

Grundsätzliches zu Biogas

Entstehung, Aufbereitung, Verwertung

Inhaltsverzeichnis

1	Bioenergie	5
1.1	Formen von Bioenergie	5
1.2	Wärme- und Stromerzeugung	6
1.3	Biokraftstoffe	6
1.3.1	Biokraftstoffe der ersten Generation.....	6
1.3.2	Biokraftstoffe der zweiten Generation	7
1.3.3	Biokraftstoffe der dritten Generation.....	7
1.4	Potenziale und Flächenbedarf	7
1.5	Vor- und Nachteile der Bioenergien.....	8
1.5.1	Vorteile	9
1.5.2	Nachteile.....	9
1.5.3	Landwirtschaftliche Nutzung von Agrarflächen.....	10
1.5.4	Biogasausbeuten	12
1.5.5	Wirtschaftlichkeit von Biogas.....	14
1.6	Sicherstellung der Nachhaltigkeit von Bioenergien	15
1.7	Perspektive der Bioenergien.....	15
2	Entstehung von Biogas	16
3	Biogasaufbereitung	20
3.1	Verfahrensarten.....	20
3.2	Nassvergärungsverfahren	20
3.2.1	Propfenströmungsverfahren.....	20
3.2.2	Verfahren mit Volldurchmischung.....	22
3.2.3	Sonderverfahren	22
3.3	Verfahren der Trockenvergärung.....	23
3.4	Containerverfahren.....	24
3.5	Boxen-Fermenter	25
3.6	Folienschlauch-Fermenter	25
3.7	Wannen- bzw. Tunnelfermenter	26
3.8	Propfenstromfermenter.....	27
4	Faulgasnutzung	28
4.1	Gasaufbereitung.....	29
4.2	Verbrennung	30
4.3	Heizen mit Biogas	30
4.4	Biogas als Treibstoff.....	30
4.5	Kraft- Wärme-Kopplung.....	30

4.6	Einspeisung ins Gasnetz	31
4.6.1	Druckwasserwäsche	33
4.6.2	Druckwechselverfahren (PSA)	33
4.6.3	Aminwäsche	33
4.6.4	Gensorb [®] – Verfahren Fa. Haase.....	34
4.7	Vergütung nach dem EEG.....	36
	Tabellenverzeichnis	37
	Quellenangaben	38

Vorwort

Diese Zusammenfassung über das Thema Biogas ist unter Zuhilfenahme unterschiedlicher Fachliteratur zusammengefasst worden. Dabei wurden Textzeilen teilweise komplett übernommen. Die Verwendete Literatur ist in der Übersicht aufgeführt. Sollten vertiefende Informationen benötigt werden, sollte die Infos oder entsprechenden Literatur entnommen werden. Soweit möglich wurden hierzu in den Quellenverzeichnissen die entsprechenden Links hinzugefügt.

1 Bioenergie

Als Bioenergie bezeichnet man Energie, die aus Biomasse gewonnen wird. Dabei werden verschiedene Energieformen wie Wärme, elektrische Energie oder auch Kraftstoff für Verbrennungsmotoren eingeschlossen. Meist wird auch Biomasse, in der die Energie chemisch gespeichert ist, als Bioenergie bezeichnet. Bisher hat Holz als Festbrennstoff die größte Bedeutung, aber auch landwirtschaftliche Produkte (Agrarrohstoffe) und organische Reststoffe aus unterschiedlichen Bereichen spielen eine zunehmende Rolle.

Derzeit findet weltweit ein starker Ausbau der Erzeugung von Bioenergie statt. Wichtige Gründe sind die steigende Preistendenz für fossile Energieträger und deren abnehmende Verfügbarkeit, die hohe Abhängigkeit durch die einseitige Verteilung von Ressourcen wie Öl und Gas, sowie Bemühungen zur Senkung der Treibhausgasemissionen. In Deutschland wird dieser Ausbau vom Gesetzgeber vor allem durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) gefördert.



Einzelne Bioenergien stehen in der Kritik, da ihre Erzeugung eine Flächenkonkurrenz zur Nahrungsmittelerzeugung darstellen kann oder weil ihr ökologischer und ökonomischer Nutzen begrenzt ist. Da die Bereitstellung und Nutzung der verschiedenen Bioenergien sehr unterschiedlich stattfindet, ist eine Bewertung im Einzelfall notwendig.

1.1 Formen von Bioenergie

Basis der Bioenergie ist die Sonnenenergie. Diese kann von Pflanzen mit Hilfe der Photosynthese in Biomasse chemisch gebunden werden. Abhängig von der Art der Biomasse sind unterschiedliche Aufbereitungsschritte notwendig. So können Verfahren wie

- Methangärung (Biogas),
- alkoholische Gärung (Ethanol),
- Pyrolyse oder Ölextraktion (Pflanzenöl) mit anschließender Umesterung (Biodiesel)

notwendig sein, oder, wie bei Holz, auch eine direkte Verwendung erfolgen. Die Nutzung erfolgt meist in Anlagen, die in identischer oder ähnlicher Form auch mit fossilen Energieträgern betrieben werden [Ofen (mit Dampfkessel), Verbrennungsmotor, Gasturbine].

1.2 Wärme- und Stromerzeugung

Verschiedene Bioenergieträger werden zur Strom- oder Wärmebereitstellung eingesetzt. Häufig findet auch eine kombinierte Erzeugung durch sogenannte Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) statt, um den Gesamtwirkungsgrad zu steigern.

Biomasseheizwerke und Biomasseheizkraftwerke nutzen Biomasse, um Wärme und, bei Heizkraftwerken, auch Strom zu erzeugen. Neben Forstholz als hauptsächlichem Brennstoff können auch landwirtschaftliche Erzeugnisse wie Kurzumtriebsholz und Stroh genutzt werden. Eine Nutzung in Kleinanlagen (Kamine, Öfen, Heizkessel) in Wohnhäusern ist möglich, beispielsweise in Pelletheizungen zur Wärmebereitstellung. Bei höherem Wärmebedarf (Mehrfamilienhäuser, Gewerbe, Industrie) kommen auch Holzhackschnitzelheizungen zum Einsatz.

Durch Vergärung von Gülle, Pflanzensilage und anderer Biomasse (Substrat) in Biogasanlagen wird sogenanntes Biogas erzeugt. Meist erfolgt nach geringfügiger Aufbereitung des Gases die Erzeugung von elektrischem Strom und Nutzwärme in einem BHKW an der Biogasanlage. Durch eine weitere, aufwendige Aufbereitung (Biogasaufbereitung) zu Biomethan (Bioerdgas) ist in Deutschland seit einigen Jahren auch eine Einspeisung in das Erdgasnetz möglich. Durch Verstromung des Biomethans an einer geeigneten Wärmesenke kann eine bessere Abwärmenutzung möglich sein. Auch eine Nutzung des Biomethans als Kraftstoff in Fahrzeugen mit Erdgasantrieb ist möglich.

Eine weitere Option kann die Herstellung von **Synthetic Natural Gas** (SNG, synthetisches Erdgas) aus Biomasse durch Pyrolyse und anschließende Methanisierung sein. Wie bei der Aufbereitung von Biogas zu Bioerdgas kann das Produkt der Methanisierung auf Erdgasqualität aufbereitet und in das Erdgasnetz eingespeist werden. Eine Nutzung sowohl zur Strom- und Wärmeerzeugung als auch als Kraftstoff ist möglich. Bisher hat die Erzeugung von SNG nur eine geringe Bedeutung.

1.3 Biokraftstoffe

Biokraftstoffe werden häufig unterteilt in eine erste, zweite und dritte Generation. Neben der Verwendung in Kraftfahrzeugen können die Biokraftstoffe auch zur Strom- und Wärmeerzeugung, beispielsweise in BHKWs, genutzt werden.

1.3.1 Biokraftstoffe der ersten Generation

Wird für die Herstellung nur ein begrenzter Anteil einer Pflanze verwendet, so wird das Produkt zur ersten Generation gezählt. Bioethanol wird durch Vergärung von Zuckern (aus Zuckerrübe, Zuckerrohr) und Zuckerpolymeren wie vor allem Stärke (aus Mais, Getreide, Kartoffel) gewonnen. Pflanzenöle werden durch Pressen oder Extraktion aus ölhaltigen Pflanzenbestandteilen gewonnen (Frucht von Raps, Soja, Sonnenblume). Biodiesel wird zur Verbesserung der Eigenschaften als Kraftstoff

durch Umesterung aus Pflanzenölen hergestellt. Biomethan aus Biogas kann auch als Kraftstoff dienen. Da die Ausbeute pro Anbaufläche relativ hoch ist, wird es gelegentlich auch der zweiten Generation zugeordnet.

1.3.2 Biokraftstoffe der zweiten Generation

Wird nahezu die vollständige Pflanze oder bisher unerschlossene Reststoffe verwendet, ordnet man das Produkt der zweiten Generation zu. Insbesondere Cellulose- und Lignocellulose-Anteile von Pflanzen und Holz wird ein hohes Potential zugeordnet. Da der Herstellungsprozess bei derzeitigem Stand der Technik jedoch deutlich aufwendiger ist, als bei Kraftstoffen der ersten Generation, erfolgt bisher keine Umsetzung in großem kommerziellen Maßstab.

BtL-Kraftstoffe (biomass to liquid) können aus fast jeder Art Biomasse (Stroh, Miscanthus, Kurzumtriebsholz, Waldrestholz, Holzabfälle) hergestellt werden. Diese wird durch Vergasung zunächst in niedermolekulare Bestandteile zerlegt und nach einer Gasreinigung durch Fischer-Tropsch-Synthese in ein Gemisch von Kohlenwasserstoffen umgewandelt. Die Verfahren befinden sich noch in der Entwicklung.

Die Gewinnung von Bioethanol aus Cellulose (Cellulose-Ethanol) ist ebenfalls noch in der Entwicklung.

1.3.3 Biokraftstoffe der dritten Generation

Gelegentlich werden Algenkraftstoffe wegen der hohen Produktivität der Algen pro Kultivierungsfläche als dritte Generation der Biokraftstoffe genannt. Jedoch findet derzeit keine kommerzielle Produktion statt und wird von Kritikern wegen hoher Betriebs- und Investitionskosten auch in absehbarer Zukunft nicht erwartet.

1.4 Potenziale und Flächenbedarf

Die Potenziale der Bioenergien hängen vor allem von der Verfügbarkeit von Anbaufläche, auf denen nachwachsende Rohstoffe (NawaRos) für die Energieerzeugung angebaut werden können, ab. Wichtig ist auch die Menge an landwirtschaftlichen, forstwirtschaftlichen und anderen organischen Reststoffen.

Nach Erhebungen der Food and Agriculture Organization (FAO) sind 3,5 Mrd. ha degradierte Fläche, die für den Anbau von Bioenergiepflanzen infrage käme, während die Anbaufläche für Biokraftstoffe im Jahr 2007 weltweit lediglich 30 Mio. ha. Betrag¹. Die weltweit verfügbaren Potenziale für Bioenergie sind demnach noch weitestgehend unerschlossen, ohne dass eine Konkurrenz zu Nahrungsmittelanbau entstehen müsste.

