

Inhaltsverzeichnis

1	Grundlagen und Technik	4
1.1	Historischer Abriss	4
1.2	Grundlagen des Biogasverfahrens	5
1.3	Grundlagen der Biogasentstehung	5
1.3.1	Der anaerobe Abbauprozess	6
1.3.1.1	Hydrolyse	7
1.3.1.2	Acidogenese	7
1.3.1.3	Acetogenese	8
1.3.1.4	Methanogenese	8
1.3.1.5	Weitere Prozesse und Prozessbedingungen	9
1.3.2	Prozessprodukt „Biogas“	11
1.4	Einsatzstoffe	14
1.4.1	Landwirtschaftliche Einsatzstoffe	15
1.4.1.1	Flüssigmist (Gülle)	15
1.4.1.2	Festmist	15
1.4.1.3	Reststoffe der Pflanzenproduktion (Koppelprodukte)	16
1.4.1.4	Nachwachsende Rohstoffe	17
1.4.2	Bestimmte Schlachtabfälle	19
1.4.3	Landschaftspflegematerial	19
1.4.4	Organische Reststoffe aus der Industrie	19
1.4.4.1	Prozessrückstände der Lebensmittelindustrie	20
1.4.4.2	Weitere Prozessrückstände der Industrie	20
1.4.5	Kommunale und gewerbliche Reststoffe	21
1.4.5.1	Biotonne	21
1.4.5.2	Gastronomiebereich	21
1.4.5.3	Grüngut aus Wertstoffhöfen	21
1.4.6	Stör- und Schadstoffe, Hygiene	21
1.4.6.1	Maßnahmen zur Risikominderung	22
1.5	Verfahrens-, Geräte- und Anlagentechnik	22
1.5.1	Anlieferung und Lagerung	23
1.5.2	Aufbereitung	23
1.5.2.1	Konservierung	24
1.5.2.2	Zerkleinerung	24
1.5.2.3	Pasteurisierung	25
1.5.3	Fermentertechnik	27
1.5.3.1	Fermenterbauarten	27
1.5.3.2	Substrateintrag	31
1.5.3.3	Direkteinleitung flüssiger Wirtschaftsdünger	31
1.5.3.4	Vorgrube	31
1.5.3.5	Feststoffeintragssysteme	32
1.5.4	Substratleitungen	34
1.5.5	Pumpen	35
1.5.5.1	Kreiselpumpen/Tauchschneidpumpen	35
1.5.5.2	Verdrängerpumpen	35
1.5.6	Sedimentaustrag	35

1.5.7	Gärrückstandaustrag	36
1.5.8	Heizung	36
1.5.9	Homogenisierung	37
1.5.10	Mess- und Regelungstechnik (MRT)	38
1.5.10.1	Menge der Substrate	40
1.5.10.2	Gasmenge	40
1.5.10.3	Gasanalyse	42
1.5.10.4	Bestimmung des pH-Wertes	42
1.5.10.5	Temperaturregelung	42
1.5.10.6	Stromproduktion und Stromverbrauch	42
1.6	Gasführendes System	43
1.6.1	Interner Gastransport	43
1.6.2	Gasaufbereitung	43
1.6.2.1	Trocknung	44
1.6.2.2	Entschwefelung	44
1.6.2.3	CH ₄ Anreicherung	46
1.6.3	Gasspeicherung	47
1.7	Gasnutzung	49
1.7.1	Verstromung	49
1.7.1.1	Verbrennungsmotoren	50
1.7.1.2	Stirlingmotor	52
1.7.1.3	Brennstoffzelle	52
1.7.1.4	Mikrogasturbine	53
1.7.2	Wärmenutzung	53
1.7.2.1	Heizung	53
1.7.2.2	Trocknung	54
1.7.2.3	Speicherung	54
1.7.2.4	Kälteerzeugung (KWKK)	54
1.7.2.5	CRC und ORC Technologie	54
1.7.3	Einspeisung ins Erdgasnetz	54
1.7.4	Gasentsorgung	55
1.8	Gärrückstandslagerung	55

Abkürzungsverzeichnis

°C	Grad Celsius
€	Euro
AKh	Arbeitskraftstunden
BHKW	Blockheizkraftwerk
BZ	Brennstoffzelle
CH ₄	Methan
CO ₂	Kohlendioxid
Ct	Cent
DVGW	D eutsche V ereinigung des G as- und W asserfaches e.V.
EEG	Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien
FM	Frischmasse
g	Gramm
GV	Großvieheinheit
H ₂	Wasserstoff
H ₂ S	Schwefelwasserstoff
hPa	Hektopascal
kg	Kilogramm
k _{n,0.5} -Wert	Reaktionskonstante bei 50 % des Biogaspotentials
kWh	Kilowattstunde
kWh _{el}	Kilowattstunde elektrisch
kWh _{therm}	Kilowattstunde thermisch
l	Normliter - Liter bei Normbedingungen (1,013 bar, 0° C, 0% Luftfeuchte)
mg	Milligramm
m 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
RF	Rohfaser
RL	Rohfett
RiGV	Rinder-Großvieheinheit
RP	Rohprotein
t	Tonne
TS	Trockensubstanz
v. K.	variable Kosten
VQ	Verdauungsquotient
VQ _{NfE}	Verdauungsquotient der stickstofffreien Extraktstoffe
VQ _{RF}	Verdauungsquotient der Rohfaser
VQ _{RL}	Verdauungsquotient Rohfett
VQ _{RP}	Verdauungsquotient Rohprotein
WS	Wassersäule
ZS	Zündstrahl-Motor

1 Grundlagen und Technik

Volker Aschmann², Dr. Vasilis Dandikas¹, Dr. Mathias Effenberger¹, Dr. Andreas Gronauer², Rainer Kissel¹, Dr. Fabian Lichti¹, Hans Mitterleitner², Dr. Stefan Nesper¹, 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 16. Jahrhundert führte der Naturforscher Alessandro Volta Verbrennungsversuche mit Sumpfgas durch. Im 17. Jahrhundert erkannten Bechamp und Popoff die biogene Methanbildung. Im 19. Jahrhundert führte Pasteur Versuche zur Biogasgewinnung aus Kuhmist durch und entdeckte mit Hoppe-Seyler die mikrobiologische Bildung von CH₄ und 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 et al., 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 potenzieller 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 1950er-Jahren entstanden in Deutschland etwa 50 Biogasanlagen, wobei aber viele nach kurzer Betriebszeit wegen mangelhafter Funktion wieder stillgelegt wurden. Der sinkende Ölpreis in den 1950er und 1960er-Jahren (Heizöl kostete damals ca. 0,10 €/l und fiel bis 1972 auf 0,04 €/l) führte zur Schließung vieler Biogasanlagen.

Aufgrund der Ölkrise entwickelte sich 1972 bzw. 1973 eine zweite Biogas-Bewegung. 1980 waren in Bayern wieder 15 landwirtschaftliche Anlagen in Betrieb. 1985 wurden in Deutschland 75 Anlagen erfasst. Im Gegensatz zur ersten Biogasbewegung in den 1950er-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. Einen dritten Aufschwung erfuhr die Biogasnutzung Anfang der 90er Jahre durch die gesetzliche Regelung der Einspeisevergütung für Strom aus Biogas und die Rahmenbedingungen des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes. Seit Inkrafttreten des „Erneuerbare-Energien-Gesetzes“ (EEG) im Jahr 2000 ist die Stromerzeugung aus Biogas stark gestiegen. Die Novellierung des EEG im Jahr 2004 löste einen deutlichen Zuwachs landwirtschaftlicher Biogasanlagen aus.

Im Jahr 1999 lag die Anzahl der Biogasanlagen bei 850. Ende 2019 wurden in Deutschland etwa 9.500 Biogasanlagen betrieben. In Abbildung 1 ist die Entwicklung des Bestandes landwirtschaftlicher Biogasanlagen von 2011 bis 2019 (sowie geschätzte Zahlen für 2020) nach Erhebungen des Fachverbandes Biogas e.V. dargestellt. Die installierte elektrische Leistung liegt bei etwa 5.000 MW, wobei etwa 3.800 MW arbeitsrelevant sind.

¹ Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Landtechnik und Tierhaltung

² ehemals Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft

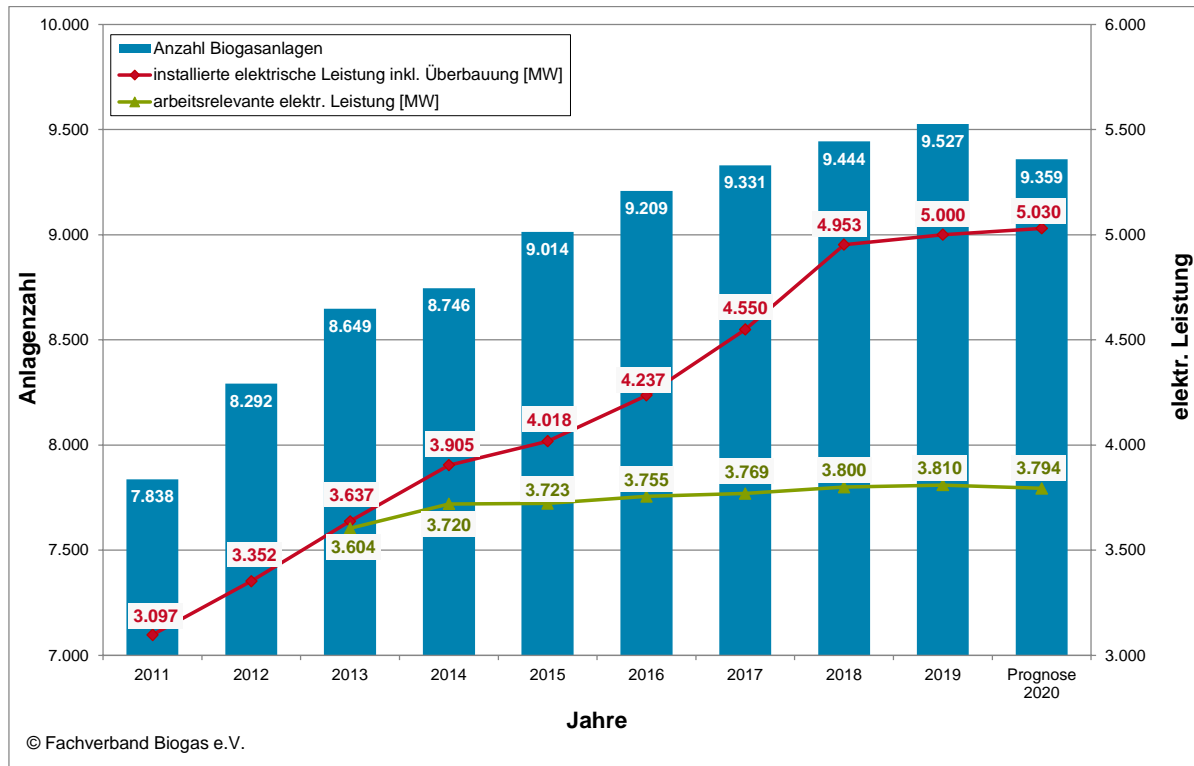


Abbildung 1: Entwicklung der Anzahl und der elektrischen Anschlussleistung (MW) der Biogasanlagen in Deutschland (Fachverband Biogas, 2020)

1.2 Grundlagen des Biogaserfahrens

In Biogasanlagen werden unterschiedliche Einsatzstoffe verschiedener Herkunft eingesetzt. Dem entsprechend entwickelten sich verschiedene Techniken zur Einsatzstofflagerung und -aufbereitung, Einbringtechnik in den Fermenter, Fermenterbauarten und -betriebsweise. Je nach Anlagenart und Größe sowie den betrieblichen Rahmenbedingungen werden unterschiedliche Techniken zur Aufbereitung, Speicherung und Nutzung des Biogases eingesetzt.

Aus technischer Sicht werden die Verfahren zur Biogaserzeugung in Nass- und Trockenfermentation (auch als Flüssig- und Feststofffermentation) unterteilt. Die beiden Verfahren unterscheiden sich im Wassergehalt bzw. Trockenmassegehalt im Fermenter, und im Stofftransport. Es handelt sich um Trockenfermentation, wenn der durchschnittliche Trockensubstanzgehalt des Einsatzstoffmix mehr als 30 % beträgt. Aus fachlicher Sicht sind dies irreführende Begriffe, da der mikrobiologische Prozess in jedem Fall nur in der wässrigen Phase stattfinden kann. In der Praxis ist die Nassfermentation das gängigste Verfahren, da eine Biogasanlage mit Nassfermentations-Verfahren einfacher betrieben werden kann als eine Trockenfermentations-Anlage.

In den folgenden Kapiteln werden die Grundlagen des mikrobiologischen Prozesses, die verfahrenstechnischen Teilschritte sowie die wesentlichen Technologien, verfahrenstechnische 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: 21 [GWP 100]) (IPCC, 1996). Durch kontrollierte Gärprozesse lässt sich die Methanentstehung aber auch technisch nutzen. Dies geschieht in kommunalen Kläranlagen (Klärschlammfäulung), Deponien oder Biogasanlagen. Je nach Herkunft des Gases spricht man dann von „Klärgas“, „Deponiegas“ oder „Biogas“. Auch Industrie und Gewerbe des agroindustriellen Bereiches nutzen den anaeroben Prozess zum Abbau der organischen Substanz von Abwässern.

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 und kann energetisch verwertet werden.

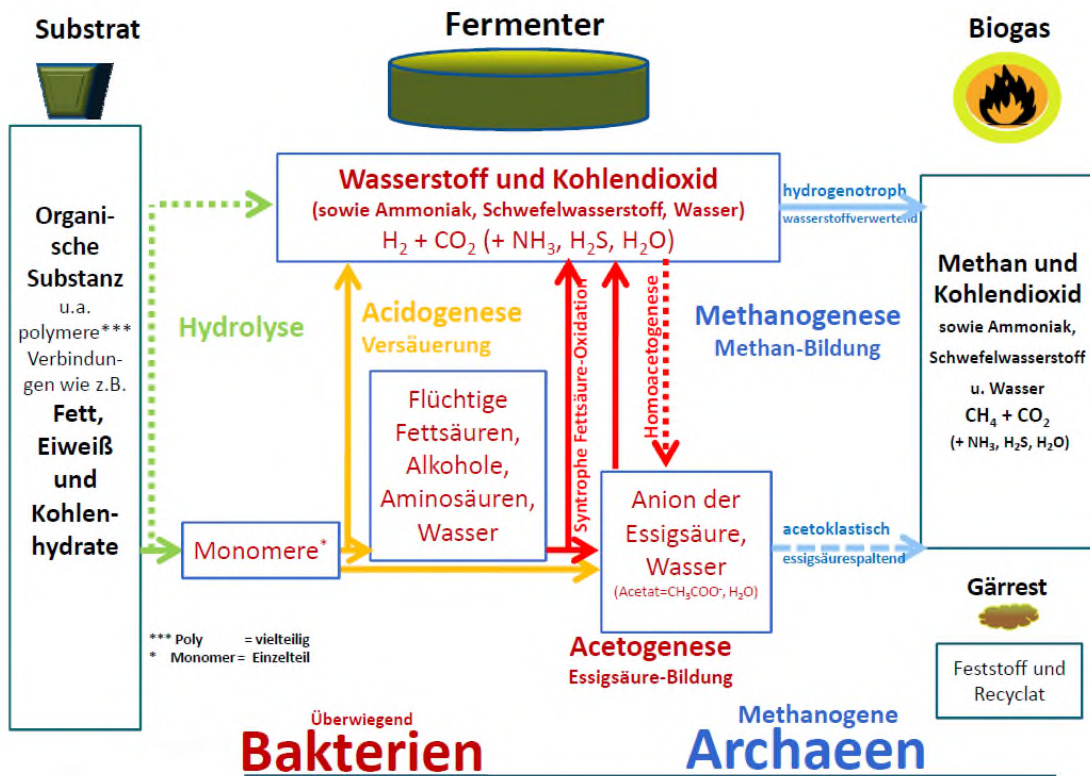


Abbildung 2: Flussschema des Biogasbildungsprozesses (Schieder et al., 2010)

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 (Abbildung 2). An den einzelnen Phasen des Abbaus sind jeweils verschiedene Gruppen von Mikroorganismen beteiligt. Diese Organismen verwerten jeweils die Produkte der vorangegangenen Schritte. Die Biogasbildung ist ein Prozess bei dem mikrobiologische und chemische Faktoren eng miteinander verbunden sind (Angelidaki et al., 2009; Mittweg et al., 2012). Außerdem kann die chemische Zusammensetzung der unterschiedlichen Pflanzenarten, sowie deren Inkrustierungsgrad, den Abbaugrad beeinflussen (Lübken et al., 2010; Li et al., 2013).

Obwohl die vier Gruppen von Mikroorganismen einen unterschiedlichen optimalen Wachstumsbereich haben (Bauer et al., 2009), sind die mikrobiologischen Schritte wegen der syntrophen und synergetischen Effekte sehr stark voneinander abhängig. Daher finden die vier Schritte des anaeroben Abbaus in einem einphasigen System zeitlich parallel statt.

1.3.1.1 Hydrolyse

Der anaerobe Abbau von organischem Material beginnt mit der Hydrolyse. In dieser Phase werden biogene Polymere biochemisch aus den Gruppen der Kohlenhydrate, der Proteine und der Fette unter Anlagerung von Wasser in niedermolekulare Verbindungen gespalten. Durch diesen enzymatischen Prozess werden einfache Kohlenhydrate, Aminosäuren und Fettsäuren produziert. Die folgende Tabelle gibt die wesentlichen Stoffumsetzungen wieder.

Tabelle 1: Stoffumsetzungen in der hydrolytischen Phase und Beispiele beteiligter Mikroorganismen (Schulz et al., 1982; Bischofsberger et al., 2005)

Substrate	Beispiele Mikroorganismen	Produkte
Kohlenhydrate Proteine Fette	<i>Clostridium</i> spp. <i>Bacillus</i> spp. <i>Pseudomonas</i> spp.	Monosaccharide Aminosäuren Kurzkettinge Peptide Langkettige 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. Bei lignocellulosehaltiger Biomasse ist die Hydrolyse der zeitlich limitierende Schritt des anaeroben Abbaus (Weinrich und Nelles, 2015). Daher kann im Falle von landwirtschaftlichen Biogasanlagen die Geschwindigkeit des Biogasbildungsprozesses durch die Hydrolyse bestimmt werden, wenn keine mikrobielle Hemmung besteht.

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.

Tabelle 2: Stoffumsetzungen in der acidogenen Phase und Beispiele beteiligter Mikroorganismen (Schulz et al., 1982; Graf, 1999; Ottow und Bidlingmaier, 1999)

Substrate	Beispiele Mikroorganismen	Produkte
Monosaccharide Aminosäuren Kurzkettinge 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 et al., 2016).

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).

Tabelle 3: Stoffumsetzungen in der acetogenen Phase und Beispiele beteiligter Mikroorganismen (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 Archaeen schließlich das Methan. Die Methanbildung basiert vor allem auf der Verwertung von Acetat durch acetoklastische und der Verwertung von Kohlendioxid und Wasserstoff durch hydrogenotrophe Organismen. Welcher Anteil des erzeugten Methans auf welchen Weg entsteht, ist von mehreren Parametern abhängig. In der Regel wird Methan bei niedriger Raumbelastung vorwiegend über einen Essigsäure-spaltenden Reaktionsweg produziert, und bei hoher Raumbelastung über den Wasserstoff verwertenden Reaktionsweg (Bauer et al., 2008; Lebuhn et al., 2008).

Tabelle 4: Stoffumsetzungen in der methanogenen Phase und Beispiele beteiligter Mikroorganismen (Wenzel, 2002; Kaltschmitt et al., 2016)

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

Die methanbildenden Archaeen sind strikt anaerob und reagieren sehr empfindlich auf Sauerstoff (Graf, 1999). Somit ist ein Sauerstoffeintrag in den Gärprozess unbedingt zu vermeiden. 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 Substratzugabe, unbedingt zu vermeiden ist.

Wird leicht abbaubares Substrat zugegeben, so setzen rasch Hydrolyse und Versäuerung ein. Sinkt der pH-Wert zu stark ab, verringert sich die Abbauleistung der methanogenen Archaeen und Acetat

wird angereichert. Dies bewirkt eine weitere Absenkung des pH-Werts, wodurch der Prozess zum Erliegen kommen kann. Man spricht dann von einer Versäuerung des Fermenterinhalt. Mit einer rechtzeitigen Unterbrechung der Substratzufuhr kann diesem Prozess entgegengewirkt werden.

1.3.1.5 Weitere Prozesse und Prozessbedingungen

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. Schwefelwasserstoff im Biogas beeinflusst den Wartungsaufwand bzw. die Standzeit der Motoren der BHKWs (Schneider et al., 2004). In der Biogasproduktion ist die so genannte Schwefelwasserstoffoxidation als Verfahren zur biologischen Entschwefelung des Gases am weitesten verbreitet. Dabei handelt es sich um einen weiteren mikrobiologischen Prozess, der nicht direkt der Biogasproduktion zuzuordnen ist, sondern bereits der Gasaufbereitung angehört.

Außerdem wird die Biogasetstehung nachteilig beeinflusst durch: Schwimmdecken, Sinkschichten, Schaumbildung, Abweichungen von der vorgegeben Fermentertemperatur oder erhöhte Ammonium- oder Fettsäurekonzentrationen (Henkelmann et al., 2020). Diesen Störeffekten kann mit erhöhtem Rühraufwand, effektiver Mess-, Steuerungs- und Regeltechnik und einer angepassten Substratzufuhr entgegengewirkt werden. 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 Mikroorganismen sind obligat anaerob, somit ist der Sauerstoffeintrag in den Gärprozess unbedingt zu vermeiden. Bezüglich der Temperatur wird zwischen drei Bereichen unterschieden, in denen jeweils der Temperatur angepasste Mikroorganismenstämme aktiv sind (Tabelle 5). Aus mikrobiologischer Sicht werden die Organismen in psychrophile, mesophile und thermophile unterteilt. Die drei Temperaturgruppen beschreiben -sofern ausreichend Nährstoffe und Spurenelemente vorhanden sind- die Optimaltemperatur für den maximalen Stoffwechsel der Mikroorganismen, wobei die Grenzen zwischen den Temperaturbereichen nicht strikt definiert werden können. Das Temperaturniveau bestimmt maßgeblich die Geschwindigkeit des Abbauprozesses.

Tabelle 5: Temperaturbereich und Aktivität der Mikroorganismen

Temperaturbereich	Typische Temperatur	Aktivität und Empfindlichkeit
psychrophil	<20 °C	niedrig
mesophil	30-42 °C	mittel
thermophil	48-55 °C	hoch

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. Sie benötigen eine gewisse

Zeit, sich an ein neues Temperaturniveau anzupassen und die ursprüngliche Leistung wieder zu erreichen, da das Spektrum der Mikroorganismen im thermophilen Bereich enger ist als im mesophilen Bereich.

