

## **Glossar**

### **aerob**

1 (aer gr. = Luft; bios gr. = Leben) allgemein: sauerstoffbedürftig oder -haltig (bezogen auf Organismen, chemische Reaktionen)

2 Bezeichnung für die Lebensweise von Organismen, die zur Atmung Sauerstoff benötigen oder chemische Reaktionsweisen, die nur unter Sauerstoffzufuhr möglich sind (aerobe Atmung)

### **aerobe Behandlung**

Biologisches Abbauprozess mit Hilfe vorwiegend aerob arbeitender Mikroorganismen, z.B. für die Herstellung eines wiederverwertbaren Stoffes (Sekundärrohstoff) beispielsweise zur Düngung oder Bodenverbesserung.

### **anaerob**

1 Abbauvorgänge, bei denen kein Sauerstoff verbraucht wird.

2 Abbau von Stoffen durch Mikroorganismen unter anaeroben Bedingungen. In der Abwassertechnik zum Beispiel die Faulung zur Stabilisierung des Klärschlammes (s. Klärschlammstabilisation).

3 (aneu gr. = ohne; aer gr. = Luft). das Fehlen von molekularem Sauerstoff bezeichnend (lebend)

4 Bezeichnung für die Lebensweise von Organismen, die zum Leben keinen freien Sauerstoff benötigen, und für chemische Reaktionsweisen, die unter Ausschluss von Sauerstoff ablaufen (Anaerobier).

5 unter Luftabschluss lebend (Gegensatz: aerob)

### **anaerobe Behandlung**

Gelenkter biologischer Abbau bzw. Umbau von nativ-organischen Abfällen in geschlossenen Systemen unter Luftabschluss.

### **Anaerobier**

Organismen, die ohne freien Sauerstoff leben; gewinnen Energie durch unvollständige Abbauvorgänge ohne die Anwesenheit von Sauerstoff (Gärung). Man unterscheidet obligate Anaerobier, für die Sauerstoff giftig ist und fakultative Anaerobier, die auch bei der Anwesenheit von Sauerstoff leben können, z. B. Darmbakterien und Bandwürmer, im Gegensatz zu Aerobiern.

### **Anmaischen**

Mischen der zu vergärenden Abfälle (Abfall) mit Wasser, um die organischen Stoffe zu lösen und für die anaeroben Mikroorganismen verfügbar zu machen.

### **Bioabfall**

1 Allgemein: Biogene (biogen) und biologisch abbaubare nativ- und derivativ-organische Abfälle (Abfall) (z. B. organische Küchenabfall, Gartenabfall und organische Produktionsrückstände, nach Bioabfallverordnung); in der BRD in der Bioabfallverordnung in einer Positivliste aufgeführt.

2 Bioabfälle sind im Siedlungsabfall enthaltene biologisch abbaubare nativ- und derivativ-organische Abfallanteile (z. B. organische Küchenabfälle, Gartenabfälle etc.).

3 Sprachgebrauch: Der in zusätzlichen Abfallbehältern (Biotonnen) getrennt erfasste Hausmüllanteil inklusive der häuslichen Gartenabfälle (Gartenabfall). Darunter nicht zu verstehen sind organische Abfälle aus Großküchen, z. B. aus Kantinen oder Krankenhäusern.

### **Bio-Erdgas**

Biogas nach der Aufbereitung zur Einspeisung in das Erdgasnetz.

synonym: Bio-Methan

**Biofilter**

Anlage zur Behandlung u.a. geruchsbeladener Abluft. Auf dem Trägermaterial siedeln sich Mikroorganismen an, welchen die Geruchsstoffe als Nährstoffe dienen. Die bekanntesten Biofiltermaterialien sind Kompost- und Rindenmulchfilter.

**Biogas**

Durch anaeroben Abbau organischer Substanzen mittels Methanbakterien in Abwesenheit von Sauerstoff entstehendes Gas (Klärgas, Sumpfgas, Faulgas, Deponiegas), das zu ca. 50 bis 70 Vol.-% aus dem hochwertigen Energieträger Methan, Kohlendioxid sowie aus Spuren von Schwefelwasserstoff, Stickstoff, Wasserstoff und Kohlenmonoxid besteht. Der durchschnittliche Heizwert von Biogas beträgt 5.000 kJ/m<sup>3</sup>. Biogas kann aus einer Vielzahl von organischen Abfällen (organischer Abfall) (u. a. menschlichen und tierischen Exkrementen, tierischen und pflanzlichen Reststoffen) hergestellt werden.