Nach einem Gutachten des Wissenschaftlichen Beirats der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) beträgt das technische Potenzial unter Beachtung sehr weitreichender Naturschutzkriterien zwischen 30 und 120 Exajoule (EJ),

was ca. 6% bis 25% des weltweiten Primärenergiebedarfs entspricht. Zusammen mit biogenen Reststoffen kann Bioenergie demnach 80 bis 170 EJ und damit 16% bis 35% des Weltenergiebedarfs bereitstellen. Aufgrund wirtschaftlicher und politischer Restriktionen sei eine Abschöpfung des Potenzials jedoch womöglich nur etwa zur Hälfte möglich (d.h. 8% bis 17,5% des Weltenergiebedarfs)ⁱⁱ.

Andere Studien berechnen weit höhere mögliche Potenziale bis zu 1440 EJ (das Dreifache des Weltenergiebedarfs), insbesondere aufgrund höherer Annahmen zur Ertragshöhe pro Flächeneinheit vor allem auf degradierten Böden, die im WBGU-Gutachten ausgesprochen konservativ eingeschätzt wurden. Eine Studie im Auftrag der Agentur für Erneuerbare Energie kommt zu dem Ergebnis, dass bei Nutzung der Hälfte der weltweiten degradierten Flächen mehr als 40% des heutigen globalen Primärenergiebedarfs aus Energiepflanzen gedeckt werden kann. Zusammen mit biogenen Reststoffen kann demnach die Hälfte des gesamten Weltenergiebedarfs mithilfe von Bioenergie gedeckt werden, ohne dass Nutzungskonkurrenzen zu Naturschutz oder Nahrungsmittelversorgung entstehen müsstenⁱⁱⁱ.

In Deutschland wurden 2007 mit 2 Mio. ha auf 12% der landwirtschaftlichen Nutzfläche Energiepflanzen angebaut. Einer vom Bundesumweltministerium vorgelegten Stoffstromanalyse zufolge kann diese Fläche bis 2030 mehr als verdoppelt werden (4,4 Mio. ha), ohne in Nutzungskonkurrenzen mit der Nahrungsmittelerzeugung zu geraten. Die auf dieser Fläche produzierten Energiepflanzen können demnach, zusammen mit biogenen Reststoffen, rund 16% des deutschen Strombedarfs, 10% des Wärmebedarfs und 12% des Kraftstoffbedarfs bereitstellen^{iv}.

Laut dem von der Agentur für Erneuerbare Energie im Januar 2010 vorgelegten Potenzialatlas Erneuerbare Energie wird der für Bioenergie benötigte Flächenbedarf von heute ca. 1,6 Mio. ha auf 3,7 Mio. ha im Jahr 2020 ansteigen, wobei hiermit 15% des gesamten deutschen Strom-, Wärme- und Kraftstoffbedarfs durch Bioenergie gedeckt werden kann. Die Versorgung mit Lebensmitteln sei dabei zu keinem Zeitpunkt gefährdet. „Trotz des steigenden Anteils der Bioenergie gibt es jedes Jahr deutliche Überschüsse bei der Getreideernte in Deutschland und der EU“, sagt Daniela Thrän vom Deutschen Biomasseforschungszentrum (DBFZ). „Die Produktivität in der Landwirtschaft steigt im Schnitt weiter an. Hinzu kommen Reststoffe wie Stroh, Gülle oder Restholz sowie brachliegende Flächen – das Potenzial bei Bioenergie ist also immer noch sehr groß“, ist Thrän überzeugt^v.

Gegenwärtig werden 5% der globalen Getreideernte zur Herstellung von Biokraftstoffen genutzt^{iv}. Von der europäischen Getreideernte werden 1,6% für Biokraftstoffe genutzt. Der überwiegende Teil (58%) wird für Viehfutter verwendet^{vii}.

1.5 Vor- und Nachteile der Bioenergien

Bei der Bewertung der Bioenergien sind zahlreiche Aspekte zu berücksichtigen, wie beispielsweise die Wirtschaftlichkeit, die Klimaverträglichkeit, der Einfluss auf die Ökologie (Biodiversität) und die Flächenkonkurrenz gegenüber der Nahrungsmittel-

erzeugung. Da diese Aspekte oft im Widerspruch zueinander stehen, führt die Bewertung meist zu ambivalenten Ergebnissen. Zudem ist keine einheitliche Bewertung für alle Bioenergien möglich, da sich die einzelnen Energien in Bereitstellung, Nutzung, Wirkungsgraden, Emissionen etc. stark unterscheiden.

1.5.1 Vorteile

Ein wichtiger Vorteil der Bioenergien basiert auf ihrer Erneuerbarkeit. Vorkommen von fossilen Energieträgern werden geschont.

- Bioenergien können zur Verringerung der Treibhausgas-Emissionen beitragen. Bei der Verbrennung von Biomasse wird nur soviel Kohlendioxid freigesetzt, wie auch zuvor bei der Photosynthese aus der Atmosphäre aufgenommen wurde.
- Die verstärkte Nutzung von Biokraftstoffen ist auch aus sicherheits- und entwicklungspolitischen Aspekten notwendig, um Konflikte um das immer knapper werdende Erdöl zu vermeiden und Energierohstoffimporte zu reduzieren.
- Bioenergie kann einen wichtigen Beitrag zur Stärkung des ländlichen Raumes und zur Eindämmung von Landflucht leisten, etwa durch Regenerierung der weltweiten degradierten Flächen, der Erschließung eines zweiten Standbeins für Landwirte durch eigene Produktion von Strom, Wärme und Treibstoffen, sowie der Bereitstellung einer dezentralen Energieversorgung.
- Bioenergie wird vor allem dann eine sehr gute Ökobilanz zugesprochen, wenn organische Abfälle, Reststoffe und organisch belastete Abwässer verwertet werden, die man sonst mit unter Umständen großem Energieaufwand behandeln müsste^{vii}. Da solche Rest- und Abfallstoffe preiswert oder kostenlos verfügbar sind, können sie wirtschaftlich verwertet werden. Das findet beispielsweise in Klärwerken und Biogasanlagen mit Cofermentation statt. In Ländern wie China und Indien sind Kleinstbiogasanlagen verbreitet, die mit organischen Abfallstoffen betrieben werden und einzelne Haushalte mit Kochgas versorgen^{ix}. Die Verwertung von Gülle wird aus ökobilanzieller Sicht als problematischer bewertet.^x

1.5.2 Nachteile

- Die Bioenergien stehen vor allem wegen ihres Flächenbedarfs beim Anbau nachwachsender Rohstoffe zeitweise in der Kritik, da eine Flächenkonkurrenz zur Nahrungs- und Futtermittelerzeugung besteht. So stieg im Jahr 2007 der Preis für Körnermais und in Folge auch der Tortilla-Preis in Mexiko (Tortilla-Krise) stark an.
- Findet der Anbau der Bioenergie in intensiver Landwirtschaft statt, führt dies zu Umweltbelastungen. So werden Pestizide und mineralische Dünger eingesetzt, die zu Gewässer- und Grundwasserbelastung führen können und deren Her-

stellung zudem sehr energieintensiv ist. Stickstoffdünger können zu erhöhten Emissionen des Klimagases Lachgas führen.

- Der stark zunehmende Anbau nur weniger Energiepflanzenarten, wie z.B. in Deutschland hauptsächlich Raps und Mais, verändert das Landschaftsbild. Dieses wurde durch Abschaffung der Flächenstilllegung in der EU verstärkt. Dadurch kann zudem die Biodiversität bedroht werden.
- Die Umwandlung ökologisch wertvoller Flächen wie Regenwald, Moore oder Grünland in Ackerland führt ebenfalls zu einer Gefährdung und Verringerung der Biodiversität. Zudem können diese Flächen in ihrem ursprünglichen Zustand große Mengen CO₂ gespeichert haben, welches bei der Umwandlung in Ackerland (Brandrodung, Trockenlegung) freigesetzt wird^{xii}. Die Nachhaltigkeitsverordnung stellt jedoch in Deutschland sicher, dass die hierzulande für Biokraftstoffe verwendete Biomasse nicht aus Raubbau von Regenwäldern stammt.
- Ein Teil der Biomasse muss auf landwirtschaftlichen Flächen verbleiben, um die Bodenqualität zu erhalten. Durch die vollständige Nutzung der Pflanzen verschlechtert sich die Humusbilanz. Bei forstlicher Biomasse führt eine intensive Nutzung zu Nährstoffentzug aus dem Wald. Zudem bietet Totholz einen Lebensraum für viele verschiedene Arten.

1.5.3 Landwirtschaftliche Nutzung von Agrarflächen

Bioenergie steht im Verdacht einer Flächenkonkurrenz zur Nahrungs- und Futtermittelherzeugung. Zur Veranschaulichung der landwirtschaftlichen Situation sollen die aktuellen Daten dienen:

Tabelle 1: Landwirtschaftliche Nutzung von Agrarflächen

Landwirtschaftliche Nutzfläche in Deutschland (2008) (Quelle BMELV, FNR)	Fläche in ha
landwirtschaftliche Nutzfläche	ca. 16,9 Mio
davon Ackerland	ca. 11,9 Mio
davon Grünland	ca. 4,8 Mio

Tabelle 2: Nutzung der landwirtschaftlichen Flächen

Nutzung der landwirtschaftlichen Fläche für	Fläche in ha
Futtermittel / Viehhaltung	ca. 10,2 Mio
Nahrungsmittel	ca. 4,5 Mio
Bioenergie	ca. 1,6 Mio
Stoffliche Nutzung	ca. 0,3 Mio
Brachland	ca. 0,3 Mio

Von diesen Flächenangaben wurden für den Anbau zu Erzeugung von Biogas

2008	ca.	0,5 Mio ha
geschätzt für 2020	ca.	1,2 Mio ha

Aufgrund der ermittelten Zahlen können wir zwar eine Konkurrenz erkennen, die nach derzeitigen Gesichtspunkten im Verhältnis sehr gering ist. Hier können aber ökonomischer und ökologischer Wege gefunden werden, um diese Konkurrenz zu unterbinden. Hierfür sind unterschiedliche Wege möglich und sinnvoll:

Ein möglicher Weg wäre die Abkehr vom reinen Anbau von Energiepflanzen zur Erzeugung von Bioenergie. Diese Wege wären möglich durch eine gesetzliche Quotierung der Nutzung von Biomasse für die Ernährung oder Erzeugung. Unter diesem Gesichtspunkt sollte weltweit von den Regierungen geregelt werden, welche Mengen von erzeugter Biomasse für die Erzeugung von Bioenergie

Eine weitere Möglichkeit wäre die Abkehr von dem Anbau von Energiepflanzen sondern die energetische Nutzung von landwirtschaftlichen Produkten aus der dem

- Landwirtschaftlichen Erzeugungsprozesse wie z. B. Gülle, Mist, Anputz aus Getreide, Hefeprozesswasser
- Kommunale Abfälle wie z.B. Biomüll, Küchenabfälle, Abbauprodukte aus Kläranlagen
- Schlachtrestoffabfälle wie z.B. Panseninhalte, Flotatschlämme
- Reststoffe aus Agro-Industrie wie Rückstände aus Fettabscheidern, Bleicherde

Bei der geschilderten anderweitigen Nutzung wäre die derzeit befürchtete Monokultur (Vermaisung) unserer Landwirtschaft weitgehend reduziert. Alternativ könnten unterschiedliche Arten von Energiepflanzen entsprechend der landwirtschaftlichen Nutzung zur Anwendung kommen,

Eine landwirtschaftliche Erzeugung von Bioenergie muss auch den intensiven Einsatz Pestiziden und mineralischen Düngern vermeiden. Ein sinnvoller Umgang und

eine nachhaltige Landwirtschaft macht es erforderlich, dass die Ressourcen des natürlichen Kreislaufes ganz besonders genutzt werden. Die anfallenden Rückstände aus dem Bioenergieprozess müssen dem natürlichen Lebenszyklus zur Nutzung der natürlichen Spurenelemente wie Stickstoff, Phosphat etc. genutzt werden.