Bei der mesophilen Prozessführung werden i. d. R. Temperaturschwankungen von $\pm 3\text{ °C}$ toleriert, ohne dass es zu einem größeren Einbruch in der Gasbildungsrate kommt. Aufgrund der erhöhten Reaktionsgeschwindigkeit sind bei höheren Temperaturen geringere Verweilzeiten bei gleichem Abbaugrad erforderlich (Abbildung 3).

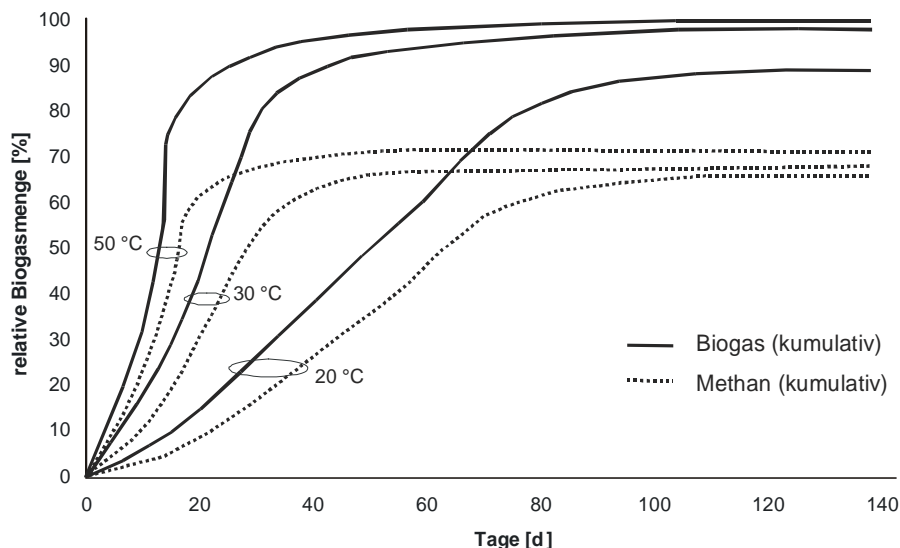


Abbildung 3: Relative Biogasmenge in Abhängigkeit von Temperatur und Verweilzeit (Baader et al., 1978)

Für die Methanbildung gilt ein pH-Wert im schwach alkalischen Bereich bis 7,5 als optimal. Aber in der Praxis können bei Systemen mit adaptierten Mikroorganismen auch pH-Werte in einem weiteren Bereich zwischen 6,5 und 9,0 beobachtet werden.

Der TM-Gehalt in voll durchmischten Gärbehältern sollte zwischen 6 und 12 % liegen. TM-Gehalte über 15 % erfordern leistungsstarke Pumpen und erhöhen den Energieaufwand zur Durchmischung. Zudem steigt der Wartungsaufwand für Pumpen und Rührwerke. Bei sehr niedrigen TM-Gehalten ist die Produktivität (Gasvolumen zu Gärvolumen) nicht effizient und es besteht die Neigung zur Schwimmdeckenbildung.

Die verschiedenen Säuren als Zwischenprodukte des Gärprozesses, können hemmend auf die Prozessbiologie wirken, wenn sie sich anreichern. Durch die Analyse der einzelnen Säuren können Aussagen zum Zustand des Prozesses getroffen werden. Pro Liter Gärgemisch sollte deren Gehalt im niedrigen drei- bis vierstelligen Milligrammbereich liegen. Ist die Säurekonzentration zu hoch und die Pufferkapazität nicht ausreichend, kann die Methanproduktion gehemmt werden. Die Pufferkapazität bzw. die Alkalität des Systems sollte im hohen vierstelligen Milligrammbereich pro Liter liegen. Das Verhältnis Säuren zu Pufferkapazität kann als FOS/TAC-Wert ermittelt werden und ist ein wichtiger Prozessindikator.

Die Verfügbarkeit der Makro- und Mikroelemente ist für die Mikroorganismen lebensnotwendig. Um die Bakterien ausreichend mit Nährstoffen zu versorgen, sollte das C:N:P:S-Verhältnis bei etwa 600:15:5:3 liegen (Weiland, 2001). Hemmungen bzw. Störungen des Prozesses können sowohl durch eine unausgewogene Versorgung mit Nährstoffen und Spurenelementen, als auch durch eine

Überversorgung mit rasch abbaubaren Substraten eintreten. Weitere Störfaktoren für Mikroorganismen sind toxische Substanzen, die mit den Substraten eingebracht werden (Schadstoffe) oder während des Prozesses direkt entstehen (Stoffwechselprodukte).

Bestimmte Spurenelemente wie Kobalt, Nickel, Selen, Eisen, Molybdän und Natrium sind für das Wachstum und Überleben der Mikroorganismen notwendig (Demirel und Scherer, 2011; Lebuhn et al., 2014; Hartmann et al., 2015; Abdel Azim et al., 2017). Wenn diese Spurenelemente nicht in bestimmten Konzentrationen im Gärmedium vorliegen, findet eine Hemmung des Prozesses statt. Spurenelementmangel wird in der Praxis sehr häufig bei der Monovergärung nachgewiesen (z. B. Kobaltmangel bei Maismonovergärung). Eine Zudosierung von Spurenelementen muss jedoch mit besonderer Vorsicht erfolgen, da sie bei hohen Konzentrationen hemmend bzw. toxisch wirken können. 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.

1.3.2 Prozessprodukt „Biogas“

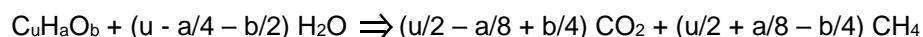
Aus der geschilderten Prozesskette entsteht das Produkt Biogas. Dessen Zusammensetzung variiert und ist abhängig von der Art sowie der Struktur des Ausgangsmaterials, dem verwendeten Anlagensystem, der Temperatur, der Verweilzeit und der Raumbelastung (Kleemann und Meliß, 1993). Grundsätzlich kann Biogas wie in Tabelle 6 angegeben charakterisiert werden.

Tabelle 6: Zusammensetzung von Biogas (verändert nach (Kaltschmitt et al., 2016))

Komponente	Methan (CH ₄)	Kohlendioxid (CO ₂)	Wasserdampf (H ₂ O)	Stickstoff (N ₂)	Wasserstoff (H ₂)	Sauerstoff (O ₂)	Schwefelwasserstoff (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 damit etwa so schwer als Luft (1,29 kg/Nm³). Wenn in Luft zwischen 6 und 22 % Biogas enthalten sind liegt ein explosives Gasgemisch vor und es besteht akute Explosionsgefahr bei offener Flamme. Vor Arbeiten im Fermenterinneren muss daher entsprechend belüftet werden, da sonst neben Erstickungsgefahr auch Explosionsgefahr besteht (Schulz et al., 1982). Schwefelwasserstoffkonzentrationen ab 200 ppm lähmen den Geruchssinn und führen ab 700 ppm zu Atemstillstand.

Insgesamt ist die Biogasproduktionsrate sowie -qualität deutlich abhängig vom verwendeten Substrat. Das Biogas- und Methanpotenzial lässt sich nach der Umsatzgleichung von (Buswell und Mueller, 1952) stöchiometrisch berechnen:



(u, a, b: Anzahl Atome der Elemente)

Im Prinzip werden hierbei aus den stöchiometrischen Mengen der enthaltenen Elemente die maximale Biogasausbeute bzw. die Menge an Methan und Kohlenstoffdioxid berechnet. Da auf diese

Weise der biologische Abbaugrad unberücksichtigt bleibt, kann dies für unterschiedlichste Einsatzstoffe zu sehr ähnlichen Ergebnissen führen.

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.

Basierend auf der Futtermittelanalytik und den Biogaspotenzialen der drei organischen Hauptstoffgruppen Rohprotein, Rohfett und Kohlenhydrate kann das Biogaspotenzial der Einsatzstoffe berechnet werden. Eine grobe Abschätzung der zu erwartenden Biogasmengen und -erträge kann mit den in Tabelle 7 angegebenen Daten erfolgen, wenn die Zusammensetzung der Ausgangssubstrate bekannt ist. Das Biogaspotenzial ist jedoch auch bei Verwendung dieses Verfahrens für viele unterschiedliche NawaRo ähnlich, da keine Differenzierung zwischen schwer abbaubaren Fraktionen (z. B. Fasern) und leicht abbaubaren Fraktionen (z. B. Stärke) erfolgt.

Tabelle 7: Theoretische Gasausbeuten (nach Kleemann und Meliß (1993); Baserga (1998); VDI 4630 (2016))

Substrat	Liter Gas / kg TM	CH ₄ [%]	CO ₂ [%]
Rohprotein	700	70 - 71	29 - 30
Rohfett	1.200 – 1.250	67 - 68	32 - 33
Kohlenhydrate	790 - 800	50	50

Um plausible maximale Biogausausbeuten vorhersagen zu können, wurden Regressionsmodelle entwickelt. Diese mathematischen Modelle wurden unter Einbeziehung der chemischen Untersuchungen der Einsatzstoffe und der experimentellen Werte aus Batchtests entwickelt. Die Regressionsmodelle weisen in der Regel einen geringen Schätzfehler auf und liefern plausible Werte, wenn die chemische Zusammensetzung des untersuchten Einsatzstoffes innerhalb des Kalibrierungsbereichs des Modells liegt. An dieser Stelle muss erwähnt werden, dass die Abwägung zwischen der Robustheit eines Modells und dessen Schätzfehler entscheidend ist. Normalerweise lässt sich der Schätzfehler über gruppenspezifische Modelle weiter vermindern. Allerdings sind diese Modelle dann weniger robust, d. h. nur für bestimmte Einsatzstoffe geeignet, da externe Faktoren (z. B. neue Pflanzensorten, Wachstumsbedingungen etc.) nur dann berücksichtigt werden können, wenn diese Information im für die Kalibrierung verwendeten Datensatz enthalten ist (Dandikas et al., 2020).

Bei einer einmaligen Substratzugabe beginnt mit der Hydrolyse die Zersetzung des Ausgangsmaterials. In dieser Startphase wird noch 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 (Abbildung 4).

In der Praxis werden Fermenter in der Regel ständig mit neuem Einsatzstoff beschickt, so dass sich je nach Art und Häufigkeit der Einsatzstoffzugaben eine mehr oder weniger konstante Gesamtgasproduktion aus summierten Überlagerungen des in Abbildung 4 dargestellten Verlaufes ergibt.

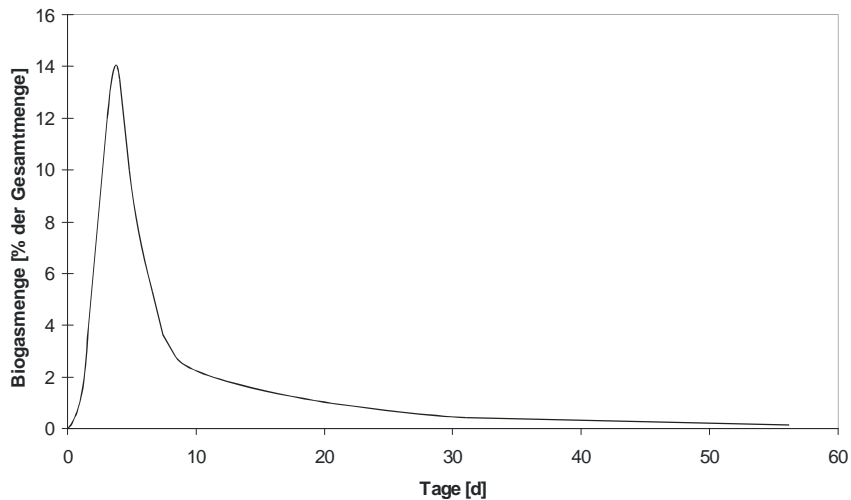


Abbildung 4: Zeitlicher Verlauf der Biogasproduktion nach einer einmaligen Substratgabe (Batch-Test)

Ein weiterer wichtiger Aspekt der Gasproduktionsrate besteht in der Abhängigkeit der Biogasausbeute (in m^3 Gas je kg zugeführter organischer Trockenmasse) 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 (Abbildung 5). In Praxisanlagen steigt während der erstmaligen Fermenterbefüllung („Anfahrbetrieb“) die Gasbildungsrate in m^3 pro m^3 Fermenter 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.

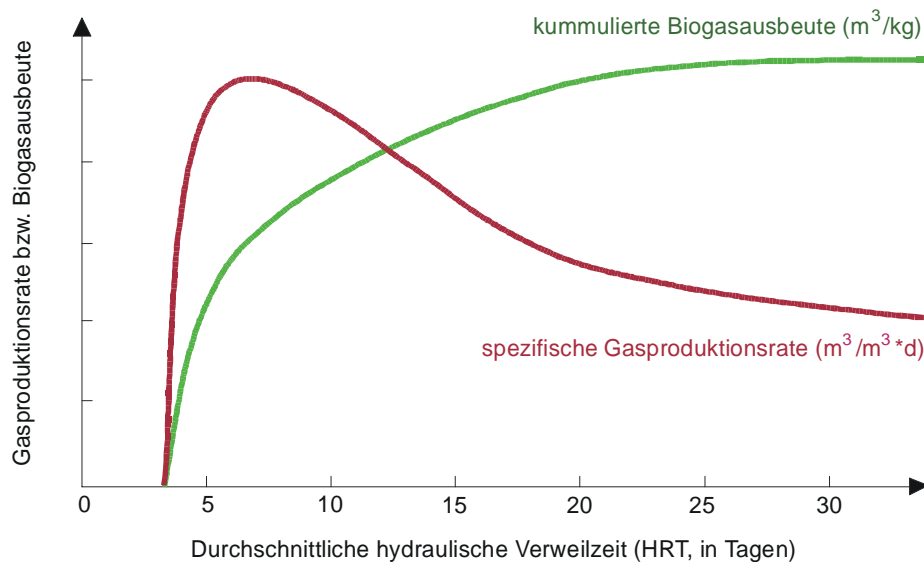


Abbildung 5: Fermentervolumenbezogene Gasproduktionsrate und substratspezifische Biogasausbeute in Abhängigkeit der hydraulischen Verweilzeit in einem Anaerobfermenter (nach MLUV (2006))

Dieses Verhalten ist darauf zurückzuführen, dass mit zunehmender hydraulischer Verweilzeit im Fermenter das Material nicht mehr so schnell abgebaut werden kann wie zu Beginn, da die leicht abbaubaren Substanzen verbraucht sind. 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 Einsatzstoffe eingesetzt, würden die Zeiträume der Kurvendynamik nach Abbildung 5 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 3 bis 4 kg oTM m⁻³ d⁻¹. In Anlagen mit mehreren in Reihe geschalteten Fermentern können Raumbelastungen im ersten Fermenter von bis zu 10 kg oTM m⁻³ d⁻¹ realisiert werden, da die Möglichkeit besteht die erste Stufe durch Rezirkulat aus einer nachfolgenden Stufe zu entlasten. Diese Zahlen sind als Richtwerte zu verstehen. In Praxisanlagen werden sie in Einzelfällen deutlich überschritten. Adaptierte Biozönosen und günstige Eigenschaften der Einsatzstoffe sind dann der Grund dafür, dass keine Beeinträchtigungen auftreten (siehe auch Kapitel 1.5).

1.4 Einsatzstoffe

Die anaerobe Fermentation organischer Einsatzstoffe oder Abfälle ist in Bayern zu einem integralen Bestandteil der Kreislaufwirtschaft geworden. Die Menge des dabei erzeugten Biogases hängt von vielen Faktoren ab. Entscheidend hierbei ist die Art des Einsatzstoffs und dessen chemische Zusammensetzung. Biogasanlagen werden meist als Kofermentationsanlagen in Flüssigfermentation betrieben, wobei dem Fermenter neben Gülle als Grundsubstrat andere organische Stoffe als Kosubstrate zugeführt werden. Durch den Einsatz dieser Kosubstrate lässt sich die Biogasproduktivität deutlich steigern und somit das Kosten-Nutzen-Verhältnis erheblich verbessern (Plöchl und Heiermann, 2002). Die Bewertung der Einsatzstoffe erfolgt nach verschiedenen Kriterien. Zu berücksichtigen sind Methanertragspotential und Einfluss auf die Mikrobiologie und den Chemismus des anaeroben Abbaus. Zudem dürfen Risiken in den Bereichen Schadstoffeintrag (Gehalt an Schwermetallen und organischen Schadstoffen) und Hygiene (Gehalt an pathogenen Keimen) nicht außer Acht gelassen werden. In diesem Kapitel werden ausgewählte Einsatzstoffe, nach ihrer Herkunft gruppiert und charakterisiert. Die Einsatzstoffe werden anhand der Ergebnisse von Batch-Gärversuchen (Laborbedingungen) beurteilt. Neben der maximalen Biogasausbeute (Biogaspotenzial) liefert die Kinetik der Biogasproduktion (Abbaugeschwindigkeit) wichtige Informationen für die Charakterisierung von Einsatzstoffen. Die Abbaugeschwindigkeit eines Substrates kann durch den $k_{h,0.5}$ -Wert beschrieben werden. Je höher der $k_{h,0.5}$ -Wert ist, desto schneller werden 50 % der gesamten Biogasausbeute erreicht (Dandikas et al., 2018).

Für eine nachhaltige Biogaserzeugung aus Energiepflanzen sollten jedoch nicht Höchsterträge einzelner Kulturarten, sondern Spitzenerträge von standortangepassten und ökologisch ausgewogenen Fruchtfolgesystemen angestrebt werden (Amon, 2003).

Grundsätzlich ist der Einsatz neuer Einsatzstoffe mit der zuständigen Behörde abzustimmen, insbesondere bei Abfallstoffen, Reststoffen, Nebenprodukten und Landschaftspflegematerial ist im Vorfeld abzuklären, ob bei deren Einsatz die Vorgaben der Bioabfallverordnung oder anderer gesetzlicher Vorschriften zusätzlich einzuhalten sind.

1.4.1 Landwirtschaftliche Einsatzstoffe

Als Substrate eignen sich verschiedenste Sorten von Energiepflanzen wie Mais, Wiesen gras, Klee gras, Sudangras, durchwachende Silphie, Futterrüben u. v. a. m., aber auch Nebenprodukte des Pflanzenbaus und die verschiedenen Formen von Rückständen aus der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung (Wirtschaftsdünger) (Amon, 2003). Rund 95 % der Biogasanlagen in Deutschland sind landwirtschaftliche Biogasanlagen. Zur Gaserzeugung werden tierische Exkrememente (Flüssig- und Festmist) mit einem massebezogenen Anteil von rund 50 % und nachwachsende Rohstoffe (NawaRo) mit einem massebezogenen Anteil von rund 49 % verwendet (Rensberg et al., 2017).

Die Biogaserträge landwirtschaftlicher Substrate können erheblich variieren: TM-Gehalte sowie die Zusammensetzung der Inhaltstoffe können aufgrund natürlicher Schwankungen zu unterschiedlichen Biogaserträgen und -qualitäten führen. Beim Einsatz dieser Substrate ist auf eine möglichst gleichmäßige Beschaffenheit des Gärgutes zu achten. Richtwerte für die Gasausbeute wurden vom KTBL veröffentlicht (KTBL, 2015).

1.4.1.1 Flüssigmist (Gülle)

Häufig dient Flüssigmist als Grundsubstrat. Dieser Einsatzstoff stabilisiert auf Grund seiner Zusammensetzung den Fermentationsprozess und gleicht Schwankungen in der Qualität des Gärmediums aus. Rinder- und Schweinegülle werden bedingt durch die anfallenden Mengen und Fermentations-eigenschaften bevorzugt. Rindergülle ist mit einem Anteil von rund 59 % der wesentliche Einsatzstoff der Wirtschaftsdünger in Biogasanlagen, Schweinegülle folgt mit 17 % (Daniel-Gromke et al., 2017). Wegen der niedrigen TM-Gehalte kann Gülle mit Pumpen in den Fermenter eingebracht werden. Ihr Methanertrag liegt zwischen 10-20 l/kg FM. In Abbildung 6 sind die Methanausbeute und die Konstante der Abbaugeschwindigkeit (Reaktionskonstante bei 50 % des Biogaspotentials) von Rinder- und Schweinegülle dargestellt.

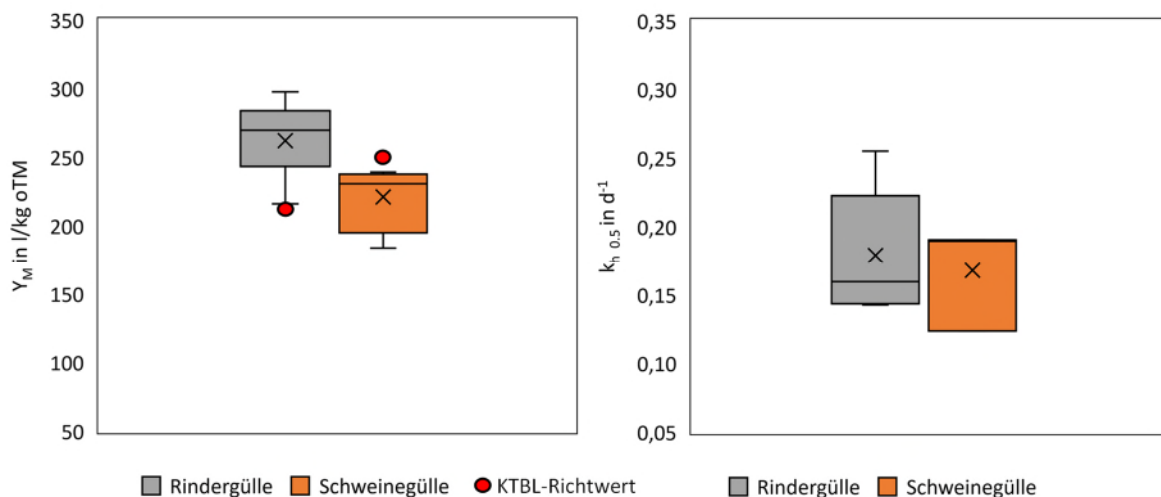


Abbildung 6: Boxplot der Methanausbeute (links) und der Konstante der Abbaugeschwindigkeit (rechts) von Rinder- und Schweinegülle. Daten aus Batchversuchen der LfL.

1.4.1.2 Festmist

Aufgrund seiner zähen Konsistenz ist der Festmisteinsatz im Vergleich zu Flüssigmist mit einem deutlich höheren technischen Aufwand verbunden. Der Methanertrag von Festmist ist höher als der von Flüssigmist. In landwirtschaftlichen Biogasanlagen werden etwa 9 % des Inputs der Wirtschaftsdünger aus Rinderfestmist und nur 2 % aus Geflügelfestmist bereitgestellt (Daniel-Gromke et al., 2017). Bei Rindermist liegt der Methanertrag bei rund 40 l/kg FM. Bei Geflügelmist liegt er aufgrund

des hohen TM-Gehalts bei rund 140 l/kg FM. Abbildung 7 zeigt die Methanausbeute und die Konstante der Abbaugeschwindigkeit von Rinder- und Geflügelmist.

