

Höhere Wertschöpfung einer Biogasanlage durch Prozeßoptimierung

Anselm J. Gleixner, INNOVAS GbR, Referat zur 12. Witzenhäuser Konferenz „ENERGIEWENDE Chancen für die Landwirtschaft“, am 02.12.2003

Einleitung

Um ein Maximum an Ertrag aus einer Biogasanlage herauszuholen muß die Anlage optimal geplant und gebaut sein. Als Voraussetzung für die gute Funktion sind ein paar grundsätzliche Fakten zu beachten.

- ⇒ Grundsätzlich muß bei der Vergärung von Pflanzen und Pflanzenteilen keine Gülle dazu gemischt werden. Im Gegenteil wird man ohne Gülle einen höheren Ertrag haben.
- ⇒ Lignin, Holz und holzige Rohfaser, ist nicht vergärbar; Zellulose und Hemizellulose ist nur unter sehr hohem Aufwand anaerob abbaubar. Deshalb gehören diese Substratbestandteile auch nicht in eine Biogasanlage und müssen vorher abgetrennt werden.
- ⇒ Es ist ein möglichst hoher Zellaufschluß herzustellen. Je größer die Oberfläche ist, welche die Partikel haben, um so besser ist der Abbau und der damit verbundene Ertrag. Der Zellaufschluß kann mechanisch durch mahlen, enzymatisch oder chemisch erfolgen.
- ⇒ Das Gärsubstrat muß homogen und gut fließbar angemischt werden.

Das richtige Verständnis der zwingend von der Natur vorgegebenen Abläufe in einer Biogasanlage ist eine wichtige Voraussetzung des guten Betriebes. Die Natur muß man verstehen, sie läßt sich von uns nicht ändern und schon gar nicht läßt sie sich außer Kraft setzen oder betrügen.

Einige Grundlagen des Anaerobprozesses

Der Abbau der organischen Substanzen in einer Biogasanlage erfolgt in vier Hauptphasen.

Daran ist eine Mischkultur aus fakultativ anaeroben (sowohl mit, als auch ohne Sauerstoff lebend) und anaeroben (also ohne Sauerstoff lebend) Mikroorganismen beteiligt, wie z.B. Bakterien, Schimmelpilze und Einzeller. In den ersten beiden Schritten, der Hydrolyse und Versäuerung werden die komplexen Polymere ihre in Monomere zerlegt

Die Kohlenstoffketten werden von den unterschiedlich daran beteiligten Mikroben in immer kürzerkettige Verbindungen geteilt.

Die hydrolysierenden Bakterien und Mikroorganismen sind anfangs fakultativ anaerob und leben in enger Symbiose mit den versäuernden Bakterien zusammen und deshalb ist es zwingend erforderlich diese beiden Abbauphasen räumlich zusammen zu fassen. Der optimale pH-Wert für die Hydrolyse und Versäuerung soll zwischen 5 und 6 liegen.