Für die Erzeugung und Nutzung von Bioenergie muss in jedem Fall ein „Substratourismus“ ausgeschlossen werden. Diese Maßnahme erfordert den Bau von Anlagen, die an die regionalen Gegebenheiten angepasst sind. Es muss in jedem Fall vermieden werden, dass natürliche Lebensräume wie Regenwald, Moore und andere für den Erhalt von menschlichen Lebensräumen zerstört werden. Die Erzeugung von Energiepflanzen darf nicht zu einer weitergehenden Rodung von z. B. Regenwald analog der Palmölgewinnung erfolgen darf. Alle für das Lebensumfeld wichtigen und für die Minderung der CO₂ Verringerung beitragenden Lebensräume müssen in allen Fällen erhalten und erweitert werden.

1.5.4 Biogasausbeuten

Wie viel Biogas in einer Biogasanlage produziert wird, hängt im Wesentlichen von der Zusammensetzung der eingesetzten Substrate ab. Die Biogasausbeute ist nicht nur substratspezifisch, sondern muss vor allem unter den jeweils vorherrschenden Randbedingungen (z.B. Temperatur, Verweilzeit, Verfahren und vorhandene Hemmstoffe) beurteilt werden. So ist zu erklären, dass es zum Teil zu erheblichen Streuungen für gleiche Substrate kommt.

In der folgenden Darstellung werden durchschnittliche Biogasausbeuten verschiedener Substrate [m³ Biogas/ t FM Substrat] dargestellt. Diese angegebenen Gasertträge eignen sich als Richtwerte.

Bild 1:
Biogasausbeuten von Substraten

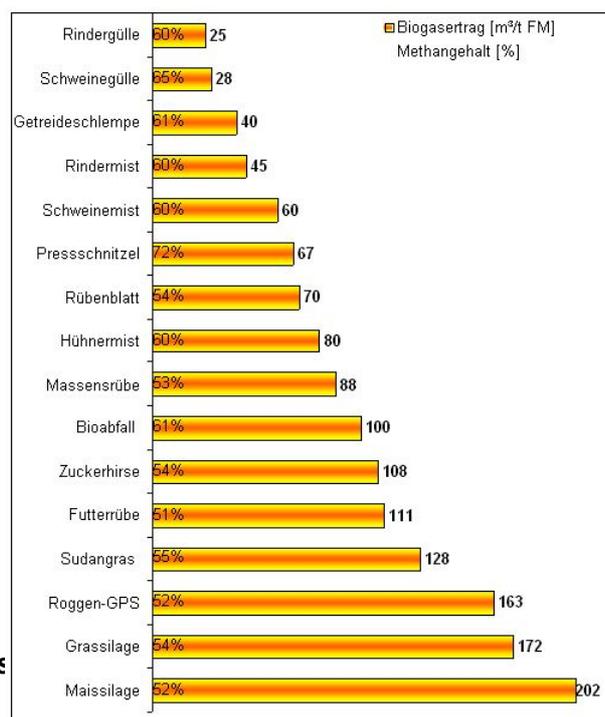
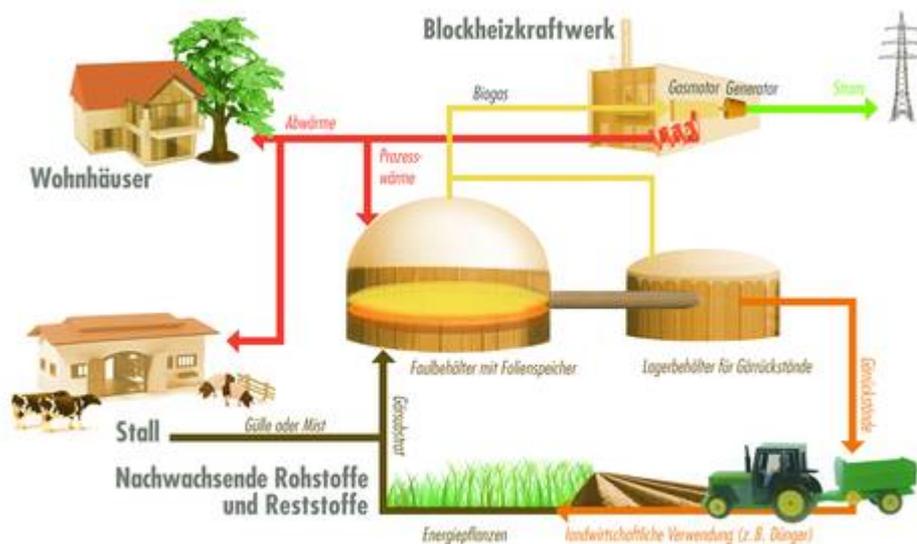


Tabelle 3: Durchs

Bestandteil	Formelzeichen	Konzentration
Methan	CH ₄	50 - 75 Vol.-%
Kohlendioxid	CO ₂	25 - 45 Vol.-%
Wasserdampf	H ₂ O	2 – 7 Vol.-%
Sauerstoff	O ₂	< 2 Vol.-%
Stickstoff	N ₂	< 2 Vol.-%
Ammoniak	NH ₃	< 1 Vol.-%
Wasserstoff	H ₂	< 1 Vol.-%
Schwefelwasserstoff	H ₂ S	20 – 20.000 ppm

[ppm: Parts per Million ; Vol.-%: volumetrischer Raumanteil]

Bild 2: Biogasverwertung (z.B. Blockheizkraftwerk zur Strom- und Wärmeproduktion)



1.5.5 Wirtschaftlichkeit von Biogas

Für den Bau einer Biogasanlage im landwirtschaftlichen Bereich sollten im Vorfeld einige wichtige, grundsätzliche Fragen berücksichtigt bzw. abgeklärt werden. Auch ohne sich schon näher mit dem Umfang der technischen Leistung und den damit verbundenen Investitionen zu beschäftigen, können mit der Beantwortung dieser Fragen erste Anhaltspunkte über eine grundsätzliche Wirtschaftlichkeit und die Dimensionierung der Anlage erhalten werden:

- Welche Menge Substrat (Gülle) fällt an?
- Können vorhandene Reststoffe mitvergoren werden (Kofermentation)?
- Sollten speziell angebaute Produkte (z. B. Mais) mitvergoren werden?
- Ist Fläche für die Produktion und Lagerung der Co-Substrate vorhanden?
- Ist der Betrieb einer Biogasanlage arbeitswirtschaftlich möglich?
- Könnten auch außerlandwirtschaftliche Reststoffe genutzt werden?
- Können Sie einen Entsorgungserlös für dieses Material erzielen?
- Muss das Co-Substrat hygienisiert werden?
- Wie hoch ist der Stromverbrauch im eigenen Betrieb/Haushalt?
- Wie ist der Stromverbrauch über das Jahr verteilt?
- Wie hoch ist der Wärmebedarf in Haushalt und Betrieb?
- Wie ist der Wärmebedarf über das Jahr verteilt?
- Wie liegen die (zukünftigen) Preise für Energie?
- Ist eine Investitionsförderung möglich?
- Welche Möglichkeiten der Investitionsförderungen gibt es?
- Sind die Voraussetzungen für eine Investitionsförderung erfüllt?
- Gibt es Referenzanlagen in der näheren Umgebung, die besichtigt werden können?

Die Wirtschaftlichkeit einer Biogasanlage ist im Allgemeinen schwierig zu bestimmen. In der Praxis wird daher nach einer Grobanalyse eine detailliertere Aufstellung aller Kosten bzw. Nutzen vorgenommen, die zu dem speziellen Projekt passen. Man ist von einer allgemeinen Empfehlung zum Bau von Biogasanlagen ab einem bestimmten Viehbestand weit entfernt. Jede Anlage muss sorgfältig geplant und dem Betrieb optimal angepasst werden. Bei den Wirtschaftlichkeitsberechnungen müssen möglichst realistische Werte beispielsweise für den Betreuungsaufwand, den Reparaturaufwand sowie die Kosten für den Anbau nachwachsender Rohstoffe berücksichtigt werden.

Zur Durchführung einer Wirtschaftlichkeitsberechnung müssen folgende Datengrundlagen / Parameter auf alle Fälle erfasst werden:

- Menge des Substrats bzw. der Substrate (z. B. bei Kofermentation)
- Menge des daraus produzierten Biogases
- Energieinhalt des Gases
- Leistung des BHKW
- Elektrischer und thermischer Wirkungsgrad des BHKW
- Anteil Prozessenergie (Strom und Wärme)
- Jährliche Betriebsstunden der Anlage
- Eigennutzung Strom
- Eigennutzung Wärme
- Höhe der Investitionskosten abzüglich Eigenanteil
- Höhe einer Investitionsförderung
- Jährliche Festkosten (Zinsen, Abschreibung)
- laufenden Kosten (angesetzter Stundenlohn, Versicherungen, Steuern, Wartung, Reparatur, Betriebsmittel, etc.)
- Kosten für ggf. erfolgten Anbau von Energiepflanzen als Kofermente
- Bezugs- und Einspeisepreise für Strom und Wärme

1.6 Sicherstellung der Nachhaltigkeit von Bioenergien

Um die Nachhaltigkeit der Herstellung und Nutzung von Bioenergieträgern sicherzustellen, werden verschiedene Maßnahmen vorgeschlagen^{xiii}.

Bioenergie sollte, statt zur Treibstoffherzeugung, zur kombinierten Strom- und Wärmeerzeugung (Kraft-Wärme-Kopplung) verwendet werden.

Die Bemühungen zur Senkung der Primärenergienachfrage (durch Effizienz und Suffizienz) sollte intensiviert werden, statt auf einen massiven Ausbau am-bivalenter erneuerbarer Energien zu setzen.

Die im Juni 2009 in Kraft getretene EU-Erneuerbare-Energien-Richtlinie^{xiv} stellt Kriterien für die nachhaltige Produktion von Bioenergien auf. Verschiedene Kritikpunkte werden geäußert, wie (a) Vollzugsprobleme speziell in den Entwicklungsländern, (b) Unvollständigkeit, (c) Probleme wie Nutzungskonkurrenzen mit der Nahrungsmittelproduktion lassen sich nicht als Kriterien formulieren; (d) es drohen Verlagerungseffekte, die die Kriterien leerlaufen lassen (ein Verbot der Biomasseproduktion im Regenwald könnte z. B. eine vermehrte Futtermittelproduktion im Regenwald zur Folge haben)^{xv}.

Eine Umsetzung der Richtlinie in deutsches Recht erfolgte mit der seit August 2009 gültigen Biomassestrom-Nachhaltigkeitsverordnung (BioSt-NachV) und der seit September 2009 gültigen Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung (Biokraft-NachV).

