischen 3 und 10 % liegen. Die Alkalinität als Maß für die Pufferkapazität liegt zwischen 1500 und 5000 mg CaCO₃/l, die Konzentration einzelner flüchtiger Fettsäuren im Bereich von 600 bis 1500 mg/l. Messwerte außerhalb der angegebenen Bereiche deuten auf eine Prozessstörung hin.

Da aus den verwendeten Substraten möglichst viel Methan produziert werden sollte, besteht ein hohes Interesse, leicht verdauliche Kohlenstoffträger als Substrat einzusetzen. Jedoch sind auch Spurenelemente und Nährstoffe wie Eisen, Nickel, Kobalt, Selen, Molybdän und Wolfram für das Wachstum und Überleben der Bakterien notwendig (BRAUN, 1982).

Um die Bakterien ausreichend mit Nährstoffen zu versorgen, sollte das C:N:P:S-Verhältnis bei etwa 600:15:5:1 liegen (WEILAND, 2001). Hemmungen bzw. Störungen des Prozesses können sowohl durch eine unausgewogene Versorgung mit Nährstoffen und Spurenelementen eintreten, als auch durch eine Überversorgung mit rasch abbaubaren Substraten. Weitere Faktoren sind für Mikroorganismen toxische Substanzen, die mit den Substraten eingebracht werden (Schadstoffe) oder während des Prozesses direkt entstehen (Stoffwechselprodukte).

Eine Festlegung strikter Grenzwerte ist schwierig, da sowohl chemische Prozesse toxische Stoffe binden können, als auch eine gewisse Adaption der Mikroorganismen an die Milieubedingungen möglich ist. Anhaltswerte für kritische Grenzen von Hemmstoffkonzentrationen gibt Tab. 6.

Tab. 6: Kritische Hemmstoffkonzentrationen für anaerobe Abbauprozesse in Biogasreaktoren (nach KALTSCHMITT UND HARTMANN, 2001)

Hemmstoff	Konzentration
Natrium	zwischen 6 - 30 g/l (in adaptierten Kulturen bis zu 60 g/l)
Kalium	ab 3 g/l
Calcium	ab 2,8 g/l CaCl ₂
Magnesium	ab 2,4 g/l MgCl ₂
Ammonium	2,7 - 10 g/l
Ammoniak	ab 0,15 g/l
Schwefel	ab 50 mg/l H ₂ S, 100 mg/l S ²⁻ , 160 mg/l Na ₂ S (in adaptierten Kulturen bis zu 600 mg/l Na ₂ S und 100 mg/l H ₂ S)
Schwermetalle	<u>Als freie Ionen:</u> ab 10 mg/l Ni, ab 40 mg/l Cu, ab 130 mg/l Cr, ab 340 mg/l Pb, 400 mg/l Zn <u>In Carbonatform:</u> ab 160 mg/l Zn, ab 170 mg/l Cu, ab 180 mg/l Cd, ab 530 mg/l Cr ³⁺ , ab 1.750 mg/l Fe Schwermetalle können durch Sulfid gefällt und neutralisiert werden
Verzweigte Fettsäuren	Iso-Buttersäure: schon ab 50 mg/l hemmend

1.3.2 Prozessprodukt „Biogas“

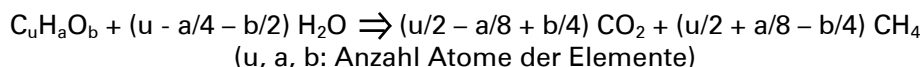
Aus der geschilderten Prozesskette entsteht das Produkt Biogas. Die Zusammensetzung von Biogas variiert und ist abhängig von der Art sowie der Struktur der Ausgangssubstrate, dem verwendeten Anlagensystem, der Temperatur, der Verweilzeit und der Raumbelastung (KLEEMANN UND MELIß, 1993). Grundsätzlich kann Biogas wie in Tab. 7 angegeben charakterisiert werden.

Tab. 7: Zusammensetzung von Biogas (verändert nach KALTSCHMITT UND HARTMANN, 2001)

Komponente	Methan (CH ₄)	Kohlen-dioxid (CO ₂)	Wasser (H ₂ O)	Stickstoff (N ₂)	Wasser-stoff (H ₂)	Sauer-stoff (O ₂)	Schwe-fel-wasser-stoff (H ₂ S)
Anteil am Biogas [%]	50-75	25-45	2-7	0-2	0-1	0-2	0-2

Da das entstehende Biogas energetisch genutzt werden soll, ist insbesondere der Methananteil von Bedeutung, der den Brennwert des Gases bestimmt. Bei einem Methangehalt von 60% kann mit einem Heizwert von 21 MJ/Nm³ Biogas gerechnet werden. Biogas hat eine durchschnittliche Dichte von 1,22 kg/Nm³ und ist somit in etwa so schwer wie Luft (1,29 kg/Nm³). Es handelt sich prinzipiell um ein ungiftiges Gas, allerdings können erhöhte Schwefelwasserstoffkonzentrationen schädlich wirken. Gefahr besteht bei offener Flamme, denn ein ungünstiges Gas-Luftgemisch von 1:3 – 1:12 erzeugt ein explosives Gasgemisch. Vor Arbeiten im Fermenterinneren muss daher entsprechend belüftet werden, da sonst neben akuter Erstickungsgefahr auch Explosionsgefahr besteht (SCHULZ ET AL., 1982).

Insgesamt ist die Biogasproduktionsrate sowie -qualität deutlich abhängig vom verwendeten Substrat. Die zu erwartende Gasproduktion aus Gülle von Wiederkäuern, die mit rohfaserreicherem Futter gefüttert werden, ist beispielsweise geringer als die Gasmenge aus Schweinegülle. Theoretisch lässt sich der Biogas- und Methanertrag nach der Umsatzgleichung von BUSWELL UND MUELLER (1952) mit einer Genauigkeit von bis zu 95 % berechnen:



Die Methanerträge aus Biomasse ergeben sich aus dem Gehalt an Protein, Fett, Rohfaser und stickstofffreien Extraktstoffen. Diese Parameter sind im Bereich der Ernährung von Wiederkäuern bekannt (Weender-Analyse) und werden in Verbindung mit der Verdaulichkeit (Van Soest-Fractionen) zur Bestimmung der Qualitäten von Futtermitteln herangezogen.

Da zwischen den mikrobiologischen Verhältnissen im Pansen von Rindern und im Reaktor einer Biogasanlage Parallelen bestehen, kann die Berechnung des theoretisch erreichbaren Biogas- und Methanertrages eines Substrates auf Basis von Weender-Analyse und Van Soest-Fraktion erfolgen. Die notwendigen Kennzahlen können den DLG-Futterwerttabellen entnommen werden. Näheres hierzu findet sich bei WEILAND (2001); JÄGER (2002); EDELMANN (2001); WELLINGER (2000) und AMON (2003). Dieses Vorgehen erscheint für die Praxis zielführender als der Ansatz über die Buswell-Gleichung. Eine grobe Abschätzung der zu erwartenden Biogasmengen und -erträge kann mit den in Tab. 8 angegebenen Daten erfolgen, wenn die Zusammensetzung der Ausgangssubstrate bekannt ist.

Tab. 8: Theoretische Gasausbeuten (nach KONSTANDT, 1976 in KLEEMANN UND MELIB, 1993; BASERGA, 1998)

Substrat	Liter Gas / kg TM	CH ₄ [%]	CO ₂ [%]
Rohprotein	700	70 - 71	29 - 30
Rohfett	1200 - 1250	67 - 68	32 - 33
Kohlenhydrate	790 - 800	50	50

Bei einer einmaligen Substratzugabe beginnt mit der Hydrolyse die Zersetzung des Ausgangsmaterials. In dieser Startphase wird noch relativ wenig Biogas erzeugt. Kurz darauf stehen die leicht abbaubaren Stoffe der Methanisierung zur Verfügung und die Biogasproduktion erreicht ihre Spitze. Sind die leicht abbaubaren Substanzen abgebaut, wird zwar aus den schwerer abbaubaren Inhaltsstoffen noch weiterhin Gas gebildet, aber mit stetig abnehmender Gasproduktionsrate (Abb. 7).

In der Praxis werden Fermenter in der Regel ständig mit neuem Substrat beaufschlagt, so dass sich je nach Art und Häufigkeit der Substratzugaben eine mehr oder weniger konstante Gesamtgasproduktion aus summierten Überlagerungen des in (Abb. 7) dargestellten Verlaufes ergibt.

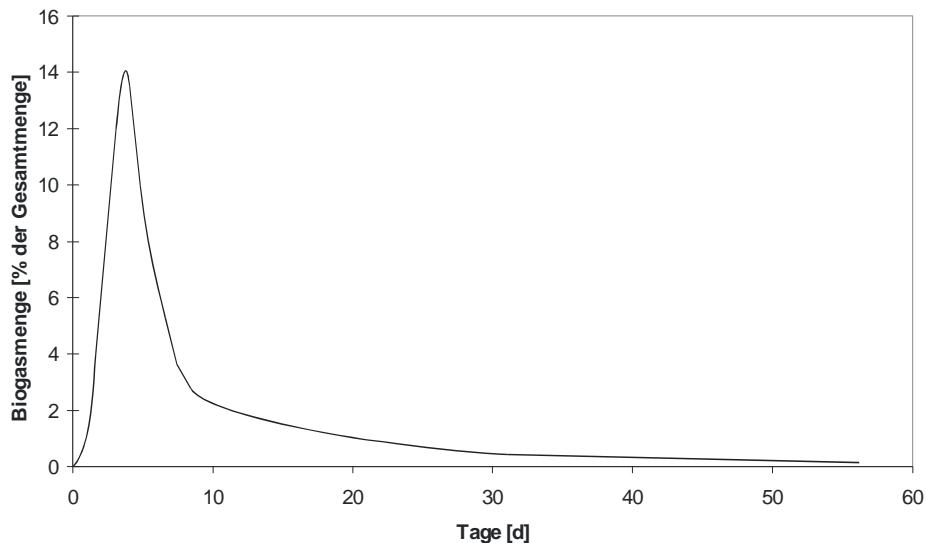


Abb. 7: Zeitlicher Verlauf der Biogasproduktion nach einer einmaligen Substratzugabe (Batch-Test)

Ein weiterer wichtiger Aspekt der Gasproduktionsrate besteht in der Abhängigkeit der Biogasausbeute (in m^3 Gas je kg zugeführtem Substrat) und der spezifischen Gasproduktionsrate (in m^3 Gas je m^3 Fermentervolumen und Tag) von der durchschnittlichen hydraulischen Verweilzeit (HRT) im Fermenter. Unter der durchschnittlichen hydraulischen Verweilzeit versteht man das Verhältnis zwischen dem gesamten Fermentervolumen und dem täglich zugeführten Substratvolumen (Abb. 8). In Praxisanlagen steigt während der erstmaligen Fermenterbefüllung („Anfahrbetrieb“) die Gasbildungsrate in m^3 pro m^3 Fermenternutzvolumen und Tag zunächst an und sinkt danach bis zum Erreichen eines quasi stationären Zustandes ab. Gleichzeitig steigt die substratbezogene Biogasausbeute kontinuierlich an und erreicht nach ca. einem Monat ein konstantes Niveau.

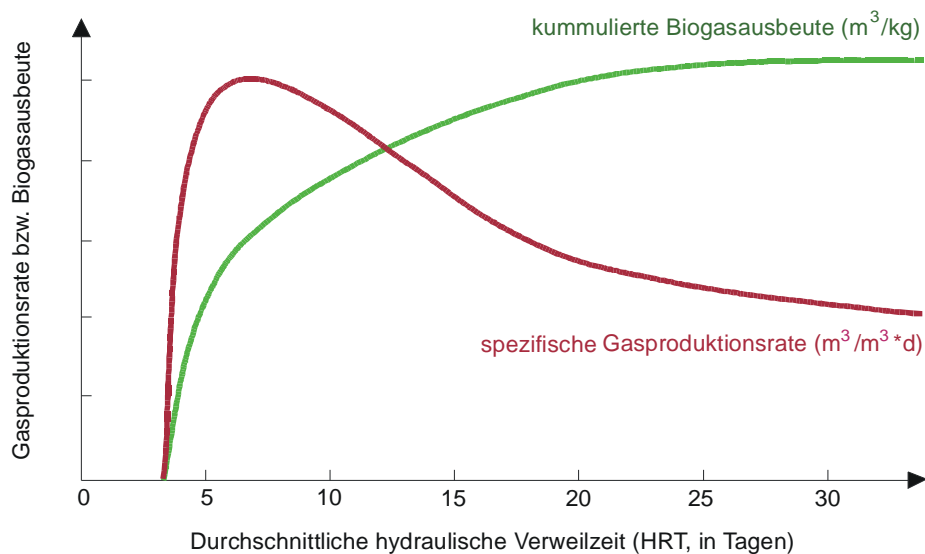


Abb. 8: Fermentervolumenbezogene Gasproduktionsrate und substratspezifische Biogasausbeute in Abhängigkeit der hydraulischen Verweilzeit in einem Anaerobfermenter (nach ANONYMUS, 2001)

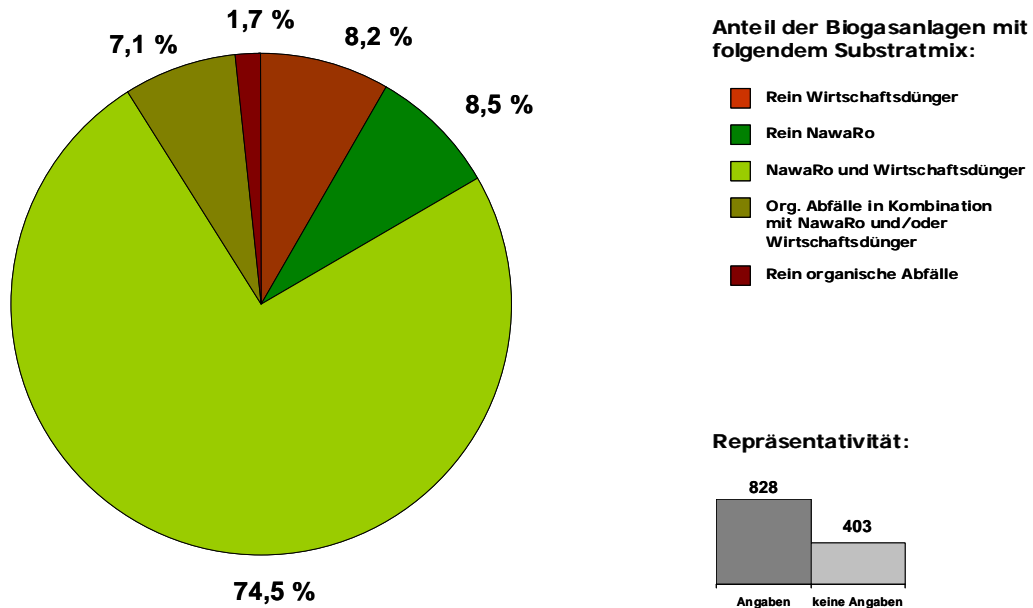
Dieses Verhalten ist darauf zurückzuführen, dass mit zunehmender hydraulischer Verweilzeit im Fermenter das Material nicht mehr so schnell abgebaut werden kann, wie zu Beginn des Abbauprozesses (die leichtabbaubaren Substanzen sind verbraucht). Im selben Zeitraum nimmt die Biogasausbeute erst sehr stark und im weiteren Verlauf kontinuierlich abgeschwächt zu, bis ein konstantes Niveau erreicht ist.

Würden nun ausschließlich leicht verdauliche Substrate eingesetzt, würden die Zeiträume der Kurvendynamik nach Abb. 8 theoretisch sehr kurz. Unter praktischen Bedingungen würde in diesem Fall der Fermenterinhalt versäuern und die Gasbildung zum Erliegen kommen. Deshalb ist ein weiterer Parameter für das Fermentermanagement sehr wichtig, die so genannte Raumbelastung. Sie gibt an, wie viel organische Trockenmasse (kg oTM) dem Fermentervolumen zugeführt wird. Grenzen der Raumbelastung liegen aus praktischen Erfahrungen bei einstufigen Anlagen bei durchschnittlich $3 \text{ kg oTM m}^{-3} \text{ d}^{-1}$. In Anlagen mit mehreren in Reihe geschalteten Fermentern können Raumbelastungen im ersten Fermenter von bis zu $10 \text{ kg oTM m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ realisiert werden (s. auch Kap. 1.5).

Diese Angaben sind aber als Durchschnittswerte zu verstehen, da die Zusammensetzung der zugeführten Substrate und deren Eigenschaften in der "Gesamtration" entscheidenden Einfluss nehmen. Auf die differenzierte Betrachtung von substratspezifischen Gaserträgen geht das folgende Kapitel ein.

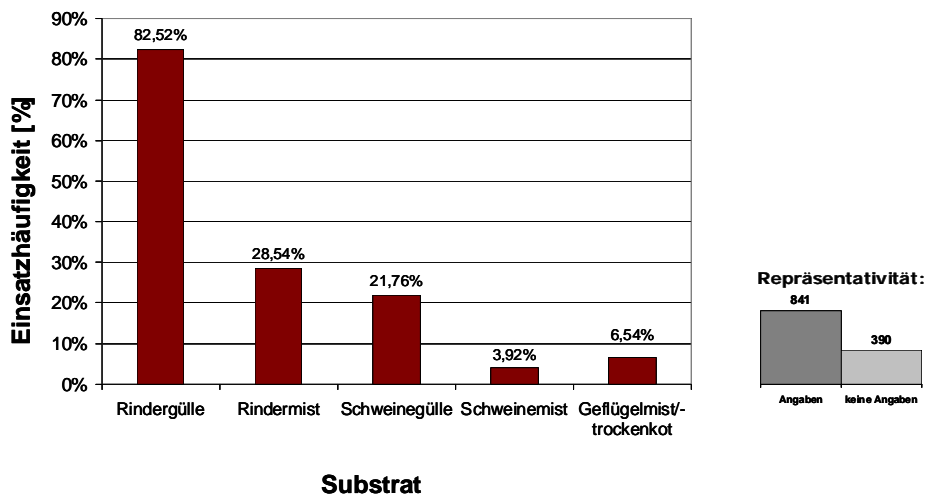
1.4 Substrate

Die anaerobe Fermentation organischer Substrate oder Abfälle ist in Bayern zu einem integralen Bestandteil der Kreislaufwirtschaft geworden. Nach der 2006 bayernweit durchgeführten Betreiberumfrage werden in Biogasanlagen am häufigsten nachwachsende Rohstoffe zusammen mit Wirtschaftsdüngern vergärt (Abb. 9). Aus dem Bereich der Wirtschaftsdünger wird am häufigsten Rindergülle eingesetzt (Abb. 10). Mais- und Grassilage sind gemäß der durchgeführten Betreiberbefragung die in Biogasanlagen am häufigsten eingesetzten nachwachsenden Rohstoffe. Die restlichen Komponenten spielen eine eher untergeordnete Rolle (Abb. 11).



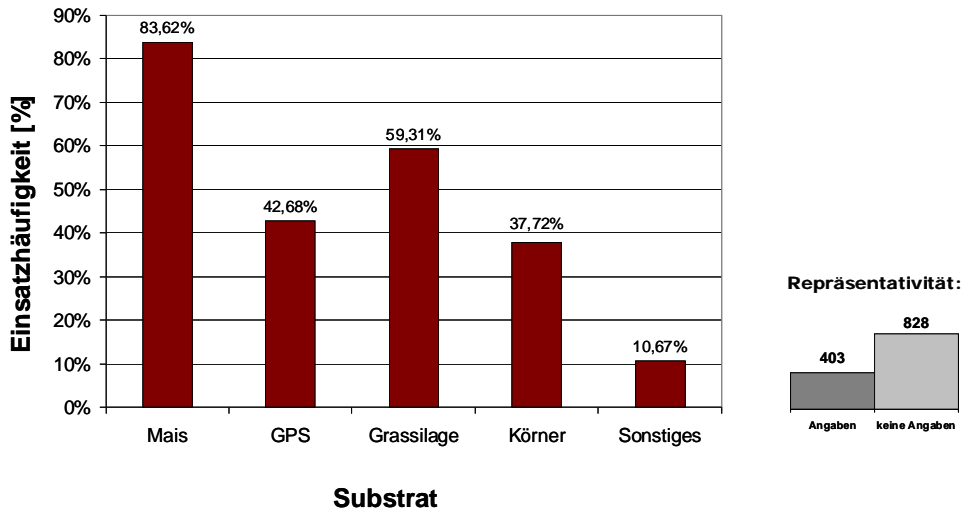
Quelle: Röhring, I., Biogasanlagen-Betreiberbefragung Bayern 2006, LfL-ILB 2007

Abb. 9: Substrateinsatz der Biogasanlagen



Quelle: Röhring, I., Biogasanlagen-Betreiberbefragung Bayern 2006, LfL-ILB 2007

Abb. 10: Einsatzhäufigkeit der Wirtschaftsdünger



Quelle: Röhling, I., Biogasanlagen-Betreiberbefragung Bayern 2006, IFL-ILB 2007

Abb. 11: Einsatzhäufigkeit der nachwachsenden Rohstoffe

Die Menge des dabei erzeugten Biogases hängt von vielen Faktoren ab. Entscheidend hierbei ist vor allem die Art des Substrates und dessen chemische Zusammensetzung. Biogasanlagen werden meist als Kofermentationsanlagen in Flüssigfermentation betrieben, wobei neben Gülle als Grundsubstrat andere organische Stoffe als Kosubstrate dem Reaktor zugeführt werden. Durch den Einsatz dieser Kosubstrate lässt sich die Biogasproduktivität deutlich steigern und somit das Kosten-Nutzen-Verhältnis erheblich verbessern (PLÖCHL, M.; HEIERMANN, M.; 2003). Die Bewertung der Substrate erfolgt nach verschiedenen Kriterien, die sowohl die Methanertragspotentiale und den Einfluss auf die Mikrobiologie, sowie den Chemismus des anaeroben Abbaus berücksichtigen, als auch Risiken in den Bereichen Schadstoffeintrag (Gehalt an Schwermetallen und organischen Schadstoffen) und Hygiene (Gehalt an pathogenen Keimen) einschließen. In diesem Kapitel werden verschiedene Substrate, die in Biogasanlagen eingesetzt werden, nach ihrer Herkunft gruppiert und charakterisiert (Abb. 12).

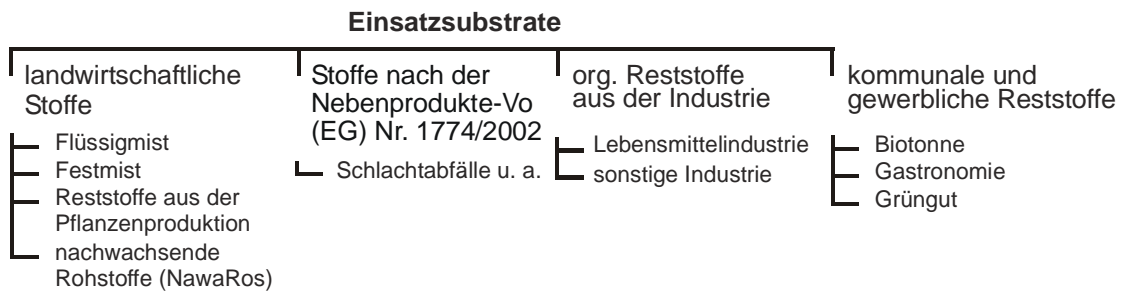


Abb. 12: Systematik verschiedener Einsatzsubstrate für Biogasanlagen

1.4.1 Landwirtschaftliche Substrate

Die Biogaserzeugung aus Biomasse landwirtschaftlicher Herkunft gewinnt zunehmend an Bedeutung. Als Substrate dienen vielfältige Sorten von Energiepflanzen wie Mais, Wiesen- gras, Klee- gras, Sudangras, Futterrüben u.v.a.m. und die verschiedenen Formen von Rück- ständen aus der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung (Wirtschaftsdünger) (AMON, 2003). Die Biogaserträge landwirtschaftlicher Substrate können erheblich variieren: TM-Gehalte so- wie die Zusammensetzung der Inhaltstoffe können wegen natürlicher Schwankungen zu un- terschiedlichen Biogaserträgen und -qualitäten führen. Beim Einsatz dieser Substrate ist auf eine möglichst gleichmäßige Beschaffenheit des Gärgutes zu achten.

1.4.1.1 Flüssigmist (Gülle)

In Biogasanlagen wird i.d.R. Flüssigmist als Grundsubstrat eingesetzt (Tab. 9). Er stabilisiert auf Grund seiner Zusammensetzung den Fermentationsprozess und gleicht Schwankungen in der Qualität des Gärsubstrats aus. Die Methanausbeute aus dem Wirtschaftsdünger hängt vom Tierleistungsniveau und von der Fütterungsintensität ab. Die höchsten Methanausbeuten werden bei mittlerer Tierleistung und bei ausgeglichener Fütterung erreicht (AMON, 2003).

Rinder- und Schweinegülle werden bedingt durch die anfallenden Mengen und Fermentati- onseigenschaften bevorzugt. Wegen der niedrigen TM-Gehalte kann Gülle mit Pumpen in den Fermenter eingebracht werden.

Tab. 9: Biogas- und Methanertrag von Flüssigmist (Gülle)

Substrate	TM (% FM)		oTM (% FM)		Biogas (m ³ /kg oTM)		Biogas (m ³ /kg oTM) Richtwert	Methan (in %)		Methan (in %) Richtwert
	von	bis	von	bis	von	bis		von	bis	
Rindergülle ^{a;b;c;d;e;f;g}	7,5	13	6,4	10	0,17	0,63	0,28	53	62	55
Schweinegülle ^{a;b;c;d;e;f;g}	2,3	11	1,3	7,1	0,3	0,88	0,40	47	68	58
Hühnergülle ^a					0,47					

a = Baserga (2000); b = Behmel (1996); c = Boxer (2004); d = KTBL (2004); e = Kuhn (1995);
f = Sedlmeier (2000); g = Zauner (1986)

1.4.1.2 Festmist

Im Vergleich zu Flüssigmist ist bei Festmist eine gesonderte Einbringung notwendig (Tab. 10). Aus heutiger Sicht ist das Einmischen des Festmistes in den flüssigen Wirtschaftsdünger die Vorzugsvariante für die Biogaserzeugung, aber auch Techniken zur direkten Feststoffeinbrin- gung in den Fermenter werden in der Praxis eingesetzt.

Tab. 10: Biogas- und Methanertrag von Festmist

Substrate	TM (% FM)		oTM (% FM)		Biogas (m ³ /kg oTM)		Biogas (m ³ /kg oTM) Richtwert	Methan (in %)		Methan (in %) Richtwert
	von	bis	von	bis	von	bis		von	bis	
Hühnermist ^c	86		60		0,38		0,50	51		60
Pferdemist ^b					0,3	0,4				
Rindermist ^{a;b;c;d;e}	26		22		0,15	0,53	0,45	42	68	55
Schafmist ^{b;e}					0,4	0,5		50	60	
Schweinemist ^b	15	25	12	20	0,45					

a = Amon (2003); b = Baserga (2000); c = KTBL (2004); d = Kuhn (1995); e = Zauner (1986)

1.4.1.3 Reststoffe der Pflanzenproduktion

Unter Reststoffen aus der Landwirtschaft werden alle aus der Pflanzenproduktion resultierenden Stoffe verstanden (z.B. Kartoffeln, Kartoffelkraut, Rübenblatt, etc.). Die Reststoffe der Pflanzenproduktion sind wegen ihres hohen Kohlenstoffanteils und ihrer hohen Verdaulichkeit (Ausnahme: Stroh) als Kosubstrate sehr gut geeignet (Tab. 11). So kann eine optimale Mischung mit einem ausgewogenen C:N-Verhältnis für die Mikrobiologie erreicht und der Methanertrag wesentlich erhöht werden.

Tab. 11: Biogas- und Methanertrag von Reststoffen der Pflanzenproduktion

Substrate	TM (% FM)		oTM (% FM)		Biogas (m ³ /kg oTM)		Biogas (m ³ /kg oTM) Richtwert	Methan (in %)		Methan (in %) Richtwert
	von	bis	von	bis	von	bis		von	bis	
Getreidestroh ^a					0,25	0,35				
Kartoffeln ^b	19	21	17	20	0,59	0,82	0,70			52
Kartoffelkraut ^a					0,5	0,6				
Maisstroh ^a					0,5					
Reisstroh ^d					0,38	0,47		50	57	
Rübenblatt ^{a,b}	11	16	8,9	11	0,4	0,55	0,55	56		52
Zuckerrübenblatt- Silage ^c					0,2	0,3				

a = Baserga (2000); b = KTBL (2004); c = Zauner (1986); d = Zhang (1999)

¹ = (m³ / kg oTM)

1.4.1.4 Nachwachsende Rohstoffe

In der Landwirtschaft wird zunehmend die Möglichkeit genutzt, spezielle Pflanzen zur Energiegewinnung anzubauen. So können Silomais, Getreideganzpflanzen, Gräser mit hohem Biomasseertrag, Rüben und andere Feldfrüchte zur Biogasgewinnung verwendet werden. Bei der Nutzung von Energiepflanzen wird das Ziel verfolgt, einen möglichst hohen Methanertrag pro Hektar bei geringst möglichen Kosten für Ernte, Anbau und Konservierung zu erreichen. Anhand ausgewählter Energiepflanzen werden im Folgenden, soweit es zum derzeitigen Stand des Wissens möglich ist, Einflüsse der Sortenwahl, des Erntezeitpunktes, der Konservierungsform und des Ernteverfahrens auf das spezifische Methanbildungsvermögen von Energiepflanzen dargestellt (Tab. 12).

Tab. 12: Biogas- und Methanertrag von nachwachsenden Rohstoffen

Substrate	TM (% FM)		oTM (% FM)		Biogas (m ³ /kg oTM)		Biogas (m ³ /kg TM) Richtwert	Methan (in %)		Methan (in %) Richtwert
	von	bis	von	bis	von	bis		von	bis	
Bohnen-Silage ^m					0,2	0,4				
Feldfutter-Heu ^b	88	81			0,4			67		
Feldfutter-Silage ^b	10	16	8,7	14	0,43	0,53		69	70	
Futterroggen-Grüngut ^h							0,4			
Futterrüben ^{g,l}	11	23	10	22	0,38	>1,00		53	70	
Gerste ^l	19	47	17	44	0,65	0,82		59	64	
Gerste-Silage ^l	25	38	24	35	0,75	0,99		61	70	
Getreide Ganzpflanzen ^l					0,78					
Grassilage ^{c,g}	27	57	25	46	0,21	0,7	0,58	52	56	56
Gras (versch. Arten) ⁱ					0,68	0,93				
Grünland Kempten ^e	0,2	0,3	0,2	0,3	0,52	0,79	0,60	46	57	54
Grünland-Silage Kempten ^e	0,1	0,2	0,1	0,2	0,53	0,83	0,58	42	55	56
Grünland Kringell ^e	0,2	0,3	0,1	0,2	0,54	0,85	0,60	44	66	54
Grünland-Silage Kringell ^e	0,2	0,2	0,2	0,2	0,48	0,81	0,58	48	54	56
Grünland-Heu Kringell ^e	0,8	0,8	0,7	0,7	0,6	0,75	0,55	47	55	55
Hafer ^k							0,4			
Hanf-Silage ^h							0,4			
Klee ^{c,g,k}					0,27	0,65		55	70	
Kleegras-Heu ^b	90		83		0,41			67		
Kleegras-Silage ^b	9,1	17	8	15	0,43	0,55		68	71	
Luzerne-Grüngut ^g	22	40	19	36	0,54	0,6		63	68	
Luzerne-Silage ^g	14	35	12	31	0,55	0,79		0,4	0,5	
Maissilage ^{b,e,f,g,i,m}	25	37	24	36	0,3	1,13	0,60	47	69	54
Raps ^{d,k}								0,3	0,6	
Roggen ^{j,l}	25	61	23	58	0,49	0,68		59	62	
Roggensilage ^{g,l}	33	46	32	42	0,57	0,79	0,60	50	68	51
Rübensilage ^g	10	11	9,3	9,9	0,9	1,13		52	58	
Sudangras ^{b,g}	18	58	14	36	0,33	0,38		54	62	
Sudangras-Silage ^{b,e}	34	36	32	36	0,36	0,37		62	63	
Triticale ^l	34	66	0,3	64	0,6	0,8		50	69	
Triticale-Silage ^l	27	41	25	39	0,79	0,87		70	71	
Weizen ^g	87		85		0,33	0,41		52	55	
Wicken-Silage ^m							0,3			
Wintergerste ^h							0,4			
Winterroggen ^h							0,4			
Zuckerrübenmus ^a					0,2	0,94	0,80	60	65	
Zuckerrübenmus-Silage ^{a,h}					0,4	1,4				

a = Abdel-Hadi (2002); b = Amon (2003); c = Baserga (2000); d = Gleixner (1999); e = Kaiser (2004; 2005); f = KTBL (1996); g = KTBL (2004); h = Linke (1999); i = Mähnert (2002); j = Pouech (1989a); k = Pouech (1989b); l = Sedlmeier (2000); m = Zauner (1986)

¹ = (m³ / kg oTM)

1.4.1.4.1 Maissilage

Der Methanertrag von Energiepflanzen pro Hektar wird wesentlich vom Biomasseertrag und der Biomassezusammensetzung bestimmt. Weil verschiedenen Sorten auf unterschiedlichen Standorten ihr genetisch veranlagtes Ertragspotential unterschiedlich ausschöpfen können, sind zum Beispiel bei Mais auf guten bis sehr guten Standorten spät reifende Sorten bezüglich ihrer Biomassebildungsrate den frühreifen Sorten vorzuziehen.

Da die Biogasanlagen – im Vergleich mit der Rinderernährung – lange Verweilzeiten zur Vergärung aufweisen, sind schnell abbaubare Kohlenhydrate (z.B. Stärke) nicht Ziel der Züchtung. Im Gegenteil, wenn bei Mais hohe Stärkegehalte zu messen sind, ist die Verdaulichkeit der Restpflanze niedriger als in vorherigen Stadien. Aus diesem Grund nimmt das Methanertragspotential bei steigendem Trockenmassegehalt der Gesamtpflanze ab. Diese Abhängigkeit vom Trockenmassegehalt ist in Abb. 13 dargestellt. Wegen der Sortenabhängigkeit dieser Korrelation ist das Bestimmtheitsmaß dieser Darstellung niedrig ($R^2 = 48$), aber die Tendenz ist klar zu erkennen (KAISER ET AL., 2005).