**Biowäscher**

Anlage zur Abluftreinigung, bei der das Waschmedium aerobe Mikroorganismen zum Abbau luftverunreinigender und geruchsbelästigender Stoffe enthält.

**Cytoplasmamembran**

Membran, die den Zellinhalt einer Zelle begrenzt.

**Enzyme**

1 Von der lebenden Zelle gebildete katalytisch wirkende organische Verbindung (organische Verbindung), die den Stoffwechsel des Organismus steuert.

2 Fermente, Eiweißstoffe, die im Organismus als Katalysatoren an fast allen chemischen Umsetzungen, d. h. den Stoffwechselvorgängen beteiligt sind, indem sie die für jede Reaktion notwendige Aktivierungsenergie herabsetzen und so eine Reaktion (zum Beispiel bei Körpertemperatur) beschleunigen oder erst ermöglichen. Viele der 700 bekannten Enzyme sind zusammengesetzte Eiweiße mit höchster Wirkungsspezifität. Enzyme haben meist systematische Namen mit der Endung -ase. Der „Vorname“ gibt die Wirkung der Enzyme an (z. B. Dehydrogenasen) oder bezeichnet das Substrat, das hydrolytisch gespalten wird (z. B. Amylasen).

**Enzymkinetik**

Gebiet der Biochemie von Enzymen über die Abhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeit einer enzymkatalysierten Reaktion von verschiedenen Parametern, wie der Substratkonzentration, Zusammensetzung, Druck, Temperatur, Ionenstärke und pH-Wert.

**fakultative Bakterien**

Bakterien, die in Anwesenheit und Abwesenheit von freiem Sauerstoff wachsen können.

**Fermenter**

Behälter in dem Vergärungsprozesse stattfinden.

**Gärung**

Stufenweiser, enzymatischer Abbau organischer Stoffe, unter Ausschluss von Sauerstoff. Anders als bei der Atmung werden die bei den Abbaureaktionen gebildeten Elektronen und Protonen nicht auf Sauerstoff, sondern auf organische Verbindung (Gärungsendprodukte) übertragen.

### **Glühverlust**

1 Massenanteil, der beim Glühen vorher bei 105 °C getrockneter Proben von der Trockenmasse verloren geht. Entspricht dem organischen Anteil der Trockenmasse.

2 Die bei vollständiger Verbrennung bei 510 °C von Stoffen gasförmig entweichenden Anteile. Da diese zu nahezu 100 % aus organischem Kohlenstoff bestehen, wird näherungsweise der Gehalt an organischer Substanz oft als Glühverlust angegeben.

3 Der Gewichtsverlust einer trockenen festen Substanz nach der Verbrennung.

### **Hammermühle**

Eine Mühle, die einen schelllaufenden Rotor mit frei schwingenden Metallhämmern besitzt. Diese schleudern den zu zerkleinernden Abfall gegen feststehende Metallkämme. Wesentliches Merkmal der Zerkleinerung ist die Druckbeanspruchung

### **Hydrolyse**

1 (hydor gr. = Wasser; lysis gr. = Lösung) Reaktion mit Wasser bzw. Spaltung chemischer Verbindungen durch Wasser.

2 Reaktion mit Wasser, manchmal bei erhöhtem Druck und Temperatur und oft bei Anwesenheit von Säuren, alkalischen oder enzymatischen Trägern. Der Prozess dient dazu, Substanzen zu zerlegen und daher zu entgiften, wie organophosphorische Verbindungen. Das Wasser selbst wird dabei auch zersetzt.

### **Hygienisierung**

Verfahrensschritt mit dem Ziel der Entseuchung, d. h. das Material in einen nicht mehr ansteckenden Zustand bringen.

### **Intensivrotte**

Erste, thermophile Phase des mikrobiellen Ab- bzw. Umbaus (mikrobieller Abbau) unter aeroben Bedingungen mit hohem Sauerstoffbedarf bei der Kompostierung.