1.7 Perspektive der Bioenergien

Zukünftig ist mit einem weiteren massiven Ausbau der Bioenergien zu rechnen. In Deutschland erfolgt die Förderung durch verschiedene Maßnahmen. Durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) wird unter anderem eine erhöhte Vergütung für Strom aus Biomasse sichergestellt, aber auch die Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) gefördert. Nach dem Energiesteuergesetz sind zudem reine Biokraftstoffe steuerbegünstigt. Auch in anderen Staaten (Österreich, Schweden, USA etc.) werden Bioenergien gefördert und decken teilweise einen großen Anteil des Energiebedarfs. Da Bioenergie, anders als Wind- und Solarstrom, einfach speicherbar ist, wird sie als wichtige Regelenergie für die künftige Stromversorgung gesehen (virtuelles Kraftwerk).

2 Entstehung von Biogas

Wie schon der Name vermuten lässt, entsteht das „Bio“-Gas in einem biologischen Prozess. Bei der Umwandlung von organischer Substanz durch Bakterien laufen die Umwandlungsprozess idealer Weise bei einem Nährstoffverhältnis von C:N:P von 100:5:1 und Vorhandensein von Spurenelementen ab.

Unter Abschluss von Sauerstoff entsteht dabei aus organischer Masse ein Gasgemisch, das sogenannte Biogas. Dieser in der Natur weit verbreitete Prozess findet beispielsweise in Mooren, auf dem Grund von Seen, in der Güllegrube sowie im Pansen von Wiederkäuern statt. Hierbei wird die organische Masse fast vollständig zu Biogas umgewandelt und es entstehen nur geringe Mengen an neuer Biomasse oder Wärme. Das gebildete Gasgemisch besteht zu ca. zwei Dritteln aus Methan und ca. einem Drittel aus Kohlendioxid. Daneben befinden sich im Biogas noch geringe Mengen an Wasserstoff, Schwefelwasserstoff, Ammoniak und anderen Spurengasen. Um den Entstehungsprozess des Biogases deutlich zu machen, kann dieser in mehrere Teilschritte unterteilt werden.

In dem ersten Schritt, der

„**Hydrolyse**“, werden die komplexen Verbindungen des Ausgangsmaterials (z. B. Kohlenhydrate, Eiweiße, Fette) in einfachere, organische Verbindungen (z. B. Aminosäuren, Zucker, Fettsäuren) zerlegt. Die daran beteiligten Bakterien setzen hierzu Enzyme frei, die das Material auf biochemischem Weg zersetzen. Die gebildeten Zwischenprodukte werden dann in der sogenannten

„**Versäuerungsphase**“ (Acidogenese) durch säurebildende Bakterien weiter zu niederen Fettsäuren (Essig-, Propion- und Buttersäure) sowie Kohlendioxid und Wasserstoff abgebaut. Daneben werden aber auch geringe Mengen an Milchsäure und Alkohole gebildet. Diese Produkte werden anschließend in der Acetogenese, der

„**Essigsäurebildung**“, durch Bakterien zu Vorläufersubstanzen des Biogases (Essigsäure, Wasserstoff und Kohlendioxid) umgesetzt. Da ein zu hoher Wasserstoffgehalt für die Bakterien der Essigsäurebildung schädlich ist, müssen die Essigsäurebildner mit den Bakterien der Methanogenese eine enge Lebensgemeinschaft bilden. Diese verbrauchen bei der Bildung von Methan den Wasserstoff und sorgen so für akzeptable Lebensbedingungen für die acetogenen Bakterien.

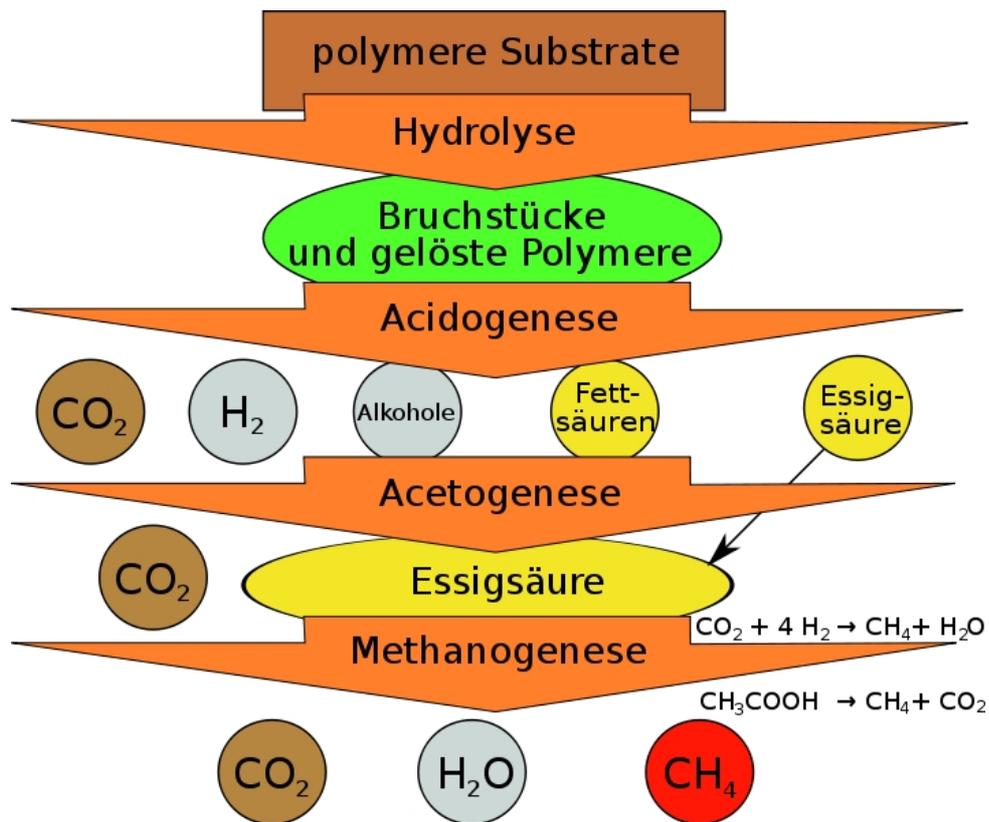


Bild 3: Anaerobe Zersetzung organischer Stoffe

In der anschließenden

„**Methanogenese**“, dem letzten Schritt der Biogasbildung, wird aus den Produkten der Acetogenese das Methan gebildet.

Laufen die vier Abbauschritte gemeinsam in einem Fermenter ab, spricht man von einstufigen Anlagen. Da die Bakterien der einzelnen Stufen aber unterschiedliche Anforderungen an ihren Lebensraum stellen, muss hier ein Kompromiss gefunden werden. Da die Methanbakterien am empfindlichsten gegenüber Störungen sind und sich nur langsam vermehren, werden die Milieubedingungen in solchen Systemen normalerweise an sie angepasst.

Hingegen werden in zweistufigen Anlagen die Hydrolyse und die Acidogenese von den nachfolgenden Abbaustufen räumlich getrennt. Dadurch können die Umgebungsbedingungen besser an die Bakteriengruppen angepasst werden und es lassen sich höhere Abbauleistungen erreichen.

Aufgrund der unterschiedlichen Entstehungsorte wird Faulgas unterschiedlich bezeichnet:

Tabelle 4: Arten von Faulgas

Arten von Faulgas	Entstehung
Erdgas	Erdgas ist ein brennbares Naturgas, das in unterirdischen Lagerstätten vorkommt. Es tritt häufig zusammen mit Erdöl auf, da es auf ähnliche Weise entsteht. Erdgase bestehen hauptsächlich aus hochentzündlichem Methan, unterscheiden sich aber in ihrer weiteren chemischen Zusammensetzung.
Grubengas	Als Grubengas wird das Gas bezeichnet, das beim Inkohlungsprozess entstanden ist und als Folge des Abbaus der Steinkohle sowie im Zuge von mikrobiellen Prozessen (Stoffwechsel) freigesetzt wurde und wird
Deponiegas	Deponiegas entsteht beim Verrottungsvorgang von häuslichen und gewerblichen Abfällen auf den Mülldeponien. Die anfallenden Gasmengen und Gasqualitäten sind sehr stark abhängig von Anteil der organischen Anteils sich in den deponierten Abfälle. Aufgrund der vielfältigen Inhaltsstoffe ist damit zu rechnen, dass der Anteil der toxischen Stoffe in unterschiedlichen Konzentrationen vorhanden ist. Die den Umbau der Stoffe negativ stark beeinflussen kann.
Faulgas	Faulgas ist ein Gemisch von zumeist brennbaren Gasen, das bei der anaeroben Gärung, der biologischen Zersetzung kohlenwasserstoffhaltiger biologischer Substanzen unter Abwesenheit von Sauerstoff durch Bakterien entsteht.
Klärgas	In technischen Einrichtungen entsteht Faulgas beim Ausfäulen der Klärschlämme von Kläranlagen als Klärgas entsteht durch die Vergärung von Abwasserinhaltsstoffen und deren durch die Abwasserreinigung durch Umwandlung der Abwasserinhaltsstoffe in biologische Masse

In Mülldeponien und in Biogasanlagen (daher die Bezeichnungen Deponiegas beziehungsweise Biogas) entsteht analog ebenfalls Faulgas. Das Vergären biologischer Substanzen in Kläranlagen, Deponien und Biogasanlagen und die anschließende Nutzung des Gases ist ökonomisch und ökologisch interessant, da Methan, das auch Hauptbestandteil von Erdgas ist, ein hochwertiger Brennstoff ist. Zum anderen entweichen die klimaschädlichen Gase Methan und Lachgas, das beim Abbau stickstoffhaltiger biologischer Stoffe wie Gülle entsteht, nicht in die Umwelt und die Reste der Vergärung (zum Beispiel die Reste der Klärschlämme) sind wesentlich unproblematischer für Böden und Gewässer als die ursprünglichen Abfälle (zum Beispiel Überdüngung durch Nitrat, ein Abbauprodukt des in landwirtschaftlichen Abfällen wie Gülle enthaltenen Ammoniums).

Da der Hauptbestandteil von Faulgas das für den Treibhauseffekt mitverantwortliche Gas Methan ist, wurden umfangreiche Untersuchungen zum anthropogenen (menschengemachten) Methananteil des Hauptproduzenten Landwirtschaft gemacht, woraus sich ergab, dass Reisfelder, Rinder und Gülle die Hauptquellen für anthropogenes Methan sind.

3 Biogasaufbereitung

3.1 Verfahrensarten

Eine strikte Unterteilung der Verfahren in Nass- und Trockenfermentation ist aus biologischer Sicht eigentlich irreführend, da die am Vergärungsprozess beteiligten Bakterien in jedem Fall ein flüssiges Medium für ihr Überleben benötigen. Auch bei der Definition über den Trockenmassegehalt des zu vergärenden Substrates kommt es immer wieder zu Missverständnissen, da häufig mehrere Substrate mit unterschiedlichen Trockenmassegehalten eingesetzt werden. Hier muss dem Betreiber klar sein, dass nicht der Trockenmassegehalt der Einzelsubstrate maßgebend für die Einteilung des Verfahrens ist, sondern der Trockenmassegehalt des in den Fermenter eingebrachten Substratgemisches. Deswegen erfolgt hier die Einteilung in Nass- oder Trockenfermentation über den Trockenmassegehalt des Fermenterinhalts. Es sei noch einmal darauf hingewiesen, dass die Bakterien in ihrer unmittelbaren Umgebung in beiden Fällen ausreichend Wasser benötigen. Zwar gibt es keine genaue Definition der Grenze zwischen Nass- und Trockenfermentation, jedoch hat es sich in der Praxis eingebürgert, dass man bis zu einem Trockenmassegehalt im Fermenter von ca. 12 % von Nassfermentation spricht, da der Fermenterinhalt bei diesem Wassergehalt noch pumpbar ist. Steigt der Trockenmassegehalt im Fermenter auf über 16 %, so ist das Material in der Regel nicht mehr pumpbar und man bezeichnet den Prozess als Trockenfermentation.