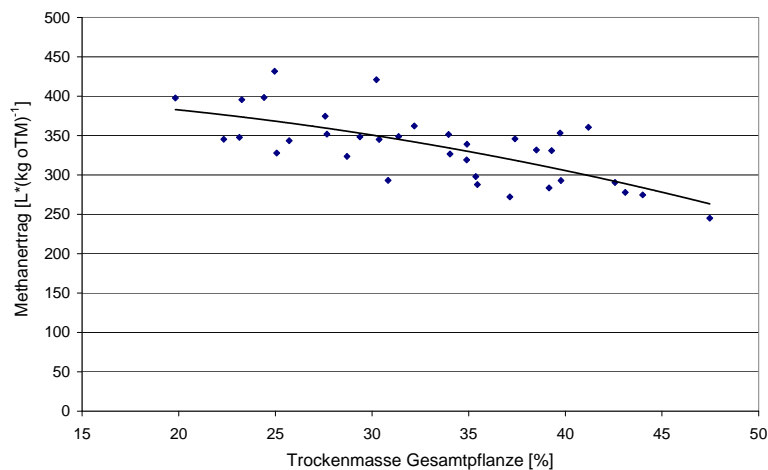


Abb. 13: Methanertragspotential im Abhängigkeit des Trockenmassegehalts bei Maissilage

1.4.1.4.2 Grassilage

Für Gräser besteht hinsichtlich des Methanertrags aus der organischen Trockenmasse eine hohe Abhängigkeit vom Gehalt an Rohprotein (Abb. 14). Je höher der Rohproteingehalt, desto geringer der Methanertrag (KAISER ET AL., 2005). Dies kann unter anderem darauf zurückgeführt werden, dass sich mit steigendem Rohproteingehalt im Substrat das C/N-Verhältnis reduziert und in der Folge eine Erhöhung des Ammoniumgehaltes im Gärsubstrat auftritt. Dieser Anstieg kann zu einer Hemmung des Prozesses führen. Dadurch wird das Gasertragspotenzials proteinreicher Substrate deutlich unterschätzt. Dieses Phänomen tritt umso stärker auf, je enger das C/N-Verhältnis beziehungsweise je höher der Ammonium-N-Gehalt im Fermenter ist. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, dieses C/N-Verhältnis beim Einsatz von Gräsern zu beachten und entsprechend zu korrigieren.

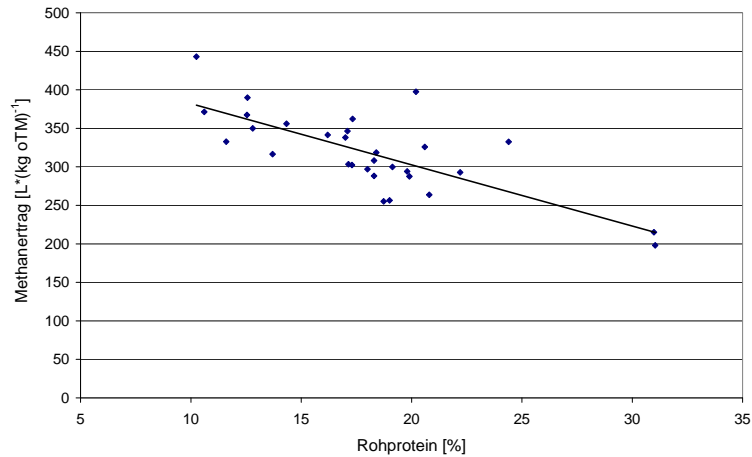


Abb. 14: Methanertragspotenzial in Abhängigkeit des Proteingehaltes bei Gräsern

Bei einigen Gräsern und Leguminosen (z. B. Wiesenrispe *Lato* und Rotklee *Titus*) wurden mehrere Schnitte untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass die Methanerträge von Schnitt zu Schnitt kontinuierlich absinken. Dieses Ergebnis ist vor allem auf den von Schnitt zu Schnitt sinkenden Methangehalt des gebildeten Biogases zurückzuführen (Abb. 15 und Abb. 16). Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung sollten genauere Untersuchungen feststellen, bei welchem Schnitt der Grenzertrag für die Rentabilität erreicht wird.

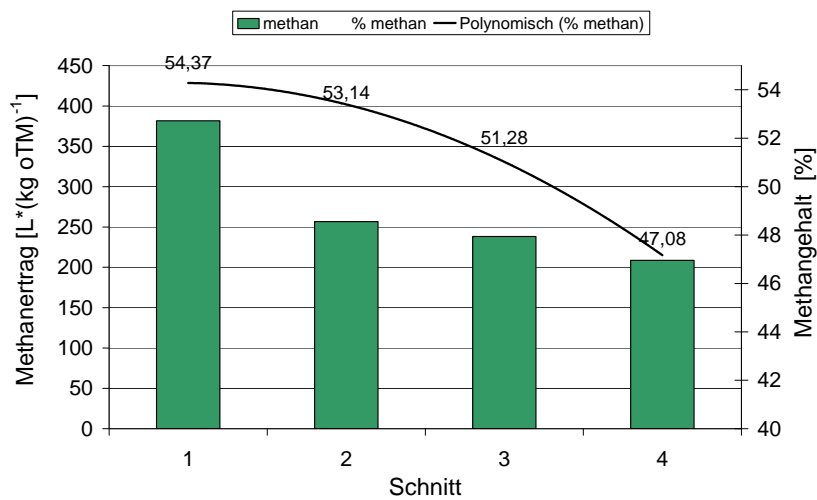


Abb. 15: Methanertragspotenzial in Abhängigkeit des Schnittes bei Wiesenrispe (*Lato*)

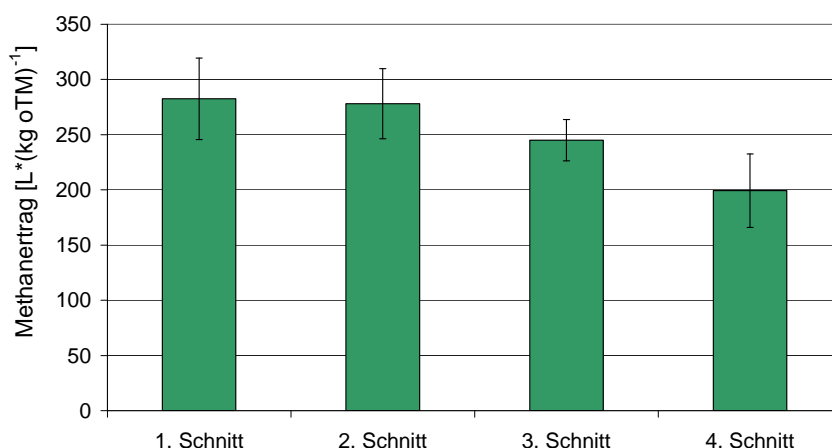


Abb. 16: Methanertragspotenzial in Abhängigkeit des Schnittes bei Rotklee (*Titus*)

1.4.1.4.3 Getreide-GPS

Bei der Einsatzhäufigkeit der nachwachsenden Rohstoffe steht die Getreide-Ganzpflanzen-silage (GPS) an dritter Stelle. BOXBERGER ET AL. (2006) haben diese Art von NawaRo auf das spezifische Methanbildungsvermögen und auf den Methanhektarertrag untersucht und sind zu folgenden Ergebnissen gekommen:

Die spezifischen Methanerträge liegen bei Weizen, Triticale und Roggen in den Vegetationsstadien „Ährenschieben“ bis „Milchreife“ am höchsten (Abb. 17). Der Trockenmassegehalt lag zwischen 22 und 34%. Im weiteren Verlauf der Vegetation nahmen die Methanerträge im Allgemeinen ab. Ab dem Vegetationsstadium „Teigreife“ hatten die Gärrohstoffe einen Trockenmassegehalt von mehr als 35% bis 40%. Bei Biomasse mit mehr als 40% Trockenmasse nimmt die Silierfähigkeit ab (BOXBERGER ET AL., 2006).

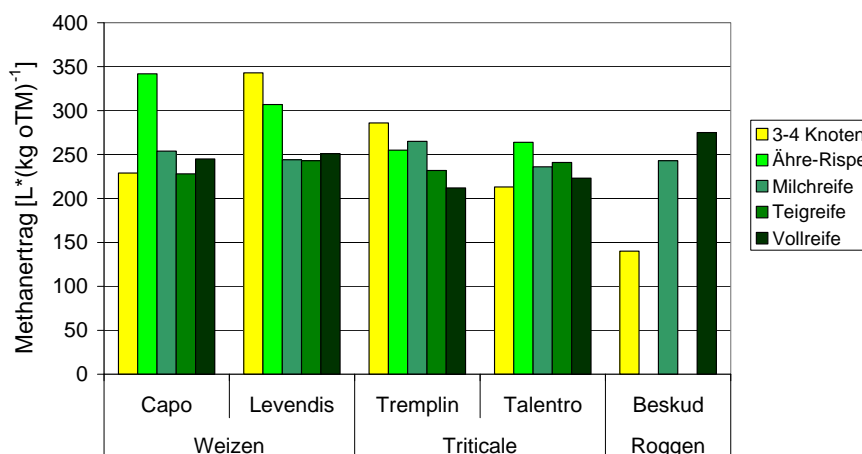


Abb. 17: Spezifischer Methanertrag von Weizen, Triticale und Roggen im Vegetationsverlauf (BOXBERGER ET AL., 2006)

Werden die Methanhektarerträge betrachtet, ist zu erkennen, dass die späteren Vegetationsstadien bei Weizen einen höheren Wert liefern als die früheren. Bei Triticale und Roggen sind die Vegetationsstadien „Ährenschieben“ bis „Milchreife“ die optimalen (Abb. 18).

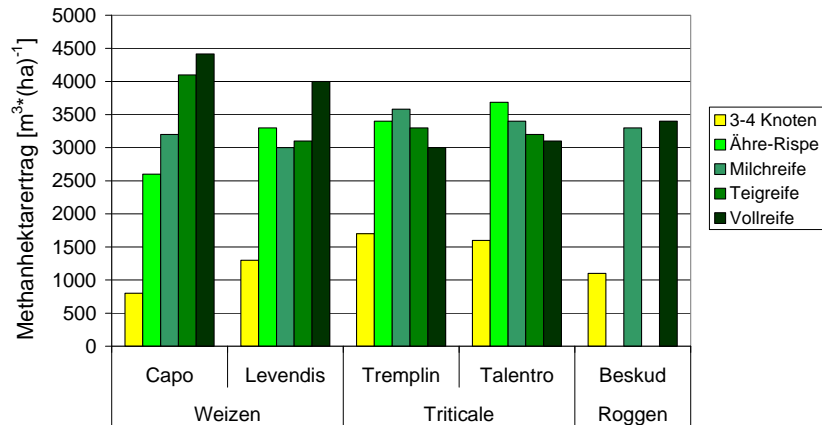


Abb. 18: Methanhektarertrag von Weizen, Triticale und Roggen im Vegetationsverlauf (BOXBERGER ET AL., 2006)

Für eine nachhaltige Biogaserzeugung aus Energiepflanzen sollten aber nicht Höchsterträge einzelner Kulturarten, sondern Spitzenerträge von standortangepassten und ökologisch ausgewogenen Fruchtfolgesystemen angestrebt werden (AMON, 2003). Kofermentation ist dann sinnvoll, wenn die Erträge aus der Verwertung der Kosubstrate den Aufwand für Bereitstellung, Lagerung und Verwertung in der Biogasanlage sowie die Nutzungskosten der Fläche übersteigen.

1.4.2 Stoffe nach der Nebenprodukte-Vo (EG) Nr. 1774/2002

Bei Reststoffen des Schlachtungsprozesses handelt es sich um sehr nährstoffreiche Substrate mit einem einerseits hohen Methanertragspotenzial (Tab. 13), aber andererseits einem hohem Risiko der Belastung mit pathogenen Mikroorganismen. Das wesentliche Risiko besteht darin, dass durch den Materialfluss auf Biogasanlagen Infektionsketten zwischen Tier und Tier sowie Tier und Mensch geschlossen werden (s. Kap. 2.2.6). Maßnahmen zur Unterbrechung dieser Infektionsketten sind sowohl durch die Einhaltung rechtlicher Regelungen (s. Kap. 2.2.6) als auch durch technische Maßnahmen zur Pasteurisierung (s. Kap. 1.5.2.3) zu erfüllen. Weitere Stoffe, die nach der o.g. Verordnung zu handhaben sind, finden sich auch in Kap. 1.4.3.1.

Tab. 13: Biogas- und Methanertrag von Schlachtabfällen

Substrate	TM (% FM)		oTM (% FM)		Biogas (m ³ /kg oTM)		Biogas (m ³ /kg oTM)		Methan (in %)		Methan (in %)	
	von	bis	von	bis	von	bis	Richtwert	von	bis	von	bis	Richtwert
Blutmehl ^b					0,6							
Fettabscheiderinhalt ² <i>b;c;d;f;g;h</i>	48		85		0,7	1,3	1,00	60	77	68		
Flotatfett ^e					0,9	1,2						
Flotatschlamm ² <i>b;c;f;g;h</i>	38		98		1,2	1,35		50	59			
Magen-/Darminhalt ^b					0,45	0,55		44	55			
Panseninhalt ^{a;b;f}	11	19	9	16	0,2	0,4	0,48	60		55		
Tierkörpermehl ^{c;h}					0,5	0,8						

a = Arge (1993); b = Baserga (2000); c = Behmel (1996); d = Frunzke (1999); e = Gleixner (1999); f = KTBL (2004); g = Kuhn (1995); h = Zauner (1986)

¹ = (m³ / kg oTM); ² nicht nach Nebenprodukte-Vo (EG) Nr. 1774/2002 beregelte Reststoffe aus Schlachthanlagen

1.4.3 Organische Reststoffe aus der Industrie

Die Behandlung organischer Abfälle kann prinzipiell in Kompostierungsanlagen oder Fermentationsanlagen erfolgen, von denen die überwiegende Mehrzahl im landwirtschaftlichen Bereich betrieben werden. Die relative Vorzüglichkeit zwischen den beiden Verfahren richtet sich im Wesentlichen nach der biologischen Abbaubarkeit, Verdaulichkeit und dem Methanertragspotential. Organische Produktionsabfälle, vorrangig aus der Nahrungs- und Genussmittelindustrie (z. B. Brauereien, Brennereien, Kellereien, Zuckerindustrie), sind unter bestimmten Rahmenbedingungen für die Fermentation gut geeignet, da sie geringe Trockenmassegehalte aufweisen und meist biologisch leicht abbaubar sind. Die Genehmigungsbedürftigkeit des Einsatzes solcher Stoffe ist im Einzelfall bei der Genehmigungsbehörde abzuklären (vgl. auch Kap. 2.2.3 und Kap. 2.2.6).

1.4.3.1 Prozessrückstände der Lebensmittelindustrie

Bei Prozessrückständen der Lebensmittelindustrie handelt es sich um Abfälle aus der Lebensmittelherstellung und -verarbeitung, überlagerte Lebensmittel oder Lebensmittel mit Transportschäden. Die Bandbreite der Substrate ist sehr weit, deshalb werden in den folgenden Kapiteln einige dieser Reststoffe exemplarisch charakterisiert (s. Tab. 14).

In Deutschland benutzt die Stärkeindustrie vorwiegend Weizen und Kartoffeln, z.T. auch Mais, für die Herstellung von Stärke. Dabei wird der Frucht die Stärke in einem Auswasch- und Separationsvorgang entzogen. Das verbleibende Fruchtwasser enthält zum Teil erhebliche Anteile eiweißhaltiger Reststoffe. Die Reststoffe, die bei der industriellen Verarbeitung von Kartoffeln entstehen, sind im Wesentlichen Kartoffelschalen, Rohkartoffeln mit Qualitätsmängeln, Stärkeverluste im Waschwasser sowie fehlerhafte Endprodukte. Die vorwiegend festen (Press-)Rückstände, die nach dem Auspressen des Saftes von Pflanzenbestandteilen übrig bleiben (z.B. Fruchtsaftindustrie) werden Trester genannt. Trester wird meist mit Weinbau assoziiert, doch er entsteht auch beim Auspressen von Äpfeln, Karotten oder Tomaten. Die Trester der meisten Früchte, die beim Entsaften anfallen, werden als Viehfutter, teilweise auch als Dünger verwendet.

Tab. 14: Biogas- und Methanertrag von Prozessrückständen der Lebensmittelindustrie

Substrate	TM (% FM)		oTM (% FM)		Biogas (m ³ /kg oTM)		Biogas (m ³ /kg oTM) Richtwert	Methan (in %)		Methan (in %) Richtwert
	von	bis	von	bis	von	bis		von	bis	
Apfelschlempe ^{c;d;i;j}					0,45	0,5		66	73	
Apfeltrester ^{c;h}	16		16		0,35	0,55	0,50			52
Biertreber ^{b;c;f;h}	21	25	20	24	0,42	0,85	0,53	55		68
Filtrationskieselgur ^{d;j}					0,3	0,4				
Getreideschlempe ^{d;f;g;j}	4,6	7,6	4,3	7,1	0,39	0,72	0,64	53	55	49
Getreidestaub ^h	89		84		0,35		0,68	49		48
Heilkräuter (extrahiert) ⁱ					0,7	0,8				
Hopfentreber ^{d;j}					0,5	0,6				
Kartoffelpülpe ^h	19		18		0,48			58		
Kartoffelschlempe ^{a;c;d;f;g;i}	4,3	4,7	3,5	3,9	0,31	0,7	0,67			54
Malzkaffetreber ^h	21		21		0,31		0,51			57
Melasse ^{c;d;i;j}					0,45			67		
Melasseschlempe ^c					0,4	0,55				
Molke ^{b;c;d;j}					0,6	0,9		66	83	
Obsttrester ^{b;c;d;i;j}					0,45	0,55		73	80	
Ölsaatrückstände ^c					0,6					
Rapskuchen ^h	89				0,82	0,98		43	50	
Raps-Extraktionsschrot ^c					0,5	0,6				
Traubentrester ^h	28		21		0,15	0,17		53	59	
Weizenschlempe ^f					0,4	0,5				

a = Amon (2003); b = Arge (1993); c = Baserga (2000); d = Behmel (1996); e = Boxer (2004);
f = Frunzke (1999); g = Gleixner (1999); h = KTBL (2004); i = Kuhn (1995); j = Zauner (1986)

¹ = (m³ / kg oTM)

Als Rückstand bei der Biererzeugung fallen die so genannten Treber an, die meist als Viehfutter Verwendung finden (Bier-/Hopfentreber). Außerdem fallen bei der Bierherstellung Bierhefe und Malzkeime an. Als Schlempe bezeichnet man den „entgeisteten“ Rückstand bzw. das „Abwasser“ einer Destillation. Es sind darin alle jene Komponenten aus den Rohstoffen enthalten, die eingemaischt wurden (Eiweißstoffe, Fette und Mineralstoffe), vermindert um die Kohlenhydrate, die zur Bildung des Alkohols gebraucht wurden. Getrocknet wird Schlempe als Futtermittel und Dünger verwendet, z.B. Kartoffel- oder Getreideschlempe aus Brennereien. Nebenprodukte der Zuckerherstellung sind Schnitzel und Melasse. Melasse ist ein dunkelbrauner, zähflüssiger, unangenehm bittersüß schmeckender Rückstand aus der Zuckerfabrikation (aus dem sich wirtschaftlich kein Zucker mehr gewinnen lässt). Melasse wird zu Alkohol vergoren (Rum) oder als Viehfutterzusatz verwendet. Organische Reststoffe aus dem Molkebetrieb enthalten einen sehr hohen Wasseranteil (und sind nach der Nebenprodukte-Vo (EG) Nr. 1774/2002 zu genehmigen!). Auf den Organischen Trockenmassegehalt bezogen weist z.B. Molke einen sehr hohen Biogasertrag auf. Sie besteht aber zu 94 % aus Wasser, ist nahezu fettfrei und enthält Milchsäuren, Milchzucker, Kohlenhydrate, Kalium, Calcium und auch noch andere Mineralstoffe. Zu den Prozessrückständen der Lebensmittelindustrie gehören auch die Schälreste aus der Obst- und Gemüseverarbeitung, sowie die Abfälle aus der Distribution von Nahrungsmitteln und die nicht mehr absetzbare Ware (fehlerhaft, beschädigt etc.).

1.4.3.2 Weitere Prozessrückstände der Industrie

Auch bei anderen Industrien, die nicht Lebensmittel verarbeiten, entstehen Prozessrückstände die man in Biogasanlagen als Kosubstrate verwenden kann. Zum Beispiel fällt bei der Umesterung von Rapsmethylester, auch Biodiesel genannt, Glycerin als Nebenprodukt an, das in einer Biogasanlage sehr hohe Methanerträge liefern kann (s. Tab. 15). Ein anderes mögliches Kosubstrat aus der Industrie ist Bleicherde (sauer aktivierte Bentonite). Diese wird zur Reinigung von Fetten, Erdwachsen, Mineralölen, Paraffinen und Zuckersäften durch Adsorption benutzt. Bleicherde aus der Fettraffination besitzt aufgrund ihrer großen organischen Belastung ein relativ hohes Potential zur Energiegewinnung durch Fermentation. Beim Einsatz solcher Stoffe in Biogasanlagen ist zu gewährleisten, dass in diesen Stoffen keine für den Betrieb der Biogasanlagen und die landwirtschaftliche Verwertung des Gärrückstandes nachteiligen Spurenstoffe (Schadstoffe) enthalten sind. Bei Einsatzstoffen, die nicht im Anhang der Bioabfallverordnung aufgeführt sind, ist eine Ausnahmegenehmigung nach §6 Abs. 2 BioAbfV erforderlich.

Tab. 15: Biogas- und Methanertrag von Prozessrückständen der Industrie

Substrate	TM (% FM)		oTM (% FM)		Biogas (m ³ /kg oTM)		Biogas (m ³ /kg oTM)	Methan (in %)		Methan (in %)
	von	bis	von	bis	von	bis	Richtwert	von	bis	Richtwert
Bleicherde ^c							0,8			
Glycerin ^d	50		41		1,28	1,68		62	67	
Heilkräuter (extrahiert) ^e					0,7	0,8				
Extraktionsrückstände aus der Pharmaindustrie ^b					0,2	0,75				
Rohglycerin ^{a,e}	50						0,7			

a = Arge (1993); b = Frunzke (1999); c = Kuhn (1995); d = Sedlmeier (2000); e = Zauner (1986)

¹ = (m³ / kg oTM)

1.4.4 Kommunale und gewerbliche Reststoffe

Innerhalb Bayerns setzten laut Umfrage 2001 über 80 % der Betreiber von Biogasanlagen Kosubstrate aus dem Abfallbereich (Definition nach Bioabfallverordnung) ein. Dieser Anteil hat sich jedoch in der Zwischenzeit stark verringert, nicht zuletzt aufgrund der Novellierung des EEG im August 2004 (Stichwort: NawaRo-Bonus). Bei der Biogas-Betreiberumfrage der LfL gaben im Jahr 2006 nur noch knapp unter 9 % der befragten Anlagenbetreiber³ an, Abfälle einzusetzen (s. Abb. 9).

Für die Behandlung fester Bioabfälle aus der kommunalen Sammlung spielt die Kofermentation bislang eine untergeordnete Rolle. Die Fermentation eignet sich gut für strukturschwache und wasserreiche Abfälle, enthaltene Stör- und Schadstoffe können sich jedoch negativ auf den Gärprozess auswirken und sowohl die Qualität des Gärrückstandes mindern, als auch die Ausbeute an Biogas reduzieren (s. Kap. 1.6).

Kommunale und gewerbliche Abfälle können sowohl leicht als auch schwer abbaubare Inhaltsstoffe enthalten. Die Genehmigungsbedürftigkeit des Einsatzes solcher Stoffe ist im Einzelfall bei der Genehmigungsbehörde abzuklären (vgl. hierzu auch Kap. 2.2.3 und 2.2.6).

³ Zu berücksichtigen ist bei diesem Prozentsatz jedoch, dass lediglich zwei Drittel der Befragten hierzu Angaben gemacht haben.

1.4.4.1 Biotonne

Reststoffe aus der Biotonne sind wegen ihres hohen Anteils an Störstoffen und ihrer heterogenen Zusammensetzung als schwer vergärbare Reststoffe einzustufen (Tab. 16).

Tab. 16: Biogas- und Methanertrag von Reststoffen aus der Biotonne

Substrate	TM (% FM)		oTM (% FM)		Biogas (m ³ /kg oTM)		Biogas (m ³ /kg oTM) Richtwert	Methan (in %)		Methan (in %) Richtwert
	von	bis	von	bis	von	bis		von	bis	
Bioabfall ^{a;b;e;f}					0,2	0,6				
Biomüll-Haushalt ^{d;e}	28	45	18	32	0,28	0,58	0,45	47	64	62
Marktabfall ^f					0,3	0,4				

a = Behmel (1996); b = Boxer (2004); c = Frunzke (1999); d = KTBL (2004); e = Kuhn (1995);
f = Zauner (1986)

¹ = (m³ / kg oTM)

1.4.4.2 Gastronomiebereich

Reststoffe aus dem Gastronomiebereich werden nach ihrer Zusammensetzung in zwei Gruppen unterteilt. Auf der einen Seite gibt es die Abfälle aus Backfabriken und Konditoreien (Altbrot, Hefe, Backabfälle), die in ihrer Zusammensetzung relativ homogen sind und einen sehr hohen durchschnittlichen TM-Gehalt von 90 % aufweisen. Aufgrund des meist großen Stärkeanteils liefern sie einen hohen Biogasertrag. Auf der anderen Seite gibt es Reststoffe aus Gaststätten, Großküchen und Einrichtungen zur Gemeinschaftsverpflegung (Studentenwerke, Bundeswehrstandorte, Altenheime, Krankenhäuser etc.). Diese Speiseabfälle weisen sehr stark schwankende Nährstoff- und TM-Gehalte und damit auch Biogaserträge auf (s. Methanerträge von Speiseresten in Tab. 17).

Tab. 17: Biogas- und Methanertrag von Abfällen aus dem Gastronomiebereich

Substrate	TM (% FM)		oTM (% FM)		Biogas (m ³ /kg oTM)		Biogas (m ³ /kg oTM) Richtwert	Methan (in %)		Methan (in %) Richtwert
	von	bis	von	bis	von	bis		von	bis	
Altbrot ^b							0,7			
Altfett ^c							0,7			
Gemüseabfälle ^{a;b;d;e}					0,4	0,7		57	73	
Speisereste ^a	14	19	12	16	0,15	0,66	0,70	43	77	60
Speiseabfälle (Großküchen) ^{a;b}					0,6		0,70			60

a = Baserga (2000); b = Behmel (1996); c = Boxer (2004); d = Gleixner (1999); e = Zauner (1986)

¹ = (m³ / kg oTM)

1.4.4.3 Grüngut aus Wertstoffhöfen und Landschaftspflegegrün

Manche Bioabfälle bilden ein Entsorgungsproblem, wie z.B. Gras aus der Landschaftspflege, aus Parks oder von Flugplätzen. Es muss gemäht werden und oft wird das Gras durch Kompostierung im Volumen reduziert. Das feuchte Material ist für die Biogas-Produktion geeignet. Gras kann, wie in verschiedenen Pilotversuchen gezeigt wurde, auch in konventionellen Biogasanlagen eingespeist werden. Laub oder holziges Material eignet sich wegen seines hohen Ligningehaltes hingegen weniger zur anaeroben Fermentation als grasartige Biomasse (Tab. 18).

Tab. 18: Biogas- und Methanertrag von Grüngut aus Wertstoffhöfen und Landschaftspflegegrün

Substrate	TM (% FM)		oTM (% FM)		Biogas (m ³ /kg oTM)		Biogas (m ³ /kg oTM) Richtwert	Methan (in %)		Methan (in %) Richtwert
	von	bis	von	bis	von	bis		von	bis	
Dauerwiesenmischung ^a	9,8		8,6		0,35			70		
Grünschnitt ^{c,d}					0,35	0,6				
Laub ^b					0,4					
Mähgut Frischgras ^b	13				0,36	0,73		50	56	
Mähgut Futtergräser ^d	24		22		0,55	0,65		50	56	
Mähgut Golfplatz ^d	32		25		0,26			57		
Mähgut KULAP ^e	19		16		0,17	0,41		80	88	
Mähgut Landschaft ^e	24		21		0,12	0,66		42	79	
Naturschutzgebiet ^d	75		70		0,08		0,15			55
Rasenschnitt ^{c,d}	8,3	50	5,7	38	0,16	0,78				

a = Amon (2003); b = Baserga (2000); c = KTBL (1996); d = KTBL (2004); f = Sedlmeier (2000)

1.4.5 Stör- und Schadstoffe, Hygiene

Wichtiges Kriterium beim Einsatz von unterschiedlichen organischen Abfällen als Kosubstrat ist deren Belastung mit Stör- und Schadstoffen bzw. mit pathogenen Organismen. Diese ist von Belang, wenn der bei der Fermentation anfallende Gärrest im Sinne der Kreislaufwirtschaft wieder als Dünger im landwirtschaftlichen Betrieb eingesetzt werden soll. Schadstoffe wie Schwermetalle, Dioxine u.a. sind im Nachhinein nicht mehr vom vergorenen Substrat zu trennen und werden bei der landwirtschaftlichen Ausbringung in die Nahrungskette eingetragen. Nicht abbaubare Störstoffe wie Kunststoffe, Metalle, Sand etc. können zu Funktionsstörungen der Biogasanlage und bei der landwirtschaftlichen Ausbringung zu einer Verschmutzung der Felder führen.

Mit pathogenen Organismen belastetes Material stellt im Hinblick auf die Ausbringung und die Schließung von Infektionsketten zwischen Tier und Tier sowie Tier und Mensch ein Risiko dar. Die Schadstoffgrenzwerte nach BioAbfallV gelten für den Gärrest.

Da während des Fermentationsprozesses Trockensubstanz abgebaut wird, kommt es zu einer relativen Anreicherung von nicht abbaubaren Stoffen. Dies muss bei der Auswahl der Inputmaterialien mit berücksichtigt werden. So hat z. B. Schweinegülle einen vergleichsweise hohen Kupfer- und Zinkgehalt. Sie sollte deshalb nicht gemeinsam mit stark kupfer- oder zinkhaltigen Kosubstraten verarbeitet werden.

Eine Einordnung einiger Kosubstrate unterschiedlicher Herkunft nach dem Risiko durch potentielle Belastung mit Stör- und Schadstoffen bzw. pathogenen Organismen erfolgt in Tab. 19 (s. auch Kap. 1.6.3).

Tab. 19: Beispielhafte Einordnung unterschiedlicher Kosubstrate nach ihrem Gefahrenpotential

Risiko	risikolos	hygienisch riskant	störstoffhaltig	schadstoffseitig riskant
Kosubstrat				
kommunale Reststoffe	Grüngut, Rasenschnitt		Bioabfall, Straßenbegleitgrün	
industrielle Reststoffe	Gemüseabfälle, Schlempe, Trester, u.a.	überlagerte Lebensmittel, Lebensmittel mit Transportschäden		Rückstände aus der Pflanzenöl- produktion
landwirtschaftliche Reststoffe	Flüssigmist, Festmist			evtl. Cu und Zn
	Rübenblatt, Stroh u.a.			
nachwachsende Rohstoffe	Maissilage, Grassilage			
Schlachtabfälle		Panseninhalt, Magen-/ Darminhalt, Fettabscheider- fett, Blutmehl, u. a.		(Fettabscheider- fett)
Sonstige		Großküchenabfälle, häusliche Abfälle		

1.4.5.1 Maßnahmen zur Risikominderung

Durch eine entsprechende Aufbereitung und Konditionierung können mit Störstoffen belastete Kosubstrate teilweise so weit gereinigt werden, dass sie in Biogasanlagen mit verarbeitet werden können. Jeder der angesprochenen Konditionierungsschritte verursacht einen zeitlichen, baulichen und/oder energetischen Aufwand und entsprechende Kosten. Bei einzelbetrieblichen Biogasanlagen ist die Entfernung von Störstoffen kaum zu automatisieren und deshalb mit z.T. erheblichem zeitlichem Aufwand verbunden. Die Reinigung erfolgt analog der Konditionierung in Kompostierungsanlagen (vgl. GRONAUER ET AL., 1997).

Schwermetalle können auf Biogasanlagen unter Praxisbedingungen nicht entfernt werden. Deshalb ist besonders darauf zu achten, dass es nicht zu einer Anreicherung im Gärrest bzw. in den Böden kommt, auf die dieser Gärrest ausgebracht wird. Mit organischen Schadstoffen belastete Reststoffe sollten in Biogasanlagen nicht eingesetzt werden. Über das Verhalten dieser Schadstoffe im Fermenter und auch im Boden ist sehr wenig bekannt (s. Kap. 1.6.3).

1.5 Verfahrens-, Geräte- und Anlagentechnik

Das Verfahren der Biogaserzeugung besteht aus verschiedenen Verfahrensschritten (vgl. Kap. 1.2, Abb. 3) und die Maschinen- und Gerätetechnik weist ein sehr weites Spektrum auf. Innerhalb dieser Vielfalt bestehen zahlreiche Möglichkeiten, einzelne Komponenten zu kombinieren. Aus diesem Grund sollte für eine Anlagenplanung die Systemeignung einschließlich einer Leistungsanpassung der Komponenten von fachkundigen Personen durchgeführt werden. Die Abstimmung von Technik, eingesetzten Substraten und Betriebsführung der Anlage entscheidet über die Qualität des Anlagenbetriebs und die Biogaserträge. Die verwendeten Substrate bestimmen letztendlich den Einsatz der entsprechenden Technik sowie deren Auslegung, wie z.B. Pasteurisierung, Zerkleinerung, Dimensionierung von Leitungen, Pumpen, Gasaufbereitung, -lagerung, BHKW, etc..

Die folgenden Kapitel sind in Anlehnung an den Verfahrensablauf in der Reihenfolge:

- Anlieferung und Lagerung,
- Aufbereitung,
- Fermentertechnik,
- Gasaufbereitung,
- Gasspeicherung,
- Gasnutzung und
- Gärrestverwertung gegliedert.

In Abb. 19 ist der schematische Aufbau einer Biogasanlage dargestellt, die ausnahmslos mit nachwachsenden Rohstoffen betrieben wird. Abb. 20 zeigt eine Anlage bei der unter Verwendung eines Basissubstrates nachwachsende Rohstoffe und Bioabfälle verarbeitet werden.