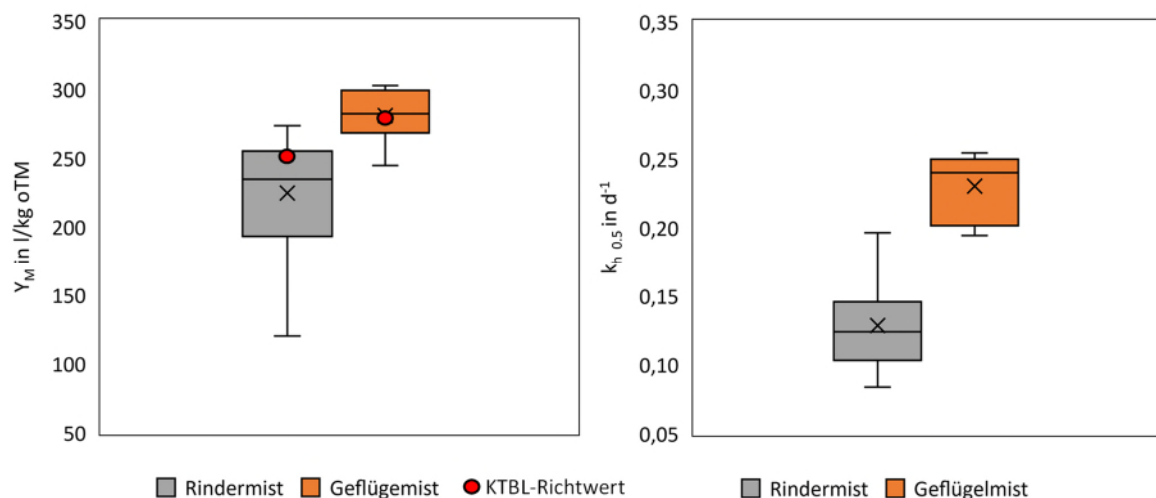


Abbildung 7: Boxplot der Methanausbeute (links) und der Konstante der Abbaugeschwindigkeit (rechts) von Rinder- und Geflügelmist. Daten aus Batchversuchen der LfL.

1.4.1.3 Reststoffe der Pflanzenproduktion (Koppelprodukte)

Unter landwirtschaftlichen Koppelprodukten werden alle nicht verwerteten Stoffe aus der Pflanzenproduktion verstanden (z. B. Körnermaisstroh, Kartoffelkraut, Rübenblatt, etc.). Da sie bei der Ernte anfallen und keine zusätzliche Flächennutzung erfordern, entsteht keine Nutzungskonkurrenz zu anderen Feldfrüchten. Der monetäre Nutzen von Koppelprodukten hängt ab vom flächenbezogenen Methanertrag, dem Aufwand zur Bergung, der Transportentfernung und einer ggf. erforderlichen Substrataufbereitung. In diesem Zusammenhang sind regionale, anlagentechnische und betriebswirtschaftliche Rahmenbedingungen auf dem eigenen Betrieb zu berücksichtigen. Die energetische Verwertung des Körnermaisstrohs z. B. ist besonders für Körnermais-Anbauregionen von hohem Interesse, da dieses ein hohes Biogas- und Biomassepotenzial aufweist (Abbildung 8).

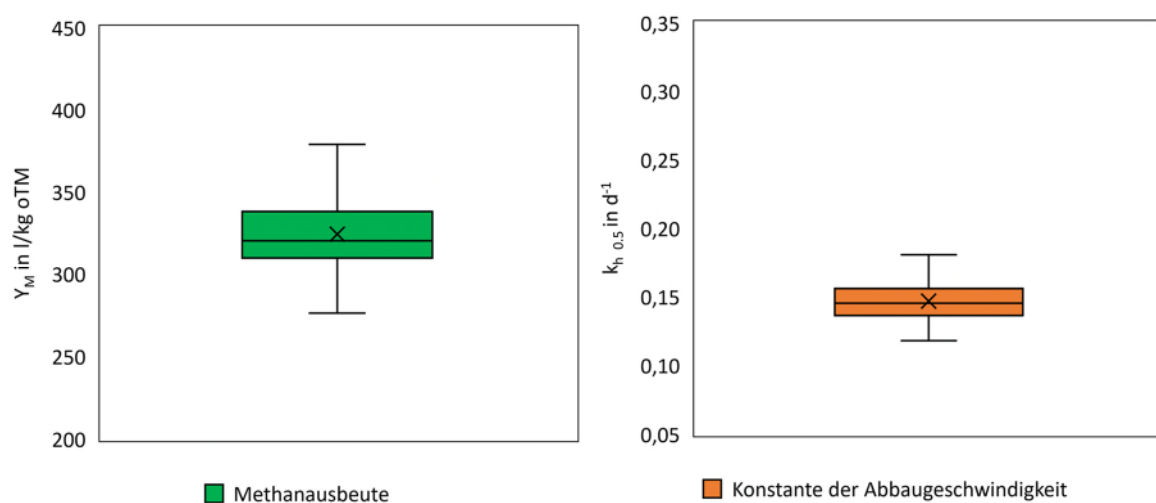


Abbildung 8: Boxplot der Methanausbeute (links) und der Konstante der Abbaugeschwindigkeit (rechts) von Körnermaisstroh. Daten aus Batchversuchen der LfL.

1.4.1.4 Nachwachsende Rohstoffe

In der Landwirtschaft ist die Nutzung von speziell zur Energiegewinnung angebauten Pflanzen üblich. Es werden Dauerkulturen, Silomais, Getreideganzpflanzen, Gräser mit hohem Biomasseertrag, Rüben und andere Feldfrüchte zur Biogasgewinnung verwendet. Bei der Nutzung von Energiepflanzen wird das Ziel verfolgt, einen möglichst hohen Methanertrag pro Hektar bei geringstmöglichen Kosten für Ernte, Anbau und Konservierung zu erreichen. 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.

1.4.1.4.1 Maissilage

Silomais nimmt bei Biogasanlagen einen massebezogenen Anteil von 72 % der NawaRo ein (Daniel-Gromke et al., 2017). Innerhalb der nachwachsenden Rohstoffe ist daher Silomais die wichtigste Kulturpflanze. Das Trockenmasse-Ertragspotential liegt zwischen 180 und 210 dt/ha⁻¹. Dieser Wert ist jedoch stark abhängig von den Standorten und den Sorten (Eder et al., 2012).

Aufgrund der starken Zunahme des Maisanbaus, wurde mit dem EEG 2012 erstmals der Einsatz von Mais und Getreidekorn zur Stromerzeugung in jedem Kalenderjahr auf 60 Massenprozent begrenzt. Das EEG 2021 limitiert den Mais- oder Getreidekornanteil noch weiter auf 40 Massenprozent. Neben den kontrovers geführten Diskussionen zu möglichen Folgen einer Intensivierung des Maisanbaues haben Studien gezeigt, dass eine Monovergärung von Energiepflanzen über einen längeren Zeitraum hinweg biochemische oder mechanische Prozessstörungen verursachen kann (Lebuhn et al., 2008; Koch et al., 2009; De Moor et al., 2013).

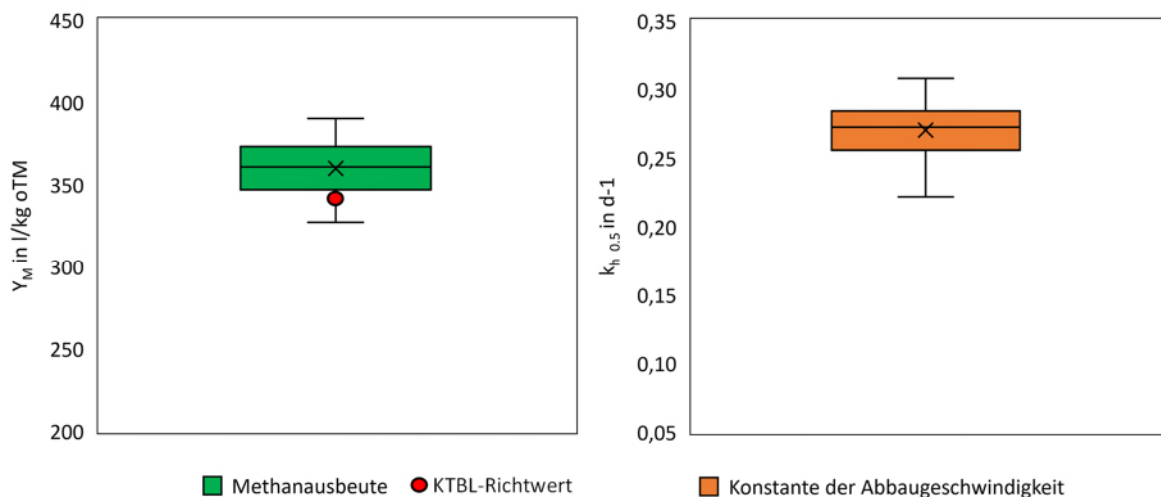


Abbildung 9 : Boxplot der Methanausbeute und der Konstante der Abbaugeschwindigkeit von Maissilage. Daten aus Batchversuchen der LfL.

1.4.1.4.2 Grassilage

Grassilage kann aus einer ein- oder mehrjährigen Ackernutzung oder von Dauergrünlandflächen gewonnen werden. Abhängig vom Standort, den Umweltbedingungen sowie der Intensität der Grünlandnutzung schwanken die Erträge sehr stark. Je nach Witterung und Klimabedingungen sind bei intensiver Nutzung drei bis fünf Ernten im Jahr möglich. Bezogen auf Ertragshöhe und Qualität ist der erste Aufwuchs die wichtigste Ernte des Jahres. Im Vergleich dazu hat der zweite Aufwuchs üblicherweise eine geringere Energiedichte und ist in der Zusammensetzung sehr heterogen. Der dritte Aufwuchs ist in der Regel qualitativ homogener. Beim Graseinsatz sind zum einen die hohen Mechanisierungskosten und zum anderen hohe Stickstofffrachten, welche zu Problemen bei der Vergärung führen können, zu beachten. Grassilage kann auch von extensiv genutzten Naturschutzflächen (Landschaftspflegematerial) geerntet werden, wobei hier aufgrund hoher Ligningehalte geringere Gasausbeuten realisiert werden. Letzteres kann durch eine mechanische Aufbereitung teilweise kompensiert werden (vgl. 1.4.3).

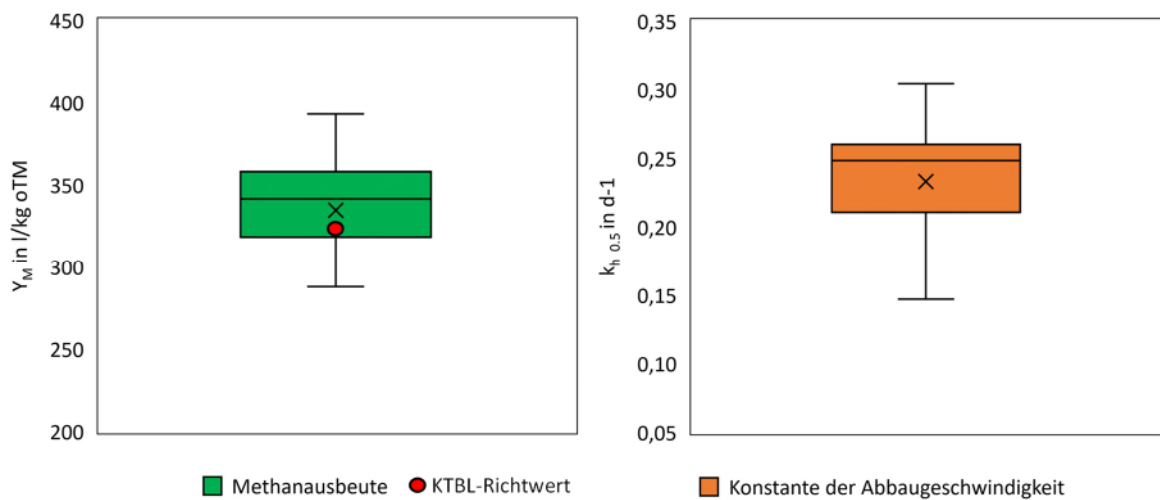


Abbildung 10: Boxplot der Methanausbeute und der Konstante der Abbaugeschwindigkeit von Grassilage. Daten aus Batchversuchen der LfL.

1.4.1.4.3 Getreide-GPS

Bei der Einsatzhäufigkeit der nachwachsenden Rohstoffe steht die Getreide-Ganzpflanzensilage (GPS) mit 6,5 % an dritter Stelle. GPS hat ein niedrigeres Ertragspotential als der Silomais, allerdings lassen sich durch den GPS-Anbau maisbetonte Fruchtfolgen auflockern und vielgliedrige Energiefruchtfolgen gestalten. Der Anbau von GPS ist somit ein Beitrag zur langfristigen Sicherung der Bodenfruchtbarkeit und des Ertragspotentials. Die Ernte von GPS ist ab einem Trockensubstanzgehalt von 28 % möglich, wenn aus dem Stand gehäckselt und siliert werden kann. Unabhängig von der jeweiligen Getreideart wird dieser Wert etwa ab der Milchreife erreicht. Die Methanausbeute von GPS liegt bei 330 l/kg oTM (Sticksel et al., 2015).

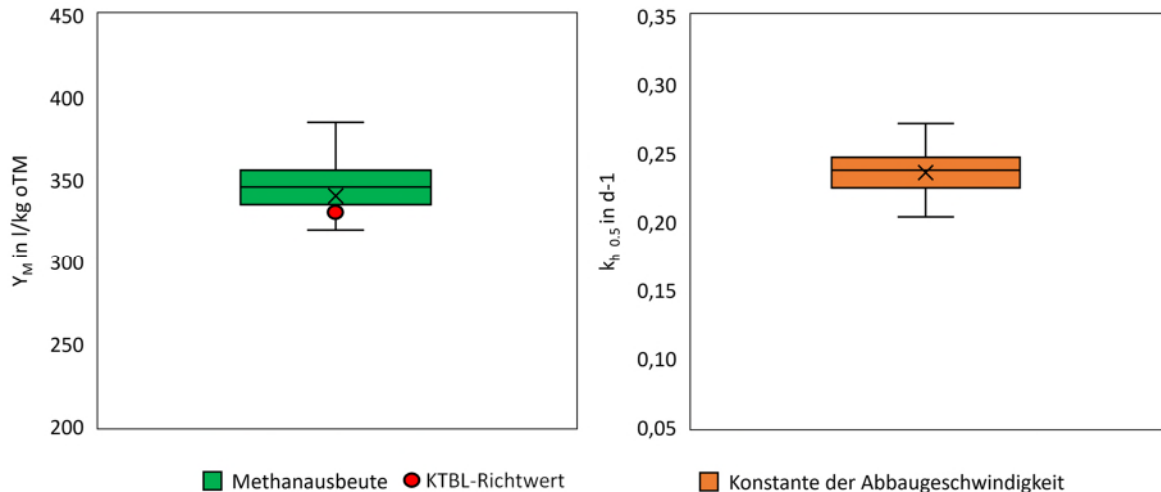


Abbildung 11: Boxplot der Methanausbeute und der Konstante der Abbaugeschwindigkeit von Gerste-GPS. Daten aus Batchversuchen der LfL.

1.4.2 Bestimmte Schlachtabfälle

Bei Schlachtabfällen handelt es sich um sehr nährstoffreiche Substrate mit hohen Methanertragspotenzialen. Ihr Einsatz ist mit dem Risiko der Belastung mit pathogenen Mikroorganismen verbunden. Das wesentliche Risiko besteht darin, dass durch den Materialfluss auf Biogasanlagen Infektionsketten zwischen Tier und Tier sowie Tier und Mensch geschlossen werden (siehe Kapitel 2.2.6). Maßnahmen zur Unterbrechung dieser Infektionsketten sind durch die Einhaltung rechtlicher Regelungen (siehe Kapitel 2.2.6) und technischer Maßnahmen zur Hygienisierung (siehe Kapitel 1.5.2.3) zu erfüllen.

1.4.3 Landschaftspflegematerial

Nach EEG 2012 gelten als Landschaftspflegematerial alle Materialien, die bei Maßnahmen anfallen, die vorrangig und überwiegend den Zielen des Naturschutzes und der Landschaftspflege im Sinne des Bundesnaturschutzgesetzes dienen und nicht gezielt angebaut wurden. Marktfrüchte, Grünschnitt, auch Straßenbegleitgrün oder von Abstandsflächen von Industrie- und Gewerbegebieten sowie Flughafengrünland zählen nicht dazu. Als Landschaftspflegegras gilt nur Grünschnitt von maximal zweischürigem Grünland (BGBl., 2011). Aufgrund der Tatsache, dass Landschaftspflegematerial oft auf dezentral gelegenen, kleinparzelligen Biotopflächen wächst, kann die Pflege meistens nur einmal jährlich erfolgen. Landschaftspflegematerial weist hohe Ligningehalte auf. Daher ist das Biogaspotenzial niedrig und bestimmte Techniken bzw. Verfahren zur Aufbereitung sind nötig. Allerdings ist die energetische Nutzung von Landschaftspflegematerial in Biogasanlagen heute bereits Stand der Technik und trägt damit zum Schutz ökologisch wertvoller Flächen und zur Stabilisierung der wirtschaftlichen Situation geeigneter Biogasanlagen bei (Letalik et al., 2021).

1.4.4 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, Keltereien, Zuckerindustrie), sind unter bestimmten Rahmenbedingungen für die Fermenta-

tion gut geeignet, da sie geringe Trockenmassegehalte aufweisen und meist biologisch leicht abbaubar sind. Der Einsatz solcher Stoffe ist mit der Genehmigungsbehörde im Vorfeld abzuklären (vgl. auch Kapitel 2.2.3 und Kapitel 2.2.6).

1.4.4.1 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 dieser Einsatzstoffe ist groß. In Deutschland verwendet die Stärkeindustrie vorwiegend Weizen und Kartoffeln und z. T. auch Mais. Dabei wird der Frucht die Stärke in einem Auswasch- und Separationsvorgang entzogen. Das verbleibende Fruchtwasser enthält zum Teil erhebliche Anteile eiweißhaltiger Reststoffe. Die bei der industriellen Verarbeitung von Kartoffeln entstehen Reststoffe, sind im Wesentlichen Kartoffelschalen, Rohkartoffeln mit Qualitätsmängeln, Stärke im Waschwasser sowie fehlerhafte Endprodukte.

Die vorwiegend festen Rückstände, die nach dem Auspressen des Saftes von Pflanzenbestandteilen übrigbleiben (z. B. Fruchtsaftindustrie) werden Trester genannt. Trester entsteht beim Auspressen von Trauben, Äpfeln, Karotten oder Tomaten. Die Trester der meisten Früchtewerden als Viehfutter und teilweise als Dünger verwendet.

Als Rückstand bei der Biererzeugung fallen Treber an, die meist als Viehfutter Verwendung finden (Bier-/Hopfentreber). Weitere Rückstände sind Bierhefen und Malzkeime.

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 verbraucht 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 Molkereibetrieb enthalten einen sehr hohen Wasseranteil und sind nach der Tierische Nebenprodukte-VO (EG) Nr. 1069/2009 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, Kalzium 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 nicht mehr absetzbare Ware (fehlerhaft, beschädigt etc.).

1.4.4.2 Weitere Prozessrückstände der Industrie

Auch bei anderen Industrien, die keine Lebensmittel verarbeiten, entstehen Prozessrückstände die man in Biogasanlagen als Einsatzstoffe verwenden kann. Zum Beispiel fällt bei der Umesterung von Rapsmethylester, auch Biodiesel genannt, Glycerin als Nebenprodukt an, das in einer Biogasanlage sehr hohe Methanerträge liefert.

Ein anderer möglicher Einsatzstoff 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 Gärückstandes nachteiligen Spurenstoffe (Schadstoffe) enthalten sind. Bei Einsatzstoffen, die nicht im Anhang der Bioabfallverordnung aufgeführt sind, ist eine Ausnahmegenehmigung nach §6 Abs. 2 BioAbfV erforderlich.

1.4.5 Kommunale und gewerbliche Reststoffe

Feste Bioabfälle aus der kommunalen Sammlung spielen in der landwirtschaftlichen Biogasproduktion i. d. R. keine 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 Gärückstandes mindern als auch die Gasausbeute reduzieren (siehe Kapitel 1.6).

Kommunale und gewerbliche Abfälle können sowohl leicht als auch schwer abbaubare Stoffe enthalten. Der Einsatz solcher Materialien ist mit der Genehmigungsbehörde abzuklären (vgl. hierzu auch Kapitel 2.2.3 und 2.2.6).

1.4.5.1 Biotonne

Reststoffe aus der Biotonne sind wegen ihres hohen Anteils an Störstoffen und ihrer heterogenen Zusammensetzung als schwer vergärbar einzustufen.

1.4.5.2 Gastronomiebereich

Reststoffe aus dem Gastronomiebereich werden nach ihrer Zusammensetzung in zwei Gruppen unterteilt. Auf der einen Seite gibt es Abfälle aus Backfabriken und Konditoreien (Altbrot, Hefe, Backabfälle), die in ihrer Zusammensetzung relativ homogen sind und mit ca. 90 % einen hohen durchschnittlichen TM-Gehalt aufweisen. Aufgrund des meist großen Stärkeanteils liefern sie hohe Gaserträge. 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.

1.4.6 Grüngut aus Wertstoffhöfen

Einige Bioabfälle, wie z. B. Gras aus Straßenbegleitgrün, aus Parks oder von Flugplätzen stellen ein Entsorgungsproblem dar. Es muss gemäht werden und oft wird das Gras kompostiert. Das Mähgut kann unter Einhaltung der rechtlichen Bedingungen in Biogasanlagen verwendet werden. Laub oder holziges Material eignet sich wegen seines hohen Ligningehaltes hingegen weniger zur anaeroben Fermentation als grasartige Biomasse (vgl. Kapitel 2.2.3).

1.4.7 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. Dies ist von Belang, wenn der bei der Fermentation anfallende Gärückstand 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 für Gärrückstände regelt die BioAbfallV.

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

1.4.7.1 Maßnahmen zur Risikominderung

Durch eine entsprechende Aufbereitung und Konditionierung können mit Störstoffen belastete Ko-substrate teilweise so weit gereinigt werden, dass sie in Biogasanlagen mitverarbeitet werden können. Jeder der angesprochenen Konditionierungsschritte verursacht einen zeitlichen, baulichen und/oder energetischen Aufwand und entsprechende Kosten. Schwermetalle können auf Biogasanlagen unter Praxisbedingungen nicht entfernt werden. Deshalb ist besonders darauf zu achten, dass es nicht zu einer Anreicherung im Gärrückstand bzw. in den Böden kommt, auf die dieser Gärrückstand ausgebracht wird. Mit organischen Schadstoffen belastete Reststoffe sollten in Biogasanlagen nicht eingesetzt werden.