### **Kompostgüte**

Güte definiert die Qualitätseigenschaften von Kompost. Güterichtlinien für Komposte sollen die Beurteilung der Endprodukte verschiedenen organischen Ursprungs ermöglichen und definierte, nachprüfbare Qualitätsanforderungen enthalten.

### **Luftporenvolumen**

1 Luftvolumen = freies Luftporenvolumen. Das Porenvolumen, abzüglich des durch Trocknung entfernten Wassers, wird in Prozent vom Gesamtvolumen angegeben.

2 Bei jedem Mischungsverhältnis verschiedener Abfallstoffe entspricht einem bestimmten Wassergehalt ein bestimmtes freies, luftführendes Porenvolumen (FAS = Free Air Space).

### **Magnetscheider**

Anlage zum Abtrennen ferromagnetischer Metalle.

### **mesophil**

Temperaturbereich zwischen 30-35 (42)°C. Das erste Stadium in der Kompostierung ist mesophil, solange diese Organismen sich vermehren und die Temperaturen ansteigen bis die thermophilen Organismen übernehmen. Der pH-Wert wechselt von leicht sauer zu alkalisch in der mesophilen Phase.

### **Methan**

1 Sumpfgas, farbloses, geruchloses, ungiftiges Gas, verbrennt zu Kohlendioxid und Wasser. Es ist ein

etwa 30fach stärkeres Treibhausgas als Kohlenstoffdioxid und ist daher Teil der Klimadiskussion.

2 Ein farb-, geruchloses, entzündbares Gas, das während des anaeroben Abbaus von faulfähigen Substanzen entsteht. Es bildet explosive Mischungen bei 5-15 Vol.-% Methan in Verbindung mit Luft.

### **methanogene Phase**

Bildung von Methan aus Essigsäure, Wasser und Kohlenstoffdioxid. Die Methanbakterien erzeugen das Biogas, bestehend aus ca. 50-70 Vol.-% Methan und 30-50 Vol.-% Kohlenstoffdioxid.

### **Mieten**

Aufschüttung von zu kompostierenden Abfallstoffen auf regelmäßige Haufen zum Zweck der Rotte. Man unterscheidet zwischen Tafel-, Dreiecks- und Walmenmieten.

### **Nachrotte**

1 Letzter Abschnitt des Rotteprozesses bei der Kompostierung, in welchem organische Substanzen, vorwiegend Zellulose, unter mesophilen Bedingungen (= Temperaturbereich ca. 30 °C bis ca. 42 °C) abgebaut werden. Der Sauerstoffbedarf ist nun wesentlich geringer als in der Intensivrotte (die Abbauleistung geht zurück).

2 An die Intensivrotte anschließende, länger währende Rottephase, in welcher bei niedrigen Temperaturen verstärkt Prozesse der Humifizierung ablaufen.

### **Nassfermentation**

Anaerobes Behandlungsverfahren bei dem der zu behandelnde Biomüll während der Vorbehandlung auf einen Trockensubstanz-Gehalt von 1-15 Gew.-% eingestellt wird

### **obligater Aerobier**

Ein Organismus, der atmosphärischem Sauerstoff zur Atmung benötigt.

### **Pasteurisierung**

Verfahren zur Inaktivierung von Mikroorganismen, insbesondere Krankheitserregern, oder zur Verminderung ihrer Konzentration unter einen vorgegebenen Wert durch Einwirkung erhöhter Temperaturen über eine ausreichende Zeitdauer.

### **Produktgas**

Das Produktgas beschreibt das Biogas nach der Aufbereitung.

### **Radlader**

Luftbereifte selbstfahrende Maschine mit einer beweglichen Schaufel zum Abtragen und Umlagern von Schüttgütern.

### **Rohbiogas**

Das Rohbiogas beschreibt das Biogas vor der Aufbereitung bzw. Veredelung.

### **saure Phase**

In der sauren Phase oder auch Versäuerungsphase genannt, übernehmen verschiedene – fakultativ und obligat anaerobe – fermentative (= versäuernde) Bakterienarten die Gärung der Zwischenprodukte zu niederkettigen organischen Säuren, Alkoholen, Wasserstoff und Kohlendioxid.

### **Schwachgas**

Das Schwachgas betitelt die Gase aus den Gärrestelagern, welche nicht in die Aufbereitung, sondern direkt in das Heizhaus geleitet werden.