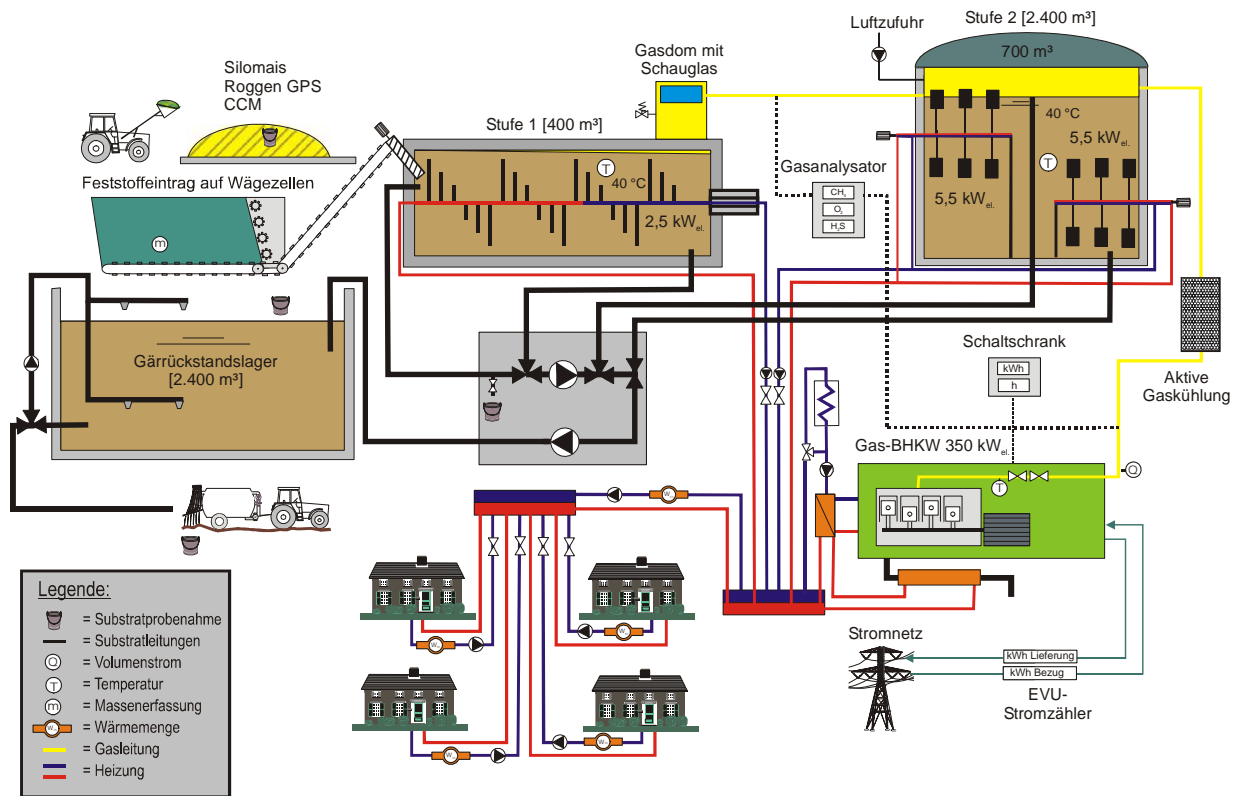


Abb. 19: Schematischer Aufbau einer NawaRo-Anlage (Beispiel, LFL 2007)

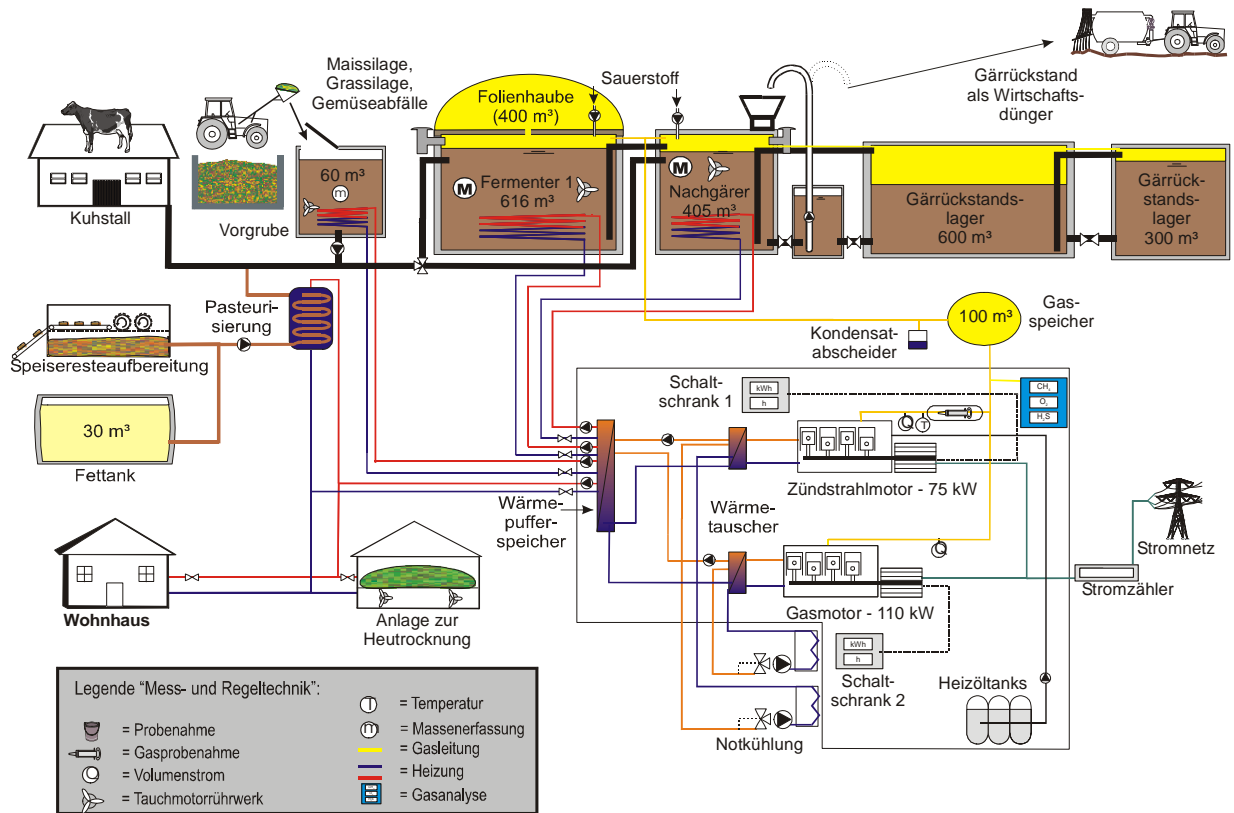


Abb. 20: Schematischer Aufbau einer Kofermentationsanlage (Beispiel, LFL 2004)

1.5.1 Anlieferung und Lagerung

Der Verfahrensbereich „Anlieferung“ ist i.d.R. nur für Anlagen von Bedeutung, die betriebsfremde Substrate (i.d.R. Stoffe nach BioAbfV, Anhang) einsetzen. Den einschlägigen Pflichten hinsichtlich Eingangskontrolle, Erfassung, Dokumentation und Nachweisführung ist nachzukommen. Die Lagerung der Substrate ist erforderlich, um eine möglichst gleichmäßige Mischung aus verschiedenen Ausgangsstoffen herzustellen, mit der die Fermenter beschickt werden. Die Dimensionierung der Lager muss sich dabei nach den Liefermengen und -intervallen sowie den täglichen Einbringungen in den Fermenter richten. Werden geruchsintensive Stoffe, z.B. Altfett, gelagert, ist auf eine geschlossene Lagerung mit ggf. entsprechender Abluftreinigung zu achten. Werden tierische Nebenprodukte (z.B. Speise- oder Schlachtabfälle – s. auch Verordnung (EG) Nr. 1774/2002 und BioAbfV) eingesetzt, muss je nach Material eine mehr oder weniger strikte Trennung zwischen Annahmestation und Lager vom landwirtschaftlichen Betrieb (Tierhaltung) gegeben sein. Ebenso ist eine Durchmischung von hygienisch bedenklichem und unbedenklichem Material nach Passage einer Pasteurisierung auszuschließen.

1.5.2 Aufbereitung

Die Konservierung nachwachsender Rohstoffe aus landwirtschaftlicher Produktion wird in der Praxis nach dem Stand der Technik durchgeführt. Die Zerkleinerung dient im Wesentlichen der Vergrößerung mikrobiologisch angreifbarer Oberflächen und damit der Beschleunigung des Abbauprozesses sowie der Minderung von Verstopfungen, Sedimentation und Flotation in technischen Einrichtungen. Die Auslese von Störstoffen, insbesondere beim Einsatz von Bioabfällen („Biotonne“) oder verpackten Lebensmitteln, erfolgt i.d.R. durch Sortierung in analoger Weise wie im Bereich der Kompostierungsanlagen oder durch den Einsatz von Abfallpulpern.

Die Pasteurisierung stellt sicher, dass bei der Verwendung von mit pathogenen Keimen belasteten Materialien die Infektionswege unterbrochen werden. Weitergehende Aufbereitungsverfahren, die vor allem den mikrobiologischen Abbau beschleunigen, die Gaserträge optimieren und die Prozessstabilität erhöhen sollen (z.B. chemische, mechanische, thermische Desintegration, enzymatischer Aufschluss), stehen erst am Anfang der Entwicklung.

1.5.2.1 Konservierung

Für einen gleichmäßigen Biogasertrag ist eine kontinuierliche Fermenterbeschickung Voraussetzung. Das heißt, die Substratzusammensetzung sollte keinen zu großen Schwankungen ausgesetzt sein, da sich die Mikrobiologie erst wieder an das jeweilige Substrat anpassen muss. Dies kann zu erheblichen Einbußen beim Biogasertrag führen. Da jedoch nicht während des gesamten Jahres Kofermentate wie z.B. nachwachsende Rohstoffe (NawaRo) anfallen, ist eine Konservierung und Lagerung dieser Substrate notwendig. Für die Konservierung nachwachsender Rohstoffe hat sich die Siliertechnik als die energetisch günstigste herausgestellt, da bei der sehr raschen pH-Wert-Absenkung unter Luftabschluss die energiereichen Bestandteile des Substrates erhalten bleiben und nicht durch eine aerobe Oxidation verloren gehen. Auf landwirtschaftlichen Betrieben sind die für die Silierung erforderlichen Maschinen und Lagerräume meist vorhanden. Dennoch muss bei der Planung der Biogasanlage der für NawaRo erforderliche Platzbedarf berücksichtigt werden, da die vorhandene Lagerkapazität ggf. nicht ausreicht.

1.5.2.2 Zerkleinerung

Für einen ausreichenden und zügigen Abbau der zugeführten organischen Substanz ist eine große Angriffsfläche für die Bakterien wichtig. Dies gilt besonders für langfaserige Substrate (Stroh, Gras, etc.), deren Struktur aufgebrochen und aufgeschlossen werden muss. Durch

eine Zerkleinerung dieser Substrate vor der Beschickung in den Fermenter bzw. die Vorgrube kann die Abbaugeschwindigkeit erhöht werden. Dadurch werden höhere Abbauraten bei kürzeren Verweilzeiten ermöglicht, wodurch die Effektivität der Fermentation erheblich gesteigert werden kann. Darüber hinaus werden durch langfaserige Stoffe verursachte Probleme wie

- Verminderung der Pumpfähigkeit
- Verstopfung von Leitungen
- Festsetzung von Rührwerken
- Erhöhung der Schwimmdeckenbildung

vermieden. Strukturstarke Substratbestandteile werden deshalb vor der Beschickung in den Fermenter durch Dosiervorrichtungen mit Schneidwerkzeugen oder in der Vorgrube durch Schneidrührwerke oder -pumpen zerkleinert. Die vorgeschriebene Zerkleinerung hat vor der Pasteurisierung zu erfolgen.

1.5.2.3 Pasteurisierung

In einer Umfrage bei 150 Biogasanlagen in Bayern zeigte sich, dass über 80 % der Anlagen Substrate einsetzen, die als hygienisch unbedenklich gelten (Abb. 21). Regelungen zur Hygienisierungserfordernis für organische Abfälle finden sich vornehmlich in der Bioabfallverordnung (siehe Kap. 2.2.3) und der Verordnung (EG) Nr. 1774/2002 des Europäischen Parlaments und des Rates mit Hygienevorschriften für nicht für den menschlichen Verzehr bestimmte tierische Nebenprodukte (Nebenprodukteverordnung; siehe Kap. 2.2.6).

In der Verordnung (EG) 1774/2002 werden tierische Nebenprodukte je nach Seuchenrisiko in drei Kategorien eingeteilt. Kategorie 1 umfasst all jene tierischen Nebenprodukte, die ein hohes Risiko für Mensch, Tier und Umwelt (hygienisches Risiko, BSE-Risiko, etc.) darstellen. Material dieser Kategorie darf prinzipiell nicht in Biogasanlagen verwertet werden. Kategorie 3 enthält jene tierischen Nebenprodukte, die von schlacht- bzw. genusstauglichen Tieren stammen, aber nicht für den menschlichen Verzehr bestimmt sind. Kategorie 2 umfasst all jene tierischen Nebenprodukte, die in keiner anderen Kategorie aufgelistet sind. Material dieser Kategorie – außer Gülle, von Magen und Darm getrennter Magendarminhalt, Milch und Kolostrum – muss vor der Fermentation bei 133°C und 3 bar für mindestens 20 min drucksterilisiert werden. Dabei darf die Partikelgröße nicht über 50 mm liegen. Tierische Nebenprodukte der Kategorie 3 können nach einer Vorzerkleinerung auf 12 mm Partikelgröße und einer anschließenden 60-minütigen Pasteurisierung bei 70°C in Biogasanlagen verwertet werden. Bei der Pasteurisierung werden die Temperatur, der Füllstand, der Druck und die Verweilzeit überwacht und aufgezeichnet, damit eine lückenlose Dokumentation der Vorgänge gegeben ist.

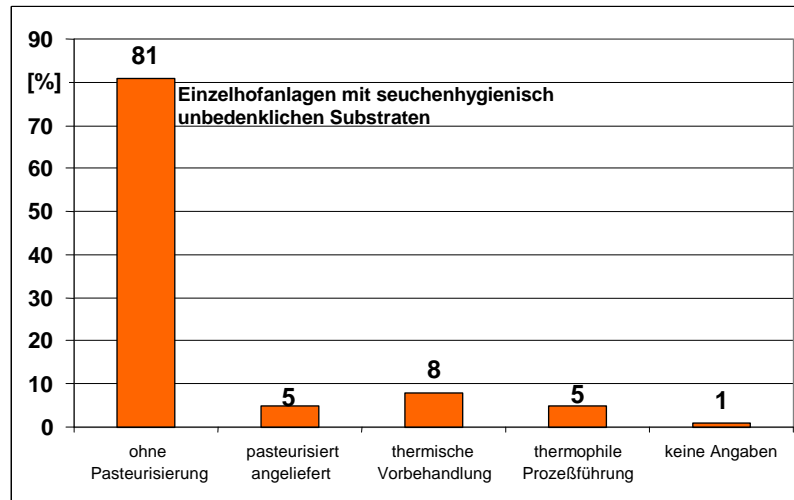


Abb. 21: Substratvorbehandlung in Biogasanlagen in Bayern (GRONAUER ET AL., 2003)

Für die technische Realisierung der Hygienisierung bei mindestens 70°C bieten sich absätzig bzw. kontinuierliche Verfahren an. Bei der Hygienisierung am Ort der Biogasanlage ist durch bauliche und organisatorische Maßnahmen darauf zu achten, dass es nicht zu einer Rekontamination von pasteurisiertem Material kommt (siehe Kap. 2.2.6).

1.5.2.3.1 Absätziges Verfahren

Bei absätzig betriebenen Pasteurisierungsverfahren kommen vorwiegend Behälter zum Einsatz, die mit innen liegenden Wärmeaustauschern ausgestattet sind (Abb. 22). Die Pasteurisierungsleistung richtet sich nach der Wasservorlaufumtemperatur, der Durchlaufmenge sowie der Wärmetauscherfläche. Zudem ist der Pasteurisierungsbehälter mit einem Rührwerk versehen, um eine dauernde Durchmischung des Substrates während des Pasteurisierungsvorganges zu gewährleisten. Derartige Anlagen können, je nach Ausrüstung, zwei bis drei Befüllungen pro Tag durchsetzen. Um die Leistung der Anlage zu erhöhen, können mehrere Einheiten hintereinander geschaltet werden. Bei zwei Behältern lässt sich dann die Leistung verdoppeln. Das Optimum sind drei Einheiten, wobei der erste Behälter befüllt und angewärmt, der zweite auf 70°C betrieben und der dritte abgekühlt und entleert wird. Diese Vorgänge laufen weitgehend parallel ab. Mit dieser quasikontinuierlichen Betriebsweise lassen sich 8 bis 10 Chargen pro Tag durchsetzen. Der dritte Behälter wird entweder direkt in einem Zug in den Fermenter entleert, oder der Inhalt wird in einem weiteren Behälter zwischengelagert und kontinuierlich dem Fermenter zugeführt. Es sind Anlagengrößen für Einzelbehälter von 100 l bis über 10 m³ erhältlich, so dass sowohl im kontinuierlichen wie auch quasikontinuierlichen Betrieb für alle Anforderungen Lösungsmöglichkeiten angeboten werden.

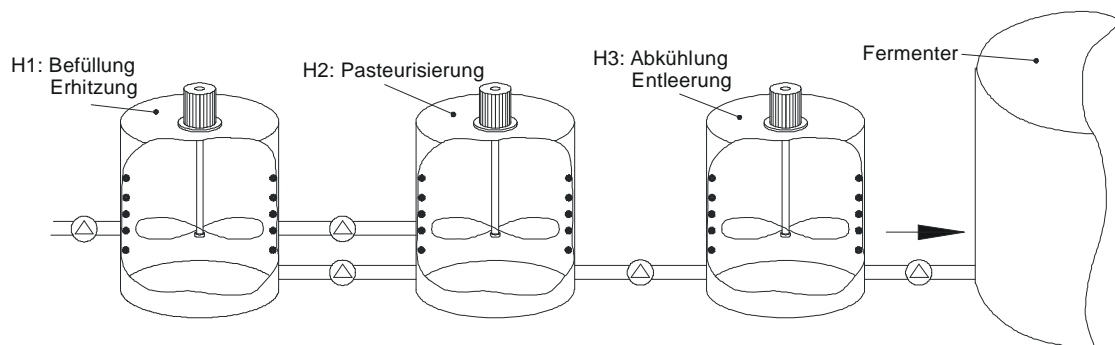


Abb. 22: Absätziges bzw. quasikontinuierliches Pasteurisierungsverfahren

1.5.2.3.2 Kontinuierliches Verfahren

Beim kontinuierlichen Verfahren erfolgt der Pasteurisierungsvorgang in einem doppelwandigen Rohr, wobei das Substrat im Innenrohr durch eine Exzentrerschneckenpumpe gefördert wird (Abb. 23). Im Ummantelungsrohr wird das Heißwasser geführt, um das Substrat entsprechend zu erwärmen. Derartige Anlagen müssen so ausgelegt sein, dass die Anforderungen für eine vollständige Pasteurisierung gewährleistet sind. Sie bieten die Möglichkeit der gleichmäßigen Zuführung von pasteurisiertem Material in den Fermenter. Die Durchsatzleistung ist von der Pumpenleistung, der Heißwasser-Temperatur und vom Rohrdurchmesser abhängig. Es muss gewährleistet sein, dass die o.g. Anforderungen bzgl. Temperatur, Druck und Verweilzeit eingehalten werden.

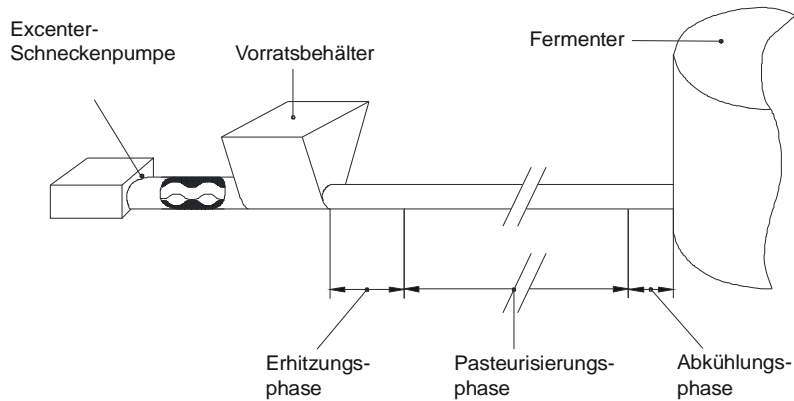


Abb. 23: Kontinuierliches Pasteurisierungsverfahren

In allen Fällen wird zur Pasteurisierung die Abwärme aus dem BHKW genutzt. Bei der Auslegung der Anlage muss berücksichtigt werden, dass besonders im Winter bei niedrigen Temperaturen der Fermenter und gegebenenfalls andere bauliche Einrichtungen einen erheblich höheren Wärmebedarf aufweisen. Hier kann die Einhaltung der vorgeschriebenen Pasteurisierungstemperatur unter Umständen schwierig werden. Mit einer Einhausung und Isolierung des Behälters kann dem entgegen gewirkt werden.

1.5.3 Fermentertechnik

Die verfahrenstechnischen Abgrenzungen zwischen einzelnen Bereichen (vgl. Abb. 3) sind zum Teil fließend. Die Trennung der Fermenter bei zweistufigen Verfahren in Hydrolyse- (Vorversäuerung) und Hauptfermenter führt oft dazu, dass der Hydrolysefermenter den Bereich „Aufbereitung“ zugeordnet wird (Abb. 24).

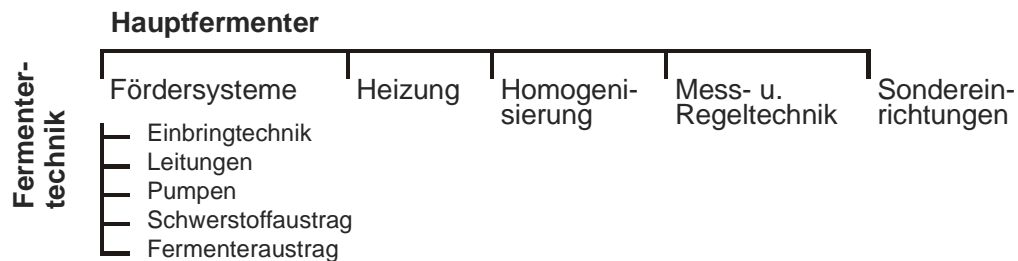


Abb. 24: Systematik der Fermentertechnik und -peripherie

Die weiteren technischen Einrichtungen eines Biogasfermenters können in die Bereiche Fördersysteme, Heizung, Homogenisierung, Mess- und Regeltechnik eingeteilt werden. Die technischen Bereiche Gasableitung, Gärrestableitung und Nachgärbehälter werden oft nicht mehr den Bereich „Fermentertechnik“ sondern den Bereichen „Gasführendes System und Gasnutzung“ sowie „Gärrestlagerung und -nutzung“ (vgl. Abb. 3) zugeordnet.

1.5.3.1 Fermenterbauarten

Die Produktion des energetisch verwertbaren Biogases findet im Fermenter statt. In der Praxis kommen Behälter unterschiedlichen geometrischen Aufbaus zum Einsatz - liegende und stehende Fermenter. Da sich die hydraulischen Vorgänge in den beiden Gärbehältern grundlegend voneinander unterscheiden, muss die Betriebsführung entsprechend angepasst werden. Biogasfermenter können in sehr verschiedenen Varianten ausgeführt sein, die sich sowohl nach Art der Beschickung, Anzahl der Prozesssysteme bzw. Fermenter als auch in der Fermentertemperatur und dem Feststoffmassegehalt des Substrates unterscheiden (Abb. 25). Einen Überblick zu den Vergärungsverfahren nach Art der Beschickung gibt Tab. 20.

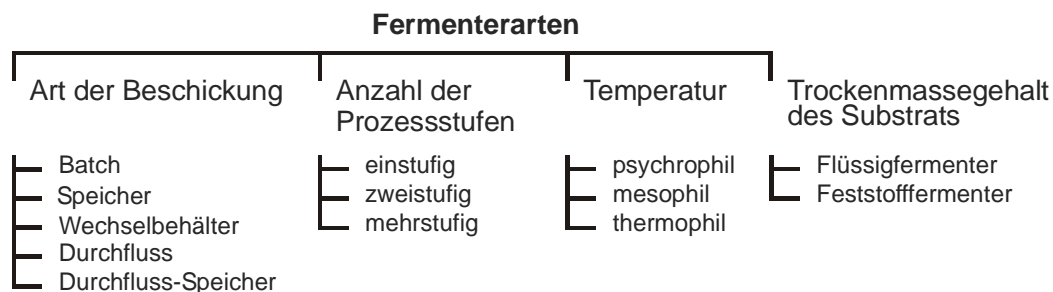
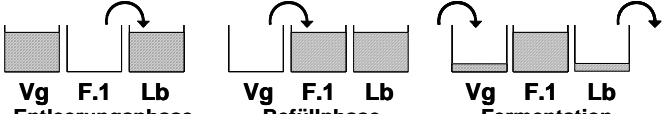
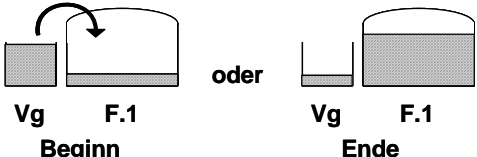
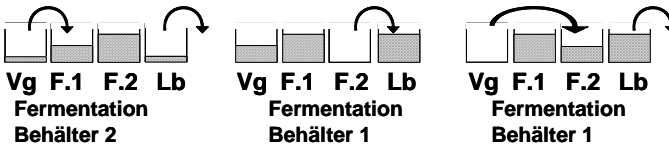
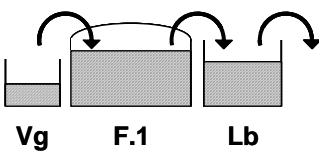
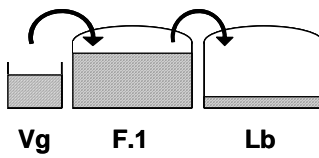


Abb. 25: Klassifizierungskriterien für Biogasfermenter

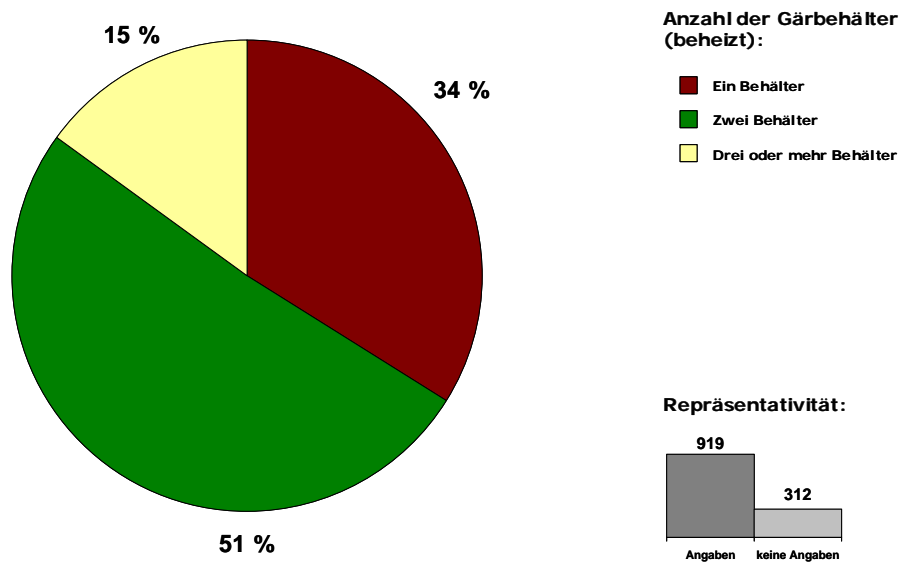
Selbst bei den Anlagen mit mehreren Fermentern werden die Anlagen i.d.R. einstufig betrieben, d.h. in allen Fermentern finden sämtliche Phasen des anaeroben Abbaus (Hydrolyse bis Methanogenese) statt. Die zwei- bzw. mehrphasigen Anlagen werden eher in industriellen bzw. rein abfallwirtschaftlichen Anlagen eingesetzt. Die Verfahrensklassifizierung nach der Temperatur (Abb. 25), die vor dem Hintergrund der Pasteurisierung an Bedeutung gewinnen wird, spielt derzeit eine untergeordnete Rolle, da die meisten landwirtschaftlichen Anlagen in Bayern (vgl. Abb. 6) im mesophilen Temperaturbereich betrieben werden.

Tab. 20: Überblick über verschiedene Vergärungsverfahren

Art der Beschickung	Ablauf des Verfahrens	Bemerkungen
Batch-verfahren	 <p>Vg F.1 Lb Entleerungsphase Vg F.1 Lb Vg F.1 Lb Befüllphase Fermentation</p> <p>VG: Vorgrube, F.x: Fermenter x, Lb: Lagerbehälter</p>	absätzig, keine kontinuierliche Gasproduktion, sichere Verweilzeit, keine Kurzschlussströmungen, geringe Faulraumeffizienz
Speicher-verfahren	 <p>Vg F.1 oder Vg F.1 Beginn Ende</p>	Fermenter = Lagerbehälter, keine kontinuierliche Gasproduktion, hohe Verweilzeit, mittlere Faulraumeffizienz, hohe Behältervolumina
Wechselbehälter-verfahren	 <p>Vg F.1 F.2 Lb Vg F.1 F.2 Lb Vg F.1 F.2 Lb Fermentation Fermentation Fermentation Behälter 2 Behälter 1 Behälter 1</p>	Überlagerung von mind. 2 absätzig beschickten Fermentern, kontinuierlichere Gasproduktion als bei Batch, gesicherte Verweilzeit, geringe Faulraumeffizienz
Durchfluss-verfahren	 <p>Vg F.1 Lb</p>	Kontinuierlicher Substratfluss, gleichmäßige Gasproduktion, keine gesicherte Verweilzeit, hohe Faulraumeffizienz
Durchfluss-Speicher-verfahren	 <p>Vg F.1 Lb</p>	Fermenter im Durchfluss, gleichmäßige Gasproduktion, keine gesicherte Verweilzeit, hohe Faulraumeffizienz

Vg: Vorgrube; F₁: Fermenter 1; F₂: Fermenter 2; Lb: Lagerbehälter; Nb: Nachgärbehälter

Auf landwirtschaftlichen Anlagen Bayerns werden hauptsächlich zweistufige Verfahren eingesetzt (Abb. 26).



Quelle: Röhling, I., Biogasanlagen-Betreiberbefragung Bayern 2006, LfL-ILB 2007

Abb. 26: Anzahl der beheizten Gärbehälter je Biogasanlage

1.5.3.1.1 Stehende Fermenter

So genannte stehende Behälter besitzen in der Regel einen runden Querschnitt und sind entweder aus Edelstahl oder häufiger aufgrund geringerer Kosten und einer günstigeren Statik aus Beton gefertigt (Abb. 27). Letztere werden in Größen unter 100 m³ bis über 5000 m³ Speichervolumen angeboten. Edelstahlbehälter sind in Größen von ca. 100 m³ bis etwa 3.500 m³ Volumen erhältlich. Darüber hinaus werden auch Fermenter aus nicht veredeltem emailliertem Stahl gefertigt. Stehende Fermenter sind voll durchmischt (s. Kap. 1.5.3.8). Dadurch ist eine Kontamination mit Bakterien des frisch zugeführtem Substrats gewährleistet. Zusätzliche Maßnahmen zur Animpfung bestimmter Bereiche des Behälters müssen somit nicht getroffen werden.

Unterschiedliche Literaturquellen geben eine maximale Faulraumbelastung von 3 bis 5 kg oTM/m³ Fermentervolumen und Tag an. In der Praxis hat sich gezeigt, dass einzelne Anlagen auch größere Belastungen tolerieren, es also auch bei einer Überschreitung der angegebenen maximalen Faulraumbelastung zu keiner Einschränkung der Biologie im Reaktor kommt. Möglicherweise ist die einem Fermenter zumutbare Belastung davon abhängig, inwieweit die Biologie an das zugeführte Frischmaterial angepasst ist und ob mit der Fütterung neue Bakterien eingetragen werden (z.B. mit Rindergülle). Mit konstanten Substratmischungen betriebene Biogasanlagen sind stärker belastbar als mit stets wechselnden Substraten beaufschlagte Anlagen. Diese Erfahrung aus der Praxis bedarf allerdings noch einer quantitativen Analyse.

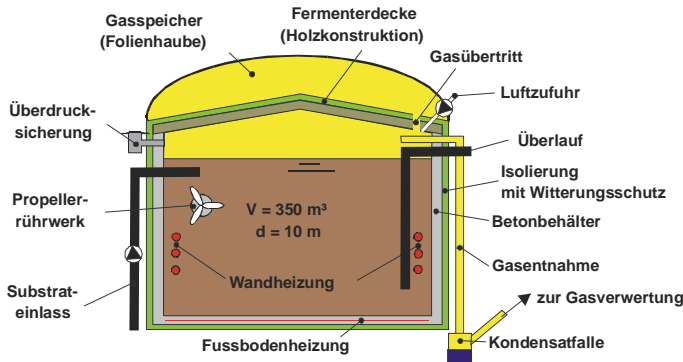


Abb. 27: Beispiel eines stehenden Betonfermenters

1.5.3.1.2 Liegende Fermenter und Pfropfenstromreaktoren

Liegende Fermenter aus Beton haben einen rechteckigen oder quadratischen Querschnitt. Baugrößen von 250 bis 1000 m³ Fermentervolumen (bei max. 25 m Länge) sind üblich, wobei sich der Faulraum durch zwei nebeneinander angeordnete Einheiten (ohne Trennwand) noch verdoppeln lässt. Liegende Stahlfermenter besitzen i.d.R. einen runden Querschnitt, sind nicht größer als 270 m³ (bei einer Länge von 24 m) und oberirdisch angeordnet (Abb. 28). Verschiedene Firmen bieten eigens für die Biogasproduktion gefertigte Stahlbehälter an, aus Kostengründen werden jedoch auch gebrauchte zylindrische Tanks aus Industrieanlagen oder von Eisenbahnwaggons verwendet.