1.5 Verfahrens-, Geräte- und Anlagentechnik

Die Maschinen- und Gerätetechnik zur Biogasgewinnung ist vielfältig. Es gibt zahlreiche Möglichkeiten und Kombinationen einzelne Komponenten zu kompletten Systemen zusammenzubauen. Aus diesem Grund ist bei der Anlagenplanung eine Fachfirma hinzuzuziehen, die die Einzelkomponenten und deren Auslegung auf die Anforderungen abstimmt. Dieser Schritt ist in Verbindung mit der Betriebsführung der Anlage entscheidend für einen reibungslosen Anlagenbetrieb. Die verwendeten Einsatzstoffe und die Art der Vergärung bestimmen letztendlich darüber, ob z. B. Anlagen zur Pasteurisierung oder Zerkleinerung erforderlich sind und wie beispielsweise Leitungen, Pumpen oder Rührwerke dimensioniert werden müssen.

Die folgenden Kapitel sind nach Verfahrensablauf geordnet:

- Anlieferung und Lagerung,
- Aufbereitung
- Fermentertechnik
- Gasaufbereitung
- Gasspeicherung
- Gasnutzung
- Gärrückstandsverwertung

In Abbildung 12 ist exemplarisch der schematische Aufbau einer bayerischen landwirtschaftlichen Biogasanlage, die mit Gülle und NawaRo (Kofermentation) beschickt wird, dargestellt. Bei der Beispiel-Biogasanlage beträgt der Gülleanteil in der Substratmischung bezogen auf die eingesetzte Frischmasse ca. 40 %. Sie ist mit einer Bemessungsleistung von 700 kW doppelt überbaut und kann Strom nach Bedarf einspeisen. Mit der Überschusswärme des BHKW vor Ort wird eine Trocknungsanlage für Ernteprodukte (z. B. Getreide) betrieben. Ein Satelliten- BHKW dient zur Versorgung einer Siedlung.

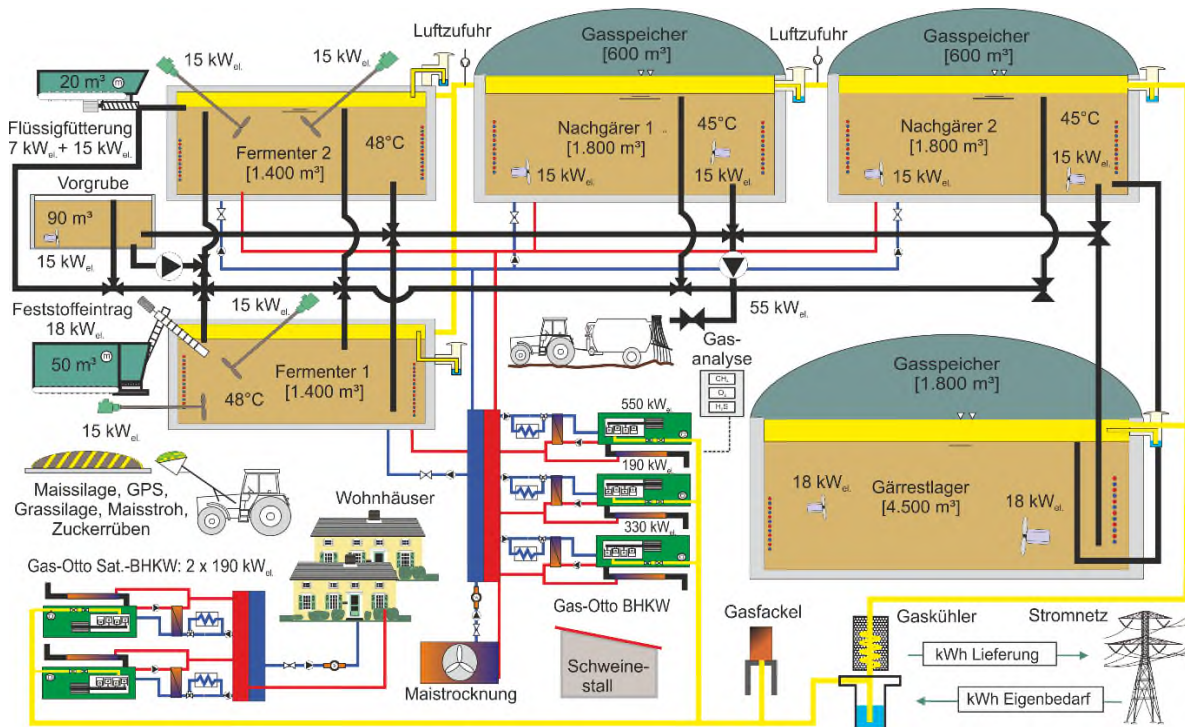


Abbildung 12: Schematischer Aufbau einer landwirtschaftlichen Biogasanlage (Beispiel, LfL 2021)

1.5.1 Anlieferung und Lagerung

Der Verfahrensbereich „Anlieferung“ ist i. d. R. nur für Anlagen von Bedeutung, die betriebsfremde Einsatzstoffe 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 richtet sich dabei nach den Liefermengen und -intervallen und der täglich eingetragenen Frischmasse. 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 – siehe auch Verordnung (EG) Nr. 1069/2009 und BioAbfV) eingesetzt, muss je nach Material eine mehr oder weniger strikte Trennung zwischen Annahmestation und Lager vom landwirtschaftlichen Betrieb (Tierhaltung) gegeben sein. Eine Durchmischung von hygienisch bedenklichem und unbedenklichem Material wird verhindert, indem ersteres vor dem Eintrag in den Fermenter einer Pasteurisierung unterzogen wird.

1.5.2 Aufbereitung

Die Konservierung nachwachsender Rohstoffe aus landwirtschaftlicher Produktion wird in der Praxis nach dem Stand der Technik analog zur Futtermittelkonservierung für die Nutztierhaltung durchgeführt. Die Zerkleinerung dient u. a. der Vergrößerung mikrobiologisch angreifbarer Oberflächen und damit der Beschleunigung des Abbauprozesses und gegebenenfalls auch der Erhöhung der Methanausbeute, sowie der Vermeidung von Verstopfungen, Sedimentation und Flotation.

Landwirtschaftliche Nebenprodukte sind i. d. R. lignocellulosereiche Einsatzstoffe. Lignocellulose stabilisiert die Zellwand der Pflanze und schützt sie vor enzymatischem bzw. mikrobiellem Abbau. Durch die Substrataufbereitung wird die stabile Struktur zwischen den einzelnen Bestandteilen der Lignocellulose aufgebrochen. Um speziell den Abbau faserreicher Biomasse in Biogasanlagen

durch eine Vorbehandlung zu steigern, stehen eine Reihe physikalischer, chemischer und biologischer Verfahren zur Verfügung. Mehrstufige Anlagenkonzepte und physikalische Aufschlussverfahren sind in der landwirtschaftlichen Praxis weit verbreitet, chemische (z. B. Säurevorbehandlung) und biologische (z. B. Hydrolysefermenter) Verfahren weniger oder noch gar nicht (Kissel et al., 2019).

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 Abfallpulpfern.

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) sind mittlerweile verbreitet. Da sie mit zusätzlichen Kosten verbunden sind, ist eine Kosten-Nutzen-Analyse im Vorfeld sinnvoll.

1.5.2.1 Konservierung

Für einen gleichmäßigen Biogasertrag ist eine kontinuierliche Fermenterbeschickung mit möglichst gleichmäßiger Substratzusammensetzung Voraussetzung. Da sich die Mikrobiologie erst wieder an das jeweilige Substrat anpassen muss, können plötzlich durchgeführte Futterumstellungen erhebliche Einbußen beim Biogasertrag zur Folge haben. Da die Einsatzstoffe nicht während des gesamten Jahres in frischer Form zur Verfügung stehen, ist eine Konservierung und Lagerung erforderlich. 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. Im Ausgangsmaterial müssen ausreichend Feuchte und wasserlösliche Kohlenhydrate als Nahrung für die Milchsäurebakterien vorhanden sein. Meist sind auf landwirtschaftlichen Betrieben die für die Silierung erforderlichen Maschinen und Lagerräume vorhanden. Der Silierungsprozess ist nach ca. zwölf Wochen sicher abgeschlossen, danach kann die Silage verwendet werden. Bei der Planung einer Biogasanlage muss, der für NawaRo erforderliche Platzbedarf berücksichtigt werden.

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 und ligninhaltige Substrate (Stroh, Gras, etc.), deren Struktur aufgebrochen und aufgeschlossen werden muss. Durch eine Zerkleinerung kann die Abbaugeschwindigkeit erhöht werden. Dadurch werden höhere Abbauraten bei kürzeren Verweilzeiten ermöglicht, wodurch die Effektivität der Fermentation erheblich gesteigert werden kann. Eine Steigerung der realisierbaren Methanausbeute wurde für einige Einsatzstoffe wissenschaftlich nachgewiesen. Allerdings haben die Verfahren einen hohen Energieverbrauch, der mit dem Feuchtigkeitsgehalt, der anfänglichen Partikellänge und dem Grad der Zerkleinerung bzw. der Intensität des Aufschlusses ansteigt (Kissel et al., 2019). Folgende Aufbereitungsverfahren haben sich in der Praxis für unterschiedliche Einsatzstoffe als geeignet erwiesen:

- Zerschneiden (Schneidmühle/Schredder)
- Zerreißen und Zerfasern (Hammermühle/Querstromzerspannung/Rotierende Zahnscheiben/Extrusion)
- Elektrokinetische Desintegration
- Ultraschall-Desintegration

- Hydrodynamische Kavitation
- Thermische Behandlung (Dampfexplosion)

Darüber hinaus werden durch langfaserige Stoffe verursachte Probleme wie

- Verminderung der Pumpfähigkeit,
- Verstopfung von Leitungen,
- Festsetzung und Verschleiß von Rührwerken und
- Anstieg der Schwimmdeckenneigung

vermieden. Strukturstarke Substratbestandteile können vor der Beschickung in den Fermenter auch durch Dosiervorrichtungen mit Schneidwerkzeugen oder durch Schneidrührwerke oder -pumpen zerkleinert werden. Die Zerkleinerung hat vor einer vorgeschriebenen Pasteurisierung zu erfolgen.

1.5.2.3 Pasteurisierung

Regelungen zur Hygienisierungserfordernis für organische Abfälle finden sich vornehmlich in der Bioabfallverordnung (siehe Kapitel 2.2.3) und der Verordnung (EG) Nr. 1069/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates mit Hygienevorschriften für nicht für den menschlichen Verzehr bestimmte tierische Nebenprodukte (Nebenprodukteverordnung; siehe Kapitel 2.2.6).

In der Verordnung (EG) 1069/2009 werden tierische Nebenprodukte je nach Seuchenrisiko in drei Kategorien eingeteilt (siehe Kapitel 2.2.6). Material der Kategorie 2 – 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.

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 Kapitel 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 (Abbildung 13). Die Pasteurisierungsleistung richtet sich nach der Wasservorlauftemperatur, 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 hygienisieren. Um die Leistung der Anlage zu erhöhen, können mehrere Einheiten hintereinandergeschaltet werden. Bei zwei Behältern lässt sich dann die Leistung verdoppeln. Das Optimum ist 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 acht bis zehn Chargen pro Tag bewältigen. 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.

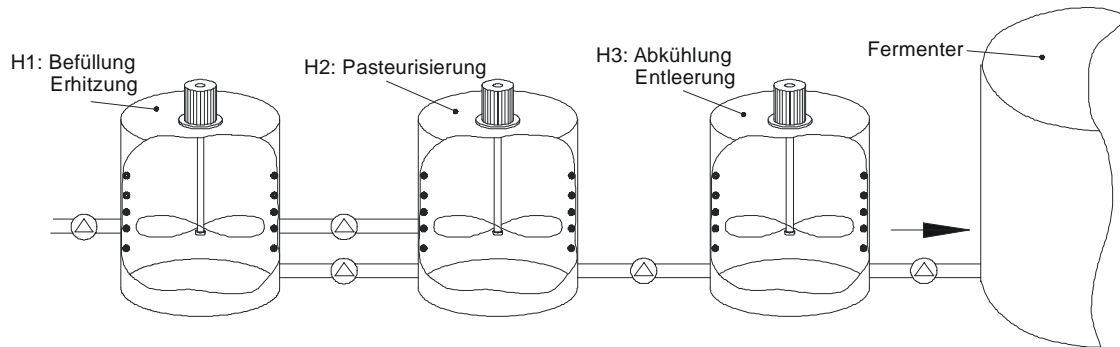


Abbildung 13: Absätziges bzw. quasikontinuierliches Pasteurisierungsverfahren (LfL, 2007)

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 (Abbildung 14). 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.

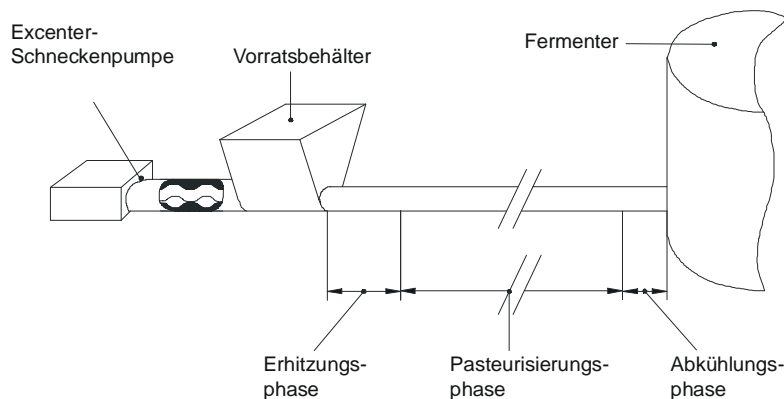


Abbildung 14: Kontinuierliches Pasteurisierungsverfahren (LfL, 2007)

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 entgegengewirkt werden.

1.5.3 Fermentertechnik

In diesem Kapitel wird nur auf die Technik zur Vergärung im Fermenter bzw. Biogaserzeugung eingegangen. Die Trennung der Fermenter bei zweiphasigen Verfahren in Hydrolyse- (Vorversäuerung) und Hauptfermenter führt oft dazu, dass der Hydrolysefermenter dem Bereich „Aufbereitung“ zugeordnet wird.

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 Anzahl der Prozesssysteme bzw. Fermenter als auch in der Fermentertemperatur und dem Feststoffmassegehalt des Substrates unterscheiden. Selbst bei den Anlagen mit mehreren Fermentern werden die Anlagen i. d. R. einphasig betrieben, d. h. in allen Fermentern finden sämtliche Phasen des anaeroben Abbaus (Hydrolyse bis Methanogenese) statt.

1.5.3.1.1 Stehende Fermenter (Haupt- und Nachgärbehälter)

Die stehenden Fermenter sind in der Regel runde Behälter aus Beton mit einem Gärvolumen von 100 m³ bis über 5.000 m³ (Abbildung 15). Stehende Fermenter sind volldurchmischt (siehe Kapitel 1.5.9). Dadurch ist eine Kontamination mit Bakterien des frisch zugeführten Substrats gewährleistet. Zusätzliche Maßnahmen zur Animpfung bestimmter Bereiche des Behälters müssen somit nicht getroffen werden. Bei landwirtschaftlichen Biogasanlagen werden vorwiegend volldurchmischte stehende Fermenter angewendet.

Unterschiedliche Literaturquellen geben eine maximale organische Faulraumbelastung von 3 bis 5 kg/m³ 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 Fermenter 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 Biogasanlagen mit stets wechselnden Substraten. Diese Erfahrung aus der Praxis bedarf allerdings noch einer quantitativen Analyse.

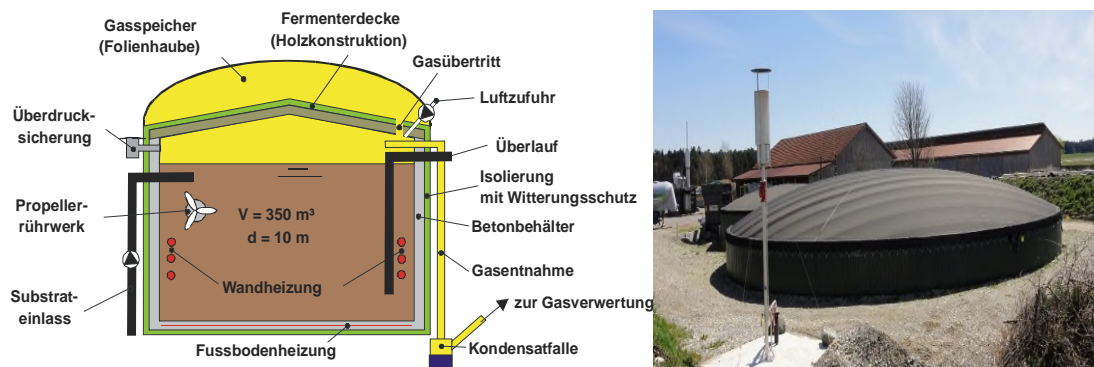


Abbildung 15: Beispiel eines stehenden Betonfermenters (LfL, 2021)

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. Erfolgt dies, wie es üblich ist mit abgekühltem Gärrückstand aus dem Gärrückstandslager, hat das 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.

1.5.3.1.2 Liegende Fermenter (Vorbehandlung und Hauptgärbehälter)

Liegende Fermenter aus Beton haben einen rechteckigen oder quadratischen Querschnitt. Baugrößen von 250 bis 1.000 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 (Abbildung 16).

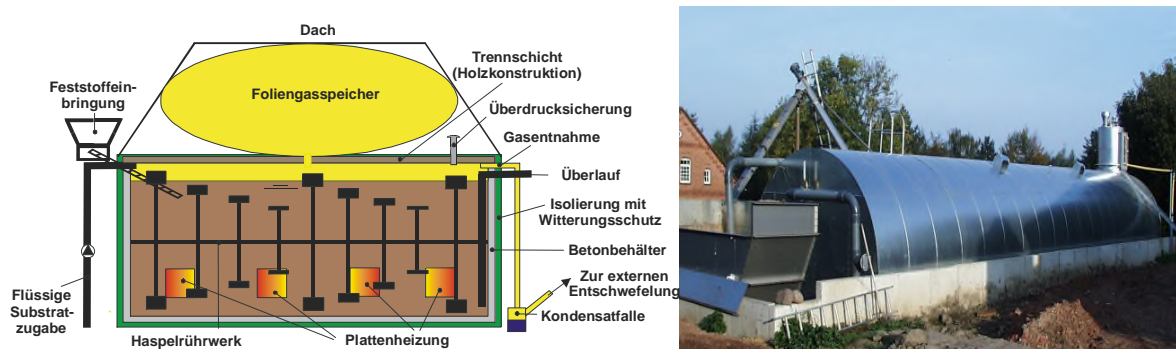


Abbildung 16: Beispiel eines liegenden Fermenters, links mit externer Entschwefelung und Einrichtung zur Gasspeicherung (LfL 2007)

Da der Durchmesser bzw. die Höhe liegender Fermenter in der Regel erheblich geringer ist als deren Länge, erhöhen sich im Vergleich zu stehenden Fermentern die Kosten für das Baumaterial. Der kleine Querschnitt ermöglicht allerdings die Installation von langsamdrehenden mechanischen Rührwerken, die quer zur Durchflussrichtung arbeiten und deren Rührpaddel nahezu den gesamten Faulraum erreichen. Trotz geringer Leistungsaufnahme bewirken sie eine optimale Durchmischung in vertikaler Richtung, und bewältigen auch hochviskose Gärsuspensionen mit TM-Gehalten 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

Pfropfenstromfermenter 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. Pfropfenstromfermenter können stärker belastet werden als volldurchmischte Behälter. Der räumlich getrennt ablaufenden Gärprozess erlaubt organische Belastungen zwischen 7 und 10 kg/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 können zum Verlust der erwünschten Pfropfenströmung führen.

In Biogasanlagen, die einer sehr hohen täglichen Faulraumbelastung ausgesetzt sind, besteht die Gefahr des Versäuerns des Fermenterinhalt. 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 entgegenzuwirken, 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 Sink-schichten ist eine Rührereinrichtung zu installieren. Zum Emissionsschutz werden die Behälter gasdicht ausgeführt. Das Hydrolysegas wird dem Biogas zugemischt und im BHKW verbrannt.

1.5.3.1.3 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.

1.5.3.1.3.1 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 (Abbildung 17). Das Volumen des Fertiggaragentyps umfasst rund 100 m³, wobei aufgrund der Einbringtechnik nur ca. 2/3 nutzbar sind. 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 ausgefautem Substrat in einem Verhältnis von 40 % bis zu 60 % (Frischmaterial: Impfmateriale) vermischt. Das Substrat wird während der gesamten Verweilzeit von drei bis sechs Wochen über an der Decke angebrachten Düsen mit Perkolat (aus dem Substrat sickende Überschussflüssigkeit, die rezirkuliert wird) besprüht (Abbildung 17). 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 Schwachgas wird aus dem Fermenterraum abgesaugt und dem Motor des BHKW als Verbrennungsluft zugeführt. Auf die Spezifikationen des Motorenherstellers und die sicherheitstechnischen Anforderungen ist zu achten.

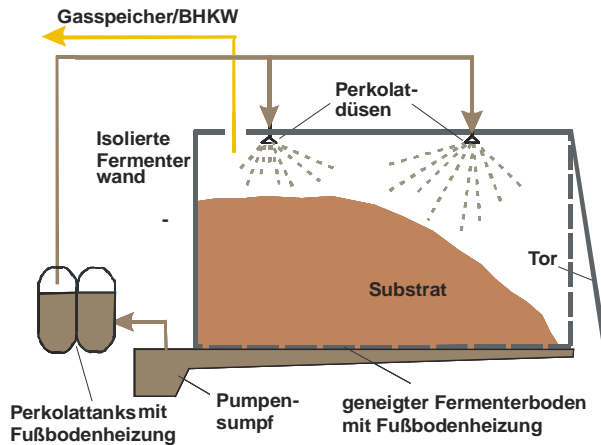


Abbildung 17: Anlagenprinzip einer Biogasanlage zur Feststofffermentation im diskontinuierlichen Verfahren (Aschmann, 2002)

1.5.3.1.3.2 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 ausgeführt, so dass die Grube mit einem Radlader befahren und mit frischem zu vergärendem Material beschickt werden kann (Abbildung 18). Dabei muss das gleiche Mischungsverhältnis zwischen Impf- und Frischmaterial wie beim Garagenverfahren eingehalten werden. 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 nicht vor.



Abbildung 18: Entleertes (links) und aktiver Fermenter (rechts) einer Anlage zur Feststoffvergärung im Grubenverfahren (LfL, 2007)

1.5.3.1.3.3 Folienschlauch (diskontinuierliches Verfahren)

Beim Folienschlauchverfahren (Abbildung 19) 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 und 30 - 150 m Länge. Sie 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 denselben Maschinen, wie sie auch für die Silierung verwendet werden, zugeführt (Abbildung 19 links). Um Prozessenergie einzusparen, sollte der Behälter isoliert werden. Das entstehende Biogas wird über ein spezielles Leitungssystem im Folienschlauch abgezogen. Nach einer Verweilzeit von sechs bis zwölf Wochen wird die Folie aufgeschnitten und der Gärrückstand einer Kompostierung zugeführt. Die entscheidenden Vorteile dieses Verfahrens im Vergleich zu anderen Techniken sind die sehr niedrigen Investitionskosten und der geringe Zeitbedarf zur Betreuung des Prozesses.