3.2 Nassvergärungsverfahren

Für die Vergärung pumpfähiger Substrate können Pfropfenströmungsverfahren, Verfahren mit Volldurchmischung und Sonderverfahren zum Einsatz kommen.

3.2.1 Propfenströmungsverfahren

Biogasanlagen mit Propfenströmung, die auch als Tank-Durchflußanlage bekannt sind, nutzen den Verdrängungseffekt von zugeführten frischen Substraten, um eine Propfenströmung durch einen in der Regel liegenden Fermenter mit rundem oder rechteckigen Querschnitt hervorzurufen. Eine Durchmischung quer zur Strömungsrichtung wird meist durch Paddelwellen oder eine speziell konstruierte Strömungsleitung realisiert. Die Eigenschaften solcher Anlagen sind in nachfolgender Tabelle charakterisiert:

Tabelle 5: Eigenschaften des Propfenstromverfahrens

Kriterien	Eigenschaften
Kennwerte	<ul style="list-style-type: none"> Baugröße bei liegenden Fermentern bis 800 m³ Aus Stahl und Beton
Eignung	<ul style="list-style-type: none"> Für pumpfähige Substrate mit hohem Trockensubstanzgehalt geeignet, Rühr- und Fördertechnik muss an Substrate angepaßt werden. Für kontinuierliche Beschickung vorgesehen.
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> Kompakte, kostengünstige Bauweise für Kleinanlagen Trennung der Gärstufen im Propfenstrom Bauartbedingte Vermeidung von Schwimmdecken und Sinkschichten Einhaltung von Verweilzeiten durch weitgehende Vermeidung von Kurzschlußströmungen Geringe Verweilzeiten Effektiv beheizbar
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> Nur in geringen Größen wirtschaftlich herstellbar Wartungsarbeiten am Rührwerk erfordern vollständige Entleerung des Gärbehälters
Bauformen	<ul style="list-style-type: none"> Können horizontal liegend und vertikal stehend hergestellt werden, wobei meist liegend angewendet In stehender Bauform wird die Pfropfenströmung meist durch vertikale, selten durch horizontale Einbauten realisiert Können mit und ohne Durchmischungseinrichtungen betrieben werden.

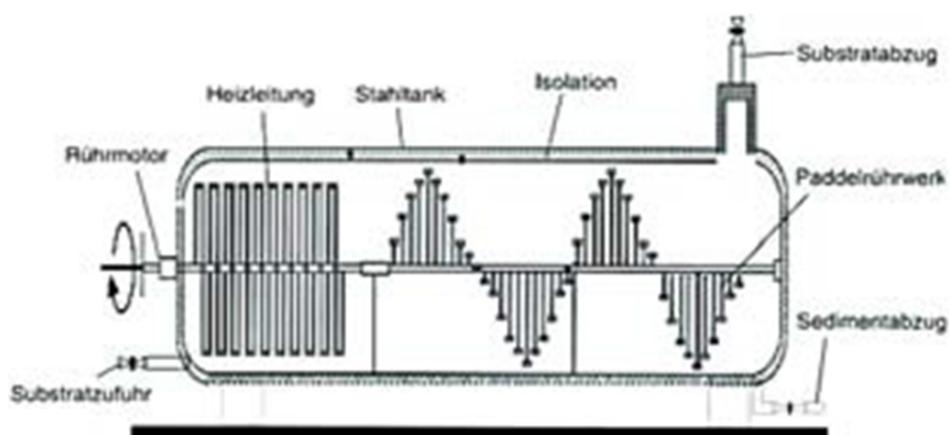


Bild 4: Pfropfenstromreaktor

3.2.2 Verfahren mit Volldurchmischung

Vorwiegend im Bereich der landwirtschaftlichen Biogaserzeugung werden volldurchmischte Reaktoren in zylindrischer, stehender Bauform angewendet. Sie entsprechen im wesentlichen Standardgüllebehältern, die nach entsprechenden Umbauten auch genutzt werden können. Die Fermenter bestehen aus einem Behälter mit einer Stahlbetonsohle und Wänden aus Stahlbeton; seltener Wänden aus Stahl. Der Behälter kann ganz oder teilweise im Boden versenkt werden oder vollständig oberirdisch errichtet werden. Auf den Behälter wird eine Decke aufgebaut, die je nach Anforderungen und Konstruktionweise verschiedenartig ausgeführt wird. Die Volldurchmischung wird durch Rührwerke im bzw. am Reaktor realisiert. Die speziellen Eigenschaften werden in nachfolgender Tabelle aufgeführt.

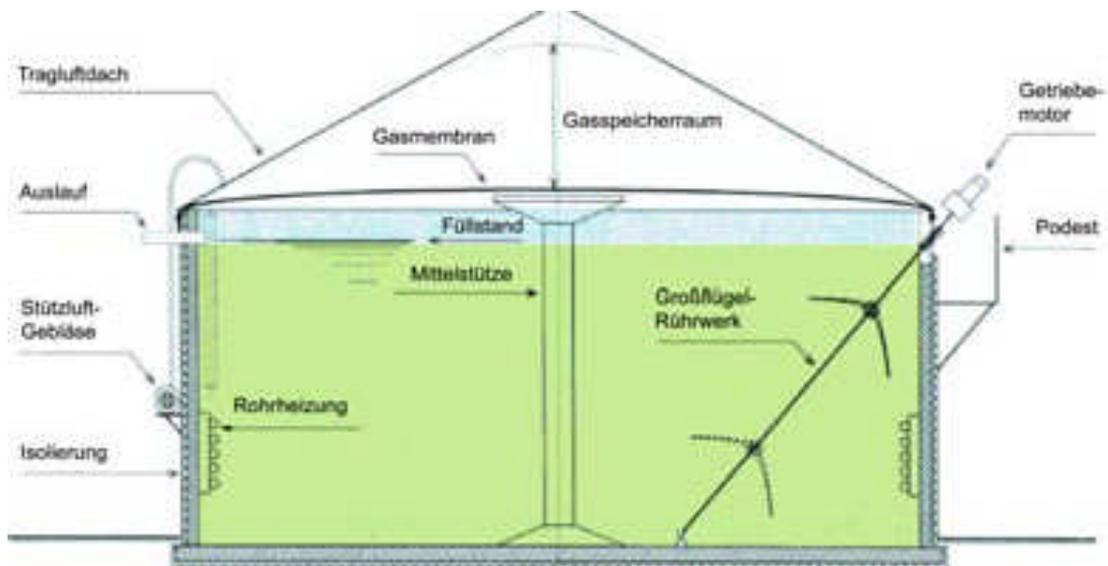


Bild 5: Volldurchmischter Fermenter

3.2.3 Sonderverfahren

Abweichend von den oben genannten, sehr weit verbreiteten Verfahren für die Nassvergärung existieren weitere Verfahren, die nicht klar nach oben genannten Kategorien zugeordnet werden können. Meist haben diese Verfahren lokale bzw. sehr geringe Bedeutung auf dem Markt.

Relativ weit verbreitet sind in Deutschland Vergärungsverfahren, die die Substratdurchmischung in Doppelkammerverfahren realisieren. Dabei wird die hydraulische Substratdurchmischung durch automatischen Druckaufbau resultierend aus der Gasproduktion und Druckablass bei Erreichen eines festgelegten Überdruckes erreicht. Dadurch kann auf den Einsatz elektrische Energie für die Umwälzung verzichtet werden. Dafür ist der bauliche Aufwand für den Fermenter höher. Es wurden

im landwirtschaftlichen Bereich über 50 auf diese Technologie basierende Biogasanlagen mit Fermentervolumina zwischen 400 und 2500 m³ im Wesentlichen für die reine Gülle- oder Klärschlammvergärung errichtet.



Bild 6: Doppelkammer-Fermenter (ENTEC Enviroment Technology Umwelttechnik)

3.3 Verfahren der Trockenvergärung

Für landwirtschaftliche Betriebe, denen keine Gülle als Basissubstrat zur Verfügung steht, ist die Biogasgewinnung durch Nassvergärung mit großem technischen Aufwand zu realisieren. Um die Substrate für die Nassvergärung aufzubereiten, müssen sie mit hohem Energie- und Wasserbedarf verflüssigt bzw. angemaischt werden. Eine alternative ist hier die Trockenfermentation. Die derzeit auf dem Markt angebotenen Verfahren

Tabelle 6: Eigenschaften der Trockenvergärung

Kriterien	Eigenschaften
Kennwerte	<ul style="list-style-type: none"> • Baugröße durch modulare Bauweise nicht begrenzt • Konstruktion aus Stahl und Stahlbeton
Eignung	<ul style="list-style-type: none"> • Für stapelbare Substrate geeignet • Für kontinuierliche und diskontinuierliche Beschickung geeignet
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • Modularer Aufbau ermöglicht flexible Anpassung der Anlage an den Bedarf • Verringerter Prozeßenergiebedarf durch Einsparung von Fördertechnik • Dadurch verminderter Wartungsaufwand und Verschleiß • Entstehung eines Biogases mit geringer H₂S –Konzentration und dadurch Einspeisung der Gasreinigung • Überbetrieblicher Einsatz durch mobile Fördertechnik • Einsparung von Energie zur Erwärmung des Gärsubstrates durch Nutzung der biologischen Wärmefreisetzung bei kurzzeitigem aeroben Abbau des Materials
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • Eine kontinuierliche Gasproduktion erfordert den phasenversetzten Betrieb mehrerer Module • Auf Grund fehlender Durchmischung können Zonen mit verminderter Gasbildung auftreten • Für die explosions sichere Befüllung und Entleerung muss Sicherheitstechnik installiert werden • Um einen hohen Gasertrag zu erzielen, ist der Einsatz hoher Impfmateriamengen notwendig
Bauformen	<ul style="list-style-type: none"> • Container und Boxen • Schläuche, Tunnel • Liegende Pfropfenstromfermenter

3.4 Containerverfahren

Im Containerverfahren werden Mobil- oder Einschubfermenter mit Biomasse befüllt und luftdicht verschlossen. Die im Impfsupstrat, das dem Substrat beigemischt wird, enthaltenen Mikroorganismen erwärmen das Substrat in einer ersten Phase, in der dem Fermenter Luft zugeführt wird. Es findet ein mit Wärmefreisetzung verbundener Kompostierungsprozess statt. Nachdem die Betriebstemperatur erreicht ist, wird die Luftzufuhr abgeschaltet. Nach Verbrauch des eingetragenen Sauerstoffes werden Mikroorganismen aktiv, die wie in der Nassvergärung die Biomasse in Biogas umsetzen. Das Biogas wird in an dem Fermenter angeschlossenen Gassammelleitungen aufgefangen und der energetischen Nutzung zugeführt



Bild 7: Container

3.5 Boxen-Fermenter

Boxen-Fermenter ähneln geometrisch Containerfermentern, die allerdings aus Fertigbauteilen erstellt werden



Bild 8: Boxen-Fermenter

3.6 Folienschlauch-Fermenter

Für Folienschlauch-Fermenter werden die aus der Siliertechnik bekannten Methoden der Folienschlauchsilierung verwendet. Auch hier wird der aerobe Kompostierungsprozeß für die erste Erwärmung des Substrates genutzt. Zur weiteren kontinuierlichen Wärmeeinbringung können die Schläuche auf einer Betonplatte, in der eine Fußbodenheizung integriert ist, verlegt werden. Zur Verminderung von Wärmeverlusten kann der Folienschlauch bei der Befüllung mit einer Wärmedämmung überzogen werden. Über in den

Schlauch integrierte Sammelleitung wird das nach dem Verbrauch des Sauerstoffes gebildete Biogas erfaßt und der Nutzung zugeführt.