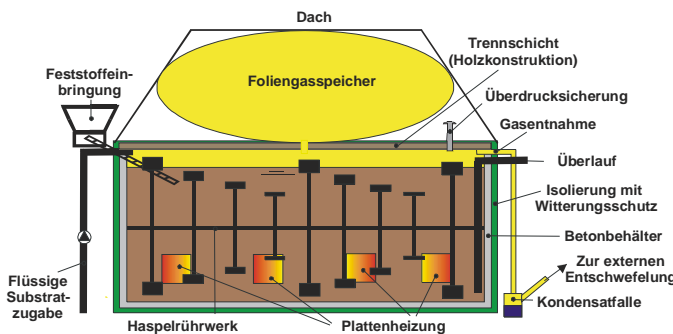


Abb. 28: Beispiel eines liegenden Fermenters, links mit externer Entschwefelung und Einrichtung zur Gasspeicherung

Da der Durchmesser bzw. die Höhe liegender Fermenter in der Regel erheblich geringer ist als deren Länge, entsteht ein im Vergleich zu stehenden Fermentern erhöhter Materialaufwand bezüglich Bau und Isolierung. Der kleine Querschnitt ermöglicht allerdings die Installation von langsamdrehenden mechanischen Rührwerken, die quer zur Durchflussrichtung arbeiten und deren Rührpaddel nahezu den gesamten Faulraum erreichen (vgl. Abb. 30:). Trotz geringer Leistungsaufnahme bewirken sie eine optimale Durchmischung in vertikaler Richtung, auch beim Einsatz von Substratmischungen mit einem Feststoffsubstantzgehalt bis 20 %. Liegende Fermenter, bei denen der Transport des Inhaltes in horizontaler Richtung ausschließlich durch den Verdrängungseffekt des immer wieder frisch eingebrachten Materials erfolgt, werden als Pfropfenstromreaktoren bezeichnet. Das Substrat wird wie ein Pfropfen durch den Fermenter geschoben, wodurch eine räumliche Trennung von verschiedenen Abbauphasen im gleichen Behälter erreicht wird und Kurzschlussströme vermieden werden. Daraus resultieren positive Effekte auf den Abbaugrad und die Hygienisierbarkeit des Materials. Die fehlende Beimischung des Frischsubstrats, das nicht mit bakterienreichem Fermenterinhalt in Verbindung kommt, kann durch die Verwendung von Gülle, Festmist oder durch Substratrückführung kompensiert werden. Pfropfenstromreaktoren können stärker belastet

werden als vollaufgemischte Behälter. Der räumlich getrennt ablaufenden Gärprozess erlaubt Belastungen zwischen 7 und 10 kg oTM/m³ und Tag. Der positive Effekt der Pfropfenströmung ist jedoch nicht generell bei allen liegenden Fermentern gegeben. In Systemen, die über eine externe Heizung erwärmt werden, kann die Pfropfenströmung dadurch aufgehoben werden, dass das Material am Ablauf außerhalb des Behälters erwärmt und am Zulauf wieder eingetragen wird. Ist eine häufige Wiederholung dieses Vorgangs zur Aufrechterhaltung der Fermentertemperatur notwendig, führt dies schließlich zu einer kompletten Durchmischung. Auch zu große Fermenterquerschnitte führen scheinbar zum Verlust der erwünschten Pfropfenströmung.

1.5.3.1.3 Hydrolysestufe

In Biogasanlagen, die einer sehr hohen täglichen Faulraumbelastung ausgesetzt sind, besteht die Gefahr des Versäuerns des Fermenterinhalts. Bei diesem Vorgang kann die Aktivität der methanbildenden Bakterien aufgrund eines zu hohen Säuregehaltes im Medium so stark beeinträchtigt werden, dass keine weitere Gasproduktion mehr erfolgt. Um dem entgegen zu wirken, ist die Einrichtung eines zusätzlichen, dem Fermenter vorgeschalteten Behälters sinnvoll, in dem nur die erste Phase (Hydrolyse) des Abbauprozesses stattfindet. Das Endprodukt der Hydrolyse weist einen pH-Wert zwischen 3,5 und 4,5 auf und kann von den im Fermenter befindlichen Bakterien leicht abgebaut werden.

Das Fassungsvermögen der Hydrolysestufe ist so zu wählen, dass das zugeführte Material für 2-3 Tage in dem Behälter verweilen kann, bevor es dem eigentlichen Fermenter zugeführt wird. Da die Hydrolyse bevorzugt im mesophilen bis thermophilen Temperaturbereich abläuft, sollten die dafür vorgesehenen Behälter beheizbar und isoliert sein. Zur Vermeidung von Schwimm- und Sinkschichten ist eine Rührereinrichtung zu installieren.

1.5.3.1.4 Nachgärbehälter

Kurzschlussströme und kurze Verweilzeiten führen dazu, dass nicht bzw. nicht vollständig vergorenes Material den Fermenter verlässt. Oftmals muss auch das Gärmedium verdünnt werden, um die Pumpfähigkeit zu erhalten bzw. Verstopfungen in den Gülleleitungen zu vermeiden. Dies wird in der Regel mit abgekühltem Gärrest aus dem Gärrückstandslager durchgeführt und hat eine Verkürzung der Verweilzeit und eine kurzzeitige Temperaturabsenkung im Fermenter zur Folge. Um das substratspezifische Energiepotential besser ausnutzen zu können und einen nicht erwünschten Bakterienaustrag zu vermeiden, wird zwischen Fermenter und Gärrückstandslager ein so genannter Nachgärbehälter geschaltet (zweistufiges System). Dieser ist in der Regel etwas größer ausgelegt als der eigentliche Fermenter und wie dieser beheizt, isoliert und mit einem Rührwerk ausgestattet. Da der Nachgärbehälter nicht in dem Maße mit hochmolekularen organischen Substanzen beaufschlagt wird wie der Fermenter, liegt dort die Biologie vorwiegend in essigsäure- und methanbildenden Bakterien vor.

Durch Güllerückführung des beheizten Nachgärerinhalts kann somit das Gärmedium verdünnt und mit einer dem Temperaturniveau angepassten Biologie versorgt werden, was den Gärprozess im Fermenter positiv beeinflusst. Die damit einhergehende Verkürzung der Verweilzeit im eigentlichen Fermenter hat keinerlei negative Auswirkungen, da der Abbauprozess im Nachgärbehälter fortgesetzt wird. Nach Untersuchungen von BESGEN (2004) wurden in Praxisanlagen zwischen 8 % und 30 % der Gesamtmenge an Biogas im Nachgärbehälter gebildet.

1.5.3.1.5 Sonderformen zur Feststofffermentation

Zur Fermentation von schüttfähigen Feststoffen, werden auch so genannte Feststofffermentationsverfahren eingesetzt, die sowohl im diskontinuierlichen als auch im kontinuierlichen Verfahren betrieben werden können.

Garagen-System

Zur diskontinuierlichen Feststofffermentation werden Behälter verwendet, die aus gasdichten, durch Dehnfugen miteinander verbundenen Fertigbetonteilen bestehen, und in der äußeren Form einer Garage ähneln oder die z.B. auf Basis von Euro-Containern aufgebaut sind (Abb. 29). Das Volumen des Fertiggaragentyps umfasst rund 100 m³, wobei aufgrund der Einbringtechnik, je nach Substrat nur das Fermentervolumen (ca. 2/3) ausgenutzt werden kann. Die Fermenter sind mit einem gasdicht abschließbaren Tor versehen, durch das die Befüllung mit Hilfe eines Radladers erfolgt. Um das zu vergärende Gut ausreichend mit anaeroben Bakterien zu versorgen und um entstehende Säuren abzupuffern, wird es mit mind. 40 % ausgefaultem Substrat in einem Verhältnis von 40 % bis zu 60 % (Frischmaterial : Impfmateriale) vermischt. Zusätzlich wird das Substrat während der gesamten Verweilzeit von 3 - 6 Wochen über an der Decke angebrachten Düsen mit Perkolat (Perkolat = aus dem Substrat sickende Überschussflüssigkeit, die rezirkuliert wird) besprüht (Abb. 29). Dieser Vorgang ersetzt das bei der Flüssigfermentation übliche Rühren zur gleichmäßigen Verteilung der Bakterien und steigert den Abbaugrad. Das Perkolat sickert durch das Substrat, wird am Boden über eine Ablaufrinne aufgefangen und in einen Vorratstank gepumpt. Das während der Anlaufphase aufgrund des niedrigen Methangehaltes noch nicht verwertbare Biogas wird aus dem Fermenterraum abgesaugt und gelangt über einen Biofilter an die Außenluft oder kann u. U. dem Motor des BHKW als Verbrennungsluft zugeführt werden. Auf die Spezifikationen des Motorherstellers und die sicherheitstechnischen Anforderungen ist zu achten.

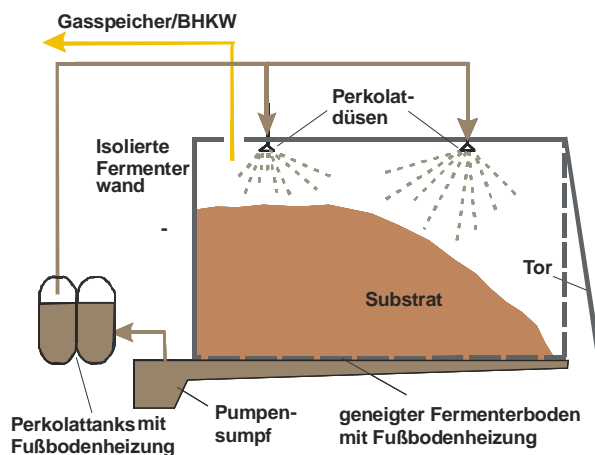


Abb. 29: Anlagenprinzip einer Biogasanlage zur Feststofffermentation im diskontinuierlichen Verfahren (nach ASCHMANN, 2002)

Grubenverfahren

Das Funktionsprinzip des Grubenverfahrens ist dem des Garagensystems sehr ähnlich – in der Ausführung unterscheiden sich die beiden Techniken jedoch wesentlich. Eine oder mehrere im Boden versenkte Betongruben dienen beim Grubenverfahren als Fermenter. Die jeweilige Stirnseite eines Behälters ist schräg angeordnet, so dass die Grube mit einem Radlader befahren und mit frischem zu vergärendem Material beschickt werden kann (Abb. 30:). Dabei muss das richtige Mischungsverhältnis zwischen Impf- und Frischmaterial

eingehalten werden, welches dem, das auch beim Garagenverfahren angewendet wird, entspricht. Nach der Befüllung eines Behälters wird die Oberfläche des Substratstockes mit perforierten Kunststoffrohren ausgelegt und der Fermenter mit einer Kunststoffolie gasdicht abgedeckt. Die Kunststoffrohre dienen während der gesamten Verweilzeit zur Benetzung des zu vergärenden Materials mit temperiertem Perkolationswasser, die Kunststoffolie zur Speicherung des entstehenden Biogases. Wissenschaftlich abgesicherte Ergebnisse aus Praxisanwendungen liegen zu diesem Verfahren derzeit nicht vor.



Abb. 30: Entleerter (links) und aktiver Fermenter (rechts) einer Anlage zur Feststoffvergärung im Grubenverfahren

Folienschlauch (diskontinuierliches Verfahren)

Beim Folienschlauchverfahren (Abb. 31) wird ähnlich wie bei der Schlauchsilierung ein flexibler Behälter aus Polyethylenfolie mit Substrat gefüllt. Die Behältermaße variieren zwischen 1,5 und 3,6 m Breite, 30 - 150 m Länge und fassen bis zu 1.000 t Substrat. Um den Gärprozess in Gang zu setzen, muss das zu vergärende Material mit bereits vergorenem Impfmaterail vermischt werden. Die Mischung wird dem auf einer beheizbaren Bodenplatte liegenden Schlauch mit den selben Maschinen, wie sie auch für die Silierung verwendet werden, zugeführt (Abb. 31). Um Prozessenergie einzusparen, sollte der Behälter isoliert werden. Das entstehende Biogas wird über ein spezielles Leitungssystem im Folienschlauch abgezogen. Nach einer Verweilzeit von 6 - 12 Wochen wird die Folie aufgeschnitten und der Gärrest einer Kompostierung zugeführt. Die entscheidenden Vorteile dieses Verfahrens sind die im Vergleich zu anderen Techniken sehr niedrigen Investitionskosten und der geringe Zeitbedarf zur Betreuung des Prozesses.

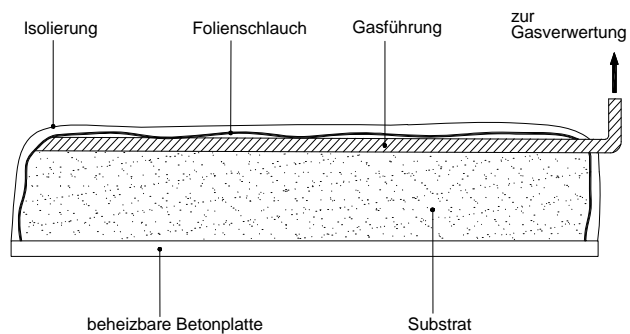


Abb. 31: Beladevorgang eines Folienschlauches Folienschlauchverfahren zur Feststofffermentation

Fördersysteme

Um flüssige Medien wie z. B. Frischgülle oder Gärrückstand zu transportieren und die Materialströme zu steuern, sind Rohrleitungen, Pumpen und Armaturen notwendig. Feststoffe können sowohl über Vorgruben verflüssigt als auch über entsprechende Einrichtungen direkt in den Fermenter eingebracht werden.

1.5.3.2 Einbringtechnik

Temperaturschwankungen im Fermenter und kurzzeitige hohe Belastungen des Systems durch stoßweise Zugabe hoher Mengen organischen Materials beeinträchtigen den Biogasprozess, wodurch Schwankungen im Methangehalt hervorgerufen werden. Außerdem kommt es zu einer ungleichmäßigen Gasbildungsrate, die wiederum zu hohen Schwefelwasserstoffkonzentrationen führt, da die zur Entschwefelung eingetragene Luftmenge in der Regel nicht an die momentan gebildete Gasmenge angepasst wird. Aus diesem Grund sollten die Beschickungsintervalle so kurz wie möglich gehalten werden. Bestimmte Einbringtechniken (Einspülschacht, Einbringschnecke mit Trichter) fordern vom Anlagenbetreiber einen hohen Zeitaufwand. Insbesondere an größeren Biogasanlagen werden deshalb Systeme bevorzugt, die eine gewisse Vorratshaltung ermöglichen und durch die der Einbringvorgang weitgehend automatisiert werden kann.

Technische Lösungen reichen bis zu zeit- und massegesteuerten Systemen sowohl für die Feststoffeinbringung als auch entsprechend gesteuerte Pumpen.

1.5.3.2.1 Direkteinleitung

Die bei entsprechenden Haltungssystemen anfallenden tierischen Exkremente können über ein Gülleleitsystem, das in einem natürlichen Gefälle angelegt ist, direkt aus dem Gülle Raum unter dem Spaltenboden in den Fermenter gegeben werden. Dieses System bietet den Vorteil der kontinuierlichen Zugabe geringer Mengen organischen Materials, ohne dass es im Fermenter zu Stoßbelastungen oder Temperaturschwankungen kommt. Feststoffreiche Rindergülle kann Verstopfungen der Rohrleitungen verursachen. Deshalb sollte das Rohrsystem über eine Pumpe mit Fermenterinhalt oder Gärrest gespült werden können. Anlagen mit Direkteinleitung müssen bei späterem Einsatz von festen Kosubstraten mit entsprechenden Techniken zur Rohstoffeinbringung ausgestattet werden.

1.5.3.2.2 Vorgrube

Insbesondere ausgelagerte Biogasanlagen, die Basissubstrate verwenden, verfügen über eine Vorgrube, in der die angelieferte Gülle zwischengelagert werden kann (vgl. Abb. 32). Sie ist den Fermentern vorgeschaltet und mit diesen durch eine Rohrleitungen verbunden. Von hier aus wird die Gülle in die Fermenter gepumpt. Eine Zumischung der einzutragenden Kosubstrate, wurde in der Vergangenheit bei kleineren Biogasanlagen häufig praktiziert, da dadurch auf eine zusätzliche technische Komponente zur Feststoffeinbringung verzichtet werden konnte. Die zur Aufrechterhaltung der Pumpfähigkeit (TM-Gehalt < 12 % - 16 %) erforderliche Verdünnung großer anfallender Mengen an Kosubstraten, der damit verbundene hohe Pumpenaufwand und die bei der Beschickung entstehende Geruchsentwicklung haben dazu geführt, dass dieses Verfahren bei modernen großen Biogasanlagen nur noch selten angewandt wird. Auch ist der entstehende erhöhte Bauaufwand nicht zu unterschätzen. Bei Einbringung von 6 t Rindergülle und 3 t Maissilage über die Vorgrube sind ca. 3 t Gärrest hinzuzufügen, um die Mischung pumpfähig zu machen. Soll eine Verweilzeit von 20 Tagen eingehalten werden, so sind aufgrund der Verdünnung für jede Tonne Mais zusätzlich 20 m³ Fermenterraum notwendig (MITTERLEITNER 2003).



Abb. 32: Vorgrube zur Sammlung und Homogenisierung von Substraten

Werden Kosubstrate über die Vorgrube in den Fermenter gegeben, ist zur optimalen Durchmischung ein Rührwerk vorzusehen. Durch Schneiden an den Rührpropellern oder in die Gülleleitung integrierte Zerkleinerungsaggregate werden langfaserige Bestandteile zerkleinert. Um die durch die Fütterung verursachten Temperaturschwankungen im Fermenter möglichst gering zu halten, kann der Behälter entweder beheizbar ausgeführt sein oder durch häufige kurzzeitige Aktivierung der Pumpe möglichst kontinuierlich beaufschlagt werden. Letzteres verhindert temporäre hohe Belastungen des Gärprozesses, führt jedoch durch längere Verweilzeiten im Vorlagebehälter zu Energieverlusten und Emissionen von Schadgasen.

Funkferngesteuerte Vorrichtungen zum Öffnen der Vorgrube vermindern die für den Befüllvorgang notwendige Arbeitszeit und reduzieren Geruchsemissionen.

1.5.3.2.3 Einspülschacht

Die Technik zur Einbringung von Feststoffen mittels eines Einspülschachtes, wurde in der Vergangenheit häufig an kleineren Biogasanlagen angewandt, da der technische und finanzielle Aufwand zur Installation vergleichsweise gering ausfällt. Bei gleichem Funktionsprinzip sind unterschiedliche Anordnungen am Fermenter möglich (Abb. 33).

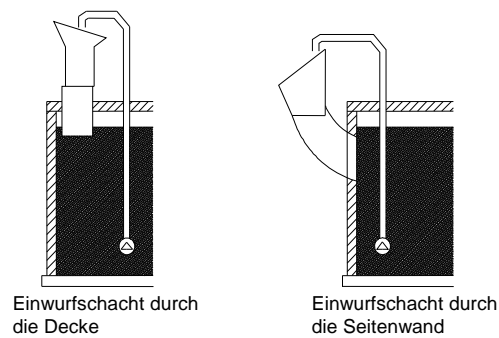


Abb. 33: Verschiedene Varianten von Einspülvorrichtungen (unten links: offener Schacht)

Der einzubringende Feststoff wird mit dem Radlader oder Frontlader in Trichter gefüllt und mittels einer Pumpenleitung mit Gülle (aus dem unteren Bereich des Fermenters) durch den am unteren Ende des Trichters sitzenden Schacht in den Fermenter gespült. Da aufgrund des hohen Arbeitsaufwandes der Einspülschacht in der Regel nur zweimal täglich mit Feststoffen beschickt wird, gelangen hier z.T. erhebliche Mengen organischen Materials in kürzester Zeit in den Fermenter. Dadurch kommt es vor allem in den Wintermonaten zu Temperaturschwankungen im Fermenter und einer kurzzeitig auftretenden hohen Belastung des Prozesses. Die damit einhergehende diskontinuierliche Gaserzeugung verursacht Schwankungen im Methan- und Schwefelwasserstoffgehalt des Biogases. Problematisch erweisen sich außerdem die durch das stoßweise Einbringen hervorgerufenen Geruchsemissionen bei offenen Einspülschächten, die in der Vergangenheit oftmals Ursache für Geruchsbelästigungen in der Nachbarschaft waren. Diese Probleme können durch die Verwendung von modifizierten Einspülschächten mit Abdeckung und Einbringwalze verhindert werden (Abb. 34). Für größere Biogasanlagen mit nahezu ausgelastetem Faulraum hat sich dieses Einbringssystem als nicht geeignet erwiesen. Die Gründe hierfür sind der immense zeitliche Aufwand für die Fütterung und die negativen Folgen von Stoßbelastungen, die sich insbesondere in hoch belasteten Systemen ohne Basissubstrat stärker auswirken. In der modernen Biogastechnologie werden Einspülsysteme deshalb praktisch nicht mehr eingesetzt.

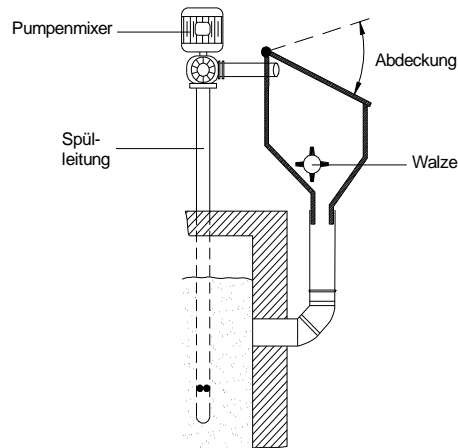


Abb. 34: Wirbeltrog

1.5.3.2.4 Einfülltrichter

Eintragschnecken mit Einfülltrichter eignen sich für stehende und liegende Fermenter. Sie werden in erster Linie für kleinere Biogasanlagen eingesetzt, da die Befüllvorrichtung nicht als Vorratsbehälter einsetzbar ist und ein hoher zeitlicher Aufwand entsteht, wenn größere Mengen an Feststoffen eingebracht werden sollen (Abb. 35). Durch die Trichterform des Annahmebehälters kann es bei der Fütterung zur Brückenbildung kommen. Dadurch wird der Substrattransport in den Fermenter unterbunden. Wird dies nicht rechtzeitig bemerkt und manuell beseitigt, ist eine kontinuierliche Fütterung nicht gegeben. Befindet sich die Vorrichtung auf der Decke des Gärbehälters, wird das Substrat über eine Schnecke, die von der Basis des Trichters bis unter den Flüssigkeitspegel des Fermenters reicht, direkt eingebracht. Ist der Befülltrichter am Boden angeordnet, wird das Substrat über eine Förderschnecke schräg nach oben transportiert und dort einer durch die Fermenterwand oder die Fermenterdecke geführten Tauchschnecke übergeben. Für den Antrieb einer Eintragschnecke mit 500 mm Durchmesser ist in der Regel ein Elektromotor mit 4 kW ausreichend (MITTERLEITNER, 2003).



Abb. 35: Einfülltrichter mit Schnecke (rechts: mit Zerkleinerungseinheit im Trichter)

1.5.3.2.5 Dosierstationen

Der entscheidende Vorteil von Dosierstationen gegenüber den bisher dargestellten Einbring-systemen ist die Möglichkeit der Bevorratung der Befüllvorrichtung. Über Dosierstationen kann das Substrat dem Fermenter zeit- und gewichtsgesteuert in kleinen Mengen mehrmals täglich zugeführt werden, ohne dass ein erhöhter Arbeitsaufwand notwendig wird. Temperaturschwankungen und kurzzeitige hohe Belastungen des Gärprozesses treten nicht auf. Dadurch stellt sich eine gleichmäßige Fermentation ein, was wiederum zu einer kontinuierlichen Gasproduktion mit konstanter Gaszusammensetzung führt. Dosierstationen sind in Form modifizierter Futtermischwägen oder eigens für diesen Zweck hergestellten Vorrichtungen (z. B. Feststoffpressen, derzeit in Größen von 10 m³ bis 70 m³ Behältervolumen) erhältlich. Je nach Menge und Art des verwendeten Substrats muss für jedes Anlagenkonzept ein passendes System gewählt werden. So eignen sich modifizierte Vertikal- oder Horizontalfuttermischer zur Einbringung langfaseriger Substrate, da sie in der Lage sind, das Material zu zerkleinern (Abb. 36).

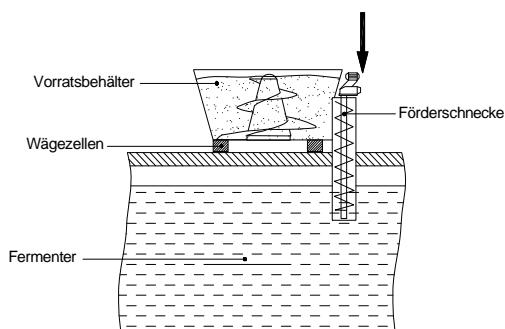


Abb. 36: Vertikalfuttermischer zur Feststoffeinbringung

Feststoffdosierer mit Zuführschnecken, Förderbändern, Kratz- oder Schubböden eignen sich eher für Zugabe von vorzerkleinerten Feststoffen (z. B. Maissilage), zeichnen sich aber durch geringere elektrische Anschlusswerte als Futtermischwägen aus (Abb. 37).

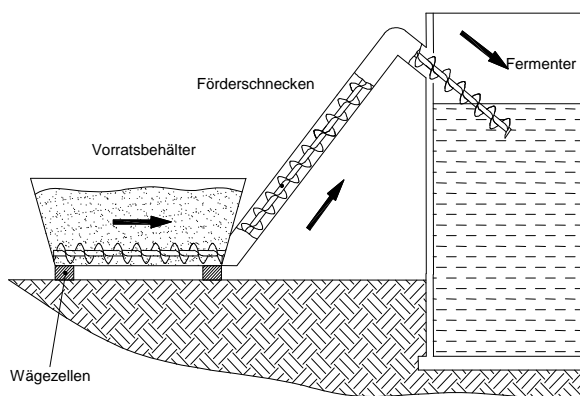


Abb. 37: Dosierstation mit Zuführschnecke

Das Substrat muss von der Förderschnecke an die Tauchschnecke übergeben werden. Dies erhöht sowohl die Bau- als auch die Unterhaltungskosten, da zum Antrieb der einzelnen

Schnecken der Einsatz mehrerer Motoren notwendig ist. Um dies zu umgehen, kann ein Verfahren angewandt werden, bei dem die Feststoffe in den unteren Bereich des Fermenters eingebracht werden. Dabei wird das Material im Annahmehunker mittels einer Schnecke einem liegenden Zylinder zugeführt, der mit dem Behälter verbunden ist. Das Substrat wird durch einen hydraulischen Presskolben in den Fermenter gefördert und vorher durch ein im Zylinder integriertes Messerkreuz zerteilt (Abb. 38).

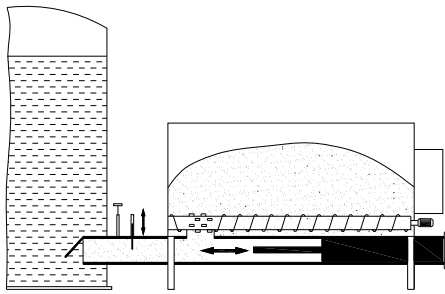


Abb. 38: Feststoffeinpresseung

1.5.3.3 Leitungen

Druckbeaufschlagte Leitungen, durch die flüssige Medien mit Hilfe einer Pumpe transportiert werden, sind in der Regel aus Stahl gefertigt und durch Flansch- oder Schweißverbindungen montiert. Um Druckverluste gering zu halten, sollte der Rohrdurchmesser mindestens 100 besser 125 mm, für längere Strecken 150 mm betragen. Kunststoffrohre werden geklebt, verschraubt oder verschweißt und können nur eingesetzt werden, wenn deren Material dem maximalen Pumpendruck standhalten kann. Überlaufleitungen wie z.B. vom Fermenter zum Nachgärbehälter oder vom Stall zur Vorgrube sind keinem Pumpendruck ausgesetzt und werden deshalb in Kunststoff ausgeführt (PVC oder Polypropylen mit Steckverbindungen und Gummiringdichtung). Damit Verstopfungen vermieden werden, ist für dünnflüssige Substrate wie Schweinegülle mindestens ein Rohrdurchmesser von 200 mm, für dickflüssigere wie Rindergülle ein Durchmesser von 300 mm erforderlich. Werden langfasrige oder feststoffsubstanzreiche Materialien zugemischt, sind noch größere Querschnitte ratsam. Die Rohrleitungen sollten möglichst frostfrei verlegt, gegebenenfalls isoliert und in einem leichten Gefälle (1 - 2 % zur Auslaufseite) angeordnet werden, damit sie sich bei Pumpenstillstand selbst entleeren (Verhinderung von Sedimentbildung). Aus der Vorgrube sollte das Substrat oberhalb des Güllespiegels in den Fermenter eingebracht werden. Auf diese Weise wird das Auftreten von Kurzschlussströmen seltener und, im Falle einer defekten Rückschlagklappe, das Zurückfließen des Gärmediums in die Vorgrube unterbunden.

1.5.3.4 Pumpen

1.5.3.4.1 Kreiselpumpen/Tauchscheidpumpen

Die einfach und robust gebauten Kreiselpumpen sind für den Transport von Substraten unter 8 % TM-Gehalt verwendbar und werden mit Leistungsaufnahmen zwischen 3 und 15 kW angeboten. Sie fördern zwischen 2 und 6 m³/min, wobei die Fördermenge mit dem Förderdruck (bzw. der Förderhöhe) abnimmt. Kreiselpumpen erreichen je nach Leistung einen maximalen

Druck von 3 - 20 bar. Sie sind so anzuordnen, dass sie nicht frei ansaugen müssen. Tauchschneidpumpen kommen zum Einsatz, wenn sich in der Gülle langfaserige Stoffe befinden, die zerkleinert werden müssen. Es handelt sich um modifizierte Kreiselpumpen mit gehärteten Schneidkanten am Laufrad und Gegenschneiden am Gehäuse (Abb. 39).

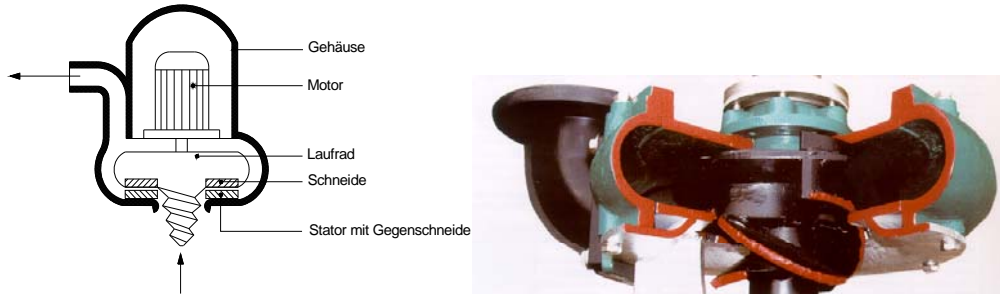


Abb. 39: Tauchschneidpumpe (Längsschnitt)

1.5.3.4.2 Verdrängerpumpen

Für Substrate mit höheren TM-Gehalten werden selbstansaugende Verdrängerpumpen verwendet, deren Fördermenge von der Förderhöhe weniger abhängig ist. *Exzentrerschneckenpumpen* saugen aus einer Tiefe von bis zu 8.5 m selbst an und erzeugen einen Druck von bis zu 24 bar (Abb. 40). Sie sind Verstopfungsanfällig bei langfaserigen Bestandteilen. Die Förderleistung ist niedriger als die der Kreiselpumpen.

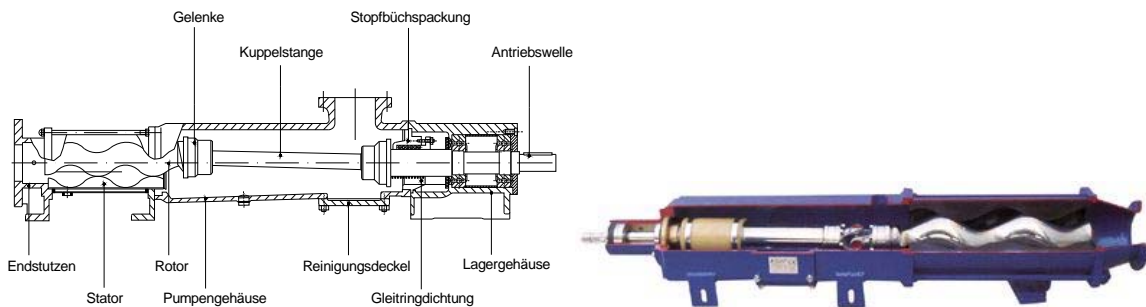


Abb. 40: Exzentrerschneckenpumpe (Längsschnitt)

Drehkolbenpumpen erreichen bei Maximaldrücken von 2 - 10 bar und Leistungsaufnahmen von 7,5 - 55 kW eine Fördermenge von 0,5 - 4 m³/min (Abb. 41).

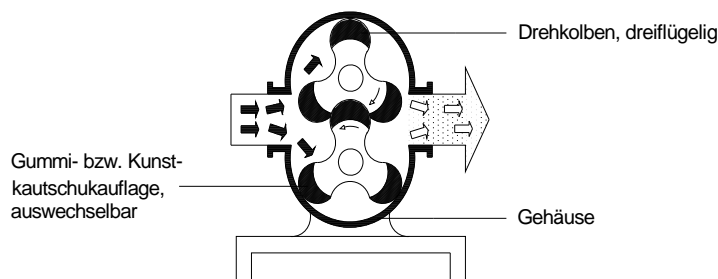


Abb. 41: Drehkolbenpumpe (Querschnitt)

Sie sind im Vergleich zu Exzentrerschneckenpumpen weitaus weniger empfindlich gegen langfaserige Bestandteile im Fördermedium und werden deshalb häufig eingesetzt, wenn der zu transportierenden Gülle Mais-, Grassilage oder Festmist zugegeben wird.

Die hohe Förderleistung dieser Pumpenarten führt dazu, dass in kurzer Zeit erhebliche Mengen frisches Material in den Fermenter gelangen. Da sich dieser Umstand nachteilig auf den Biogasprozess auswirkt (Temperaturabsenkung, kurzzeitige hohe Belastung), sind die Befüllintervalle und die Pumpenlaufzeiten kurz zu gestalten oder drehzahlregelbare Verdrängerpumpen einzusetzen. Eine weitere Alternative ist die Verwendung von langsamlaufenden Exzentrerschnecken- oder Balgenpumpen, mit denen eine kontinuierliche Beschickung realisiert werden kann (Abb. 42).