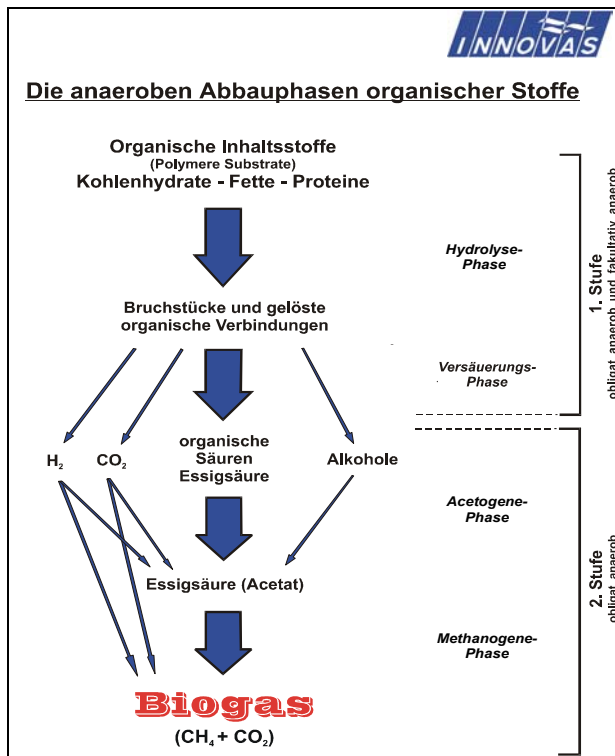


Abbildung 1 - die anaeroben Abbauphasen

In besonderen Fällen kann sich der pH-Wert auch unter 5 einstellen. Entscheidend ist alleine das sich bildende Säuremuster aus freien kurzkettigen Fettsäuren (C2 bis C7).

Fettsäuren	C-2 Essige	C-3 Propion	i-C-4 Isobutter	C-4 Butter	i-C-5 Isovalerian	C-5 Valerian	C-6 Capron	C-7 Oenanth	Summe
Hydrolyse (mg/l)	4357	1606	104	2612	145	1413	1722	666	12623
Methanisierung (mg/l)	206	16	5	22	5	30	28	14	323
Abbaugrad (%)	95,3	99,0	95,7	99,2	96,2	96,5	97,9	98,4	97,4

Tabelle 1 - Beispiel Fettsäurezusammensetzung und Abbaugrad einer Biogasanlage

Die Hydrolyse ist der limitierende Faktor der Biogasbildung - d.h. je mehr Fettsäuren und in erster Linie Essigsäure in der Versäuerung gebildet werden, um so höher ist der Abbaugrad und die Biogasbildung. Anders herum ausgedrückt kann nur das von den nachfolgenden Bakterien in Biogas umgewandelt, was in der Hydrolyse- und Versäuerungsphase gebildet wurde. Die Methanbildner verstoffwechseln ausschließlich Essigsäure und Wasserstoff!

Die TU München-Weihenstephan, Lehrstuhl für Energie- und Umwelttechnik der Lebensmittelindustrie hat die Vorgänge in der Hydrolyse sehr anschaulich mit der „Weihenstephaner Kuh“ dargestellt. Das Verdauungsprinzip der Wiederkäuer funktioniert in gleicher Weise. Nur, daß beim Tier eher die Produktion von Propionsäure im Vordergrund steht und der Abbaugrad der zugeführ-

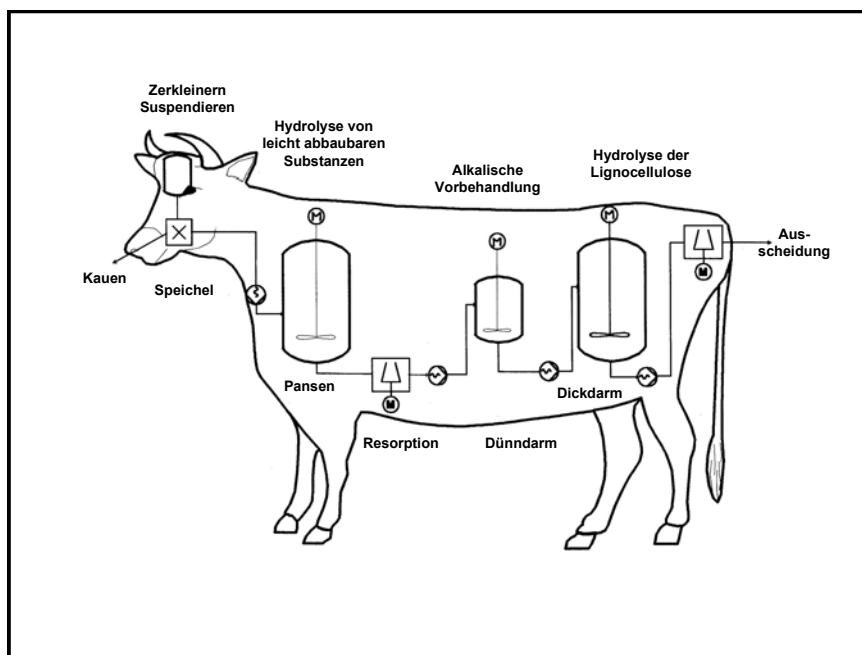


Abbildung 2 - Hydrolyse analog zur Verdauung im Wiederkäuer

ten Biomasse nicht maximal ist und auch nicht maximal sein darf, ansonsten würde das „Transportsystem“ im Darm des Tieres nicht funktionieren.