Bild 9: Folienschlauchbefüllung (Folienschlauch-Fermenter)

3.7 Wannen- bzw. Tunnelfermenter

Vergleichbar zu den Folienschlauchfermentern werden Vergärungssysteme entwickelt, die einen kontinuierlichen Prozeß in Wannen bzw. Tunneln ermöglichen. Der Verfahrensablauf stimmt weitestgehend mit dem im Folienschlauch überein, läßt sich jedoch besser kontrollieren

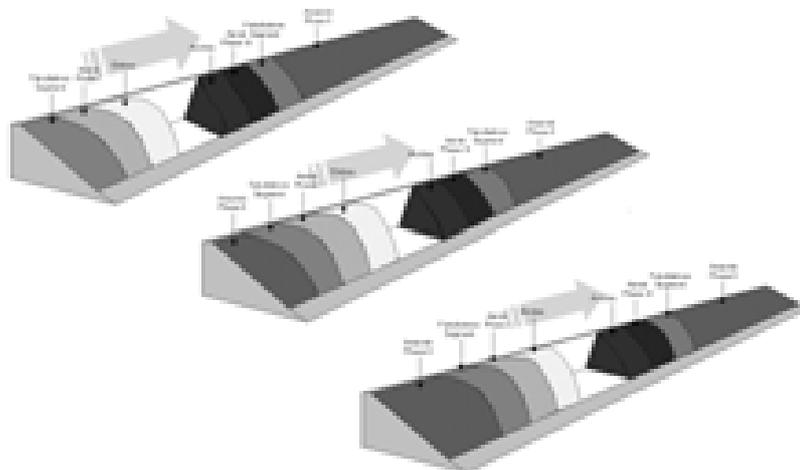


Bild 10: Fermenter

3.8 Propfenstromfermenter

Im Bereich der Abfallwirtschaft werden bereits seit einer geringen Zeit erfolgreich Ppropfenstromfermenter für die Trockenvergärung eingesetzt. Sie werden als liegende und als stehende Fermenter konstruiert und kontinuierlich und diskontinuierlich beschickt. Teilweise integrierte Rührwellen dienen der leichteren Entgasung des Materials. In der landwirtschaftlichen Biogaserzeugung spielen diese Verfahren auf Grund des hohen technischen Aufwandes der kontinuierlichen Technik jedoch keine Rolle.



Bild 11: Ppropfenstrom -Fermenter

4 Faulgasnutzung

Biogas ist ein hochwertiger Energieträger und kann vielseitig und mit hohem Wirkungsgrad verwertet werden. Der Heizwert liegt je nach Methangehalt zwischen ca. 5,0 -7,0 kWh/m³ Biogas.

Tabelle 7: Biogas - biotechnische Kenndaten

Kenndaten		Biogas	Erdgas	Propan	Methan	Wasserstoff
Heizwert	kWh/m ³	6	10	26	10	3
Dichte	Kg/m ³	1,2	0,7	2,01	0,72	0,09
Dichteverhältnis zu Luft		0,9	0,54	1,51	0,55	0,07
Zündtemperatur	°C	700	650	470	650	585
Max. Zündtemperatur in Luft	m/s	0,25	0,39	0,42	0,47	0,43
Zündgrenze, Gas in Luft	%	6 -12	5 -15	2 – 10	5 - 15	4 - 80
Theoretischer Luftbedarf	m ³ /m ³	5,7	9,5	23,9	9,5	2,4

Biogas wird überwiegend für den Antrieb von Motoren zur Stromerzeugung und im besten Fall mit integriertem Wärmekonzept genutzt. In seltenen Fällen wird auch eine häusliche Nutzung (Heizen, Wärmearbeitung etc.) des Biogases angestrebt.

Neuerlicher Weise wird die Methangasnutzung auch zur Aufbereitung zu Bioerdgas durchgeführt. Diese Nutzung hat den Vorteil, dass Biogas aufbereitet und in ein öffentliches Erdgasnetz eingespeist wird. An einem undefinierten Netzpunkt kann das äquivalente „Biogas“ entnommen und der Energie- und Wärmenutzung zugeführt werden.

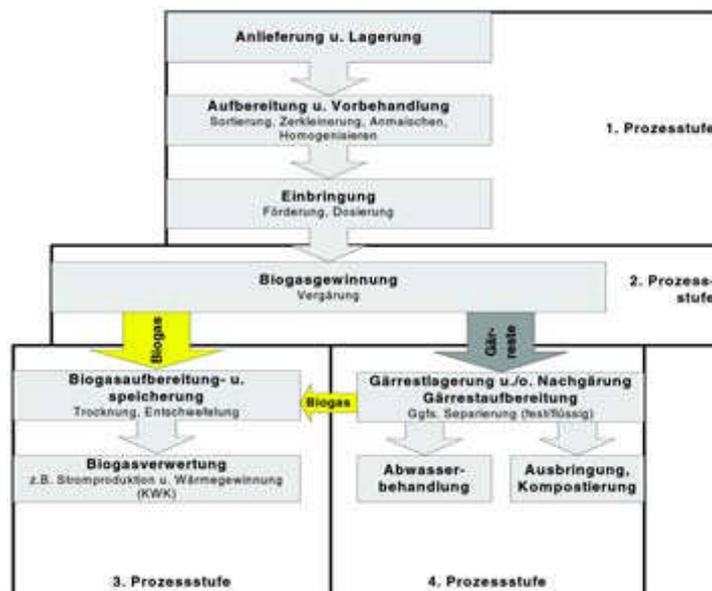


Bild 12: Schema der Biogasnutzung

4.1 Gasaufbereitung

Biogas enthält neben Methan (CH_4) und Kohlendioxid (CO_2) auch Spuren von Schwefelwasserstoff (H_2S) und anderen Spurenelementen. Zudem ist Biogas wasserdampfgesättigt. In Abhängigkeit von der Nutzung des Biogases sind unterschiedliche Ansprüche an das Biogas vorhanden.

Bei einer landwirtschaftlichen Biogasanlagen ist es i.d.R. nur erforderlich, dem Biogas den das Kondensat und Schwefelwasserstoff zu entziehen.

Die Entschwefelung des Biogases kann mittels einer biologischen Entschwefelung im Fermenter durch Einblasen von Sauerstoff in elementaren Schwefel oxidiert. Eine andere Form der Entschwefelung ist die Entschwefelung außerhalb des Fermenters in einem separatem Bauwerk durchgeführt werden. Letzt genannte Entschwefelungsart bietet besondere Vorteile bei stark schwankenden Schwefelwasserstoffkonzentrationen, da auf die Schwankungen reagiert werden kann

Neben dem Schwefelwasserstoff muss dem Biogas das enthaltene Wasser entzogen werden. Hierzu wird das Wasser gekühlt, wodurch des enthaltene Kondensat. (Mehr Infos hierzu siehe Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung (Literaturverzeichnis))

4.2 Verbrennung

Die reine thermische Verwertung mit einem Bunsen- oder Gebläsebrenner, z. B. zum Kochen mit Biogas oder mit Infrarotstrahlern für die Jungtieraufzucht, wird in Deutschland kaum praktiziert. Biogas wird in den Entwicklungsländern (China, Indien, Nepal etc.) zum Kochen eingesetzt.

4.3 Heizen mit Biogas

Beim Heizen mit Biogas unterscheidet man Heizkessel mit atmosphärischem Brenner für kleine Leistung von 10–30 KW sowie Gebläsebrenner für größere Leistungen. Die Heizkessel arbeiten sinnvollerweise auf einen Pufferspeicher, an den die Hausheizung, die Fermenterheizung, die Brauchwasserversorgung etc. angeschlossen werden. Die preiswerte Alternative zum Kessel ist ein Durchlauferhitzer (Gas-therme), der mit einem atmosphärischen Brenner arbeitet und vor allem zur Brauchwassererwärmung eingesetzt wird.

Der Leistungsbereich liegt zwischen 5–30 KW. Bei allen Heizgeräten sind Sicherheitseinrichtungen (Züandsicherungen, Flammenwächter) erforderlich, um zu verhindern, dass Biogas unverbrannt ausströmt. Bei den heute vorwiegend verwendeten Foliengasspeichern reicht der geringe Gasdruck zwar für den Betrieb der selbstansaugenden Gas- und Dieselmotoren aus, nicht aber für Kessel und Durchlauferhitzer. Hier wird ein Verdichter mit Druckregelung erforderlich. Gemäß den technischen Vorschriften zum Explosionsschutz müssen Gasverdichter entweder gasdichtausgeführt oder druckgekapselt sein.

4.4 Biogas als Treibstoff

Für die Nutzung als Treibstoff muss Biogas ebenfalls auf Erdgasqualität gereinigt und aufbereitet werden, da es i.d.R. in erdgastauglichen Motoren zum Einsatz kommt. Derzeit gibt es in Deutschland eine Biogastankstelle in Jamel (LK Lüchow-Dannenberg).

4.5 Kraft- Wärme-Kopplung

Bei der Kraft-Wärme-Kopplung wird das Biogas als Kraftstoff im Verbrennungsmotor verwendet, der einen Generator zur Erzeugung von Netzstrom antreibt. Die gleichzeitig anfallende Motorabwärme aus Kühlung und Abgas kann zum Heizen genutzt werden. Von allen Nutzungsarten ist dieses das bisher meisten angewendet Nutzungsverfahren. Die erzeugte Energie wird direkt dem öffentlichen E-Netz zugeführt. Die örtliche E - Betreiber sind nach dem EEG (Erneuerbare Energieen Gesetz) verpflichtet, den Erzeugten Strom abzunehmen und zu vergüten. Die Vergütung ist

ebenfalls im EEG geregelt, die jeweiligen Grundvergütungen sind in der nachfolgenden Tabelle zu entnehmen.

4.6 Einspeisung ins Gasnetz

Die Einspeisung ins Gasnetz bietet der Biogasnutzung neue Perspektiven. Durch die Gaseinspeisung kann das Biogas dort genutzt werden, wo es tatsächlich genutzt wird. Die hohen Verluste durch fehlende Abwärmenutzer können dadurch reduziert werden. Und der Gesamtwirkungsgrad der Energieerzeugung letztendlich deutlich verbessert werden.

Aufgrund der Gaszusammensetzung von Biogas muß das Biogas vor Einspeisung in ein öffentliches Gasnetz auf die Qualität des Erdgases aufbereitet werden.