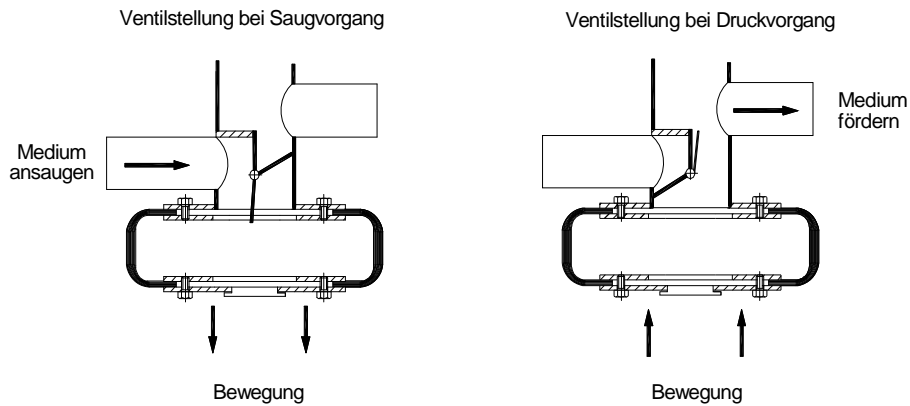


Abb. 42: Balgenpumpe: Ventilstellung bei Druck- und Saugvorgang

1.5.3.5 Schwerstoffaustrag

In Abhängigkeit des verwendeten Substrats fallen mehr oder weniger große Mengen an Sedimentationsstoffen wie z.B. Sand an. Werden keine Vorkehrungen zur Beseitigung der Sedimente an den Behältern getroffen, sinkt das Fermentervolumen und damit die Belastbarkeit des Systems. Um arbeits- oder kostenintensive Maßnahmen (längere Rührzeiten, manuelle Beseitigung) zu vermeiden, kann schon bei der Planung eine Vorrichtung zum Sinkstoffaustrag vorgesehen werden.

In stehenden Betonbehältern werden derzeit Bodenräumer eingesetzt, deren Verwendung jedoch auf Behälterdurchmesser von weniger als ca. 14 m begrenzt ist, da die Stabilität des Geräts bei größeren Durchmessern nicht mehr gewährleistet werden kann (WIMMER, 2004) (Abb. 43).



Abb. 43: Bodenräumer zum Austrag von Schwerstoffen (Mitte: Austragsschnecke)

Die Antriebswelle ist zentral und vertikal im Fermenter angeordnet, wobei der eingesetzte Getriebemotor außerhalb des Behälters angebracht ist. An dieser Welle ist am Boden des Fermenters ein Räumarm mit integrierten Ablenkwiukeln angebracht, der die Sinkstoffe zu einem Sedimentsumpf am Behälterrand transportiert. Aus dem Sumpf wird das Sediment mit Hilfe einer Schnecke, die über den Pegelstand im Fermenter reichen muss, ausgetragen, und in einem Behälter aufgefangen. Durch die mechanische Beanspruchung des Räumarms bei hohem Sedimentaufkommen kann es zu Störungen kommen. Dabei gestaltet sich die Reparatur eines Bodenräumers sehr aufwändig und arbeitsintensiv, da hierfür der Fermenterinhalt abgesenkt werden muss. Sinkstoffe können auch durch eine spezielle Fermentergeometrie beseitigt werden. Dabei ist der Fermenterboden um 5 % geneigt und führt auf einen Trichter zusammen, der durchschnittlich einen Durchmesser von 2 m und eine Tiefe von 1 m aufweist. Durch die vom Rührwerk verursachte Bewegung der Flüssigkeit gelangt das Sediment in diesen im Behälterboden eingelassenen Sedimentsumpf. Von hier aus wird es ähnlich wie beim Bodenräumer mit einer Schnecke ausgetragen. Inzwischen werden auch Öffnungen in den Behälterdecken angeboten, die zur Revision des Fermenters und für den Austrag von Sink-schichten mit Kleinbaggern geeignet sind.

1.5.3.6 Gärrestaustrag

Für den Austrag des vergorenen Substrates im Fermenter werden in der Regel die gleichen Rohrleitungen verwendet, wie sie für das übrige Substratleitsystem eingesetzt werden. Dabei wird der Fermenterinhalt durch eine Rohrleitung entweder in das Gärrückstandslager gepumpt, häufiger findet sich jedoch ein so genanntes Überlaufsystem, bei dem das Substrat bei einem bestimmten Füllstand des Fermenters automatisch in den Lagerbehälter übertritt (s. Abb. 44). Beim Überlaufsystem erweist es sich als vorteilhaft, wenn die Biegestelle der Rohrleitung oben angeordnet ist, da somit eine dauerhafte Belastung durch den hydrostatischen Druck des Gärmediums auf die Rohrbiegung unterbunden und damit einer Beschädigung vorgebeugt wird. Druckbeaufschlagte mit einer Pumpe versorgte Rohrleitungen zum Gärrückstandslager müssen dem maximalen Pumpendruck standhalten können.

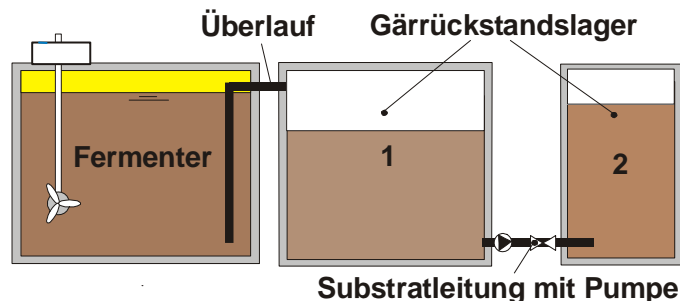


Abb. 44: Systeme zum Fermenteraustrag

1.5.3.7 Heizung

Eine Voraussetzung für einen gleichmäßig verlaufenden Gärprozess ist eine konstante Substrattemperatur. Die dafür benötigte Wärmemenge wird bei Biogasanlagen in der Regel durch die Abwärme des BHKW geliefert und ist in ausreichender Menge vorhanden. Zur externen Erwärmung (außerhalb des Fermenters) wird das Substrat im Gegenstrom zu Heißwasser durch einen Wärmeaustauscher gepumpt, wofür vor allem Doppelrohr- und Spiralwärmetauscher verwendet werden. Bei Letzteren kann das Heizmedium auch warme Gülle sein. Da bei diesem Verfahren nicht nur Heizwasser sondern auch die Gülle durch Rohrleitungen gepumpt werden muss, ist ein erhöhter Pumpenaufwand zu betreiben und bei langfasrigen Substraten besteht die Gefahr des Verstopfens. Das thermodynamisch sehr effiziente Verfahren gestaltet sich relativ kostenintensiv und wird deshalb vorwiegend in größeren Anlagen angewandt.

In stehenden Behältern werden vorwiegend Boden- oder Wandheizungen eingesetzt. Bei Bodenheizungen werden in den Fermenterboden Kunststoffheizspiralen verlegt und der Vor- und Rücklauf über je einen Verteiler parallel geschaltet, um den Strömungswiderstand gering zu halten. Es ist ein statischer Nachweis über die Standsicherheit der Bodenplatte zu führen. Sinkschichten führen zu einer starken Verschlechterung der Wärmeübertragung. Sie müssen deshalb aufgerührt oder mit einem Sedimentaustrag beseitigt werden. Weit verbreitet sind Wandheizungen, für die zwei Varianten einsetzbar sind. Kunststoffheizrohre werden ähnlich wie bei der Fußbodenheizung in den Beton eingegossen. Hier ist ebenfalls ein statischer Nachweis zu führen. Eine bessere Wärmeübertragung liefern mit einigem Abstand an der Betonwand befestigte Edelstahl- oder Kunststoffrohre in zwei oder mehr Heizkreisen. Voraussetzung für eine effektive Temperaturübertragung ist das Umspülen der Rohre mit Substrat. Die Rohre sollten mit einem Mindestabstand von 20 - 50 cm von der Seitenwand installiert und mit stabilen Haltevorrichtungen befestigt werden. Damit wird einer Beschädigung beim Absenken des Flüssigkeitspegels durch eine ggf. vorhandene Schwimmdecke vorgebeugt (s. z.B. Abb. 46 rechts). Rührwellenheizungen sorgen in horizontalen Fermentern für eine sehr gute Wärmeübertragung. Am Substrateinlass befindet sich statt der Rührpaddel eines Haspelrührwerks eine mehrteilige Schleife aus Stahlrohr, die mit Heizwasser versorgt wird. Aufgrund des günstigen Wärmeübertrags bei aktivem Rührwerk wird nur eine geringe Tauscherfläche benötigt, wobei zur Aufrechterhaltung der Temperatur ein längerer Stillstand zu vermeiden ist, da sich der Wärmeübergang dann erheblich verschlechtert (vgl. Abb. 45).

1.5.3.8 Homogenisierung

Fermenter und Nachgärbehälter müssen mit Rührwerken ausgestattet sein, um frisch zugegebenes Material ausreichend mit Bakterien zu versorgen und eine gleichmäßige Temperaturverteilung zu erreichen. Außerdem verhindert eine effektive Rührtechnik die Bildung von Schwimm- und Sinkschichten und wirkt sich positiv auf den Stoffwechsel der Bakterien aus, da Gasblasen ausgetrieben und frische Nährstoffe herangeführt werden. Die Rührintervalle sind abhängig von der Art des Rührwerks, der Art des Substrats und sind deshalb für jede Anlage individuell zu gestalten.

Haspelrührwerke sind langsam laufende Rührwerke, werden zur Durchmischung horizontaler Fermenter eingesetzt und arbeiten quer zur Durchflussrichtung (s. Kap. 1.5.3.1). Die Rührarme im Bereich der Substratzufuhr können als Heizstränge ausgeführt werden (optimale Temperaturverteilung). Die Rührarme im mittleren und rückwärtigen Bereich des Fermenters sollten spiralförmig angeordnet (Verringerung des Drehmoments bei Sinkschichtenbildung) und am Ende mit kurzen Paddeln ausgestattet sein. Haspelrührwerke besitzen eine vergleichsweise geringe Anschlussleistung, müssen bei einer Drehzahl von ca. 4 U min^{-1} 6 bis 12 mal täglich für fünf bis zehn Minuten betätigt werden und erreichen auch bei Substraten mit bis zu 20 % TM einen sehr guten Homogenisierungseffekt (Abb. 45).

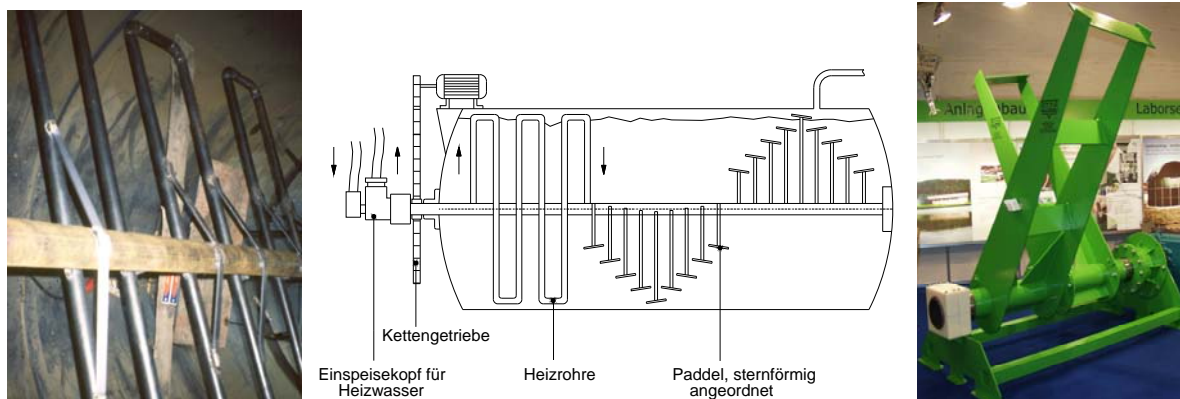


Abb. 45: Mechanisches Haspelrührwerk mit Heizrohr und Detail

Tauchpropellerrührwerke sind schnell laufende Rührwerke (380 U min^{-1}) und kommen bei stehenden Behältern zum Einsatz. Modelle ohne Getriebe erreichen Drehzahlen bis 1.500 U min^{-1} werden jedoch für die Biogasproduktion nicht verwendet. Tauchpropellerrührwerke sind oft auf der Fermenterdecke installiert, mit einem Service-Schacht ausgestattet und sind seiten- und höhenverstellbar ausgeführt (Abb. 46).

Sie werden in der Regel mit Anschlussleistungen zwischen 7 und 22 kW installiert, wobei die Propeller Durchmesser zwischen 50 und 70 cm aufweisen. Um die Drehzahl zu verringern, werden neuerdings Propeller bis zu 1,80 m Durchmesser angeboten. Tauchpropellerrührwerke sind geeignet zur Durchmischung von Fermenterhalten mit einem TM-Gehalt von bis zu 12 %, wobei zur effektiven Durchmischung eines Behälters mit einem Volumen von 1000 m^3 bereits zwei Rührgeräte verwendet werden müssen. Nachteilig kann sich eine geringfügige Beeinträchtigung der Bakterienpopulation auswirken, die bei sehr hohen Drehzahlen auftritt. Diese führen auch zu einer erhöhten mechanischen Beanspruchung der Rührwerke, wodurch sich auch die Verankerung des Standrohrs lösen kann. Die Verwendung von hydraulischen Antrieben gewährleistet eine ausreichende Abdichtung und Temperaturbeständigkeit der Tauchmotoren.

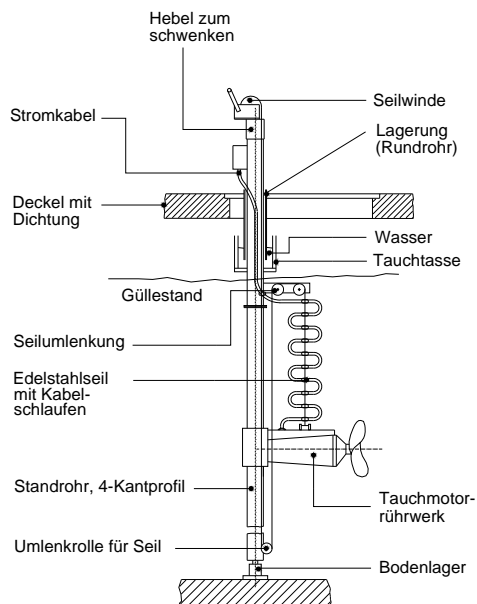


Abb. 46: Schwenk- und höhenverstellbares Tauchmotorrührwerk

Stabmixer sind schnell laufende Rührwerke (380 bis max. 1000 U min⁻¹) mit einem außen liegenden Motor, der über eine lange Welle einen Propeller mit einem Durchmesser von bis zu 60 cm antreibt (Abb. 47). Auch Antriebe über Ölmotoren oder die Zapfwelle des Schleppers sind möglich.

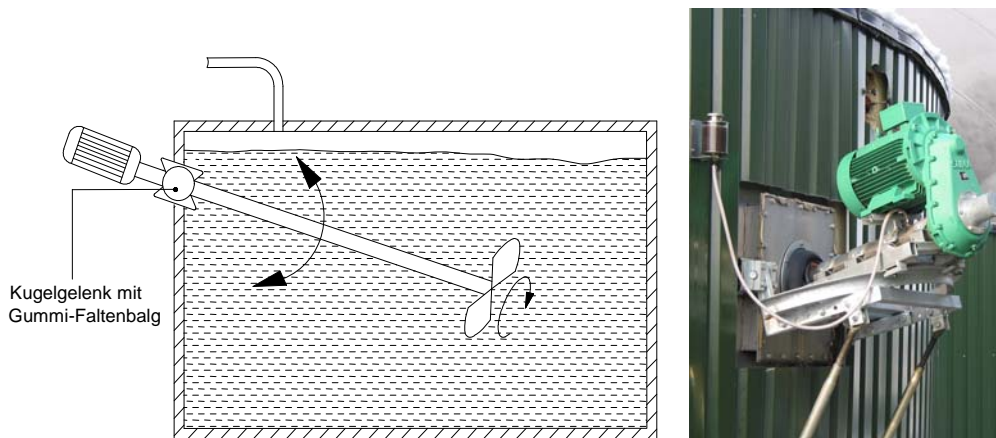


Abb. 47: Stabmixer, schwenkbar

Sie sind entweder durch die Decke in der Regel jedoch durch die Fermenterwand geführt und besitzen eine elektrische Anschlussleistung von bis zu 15 kW. Bei Deckeneinbau ist auch der Antrieb über die Schlepperzapfwelle möglich. Um Schäden der Rührwelle durch die auftretenden Schub- und Zugkräfte zu vermeiden, wird diese in einem Außenrohr mehrfach gelagert und die Standzeit der Dichtung an der Fermenterdurchführung wird durch die Lagerung des Außenrohrs außerhalb des Fermenters erhöht. Die hydrostatische Belastung sollte gering gehalten werden, indem der maximale Flüssigkeitsstand im Fermenter nicht mehr als einen Meter über der Dichtung liegt. Stabmixer sollten möglichst horizontal und vertikal schwenkbar sein, damit auch Schwimmschichten und Sedimente effektiv beseitigt werden können. Sie können auch als Schneidwerkzeuge dienen, wenn deren Propeller mit aufgeschweißten Zähnen versehen oder spezielle Schneidmesser zusätzlich zum Propeller an der Rührwerkswelle befestigt werden.

Axialrührwerke sind langsam laufende Rührwerke, die ausschließlich in stehenden Behältern eingesetzt werden (Abb. 48).

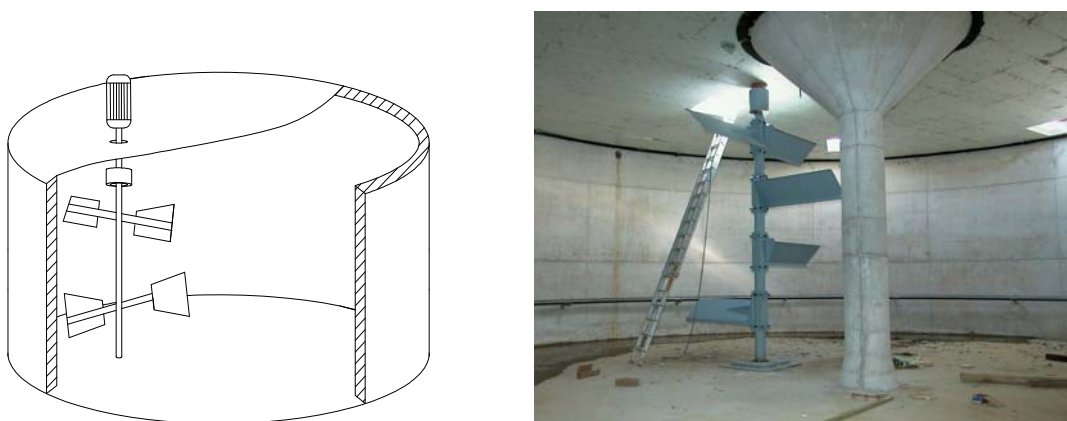


Abb. 48: Dezentral angeordnetes Axialrührwerk

Bei Behälterdurchmessern bis 14 m werden sie mittig, bei größeren Durchmessern werden sie dezentral angeordnet, da solche Fermenter in der Regel mit einer Mittelstütze versehen

werden. Axialrührwerke besitzen eine elektrische Anschlussleistung von 15 - 18 kW und weisen einen Durchmesser von 3 - 4 m auf. In Abhängigkeit der Länge der Rührflügel werden sie mit Drehzahlen zwischen 12 und 25 U min^{-1} betrieben. Die niedrigen Drehzahlen wirken sich positiv auf die Standzeiten der Rührwerke aus (geringe mechanische Beanspruchung) und schonen die Bakterienpopulation. Schwimm- und Sinkschichten werden nicht so effektiv beseitigt wie mit schnell laufenden, positionsveränderbaren Rührwerken.

Langachsührwerke sind langsamdrehende Rührwerke, die schräg durch die Fermenterwand eingeführt sind (Abb. 49). Sie gelten auch als Sonderform der Stabmixer.

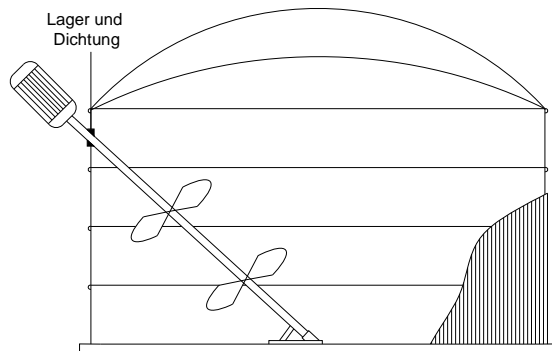


Abb. 49: Langachsührwerk

Der Antriebsmotor (15 kW) der Rührwelle befindet sich außerhalb des Fermenters und treibt zwei 0,7 m bis 2,5 m lange Rührflügel an, die mit einer Drehzahl von 15 bis max. 40 U min^{-1} betrieben werden (in Ausnahmefällen bis 200 U min^{-1}). Sind Frequenzumrichter integriert, kann der Stromverbrauch dem aktuellen Leistungsbedarf angepasst werden. Die Rührwerke sind i.d.R. außerhalb des Fermenters an einem Sockel und innen am Fermenterboden befestigt. Durch die massive Bauweise wird in Verbindung mit der niedrigen Drehzahl ein langlebiger Betrieb bei geringer Reparaturanfälligkeit ermöglicht. Die Anordnung der Rührflügel bewirkt eine Durchmischung in horizontale und vertikale Richtung, wodurch Schwimmdecken und Sedimentbildungen aufgelöst werden.

Paddelrührwerke sind langsam laufende Rührwerke, deren horizontal verlaufende Rührwellen seitlich durch stehende Fermenter geführt werden und deren Rührpaddel wechselständig angeordnet sind. Im Innern des Fermenters ist die Rührwelle an einem am Boden oder der Decke verankerten Stützgerüst gelagert (Abb. 50).

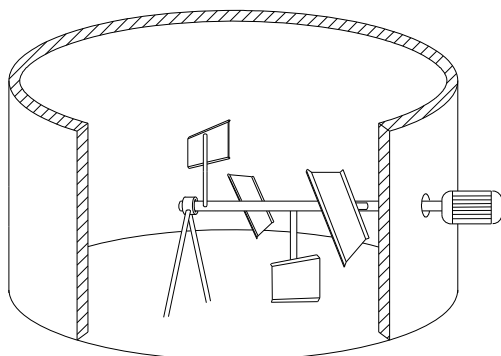


Abb. 50: Paddelrührwerk System „Agrikomp-Paddelgigant“

Dabei variiert sowohl die Drehzahl ($8 - 14 \text{ U min}^{-1}$) als auch die Höhe der Lagermitte (1,9 m - 3,5 m) mit der Länge der Rührpaddel (1,45 m bis 1,95 m). Das Rührwerk hat eine elektrische Anschlussleistung von 15 kW und ermöglicht aufgrund seines Aufbaus eine effektive Durchmischung, auch bei Fermenterinhalt mit hohen TM-Gehalten. Durch die geringen Drehzahlen sind sie sparsam und schonen die Bakterienpopulation, aufgrund der geringen mechanischen Beanspruchung sind sie relativ unempfindlich gegen Verschleiß.

Die Durchmischung mittels *hydraulischen Rührwerken* wird durch Absaugen und Wiedereinleiten des Fermenterinhalt erreicht (Abb. 51).

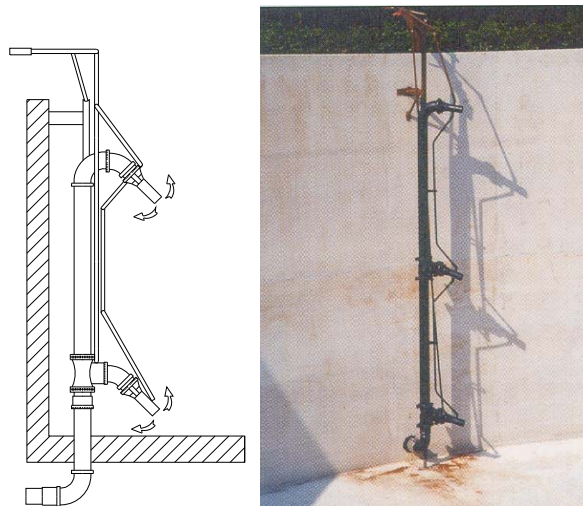


Abb. 51: Düsenrührgerät

Die dafür notwendige leistungsfähige Pumpe ist meist auch zur Fermenterbeschickung und zum Befüllen des Gülletankwagens verwendbar, wobei die verschiedenen Einsatzgebiete durch Absperrschieber gesteuert werden. Für den Rührvorgang wird der Fermenterinhalt abgesaugt und über zwei oder mehr, horizontal und vertikal schwenkbare Düsen wieder eingeleitet. Von Vorteil sind die außerhalb des Fermenterraums befindlichen und gut zugänglichen mechanisch Verschleißteile. Das patentierte *Gasdruck-Mischverfahren* nutzt den Gasdruck aus, der entsteht, wenn die Verbindung vom Fermenter zum Gasspeicher geschlossen wird (Abb. 52).

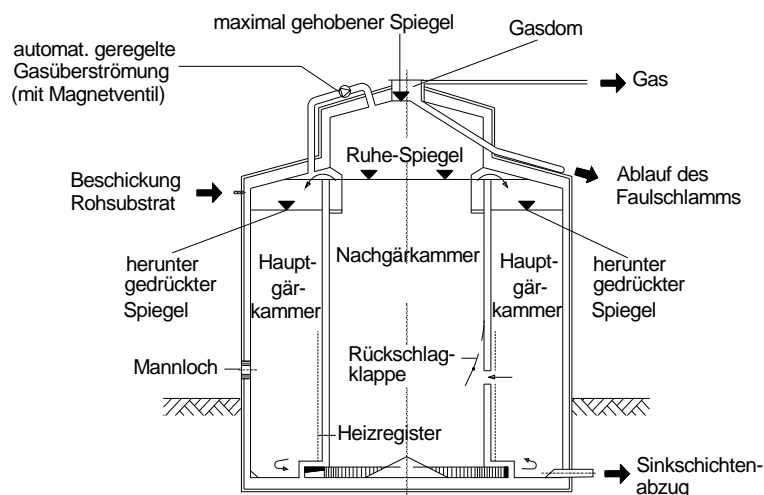


Abb. 52: Gasdruck-Mischverfahren

Das System besteht aus einer Hauptgärkammer im äußeren Bereich und einer Nachgärkammer im Kern eines Behälters. Durch die Kraft des komprimierten Gases wird das Substrat in der Hauptgärkammer nach unten gedrückt und hebt den Flüssigkeitsspiegel in der Nachgärkammer langsam an. Wird die Verbindung zum Gasspeicher wieder geöffnet, fließt die Gülle schlagartig zurück in die Hauptgärkammer, wodurch ein Durchmischungseffekt erzielt wird. Bei diesem Verfahren sind keine mechanischen Teile im Einsatz und es wird keine elektrische Energie für das Aufrühren benötigt. Nachteilig wirkt sich jedoch der aufgrund der relativ hohen auftretenden Drücke notwendige Bauaufwand für den Fermenter aus.

Bei *pneumatischen Rührwerken* wird das entstandene Biogas mit Hilfe eines Kompressors und mehrerer einzeln ansteuerbarer Abgänge des Gasrohrs von unten durch das Substrat gepresst. Das aufsteigende Gas bewirkt eine Durchmischung in vertikale Richtung. Da in horizontaler Richtung kaum ein Rühreffekt auftritt, kommt es nicht wie bei voll durchgemischten Fermentern zur Durchschleusung von nicht ausgegorenen Material. Insbesondere entsteht dieser Effekt beim Einbau von Zwischenwänden, die für ähnliche Strömungsverhältnisse sorgen, wie sie in liegenden Fermentern herrschen. Für zu Schwimmdecken neigende Substrate ist das System weniger geeignet, da diese nicht beseitigt werden können. Auch hier erhöht sich der Bauaufwand für den Behälter, da mit erhöhten Druckbelastungen zu rechnen ist.

1.5.3.9 Mess- und Regelungstechnik (MRT)

Angesichts zunehmender Anlagengrößen, der Vielfalt der eingesetzten Substrate sowie der großen wirtschaftlichen Bedeutung der Biogasproduktion als landwirtschaftlicher Produktionszweig steigen die Anforderungen an die Überwachung und Steuerung von Biogasanlagen. Damit wird eine Ausstattung der Anlagen mit Mess- und Regelungstechnik unerlässlich.

Dennoch gibt es seitens der Betreiber immer noch Vorbehalte, in entsprechende Komponenten zu investieren. Der finanzielle Schaden, der durch einen (Teil-)Absturz der Anlage aufgrund mangelhafter Überwachung entstehen kann, ist jedoch im allgemeinen wesentlich größer als die Kosten für eine messtechnische Grundausstattung. Eine Übersicht über notwendige und sinnvolle Messtechnik für Biogasanlagen gibt Tab. 21.

Tab. 21: Messtechnische Ausstattung von Biogasanlagen

Messgröße	Nutzen	Bewertung
Masse der Substrate	Abschätzung der zu erwartenden Biogasproduktionsrate, Abschätzung der Verweilzeit, Steuerung der Raumbelastung	wichtig
Durchfluss von flüssigen Substraten/Gärsuspension	Abschätzung der zu erwartenden Biogasproduktionsrate, Steuerung der Raumbelastung und von Rezirkulationsströmen	wichtig
Stromaufnahme der Rührwerke	Überwachung der Fermenterbelastung (TM-Gehalt)	optional
Betriebsstunden der Hauptaggregate	Abschätzung des Stromverbrauches	optional
Stromaufnahme der Biogasanlage	Ermittlung und Minimierung des Stromeigenbedarfes	wichtig
Heizwärmemengen	Ermittlung des Heizwärmebedarfes der Anlage bzw. der potentiell für andere Nutzungen verfügbaren Wärme	optional
Gasdruck im Fermenter	Regelung der Motorleistung, Überdrucksicherung	optional

Messgröße	Nutzen	Bewertung
Gasmenge	Überwachung der Prozessstabilität, Regelung der Beschickung, Abschätzung der Gasqualität	wichtig
Gastemperatur	gegebenenfalls Normierung der Gasmenge	optional
Gasdruck	gegebenenfalls Normierung der Gasmenge	optional
Methangehalt im Biogas	Überwachung der Prozessstabilität, Abschätzung des Motorwirkungsgrades (in Kombination mit Gasmenge und Stromproduktion)	wichtig
Schwefelwasserstoffgehalt im Biogas	Überwachung der Prozessstabilität, Regelung der Entschwefelung, Motorschutz	wichtig
Sauerstoffgehalt im Biogas	Regelung der Entschwefelung	wichtig
Wasserstoffgehalt im Biogas	Überwachung der Prozessstabilität, Regelung der Beschickung; eingeschränkt bei Lufteinblasung	ggf. optional
Kohlendioxidgehalt im Biogas	Überwachung der Prozessstabilität, Kontrollgröße für Messwertplausibilität	optional

Biogasanlagen werden heute meist mit mehr oder weniger umfangreichen Prozessleitsystemen ausgestattet, die neuerdings auch eine Überwachung der gesamten Anlage durch den Hersteller per Datenfernübertragung erlauben, wie dies bei den Blockheizkraftwerken schon längere Zeit zum Standard gehört. Die Ausführung der Leitsysteme im Hinblick auf die eingebundenen Komponenten sowie die Visualisierung und Aufzeichnung von Betriebsdaten ist von Hersteller zu Hersteller noch sehr unterschiedlich. Im Folgenden werden einzelne Messaufgaben und die verfügbare Technik diskutiert.

1.5.3.9.1 Menge der Substrate

Um die Faulraumbelastung einer Biogasanlage zu steuern, muss die eingetragene Substratmenge erfasst werden (vgl. Tab. 25). Die festen Substrate sollten hierfür vorzugsweise bei der Einbringung in die Eintragsvorrichtung bzw. in der Eintragsvorrichtung selbst gewogen werden. Eine nur volumetrische Erfassung der Menge fester Substrate ist ungenau und nur schwer mit Analysenwerten zu verknüpfen, da die Dichte des Materials im Silo bzw. bei der Beschickung normalerweise nicht bekannt ist. Notfalls kann eine stichprobenartige Verwiegung von Laderschaufeln erfolgen, die allerdings auch zu relativ großen Ungenauigkeiten führt.

Flüssige Substrate werden in ihrer Menge am genauesten über geeignete Durchflussmesser in der Pumpleitung zum Fermenter erfasst. Dies schließt auch Rezirkulationsströme mit ein. Die Abschätzung der Durchflussmenge über die Pumpenlaufzeit ist mit beträchtlichen Ungenauigkeiten verbunden. Bei Vorhandensein einer Vorgrube kann auch eine Volumenbestimmung über eine Füllstandsmessung erfolgen.

Tab. 22: Erfassung der Substratmenge

Messgröße	Messtechnik	Beurteilung
Masse fester Substrate	Wägung bei der Beschickung: Fuhrwerkswaage, Achslastwaage, dynamisches Wägesystem am Lader	gute Genauigkeit, aber etwas vergrößerter Arbeitsaufwand
	Wägezellen in der Eintragsvorrichtung	gute Genauigkeit; automatischer, massen-gesteuerter Eintrag möglich
Durchfluss flüssiger Substrate von der Vorgrube zum Fermenter	Magnetisch-induktiver Durchflussmesser. Der Durchfluss induziert dabei in einem Magnetfeld eine ihm proportionale messbare Spannung.	kostenintensives, aber sehr genaues und nahezu wartungsfreies Verfahren; Ungenauigkeiten bei Blasenbildung im Substratstrom
	Ermittlung über Pumpenlaufzeit und Nennfördermenge	kostengünstiges, aber auch ungenaues Verfahren, da die Fördermenge vom jeweiligen Medium sowie Pumpenverschleiß abhängt
Pegelmessung in der Vorgrube	Druckmessdose: Messung des hydrostatischen Druckes der Flüssigkeitssäule	relativ genaue und wartungsarme Methode
	Echolot	relativ genaue und wartungsarme Methode
	Schwimmer	eingeschränkte Genauigkeit bei Schwimmschichtenbildung, wartungsbedürftig

1.5.3.9.2 Gasmenge

Die produzierte und verwertete Gasmenge gibt Auskunft über die Stabilität und Effizienz des Gärprozesses und lässt Rückschlüsse auf die Gasqualität und den Wirkungsgrad des BHKW zu. Sie dient auch als Bemessungsgrundlage für die Menge der Lufteinblasung zur biologischen Entschwefelung. Aufgrund des Feuchtegehaltes und der korrosiven Eigenschaften stellt Biogas erhöhte Anforderungen an die verwendete Messtechnik (Tab. 26). In der Praxis haben sich strömungsmechanische Durchflussmesser sowie Massestrommesser bewährt, die ohne bewegte Teile arbeiten. Üblicherweise wird die verwertete Gasmenge in der Zuleitung zum BHKW erfasst. Die Messung ist hier durch den kleineren Leitungsquerschnitt und das höhere Druckniveau sowie die Tatsache, dass das Gas aufbereitet ist, erleichtert.