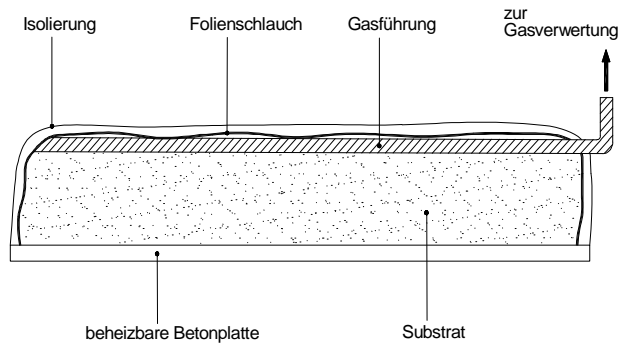


Abbildung 19: Beladevorgang eines Folienschlauches / Folienschlauchverfahren zur Feststofffermentation (Lfl. 2007)

1.5.3.2 Substrateintrag

Durch die Fütterung hervorgerufene Stoßbelastungen und Temperaturschwankungen führen zu ungleichmäßigen Gasbildungsrate, Schwankungen in der Gaszusammensetzung und können die Biologie beeinträchtigen. Sie müssen deshalb vermieden werden. Aus diesem Grund sind die heute eingesetzten Einbringtechniken i. d. R. so ausgestattet, dass die täglichen Gesamtfuttermengen auf viele kleine Einzelgaben über den ganzen Tag verteilt zugeführt werden (Streicher et al., 2019). Üblicherweise erfolgt die Teilfuttermenge zeitschaltuhrgesteuert jede halbe oder ganze Stunde. Bei flüssigen Wirtschaftsdüngern reicht eine Aufteilung auf zwei bis vier Gaben pro Tag, da hier die Gefahr von Stoßbelastungen aufgrund niedriger Energiepotentiale geringer ist. Im Folgenden werden verschiedene Techniken zur Substrateinbringung kurz vorgestellt.

1.5.3.3 Direkteinleitung flüssiger Wirtschaftsdünger

Die bei entsprechenden Haltungssystemen anfallenden tierischen Exkremente können dem Fermenter mittels einer Pumpe über ein Gülleleitsystem zugeführt werden. Ist das Leitsystem in einem natürlichen Gefälle angelegt, kann die Gülle auch ohne Pumpvorgang aus dem Güllerraum unter dem Spaltenboden eingeleitet werden. Dieses System bietet den Vorteil der kontinuierlichen Zugabe geringer Mengen organischen Materials, ist aber anfällig für Verstopfungen. Die Rohrleitung sollte deshalb über eine Pumpe mit Fermenterinhalt oder Gärrückstand gespült werden können.

1.5.3.4 Vorgrube

Wird Wirtschaftsdünger angeliefert oder ist eine Direkteinleitung aus logistischen Gründen nicht möglich, wird die Gülle in einer Vorgrube zwischengelagert. Von da aus wird sie über eine Rohrleitung in die Fermenter gepumpt (Abbildung 20).

Eine Zumischung der einzutragenden Feststoffe war in der Vergangenheit, insbesondere bei kleineren Biogasanlagen üblich, da auf kostenintensive Systeme zur Feststoffeinbringung verzichtet werden konnte. Die Technik ist auch heute noch in Anwendung, für größere Anlagen aber nur bedingt geeignet, da zur Herstellung pumpfähiger Gemische erhebliche Güllermengen erforderlich sind. Das

Verfahren verursacht Stickstoff-, Methan und Geruchsemissionen und ist deshalb nur dann genehmigungsfähig, wenn eine geruchsdichte Abdeckung installiert ist, die nur für Befüllvorgänge kurzzeitig geöffnet werden darf (siehe Kapitel 2.2.2.2.3). Zur Durchmischung ist ein Rührwerk vorzusehen. Durch langfaserige Feststoffe verursachte Verstopfungen können durch Schneiden an den Rührpropellern, in die Gülleleitung integrierte Zerkleinerungsaggregate oder durch eine Vorzerkleinerung vermieden werden. Beheizte Vorgruben und die zur Vermeidung von Stoßbelastungen über den Tag verteilte kontinuierliche Beschickung des Fermenters ziehen erhöhte Emissionen nach sich. Dieses Problem kann umgangen werden, indem das in der geschlossenen Grube entstehende Gas dem Biogasspeicher zugeführt und im BHKW verbrannt wird. Vorgruben eignen sich auch zur Abscheidung von Störstoffen wie Steine oder Sand. Diese können dann mittels eines Sedimentaustrags (vgl. 1.5.6) oder manuell beseitigt werden. Für Letzteres ist am geschlossenen Behälter eine Zugangsmöglichkeit vorzusehen.



Abbildung 20: Abgedeckte Vorgrube zur Güllezwischenlagerung und Zumischung von Feststoffen ((LfL, 2007)

1.5.3.5 Feststoffeintragssysteme

Prinzipiell können stapelbare Substrate von oben durch die Betondecke, von oben schräg durch die Behälterwand oder von unten horizontal durch die Behälterwand (Einpressung) eingetragen werden. Dafür steht eine Reihe verschiedener Technologien zur Verfügung. Im Wesentlichen bestehen diese aus den in Abbildung 21 bestehenden Komponenten, die zur Bevorratung der täglichen Futtermenge (1), zum Transport des Futters zur Einbringvorrichtung (2) und zur Beförderung des Futters in den Fermenter (3) dienen. Sie sollten so dimensioniert sein, dass sie mindestens die Hälfte, besser jedoch die ganze Futterration eines Tages aufnehmen können. So kann der Arbeitsaufwand zur Befüllung mit dem Radlader geringgehalten werden. Die Behälter sind auf Wägezellen zu montieren, so dass die eingetragenen Mengen kontrolliert und die bei EEG-Vergütung bestehende Dokumentationspflicht erfüllt werden kann. Die Wägung dient außerdem zur Steuerung der pro Ration gegebenen Futtermenge, indem die Zudosierung so lange erfolgt, bis das im Vorratsbehälter verbleibende Substrat um ein bestimmtes Gewicht abgenommen hat. Auf diese Weise ist eine exakte Aufteilung der Gesamtfuttermenge auf mehrere Einzelgaben möglich und eine Unterbrechung der Zufuhr durch z. B. Brückenbildung wird sofort erkannt.



Abbildung 21: Vorlagebehälter (1), Austragsystem (2) und Einbringsystem (3) eines Feststoffeintrags (Foto: LfL)

Bei Vorlagebehältern (Abbildung 21 – Nr. 1) ohne Intensiv-Mischwerkzeuge erfolgt der Materialtransport zum Austragsorgan in Abhängigkeit der Behältergeometrie. In Behältern in Containerbauweise können dafür Schubböden- oder Stangen, Kratzböden, oder Abschiebevorrichtungen eingesetzt werden. In trichterförmigen Behältern kommen Schneckensysteme und in Rundbehältern Austragsschwerter zum Einsatz.

Vorlagebehälter mit Intensiv-Mischwerkzeugen mit rundem oder ovalem Querschnitt gleichen Futtermischern, wie sie in der Tierernährung verwendet werden. Sie sind mit vertikal angeordneten kegelförmigen Schnecken ausgestattet, die das Material mischen. Eine Zerkleinerung erfolgt durch Messerklingen an den Schnecken. Aufgrund der zusätzlichen technischen Einrichtungen weisen sie deutlich höhere Energieverbräuche auf als Vorlagebehälter ohne Intensiv-Mischung.

Im Austragsystem (Abbildung 21 – Nr. 2) an der Austragsseite der Vorlagebehälter sorgen Förderschnecken oder Walzen für eine gleichmäßige Versorgung der Eintragungssysteme, sofern es sich um rieselfähiges Material wie z. B. klein gehäckselte Maissilage handelt. Werden langfaserige Substrate eingesetzt, sind zusätzliche Einrichtungen zum Auflösen des Silostocks erforderlich. Hier haben sich horizontale Reißwalzen bzw. vertikale Schnecken als gut geeignet erwiesen.

Das Eintragungssystem (Abbildung 21 – Nr. 3) verbindet Fermenter und Vorlagebehälter und besteht aus einer Kombination von Fördereinrichtung und Stopfschnecke. Das Substrat wird über die Fördereinrichtung, die aus Schnecken oder Förderbändern bestehen kann, zu einer Stopfschnecke transportiert, die es in den Gärbehälter hineindrückt (Abbildung 22). Das Überbrücken großer Höhenunterschiede durch Steigschnecken sollte vermieden werden, da die hohen Kräfte zu erhöhtem Energieverbrauch und Verschleiß führen. Im Extremfall kann es zu Wellenbrüchen kommen. Sollen Höhenunterschiede durch herkömmliche Fließbänder überwunden werden, sollte der Anstellwinkel nicht mehr als 20° betragen. Spezielle, mit Mitnehmern ausgestattete Bänder erlauben Anstellwinkel bis 30°. Wie in Abbildung 22 deutlich zu sehen ist, wird bei der Fließbandlösung gegenüber dem Schneckentransport deutlich mehr Platz benötigt.



Abbildung 22: Eintragungssysteme mit Förderschnecken (links) und Förderbändern (rechts) (LfL)

Alternativ kann der Substrateintrag auch durch eine sogenannte „Flüssigfütterung“ erfolgen. Dabei wird der Feststoff mit Rezirkulat oder Frischgülle, ähnlich wie bei der Zugabe in eine Vorgrube, gemischt und die Suspension dem Gärbehälter zugeführt. Der Unterschied zur Vorgrube besteht in der technischen Ausführung. Bei der Flüssigfütterung wird Frischgülle, Gärsubstrat oder Gärrückstand durch eine Rachtrennpumpe in einem Leitungssystem angesaugt und erreicht am Ausgang der Leitung den Fermenter. An der Pumpe wird dem Flüssigkeitsstrom über den Rachtrenner Feststoff über eine Dosiereinrichtung zugeführt. Möglich ist auch eine Direkteinpressung der Feststoffe in die Leitung. In diesem Fall kann die Suspension mit einer herkömmlichen Pumpe bewegt werden. Für die Flüssigfütterung werden üblicherweise Drehkolben oder Excenterschneckenpumpen verwendet. Bei hochviskosen Medien oder langfaserigen Inhaltsstoffen sind letztere vorzuziehen. Die Technik optimiert die Temperierung, Bakterienverteilung und Homogenisierung im Fermenter und wirkt der Neigung zur Entmischung entgegen. Bei einer Anbindung der Leitung an andere Gärbehälter kann z. B. ein Nachgärbehälter gefüttert werden. Das erlaubt Wartungsarbeiten am Hauptfermenter, ohne dass es zu drastischen Leistungseinbußen kommt.

1.5.4 Substratleitungen

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 mm (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 langfaserige oder feststoffsubstanzenreiche Materialien zugemischt, sind größere Querschnitte ratsam. Die Rohrleitungen sollten möglichst frostfrei und UV-geschützt 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 treten Kurzschlussströme seltener auf und ein Zurückfließen des Gärmediums in die Vorgrube wird unterbunden.

1.5.5 Pumpen

Der Transport pumpfähiger Substrate erfolgt durch mit Elektroantrieben ausgestatteten Pumpen. Im Folgenden werden die wichtigsten Pumpenarten zum Transport flüssiger Gärmedien kurz beschrieben.

1.5.5.1 Kreiselpumpen/Tauchschneidpumpen

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 30 m³/min, wobei die Fördermenge mit dem Förderdruck (bzw. der Förderhöhe) abnimmt. Kreiselpumpen erreichen je nach Leistung einen maximalen Druck von 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.

1.5.5.2 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 und mehr selbst an und erzeugen einen Druck von bis zu 48 bar. Sie weisen niedrigere Förderleistungen auf als Kreiselpumpen und haben sich an Bayerischen Pilotbetrieben als gut geeignet zum Transport von TS-reichen Suspensionen mit hohen Fasergehalten erwiesen.

Drehkolbenpumpen erreichen bei Maximaldrücken von 12 bar und Leistungsaufnahmen zwischen 7,5 und 55 kW Fördermengen bis über 16 m³/min. Die Untersuchungen an bayerischen Anlagen haben gezeigt, dass beim Transport von Suspensionen mit langfaserigen Bestandteilen der Wartungsaufwand stark ansteigt.

Da durch hohe Fördermengen Temperaturschwankungen in den Gärbehältern verursacht werden können, sind bei Pumpen mit hoher Förderleistung die Laufzeiten anzupassen. Alternativ können drehzahlregelbare Verdrängerpumpen oder langsam laufende Exzentrerschnecken eingesetzt werden. Für Suspensionen mit TS-Gehalten unter 10 % sind auch Balgenpumpen, die niedrige Fördermengen aufweisen geeignet.

1.5.6 Sedimentaustrag

Praxisuntersuchungen haben gezeigt, dass sich Sedimente bilden können (verstärkt beim Einsatz von Grassilage und Zuckerrüben), die allein durch Erhöhung der Rührintensität nicht sicher zu beseitigen sind. Da sie das Fermentervolumen reduzieren und im Extremfall die Temperierung beeinträchtigen, können biologische Probleme entstehen. Um den erheblichen Aufwand zur manuellen Beseitigung durch Absenken und Öffnen des Behälters im Vorfeld zu vermeiden, kann eine Vorrichtung zum Sinkstoffaustrag integriert werden. In stehenden Behältern mit Durchmessern unter 14 m kann ein Bodenräumer eingesetzt werden, der das Material zu einem Sedimentsumpf am Behälterrand transportiert aus dem es mit einer Austragsschnecke, die über den Pegelstand im Fermenter reichen muss entfernt werden kann (Abbildung 23). Da die Antriebswelle zentral angeordnet ist, ist

der Bodenräumer aufgrund der erforderlichen Mittelstütze für größere Behälter nicht geeignet. Die mechanische Beanspruchung des Systems ist hoch und Reparaturmaßnahmen sind aufwändig.



Abbildung 23: Bodenräumer zum Austrag von Schwerstoffen (Mitte: Austragsschnecke) - (LfL, 2007)

Alternativ können Sinkstoffe auch durch einen um 5 % geneigten Fermenterboden beseitigt werden. Der Boden führt zu einem Trichter von etwa 2 m Durchmesser und 1 m Tiefe, in den das Sediment durch die vom Rührwerk verursachte Bewegung der Flüssigkeit gelangt. Aus diesem werden sie mit Hilfe einer Schnecke ähnlich wie beim Bodenräumer ausgetragen. Aufgrund der Störanfälligkeit bei beiden Systemen werden Sinkschichten in der Praxis meist manuell mit Kleinbaggern oder speziellen Absaugvorrichtungen entfernt. Dafür werden Revisionssschächte auf Fermenterdecken genutzt. Ist ein Behälter mit einer Folienhaube zur Gasspeicherung ausgestattet, muss diese geöffnet werden.

1.5.7 Gärrückstandaustrag

Für den Austrag des vergorenen Substrates im Fermenter werden die gleichen Rohrleitungen verwendet, wie sie für das übrige Substratleitsystem eingesetzt werden. Dabei wird der Gärrückstand durch eine Rohrleitung entweder in das Gärrückstandslager gepumpt oder es gelangt durch ein Überlaufsystem ohne Einsatz zusätzlicher technischer Einrichtungen dort hin. Überlaufsysteme neigen zu Verstopfungen, wenn faser- und TS- reiche Gärrückstände vorliegen. Um Verstopfungen beseitigen zu können ist ein Druckluftanschluss an der Rohrleitung zu empfehlen. Die Biegestelle der Rohrleitung ist oben angeordnet, damit sie nicht dauerhaft durch den hydrostatischen Druck des Gärmediums belastet wird (Abbildung 24).

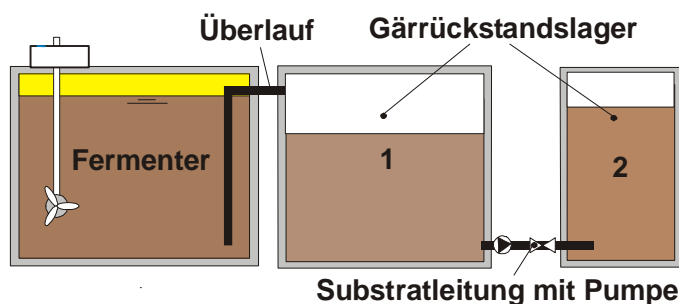


Abbildung 24: Systeme zum Austrag des Gärrückstands in die Lagerstätten (LfL, 2007)

1.5.8 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.

Bei der thermodynamisch effizienten externen Erwärmung (außerhalb des Fermenters) wird das Substrat im Gegenstrom zu Heißwasser durch einen Wärmetauscher gepumpt, wofür vor allem Doppelrohr- und Spiralwärmetauscher verwendet werden. Für den Transport von Heizwasser und Gärsubstrat, steigt der Pumpenaufwand und bei langfaserigen Substraten besteht Verstopfungsgefahr.

Zur internen Erwärmung werden vorwiegend Boden- oder Wandheizungen eingesetzt. Bei Bodenheizungen werden in den Fermenterboden Kunststoffheizspiralen verlegt. Bilden sich Sinkschichten, wird die Wärmeübertragung stark beeinträchtigt. Sie müssen deshalb beseitigt werden (vgl. 1.5.6). Weit verbreitet sind Wandheizungen, für die auf die Fermenterinnenwand montierte Kunststoff- oder Edelstahlheizrohre verwendet werden können. Die Edelstahlvariante liefert eine bessere Wärmeübertragung, weshalb zwei Heizkreise pro Fermenter i. d. R. ausreichen. Die kostengünstigen Kunststoffleitungen weisen geringere Querschnitte auf und haben eine schlechtere Wärmeübertragung. Deshalb sind pro Behälter deutlich mehr Heizkreise erforderlich. Voraussetzung für eine effektive Temperaturübertragung ist das Umspülen der Rohre mit Substrat. Ablagerungen auf den Heizrohren beeinträchtigen die Wärmeübertragung. Die Rohre sollten deshalb mit einem Mindestabstand von 20 cm von der Seitenwand installiert werden. Stabile Haltevorrichtungen verhindern eine Beschädigung beim Absenken des Flüssigkeitspegels durch ggf. vorhandene Schwimmdecken.

1.5.9 Homogenisierung

Die Rührerichtungen in Gärbehältern sorgen für eine gleichmäßige Temperatur- und Nährstoffverteilung, fördern den Stoffwechsel der Bakterien, verhindern Schwimm- und Sinkschichten und treiben das Gas aus der Gärsuspension, wodurch das Aufquellen von Fermenterinhalt vermieden wird. Die Intensität der Homogenisierung ist abhängig von der Art des Rührwerks und der Art des Substrats. Sie ist deshalb für jede Anlage individuell zu gestalten. Im Folgenden sind die wichtigsten technischen Einrichtungen zur Homogenisierung kurz genannt. Eine ausführliche Beschreibung findet sich in der Fachinformation „Empfehlungen für die Auswahl von Rührwerken für Gärbehälter und Gärrückstandslager“ des „Biogas Forum Bayern“ (Kissel et al., 2014).

Haspelrührwerke sind langsam laufende Rührwerke, werden zur Durchmischung horizontaler Fermenter eingesetzt und arbeiten quer zur Durchflussrichtung (siehe Kapitel 1.5.3.1). Sie besitzen eine vergleichsweise geringe Anschlussleistung, arbeiten bei Drehzahlen von ca. 4 U min^{-1} und können auch hochviskose Suspensionen (20 % TM) effektiv durchmischen.

Tauchpropellerrührwerke sind schnell laufende Rührwerke (380 U min^{-1}) und kommen in stehenden Behältern bei Leistungsklassen zwischen 7 und 22 kW zum Einsatz. Die Propellerdurchmesser liegen zwischen 50 und 70 cm, in Ausnahmefällen auch größer. Sie eignen sich zur Homogenisierung von Materialien mit TS-Gehalten bis ca. 12 %. Die hohen Drehzahlen führen zu starker mechanischer Beanspruchung. Tauchpropellerrührwerke werden mit elektrischen oder hydraulischen Antrieben angeboten und sind oft auf der Fermenterdecke installiert. Sie sind i. d. R. mit Service-Schächten ausgestattet und seiten- und höhenverstellbar ausgeführt.

Stabmixer sind schnell laufende Rührwerke (380 bis max. 1.000 U min^{-1}) mit einem außenliegenden Motor, der über eine lange Welle einen Propeller mit einem Durchmesser von bis zu 60 cm antreibt. Auch Antriebe über Ölmotoren oder der Zapfwelle des Schleppers sind möglich. Sie sind entweder durch die Decke oder durch die Fermenterwand geführt und besitzen elektrische Anschlussleistungen bis 15 kW. Bei Deckeneinbau ist auch der Antrieb über die Zapfwelle möglich. Um Schäden der Rührwelle durch die auftretenden Schub- und Zugkräfte zu vermeiden, wird diese in einem Außenrohr mehrfach gelagert. Der Flüssigkeitsstand im Fermenter sollte einen Meter über der Dichtung nicht überschreiten, um die hydrostatische Belastung gering zu halten. Stabmixer sollten möglichst

horizontal und vertikal schwenkbar sein, damit auch Schwimmschichten und Sedimente effektiv beseitigt werden können.

Axialrührwerke sind langsam laufende Rührwerke für stehende Behälter. 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 elektrische Anschlussleistungen bis 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 langsam laufende Rührwerke, die schräg durch die Fermenterwand eingeführt sind. Der Antriebsmotor (bis 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 Sedimente beseitigt 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. Dabei variiert sowohl die Drehzahl (8 - 14 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). Bei Anschlussleistungen bis 15 kW werden aufgrund seines Aufbaus auch Fermenterinhalt mit hohen TM-Gehalten effektiv durchmischt. Durch die geringen Drehzahlen sind sie sparsam, verschleißarm und schonen die Bakterienpopulation.

Die Durchmischung mittels *hydraulischer Rührwerke* wird durch Absaugen und Wiedereinleiten des Fermenterinhalt erreicht. 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.

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 Kurzschlussströmen. Für zu Schwimmdecken neigende Substrate ist das System weniger geeignet, da diese nicht beseitigt werden können.

1.5.10 Mess- und Regelungstechnik (MRT)

Angesichts der Dokumentationspflicht, der Sicherheitsauflagen aber auch aufgrund der wirtschaftlichen Bedeutung der Biogasproduktion muss ausreichend Mess- und Regelungstechnik vorhanden sein. Bestimmte Messeinrichtungen sind obligatorisch, wobei zwischen nach Baurecht genehmigten

Anlagen und solchen, die der 44. BImSchV unterliegen unterschieden wird. In Tabelle 8 sind vorgeschriebene messtechnische Einrichtungen für beide Anlagentypen sowie deren nützliche Eigenschaften dargestellt.