Soll die Biogasanlage genau so perfekt funktionieren wie der Versäuerungsapparat im Wiederkäuer, so muß man die wichtigsten Verfahrensschritte kennen und anlagentechnisch nachbilden.

Das ist eine wesentliche Voraussetzung für eine hohe Abbau- und Gasleistung und unabdingbarer Bestandteil unserer Biogasanlage.

Optimal für den Versäuerungsprozeß ist eine Temperatur von 35 - 40 ° C. Auch das eine Parallele zur Natur, in diesem Temperaturbereich liegt die übliche Körpertemperatur von Warmblütern.

Das ausreichend und gut vorgesäuerte Substrat (vergleiche Tabelle 1) kann nun den nächsten beiden Prozeßschritten - der Acetogenese und Methanisierung zugeführt werden. Auch in diesen zwei Phasen ist es so, daß die beteiligten Mikroben in enger Symbiose leben und deshalb in der strikt anaeroben Methanstufe zusammengefaßt werden müssen.

Der optimale pH-Wert für die Methanisierung liegt zwischen 6,8 und 7,6 (bei pH-Werten über 8 sollte man den Prozeß untersuchen, denn das kann auf einer erhöhten Anreicherung von Ammonium hervorgerufen werden und diese kann wiederum toxisch für den Prozeß wirken).

Das Stoffwechselprodukt der Bakterien im Fermenter ist das von uns gewünschte Biogas - ein Gemisch aus hauptsächlich Methan (bei Schlempe zwischen 70 und 85 % CH₄) und Kohlendioxid (15 - 30 % CO₂). Der Anteil an Spurengasen ist < 1% und kann deshalb vernachlässigt werden.

Bei der Hydrolyse entsteht ebenfalls Gas als Ausscheidprodukt der Mikroorganismen. In erster Linie CO₂ und vor allem der Größte Anteil des ungewünschten Schwefelwasserstoffes H₂S. Das Hydrolysegas ist energetisch nichts wert, hat aber einen sehr üblen Geruch. Deshalb wird das Hydrolysegas separat erfasst und in einen Biofilter eingeleitet und hier gereinigt.

Für den optimalen Betrieb einer Biogasanlage sollten die folgend dargestellten Bedingungen erfüllt sein.

Temperatur	Mesophil Thermophil	35 - 40 °C 52 - 55 °C
pH - Wert	Hydrolyse / Versäuerung Methanisierung	4 (5) - 6 6,8 - 7,5
Nährstoffverhältnis C:N:P:S = 2000:15:5:3		
möglichst hohe Substratkonstanz		
möglichst gute Substrathomogenität		
laminare Strömungsverhältnisse		
keine Auswaschung von Mikroorganismen		

Tabelle 2 - die optimalen Bedingungen für den Biogasprozeß

Das Nährstoffangebot fast aller Pflanzen liegt gut im optimalen Rahmen. Durch Zugabe von Co-Substraten kann dieses sogar noch weiter verbessert werden, um noch höhere Gasausbeuten zu erzielen. Wird Gülle dazu gegeben, wird die Gasausbeute naturgemäß verringert. In der Gülle fehlen eben viele leicht abbaubare Substanzen des Futters, denn diese dienten zuvor dem Lebewesen als Energiezufuhr.