Tabelle 8: Überblick über CO₂-Abtrennverfahren und Hersteller^{xvi}

Verfahren	Firmen	Auszug Referenzen (Bezug Rohgas)
Druckwechseladsorption	CarboTech Engineering (D) Cirmac (NL) QuestAir (CAN) Verdesis (CH)*	D, S, A, CH mehr als 20 Anlagen NL, Nuenen Mehrere in USA, CAN CH, Widnau, Lavigny, Ville-neuve, Invil
Physikalische Wäsche		
Druckwasserwäsche	Flotech (S, NZ) Malmberg (S) YIT (S), RosRoca (D)*	Mehrere Anlagen in S, E, EP S: mehr als 20 Anlagen; D:2 S: 5 Anlagen
Genosorb®-Wäsche HAASE Energietechnik (D)	HAASE Energietechnik (D)	Jameln, Hannover
Chemische Wäsche		
Aminwäsche	DGE (D) MT-Biomethan (D)* CarboTech (D) Cirmac (NL)	Prototyp, CH: ZürichRockstedt 600 m ³ /h Prototyp Schwandorf Göteborg 1.600 m ³ /h, Boras 600 m ³ /h
Membranenverfahren	Cirmac (NL) Air Liquide (F)	NL Berverwk

Tabelle 9: Richtwerte für die Einspeisung von Deponie-, Klär- und Biogas^{xvii}

Beschaffenheit der Rohgase	Hauptkomponenten			Spurengase			H ₂ O Taupunkt °C
	CH ₄ Vol %	CO ₂ Vol %	O ₂ /N ₂ Vol %	KW** Mg / m ³	H ₂ S mg / m ³	FCKW mg/m ³	
Mülldeponien	40-60	20-40	Rest	300	400	20-1000	~ 35
Biogasanlagen*	60-80	20-40	Rest	-	8000	-	~ 35
Kläranlagen	90-70	20-40	Rest	10	8000	-	~ 35
Erdgas H-Gebiete	>96	Keine bes. Festlegung	O ₂ < 0,5	Keine bes. Festlegung	< 5	***	ts > Bodentemperatur
Erdgas L-Gebiete	>90	Keine bes. Festlegung	O ₂ < 0,5	Keine bes. Festlegung	< 5	***	ts > Bodentemperatur

*In landwirtschaftlichen Betrieben; ** Kohlenwasserstoffe; ***Klär- und Biogase: Keine Festlegung erforderlich; Deponiegase: Einspeisung in öffentliche Netze nicht zulässig

Zur Aufbereitung des Biogases auf Erdgasqualität ist eine Aufbereitung des Biogases auf Grundlage der tatsächlichen chemischen Zusammensetzung des Biogases durchgeführt werden. Da auf Grundlage der o.g. Tabelle davon ausgegangen werden kann, dass Biogas neben Methan, außer Kohlendioxid, Wasser und Schwefelwasserstoff keine anderen Inhaltsstoffe vorhanden sind. Dieser Punkt jedoch abhängig von dem gewählten Substrateinsatz. Aus technischer Sicht muss eine dem Biogas der Schwefelwasserstoff und Wasser (bei Biogas ist mit einem Wasseranfall von 35 g / m³ Biogas bei einer Temperatur von 35°C und einem Feuchtegehalt von 100%), bevor die Aufbereitung zur Qualitätsverbesserung durch die Erhöhung des Methangehaltes durchgeführt werden kann.

Für die Reduzierung des Kohlendioxidgehaltes aus dem Biogas haben sich aus technischer Sicht derzeit drei Verfahren durchgesetzt:

- Druckwasserwäsche
- PSA-Verfahren (Druckwechselverfahren)
- Aminwäsche
- Membranen

Druckwasserwäsche

Bei der Druckwasserwäsche wird die unterschiedliche Löslichkeit von Kohlendioxid und Methan in Wasser ausgenutzt. Kohlendioxid löst sich unter Druck stehend stärker als Methan und kann dadurch getrennt werden. Diese sogenannte Gaswäsche ist das heute in Europa verbreitetste Verfahren zur Aufbereitung von Biogas.

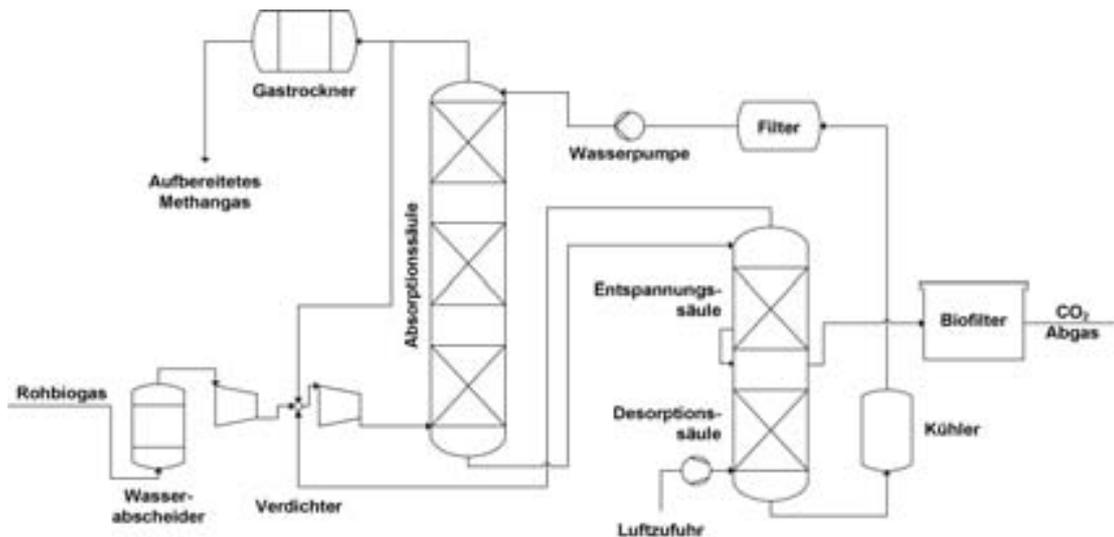


Bild 13: Systemskizze Druckwasserwäsche

4.6.1 Druckwechselverfahren (PSA)

Beim PSA (Druckwechselverfahren) handelt es sich um ein „adsorptives“ oder so genanntes „trockenes Verfahren“ der Abtrennung von Kohlendioxid. Das Biogas wird über einen Verdichter (ca. 8-10 bar) in die Adsorptionsbehälter gepreßt. Dort bleibt das Kohlendioxid an Aktivkohle oder an Sieben (Molekularsieben auf Kohlenstoffbasis) haften und wird hierdurch abgetrennt

4.6.2 Aminwäsche

Bei der drucklosen Aminwäsche strömt das zuvor entfeuchtete und entschwefelte Biogas in eine mit Füllkörpern bepackte Waschkolonne. Bei der Waschlösung handelt es sich um eine wässrige Aminlösung. Diese fließt im Gegenstrom zum Gas von oben nach unten. Der Waschprozess erfolgt bei einer Temperatur von ca. 40°C. Die Füllkörper in der Kolonne vergrößern deutlich die Oberfläche, so dass ein intensiver Stoffaustausch zwischen Gas- und Flüssigkeitsphase stattfindet. Die Aminlösung kann auf Grund ihrer chemischen Eigenschaften das im Biogas enthaltene Kohlendioxid sehr gut absorbieren. Das Methan hingegen reagiert nicht mit der Waschflüssigkeit und kann am Kopf der Kolonne als hochreines Biomethan abgezogen werden. Die Selektivität der Waschlösung führt zu einem minimalen Methanverlust von < 0,1 %. Die mit Kohlendioxid beladene Waschlösung wird am Boden

der Kolonne abgezogen und einem Regenerationsprozess zugeführt, wo der Waschlösung das aufgenommene Kohlendioxid unter Wärmezufuhr aus der Waschlösung wieder entzogen wird. Nach dem Entzug des Kohlendioxids kann die Waschlösung erneut verwendet werden.

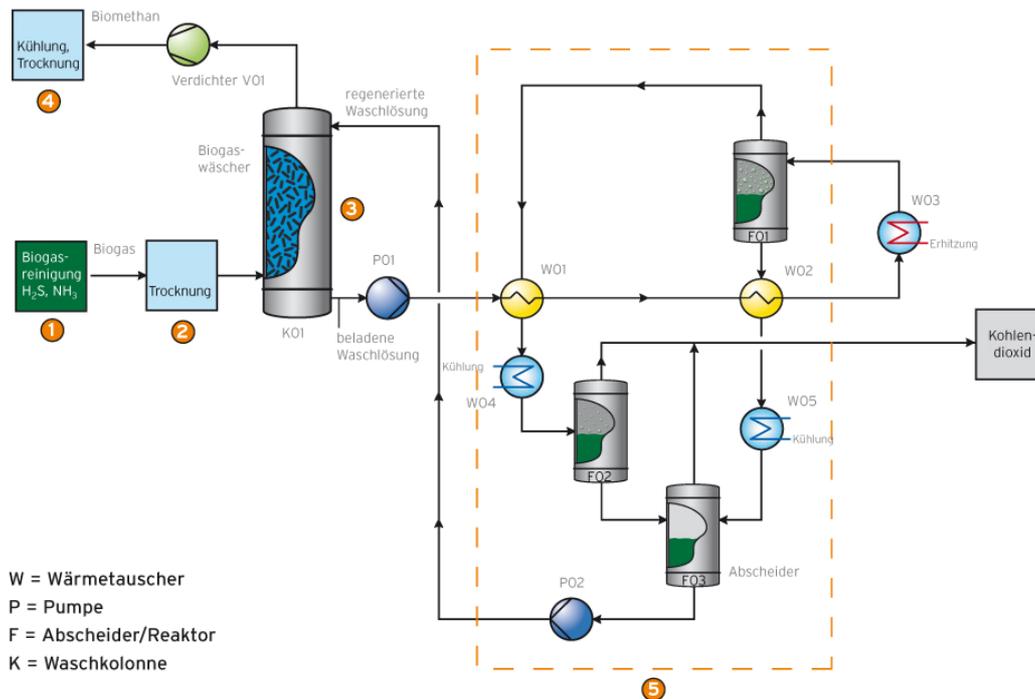


Bild 1: BCM-Verfahren in Lizenz der DGB GmbH Wittenberg

4.6.3 Gensorb® – Verfahren Fa. Haase

Das Verfahren basiert auf einer physikalischen Gaswäsche mit einer Waschflüssigkeit. Die Absorption erfolgt unter einem Druck. Zur Regeneration wird die beladene Waschlösung auf erwärmt und nach einer Zwischenentspannung in einem Flashdesorber im Desorber auf Umgebungsdruck entspannt. Die benötigte Vorlauftemperatur des Wärmeträgermediums muss mindesten 5-10°C über der Temperatur der zu regenerierenden Waschlösung liegen.

Durch die Zufuhr von Umgebungsluft als Strippluft werden die absorbierten Gasbestandteile im Desorber wieder ausgetrieben. Die Strippluft aus dem Desorber wird entweder thermisch behandelt oder einem installierten BHKW als Verbrennungsluft zugeführt. Zur Verringerung der Methanverluste wird ein Teilstrom des Gases bei Bedarf rezirkuliert. Für die Regeneration der Waschflüssigkeit muss keine externe Wärmeversorgung bereitgestellt werden, da die interne Abwärmeauskopplung bei der Gasverdichtung ausreichend ist. Bei der thermischen Regeneration wird auch das sorbierte Wasser wieder abgetrennt

Ein Verfahrensvergleich hinsichtlich der Produktgasqualität zeigt, dass Aminwäschen die höchste Produktgasqualität, den geringsten Methanschleupf und den geringsten spezifischen Strombedarf aufweisen. Im Vergleich zu PSA-Verfahren und Druckwasserwäschen benötigen Aminwäschen allerdings auch Prozesswärme auf einem hohen Temperaturniveau, z. B. die Aminwäsche des Anbieters MT-Energie von etwa 0,5 kWh/m³ mit einer Vorlauftemperatur von 160°C. Der Vorteil des deutlich geringeren Stromverbrauches bleibt demzufolge nur erhalten, wenn preiswert regenerative Wärme zur Verfügung gestellt werden kann.