Tabelle 8: Obligatorische messtechnische Ausstattung von Biogasanlagen (verändert nach Effenberger et al. (2021))

Messgröße	erforderlich für
Masse der festen Einsatzstoffe	Umweltgutachten; Substratverbrauch; Bestimmung von Gasertrag, Verweilzeit, Raumbelastung und Stromausbeute
Volumen der flüssigen Einsatzstoffe	Umweltgutachten, Bestimmung von Gasertrag, Verweilzeit, Raumbelastung, Rezirkulationsstrom und Stromausbeute
Gaswarneinrichtung Substratannahalle	Sicherheit und Gesundheitsvorsorge
Füllstand Gasspeicher	Sicherheit, Anlagen- und Motorsteuerung
Überfüllsicherung Gär- und Gärrestlagerbehälter	Sicherheit, Gewässer- und Umweltschutz
Temperatur des Gärgemisches	Kontrolle des Heizsystems, Sicherstellung konstanter Bedingungen
Luftrate zur Entschwefelung	Anpassung der Luftmenge an die Gasbildungsrate
Wärmezähler (bei KWK-Nutzung und BHKW mit unterschiedlichen Stromkennzahlen)	KWK-Vergütung und Abrechnung mit Abnehmern
Wärmezähler für Wärmeabsatz	KWK-Vergütung und Abrechnung mit Abnehmern
Betriebsstunden BHKW	Kontrolle eines flexiblen Betriebs
Stromeinspeisung	Abrechnung mit Stromversorger, Bestimmung von Wirkungsgrad und Stromausbeute

Biogasanlagen, die der 44. BImSchV unterliegen müssen zudem die Füllstände aller Gärbehälter, die Schaumbildung, den H₂S-Gehalt im Gas und die Laufzeit der Notfackel überwachen. Zur Brandvermeidung müssen deren Schaltschränke mit Temperatursensoren und die BHKW-Räume mit Brandmeldern und Gaswarneinrichtungen ausgestattet sein. Die vorgeschriebene Überwachung von Aktivkohlefiltern und Zwischenräumen von Tragluftdächern dient dem gleichen Zweck. Zum Schutz der Umwelt müssen sie die Temperatur vor dem Oxidationskatalysator und den NO_x-Gehalt im Abgas überwachen.

In der Fachinformation „Empfehlungen für die messtechnische Ausstattung landwirtschaftlicher Biogasanlagen“ des Biogas-Forum Bayern bieten Effenberger et al. (2021) Informationen zu ergänzenden Messeinrichtungen, mit denen der Anlagenbetrieb erleichtert und noch sicherer gestaltet werden kann.

Biogasanlagen sind mit mehr oder weniger umfangreichen Prozessleitsystemen ausgestattet, so ist die Fernüberwachung der gesamten Anlage durch den Hersteller möglich. Bei Blockheizkraftwerken ist die Fernüberwachung Standard.

1.5.10.1 Menge der Substrate

Um die Raumbelastung einer Biogasanlage zu steuern und der Dokumentationspflicht nachkommen zu können, muss die eingetragene Substratmenge erfasst werden (vgl. Kapitel 1.5.3.2). Feste Einsatzstoffe werden i. d. R. in den Eintragsvorrichtungen gewogen, die auf Wägezellen montiert sind. Eine automatisierte Dokumentation der einzelnen Tonnagen ist verbreitet. Alternativ kann die Menge auch vor der Beschickung gewogen werden, etwa durch Fuhrwerks- oder Achslastwaagen. Die ausschließliche volumetrische Erfassung ist möglich, aber sehr ungenau. Bessere Ergebnisse liefert die stichprobenartige Bestimmung des vollen Laderschaufelgewichts in Verbindung mit der Anzahl eingetragener Schaufeln. Die präziseste Bestimmung flüssiger Einsatzstoffe oder Rezirkulatmengen erfolgt durch Durchflussmengenähler in den Pumpleitungen. Eine Abschätzung über Pumpenlaufzeiten ist sehr ungenau. Bei Vorhandensein einer Vorgrube kann die Volumenbestimmung auch über eine Füllstandsmessung erfolgen.

Tabelle 9: Messung von Einsatzstoffmengen

Messgröße	Messtechnik	Beurteilung
Masse fester Einsatzstoffe	Fuhrwerkswaage, Achslastwaage, dynamisches Wägesystem am Lader	genau, mehr Arbeitsaufwand
	Wägezellen in der Eintragsvorrichtung	genau; Eintragsmenge und Dokumentation automatisierbar
Volumen flüssiger Einsatzstoffe	Magnetisch-induktive Durchflussmessung.	kostenintensiv, sehr genau, wartungsfrei; Blasenbildung verfälscht die Messung
	Druckmessdose in der Vorgrube	genau und wartungsarm
	Echolot in der Vorgrube	genau und wartungsarm
	Schwimmer in der Vorgrube	ungenau bei Schwimmschichtenbildung, wartungsintensiv

1.5.10.2 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 (Tabelle 10). 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.

Tabelle 10: 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 turbinenartigen 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
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

1.5.10.3 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 (CH_4), Schwefelwasserstoff (H_2S) und Sauerstoff (O_2). 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 Biogas-verwertenden Motoren sehr wichtig. Für Anlagen, die der 44. BImSchV unterliegen ist die H_2S -Überwachung obligatorisch. Über den Sauerstoffgehalt wird die biologische Entschwefelung durch Luftzufuhr geregelt. Optional kann auch der Wasserstoffanteil (H_2) 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 (CO_2) 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.

1.5.10.4 Bestimmung des pH-Wertes

Der pH-Wert ist ein sehr einfach zu messender 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.

1.5.10.5 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.

Nach EEG nachzuweisende genutzte Wärmemengen werden anhand von aus der Haustechnik stammenden Wärmemengenzählern ermittelt. Zur Kundenabrechnung werden verkaufte Wärmemengen mit der gleichen Messtechnik erfasst.

1.5.10.6 Stromproduktion und Stromverbrauch

Der überwiegende Teil der Biogasanlagen speist produzierten Strom ein. Je nach Vergütungssatz nutzen die Betreiber entweder Bezugsstrom oder selbst produzierten Strom zur Deckung des Eigenbedarfs (Überschusseinspeisung). Die eingespeiste Strommenge und ggf. der Bezugsstrom werden

vom Stromversorger gemessen. Die Werte erscheinen auf den monatlichen Abrechnungen. Bei einer Überschusseinspeisung ist der Eigenverbrauch durch einen geeichten Stromzähler zu erfassen, da für Verbrauchsmengen, die über 30 MWh/a hinausgehen eine EEG-Umlage zu entrichten ist.

Eine zusätzliche Messung der Stromaufnahme der Rührwerke erlaubt Rückschlüsse auf die Belastung in Abhängigkeit vom Trockenmassegehalt des Gärgemisches. Diese Messeinrichtungen sind häufig Bestandteil des Prozessleitsystems. Ein zeitversetzter Betrieb der Rührwerke als Hauptstromverbraucher verhindert teure Leistungsspitzen.

1.6 Gasführendes System

Das gasführende System von Biogasanlagen betrifft den internen Transport, die Gasaufbereitung und die Gasspeicherung.

1.6.1 Interner Gastransport

Der Transport des Biogases innerhalb der Biogasanlage erfolgt durch Stahl- und Kunststoffleitungen, die die Gasräume bzw. Gasspeicher aller Gärbehälter und ggf. die externen Gasspeicher miteinander verbinden. Bis auf den Bereich unmittelbar vor dem BHKW herrscht deshalb im gesamten System der gleiche Druck. Um die Behälter zu schonen beträgt dieser je nach Art der Abdeckung zwischen 10 und 30 mbar. Die Druckregelung erfolgt durch Überdruckventile oder Überdrucksicherungen. Das Funktionsprinzip einer solchen Überdrucksicherung in der der Druck durch eine frostfreie Wasservorlage eingestellt wird ist schematisch in Abbildung 25 dargestellt.

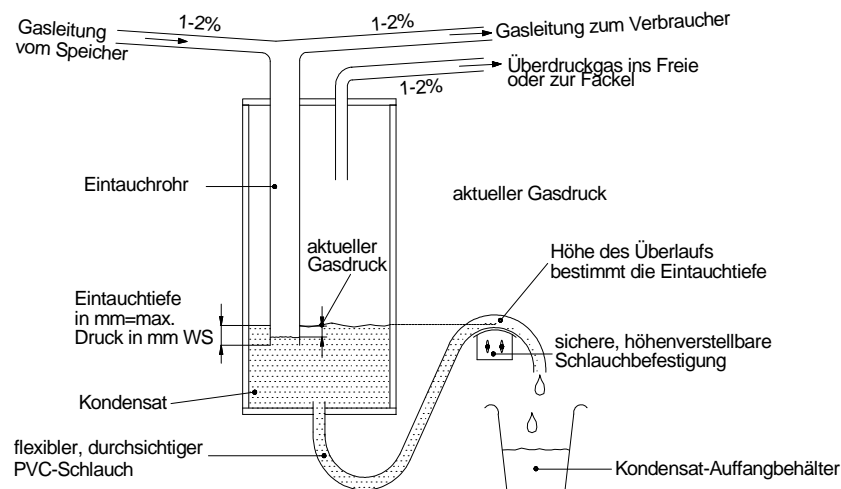


Abbildung 25: Überdrucksicherung mit Kondensatfalle (LfL, 2007)

Es ist darauf zu achten, dass der Überlauf, der die Eintauchtiefe des Gasrohrs in die Wasservorlage regelt sehr sorgfältig eingestellt wird, damit Schäden am Fermenter vermieden werden. Ferner muss der Pegelstand der Wasservorlage regelmäßig kontrolliert werden, da im Falle eines Absinkens ungewollt Gas entweichen kann. (siehe Kapitel 2.2.5).

1.6.2 Gasaufbereitung

Die Art der Nutzung ist ausschlaggebend dafür auf welche Art und Weise das Biogas aufbereitet werden muss. Für die energetische Nutzung in einem Verbrennungsmotor genügt eine Reduzierung des Schwefelwasserstoffgehalts und des enthaltenen Wasserdampfs. Bei der Nutzung in einer

Brennstoffzelle muss Schwefelwasserstoff vollständig entfernt werden. Für die Nutzung als Kraftstoff im mobilen Sektor muss Wasserdampf, H₂S und Kohlendioxid entfernt werden, bei der Einspeisung ins Erdgasnetz ist eine Aufbereitung auf Erdgasqualität erforderlich.

1.6.2.1 Trocknung

Zum Schutz der Motoren vor Korrosion bzw. zur Einhaltung der Vorgaben des DVGW-Regelwerks muss das Gas vor der Nutzung entfeuchtet werden. Im Folgenden werden verschiedene Verfahren zur Trocknung kurz erläutert.

1.6.2.1.1 Kondensation

Die häufigste Methode zur Gastrocknung ist das Herunterkühlen durch eine entsprechend lange Gasleitung an deren tiefstem Punkt sich ein gut zugänglicher Kondensatabscheider befindet, der regelmäßig entleert und frostfrei installiert sein muss. Im Erdreich verlegte Leitungen bzw. eine zusätzliche Kompression des Gases verbessern das Ergebnis. Mit dem Verfahren werden Taupunkte bis zu 3 °C erreicht und es eignet sich für die Nutzung in Verbrennungsmotoren. Zur Einspeisung ins Erdgasnetz sind die Abscheidegrade nicht ausreichend.

1.6.2.1.2 Adsorption

Effektiver ist das Adsorptionsverfahren bei dem in einem Festbett installierte Zeolithe, Kieselgele oder Aluminiumoxid als regenerierbare Adsorber eingesetzt werden. Das Verfahren arbeitet bei Umgebungsdruck im Wechsel mit 6 bis 10 bar, eignet sich für kleine bis mittlere Volumenströme und erreicht Taupunkte von bis zu -90 °C (Ramesohl et al., 2005).

1.6.2.1.3 Absorption

Die derzeit effektivste Methode zur Entfeuchtung ist die sogenannte Glykolwäsche. Hier dient Glykol als Absorber und es sind Taupunkte bis zu -100 °C möglich (Schönbucher, 2002). Das Gas wird im Gegenstrom einer Absorberkolonne zugeführt und so entfeuchtet und von höheren Kohlenwasserstoffen befreit. Das Medium ist bei 200 °C regenerierbar (Weiland, 2003). Das Verfahren eignet sich für die Gaseinspeisung, ist kostenintensiv und deshalb nur für große Volumenströme geeignet.

1.6.2.2 Entschwefelung

Schwefelwasserstoff entsteht bei anaeroben Abbauprozessen im Gär- bzw. Faulbehälter. Die Konzentration von H₂S ist im Wesentlichen vom Substrat abhängig und variiert im Bereich von 0,02 bis 0,5 Vol.-%, in Extremfällen bis zu 1,5 %. Das farblose Gas wirkt auf Verbrennungsmotoren und andere bauliche Einrichtungen stark korrosiv. Beim Menschen greift es die Schleimhäute der Augen und der Atemwege an. Bei Konzentrationen ab 150 ppm fällt der Geruchssinn aus. Ab 250 ppm können sich Lungenödeme bilden und ab 1.000 ppm wirkt es in kürzester Zeit tödlich.

Das in der Praxis in Bayern meist verwendete Verfahren ist die biologische Entschwefelung durch Luftzufuhr in den Fermenter. Häufig wird es kombiniert mit einer nachgeschalteten Aktivkohlereinigung. Die wichtigsten Verfahren sind in Abbildung 26 dargestellt und werden nachfolgend kurz beschrieben.

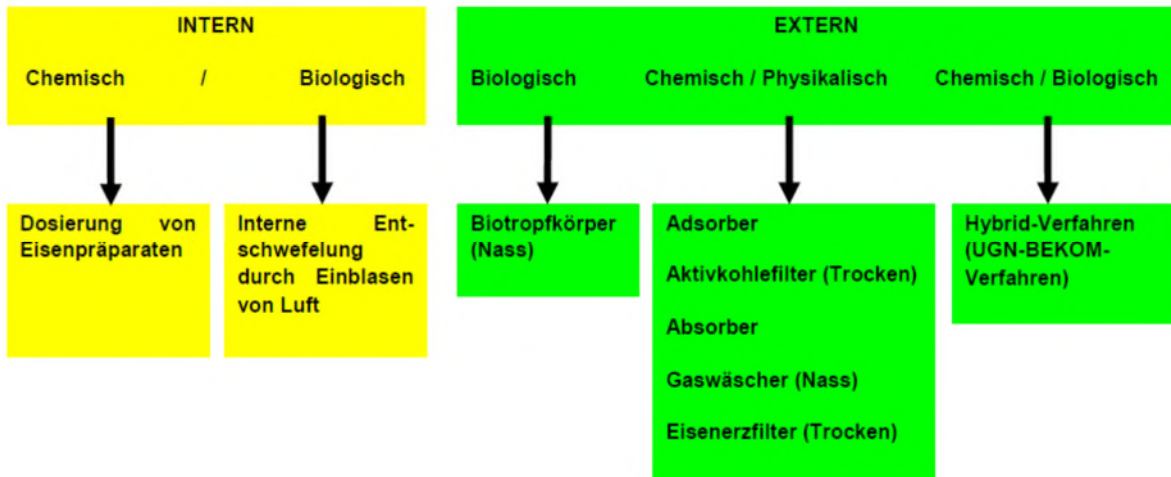


Abbildung 26: Verfahren zur Entschwefelung (Zölsmann et al., 2017)

1.6.2.2.1 Biologische Verfahren

Die biologische Entschwefelung erfolgt durch Mikroorganismen (*Sulfobacter oxydans*), 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. Es wird zwischen internen und externen biologischen Verfahren unterschieden.

Die **interne biologische** Entschwefelung erfolgt im Gasraum der Gärbehälter. Aufgrund niedriger Investitions- und Betriebskosten wird dieses Verfahren am häufigsten angewandt. In der Praxis hat sich ein Zuluftbedarf von 3 bis zu 5 % der Gasproduktionsrate als optimal erwiesen. Entscheidend ist eine ausreichend große Besiedlungsoberfläche für die Bakterien, die mit Gärwasser benetzt sein sollte, um die Versorgung der Bakterien mit Nährstoffen und Wasser zu gewährleisten.

Bei der **externen biologischen** Entschwefelung sind Gasproduktion und Entschwefelung räumlich voneinander getrennt. Um Luftzufuhr und Temperatur genauer steuern zu können, wird das Gas hier in einem separaten Behälter behandelt, der i. d. R. zwischen Gärbehälter und Gasspeicher angeordnet ist. Es gibt verschiedene Verfahren die kostenintensiver aber bei Abscheideraten von bis zu 99 % auch effektiver sind als die interne biologische Entschwefelung.

Bei allen Verfahren sind die Behälter durch die das zu reinigende Gas geleitet wird mit Füllkörpern ausgestattet, auf denen Mikroorganismen siedeln, die H_2S in elementaren Schwefel umwandeln. Beim Tropfkörperverfahren übernimmt ein im Kreis geführtes Waschmedium die Aufgabe, den im Gas enthaltenen Schwefelwasserstoff zum Biofilm zu transportieren, diesen mit Nährstoffen zu versorgen und vom Überschussschlamm zu reinigen. Bei Biofiltern sind die Bakterien fixiert und die Flüssigkeit dient ausschließlich zu deren Benetzung (Nährstoffversorgung), und zum Abtransport des Schlammes. Das mit elementarem Schwefel angereicherte Washwasser muss in allen Fällen in regelmäßigen Abständen gewechselt werden und dient zur Düngung im Pflanzenbau. Da in beiden Fällen das Biogas mit Luft kontaminiert wird um die Bakterien zu versorgen, eignen sie sich nicht für die Aufbereitung auf Erdgasqualität. Beispielhaft ist das Funktionsprinzip einer Anlage zur externen Entschwefelung in Abbildung 27 dargestellt.

Analog arbeitet der zweistufige Biowäscher, jedoch wird das Spülmedium (verdünnte Natronlauge) in einer separaten Einheit durch Sauerstoffzufuhr und Schwefelabscheidung regeneriert. Ein Luftzutritt in das Biogas wird so verhindert, weshalb es sich zur Aufbereitung auf Erdgasqualität eignet.

Aufgrund des hohen technischen und finanziellen Aufwands kommt ein Biowäscher in der Regel nur bei großen Biogasanlagen in Frage.

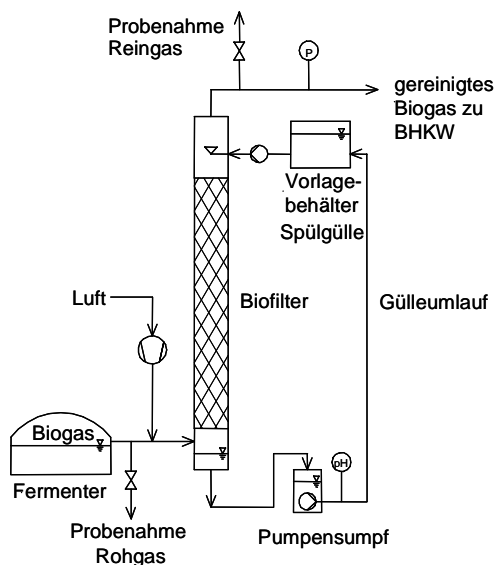


Abbildung 27: Verfahrensschema eines biologischen Wäschers zur Entschwefelung von Biogas (Schneider et al., 2004)

1.6.2.2 Chemische Verfahren

Durch Zugabe von Eisenverbindungen in die Fermenter erfolgt bei der **Fällung** eine Grobentschwefelung durch chemische Bindung des Schwefels im Substrat. Bei einer Zugabe von 33 g pro m³ Substrat kann dadurch die Freisetzung von Schwefelwasserstoff bis auf 100 bis 150 ppm reduziert werden, wobei keine Qualitätseinbußen bei schwankender Gasproduktion auftreten. Da kein Sauerstoffeintrag erfolgt, eignet sich das Verfahren bei anschließender Feinentschwefelung für die Gaseinspeisung. Zudem werden Korrosionsprobleme in den Gärbehältern reduziert. Diese Vorteile entfallen, wenn das Verfahren zusätzlich zur internen biologischen Entschwefelung angewandt wird, wenn diese keine zufriedenstellenden Ergebnisse liefert. Es verursacht Kosten für die Chemikalienbeschaffung und zusätzliche Sicherheitseinrichtungen und die Eisenkonzentration im Boden kann bei anschließender Ausbringung stark ansteigen.

Bei der **Adsorption** wird der im Gas enthaltene Schwefelwasserstoff an die Oberfläche von imprägnierter oder dotierter Aktivkohle oxidiert. Für diese Art der Feinentschwefelung muss im Biogas Wasserdampf und bei der imprägnierten Variante auch Sauerstoff vorhanden sein. Die Aktivkohle muss in regelmäßigen Abständen regeneriert bzw. ausgetauscht werden. Um deren Standzeit zu erhöhen und damit Kosten einzusparen erfolgt vorher i. d. R. eine Grobentschwefelung. Praxisuntersuchungen haben gezeigt, dass der Schwefelwasserstoff im Biogas auf diese Weise dauerhaft vollständig entfernt werden kann.

1.6.2.3 CH₄ Anreicherung

Etwas mehr als 200 Anlagen speisen in Deutschland Biogas ins Erdgasnetz ein und die Nachfrage nach Biogas als regenerativer Treibstoff für den Kraftfahrzeugsektor steigt (dena, 2020). Bevor Biogas ins Erdgasnetz eingespeist oder als Kraftstoff verwertet werden kann ist jedoch eine Abtrennung von CO₂ erforderlich. Zudem müssen Spurengase weitgehend entfernt werden. Im Wesentlichen werden dafür die in Tabelle 11 aufgelisteten Technologien angewandt. Bei der Gaseinspeisung kann auch die Beseitigung von Sauerstoff erforderlich werden, wofür zusätzliche Techniken benötigt werden.

Tabelle 11: Aufbereitungsverfahren zur Anreicherung von Methan (SeV, 2008)

Verfahren	CH ₄ %	Anwen- dung	Eigenschaften
Druckwechseladsorption (PSA)	> 97	häufig	Für entschwefeltes, getrocknetes Gas; Anpassung an Gasvolumenstrom eingeschränkt; hoher Strombedarf und Methanschluß; kein Wärmebedarf; kein Chemikalienbedarf
Druckwasserwäsche (DWW)	> 98	häufig	Für unbehandeltes Gas geeignet; Anpassung an Gasvolumenstrom möglich; hoher Strombedarf und Methanschluß; kein Wärmebedarf; kein Chemikalienbedarf
Aminwäsche	> 99	häufig	für kleine Gasvolumenströme; geringer Strombedarf; hoher Wärme- und Chemikalienbedarf (Waschmittel); minimaler Methanschluß
Gensorb-Wäsche	> 96	vereinzelt	für große Anlagen; für unbehandeltes Gas geeignet; Anpassung an Gasvolumenstrom möglich; sehr hoher Strombedarf; geringer Wärmebedarf; hoher Methanschluß
Membrantrennung	> 96	selten	Für entschwefeltes, getrocknetes Gas; sehr hoher Strombedarf; kein Wärmebedarf; hoher Methanschluß; keine Prozesschemikalien
Kryogene	> 98	-	Pilotanlagenstatus; für entschwefeltes, getrocknetes Gas; sehr hoher Strombedarf, sehr geringer Methanschluß, keine Prozesschemikalien

1.6.3 Gasspeicherung

Der Gasspeicher dient als Pufferorgan zwischen Gaserzeugung und -verwertung. Je nach Druckstufe wird in Nieder-, Mittel- und Hochdruckverdichtung unterschieden, wobei in Strom erzeugenden Anlagen nahezu überall die erste Variante Verwendung findet. Nähere Informationen zu unterschiedlichen Verfahren der Niederdruckspeicherung sind der Fachinformation „flexible Stromproduktion“ des Biogas Forum Bayern zu entnehmen (Häring et al., 2013). Die Mitteldruckverdichtung wird nur zur Einspeisung ins Erdgasnetz angewandt, wobei hier in der Regel nicht zwischengelagert wird. Die Hochdruckverdichtung ist für „Biogas-Tankstellen“ erforderlich.