Erfolgt eine Volumenstrommessung, so ist zur Ermittlung des Normvolumens eine Kompensation der Temperatur (und evtl. des Druckes) am Messort erforderlich. Bei direkter Messung des Massestromes kann der Norm-Volumenstrom über die Normdichte des Biogases errechnet werden. Diese ist abhängig von der Biogaszusammensetzung.

Tab. 23: Erfassung der Gasmenge

Messgröße	Messtechnik	Beurteilung
Kumulatives Gasvolumen	Drehkolbengaszähler: Antrieb von Drehkolben durch Füllung/Entleerung von Kammern	für Biogas nur sehr bedingt geeignet; keine Ein- und Auslaufstrecke erforderlich
	Balgengaszähler: Mechanische Verformung von Kammermembranen	für Biogas nur sehr bedingt geeignet; keine Ein- und Auslaufstrecke erforderlich
	Turbinenradzähler: Messung der Strömungsgeschwindigkeit über Turbinenrad	für Biogas wegen Lagerkorrosion nicht geeignet bzw. sehr wartungsintensiv (Ölschmierung); Ein- und Auslaufstrecke erforderlich
Volumenstrom	Wirbelstromdurchflussmesser: Messung der Wirbelfrequenz hinter einem Staukörper (Kármánsche Wirbelstraße)	kostenintensiv; keine bewegten Teile, kein Verschleiß, wartungsfrei; hohe Genauigkeit; integrierte Temperaturkompensation möglich (evtl. auch Druck); lange Einlaufstrecke
	Dralldurchflussmesser: Frequenz der Rotationsbewegung nach einem turbinartigen Eintrittskörper	kostenintensiv; keine bewegten Teile, kein Verschleiß, wartungsfrei; hohe Genauigkeit, integrierte Temperaturkompensation möglich (evtl. auch Druck); relativ kurze Einlaufstrecke; Druckverlust
	Differenzdruck-Durchflussmesser: Druckdifferenz durch Änderung der Fließgeschwindigkeit an einem Staukörper (Energieerhaltung in geschlossenen Rohrleitungen)	relativ kostenintensiv; Druckverlust; keine bewegten Teile, wartungsarm
	Schwebekörper-Durchflussmesser: Messung der Höhenstellung eines vertikal beweglichen Schwebekörpers in einer durchströmten Messstrecke	Messergebnis dichteabhängig; wird üblicherweise nicht für Biogas, sondern für Messung der Luftzufuhr für Entschwefelung eingesetzt

Messgröße	Messtechnik	Beurteilung
Massestrom	Thermischer Massestrommesser: Messung der strömungsabhängigen Abkühlung eines beheizten Körpers (Heißfilm-Anemometer)	kostenintensiv; keine bewegten Teile, wartungsarm; hohe Genauigkeit; lange Einlaufstrecke
	Coriolis-Massestrommesser: Messung der durch die Coriolis-Kraft bedingten Frequenzänderung einer in Schwingung versetzten durchströmten Messstrecke	sehr kostenintensiv; sehr hohe Genauigkeit; keine Ein- und Auslaufstrecke erforderlich

1.5.3.9.3 Gasanalyse

Die Messung der Gaszusammensetzung gibt Auskunft über die Stabilität des Gärprozesses und ermöglicht in Kombination mit der Gasmengenerfassung die Beurteilung der Effizienz der Gasverwertung im BHKW. Wichtigste Messwerte sind dabei der Gehalt an Methan (CH₄), Schwefelwasserstoff (H₂S) und Sauerstoff (O₂). Der Methananteil im Biogas bestimmt dessen Energieinhalt und ist ein sehr guter Indikator für den Zustand des Gärprozesses. Die Messung des Schwefelwasserstoffgehaltes ist die Kontrollgröße für die Wirksamkeit des eingesetzten Entschwefelungsverfahrens und daher für den Schutz der das Biogas verwertenden Motoren sehr wichtig. Über den Sauerstoffgehalt wird die biologische Entschwefelung durch Luftzufuhr geregelt. Optional kann auch der Wasserstoffanteil (H₂) im Biogas gemessen werden, der einen guten Indikator für den Belastungsgrad der Fermenterbiologie darstellt. Allerdings wird dieser Messwert bei biologischer Entschwefelung durch Lufteinblasung verfälscht. Die Messung des Kohlendioxidanteils (CO₂) kann optional zur Plausibilitätsprüfung erfolgen.

Mittlerweile werden von mehreren Herstellern technisch ausgereifte Systeme für die Biogasanalyse angeboten. Zur Messung des Methan- und Kohlendioxidgehaltes werden Infrarot- oder Wärmeleitfähigkeitssensoren eingesetzt. Schwefelwasserstoff, Sauerstoff und Wasserstoff werden mit elektrochemischen Sensoren gemessen. Automatische Gasanalysensysteme sind zunächst relativ kostenintensiv, ermöglichen jedoch eine fortlaufende Kontrolle der Gasqualität und lassen sich gegebenenfalls in ein Prozessleitsystem einbinden.

1.5.3.9.4 Bestimmung des pH-Wertes

Der pH-Wert ist ein sehr einfacher Indikator für den Zustand des Gärprozesses. Bei pH-Werten < 6,5 besteht die Gefahr einer Versäuerung des Prozesses. Insbesondere in Gärgemischen mit hoher Pufferkapazität (Rindergülle als Substrat) erfolgt die Verschiebung des pH-Wertes jedoch mit deutlicher Verzögerung, so dass eine beginnende Versäuerung evtl. nicht rechtzeitig erkannt wird. Der pH-Wert allein ist daher kein geeigneter Parameter für die Überwachung der Prozessstabilität in landwirtschaftlichen Biogasanlagen.

Obwohl in der Abwasserreinigung Stand der Technik, ist es in Biogasanlagen bisher nicht üblich, den pH-Wert im Fermenter kontinuierlich zu messen, was nicht zuletzt an der für die Sensorik äußerst problematischen Zusammensetzung des Gärgemisches liegt. In der Praxis ist es im allgemeinen ausreichend, den pH-Wert regelmäßig in einer frisch gezogenen Probe mittels eines elektronischen Handgerätes oder pH-Teststreifen mit besonders guter Auflösung im neutralen Bereich zu bestimmen.

1.5.3.9.5 Temperaturregelung

Die Fermenter landwirtschaftlicher Biogasanlagen werden stets mit Warmwasser beheizt. Das Wasser des Heizkreislaufs wird dabei über Kühlwasser- und Abgaswärmetauscher des BHKW

erwärmt. Die Steuerung der Fermentertemperatur erfolgt zweckmäßigerweise mittels kostengünstigen Mess- und Regelsystemen aus dem Bereich der Haustechnik, die über eine ausreichende Regelgenauigkeit verfügen. Um einen Überblick über den Wärmeverbrauch der Anlage sowie die für andere Nutzungen zur Verfügung stehende Wärme zu bekommen, können Wärmemengenzähler in die entsprechenden Heizkreisläufe eingebaut werden.

1.5.3.9.6 Zündölverbrauch

Wird das Biogas in einem Motor verbrannt, der einer Stützfeuerung bedarf, so ist eine Mengenerfassung des verbrauchten Zündöls sinnvoll. Der Zündölverbrauch sollte aus Gründen des Umwelt- und Klimaschutzes möglichst niedrig gehalten werden. Das Zündöl ist für die partikulären Emissionen (Ruß) von Zündstrahl-BHKW verantwortlich, die bei der Verbrennung von reinem Biogas praktisch nicht auftreten. Der Zündölverbrauch sollte in Ergänzung zur Füllstandsanzeige am Zündöltank mit einem Heizöl-Durchflussmesser erfasst werden. (s. auch Kap. 2.2.2.2.6).

1.5.3.9.7 Stromproduktion und Stromverbrauch

Als das wertgebende Produkt des gesamten Prozesses muss der produzierte Strom gemessen werden. Dazu dienen herkömmliche Stromzähler mit ausreichender Dimensionierung, wie sie in der Haustechnik üblich sind. Üblicherweise wird lediglich die vom BHKW abgegebene sowie die ins öffentliche Netz eingespeiste Strommenge gemessen. Wird der für den Betrieb der Biogasanlage benötigte Strom aus dem öffentlichen Netz bezogen, so ist ein separater Zähler ausschließlich für den Verbrauch der Biogasanlage zweckmäßig, um den Stromeigenbedarf ermitteln zu können. In diesem Falle ergibt sich die Nettostromerzeugung aus der Stromabgabe ins Netz abzüglich des Stromeigenbedarfs der Biogasanlage.

Die Messung der Stromaufnahme erlaubt Rückschlüsse auf die Belastung der Rührwerke in Abhängigkeit vom Trockenmassegehalt des Gärgemisches. Diese Messeinrichtungen sind mittlerweile meist Bestandteil des Prozessleitsystems. Um teure Leistungsspitzen zu vermeiden, sollten die Laufzeiten der Hauptstromverbraucher der Anlage nach Möglichkeit aufeinander abgestimmt werden, d. h. beispielsweise zeitversetzter Betrieb der Rührwerke in verschiedenen Gärbehältern.

1.5.4 Gasführendes System

Das gasführende System von Biogasanlagen lässt sich vereinfacht in die Bereiche Gasableitung vom Fermenter, die Gasaufbereitung und die folgende Gasspeicherung einteilen (Abb. 53). Nach dem Gasspeicher folgen weitere Leitungen bis zur Gasnutzung.

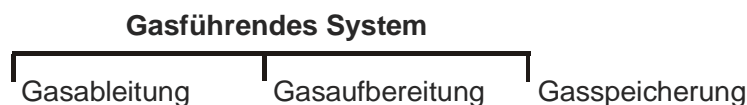


Abb. 53: Systematik des gasführenden Systems (ohne Gasnutzung)

1.5.4.1 Gasableitung

Zur Entwässerung des Biogases ist eine *Kondensatfalle* in einer frostfreien Zone zu installieren. Diese kann gleichzeitig als *Überdrucksicherung* eingesetzt werden, die dafür sorgt, dass der zulässige von der Art der Behälterabdeckung abhängige Fermenterinnendruck von 10 bis 20 mm WS (vgl. Abb. 54) nicht überschritten wird. Das vereinfachte Funktionsprinzip einer solchen Überdrucksicherung ist schematisch in Abb. 54 dargestellt.

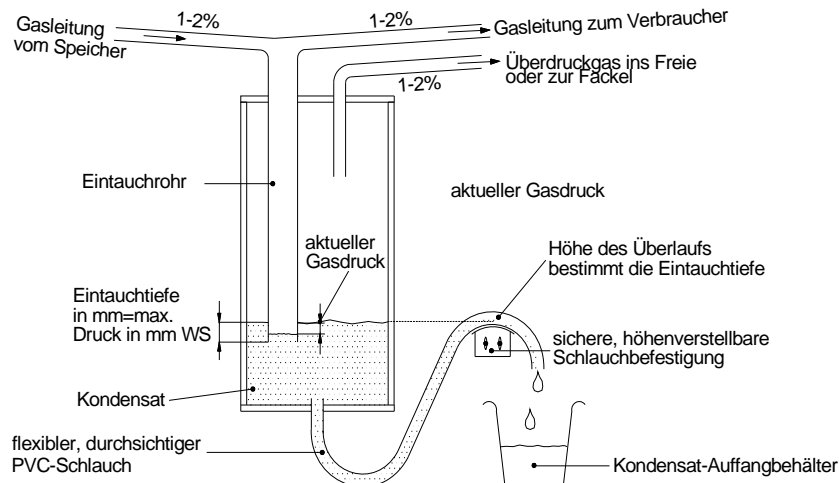


Abb. 54: Überdrucksicherung mit Kondensatfalle

Es ist darauf zu achten, dass der Überlauf, der die Eintauchtiefe des Gasrohrs in die Wasserwanne regelt sehr sorgfältig eingestellt wird, damit Schäden am Fermenter vermieden werden. Ferner muss der Pegelstand der Wasserwanne regelmäßig kontrolliert werden, da im Falle eines Absinkens ungewollt Gas entweichen kann. Alternativ kann auch ein mechanisches Überdruckventil zwischen Gasspeicher und Verbraucher installiert werden. Dieses ist regelmäßig auf seine Funktionstüchtigkeit hin zu überprüfen. Die Sicherheitsregeln für Biogasanlagen sind einzuhalten (s. Kap. 2.2.5).

1.5.4.2 Gasaufbereitung

Neben den Hauptbestandteilen Methan und Kohlendioxid enthält Biogas auch Spurengase (Tab. 7). Besonders relevant unter den Spurengasen ist der **Schwefelwasserstoff**. Die Konzentration von H_2S ist im Wesentlichen vom Substrat abhängig und variiert im Bereich von 0,02 bis 0,5 Vol %. In extremen Einzelfällen können Konzentrationen von bis zu 1,5 % auftreten. Schwefelwasserstoff ist ein farbloses Gas, das sowohl für Mensch und Umwelt, als auch in Verbrennungsmotoren negative Auswirkungen verursacht.

Auf den Menschen wirkt H_2S stark toxisch. Es greift die Schleimhäute der Augen und der Atemwege an. Bei Konzentrationen ab 150 ppm fällt der Geruchssinn aus, bei 250 ppm können sich bereits Lungenödeme bilden und ab Konzentrationen um 1000 ppm wirkt es in kürzester Zeit tödlich.

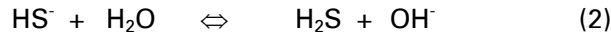
Auf Verbrennungsmotoren und andere bauliche Einrichtungen wirkt H_2S stark korrosiv.

1.5.4.3 Bildung von Schwefelwasserstoff

Schwefelwasserstoff entsteht bei anaeroben Abbauprozessen im Gär- bzw. Faulbehälter. Es werden zwei Hauptbildungsarten unterschieden, die assimilatorische Sulfatreduktion und die mikrobiologische Desulfurikation. Bei der assimilatorischen Sulfatreduktion wird das Sulfat von autotrophen Bakterien und Pflanzen aufgenommen und in Form von organischen Schwefelverbindungen, z.B. Aminosäuren (Cystein, Cystin, Methionin) gebunden. Diese werden bei der *Desulfuration* durch hydrolisierende und fermentative Bakterien abgebaut. Dabei entstehen unter anaeroben Bedingungen Sulfide.

Die zweite Art der Schwefelwasserstoffbildung beruht auf der Fähigkeit obligat anaerober Bakterien (Desulfurikanten), Sulfat zu Sulfid zu reduzieren. Als Wasserstoffdonatoren dienen hierbei Acetat, höhere Fettsäuren, Alkohole und Wasserstoff. Das Hauptprodukt der *Desulfurikation* ist ebenfalls Sulfid.

Sulfide stellen die Vorstufe für die Bildung von Schwefelwasserstoff dar. Sie liegen in der Flüssigphase in dissoziierter ionischer Form vor. Sulfidionen (S^{2-}) stehen im Gleichgewicht mit Hydrogensulfidionen (HS^-) und über diese mit undissoziiertem Schwefelwasserstoff:



Wie die Gleichungen (1) und (2) deutlich machen, nehmen die Bildung und damit auch der Übergang des undissoziierten Schwefelwasserstoffs in die Gasphase mit sinkendem pH-Wert zu. Die Freisetzung von H_2S aus der Flüssigphase nimmt aufgrund einer verringerten Löslichkeit auch mit steigender Temperatur zu.

In der Praxis unterliegt die Löslichkeit des H_2S allerdings noch anderen Einflüssen. Im Faulraum des Fermenters wird der Austritt von H_2S aus dem Faulschlamm durch Schlammpartikel und deren höhere Viskosität gegenüber Reinwasser erschwert. Weiterhin werden neben dem H_2S auch weitere Gase (CH_4 , CO_2) aus dem Faulschlamm freigesetzt, welche ebenfalls den Übergang des H_2S in die Gasphase behindern (RIES, 1993).

1.5.4.4 Verfahren zur Entschwefelung von Biogas

Grundsätzlich wird zwischen chemisch-physikalischen, biologischen und kombinierten Verfahren unterschieden (Abb. 55).

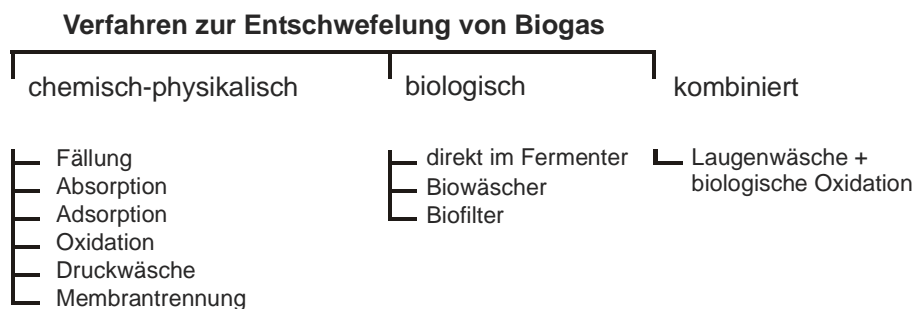


Abb. 55: Verfahren zur Entschwefelung

In der Praxis wird in Bayern zu 99% das biologische Verfahren direkt im Fermenter eingesetzt (GRONAUER ET AL., 2003). Näheres zu den alternativen Verfahren findet sich bei SCHNEIDER ET AL., 2002.

1.5.4.4.1 Biologische Verfahren

Die biologische Entschwefelung erfolgt durch Mikroorganismen (farblose Schwefelbakterien genannt), welche H_2S in ihrem Stoffwechsel als Energiequelle verbrauchen und dabei elementaren Schwefel bzw. Sulfat produzieren. Sie sind bereits im Gärsubstrat vorhanden, der benötigte Sauerstoff muss dem Prozess jedoch zugeführt werden. Bei der direkten Entschwefelung im Gasraum des Fermenters richtet sich die erforderliche Sauerstoffmenge, durch die Stöchiometrie der Abbaureaktionen vorgegeben, nach der Gasproduktionsrate und der H_2S -Konzentration. In der Praxis wurde ein Zuluftbedarf von 3 bis zu 5 % der Gasproduktionsrate

ermittelt. Entscheidend für die Effizienz der Entschwefelung direkt im Gasraum ist eine ausreichend große Besiedlungsfläche für die Bakterien, um auch den „Durchbruch von Schwefelspitzen“ im Biogas ausschließen zu können. Diese Siedlungsfläche sollte mit Gülle bzw. Gärwasser benetzt sein, um die Versorgung der Bakterien mit Nährstoffen und Wasser zu gewährleisten. Aus dem praktischen Betrieb ergibt sich, dass bei 20°C mit einer Siedlungsfläche von 1 m² etwa 20 m³ Biogas je Tag entschwefelt werden können. Der optimale Temperaturbereich liegt bei 35°C (KÖBERLE, 1999). Unter optimalen Bedingungen kann eine Entschwefelungsrate von 95 % erzielt werden (SCHULZ, 1996). Die Investitions- und Betriebskosten des Verfahrens sind sehr niedrig. Das biologische Entschwefelungsverfahren direkt im Gasraum des Gärbehälters kann nur dann zuverlässig arbeiten, wenn es optimal betrieben und überwacht wird. Insbesondere schwankende Biogasmengen und Gaskonzentrationen wirken sich negativ auf die Abbauleistung aus, da die Zudosierung der Luft meist nicht geregelt wird.

Bei der Entschwefelung von Biogas in nachgeschalteten Biowäschern bzw. Filtern erfolgen die gleichen mikrobiologischen und chemisch-physikalischen Abbauprozesse. Der wesentliche Unterschied besteht in der räumlichen Trennung von Biogasproduktion und Entschwefelung. Letztere findet in einem separaten Reaktor statt, der i.d.R. zwischen Gärbehälter und Gasspeicher angeordnet wird.

Bei der Entschwefelung in Biowäschern bzw. -filtern besiedeln die Mikroorganismen Trägermaterialien, die so genannten Füllkörper, und bilden an den Oberflächen Biofilme. Das zu reinigende Biogas durchströmt den Filter von unten nach oben, wobei H₂S im Biofilm absorbiert wird und für die Bakterien verfügbar wird. Den typischen Aufbau eines Biowäschers bzw. Filters zur biologischen Entschwefelung zeigt Abb. 56:

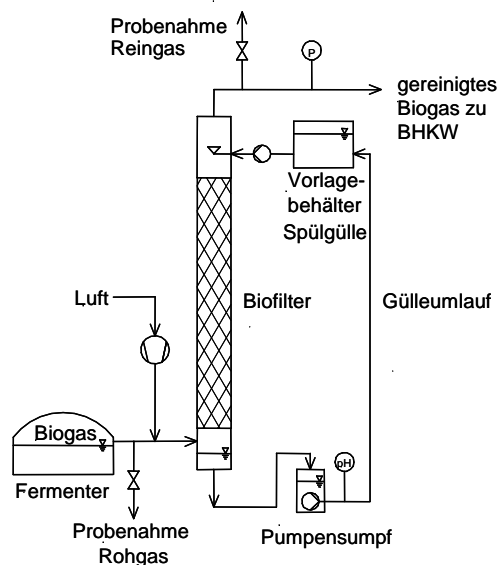


Abb. 56: Verfahrensschema eines biologischen Wäschers zur Entschwefelung von Biogas (SCHNEIDER ET AL., 2002)

Die Spülflüssigkeit, die einerseits die Mikroorganismen mit Nährstoffen versorgt und andererseits den gebildeten elementaren Schwefel aus der Kolonne spült, wird im Kreislauf über einen Vorlagebehälter gepumpt. Über eine Zeitschaltuhr können unterschiedliche Spülintervalle eingestellt werden (SCHNEIDER ET AL., 2002).

Im Laufe der Zeit muss die Spülflüssigkeit (Gemisch aus Gülle und Natronlauge zur pH-Stabilisierung) erneuert werden, um den gebildeten elementaren Schwefel aus dem System auszutragen; sie kann als schwefelhaltiger Dünger verwertet werden. Auch dieses Verfahren

hat in ähnlicher Weise wie die direkte Entschwefelung im Fermenter gezeigt, dass Schwankungen der Gasproduktionsrate sowie Schwankungen des H₂S-Gehaltes im Biogas unterschiedliche Abscheiderarten verursachen. Mit Biowäschern bzw. -filtern können bei entsprechender Auslegung Schwefelwasserstoffkonzentrationen im Reingas von weniger als 200 ppm erreicht werden. Diese Art der Entschwefelung stellt jedoch ein kostenträchtigeres Verfahren, das sich daher insbesondere für größere Biogasanlagen eignet. Auf Grund seiner Entkoppelung vom Fermenter kann es universell eingesetzt werden.

1.5.4.5 Gasspeicherung

Der Gasspeicher dient als Pufferorgan zwischen Gaserzeugung und -verwertung. Je besser die Abstimmung zwischen diesen beiden Komponenten ist, um so kleiner kann der Gasspeicher gewählt werden. Je nach Druckstufe wird in Nieder-, Mittel- und Hochdruckverdichtung unterschieden, wobei derzeit, bei fast ausschließlicher Verstromung des Biogases, nahezu überall die erste Variante Verwendung findet. Die Mittel- und Hochdruckverdichtung könnte an Bedeutung gewinnen, wenn weitere Formen der Gasverwertung, wie z. B. die Gaseinspeicherung in das Erdgasnetz oder die Gasnutzung für Fahrzeugantriebe, wirtschaftlich interessant werden.

Tab. 24: Typische Ausführungen, Größen und Druckstufen für Gasspeicher an Biogasanlagen (SCHULZ UND EDER, 2001)

Druckstufe	Betriebsdruck			übliche Größe m ³	Ausführung
	mbar	mm WS	bar		
Niederdruck	20-50 0,05-0,5	200-500 0,5-5	-	5 – 200 10 - 2000	Wassertassengasometer Folienhaube, -speicher
Mitteldruck			5-20	1 - 100	Stahldruckbehälter
Hochdruck			200-300	0,1 – 0,5	Stahlflaschen

Die Fassungskapazität der Biogasspeicher sollte je nach Anlagengröße mindestens 20 bis 50 % (SCHULZ UND EDER, 2001) der täglich erzeugten Biogasmenge betragen. Durch die Auslegung und die Betriebsweise des BHKW (Volllast/Teillast), kann unter bestimmten Voraussetzungen diese Lagerkapazität unterschritten werden. Wenn die Verwertung des erzeugten Biogases nur zu Spitzenzeiten erfolgt, sind entsprechend größere Gasspeicher zu installieren.

In der Praxis werden vorwiegend Gasspeicher aus entsprechenden, gewebeverstärkten Kunststoffplanen verwendet. Hierbei kann die Speicherung entweder in den Fermenter integriert oder separat erfolgen. Außerdem kann die Gaslagerung in Fermentern mit Betondecke erfolgen. Jedoch sind hier hohe Anforderungen an die Qualität und die Verarbeitung des Betons zu stellen. Auf Grund der niedrigen auftretenden Drücke im Gaslager ist zur Verstromung mit Gasmotoren der Einsatz von Verdichtern erforderlich, Zündstrahlmotoren sind dagegen selbstansaugend.

Die Gasspeicherung und die an sie gestellten Anforderungen sind in den Sicherheitsregeln für Biogasanlagen der landwirtschaftlichen Berufsgenossenschaften ausführlich beschrieben (s. Kap. 2.2.5).

1.5.4.5.1 Gasspeicherausführungen

Interne Gasspeicher: In vielen Fällen erfolgt die Gasspeicherung direkt in den entsprechenden Fermentern, so dass ein zusätzlicher Gasspeicher nicht erforderlich ist. Bei Speicher-/Durchflussanlagen kann hierbei der variable Fermenter- bzw. Nachgärraum als Gaslager dienen, wobei auch Fermenter mit **Betondecken** einbezogen werden können.

Verstärkt kommen Biogasanlagen mit entsprechenden Folienbedachungen zum Einsatz, wobei zum einen auf die relativ teure Betondecke verzichtet werden kann und zum anderen ein entsprechend hohes Gaslagervolumen ermöglicht wird. Bei den Folienabdeckungen kommen folgende Varianten zum Einsatz:

Folienhaube: Bei dieser Form der Abdeckung wird der Fermenter mit einer Holzkonstruktion abgedeckt, einer Isolierung versehen und eine Folie gasdicht aufgebracht. Der gasdichte Abschluss der Folie zum Fermenterrand erfolgt i.d.R. mit einem sogenannten Seeger-Verschluss. Dabei wird in den oberen Fermenterrand eine entsprechende U-Schiene eingegossen und hier die Folie mit einem mit Luft oder Wasser gefüllten Schlauch eingepresst. Die Folienhaube dient als Gaslager und Witterungsschutz (Abb. 57).

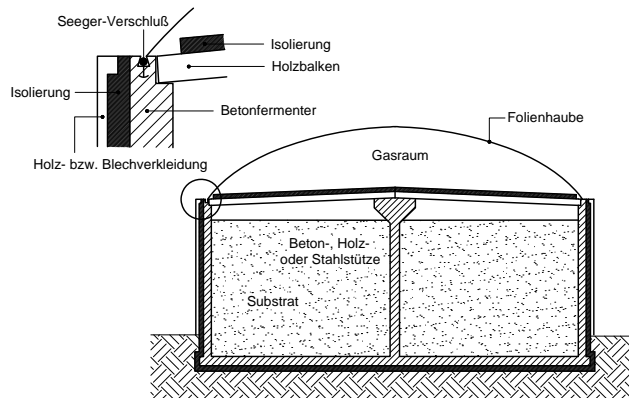


Abb. 57: Folienhaubengasspeicher mit Seegerverschluss

Foliendach: Das Foliendach wird im Gegensatz zur freitragenden Folienhaube mit einer Mittelstütze getragen. Diese kann als Teleskopstütze ausgeführt und dadurch in der Höhe variierbar sein. Die Anbringung der Folie erfolgt über eine Spezialhalterung. Das Foliendach kann ein- oder zweischalig eingesetzt werden. Durch die Verwendung einer Mittelstütze sind derartige Foliendächer auch für sehr große Spannweiten geeignet (Abb. 58).

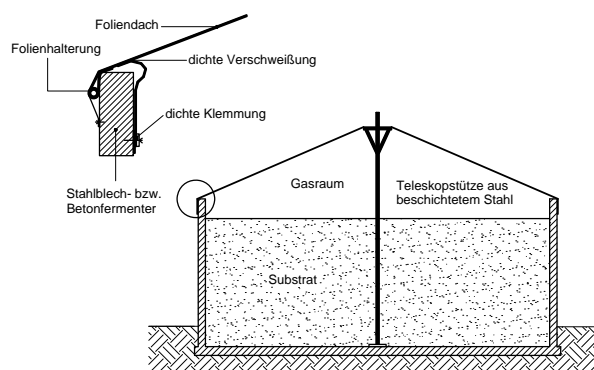


Abb. 58: Foliendachspeicher mit Teleskopstütze

Tragluftdach: Eine weitere Variante ist das Tragluftdach. Hierbei handelt es sich um zwei Folien, die über den Fermenter aufgebracht werden. Dabei ist die innere Folie die Gasmembrane und die äußere die Schutzfolie. Zwischen beiden Folien wird mit einem Gebläse Stützluft ein-geblasen. Das Absinken der Gasmembrane auf den Substratspiegel wird durch eine Mittelstütze oder ein Schnurgerüst verhindert (Abb. 59).

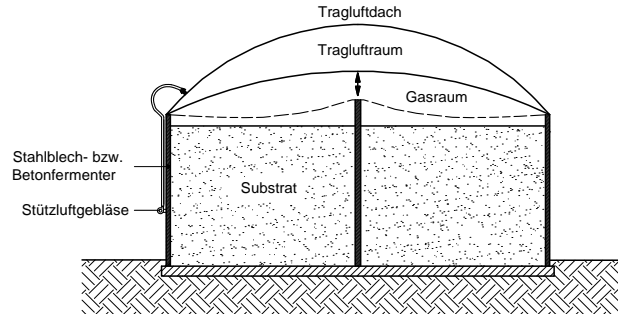


Abb. 59: Tragluftdachgasspeicher mit Stützgebläse

Gesonderte Foliengasspeicher: Eine weitere Möglichkeit der Gaslagerung ist die Verwendung von externen Foliengasspeichern. Sie werden vor allem dort angewendet, wo keine Möglichkeit der Gaslagerung im Fermenter gegeben ist (wie z.B. bei liegenden Fermentern mit Gas-dom ohne Nachgärer). Externe Foliengasspeicher sind entweder eingehaust oder werden im Freien entsprechend verspannt und geschützt aufgestellt.

1.5.5 Gasnutzung

Die energetische Nutzung des produzierten Biogases kann in unterschiedlicher Weise erfolgen. In den meisten Fällen wird das produzierte Gas verstromt und ins Netz eingespeist, um einen monetären Ertrag zu erwirtschaften. Der Eigenstrombedarf der Biogasanlage kann entweder aus dem Stromnetz oder direkt vom BHKW gedeckt werden.

Ein Teil der Abwärme des Verstromungsaggregates wird zur Aufrechterhaltung des Abbauprozesses verwendet. Der überwiegende Teil der erzeugten Wärme steht jedoch für eine anderweitige Nutzung zur Verfügung.

Technische Entwicklungen bei der Aufbereitung des Biogases ermöglichen heutzutage auch eine Einspeisung des produzierten Biogases in bestehende Gasnetze. Einen systematischen Überblick gibt Abb. 60.

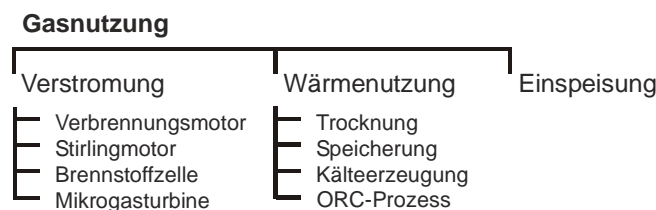


Abb. 60: Systematik der Gasnutzungsmöglichkeiten

1.5.5.1 Verstromung

Für die Stromgewinnung aus Biogas stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung. Die gebräuchlichste Art der Stromproduktion besteht aus der Verbrennung des Biogases in einem Gas-Otto- oder Zündstrahlmotor, an den ein Generator zur Stromerzeugung gekoppelt ist. Der so produzierte Strom wird überwiegend ins öffentliche Stromversorgungsnetz eingespeist

und nach dem Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (EEG) vergütet. In neuerer Zeit wird auch vermehrt versucht, zur Stromerzeugung Brennstoffzellen und Mikrogasturbinen zu verwenden. Sie bieten einige Vorteile, sind jedoch aufgrund des geringen Entwicklungsstandes auf dem Markt noch nicht konkurrenzfähig.

1.5.5.1.1 Verbrennungsmotoren

Es gibt verschiedene BHKW Motorbauarten und Verbrennungsverfahren (s. Tab. 25). Bei den Benzinmotoren handelt es sich um PKW-Motoren, die auf einen Gasbetrieb umgerüstet werden. Sie werden in der Regel aufgrund ihrer geringen Leistung bei relativ kleinen Biogasanlagen eingesetzt. Durch ihre hohe Drehzahl (ca. 3000 U min⁻¹) werden sie auch als „Schnellläufer“ bezeichnet.

Bei größeren Biogasanlagen kommen vorwiegend Dieselaggregate zum Einsatz. Hierbei handelt es sich entweder um umgerüstete Dieselmotoren auf Gas-Otto-Betrieb (Gasmotor), die einen Gasmischer und eine Fremdzündung erfordern, oder um Seriedieselmotoren (Zündstrahlmotoren), bei denen dem verdichteten Gasgemisch über Einspritzdüsen geringe Mengen an Zündöl zugemischt werden.

Die Zündung des Gasgemisches erfolgt durch Verdichtung. Grundgerüst dieser BHKW sind Serienmodelle verschiedener Motorenhersteller, die von den BHKW-Herstellern für den Betrieb an Biogasanlagen modifiziert werden.

Tab. 25: Merkmale verschiedener Motoren und Verbrennungsverfahren für Biogas (verändert nach SCHULZ U. WINKLER, 1998)

Merkmal	Motorbauart und Verbrennungsverfahren		
	Benzinmotor Gas-Otto-Verfahren	Gasmotor Gas-Otto-Verfahren	Dieselmotor Zündstrahlverfahren
Preis	niedrig	sehr hoch	hoch
Wirkungsgrad	20-25 %	30-40 %	33-42 %
Lebensdauer	niedrig	mittel-hoch	mittel
Geräusch	mittel	stark	mittel
Ruß im Abgas	nicht vorhanden	nicht vorhanden	vorhanden
Wartung	hoch	gering	mittel
Zündölverbrauch	nicht vorhanden	nicht vorhanden	> 3 %
Ersatzkraftstoff bei Biogasausfall	Flüssiggas (Benzin)	Flüssiggas (Propan / Butan)	Heizöl, Dieselöl, (Pflanzenöl)

Der Vorteil des Zündstrahl-BHKW im Leistungsbereich von 30 kW bis 300 kW gegenüber dem Gasmotor-BHKW liegt im geringeren Preis und höheren elektrischen Wirkungsgraden. Außerdem kann bei Ausfall der Gasproduktion der Betrieb kurzfristig mit Heizöl weitergeführt werden. Der Gasmotor hat gegenüber dem Zündstrahlmotor einen höheren thermischen und damit auch einen höheren Gesamtwirkungsgrad und weist zudem längere Standzeiten auf (Abb. 61).