Die gleichmäßige Substratkonstanz und -homogenität ist Anlagentechnisch herzustellen. Es muß dafür gesorgt werden, daß die Biogasanlage möglichst gleichmäßig ohne Lastschwankungen beschickt wird. Um optimale Strömungsverhältnisse zu erhalten wird in *INNOVAS* Fermentern das frische Substrat gleichmäßig im Bodenbereich eingetragen und oben abgezogen. Auf ein Rührwerk wird ganz verzichtet. Dadurch treten im Fermenter keine schädlichen Scherkräfte auf. Ein eingebauter Bakterienspeicher sorgt für eine gute Immobilisierung der Mikroorganismen.

Biogasanlagen können grundsätzlich mesophil, d.h. zwischen 35 -40 °C, aber auch thermophil mit 52 - 55 °C gefahren werden (aber: entweder oder, ein sowohl als auch geht nicht).

Wir bevorzugen den mesophilen Bereich, weil dieser wesentlich stabiler und weniger störungsanfällig ist (Körpertemperatur der warmblütigen Lebewesen !), als der thermophile Bereich.

Der Vorteil in der thermophilen Fahrweise ist, daß der gleiche Abbau in etwas kürzerer Zeit stattfindet. Es kann aber nicht mehr Biogas gebildet werden als Kohlenstoff zur Verfügung gestellt wird und auch nicht hydrolysiertes Material kann nicht weiter abgebaut werden. Ein weiterer Vorteil kann in einer besseren Pasteurisierung des ausgefaulten Substrates gesehen werden. Aber das ist für eine Biogasanlage für nachwachsende Rohstoffe nicht von Belang.

Energienutzen

Für die Biogaserzeugung sind im wesentlichen die Stoffinhaltsgruppen der Fette, Eiweiße (Proteine) und Kohlenhydrate brauchbar, wohingegen Lignin nicht anaerob abbaubar ist. Deshalb wird man aus Rohfaser deren Ligninhülle stabil ist, kein Biogas gewinnen können.

Die Gasbildung und die Menge an CH₄ (Gasqualität) ist ebenfalls zwingend von der Materialzusammensetzung abhängig. Kennt man die Zusammensetzung, so kann man die theoretisch erzielbare Biogasmenge und deren CH₄ und CO₂ Gehalt anhand der Buswell-Formel berechnen. Der Einfachheit halber haben wir die mögliche Gasbildung und Methanbildung in folgender Tabelle zusammen gefasst.

Inhaltsstoffe / Grundsubstanzen	stöchiometrische Biogasausbeute (Liter Biogas / kg OTS abgebaut)	ca. Methangehalt im Biogas (% im Biogas)
Fette	1.400 l/kg (1,4 m ³ /kg)	80 .. 90 %
Eiweiß / Proteine	600 .. 900 l/kg (0,6 .. 0,9 m ³ /kg)	75 .. 80 %
Kohlenhydrate	700 .. 800 l/kg (0,7 .. 0,8 m ³ /kg)	50 .. 60 %

Tabelle 3 - Gasausbeute aus zugeführter Organik

Mit diesen Zahlen und mit bekannter Zusammensetzung kann man die Biogasmenge und somit die gewinnbare Energiemenge vorabschätzen. Um einen neutralen Vergleich herzustellen, haben wir die Zusammensetzung der nachfolgend dargestellten Substratarten aus den „DLG-Futterwerttabellen“ entnommen. Der TS Gehalt in der Maische wurde einheitlich auf 7,0 % festgelegt.