Tabelle 12: Typische Ausführungen, Größen und Druckstufen für Gasspeicher an Biogasanlagen (Schulz et al., 2001)

Druckstufe	Betriebsdruck			übliche Größen m ³	Ausführung
	mbar	mm WS	bar		
Niederdruck	20–50	200–500	-	5–200	Wassertassengasometer Folienhaube, -speicher
	0,05–0,5	0,5–5		10–2.000	
Mitteldruck			5–20	1–100	Stahldruckbehälter
Hochdruck			200–300	0,1–0,5	Stahlflaschen

Die Kapazität der Biogasspeicher sollte je nach Anlagengröße mindestens 20 bis 50 % (Schulz et al., 2001) der täglich erzeugten Biogasmenge betragen. Bei flexibler Fahrweise 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. Bei Fermentern mit Betondecke dient das Volumen zwischen Flüssigkeitsspiegel und Abdeckung als zusätzlicher Speicher. Auf Grund des niedrigen Lagerdrucks ist zur Verstromung mit Gasmotoren der Einsatz von Verdichtern erforderlich. Regelungen zur Gasspeicherung und die an sie gestellten Anforderungen sind in den DWA Merkblättern M 375 und 377 ausführlich beschrieben (siehe Kapitel 2.2.5).

Interne Gasspeicher: In der Regel verfügen Biogasanlagen über interne Gasspeicher, da der variable Nachgärraum als Gaslager nicht ausreicht. Hier kommen Folienbedachungen zum Einsatz. Das spart kostenintensive Betondecken ein und sorgt gleichzeitig für hohe Gaslagervolumen. Folgende Varianten kommen zum Einsatz:

Tragluftdach: Mittlerweile weit verbreitet sind Tragluftdächer, bei denen zwei Folien über dem Fermenter aufgebracht werden. Dabei ist die innere Folie die Gasmembran und die äußere die Schutzfolie. Ein Stützluftgebläse zwischen beiden Folien sorgt dafür, dass die äußere Membran unter Spannung gehalten wird. Das Absinken der Gasmembrane auf den Substratspiegel wird durch eine Mittelstütze oder eine Gerüstkonstruktion aus Schnur oder Holz verhindert (Abbildung 28).

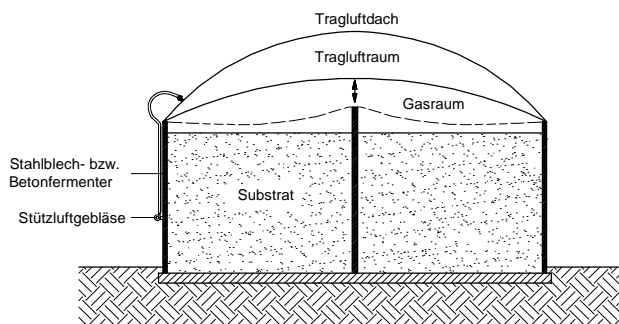


Abbildung 28: Tragluftdachgasspeicher mit Stützgebläse (LfL, 2007)

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 (Abbildung 29).

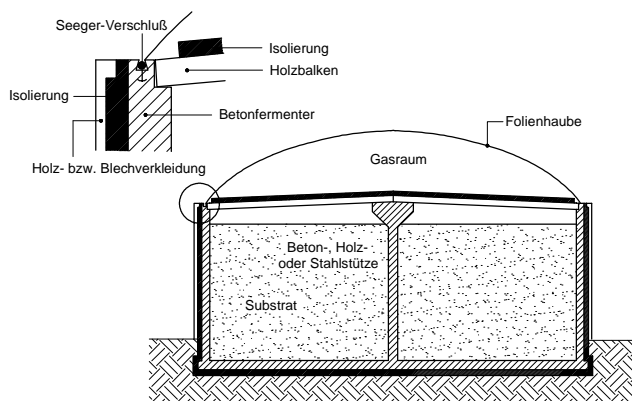


Abbildung 29: Folienhaubengasspeicher mit Seegerverschluss (LfL, 2007)

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 (Abbildung 30).

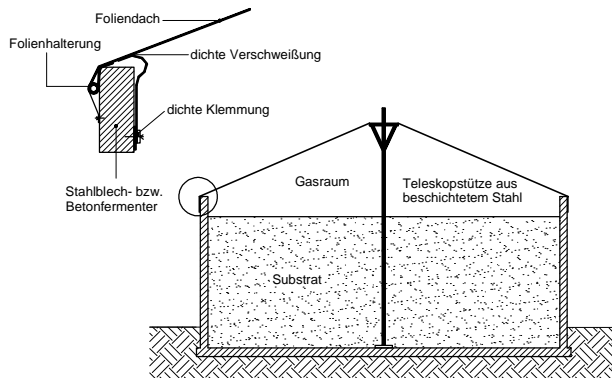


Abbildung 30: Foliendachspeicher mit Teleskopstütze (LfL, 2007)

Externe Foliengasspeicher: Eine weitere Möglichkeit der Gaslagerung ist die Verwendung von externen Foliengasspeichern. Sie werden vor allem dort angewendet, wo die Möglichkeiten zur Gaslagerung im eingeschränkt sind (wie z. B. bei liegenden Fermentern oder Betondecken). Zum Schutz vor Witterung und mechanischer Beschädigung werden externe Foliengasspeicher i. d. R. eingehaust, oder werden im Freien entsprechend verspannt und geschützt aufgestellt.

1.7 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. Nach einer Aufbereitung kann es aber auch in das Erdgasnetz eingespeist oder als Treibstoff für KFZ genutzt werden. Ob es ökonomisch sinnvoller ist den Eigenstrombedarf der Biogasanlage aus dem Stromnetz oder über das BHKW zu decken, ist abhängig von Strompreis und Stromvergütung. Ein Teil der Abwärme des Verstromungsaggregates wird zur Aufrechterhaltung des Abbauprozesses verwendet. Der Rest steht für eine anderweitige Nutzung zur Verfügung.

1.7.1 Verstromung

Für die Stromgewinnung aus Biogas haben sich verschiedene Technologien etabliert. Die übliche Art der Stromproduktion ist die Verbrennung des Biogases in einem Gas-Otto-Motor. Die Stromerzeugung erfolgt durch einen an den Motor gekoppelten Generator. Der ins Netz eingespeiste Strom wird in der Regel nach EEG vergütet. Die früher weit verbreiteten Zündstrahlmotoren sind die Stromproduktion betreffend effektiver, erfordern jedoch zur Stützfeuerung einen zusätzlichen flüssigen Brennstoff (Pflanzenöl) und weisen höhere CO-Konzentrationen im Abgas auf als Gasmotoren. Mit Zündstrahlmotoren sind in nach BImSchV genehmigten Anlagen die derzeit und insbesondere die künftig geltenden Vorgaben zur Emissionsbegrenzung für Biogasmotoranlagen (vgl. Kapitel 2.2.2.6) nur schwer einzuhalten. Derzeit werden sie nicht mehr angeboten und deshalb an dieser Stelle nicht besprochen. Alternativen wie Stirling-Motoren oder Mikrogasturbinen haben sich aufgrund niedriger Wirkungsgrade nicht durchsetzen können. Auch Brennstoffzellen haben sich bis jetzt im Biogassektor nicht durchgesetzt. Möglicherweise aufgrund des im Biogasbereich störungsanfälligen Umwandlungsprozesses von Methangas zu Wasserstoff.

1.7.1.1 Verbrennungsmotoren

Die kostengünstigste Verstromung ermöglichen Benzinmotoren aus dem PKW-Sektor. Die auf Gasbetrieb umgerüsteten sogenannten Schnellläufer (ca. 3.000 U min⁻¹) weisen niedrige Standzeiten auf und sind aufgrund ihrer geringen Leistungen nur für kleine Biogasanlagen geeignet. Wegen ihres ungünstigen Abgasverhaltens und ihren niedrigen Wirkungsgraden werden sie praktisch nicht mehr verwendet.

In der Regel kommen auf Gas-Otto-Betrieb (Gasmotor) umgerüstete Dieselmotoren zum Einsatz, die einen Gasmischer und eine Fremdzündung erfordern. Grundgerüste dieser BHKW sind Serienmodelle verschiedener Motorfabrikate, die von den BHKW-Herstellern für den Betrieb an Biogasanlagen modifiziert werden. Gasmotoren sind kostenintensiv, wartungsarm und weisen hohe Standzeiten und Gesamtwirkungsgrade auf. Ihr Abgasverhalten ist gut und sie können im Notfall mit Flüssiggas betrieben werden.

Für eine Verbrennung im BHKW muss das Gas bestimmte Anforderungen erfüllen. Diese schwanken innerhalb der verschiedenen Hersteller, weshalb die in Tabelle 13 angegebenen Zahlen nur als Orientierungswerte zu sehen sind. Im Allgemeinen können diese Mindestanforderungen eingehalten werden. Um jedoch die Lebensdauer des BHKW nicht zu verkürzen, sollte der H₂S-Gehalt im Biogas immer unter 150 ppm liegen. Weitere kritische Gasbestandteile entstehen vor allem bei der Kofermentation von industriellen Biomassen. Hier können Siloxane und Phosphorverbindungen zu Problemen im Motorraum und im Abgas führen.

Tabelle 13: Mindesteigenschaften von Brenngasen für Gasmotoren

Eigenschaften	Einheit
Unterer Heizwert	> 4,5 kWh/m ³ _n
Methangehalt	> 45 Vol.-%
Gesamtschwefel	< 2 00 mg/m ³
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	< 2 mg/m ³ _n CH ₄
Feststoffanteil (Teilgröße < 1 µm)	< 10 mg/m ³ _n CH ₄
Schwefelwasserstoff	< 150 ppm

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 so viel Sauerstoff zugegeben, wie für die vollständige Oxidation des Brennstoffes benötigt wird. Bei der Verbrennung von Biogas ist der Betrieb mit einem λ zwischen 1,4 und 1,6 üblich, da so die Abgasbestandteile NO_x und CO niedrig gehalten werden können (Abbildung 31). 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.

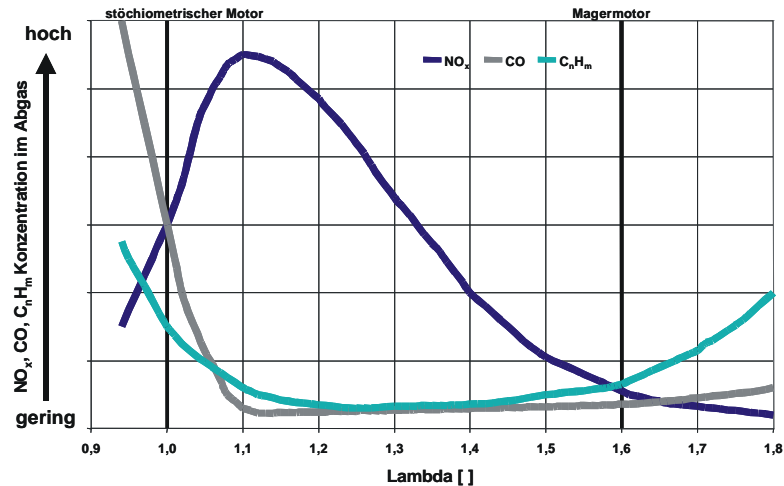


Abbildung 31: Verlauf der Emissionsraten in Abhängigkeit des Lambda-Wertes (Jenbacher, 2002)

Die zur Emissionsbegrenzung für Biogasmotoranlagen einzuhaltenden Grenzwerte für Staub, NO_x , CO und Formaldehyd sowie ggf. Kohlenwasserstoffe im Abgas sind abhängig von der Gesamtfeuerleistungswärmeleistung (FWL) einer Anlage. Hier gelten für nach 44. BImSchV zu genehmigenden Anlagen (> 1 MW FWL) andere Vorgaben als für kleinere Anlagen. Für Zündstrahler gelten andere Grenzwerte als für Gas-Ottomotoren. In Kapitel 2.2.2.5 sind die einzuhaltenden Werte für verschiedene Leistungsklassen und Motorarten tabellarisch dargestellt.

Die Einhaltung der Grenzwerte von Anlagen, welche nicht der 44. BImSchV unterliegen kann bei guter Betriebsführung sowohl von Gas- als auch von Zündstrahl-BHKW bewerkstelligt werden. Durch regelmäßige Abgasmessungen im Rahmen der Motorwartung ist dabei nachzuweisen und zu dokumentieren, dass die jeweils geltenden rechtlichen Vorgaben (siehe Kapitel 2.2.2.5) sicher eingehalten werden können.

Bei Anlagen, welche der 44. BImSchV unterliegen wird zudem zwischen Bestands- und Neuanlagen unterschieden. Die Grenzwerte werden bis 2029 noch einmal stufenweise herabgesetzt. Für diese Anlagen gilt, dass die Vorgaben nur durch eine Abgasnachbehandlung mit einem Oxidationskatalysator eingehalten werden können. Stickoxidemissionen müssen mittels geeigneter Sensorik kontinuierlich überwacht und ihr Tagesmittelwert dokumentiert werden. Eine Störung bei einer Anlage zur Abgasnachbehandlung muss innerhalb von 24 Stunden behoben sein, sonst droht ein eingeschränkter Anlagenbetrieb. Aus diesem Grund muss zum Schutz des Katalysators unbedingt eine Feinentschwefelung des Brennstoffs durch einen Aktivkohlefilter oder ähnliche Systeme durchgeführt werden.

Zur Stromproduktion sind zwei Arten von Generatoren, der Synchrongenerator und der Asynchrongenerator, zu unterscheiden. Der Synchrongenerator benötigt Gleichstrom für die Magneterregung, d. h. er kann auch dann eingesetzt werden, wenn kein Hausanschluss vorhanden ist und die Stromversorgung allein 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 (LUBW, 2001). Die Netz-anbindung erfolgt bis 1 MW über das Niederspannungsnetz.

1.7.1.2 Stirlingmotor

Bereits vor über 150 Jahren entwickelte Dr. Robert Stirling (1790–1878) diesen Motorentyp. Da die Verbrennung, anders als bei klassischen Verbrennungsmotoren außerhalb des Motors stattfindet, ist er wartungs- und geräuscharm, außerdem langlebig und ca. zehnmal weniger emissiv als herkömmliche Verbrenner. Aufgrund des geringen elektrischen Wirkungsgrads (< 30 %) und vergleichsweise niedrigen Anschlussleistungen (unter 100 kW_{el.}) hat er sich im Biogassektor nicht durchgesetzt. Stirling Motoren können auch mit BHKW-Abwärme betrieben werden. Sie könnten deshalb künftig als Technologie zur Nachverstromung an Bedeutung gewinnen.

Funktionsprinzip

Der Stirlingmotor arbeitet 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 Kurbelwelle auch der Kompressionskolben mit nach oben gedrückt. Das Gas gelangt über den Erhitzer und Regenerator in den Kompressionszylinder und wird dort gekühlt. Der dadurch entstehende Unterdruck zieht den Expansionskolben wieder nach oben. Im Regenerator, der aus einem dichten Drahtgeflecht besteht, wird jeweils ein Teil der Wärme bzw. Kälte des Gases gespeichert, um einem erhöhten Wärmeverlust entgegenzuwirken. Für einen gleichmäßigen Motorlauf benötigt der Stirlingmotor eine Schwungscheibe, um einen toten Punkt im Prozessablauf zu überbrücken.

1.7.1.3 Brennstoffzelle

Die Brennstoffzellentechnologie hat insbesondere im Fahrzeugsektor einen erheblichen Entwicklungs- und Innovationsschub erfahren. Aufgrund des hohen Investitionsbedarfs und hohen Ansprüchen an die Qualität des Brennstoffs hat sie sich allerdings im Biogassektor bisher nicht durchgesetzt. Serienreife Modelle aus dem PKW-Bereich und erhebliche Fortschritte bei der Aufbereitung von Rohbiogas könnten dazu führen, dass künftig die positiven Eigenschaften der Brennstoffzelle auch im Biogassektor genutzt werden. Die BZ weist hohe elektrische Wirkungsgrade (ca. 50 %) auf. Bei Teillastbetrieb treten kaum Wirkungsgradverluste auf. Sie ist wartungs- und geräuscharm und es werden 3- bis 150-fach niedrigere Emissionen verursacht als durch Verbrennungsmotoren (LUBW, 2001).

Funktionsprinzip

Die Funktionsweise der BZ unterscheidet sich grundlegend von der oben beschriebenen thermischen Verbrennung. Da die gebundene chemische Energie des Brennstoffs direkt in elektrische Energie umgewandelt wird, ist die Brennstoffzelle (BZ) wesentlich effektiver als ein herkömmliches BHKW, bei dem der Zwischenschritt zu mechanischer Energie zu Verlusten führt. Die BZ besteht aus den Elektroden Kathode und Anode und dem Elektrolyten, 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 Elektrolyten 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). Der für den Betrieb der BZ nötige Wasserstoff wird in einem Reformier durch die katalytische Umsetzung methanreichen Gases mit Wasserdampf gewonnen (Dampf-reformation). Das dabei entstandene Kohlenmonoxid wird zusätzlich durch Wasser zu Kohlendioxid und Wasserstoff oxidiert. Vor allem Schwefelwasserstoff (H₂S) kann hierbei korrosive Schäden im Reformier verursachen und muss daher vorher entfernt werden.

1.7.1.4 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 Rekupe- rator erwärmt, bevor sie in die Brennkammer gelangt. Die Vorteile der Mikrogasturbine bestehen in den geringen Emissionswerten, in der Toleranz gegenüber Schwefelwasserstoff im Brenngas und vergleichsweise langen Wartungsintervallen. Nachteilig sind die nach wie vor hohen Investitionskosten und der relativ geringe elektrische Wirkungsgrad (ca. 30 %). (Aschmann und Effenberger, 2011)

1.7.2 Wärmenutzung

Beim BHKW Betrieb werden über Wärmetauscher die vorhandene Wärme des Motorkühlwassers, Schmieröls und Abgases nutzbar gemacht. Durch die Nutzung des Wärmepotentials kann der Gesamtwirkungsgrad eines BHKW auf mehr als 90 % gesteigert und so das CO₂ Einsparungspotential deutlich erhöht werden. Dennoch wurde die Wärmeenergie zu Beginn des EEG im Jahr 2000 an vielen Anlagen nur unzureichend genutzt. Deshalb trat 2009 zunächst ein Anreizprogramm in Kraft (KWK-Bonus, EEG 2009) und 2012 schließlich, wurde im Rahmen des EEG die Nutzung von 60 % der anfallenden Abwärme Voraussetzung für den Erhalt der EEG-Vergütung. Dabei muss nachweislich der Verbrauch fossiler Energieträger ersetzt werden und es können pauschal 25 % für den Prozessenergiebedarf angerechnet werden. Zumindest an den Bayerischen Pilotbetrieben führte dies zu einer deutlichen Verbesserung der Situation. Vor 2009 nutzten zehn Pilotbetriebe durchschnittlich rund 30 % der gesamten Abwärme, nach 2012 betrug der mittlere Anteil an weiteren 13 Pilotbetrie- ben mehr als 50 %.

Die Möglichkeiten zur Wärmeverwertung sind vielfältig und der technische Aufwand abhängig von der Art der Verwertung. Wird die Wärme vor Ort, etwa in Stallungen, Trocknungsanlagen, Wohn- oder Werkstattgebäuden genutzt, ist der Aufwand gering. Der Betrieb von Fern- oder Nahwärmenet- zen zur Versorgung von Kommunen oder die Einrichtung einer Wärmeleitung zu Industrieanlagen, Gewächshäusern oder öffentlichen/sozialen Gebäuden ist erheblich aufwändiger.

Einer 2016 durchgeführten Umfrage des DBFZ zufolge nutzen 41 % von ca. 400 befragten Betrie- ben die Wärme in Trocknungsanlagen. 25 % der Betriebe versorgen ihre Stallungen und 30 % Sozi- algebäude mit Biogaswärme. Deutlich angestiegen im Vergleich zur Umfrage 2010 ist die Nutzung als Fern- und Nahwärme. 30 % (2010: 7 %) nutzen demnach ein Nahwärmenetz und 25 % sind an ein Fernwärmenetz angeschlossen (2010: 5 %).

Die Eigenschaften einiger Nutzungsmöglichkeiten werden im folgenden Kapitel erläutert. Da die Wärmenutzung nicht unmittelbar der Biogasproduktion zugeordnet ist, werden technische Details nicht näher ausgeführt.

1.7.2.1 Heizung

Die Nutzung von Biogasabwärme zur Versorgung des thermischen Energiebedarfs von Gebäuden ist sehr verbreitet, auch weil sie zusätzliche monetäre Erträge bietet. Die Nutzung am Betrieb ist ein- fach und kostengünstig. Investition und Aufwand für Wärmeleitungen und Wärmenetze sind höher und hängen ab von der Entfernung und topographischen Situation zu den zu versorgenden Gebäu- den. Da durch Wärmenetze ganze Ortschaften versorgt werden können sind sie bezüglich des Wär- menutzungsgrads sehr effektiv, das gilt auch für Wärmeleitungen zu Industriebetrieben mit hohem Wärmebedarf. Die technischen Anforderungen an Wärmenetze sind ein einer Fachinformation des Biogas-Forum Bayern erschienen (Wagner, 2014), zwei weitere Schriften auf der gleichen Plattform behandeln Anforderungen an das Heizwasser und die Ausgestaltung von Wärmelieferverträgen (Wagner und Glötzl, 2014; Alter, 2018).

1.7.2.2 Trocknung

Trocknungsanlagen bieten die Möglichkeit den im Sommer deutlich geringeren Wärmebedarf anderer versorgter Einrichtungen zu kompensieren und sind deshalb weit verbreitet. Für die Trocknung kommen in Frage Scheitholz, Holzpellets, Erntegut (Getreide, Raufutter, Kräuter) aber auch Produkte zur Futterherstellung (Jehle, 2014; Maierhofer, 2016; Thurner et al., 2017). Die Trocknung vom Gärrückstand dient der Stabilisierung und Massenreduktion (Effenberger et al., 2015). Da sie die Möglichkeit bietet, das Volumen und damit die Ausbringkosten deutlich zu reduzieren, gewinnt sie in größeren Biogasanlagen zunehmend an Bedeutung.

1.7.2.3 Speicherung

Um überschüssige Wärme nutzen zu können, kann sie gespeichert werden. Die Speicherung erfolgt stets unterirdisch, die Speichermedien sind Wasser (konvektiver Wärmeaustausch in Erdbecken oder Felskavernen), Erdreich (konduktiver Wärmeaustausch durch Sonden) oder eine Kombination aus beiden.