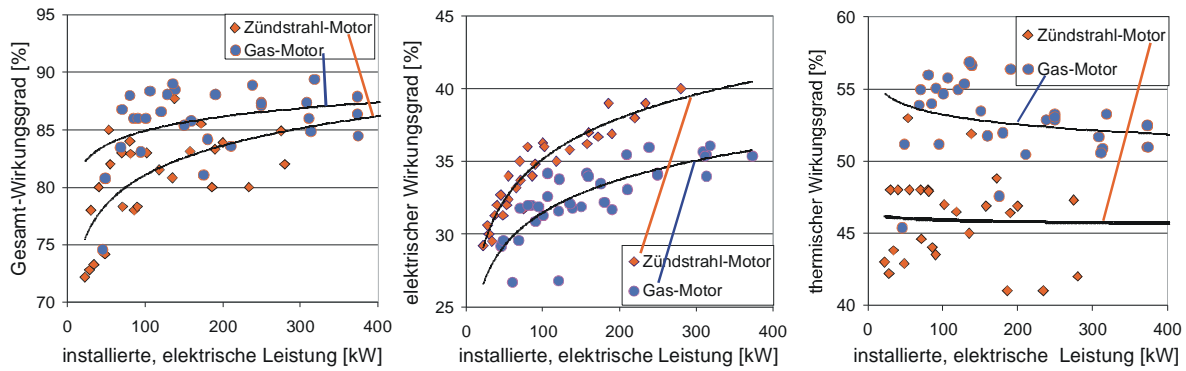
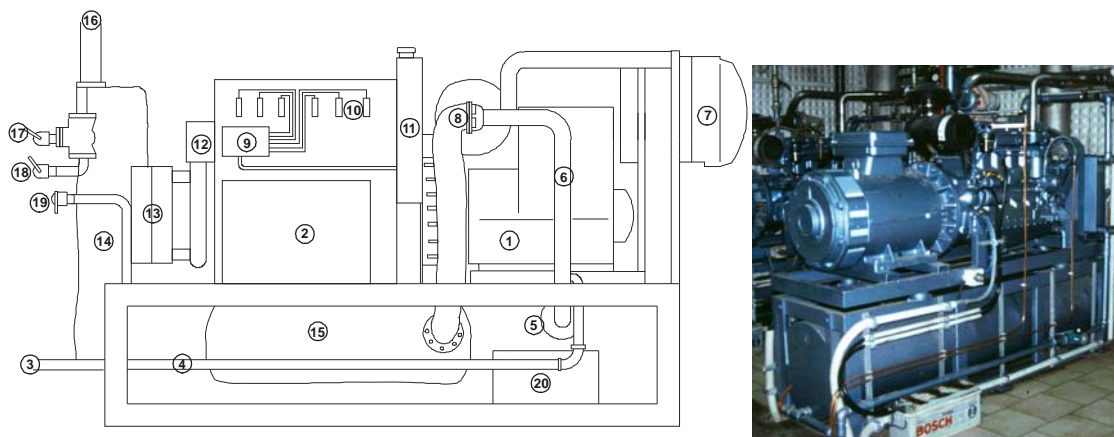


Abb. 61: Vergleich der Wirkungsgrade von Zündstrahl- und Gas-Ottomotoren (Prospektangaben, MITTERLEITNER, 2002)

Welcher BHKW-Typ für welche Anlage die richtige Wahl ist, hängt von den gegebenen Faktoren vor Ort ab und muss im Einzelfall entschieden werden.

Der in Abb. 62 abgebildete Zündstrahlmotor zeigt beispielhaft den grundsätzlichen Aufbau von biogasbetriebenen Blockheizkraftwerken.



1 Generator, 2 Motor, 3 Gasanschluss, 4 Gasregelstrecke, 5 Luftfilter, 6 Venturirohr, 7 Ladeluftkühler, 8 Turbolader, 9 Einspritzpumpe, 10 Zylinder, 11 Ölvorratsbehälter, 12 Wasserpumpe, 13 Plattenwärmetauscher, 14 Abgaswärmetauscher, 15 Abgaswärmetauscher, 16 Abgasrohr, 17 Leitung Notkühler, 18 RL-Heizung, 19 VL-Heizung, 20 Batterie

Abb. 62: Prinzipieller Aufbau eines 6 Zylinder-Zündstrahlmotors

Für eine Verbrennung im BHKW muss das Gas bestimmte Anforderungen erfüllen (Tab. 26). Im allgemeinen können diese Mindestanforderungen eingehalten werden. Um jedoch die Lebensdauer des BHKW nicht zu verkürzen, sollte der H₂S-Gehalt im Biogas die Werte von 150 bis 200 ppm nicht überschreiten. Weitere problematische Gasbestandteile entstehen vor allem bei der Kofermentation von industriellen Biomassen. Hier können Siloxane und Phosphorverbindungen zu Problemen im Motorraum und im Abgas führen (HERDIN, 2002).

Die für den Verbrennungsvorgang nötige Luftzufuhr wird über den Lambda-Wert (λ -Wert) eingestellt. Der Wert für eine stöchiometrische Verbrennung liegt bei $\lambda = 1$, d.h. es wird genau soviel Sauerstoff zugegeben, wie für die vollständige Oxidation des Brennstoffes benötigt wird. Bei der Verbrennung von Biogas ist der Betrieb mit einem λ von 1 nicht möglich, da in diesem Bereich die Emissionswerte für NO_x und CO zu hoch liegen würden.

Tab. 26: Mindesteigenschaften von Brenngasen für Gasmotoren (PRESCHNER, GOLISCH U. WICHMANN, 2000)

Eigenschaften	Einheit
Unterer Heizwert	> 4 kWh / m ³ _n
Methangehalt	> 40 Vol.-%
Gesamtschwefel	< 2.300 mg / m ³ _n CH ₄
Chlor	< 100 mg / m ³ _n CH ₄
Fluor	< 50 mg / m ³ _n CH ₄
Summe Chlor und Fluor	< 100 mg / m ³ _n CH ₄
Silizium	< 10 mg / m ³ _n CH ₄
Feststoffanteil (Teilgröße < 1 µm)	< 30 mg / m ³ _n CH ₄
Schwefelwasserstoff	< 0,15 Vol.-%

Eine Abgasnachbehandlung mit Oxidationskatalysator ist im Bezug auf CO-Emissionen zwar möglich, aber aufgrund fehlender Langzeituntersuchungen technisch noch nicht ausgereift. Das haben Untersuchungen des Bayerischen Landesamt für Umwelt (SKLORZ ET AL., 2004) gezeigt. Deshalb werden Biogas-BHKW im Einstellungsbereich des „Magermotors“ betrieben, um die Emissionswerte von NO_x und CO möglichst gering zu halten (Abb. 63).

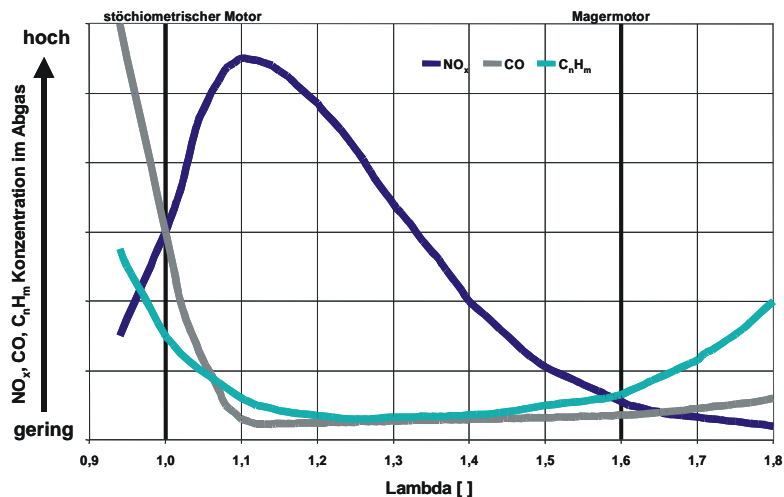


Abb. 63: Verlauf der Emissionsraten in Abhängigkeit des Lambda-Wertes (HERDIN, 2002)

Eine Verschiebung der Verbrennung im mageren Bereich ist allerdings mit Leistungsverlusten verbunden, da durch den höheren Luftanteil im Gemisch dem Motor weniger Energie für die Verbrennung zur Verfügung steht. Eine Erhöhung der Energiedichte wird durch die Komprimierung und Kühlung des Gemisches unter Verwendung eines Abgasturboladers mit Ladeluftkühlung erreicht. Um jedoch über die gesamte Standzeit des BHKW die vorgeschriebenen Abgaswerte einhalten zu können, ist eine wiederkehrende Kontrolle der Abgaswerte bei der Wartung und Einstellung des Motors erforderlich (siehe Kap. 1.6).

Zur Stromproduktion sind zwei Arten von Generatoren, der Synchrongenerator und der Asynchrongenerator, zu unterscheiden. Der Synchrongenerator benötigt eine Gleichstromquelle für die Erregung, d.h. er kann auch eingesetzt werden, wenn kein Festnetzanschluss vorhanden ist und die Stromversorgung alleine vom BHKW geleistet wird (Inselbetrieb). Eine Synchronisierereinrichtung passt Frequenz und Phase an das Stromversorgungsnetz an.

Beim Asynchrongenerator übernimmt das Stromnetz die Frequenzführung, damit der erzeugte Strom mit Frequenz und Phase übereinstimmt. Dieses System ist einfacher und kostengünstiger als der Synchrongenerator, besitzt aber einen etwas geringeren Wirkungsgrad (GÜTLING U. KAMM, 2001). Die Netzanbindung erfolgt bis 1 MW über das Niederspannungsnetz.

1.5.5.1.2 Stirlingmotor

Bereits vor über 150 Jahren entwickelte Dr. Robert Stirling (1790 – 1878) diesen Motortyp. Aufgrund seiner schweren Bauweise konnte er sich jedoch nicht auf dem Kraftfahrzeugmarkt durchsetzen und wurde deshalb kaum weiterentwickelt. Der Stirlingmotor zählt nicht zu den klassischen Verbrennungsmotoren, da die Verbrennung außerhalb des Motors stattfindet. Es handelt sich hier um eine so genannte „kalte Verbrennung“.

Er besitzt jedoch einige Vorteile gegenüber herkömmlichen Otto- und Dieselmotoren die ihn gerade für den Einsatz als stationäres BHKW interessant machen (GÜTLING U. KAMM, 2001).

Funktionsprinzip

Der Stirlingmotor arbeitet ohne direkte Verbrennung im Motorraum, sondern durch stetige Erhitzung und Abkühlung eines Gases. Durch die Erhitzung des Expansionskolbens dehnt sich das darin enthaltene Gas (meist Helium) aus und es entsteht ein Überdruck, der den Kolben nach unten drückt. Nach einer Viertel Drehung wird über die Pleuelwelle auch der Kompressionskolben mit nach oben gedrückt. Das Gas gelangt über den Erhitzer und Regenerator in den Kompressionszylinder und wird dort gekühlt.

Durch die Abkühlung entsteht ein Unterdruck, der den Expansionskolben wieder nach oben zieht. Im Regenerator, der aus einem dichten Drahtgeflecht besteht, wird jeweils ein Teil der Wärme bzw. Kälte des Gases gespeichert, um einem erhöhten Wärmeverlust entgegenzuwirken (Abb. 64). Für einen gleichmäßigen Motorlauf benötigt der Stirlingmotor eine Schwungradscheibe, um einen toten Punkt im Prozessablauf zu überbrücken. Der Wirkungsgrad neuerer Motoren beläuft sich auf ca. 28 %.

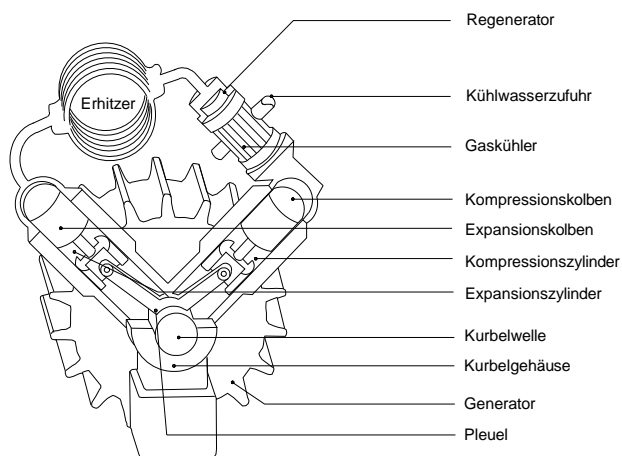


Abb. 64: Funktionsschema eines Stirlingmotors (Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V.; ASUE, 2001)

Der Stirlingmotor ist sehr wartungsarm, da keine Verbrennung im Motorinneren stattfindet und damit auch kein Ölwechselbedarf besteht (Wartungsintervalle von 5.000 bis 8.000 h) (GÜTLING U. KAMM, 2001; ASUE, 2001), sehr geräuscharm im Betrieb, und sehr gering in der Emissivität (um das 10-fache niedriger als bei Gas-Otto-Motoren).

Die Entwicklung dieser Motoren im Biogasbetrieb ist noch im Versuchsstadium (für Erdgasbetrieb). Die Bandbreite der angebotenen Aggregate ist insgesamt noch sehr eingeschränkt und bewegt sich zwischen 2 kW_{el} und 50 kW_{el}.

1.5.5.1.3 Brennstoffzelle

In den letzten Jahren hat die Brennstoffzellentechnologie einen erheblichen Entwicklungs- und Innovationsschub erfahren. Vor allem der Einsatz von Brennstoffzellen (BZ) in BHKW wird in zunehmenden Maße interessant, da die BZ gegenüber herkömmlichen Verbrennungsmotoren einige Vorteile besitzt (GÜTLING U. KAMM, 2001), wie einen wesentlich höheren elektrischen Wirkungsgrad (ca. 50 %), kaum Wirkungsgradverluste bei Teillastbetrieb, wartungs- und geräuscharme Betriebsweise und 3- bis 150-fach niedrigere Emissionen als bei Verbrennungsmotoren.

Nachteile, wie die Anfälligkeit auf korrosive Bestandteile (keine stabilen Elektroden) und der hohe Investitionsbedarf (Elektrodenmaterialien) sind dafür verantwortlich, dass sich die Brennstoffzellentechnologie beim Einsatz in der Biogastechnik noch nicht durchsetzen konnte.

Funktionsprinzip

Die Funktionsweise der BZ unterscheidet sich grundlegend von der oben beschriebenen thermischen Verbrennung. Bei herkömmlichen BHKW wird der Brennstoff zunächst durch die Verbrennung in Energie umgesetzt. Diese Energie wird durch den Motor in mechanische Energie verwandelt, die wiederum mit Hilfe eines Generators elektrische Energie erzeugt. Die BZ ermöglicht die Erzeugung elektrischer Energie direkt aus der gebundenen chemischen Energie, ohne den Umweg über die thermische und mechanische Energie. Daraus resultiert ein wesentlich höherer elektrischer Wirkungsgrad als bei herkömmlichen BHKW (s. Abb. 65).

Die BZ besteht aus den Elektroden Kathode und Anode und dem Elektrolyt, der die beiden Elektroden voneinander trennt. An der Anode wird der Wasserstoff (H₂) zu Wasserstoff-Ionen (H⁺-Ionen) oxidiert. Die dabei freiwerdenden Elektronen (e⁻) wandern über einen externen Leiterkreislauf zur Kathode. Dort wird der Sauerstoff (O₂) zu Sauerstoff-Ionen (O²⁻-Ionen) reduziert. Durch die Wanderung der H⁺-Ionen oder der O²⁻-Ionen durch den Elektrolyt wird der Stromkreis geschlossen. Als Endprodukt entsteht Wasser (H₂O). Ob das Wasser auf der Seite der Kathode oder der Anode entsteht hängt vom Elektrolyten ab (ASUE, 2001).

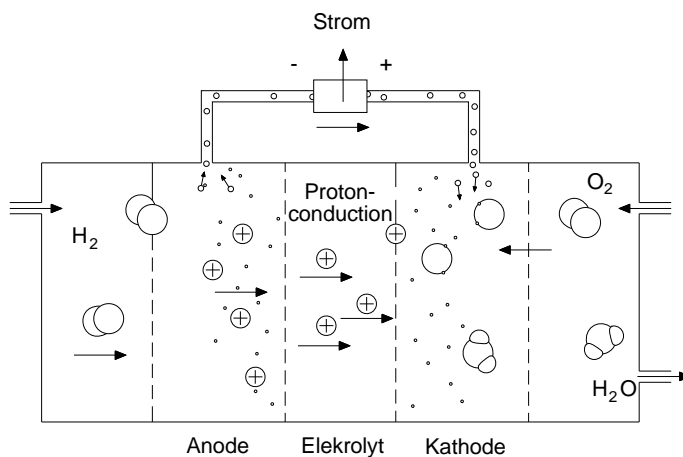


Abb. 65: Funktionsprinzip der Brennstoffzelle (Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V.; ASUE, 2001)

Der für den Betrieb der BZ nötige Wasserstoff wird in einem Reformer durch die katalytische Umsetzung methanreichen Gases mit Wasserdampf gewonnen (Dampfpreformation).

Das dabei entstandene Kohlenmonoxid wird zusätzlich durch Wasser zu Kohlendioxid und Wasserstoff oxidiert. Vor allem Schwefelwasserstoff (H_2S) kann hierbei korrosive Schäden im Reformier verursachen und muss daher vorher entfernt werden.

Brennstoffzellentypen

Es gibt verschiedene Brennstoffzellentypen, die je nach Elektrolyt bei unterschiedlichen Temperaturen arbeiten und für verschiedene Leistungsbereiche ausgelegt sind (Tab. 27).

Tab. 27: Die wichtigsten Brennstoffzellentypen (nach GÜTLING U. KAMM, 2001)

Name: (Typbezeichnung)	PAFC	PEMFC	MCFC	SOFC
Brennstoffzellenart	phosphorsaure Brennstoffzelle	Polymermembran-Elektrolyt-Brennstoffzelle	Karbonatschmelzen-Brennstoffzelle	oxid-keramische Brennstoffzelle
Elektrolyt	Phosphorsäure (H_2SO_4)	Polymermembran	$\text{Li}_2\text{CO}_3/\text{Na}_2\text{CO}_3$	Yttrium dotiertes Zirkoniumoxid
Temperatur ($^{\circ}\text{C}$)	160-220	50-90	600-660	800-1000
el. Wirkungsgrad (%)	Erdgas: 40	Erdgas: 40 H_2 : 50-60	Erdgas: 54	Erdgas: 50-55
Bedingungen für Brennstoff	$\text{S} < 1 \text{ ppm}$ $\text{CO} < 1 \%$ $\text{N}_2 < 4 \%$	$\text{S} < 1 \text{ ppm}$ $\text{CO} < 10\text{-}100 \text{ ppm}$	$\text{S} < 1 \text{ ppm}$ CO-tolerant	$\text{S} < 1 \text{ ppm}$ CO-tolerant
Leistungsbereich	einige 10 kW bis einige 100 kW	einige W bis einige 100 kW	einige 100 W bis einige MW	einige kW bis einige MW
Betriebsweise	Mittellast-Grundlast	variabel	Grundlast	Mittellast-Grundlast
Reformierung	extern	extern	intern oder interne Teilreformierung	interne Teilreformierung
Entwicklungsstand	Marktprodukt	Seit 1995 Einsatz in Kraftfahrzeugen	Demonstrationsanlagen seit 1996	Pilotanlage seit 1997

1.5.5.14 Mikrogasturbine

Mikrogasturbinen sind schnell laufende Gasturbinen mit Drehzahlen von 70.000 bis über 100.000 U min^{-1} im Leistungsbereich bis ca. 200 kW_{el} . Der Gasdruck beträgt hierbei zwischen 3,8 und 8,5 bar. Die für die Verbrennung benötigte Luft wird in einem Verdichter komprimiert und über den Rekuperator erwärmt, bevor es in die Brennkammer gelangt (Abb. 66). Dadurch lässt sich der elektrische Wirkungsgrad auf bis zu 30 % erhöhen.

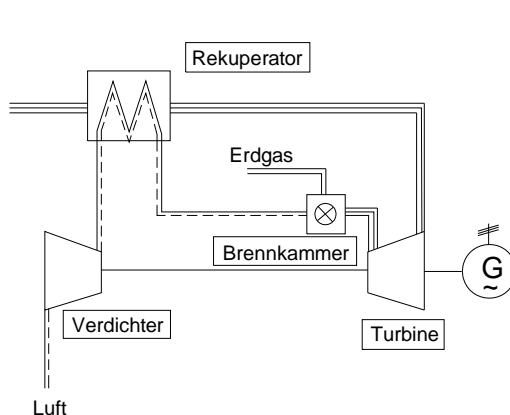


Abb. 66: Funktionsprinzip einer Mikrogasturbine (Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V.; ASUE, 2001)

Der Vorteil der Mikrogasturbine besteht zum einen in den geringen Emissionswerten und zum anderen in der Toleranz gegenüber Schwefelwasserstoff im Brenngas (Tab. 28) und ermöglicht damit relativ lange Wartungsintervalle (ASUE, 2001).

Die Nachteile liegen derzeit noch in den großen Investitionskosten (pro kW elektrischer Leistung zwischen 995 € und 1.750 €/kW) (ASUE, 2001) und im Strom- und Wärmeverbrauch des Verdichters bzw. des Rekuperators (HERDIN, 2002).

Probleme treten zudem durch Wasser im Brenngasverdichter und Siloxananlagerungen an den Turbinenschaufeln auf (KRAUTKREMER, 2003).

Tab. 28: Anforderungen an die Gasqualität, für die Nutzung in Mikrogasturbinen (nach KRAUTKREMER, 2003)

Parameter	Toleranzgrenzen
Heizwert	36,5 - 45 MJ/Nm ³
Druck	3,4 – 10,3 bar
brennbarer Anteil	30 – 100 Vol. %
Wasserstoff	0 – 5 Vol. %
Wasserdampf	0 – 5 Vol. %
Sauerstoff	0 – 10 Vol. %
Kohlendioxid	0 – 50 Vol. %
Stickstoff	0 – 50 Vol. %
Schwefelwasserstoff	0 – 70.000 ppm

1.5.5.2 Wärmenutzung

Weitere Komponenten des BHKW sind die Wärmetauscher, welche die vorhandene Wärme des Motorkühlwassers, Schmieröls und Abgases nutzbar machen und damit das Brauchwasser auf etwa 80 ° - 90 °C aufheizen können. Um Spitzen in der Wärmenutzung abdecken zu können, heben Spitzen- und Reservekessel die Vorlauftemperatur des Heizsystems gegebenenfalls an. Des Weiteren ist der Betrieb von Wärmespeichern möglich, um zeitliche Unterschiede zwischen Erzeugung und Nutzung auszugleichen.

Ein Teil der bei der Verbrennung entstehenden Wärme wird zur Aufrechterhaltung des Gärprozesses benötigt. Der überwiegende Teil steht für andere Einsatzzwecke zur Verfügung. Mit der Überschusswärme können z.B. nebenstehende Gebäude und Ställe mit Wärme und Warmwasser versorgt werden.

Es besteht auch die Möglichkeit über eine Nahwärmeleitung nahe gelegene Wohnsiedlungen, Schwimmbäder, Gewächshäuser etc. mit Heizenergie zu versorgen, vorausgesetzt die Abnehmer befinden sich in unmittelbarer Nähe zur Biogasanlage. Für die Sommermonate, wenn keine Heizenergie gebraucht wird, sollten andere Nutzungskonzepte gefunden werden, um dadurch insgesamt den Anlagenleistungsgrad zu steigern und einen möglichst großen Beitrag zur Einsparung fossiler Energiereserven und zum Klimaschutz zu leisten. Die einzelnen Nutzungsmöglichkeiten und neuere technische Ansätze werden im folgenden Kapitel näher erläutert.

1.5.5.2.1 Trocknung

Eine alternative Verwendung überschüssiger Wärmeenergie stellt die Trocknung landwirtschaftlicher Güter dar. Die Anwendungspalette reicht von der Trocknung landwirtschaftlicher Substrate (Getreide, Raufutter etc.), über die Holz Trocknung (Holzpellets etc.) bis hin zur Futtermittelherstellung (Grünmehl-Pellets). Dieses Verfahren ermöglicht einen Wärmenutzungsgrad von bis zu 80 % (BERG, 2003).

1.5.5.2.2 Speicherung

Um die ungenutzte Wärme im Sommer nicht zu verlieren und sie ggf. in der Winterzeit bei erhöhtem Wärmebedarf nutzen zu können, muss sie gespeichert werden. Die Wärmespeicherung in unterirdischen Wasserspeichern wird derzeit in Pilotprojekten erprobt.

Die Speicherkapazität von Wasser beträgt $1,16 \text{ kWh/m}^3 \cdot \text{K}$, d.h. es werden große Speicherkapazitäten benötigt, um größere Wärmemengen zu speichern.

Es gibt verschiedene **Speichertechniken**, die je nach Art des Wärmetauschers in 3 Kategorien eingeteilt werden (nach REUß, 2001):

Speichermedium Wasser (konvektiver Wärmeaustausch)

- Erdbeckenspeicher
- Felskavernenspeicher

Speichermedium Erdreich (konduktiver Wärmeaustausch)

- Erdwärmesonden-Speicher in Locker- und Festgestein

Speichermedium Untergrund (kombinierter konvektiver und konduktiver Wärmeaustausch)

- Aquiferwärmespeicher
- Kies/Wasserspeicher

Die konvektiven Wärmespeicher verwenden als Speichermedium Wasser, das entweder in unterirdischen Becken (Betonbecken mit Stahlauskleidung) oder in natürlichen Kavernen in den Boden gebracht wird. Bei konduktiven Wärmespeichern wird die Wärme direkt in geeignete Bodenschichten geleitet und dort gespeichert. Kombinierte Wärmespeicher nutzen die Speicherkapazität des wassergesättigten Untergrundes entweder an natürlichen Standorten oder durch künstliche Erdbecken. Alle Wärmespeicherverfahren bedürfen einer genauen Standortwahl (natürliche Speicher) oder einer aufwändigen Konstruktion (künstliche Speicher), um eine Speicherung der Wärme über längere Zeit, ohne große Verluste gewährleisten zu können. Die Kosten der Wärmespeicher belaufen sich, je nach Größe und Verfahren, zwischen 100 € und 360 €/m^3 Speichervolumen (REUß, 2001).

1.5.5.2.3 Kälteerzeugung (KWKK)

Eine weitere Nutzungsform der anfallenden Wärme während der warmen Jahreszeit ist die Kälteproduktion, auch als Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK) bekannt. Da im Sommer kaum Bedarf an Heizenergie besteht, aber der Bedarf von Kälteenergie insgesamt am höchsten ist, bietet sich dieses Verfahren bei gesicherter Kälteabnahme als eine interessante Nutzungsalternative an. Im Gegensatz zu herkömmlichen Kompressionskälteanlagen, die durch elektrische Energie angetrieben werden, werden Absorptionskälteanlagen (AKM) durch thermische Energie betrieben.

Das Kältemittel wird im Verdampfer bei geringem Temperatur- und Druckniveau durch Zufuhr von Wärmeenergie (Q_0) verdampft (Kühleffekt) und im Absorber durch ein geeignetes Absorptionsmittel verflüssigt und dann verdichtet (Abb. 67). Danach wird das Kältemittel durch Wärmeenergie (Q_H) aus der Absorptionsflüssigkeit wieder ausgetrieben und im Kondensator wieder verflüssigt (GÜTLING U. KAMM, 2001). Damit schließt sich der Kreislauf.

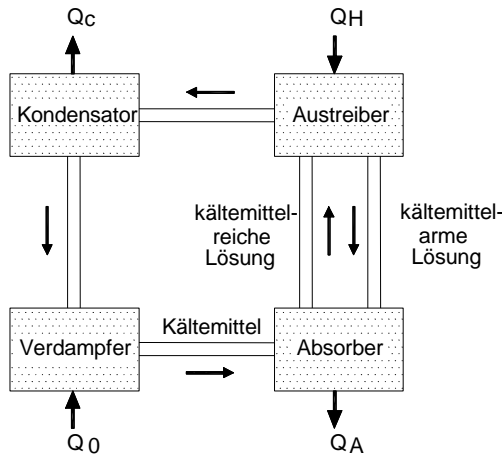


Abb. 67: Funktionsprinzip einer Absorptionskälteanlage (Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V.; ASUE, 2001; Bildquelle: bhkw-info.de)

Für Kühltemperaturen über 0 °C werden meist Wasser-Lithium-Bromid (LiBr) und für Temperaturen unter 0 °C meist Ammoniak-Wasser als Kältemittel-Lösungsmittel-Kombination verwendet (GÜTLING U. KAMM, 2001). Beim Betrieb mit Motor-BHKW typischen Antriebstemperaturen (Motorkühlwassertemperatur von 90-95 °C) leisten Wasser-LiBr-AKM nur die Hälfte ihrer Auslegungsleistung.

Höhere Temperaturen (120 °C) können zwar erreicht werden, haben jedoch einen um 5 % geringeren BHKW-Wirkungsgrad zur Folge (SCHÖNBERG U. NOERES 1998). Ebenso kann Wärmeenergie durch den Einsatz von Abgaswärmetauschern erschlossen werden.

1.5.5.2.4 ORC-Prozess

Beim ORC-Prozess („Organic Rankine Cycle“-Prozess) wird im Gegensatz zu den oben beschriebenen Wärmenutzungsverfahren nicht die Abwärme des BHKW, sondern die Wärme des Abgasstromes verwendet.

Der „Wasserdampf-Prozess“ wurde bereits im 19. Jahrhundert von den Physikern Rudolph Clausius und William Rankine entwickelt. Anstelle von Wasser wird beim ORC-Prozess ein organisches Arbeitsmedium (z.B. Toluol oder Silikonöl) verwendet.

Die Energie aus dem Abgasstrom wird über einen Thermoölkreislauf an den Verdampfer geleitet und das Arbeitsmedium verdampft. In der Turbine wird durch die Entspannung ins Vakuum mechanische Arbeit verrichtet und damit ein Generator angetrieben. Danach wird das Arbeitsmedium in einem Kondensator wieder heruntergekühlt und das rückverflüssigte Medium wieder dem Verdampfer zugeführt (Abb. 68).

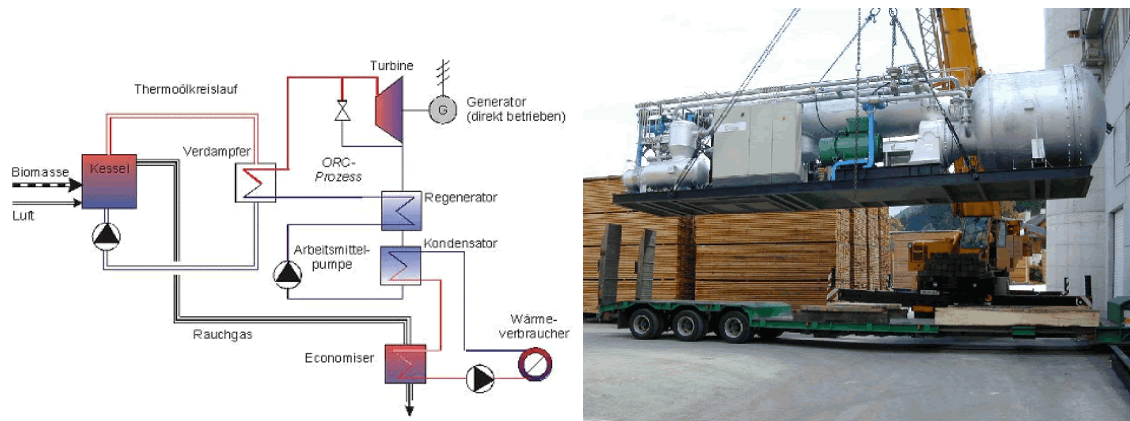


Abb. 68: ORC-Anlage in einem Biomasse-Heizkraftwerk (Quelle: BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH, www.bios-bioenergy.at)

Der elektrische Wirkungsgrad dieses Verfahrens liegt zwischen 5 % und 17 %. Aufgrund der technisch sehr anspruchsvollen Bauweise und den damit verbundenen hohen Investitionskosten ist dieses Verfahren nur für sehr große Anlagen wirtschaftlich einsetzbar.

1.5.5.3 Einspeisung ins Erdgasnetz

Neben der klassischen Verbrennung des produzierten Biogases und der damit verbundenen Nutzung des Stromes und der anfallenden Abwärme, wird aufgrund der fortschreitenden Aufbereitungs- und Anlagentechnik versucht, auch anderweitige Nutzungsformen zu erschließen. Hierzu gehören vor allem die Aufbereitung und Einspeisung des produzierten Biogases ins Erdgasnetz oder die Bereitstellung als Kraftstoff in der Fahrzeugtechnik.

Die Qualitätsanforderungen für das Einspeisen des aufbereiteten Biogases ins Erdgasnetz richtet sich nach den Spezifikationen der DVGW-Regelwerke (Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V.) und für die Bereitstellung als Kraftstoff müssen die Normen der ISO/DIS 15403 erfüllt werden (Tab. 29).

Um diese Anforderungen einhalten zu können, muss das vorhandene Biogas aufbereitet werden. Hierfür können verschiedene Verfahren zur CH₄-Anreicherung bzw. CO₂-Abtrennung verwendet werden (Tab. 30). Die grobe Entschwefelung erfolgt bereits während der Biogasentstehung. Eine Feinentschwefelung kann dem jeweiligen Verfahren noch vorgeschaltet werden.