Substrat	TS/OTS (%)	Rohfett (g/kg TS)	Proteine (g/kg TS)	Kohlenhydr. (g/kg TS)	Rohfaser (g/kg TS)	spezif. Gasbildungsrate (m ³ /kgOTS)	Biogas pro 1 m ³ Maische (m ³ /m ³)	CH ₄ -Gehalt
Kartoffelschlempe	7,0 / 85 %	17 g	285 g	451 g	80 g	0,60 m ³ /kg	36 m ³ /m ³	75 %
Weizenschlempe	7,0 / 88 %	67 g	362 g	416 g	97 g	0,65 m ³ /kg	38 m ³ /m ³	68 %
Maissilagemaische ¹⁾	7,0 / 95,5 %	41 g	98 g	743 g	73 g	0,62 m ³ /kg	41 m ³ /m ³	63 %
Grassilagemaische ¹⁾	7,0 / 91,4 %	53 g	219 g	558 g	85 g	0,58 m ³ /kg	38 m ³ /m ³	66 %
Schweinegülle ²⁾	7,0 / 86 %	70 g	180 g	450 g	160 g	0,50 m ³ /kg	30 m ³ /m ³	68 %
Rindergülle ²⁾	7,0 / 80 %	30 g	150 g	410 g	210 g	0,48 m ³ /kg	27 m ³ /m ³	64 %

1) nach Abtrennung der nicht vergärbaren Rohfaser

2) unseparierte Gülle

Tabelle 4 - typische Biogaserträge aus verschiedenen NaWaRo-Maischen und Gülle zum Vergleich

Diese Gaserträge können aber nur mit einer zweistufigen Hochleistungs-Biogasanlage erreicht werden, deren Prozessschritte sorgfältig aufeinander abgestimmt sind. Einfache, einstufige Landwirtschaftliche Biogasanlagen mit der dort üblichen Einbring- und Rührtechnik werden niemals diesbezügliche Abbauraten und Gasausbeuten erzielen können.

INNOVAS Innovative Energie- und Umwelttechnik
Anselm Gleixner und Stefan Reitberger GbR

Margot-Kalinke-Str. 9, D-80939 München

Telefon: 089 - 16 78 39 73

Telefax: 089 - 16 78 39 75

info@innovas.com

www.innovas.com



-  Biogasanlagen
-  Biodieselanlagen
-  Biomassenanlagen
-  Müllbrikettierung
-  Industrieberatung

Grundsätzlich ist folgende Biogasnutzung möglich:

- ⇒ Verbrennung in einem BHKW mit Gasmotor (oder Zündstrahlmotor), zur Erzeugung von Strom und Wärme (85 -95°C)
- ⇒ Verbrennung in einem BHKW mit Gasturbine, zur Erzeugung von Strom und Dampf / Prozeßwärme
- ⇒ Einsatz von Biogas in Brennstoffzelle, Erzeugung von Strom und Dampf/Prozeßwärme
- ⇒ Direkte Verbrennung im Dampfkessel, zusammen mit Erdgas oder anstelle von Heizöl

Technik

Eine optimale Biogasanlage sollte wenigstens über folgende Komponenten verfügen:

Zerkleinerung



Abbildung 3 – Hammermühle

Auf eine Zerkleinerung kann in der Regel nicht verzichtet werden, denn die üblichen Erntemaschinen sind eben auf Durchsatzleistung ausgelegt und nicht auf einen guten Zerkleinerungsgrad.

Für den Futterzweck ist das auch vollkommen ausreichend. Wie wir gesehen haben, verfügt das Tier ja über die richtigen Mahlwerkzeuge um das Futter optimal aufzubereiten.

Für die Biogasanlage müssen wir diese Mahlwerkzeuge technisch nachbilden. Dafür eignen sich sehr gut Hammermühlen, Prallmühlen und Maceratoren. Bei der Zerkleinerung ist eine möglichst große Oberfläche zu schaffen. Das bedeutet, daß gequetschtes Material besser ist als fein gehacktes Material.

Hydrolyse und Vorversäuerung



Abbildung 4 – Hydrolysebehälter

Die Hydrolysestufe kann im Fermenter integriert sein, oder auch mit freistehenden Tanks aufgebaut werden.

Die Integration in einem Zweistufenfermenter hat große Vorteile in der Substratführung und im Wärmehaushalt.

Optimale Substratführung und gleichmäßige Prozeßtemperatur sind ein wesentlicher Funktionsgarant.