Möglicherweise haben technisch einfachere Lösungen zur Nutzung der Wärme im Sommer (z. B. Trocknungsanlagen) dazu geführt, dass sich die Speicherung nicht durchgesetzt hat. Weder eine der Bayerischen Pilotanlagen noch eine der an der DBFZ-Umfrage beteiligten Betriebe wenden diese Technik an.

1.7.2.4 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, aber der größte Kühlbedarf besteht, bietet sich dieses Verfahren bei gesicherter Kälteabnahme als eine interessante Nutzungsalternative an. Die Anschaffung der dafür verwendeten Absorptionskälteanlagen, die durch thermische Energie betrieben werden, war in der Vergangenheit kostenintensiv. In bayerischen Anlagen sind sie nicht sehr verbreitet. Mittlerweile bieten BHKW-Hersteller Kompaktversionen der unteren Leistungsklasse mit integrierter Kältemaschine an.

1.7.2.5 CRC und ORC Technologie

Mittlerweile ist die Nachverstromung (NV) bei Biogasanlagen tendenziell etabliert (Stockmann et al., 2019). Üblicherweise dienen CRC oder ORC-Prozesse zur Steigerung der Stromausbeute durch die NV. In beiden Fällen wird die Wärmeenergie des Abgases dafür verwendet ein Arbeitsmedium zu expandieren und so eine Turbine zu betreiben, mit der über einen Generator zusätzlich Strom produziert wird. In einem Kondensator wird das Arbeitsmedium wieder verflüssigt, wobei thermische Energie frei wird, die z. B. in Trocknungsanlagen verwertet werden kann. Die beiden Verfahren unterscheiden sich nur in den Arbeitsmedien. Die CRC-Technik (Clausius-Rankine-Cycle) wird mit Wasser betrieben, die ORC-Technik (Organic Rankine Cycle) mit einem organischen Fluid (z. B. Toluol oder Silikonöl), das deutlich niedrigere Siedepunkte aufweist (ab 70 °C). Anlagen um 40 kW_{el.} erfordern Wärmeleistungen von ca. 220 kW, Anlagen mit 170 kW_{el.} benötigen mehr als 900 kW thermische Energie und sind nur für Anlagen mit hohen Anschlussleistungen (1 bis 2 MW_{el.}) geeignet. Die Systeme sind kostenintensiv und in Bayern aufgrund der kleineren Strukturen nicht sehr verbreitet (Stockmann et al., 2019).

1.7.3 Einspeisung ins Erdgasnetz

Neben der klassischen Verbrennung des produzierten Biogases und der damit verbundenen Nutzung des Stromes und der anfallenden Abwärme, kann es auch in das Erdgasnetz eingespeist oder als Kraftstoff für Fahrzeuge verwendet werden.

Die Qualitätsanforderungen für das Einspeisen des aufbereiteten Biogases ins Erdgasnetz richten sich nach den Spezifikationen des DVGW-Regelwerks G 260. Für die Bereitstellung als Kraftstoff müssen die Normen der ISO/DIS 15403 erfüllt werden. Darin sind im Wesentlichen Mindestbrennwert und die zulässigen Gehalte an Nebenbestandteilen im Gas geregelt. Da die Regelwerke regelmäßig angepasst werden ist darauf zu achten, dass die Anforderungen der aktuellen Fassung eingehalten werden. In Kapitel 1.6.2 sind verschiedene Möglichkeiten beschrieben, wie das Gas konditioniert werden kann, so dass es die geforderte Brennstoffqualität aufweist.

1.7.4 Gasentsorgung

Methan hat die 24-fache Klimawirksamkeit von CO₂. Aus diesem Grund gilt es die Freisetzung zu vermeiden. Ist an einer Biogasanlage die Einheit zur Gasnutzung außer Betrieb, kann nur ein bestimmter Teil des Gasvolumenstroms durch die Speichereinheit gelagert werden. Ist die Lagerkapazität überschritten, würde das Gas über die Überdrucksicherungen in die Atmosphäre gelangen und den Umweltnutzen einer Biogasanlage stark beeinträchtigen. Seit 2014 müssen deshalb alle Biogasanlagen in Deutschland eine zusätzliche Gasverbrauchseinrichtung nachweisen, um bei Ausfall der regulären Gasverwertungseinheit eine unkontrollierte Freisetzung von Biogas in die Umwelt zu verhindern (Russow, 2013). Nahezu ausnahmslos werden dafür stationäre sogenannte geschlossene Gasfackeln mit weitgehend verdeckter Flamme eingesetzt, da sie im Vergleich zu offenen Fackelsystemen deutlich bessere Abgaseigenschaften aufweisen. Gasfackeln müssen in der Lage sein Schwachgas aus dem Anfahrbetrieb (30 % CH₄) als auch Biomethan von Einspeiseanlagen (100 % CH₄) zu verbrennen. Sie müssen die maximal produzierbare Gasmenge verarbeiten können und ggf. ist der erforderliche Betriebsdruck durch einen Verdichter herzustellen. Eine Automatische Zündvorrichtung ist verpflichtend vorzusehen. Zudem muss die Funktion regelmäßig überprüft werden (Russow, 2013). Weitere Anforderungen an Gasfackeln finden sich in Kapitel 2.2.2.2.8.

1.8 Gärrückstandslagerung

Der Gärrückstand aus einer Biogasanlage enthält Methan bildende Mikroorganismen, die auch in unbeheizten Lagerbehältern einen – wenn auch stark verlangsamten – Abbau verbliebener organischer Substanz bewirken. Um zu verhindern, dass so klimarelevantes Biogas emittiert wird, werden neu errichtete Gärrückstandslager i. d. R. gasdicht ausgeführt und das entstehende Biogas wird verwertet. Das verhindert gleichzeitig Ammoniakemissionen, die bei der offenen Lagerung von Gärrückständen aufgrund deren höherem Anteil an Ammonium-Stickstoff höher ausfallen als bei unbehandeltem Flüssigmist. Die rechtlichen Vorgaben bezüglich des Emissionsschutzes bei der Gärrückstandslagerung sind detailliert in Kapitel 2.2.2.2.9 dargelegt. Vereinfacht ausgedrückt sehen die Regelungen vor, dass für alle Biogasanlagen eine Mindestverweilzeit von 150 Tagen im gasdichten System nachgewiesen werden muss, um in einem nicht gasdichten Behälter aus dem Bestand einlagern zu können. Ausgenommen von dieser Regelung sind nur Anlagen, die ausschließlich Wirtschaftsdünger und Futterreste einsetzen.

Ein Gärrückstandslager kann als Tiefbehälter (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, bedürfen eines statischen Nachweises (siehe Kapitel 2) und müssen mit einer Leckageerkennung versehen sein. Ein Überlaufen des Lagerbehälters ist durch baulich-technische Maßnahmen auszuschließen.

Gärrückstände entmischen sich im Allgemeinen rascher als unbehandelter Rinder-Flüssigmist. Um sie vor der Entnahme homogenisieren zu können, müssen im Lagerbehälter ausreichend Rührkapazitäten vorhanden sein. Hierfür kommen grundsätzlich alle Techniken in Frage, die auch in Fermentern eingesetzt werden (siehe Kapitel 1.5.9). Für ausreichend Freibord (mind. 20 cm) muss wegen

Wellenbildung beim Aufrühren gesorgt werden. Wenn anfallendes Niederschlagswasser dem Vergärungsprozess oder dem Gärrückstandslager zugeführt wird, ist es bei der Berechnung der Lagerkapazität mit zu berücksichtigen (siehe Kapitel 2). Besonders stark ist der Niederschlagsüberschuss im Winter, wenn gleichzeitig die größte Lagerkapazität erforderlich ist.

Für „geschlossene Behälter“ im Sinne der VDI 3894 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 verwertet werden. Zeltdächer können hängend (Kegelstumpfplane), mit Pendelstütze oder Unterkonstruktion (mit oder ohne Mittelstütze) ausgeführt werden. Dächer mit einer festen Unterkonstruktion beanspruchen die Plane am wenigsten, stellen jedoch eine höhere Belastung der Behälterwand dar. Segmentförmige Abdeckungen werden aus glasfaserverstärktem Kunststoff, Stahl oder Beton mit oder ohne Mittelstütze angeboten. Flexible Abdeckungen sind vorzuziehen, da so Unterdruckprobleme bei der Gärrückstandentnahme vermieden werden können.

Literaturverzeichnis

- [1] Abdel Azim, A. et al. (2017), The physiology of trace elements in biological methane production, *Bioresource Technology* 241, 775–786.
- [2] Alter, N. (2018), Hinweise zur Wasserqualität in Heizungssystemen und Wärmenetzen, *Biogas Forum Bayern*, Hrsg. ALB Bayern e.V.
- [3] Amon, T. (2003), Optimierung der Biogaserzeugung aus Energiepflanzen Mais und Klee gras, Projektbericht, Institut für Landtechnik, Universität für Bodenkultur Wien, Wien.
- [4] Angelidaki, I. et al. (2009), Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays, *Water Science and Technology* 59 (5), 927–934.
- [5] Aschmann, V. (2002), Feststoff vergären: es geht auch ohne Gülle, *Biogas: Strom aus Gülle und Biomasse*, Top Agrar Fachbuch, Landwirtschaftsvlg Münster, Münster, 22–25.
- [6] Aschmann, V. und M. Effenberger (2011), Marktübersicht BHKW, *Biogas Forum Bayern*, Hrsg. ALB Bayern e.V.
- [7] Baader, W., E. Dohne und M. Brenndörfer (1978), *Biogas in Theorie und Praxis: Behandlung organischer Reststoffe aus der Landwirtschaft durch Methangärung*, KTBL-Schrift 229, 134.
- [8] Baserga, U. (1998), Landwirtschaftliche Co-Vergärungs-Biogasanlagen. Biogas aus organischen Reststoffen und Energiegras. *Agricultural co-digestion biogas plants. Biogas from organic waste and energy grass.*, FAT-Berichte Nr. 512.
- [9] Bauer, C., M. Korthals, A. Gronauer und M. Lebuhn (2008), Methanogens in biogas production from renewable resources - a novel molecular population analysis approach, *Water Science and Technology* 58 (7), 1433–1439.
- [10] Bauer, C., M. Lebuhn und A. Gronauer (2009), Mikrobiologische Prozesse in landwirtschaftlichen Biogasanlagen, *LfL-Schriftenreihe*.
- [11] BGBl. (2011), Gesetz zur Neuregelung des Rechtsrahmens für die Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien, 4. August.
- [12] Bischofsberger, Wolfgang, Norbert Dichtl, Karl-Heinz Rosenwinkel, Carl-Franz Seyfried und Botho Böhnke (Hrsg.) (2005), *Anaerobtechnik*, 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- [13] Buswell, A.M. und H.F. Mueller (1952), Mechanism of Methane Fermentation, *Industrial & Engineering Chemistry* 44 (3), 550–552.
- [14] Dandikas, V., H. Heuwinkel, F. Lichti, T. Eckl, J.E. Drewes und K. Koch (2018), Correlation between hydrolysis rate constant and chemical composition of energy crops, *Renewable Energy* 118 (Supplement C), 34–42.
- [15] Dandikas, V., M. Lebuhn, M. Post, M. Fritz und K. Koch (2020), Gasausbeute - Erklärung verschiedener Methoden und Tests zur Bestimmung., *Biogas Forum Bayern*.
- [16] Daniel-Gromke, J. et al. (2017), Anlagenbestand Biogas und Biomethan – Biogaserzeugung und -nutzung in Deutschland (DBFZ Report Nr. 30), DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH, Leipzig.
- [17] De Moor, S. et al. (2013), Feasibility of grass co-digestion in an agricultural digester, influence on process parameters and residue composition, *Bioresource Technology* 150, 187–194.
- [18] Demirel, B. und P. Scherer (2011), Trace element requirements of agricultural biogas digesters during biological conversion of renewable biomass to methane, *Biomass and Bioenergy* 35 (3), 992–998.
- [19] dena (2020), Branchenbarometer Biomethan 2020. Stand: 04/2020, Deutsche Energie-Agentur GmbH.
- [20] Eder, J., B. Eder, D. Hofmann, B. Darnhofer und F. Lichti (2012), Silomais als Biogassubstrat, *Biogas Forum Bayern*, Hrsg. ALB Bayern e.V.
- [21] Effenberger, M. et al. (2021), Empfehlungen für die messtechnische Ausstattung landwirtschaftlicher Biogasanlagen, *Biogas Forum Bayern*, Hrsg. ALB Bayern e.V.
- [22] Effenberger, M., H. Möhrle, G. Winkler und T. Krodel (2015), Technische Empfehlungen für die Gärresttrocknung, *Biogas Forum Bayern*, Hrsg. ALB Bayern e.V.
- [23] Fachverband Biogas (2020), Branchenzahlen 2019 und Prognose der Branchenentwicklung 2020. Stand: 07/2020, Fachverband Biogas e.V.
- [24] Graf, W. (1999), *Kraftwerk Wiese - Strom und Wärme aus Gras.*, Books on Demand, Norderstedt.
- [25] Häring, G., M. Sonnleitner, L. Wiedemann, W. Zörner und V. Aschmann (2013), Technische Anforderungen an Biogasanlagen für die flexible Stromerzeugung, *Biogas Forum Bayern*, Hrsg. ALB Bayern e.V.
- [26] Hartmann, T., N. Schwanhold und S. Leimkühler (2015), Assembly and catalysis of molybdenum or tungsten-containing formate dehydrogenases from bacteria, *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Proteins and Proteomics* 1854 (9), 1090–1100.

- [27] Henkelmann, G., K. Meyer zu Köcker, M. Lebuhn, M. Effenberger und K. Koch (2020), Schlüsselpa-
rameter zur Kontrolle des Gärprozesses - Physikalische und chemische Untersuchungen, Biogas Forum
Bayern, Hrsg. ALB Bayern e.V.
- [28] IPCC (Hrsg.) (1996), Second Assessment Report - Climate Change 1995: The Science of Climate
Change, Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Great Britain.
- [29] Jehle, S. (2014), Trocknung von Getreide einschließlich Mais mit Biogas-Wärme, Biogas Forum Bayern,
Hrsg. ALB Bayern e.V.
- [30] Jenbacher (2002), Handbuch zur Nutzung von Bio-, Klär- und Deponiegasen in GE Jenbacher Gasmotoren.
Unternehmensprospekt.
- [31] Kaltschmitt, M., H. Hartmann und H. Hofbauer (2016), Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken
und Verfahren, 3., aktualisierte Aufl. 2016 Edition Auflage, Springer Vieweg, Berlin Heidelberg.
- [32] Kissel, R., G. Henkelmann, V. Dollhofer, M. Lebuhn, J. Seidel und K. Koch (2019), Substrataufbereitung,
Biogas Forum Bayern, Hrsg. ALB Bayern e.V.
- [33] Kissel, R., R. Kliche, G. Streicher und M. Effenberger (2014), Empfehlungen für die Auswahl von Rühr-
werken für Gärbehälter und Gärrestlager, Biogas Forum Bayern, Hrsg. ALB Bayern e.V.
- [34] Kleemann, M. und M. Meliß (1993), Regenerative Energiequellen, 2., völlig Neubearb. Edition Auflage,
Springer, Berlin.
- [35] Koch, K., M. Wichern, M. Luebken und H. Horn (2009), Mono fermentation of grass silage by means of
loop reactors, *Bioresource Technology* 100 (23), 5934–5940.
- [36] KTBL (2015), Gasausbeute in landwirtschaftlichen Biogasanlagen, Heft 107, 3. Auflage, Kuratorium für
Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., Darmstadt, Germany.
- [37] Lebuhn, M., A. Hanreich, M. Klocke, A. Schlüter, C. Bauer und C.M. Pérez (2014), Towards molecular
biomarkers for biogas production from lignocellulose-rich substrates, *Anaerobe* 29, 10–21.
- [38] Lebuhn, M., F. Liu, H. Heuwinkel und A. Gronauer (2008), Biogas production from mono-digestion of
maize silage-long-term process stability and requirements, *Water Science and Technology* 58 (8), 1645–
1651.
- [39] Letalik, C. et al. (2021), Energetische Nutzung von Landschaftspflegematerial in Biogasanlagen, Biogas
Forum Bayern, Hrsg. ALB Bayern e.V.
- [40] Li, Y., R. Zhang, G. Liu, C. Chen, Y. He und X. Liu (2013), Comparison of methane production potential,
biodegradability, and kinetics of different organic substrates, *Bioresource Technology* 149, 565–569.
- [41] Lübken, M., T. Gehring und M. Wichern (2010), Microbiological fermentation of lignocellulosic biomass:
current state and prospects of mathematical modeling, *Applied Microbiology and Biotechnology* 85 (6),
1643–1652.
- [42] LUBW (Hrsg.) (2001), Blockheizkraftwerke - Technik, Ökologie, Ökonomie, 1. Auflage, Landesanstalt für
Umweltschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe.
- [43] Maierhofer, H. (2016), Trocknung von Energieholz im Satz Trockner mit Biogas-Wärme, Biogas Forum
Bayern, Hrsg. ALB Bayern e.V.
- [44] Mittweg, G., H. Oechsner, V. Hahn, A. Lemmer und A. Reinhardt-Hanisch (2012), Repeatability of a la-
boratory batch method to determine the specific biogas and methane yields, *Engineering in Life Sci-
ences* 12 (3), 270–278.
- [45] MLUV (Hrsg.) (2006), Biogas in der Landwirtschaft. Leitfaden für Landwirte und Investoren im Land
Brandenburg, Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Bran-
denburg, Referat Presse- und Öffentlichkeitsarbeit, Postdam.
- [46] Ottow, J. und W. Bidlingmaier (1999), Umweltbiotechnologie, Spektrum Akademischer Verlag, Stuttgart.
- [47] Plöchl, M. und M. Heiermann (2002), Ökologische Bewertung der Bereitstellung landwirtschaftlicher Ko-
substrate zur Biogaserzeugung, Biogas und Energielandwirtschaft- Potenzial, Nutzung, Grünes Gas,
Ökologie und Ökonomie, Bornimer Agrartechnische Berichte, Bd. Vol. 32, Institut für Agrartechnik Bor-
nim e.V. (ATB), Potsdam-Bornim.
- [48] Ramesohl, S. et al. (2005), Analyse und Bewertung der Nutzungsmöglichkeiten von Biomasse. Untersu-
chung im Auftrag von BGW und DVGW. Band 3: Biomassevergasung, Technologien und Kosten der
Gasaufbereitung und Potenziale der Biogaseinspeisung in Deutschland, Projektbericht, Wuppertal Insti-
tut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH; Institut für Energetik und Umwelt gGmbH; Fraunhofer-Institut für
Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik; Gas- und Wärme-Institut Essen e.V.
- [49] Rensberg, N., B. Schumacher und W. Stinner (2017), Verfügbare ungenutzte Substratpotenziale und
Hemmnisse bei deren energetischer Nutzung in deutschen Biogasanlagen - Befragung von Tierhaltern
ohne Biogasanlage.
- [50] Russow, F. (2013), Gasfackeln - technische Grundlagen und Anwendung auf landwirtschaftlichen Bio-
gasanlagen, Biogas Forum Bayern, Hrsg. ALB Bayern e.V.
- [51] Schieder, D. et al. (2010), Prozessmodell Biogas, Biogas Forum Bayern, Hrsg. ALB Bayern e.V. (Nr III-
3/2010).

- [52] Schneider, R., P. Quicker, T. Anzer, S. Prechtl und M. Faulstich (2004), Grundlegende Untersuchungen zur effektiven, kostengünstigen Entfernung von Schwefelwasserstoff aus Biogas, Projektbericht, ATZ Entwicklungszentrum, Untersuchung der internen, biologischen Entschwefelung mittels.
- [53] Schönbacher, A. (2002), Thermische Verfahrenstechnik: Grundlagen und Berechnungsmethoden für Ausrüstungen und Prozesse, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- [54] Schulz, H., B. Eder, A. Krieg und H. Mitterleitner (2001), Biogas-Praxis: Grundlagen, Planung, Anlagenbau, Beispiele, 2., überarb. Edition Auflage, Ökobuch, Staufen bei Freiburg.
- [55] Schulz, H., A. Perwanger und H. Mitterleitner (1982), Einsatzmöglichkeiten verschiedener Energieträger in der Landwirtschaft., Projektbericht, Landtechnischen Vereins in Bayern e.V., München.
- [56] SeV (2008), biogasaufbereitungssysteme zur Einspeisung in das Erdgasnetz, SeV-Studien 02, Solar-energieförderverein Bayern e.V., München.
- [57] Stickse, E., F. Lichti, A. Klara und D. Hofmann (2015), Wintergetreide - Ganzpflanzensilage als Biogas-substrat, Biogas Forum Bayern, Hrsg. ALB Bayern e.V.
- [58] Stockmann, F., R. Wagner, U. Kilburg und C. Kern (2019), Nachverstromung in landwirtschaftlichen Biogasanlagen, Biogas Forum Bayern, Hrsg. ALB Bayern e.V.
- [59] Streicher, G., M. Effenberger und M. Helm (2019), Feststoffeintragssysteme an Biogasanlagen, Biogas Forum Bayern, Hrsg. ALB Bayern e.V.
- [60] Thurner, S., J. Simon, P. Stötzel, G. Ohmayer und A. Schneider (2017), Möglichkeiten der Nutzung von Kraft-Wärme-Kopplung zur Heubelüftung Teil 1: Technische und bauliche Grundlagen, Förderung, Biogas Forum Bayern, Hrsg. ALB Bayern e.V.
- [61] VDI 4630 (2016), Richtlinie VDI 4630 - Vergärung organischer Stoffe Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche., Verein Deutscher Ingenieure.
- [62] Wagner, R. (2014), Technische Anschlussbedingungen (TAB) Fernwärme, Biogas Forum Bayern, Hrsg. ALB Bayern e.V.
- [63] Wagner, R. und M. Glötzl (2014), Wärmeliefervertrag, Biogas Forum Bayern, Hrsg. ALB Bayern e.V.
- [64] Weiland, P. (2003), Notwendigkeit der Biogasaufbereitung, Ansprüche einzelner Nutzungsrouten und Stand der Technik, Rede, FNR-Workshops „Aufbereitung von Biogas“ vom 17./18.06.2003, Braunschweig.
- [65] Weiland, P. (2001), Grundlagen der Methangärung - Biologie und Substrate, Konferenzpapier, Biogas als regenerative Energie: Stand und Perspektiven, Düsseldorf.
- [66] Weinrich, S. und M. Nelles (2015), Critical comparison of different model structures for the applied simulation of the anaerobic digestion of agricultural energy crops, Bioresource Technology 178, 306–312.
- [67] Wenzel, W. (2002), Mikrobiologische Charakterisierung eines Anaerobreaktors zur Behandlung von Rübenmelasseschlempe.
- [68] Zölsmann, H., A. Mielke, C. Marx, M. Effenberger und B. Huber (2017), Entschwefelung von Biogas in landwirtschaftlichen Biogasanlagen, Biogas Forum Bayern, Hrsg. ALB Bayern e.V.