Tabelle 10: Verfahrensvergleich anhand ausgewählter technischer Parameter^{viii}

Kriterien	Verfahren				
	PSA	DWW	Genosorb®	MEA	DEA
Vorreinigung ^a	Ja 4-7	Nein 4-7	Nein 4-7	Ja drucklos	Ja drucklos
Methanverlust ^b	%/6-10 ^b	< 1 % / < 2	< 1 %	< 0,1 %	< 0,1%
Methananteil Produktgas ^c	> 96 %	> 97 %	> 97 %	> 99 %	> 99 %
Stromverbrauch ^d [kWh/Nm ³]	0,25	< 0,25	0,24-0,30	< 0,15	< 0,15
Wärmebedarf [°C]	Nein	Nein	70-80 e	160	160
Regelbarkeit in % der Nennlast	+/- 10-15 %	50-100 %	50-100 %	50-100 %	50-100 %
Referenzen ^f	> 20	> 20	3	3	2

- a Die Angaben beziehen sich auf Rohbiogase mit H₂S-Belastungen kleiner 500 mg/m³. Bei hohen H₂S-Gehalten, wie sie beispielsweise bei Gülle-Biogasanlagen anzutreffen sind, empfiehlt sich auch bei physikalischen Wäschen eine vorgelagerte Grobentschwefelung.
- b Der Methanverlust ist abhängig von den Betriebsbedingungen. Die hier angegebenen Werte sind entweder Garantieangaben des Herstellers oder Betreiberangaben. Der Methanverlust < 3% bezieht sich Anlagen der Fa. CarboTech, die Spanne zwischen 6-10% auf Anlagen der Fa. QuestAir. Druckwasserwäsche: < 1% Fa. Malmberg, < 2% Fa. Flotech
- c Die Produktgasqualität ist prinzipiell variabel einstellbar; allerdings auf Kosten der Wirtschaftlichkeit oder des Methanverlustes. Die hier angegebenen Werte sind entweder Garantieangaben des Herstellers oder Betreiberangaben. Basis: luftfreies Biogas
- d Basis: Angaben in kWh/Nm³ Rohbiogas, Verdichtung des Produktgases auf 7 bar
- e Nach Angaben der Fa. HAASE ist eine interne Wärmebereitstellung mittels Wärmepumpe möglich.
- f Teilweise sind die angeführten Referenzanlagen Prototypen. Die Angaben in der Tabelle erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

4.7 Vergütung nach dem EEG

Auf Grundlage der von der EU erlassenen Richtlinie 2001/77/EG zur Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen wurde das in Deutschland bekannte EEG umgesetzt. In ihm wird geregelt, welche Vergütungen für die unterschiedliche Erzeugung von Erneuerbaren Energien gezahlt werden.

Die erzeugte Energie wird direkt dem öffentlichen E-Netz zugeführt. Die örtliche E-Betreiber sind nach dem EEG (Erneuerbare-Energien-Gesetz) verpflichtet, den Erzeugten Strom abzunehmen und zu vergüten. Die Vergütung ist ebenfalls im EEG geregelt, die jeweiligen Grundvergütungen sind in der nachfolgenden Tabelle zu entnehmen.

Tabelle 11: Grundvergütungen nach EEG

EEG Vergütungssätze in ct/KWh _{el}	Grundvergütung 2009	NaWaRo Bonus 2009	Technologie-Bonus 2009	KWK-Bonus 2009
Bis 150 kW _{el}	11,67 Cent	7,00 Cent	2,00 Cent	3,00 Cent
150 kW _{el} bis 500 kW _{el}	9,18 Cent	7,00 Cent	2,00 Cent	3,00 Cent
500 kW _{el} bis 5 MW _{el}	8,25 Cent	4,00 Cent	2,00 Cent	3,00 Cent
5 MW _{el} bis 20 MW _{el}	7,79 Cent	0,00 Cent	2,00 Cent	3,00 Cent

Für eine Gasaufbereitung von Biogas wird gemäß EEG für Anlagen bis max 700 Nm³ /h aufbereitetes Rohbiogas bis zu 2,0 Ct/kWh gezahlt

Dazu sind besonders umfangreiche Sonderzahlungen möglich. Bedingung sind die Nutzung innovativer Technologien (Technologie-Bonus), Verwendung von nachwachsenden Rohstoffen oder Gülle (NaWaRo-Bonus, darin enthalten: der sogenannte Gülle-Bonus), die Anwendung von Kraft-Wärme-Kopplung (KWK, KWK-Bonus) oder die Einhaltung von Grenzwerten bei den Formaldehyd-Emissionen (Formaldehyd-Bonus). Die Höhe der jeweiligen zusätzlichen Vergütungen sind vom jeweilig eingesetzten Verfahren und Leistungsstärke abhängig. Für Biogasanlagen, die nach 1. Januar 2010 in Betrieb genommen werden, verringert sich die Grundvergütung jährlich um 1,0 %. Einzelheiten siehe auch Gesetz zur Neuregelung des Rechts der Erneuerbaren Energien im Strombereich und zur Änderung damit zusammenhängender Vorschriften EEG.

Aufstellung der Bild und Tabellen

Lists of figures

Bild 1: Anaerobe Zersetzung organischer Stoffe	17
Bild 2: Biogasverwertung (z.B. BHKW zur Strom- und Wärmeproduktion.....)	21
Bild 3: Anaerobe Zersetzung organischer Stoffe	17
Bild 4: Pfropfenstromreaktor	21
Bild 5: Volldurchmischer Fermenter.....	22
Bild 6: Doppelkammer-Fermenter (ENTEC)	23
Bild 7: Container.....	25
Bild 8: Boxen-Fermenter	25
Bild 9: Folienschlauchbefüllung (Folienschlauch-Fermenter).....	26
Bild 10: Fermenter.....	26
Bild 11: Pfropfenstrom -Fermenter	27
Bild 12: Schema der Biogasnutzung.....	29
Bild 13: Systemskizze Druckwasserwäsche	33
Bild 14: BCM-Verfahren in Lizenz der DGB GmbH Wittenberg.....	34

Tabellen

Tabelle 1: Landwirtschaftliche Nutzung von Agrarflächen.....	18
Tabelle 2: Nutzung landwirtschaftlicher Flächen.....	181
Tabelle 3: Durchschnittliche Zusammensetzung von Biogas	183
Tabelle 4: Arten von Faulgas.....	18
Tabelle 5: Eigenschaften des Propfenströmverfahrens	21
Tabelle 6: Eigenschaften der Trockenvergärung	24
Tabelle 7: Biogas - biotechnische Kenndaten.....	28
Tabelle 8: Überblick über CO ₂ -Abtrennverfahren und Hersteller	31
Tabelle 9: Richtwerte für die Einspeisung von Deponie-, Klär- und Biogas.....	32
Tabeile 10: Verfahrensvergleich anhand ausgewählter technischer Parameter.....	35
Tabelle 11: Grundvergütungen nach EEG	36

Quellenangaben

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. Hofplatz 1 18276 Gülzow	Handreichung Biogasgewinnung und –nutzung Ausgabe 2005 http://www.fnr-server.de/ftp/pdf/literatur/pdf_208-hr_biogasnutzung_2009.pdf
Barbara Eder, Heinz Schulz	Biogas Praxis Grundlagen, Praxis, Anlagenbau, Beispiele 3. Auflage, 2006 Ökobuch Verlag und Versand GmbH, Postfach 1126, D-79219 Stauden http://www.oekobuch.de/
Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. Hofplatz 1 18276 Gülzow	Studie Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz 2. Auflage, 2006 http://www.fnr-server.de/ftp/pdf/literatur/pdf_211pdf_211_einspeisestudie_endfassung.pdf
Wikipedia	Bioenergy http://de.wikipedia.org/wiki/Bioenergie
Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheitsund Energietechnik UMSICHT Osterfelder Straße 3 46047 Oberhausen	Abschlussbericht für das BMBF-Verbundprojekt »Biogaseinspeisung« Beseitigung technischer, rechtlicher und ökonomischer Hemmnisse bei der Einspeisung biogener Gase in das Erdgasnetz zur Reduzierung klimarelevanter Emissionen durch Aufbau und Anwendung einer georeferenzierten Datenbank« Band 4: Technologien und Kosten der Biogasaufbereitung und Einspeisung in das Erdgasnetz. Ergebnisse der Markterhebung 2007-2008 http://www.biogaseinspeisung.de/download/2008_UMSICHT_Technologien_und_Kosten_der_Biogasaufbereitung_und_Einspeisung_in_das_Erdgasnetz.pdf
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit	Gesetz zur Neuregelung des Rechts der Erneuerbaren Energien im Strombereich und zur Änderung damit zusammenhängender Vorschriften (EEG) http://www.bmu.de/gesetze/verordnungen/doc/2676.php

^{viii} Walter Edelmann et al.: *Ökologischer, energetischer und ökonomischer Vergleich von Vergärung, Kompostierung und Verbrennung fester biogener Abfallstoffe*. Februar 2001, (online (PDF 3,3MB)) teilweise anders SRU (2007), *Klimaschutz durch Biomasse*.

^{ix} Deublein, Steinhauser: *Biogas from Waste and Renewable Resources*. Wiley-VCH, Weinheim 2008

-
- x Edelmann et al.: *Oekobilanz der Stromgewinnung aus landwirtschaftlichem Biogas*. 2001,
- xii Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz: *Nutzung von Biomasse zur Energiegewinnung - Empfehlungen an die Politik*. Gutachten des Beirats für Agrarpolitik, November 2007
- xiii F.Ekardt et al.: Europäische und nationale Regulierungen der Bioenergie und ihrer ökologisch-sozialen Ambivalenzen, *Natur und Recht*. 2009 S222-232; SRU, Klimaschutz durch Biomasse. Sondergutachten 2007
- xiv F.Ekardt et al.: Europäische und nationale Regulierungen der Bioenergie und ihrer ökologisch-sozialen Ambivalenzen, *Natur und Recht*. 2009 S222-232;
- xv G.Ludwig: Nachhaltigkeitsanforderungen beim Anbau nachwachsender Rohstoffe im europäischen Recht. *Zeitschrift für Umweltrecht* 2009, S.317 ff
- xvi Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT: Abschlussbericht für das BMBF-Verbundprojekt »Biogaseinspeisung« Beseitigung technischer, rechtlicher und ökonomischer Hemmnisse bei der Einspeisung biogener Gase in das Erdgasnetz zur Reduzierung klimarelevanter Emissionen durch Aufbau und Anwendung einer georeferenzierten Datenbank«, Band 4: Technologien und Kosten der Biogasaufbereitung und Einspeisung in das Erdgasnetz. Ergebnisse der Markterhebung 2007-2008
- xvii Barbara Eder, Heinz Schulz: *Biogas Praxis, Grundlagen, Planung, Anlagenbau*, Ökobuch Verlag Versand GmbH, Postfach 1126, D-79219 Stauden
- xviii Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT: Technologien und Kosten der Biogasaufbereitung und Einspeisung in das Erdgasnetz. Ergebnisse der Markterhebung 2007-2008