Beinhaltet das Gärsubstrat Sand und andere leicht sedimentierende Bestandteile oder ist der Faseranteil sehr hoch, dann ist eine separate Hydrolysestufe im Vorteil.

Auch bei der Optimierung und Nachrüstung an einer bestehenden Biogasanlage wird man die Hydrolysestufe separat aufstellen.

INNOVAS Innovative Energie- und Umwelttechnik
Anselm Gleixner und Stefan Reitberger GbR

Margot-Kalinke-Str. 9, D-80939 München

Telefon: 089 - 16 78 39 73

Telefax: 089 - 16 78 39 75

info@innovas.com

www.innovas.com



-  **Biogasanlagen**
-  **Biodieselanlagen**
-  **Biomassenanlagen**
-  **Müllbrikkettierung**
-  **Industrieberatung**

Abpreßtechnik



Abbildung 5 – Preßschneckenseparator

Zum Abtrennen der nicht vergärbaren Bestandteile aus der Maische eignen sich sehr gut handelsübliche Preßschneckenseparatoren.

Die Flüssigphase geht in den Fermenter und daraus wird durch anaeroben Abbau Biogas gewonnen. Der Preßkuchen wird je nach Zusammensetzung einen Trockensubstanzgehalt von bis zu 35 % TS (>65 % Wassergehalt) haben.

Der Preßkuchen kann beispielsweise anschließend kompostiert werden. Eine höhere Wertschöpfung wird man jedoch erzielen, wenn der Preßkuchen mit vorhandener Abwärme weiter getrocknet und anschließend zu Biobrennstoff aufbereitet wird.

Fermenter



Abbildung 6 – Zweistufenfermenter

Der Hochleistungsfermenter ist das Herzstück einer Biogasanlage. Die Abbildung zeigt einen Zweistufenfermenter, mit innen intergrierter Hydrolysestufen.

Nach gleichem Funktionsprinzip werden auch einstufige Fermenter gebaut.

Für die hohe Abbauleistung ist eine möglichst gleichmäßige Beschickung in Menge und Last, eine möglichst gleichmäßige Substratverteilung innen und eine gleichmäßige und ruhige Durchstömung ohne schädliche Scherkräfte und ohne Kurzschlußströme wichtig. Der Fermenter muß eine ausreichend gute Bakterienimmobilisierung aufweisen.

Die Substratentnahme erfolgt ebenfalls relativ gleichmäßig oben. Unsere Fermenter sind zudem noch „überfüllt“ und deshalb immer gasdicht.

Gasaufbereitung



Abbildung 7 – Biologische Entschwefelung



Abbildung 8 – Biogaskühler

Biogas hat je nach der Zusammensetzung des Gärsubstrates einen mehr oder weniger hohen Gehalt an Schwefelwasserstoff H_2S , ein Schadgas das sehr korrodierend auf Metalle wirkt und dadurch insbesondere alle Verbrennungsmotoren außergewöhnlich stark belastet.

H_2S entsteht beim anaeroben Abbau von Eiweißmolekülen und durch biochemische Reduktion anorganischer Schwefelverbindungen. Die Entschwefelung kann auf biologischem Wege durch Zugabe geringer Mengen an Luft erfolgen.

Bereits in der Hydrolysephase entsteht ein Großteil an H_2S , das hier separat erfasst werden kann und somit dieser Anteil nicht mehr aus dem Biogas entfernt werden muß. Beinhaltet das Gärsubstrat ein sehr hohes Schwefelpotential, dann kann die Biologische Gasreinigung alleine nicht mehr ausreichend sein. In diesem Fall wird zusätzlich Eisensalz in die Fermenterbrühe zudosiert.

Auf keinen Fall darf man die Luft direkt in einen Betonfermenter einblasen. Obwohl dieser Fehler sehr häufig gemacht wird, bedeutet das die ernste Gefahr sehr schwerer Betonschäden. Bei der Umwandlung von H_2S in elementaren Schwefel entsteht nebenbei schwefelige Säure und diese greift Beton an.