Tab. 29: Mindestqualitäten des Rohbiogases und Anforderungen zur Verwendung als Kraftstoff und im Erdgasnetz (nach REHER, 2003 und SCHULTE-SCHULZE UND BERNDT, 2003)

Komponente	Rohbiogas	Erdgas (DVGW G 260)	Kraftstoff (ISO/DIS 15403)
Methan (CH ₄)	50 - 70 %	keine Mindestwerte	> 96 %
Kohlendioxid (CO ₂)	30 - 45 %	keine Mindestwerte	< 3 %
Stickstoff (N ₂)	< 2 %	keine Höchstwerte	keine Höchstwerte
Sauerstoff (O ₂)	< 0,5 %	< 0,5 %	< 3 %
Schwefelwasserstoff (H ₂ S)	< 500 ppm	< 5 mg/Nm ³	< 5 mg/Nm ³
Kohlenwasserstoff (C _x H _y)	< 100 ppm	< Kondensationspunkt	< 1 %
Wasser (H ₂ O)	gesättigt	< Kondensationspunkt	< 0,03 g/m ³
Brennwert (H _{S,M})	6 - 7,5 kWh/m ³	8,4 - 13,1 kWh/m ³	Max. 11 kWh/m ³

Tab. 30: Verfahren zur CH₄-Anreicherung bzw. CO₂-Abtrennung (nach SCHULTE-SCHULZE UND BERNDT, 2003 und BOBACK, 2003)

Verfahren	Beschreibung
Gaswäsche	CO ₂ -Absorption mittels Waschflüssigkeit (Wasser, NaOH, u.a.)
Druckwechseladsorption	CO ₂ -Adsorption über elektrostatische Kräfte an Adsorptionsmittel
Membranverfahren, nass	CO ₂ -Abtrennung durch permeables Membrantrennverfahren und Aufnahme durch Absorptionsflüssigkeit
Membranverfahren, trocken	CO ₂ -Abtrennung durch Membrantrennverfahren
CO ₂ -Verflüssigung	Phasentrennung von flüssigem CO ₂ und gasförmigen CH ₄
Tiefemperaturrektifikation	CH ₄ / CO ₂ -Abtrennung durch Siedepunktdifferenzierung und Temperatur (- 80 °C u. + 15 °C)

1.5.6 Gärrestverwertung

Die Gärrestverwertung erfasst die Bereiche Lagerung, inkl. der Aspekte ausreichender Lagerkapazitäten und Maßnahmen zur Emissionsminderung sowie die Ausbringung des Gärrestes zur Düngung im Pflanzenbau.

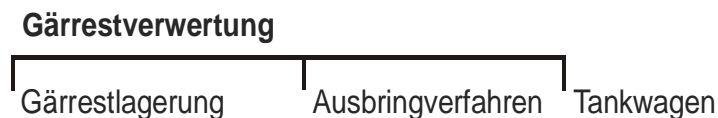


Abb. 69: Aspekte der Gärrestverwertung

1.5.6.1 Gärrestlagerung

Der Gärrest aus einer Biogasanlage enthält Methan bildende Mikroorganismen, die auch in unbeheizten Lagerbehältern einen – wenn auch stark verlangsamten – Abbau verbliebener organischer Substanz und damit verbunden eine Freisetzung von Biogas bewirken. Bei nicht ausreichendem Ausfaulgrad des Gärrestes könnte es durch ein offenes Gärrestlager daher zu einem relevanten Verlust an nutzbarem Biogas bzw. Methan kommen. Der gegenüber unbehandeltem Flüssigmist erhöhte Gehalt an Ammonium-Stickstoff bedingt auch höhere Ammoniakemissionen bei offener Lagerung.

Ein Gärrestlager kann als Tiefbehälter (offen oder mit befahrbarer Decke) oder Hochbehälter – üblicherweise in zylindrischer Form – ausgeführt werden. Hierbei gelten dieselben bauordnungsrechtlichen Festlegungen wie für Flüssigmistbehälter, d. h. die Behälter müssen dicht sein und bedürfen eines statischen Nachweises (s. Kap. 2). Der Gärrest sollte dem Lagerbehälter im freien Gefälle zufließen. Ein Überlaufen des Lagerbehälters ist durch baulich-technische Maßnahmen auszuschließen.

Der Lagerbehälter sollte über ein Rührwerk verfügen, um den Gärrest vor der Entnahme zu homogenisieren. Hierfür kommen je nach Behälterkonstruktion Zapfwellenmischer an der Behälterwand, Propellerrührwerke an Behälterrund oder Mittelstütze oder Strahldüsen in Frage. Für das Aufrühren und wegen Wellenbildung ist grundsätzlich ein ausreichender Freibord einzukalkulieren (mind. 20 cm). Da der Gärrest eine wässrige Konsistenz aufweist, tritt insbesondere im Vergleich zu unbehandeltem Rinder-Flüssigmist eine rasche Entmischung noch vorhandener Feststoffe auf.



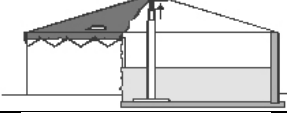

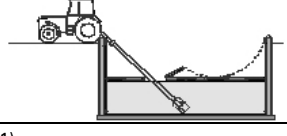
Bei Behältern ohne feste Abdeckung ist anfallendes Niederschlagswasser bei der Berechnung der Lagerkapazität mit zu berücksichtigen (s. Kap. 2). Besonders stark ist der Niederschlagsüberschuss im Winter, wenn gleichzeitig die größte Lagerkapazität erforderlich ist.

Neben meteorologischen Faktoren und der Beschaffenheit des Gärrestes haben Behälterdurchmesser und -füllstand Einfluss auf die Emissionen bei der offenen Gärrestlagerung. Tendenziell steigen die Emissionen mit zunehmendem Behälterdurchmesser und abnehmendem Freibord. Natürlich entstehende und künstliche Schwimmdecken aus Stroh oder verschiedenen Leichtmaterialien bewirken eine Verminderung der von offenen Gärrestlagern ausgehenden Ammoniak-Emissionen, können jedoch zu erhöhten Emissionen an Methan und Lachgas führen. Für eine ausreichende Homogenisierung des Gärrestes vor der Entnahme müssen die Schwimmdecken zerstört werden. Als Leichtmaterialien werden Perlite oder Blähtonkugeln eingesetzt; darüber hinaus werden zwischenzeitlich auch Schwimmelemente aus Kunststoffregenerat angeboten, die v.a. bei Gärresten mit geringer Schwimmdeckenbildung gute Ergebnisse in der Minderung der Geruchs- und Ammoniakemissionsminderung bringen sollen. Styropor-Kugeln oder auf der Oberfläche schwimmende Hartschaumplatten sind nicht zu empfehlen. Generell emissionsmindernd wirkt die Absenkung des pH-Wertes des Gärrestes. Schwimmfolienabdeckungen („einfache Abdeckungen“ nach VDI 3471) senken die Emissionen an allen drei erwähnten Gasen. Bei ihrem Einsatz sollte jedoch gewährleistet sein, dass Niederschlagswasser abgeführt wird, entstehendes Gärgas genutzt wird und die Folie an den Behälterwandungen anliegt.

Für „geschlossene Behälter“ im Sinne der VDI 3471 kommen Zeltdächer, feste Behälterdächer aus Faserzementplatten o. ä., Dachkonstruktionen aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) oder Betondecken in Frage. Die verwendeten Materialien müssen witterungsbeständig und UV-stabil und wegen der aggressiven Bestandteile des unter der Abdeckung entstehenden Biogases auch korrosionsbeständig sein.

Wird der Gasraum an das Gassystem der Biogasanlage angeschlossen, kann noch entstehendes Biogas mit erfasst und verwertet werden. Zeltdächer können hängend (Kegelstumpfpläne), mit Pendelstütze oder Unterkonstruktion (mit oder ohne Mittelstütze) ausgeführt werden. Dächer mit einer festen Unterkonstruktion beanspruchen die Pläne am wenigsten, stellen jedoch eine höhere Belastung der Behälterwand dar. Segmentförmige Abdeckungen werden aus glasfaserverstärktem Kunststoff, Stahl oder Beton mit oder ohne Mittelstütze angeboten. Bei Behältern mit nicht flexibler Abdeckung muss der für die Gärrestentnahme erforderliche Druckausgleich berücksichtigt werden. Einen Überblick über die unterschiedlichen Abdeckungen gibt Tab. 31. Die Daten sind aus der Wirtschaftsdüngerlagerung abgeleitet.

Tab. 31: Lagerbehälterabdeckungen für Flüssigmist (Emissionsreduzierung für Ammoniak) und spezifische Kosten (verändert nach KTBL, 2005)

Behälter und Abdeckung		Ammoniak-emissions-minderung		Kosten für Lagerbehälter [€/m ³] bzw. Abdeckung [€/m ²]	
		Rinder	Schweine	Investition	Jahreskosten
	Offenes Erdbecken ⁶⁾	-	-	¹⁾ 18 – 24	
	Offener Behälter (Beton oder Stahl)	-	-	¹⁾ 24 – 52	
	Abdeckung (Decke, Zeltdach, Folie)	85 - 95	85 - 95	50	²⁾ 5,3
	Strohhäckseldecke	70 - 90	70 - 90		³⁾ <1
	Granulate (z.B. Perlite)	k.A.	k.A.	11	⁴⁾ 2,5
	Schwimmelemente	nicht mgl.	90 - 98	35	⁵⁾ 3,2
	Schwimmfolien	80 - 90	80 - 90	38	⁴⁾ 5,3
¹⁾ Annahme: 15 m Durchmesser ²⁾ Nutzungsdauer: 15 Jahre ³⁾ Nutzungsdauer 0,5 Jahre ⁴⁾ Nutzungsdauer 10 Jahre ⁵⁾ Nutzungsdauer 20 Jahre ⁶⁾ Erhöhter baulich-technischer Aufwand bei Abdeckung und Nutzung des Restgases					

1.5.6.2 Ausbringverfahren

Für die Ausbringung fester bzw. flüssiger Gärückstände können grundsätzlich dieselben technischen Lösungen wie für die Ausbringung von Fest- bzw. Flüssigmist zum Einsatz kommen. Feste Gärückstände aus der so genannten „Trockenfermentation“ strukturreicher Substrate fallen in der Praxis noch kaum an. Bei flüssigen Gärresten sind für die Wahl einer geeigneten Ausbringtechnik die gegenüber unbehandeltem Flüssigmist veränderten Eigenschaften (insbesondere höherer Gehalt an Ammonium-Stickstoff, geringerer Trockensubstanzgehalt, praktisch wässrige Konsistenz) zu berücksichtigen.

Nach Düngeverordnung müssen Geräte zum Ausbringen von Düngemitteln den allgemein anerkannten Regeln der Technik entsprechen und eine sachgerechte Mengenbemessung bei Verteilung sowie verlustarme Ausbringung gewährleisten. Eine gezielte Düngung mit organischen Düngern erfordert eine geeignete Kombination von Tankwagen, dosiergenauem Querverteiler und Regelsystem für die Längsverteilung (s. unten).

Häufigstes Verfahren ist die kontinuierliche Ausbringung, bei der die Abholung des Gärrestes vom Lagerbehälter, der Transport zur Fläche und die Ausbringung mit demselben Tankwagen

bewerkstelligt werden. Bei der absätzigen Ausbringung wird der Flüssigmist/Gärrest von einem Zubringertankwagen oder einem Zwischenlagerbehälter auf das Ausbringfahrzeug übergeladen. Den dabei erzielbaren hohen Flächenleistungen stehen ein erhöhter Material- und Personalaufwand gegenüber.

Eine weitere Möglichkeit der absätzigen Ausbringung ist die Zuführung des Gärrestes mittels Verschlauchung/Verrohrung. Dieses Verfahren ist am schonendsten für den Boden, verursacht für eine geregelte Ausbringung jedoch einen erheblichen Mehraufwand.

Tankwagen

In der Praxis werden im Wesentlichen Pumpentankwagen und Kompressortankwagen eingesetzt. Durch den Kompressor kann ein Unterdruck für die Befüllung des Tankwagens und ein Überdruck für die Ausbringung erzeugt werden. Druckverteilerwagen haben geringere Anschaffungskosten und das Substrat wird hier bei der Ausbringung kontinuierlich aufgerührt; eine Selbstbeladung ist nicht möglich.

Pumpentankwagen haben in diesem Vergleich die höchsten Kosten, sind jedoch selbstbeladend und aufgrund des vom Tankfüllstand unabhängigen Volumenstromes für eine geregelte Ausbringung am besten geeignet. Druckverteiler- und Kompressortankwagen eignen sich mit gewissen Einschränkungen ebenfalls für eine geregelte Ausbringung.

Nicht mehr den allgemein anerkannten Regeln der Technik entsprechen Schleudertankwagen sowie Güllewagen mit senkrecht angeordneter Schleuderscheibe oder mit zentralem Prallverteiler, bei denen die Gülle steil nach oben abgelenkt wird.

Längs- und Querverteilung

Maßgeblich für die Querverteilung des Gärrestes bei der Ausbringung ist das gewählte Verteilersystem. Zu unterscheiden sind so genannte Breitverteiler (Prallbleche/-köpfe, Schwenkdüsen, Düsenbalken etc.) und Verteiler mit bandförmiger Ablage, wie Schleppschauchverteiler (hauptsächlich für stehende Ackerbaukulturen), Schleppschuhverteiler (hauptsächlich für Grünland) oder Einarbeitungsgeräte (Injektoren für Ackerland, Schlitzgeräte für Grünland).

Die Regelung der Längsverteilung kann über die Fahrgeschwindigkeit, den Volumenstrom oder die Pumpe erfolgen; letzteres ist nur bei Pumpentankwagen möglich. Erweiterte Möglichkeiten ergeben sich durch die Einbindung von GPS bei der so genannten teilflächenspezifischen Ausbringung.

Zusätzlich zum Nachteil der eingeschränkten Dosiergenauigkeit sind Breitverteiler für die Ausbringung von Gärresten grundsätzlich weniger geeignet, da sie zu erhöhten Ammoniak-Emissionen führen. Die Gefahr der Futtermittelverschmutzung ist bei der Breitverteilung von Gärresten aufgrund deren wässriger Konsistenz generell geringer als bei der Anwendung von Flüssigmist. Bei heißer und trockener Witterung kann der Gärrest mit seinem hohen Salzgehalt jedoch zu Ättschäden auf Grünland führen, und muss gegebenenfalls mit Wasser verdünnt werden.

Die Ausbringung von Gärresten mit Exaktverteilern ermöglicht eine pflanzenbedarfsgerechte und emissionsarme Ausbringung. Die dünnflüssigen Gärreste lassen dabei prinzipiell auch keine Verstopfungsprobleme mit diesen Verteilern erwarten, wie sie aus der Praxis bei der Ausbringung von unbehandeltem Flüssigmist berichtet werden. Eine qualitative Beurteilung verschiedener Ausbringungssysteme für Gärreste zeigt Tab. 32.

Die Kosten für die Ausbringung sind von einer Vielzahl von Faktoren abhängig und können daher in der Praxis stark schwanken. Auf Basis einer europaweiten Studie wurden die durchschnittlichen Mehrkosten des Einsatzes von Exaktverteilern gegenüber Breitverteilern auf 2 € pro m³ geschätzt (bei 1000-3000 m³ Ausbringvolumen pro Jahr), wobei diese Mehrkosten mit zunehmender Betriebsgröße tendenziell abnehmen.

Tab. 32: Relative qualitative Beurteilung verschiedener Ausbringsysteme für Flüssigmist / Gärrest (verändert nach AID, 1996)

Beurteilungskriterien	Verteiler/Beurteilung			
	Breitverteiler	Schleppschlauchverteiler	Schleppschuhverteiler	Injektoren / Schlitzgeräte
Technische Aspekte				
Verstopfungsgefahr	++++	+++	+++	+++
Seitenwindempfindlichkeit	++	++++	++++	++++
Anschlussfahren	++	++++	++++	++++
Arbeitsbreite	++++	++++	+++	++
Zugleistungsbedarf	++++	++++	+++	+
Straßenverkehrsreignung	++++	+++	+++	+++
Umwelt- u. Düngeaspekte				
Nitratauswaschung	+++	++++	++++	++
Geruchsstofffreisetzung	+	++	+++	++++
Ammoniakfreisetzung	+	++	+++	++++
Oberflächenabfluss	+	++	+++	++++
Verteilgenauigkeit	++	++++	++++	++++
Düngewirkung	++	+++	++++	++++
Spezielle Grünlandaspekte				
Futtermverschmutzung	+	++	+++	++++
Narbenschäden	+++	++	++	+
Ättschäden	+	++	+++	+++
Fahrspurschäden	+++	+++	+++	++
Kosten				
Investitionsbedarf	++++	++	+	+
Kosten je m ³ Gärrest	++++	+++	++	+

+: ungünstige Beurteilung bis ++++: sehr günstige Beurteilung

Literaturverzeichnis

- ABDEL-HADI, M.; BECK, J. UND JUNGBLUTH, TH. (2002): Methanerträge bei der Kofermentation flüssig siliierter Gehaltsrüben. In: Landtechnik 2/2002, S.96-97.
- AID - AUSWERTUNGS- UND INFORMATIONSDIENST FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN E.V. (1996): Behandlung und Ausbringung von Flüssigmist, 2. überarb. Auflage.
- AMON, TH. (2003): Optimierung der Biogaserzeugung aus den Energiepflanzen Mais und Klee-gras. Endbericht Juli 2003. Institut für Land-, Umwelt- und Energietechnik, Universität für Bodenkultur Wien.
- ANONYMUS (2001): „Biogas in der Landwirtschaft – Leitfaden für Landwirte und Investoren im Land Brandenburg; Ministerium für Landwirtschaft, Umweltschutz und Raumord-nung des Landes Brandenburg; Potsdam.
- ARBEITSGEMEINSCHAFT FÜR SPARSAMEN UND UMWELTFREUNDLICHEN ENERGIEVERBRAUCH E.V. (ASUE) (2000): Stationäre Brennstoffzellen: Grundlagen, Einsatzmöglichkeiten, Stand der Technik, Perspektiven. Verlag Rationeller Erdgaseinsatz, Kaiserslautern.
- ARBEITSGEMEINSCHAFT FÜR SPARSAMEN UND UMWELTFREUNDLICHEN ENERGIEVERBRAUCH E.V. (ASUE) (2001): Mikro-KWK: Motoren, Turbinen und Brennstoffzellen. Verlag Rationeller Erdgaseinsatz, Kaiserslautern.
- ARGE ARBI - PROBAG (1993): Vergärung biogener Abfälle aus Haushalt, Industrie und Land-schaftspflege. Schriftenreihe des Eidgenössischen Bundesamtes für Energiewirt-schaft (CH): Studie Nr. 47. Hrsg.: Eidgenössisches Bundesamt für Energiewirtschaft. 3. Aufl., Bern, 1993. S.13-18.
- ASCHMANN, V. (2002): Feststoff vergären: es geht auch ohne Gülle. In: Biogas - Strom aus Gül-le u. Biomasse. Top Agrar Fachbuch, Landwirtschaftsverlag Münster; S. 22 - 25.
- BAADER, W.; DOHNE, E UND BRENNDÖRFER, M. (1978): Biogas in Theorie und Praxis. Behandlung organischer Reststoffe aus der Landwirtschaft durch Methangärung. KTBL-Schrift 229. Frankfurt.
- BEHMEL, U.; MEYER-PITROFF R. (1996): Risiken bei der Cofermentation organischer Reststoffe in Biogasanlagen. In: Korrespondenz Abwasser, Nr. 12/96, 43. Jahrg.: S. 2172-2179.
- BERG, H. (2003): „Nutzung der Überschusswärme landwirtschaftlicher Biogasanlagen“. News: Die Zeitung des Ingenieurbüros H. Berg & Partner GmbH. Ausg. 1/2003, S. 2 - 3.
- BESGEN, S. (2004): Biogaspotential von Nachgärbehältern modernern Biogasanlagen. Mündli-che Mitteilung. Landwirtschaftskammer NRW.
- BOBACK, R. (2003): „Gasaufbereitung mittels Tieftemperaturrektifikation“. In: Gülzower Fach-gespräche, Workshop: „Aufbereitung von Biogas“. 17./18. Juni 2003, Braun-schweig. Hrsg.: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) mit Förderung des Bundesministeriums für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft. Band 21, S. 160 - 168.
- BÖHNKE, B.; BISCHOFBERGER, W. UND SEYFRIED, C.F. (1993): Anaerobtechnik. Springer Verlag Berlin.
- BOXBERGER, J.; AMON, TH. UND MOITZI, G. (2006): Energietechnik (Alternative Energien). In: Jahrbuch Agrartechnik. Band 18, Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster.
- BOXER. INFODIENST: REGENERATIVE ENERGIEN (2004): Biogaspotentiale. [Online im Internet 04.05.2004] http://www.boxer99.de/biogas_biogaspotentiale.htm
- BUSSWELL, A.M.; MUELLER H.F. (1952): „Mechanism of Methane Fermentation“, Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 44, No. 3, S. 550-552.
- EDELMANN, W. (2001): Biogaserzeugung und Nutzung. In: Energie aus Biomasse – Grundlagen, Technik und Verfahren. S. 641 – 692. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York. KALTSCHMITT UND HARTMANN (Hrsg.).

- FRUNZKE, K. (1999): Erzeugung von regenerativer Energie aus organischen Industrieabfallstoffen in Biogasanlagen. Vortrag anlässlich der "Oberfränkischen Energietage" vom 25.-27. Januar 1999 in Kulmbach [Online im Internet, Stand 05.03.2004] http://www.biotech.de/txt/txt_vortrag_jan99.php
- GLEIXNER, A. (1999): Biomasse und Biomassefeuerung - Eine technisch und wirtschaftlich sinnvolle Ergänzung. Vortrag anlässlich der Grünen Woche, Berlin am 25. Januar 1999. [Online im Internet, Stand 27.01.2004] <http://www.innovas.com>
- GRAF, W. (1999): Kraftwerk Wiese. Strom und Wärme aus Gras. Books on Demand.
- GRONAUER, A.; EFFENBERGER, M.; KAISER, F. UND SCHLATTMANN, M. (2003): Biogasanlagen-Monitoring und Emissionsverhalten von Biogas-Blockheizkraftwerken. Materialien Umwelt & Entwicklung Bayern, Bayer. Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, Nr. 176, S. 134.
- GRONAUER, A.; CLAASSEN, N.; EBERTSEDER, T.; FISCHER, P.; GUTSER, R.; HELM, M.; POPP, L. UND SCHÖN, H. (1997): Bioabfallkompostierung - Verfahren und Verwertung. München: Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, LfU-Schriftenreihe Bd. 139; S.375.
- GÜTLING UND KAMM (2001): Blockheizkraftwerke: Technologie, Ökologie, Ökonomie. Hrsg.: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg. Industrie und Gewerbe 4, 1. Auflage, Karlsruhe.
- HERDIN, G.R. (2002): Biomassenutzung zur Stromproduktion, Vergleich verschiedener Techniken: „Der Gasmotor im Wettbewerb zum Zündstrahlmotor“. Internet: [www.energytech.at/\(en\)/kwk/results/id2343.html](http://www.energytech.at/(en)/kwk/results/id2343.html).
- HERDIN, G. R. (2002): Standesanalyse des Gasmotors im Vergleich zu den Zukunftstechniken (Brennstoffzelle und Mikrogasturbine) bei der Nutzung von aus Biomasse gewonnenen Kraftstoffen.
- JÄGER, F. (2002): Mais als Energiepflanzen für die Biogasproduktion, KWS Mais GmbH, Fachberatung Mais.
- KAISER, F.; ASCHMANN, V. UND GRONAUER, A. (2003): Dry Fermentation of Agricultural Substrates. In: 9th International Symposium ASAE – Animal, Agricultural and Food Processing Wastes, 12-15 October 2003, North Caroline, USA, S. 325 – 332.
- KAISER, F.; DIEPOLDER, M.; EDER, J.; HARTMANN, S.; PRESTELE, H.; GERLACH, R.; ZIEHFREUND, G. UND GRONAUER, A. (2004): Ertragspotenziale verschiedener nachwachsender Rohstoffe in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. In: Biogas in Bayern. Tagungsband zur Jahrestagung am 09.12.2004 in Rosenheim, S. 43 – 55.
- KAISER, F. UND GRONAUER, A. (2005): Verdaulichkeit der Inhaltstoffe verschiedener nachwachsender Rohstoffe in Biogasanlagen. In: 14. Symposium BIOENERGIE - Festbrennstoffe, Flüssigkraftstoffe, Biogas am 24./25. November 2005 in Kloster Banz, Bad Staffelstein, S. 290 – 295.
- KAISER, F. UND GRONAUER, A. (2005): Methanertragspotenziale verschiedener nachwachsender Rohstoffe in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. In: 12. C.A.R.M.E.N.-Forum „Strom und Wärme vom Acker“. Tagungsband zur Jahrestagung am 14. März 2005. Hrsg.: Centrales Agrar-Rohstoff-Marketing- und Entwicklungs-Netzwerk e.V. (CARMEN). Straubing, S. 39 – 53.
- KAISER, F.; SCHLATTMANN, M. UND GRONAUER, A. (2005): Methanertragspotenzial verschiedener nachwachsender Rohstoffe in Laborfermentern und deren Übertragbarkeit auf die Praxis. In: 7. Tagung Bau, Technik, und Umwelt in der Landwirtschaftlichen Nutztierhaltung 2005, 1.-3. März 2005 in Braunschweig. Eds: Max-Eyth-Gesellschaft Agartechnik im VDI (VDI-MEG) Düsseldorf; Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL) Darmstadt.
- KALTSCHMITT, M., HARTMANN, H. (2001): Energie aus Biomasse. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.

- KALTSCHMITT, M.; WILFERT, R.; SCHEUERMANN, A.; DILGER, M. (2003): Biogasgewinnung und -nutzung - Tendenzen und Entwicklungen infolge des EEG. Internet: <http://www.carmen-ev.de/dt/portrait/sonstiges/kaltschmidt.pdf>.
- KLEEMANN, M., MELIß, M. (1993): Regenerative Energiequellen. 2. völlig neu überarbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg, Springer Verlag New York.
- KÖBERLE, E. (1999): Maßnahmen zur Verbesserung der Biogasqualität in landwirtschaftlichen Biogasanlagen; Berichte zur 8. Biogastagung, Fachverband Biogas, S. 41 – 54.
- KRAUTKREMER, B. (2003): „Anforderungen an die Qualität von Biogas beim Einsatz von Mikrogasturbinen“. In: Gülzower Fachgespräche, Workshop: „Aufbereitung von Biogas“. 17./18. Juni 2003, Braunschweig. Hrsg.: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) mit Förderung des Bundesministeriums für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft. Band 21, S. 53 - 59.
- KTBL (HRSG.) (2004): Gasausbeute in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Landwirtschaftsverlag Münster. 24 S.
- KTBL (Hrsg.) (1996): KTBL-Arbeitspapier 235 "Energieversorgung und Landwirtschaft". Landwirtschaftsverlag Münster.
- KTBL (HRSG.) (2005): Faustzahlen für die Landwirtschaft, 13. Auflage, Darmstadt.
- KUHN, E. (1995): Kofermentation: Arbeitspapier 219, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), Landwirtschaftsverlag: Münster-Hiltrup, S.67ff.
- LINKE, B., BAGANZ, K. UND SCHLAUDERER, R. (1999): Nutzung von Feldfrüchten zur Biogasgewinnung. Agrartechnische Forschung 5, H.2, S. 82-90.
- MÄHNERT, P., HEIERMANN, M.; PLÖCHL, M.; SCHELLE, H. UND LINKE, B. (2002): Verwertungsalternativen für Grünlandbestände - Futtergräser als Kosubstrat für die Biomethanisierung, Landtechnik 5/2002, S.260-261.
- MITTERLEITNER, H. (2002): „Gasmotor oder Zündstrahler“. In: Biogas – Strom aus Gülle und Biomasse. Top Agrar Fachbuch; Landwirtschaftsverlag, Münster.
- MITTERLEITNER, H. (2002): Inputmaterialien für die Biogaserzeugung. Broschüre der Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Landtechnik, Freising-Weihenstephan.
- MITTERLEITNER, H. (2002): Möglichkeiten der Feststoffeinbringung in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Broschüre der Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Landtechnik, Freising-Weihenstephan.
- OTTOW, J.; BIDLINGMAIER, W. (1997): Umweltbiotechnologie. Stuttgart: Fischer Verlag.
- PLÖCHL, M. ; HEIERMANN, M. (2002): Ökologische Bewertung der Bereitstellung landwirtschaftlicher Kosubstrate zur Biogaserzeugung. In: Biogas und Energielandwirtschaft - Potenzial, Nutzung, Grünes Gas™, Ökologie und Ökonomie. 18.-19. November 2002 in Potsdam. Tagungsband (Hrsg. HEIERMANN, M. und PLÖCHL, M.), Bornimer Agrartechnische Berichte Vol. 32, 2. überarbeitete Auflage: S. 98-106.
- POUECH, P. ; FRUTEAU, H. UND BEWA, H. (1989a): Agricultural Crops for Biogas Production on Anaerobic Digestion Plants. In Biomass for Energy and Industry, C.A.R.E.N., Proceeding of the International Conference Würzburg, Germany, 8-11 June 1998, S. 163-165.
- POUECH, P.; FRUTEAU, H. UND BEWA, H. (1989b): Biomass Co-fermentation in a Full-scale anaerobic Digester influence of running parameters. In Biomass for Energy and Industry, C.A.R.E.N., Proceeding of the International Conference Würzburg, Germany, 8-11 June 1998, S. 714-717.

- PRESCHNER, K.; GOLISCH, J.; WICHMANN, V. (2000): „BHKW-Module bei Biogasanlagen – Entwicklungen und zukünftige Trends“. In: Gülzower Fachgespräche „Energetische Nutzung von Biogas: Stand der Technik und Optimierungspotenzial“. 26./27. Oktober 2000, Weimar. Hrsg.: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) mit Förderung des Bundesministeriums für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft. Band 15, S. 87 - 100.
- REHER, S. (2003): „Kraftstoffe aus Biogas“. In: Gülzower Fachgespräche, Workshop: „Aufbereitung von Biogas“. 17./18. Juni 2003, Braunschweig. Hrsg.: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) mit Förderung des Bundesministeriums für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft. Band 21, S. 71-77.
- REUB, M. (2001): „Saisonale Wärmespeicherung im Untergrund - eine Lösung für die effiziente Wärmenutzung auch bei Biogas?“. Internet: www.carmen-ev.de/dt/portrait/sonstiges/reuss.pdf.
- RIES, T. (1993): Reduzierung der Schwefelwasserstoffbildung im Faulraum durch Zugabe von Eisenchlorid; Schriftenreihe Siedlungswasserwirtschaft RUB, Nr. 25.
- RÖHLING, I. UND KEYMER, U. (2007): Biogasanlagen in Bayern 2006. Ergebnisse einer Umfrage. In: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) (Hrsg.): LfL-Informationen. Mai 2007.
- SCHNEIDER ET AL. (2002): Grundlegende Untersuchungen zur effektiven, kostengünstigen Entfernung von Schwefelwasserstoff aus Biogas. BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ (Hrsg.): Biogasanlagen – Anforderungen zur Luftreinhaltung (Augsburg, 17. Oktober 2002).
- SCHNEIDER, R.; QUICKER, P.; ANZER, T.; PRECHTL, S. UND FAULSTICH, M. (2002): Grundlegende Untersuchungen zur effektiven, kostengünstigen Entfernung von Schwefelwasserstoff aus Biogas". In: BAYER. LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ (Hrsg.) "Biogasanlagen - Anforderungen zur Luftreinhaltung, Augsburg 17.Oktober 2002), S. 29 – 45.
- SCHÖNBERG, I.; NOERES, P. (1998): „KWKK - Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung“. BINE-Informationssdienst, Profi-Info, Nr. 2/1998. Hrsg.: Fachinformationszentrum Karlsruhe, Bonn.
- SCHOLWIN, F. (2005): Aktuelle Daten zur Stromerzeugung aus Biogas. In: Workshop-Dokumentation „Stromerzeugung aus Biogas – Erfahrungen mit dem novellierten EEG“, 14.-15. Juli 2005, Berlin, Institut für Energetik und Umwelt, Leipzig.
- SCHULTE-SCHULZE BERNDT, A. (2003): „Gasaufbereitung mittels Druckwechseladsorption“. In: Gülzower Fachgespräche, Workshop: „Aufbereitung von Biogas“. 17./18. Juni 2003, Braunschweig. Hrsg.: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) mit Förderung des Bundesministeriums für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft. Band 21, S. 127 - 143.
- SCHULTZ, H.; WINKLER, M. (1998): „Betriebliche Aspekte“. In: KTBL-Arbeitspapier 249, Kofermentation. KTBL-Schriftenvertrieb im Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster-Hiltrup, S. 41 - 45.
- SCHULZ H., EDER, B. (2001): „Biogas-Praxis: Grundlagen, Planung, Anlagenbau“, 2. überarbeitete Auflage, Ökobuchverlag, Staufen bei Freiburg.
- SCHULZ, H., EDER, B. (2001): Biogas Praxis. Grundlagen - Planung - Anlagenbau - Beispiele. 2. überarb. Aufl.. Staufen bei Freiburg: ökobuch Verlag.
- SCHULZ, H.; PERWANGER, A. UND MITTERLEITNER H. (1982): Einsatzmöglichkeiten verschiedener Energieträger in der Landwirtschaft. Endbericht des Landtechnischen Vereins in Bayern e.V., München.
- SCHULZ, H.; MITTERLEITNER, H. UND BEHMEL, U. (1996): Schlussberichte zum Auftrag "Altbrotvergärung zu Biogas". Freising-Weihenstephan (unveröffentlicht).

- SEDLMEIER, J. (2000): Futterrüben als Kraftwerk. Aus: Landwirtschaftblatt Weser-Ems Nr. 11 vom 17.03.2000.
- SKLORZ M.; SCHNELLE-KREIS J.; GOTTLIEB A.; KÜHNERL N. UND SCHMID B. (2004): Katalysatoren an Biogasmotoren. Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (Hrsg.). Materialien – Umwelt & Entwicklung Bayern, Band 182.
- WEILAND, P. (2001): Grundlagen der Methangärung - Biologie der Substrate; VDI-Berichte, Nr. 1620 „Biogas als regenerative Energie - Stand und Perspektiven“, S. 19-32, VDI-Verlag.
- WELLINGER, A. (2000): Strom aus Gras? Kein Problem! In: Blick ins Land 7/2000, S. 25.
- WENZEL, W. (2002): Mikrobiologische Charakterisierung eines Anaerobreaktors zur Behandlung von Rübenmelasseschlempe. Dissertation an der TU Berlin.
- WIMMER H. (2004): Information zu stehenden Betonfermentern. Mündliche Mitteilung. Fa. Wimmer, 84556 Kastl, Deutschland.
- ZAUNER, E. UND U. KÜNTZEL (1986): Methane production from ensiled plant material. Biomass 10, S. 207-223.
- ZHANG, R. UND Z. ZHANG (1999): Biogasification of rice straw with an anaerobic-phased solids digester system. Bioresource Technology 68, S. 235-245.