Nach der biologischen Gasreinigung und einer anschließenden basischen Wäsche wird das wassergesättigte Biogas auf $< 10\text{ °C}$ abgekühlt und dabei auskondensiert. Als Kältequelle dient entweder kaltes Brunnenwasser oder es wird ein kleiner Kaltwassersatz eingesetzt.

Nach dem Kühler sollte noch ein Kiesfilter als Tröpfchenabscheider installiert sein, bevor das Biogas die Meßstelle passiert. Auf jeden Fall muß ein Gaszähler installiert sein, darüber hinaus ist ein Gasmonitor für die online Messung von CH_4 , O_2 und H_2S dringend angeraten.

Gaslager



Abbildung 9 – Folienblasenspeicher

Eine sehr preiswerte Methode das auskondensierte Biogas zu speichern ist die Verwendung von Folienblasenspeichern.

Als Folienmaterial wird eine faserverstärkte PVC Spezialfolie verwendet. Das bedeutet, daß die Speicherung quasi drucklos erfolgt. Der Systemdruck in der Biogasanlage beträgt nur ca. 5 mbar, maximal zulässig ist 10 mbar.

Die üblichen Gasverbraucher wie Gasmotoren oder Gasbrenner benötigen allerdings einen Vordruck zwischen 30 und 50 mbar. Diesen Druck erzeugt man einfach mit einer Druckerhöhungsstation. Bei kleineren und mittleren Biogasanlagen bis 500 kW_{elektrisch} sind das i.d.R. Seitenkanalgebläse. Selbstverständlich sind diese Anlagen gegen Unterdruck und Überdruck abgesichert.

Biofilter



Abbildung 10 – Biofilter

Während der Versäuerung entsteht ein übel riechendes Gas, das als Hydrolysegas gezeichnet wird. Hydrolysegas besteht hauptsächlich aus CO₂, beinhaltet aber auch einen sehr hohen Anteil an H₂S und Ammoniak.

Weil Hydrolysegas energetisch nichts wert ist, wird es nicht mit dem nutzbaren Biogas gemischt, sondern separat an den Entstehungsstellen erfasst und über einen Biofilter geleitet. Hier wird die Abluft gereinigt.

Biofilter sind einfach im Aufbau und problemlos zu betreiben. Man muß nur darauf achten, daß der Filter ausreichend groß ausgelegt wird und immer feucht gehalten wird.

Als Filtermaterial wird üblicher Weise ein Fasergemisch aus Weißtorf, Heidekraut oder Kokosfaser eingesetzt, aber auch geschreddertes Wurzelholz kann dafür verwendet werden.

Fazit

Eine falsch geplante Anlage am falschen Ort, die zu wenig verdient oder mit zu hohen Betriebskosten zu kämpfen hat kann gar nicht so „einfach“ und billig sein, daß sie nicht in ein finanzielles Fiasko führt! Deshalb ist eine gründliche Vorplanung unerlässlich, um bereits im Vorfeld zu erkennen, unter welchen Voraussetzungen das gewünschte Vorhaben wirtschaftlich sein wird.

Bezüglich der Weiterverarbeitung und wirtschaftlichen Nutzung der abgetrennten, nicht vergärbaren Bestandteile der NaWaRo-Maischen informieren wir Sie durch den nun folgenden Beitrag „Biogene Festbrennstoffe“, vorgetragen von Johannes Ketter, INNOVAS München.

INNOVAS Innovative Energie- und Umwelttechnik
Anselm Gleixner und Stefan Reitberger GbR

Margot-Kalinke-Str. 9, D-80939 München

Telefon: 089 - 16 78 39 73

Telefax: 089 - 16 78 39 75

info@innovas.com

www.innovas.com



-  **Biogasanlagen**
-  **Biodieselanlagen**
-  **Biomassenanlagen**
-  **Müllbrikkettierung**
-  **Industrieberatung**