**Schwefelwasserstoff (H<sub>2</sub>S)**

Giftiges Gas mit dem Geruch von verdorbenen Eiern, welches durch die Verringerung der Sulfate in einem schwefelhaltigen organischen Material und in dessen Verwesungsvorgang produziert wird.;

**thermophil**

(thermos gr. = warm; philos = liebend) wärmeliebend. Mikroorganismen werden als thermophil bezeichnet, wenn ihr Temperaturoptimum um 50-55°C liegt.

**Trockenfermentation**

Anaerobes Behandlungsverfahren bei dem der Bioabfall entsprechend seines Wassergehaltes bei 25-40 Gew.-% Trockensubstanz vergoren wird.

**Trockengewicht**

Gewicht der Trockensubstanz

**Trockenmasse**

Der Anteil einer festen Substanz, der nach Wasserentzug übrig bleibt.

**Trockensubstanz**

1 Die nach einem Trocknungsverfahren erhaltene Masse.

2 Stoffe nach Entzug von Wasser durch Trocknung bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz, s. a. Trockengewicht.

**Unterkorn**

Material, dass bei einem Siebdurchgang hindurchfällt.

**Überkorn**

Siebrückstand eines Siebes.

**Versäuerungsphase**

In der Versäuerungsphase übernehmen verschiedene – fakultativ und obligat anaerobe – fermentative (= versäuernde) Bakterienarten die Gärung der Zwischenprodukte zu niederkettigen organischen Säuren, Alkoholen, Wasserstoff und Kohlendioxid.

**Zwangsbelüftung**

Bei der Zwangsbelüftung wird zwischen Druck- und Saugbelüftung unterschieden. Je geringer das Luftporenvolumen ist, desto größer sind die Druckverluste bei der Zwangsbelüftung und desto energieaufwendiger wird die Belüftung. Die Luftverteilung ist bei der Druckbelüftung günstiger. Bei der Saugbelüftung fällt ein stark belastetes Kondensat mit der Abluft an. Darüber hinaus ist der Ventilator korrosionsbeständig auszulegen.

Nachteil: Eine Ablufterfassung ist nur im geschlossenen System möglich.

Vorteil: weitgehenden Erfassbarkeit der geruchsintensiven Prozessabluft, Synonym: aktive Belüftung

Wie entsteht Biogas? – Eine Einführung in die moderne Vergärungstechnologie

Prof. Dr.-Ing. Eckhardt Kraft, Bauhaus-Universität Weimar

Herzlich Willkommen in unserem Kurs „Wie entsteht Biogas? – Eine Einführung in die moderne Vergärungstechnologie“ zum SDG 7 – Bezahlbare und saubere Energien. Hier werden Sie anhand der Biogasanlage der Firma Biothan GmbH in Fulda alle Prozessabschnitte bei der Erzeugung von Biogas aus Biomasse kennenlernen und erlernen. Zur Veranschaulichung steht dabei ein virtueller 360°-Rundgang über die Anlage in Fulda im Mittelpunkt, der den theoretischen Teil mit der Praxis verknüpft. Dieser Rundgang ist in fünf Abschnitte unterteilt, die nach und nach freigeschaltet werden. Nach jedem Abschnitt wird zuerst das erlernte Wissen in Form eines Multiple Choice Quiz abgefragt. Im Anschluss wird dann der nächste Abschnitt zur Verfügung gestellt.

Der erste Abschnitt behandelt die theoretischen Grundlagen der anaeroben Vergärung von Biomasse zu Biogas und ist inhaltlich an den Prozess der Nassfermentation (A) auf der Anlage in Fulda gekoppelt. Hier wird erläutert, wie die „nasse“ Biomasse, wie z.B. verdorbene Lebensmittel aus Supermärkten, zu Biogas vergoren wird. In Abschnitt zwei, der Trockenfermentation (B), werden die Verfahrenstechniken (der Monod-Kinetik und der Reaktortypen) und die genauen Parameter bei der Erzeugung von Biogas aus vornehmlich Bioabfall und Grünschnitt erklärt. Im anschließenden dritten Abschnitt geht es um die nachgeschaltete Kompostierung (C), die durch aeroben Abbau dieser Gärreste gütegesicherten Kompost erzeugt. Abschnitt vier erklärt, wie die Gasaufbereitung (D) und anschließende Einspeisung in das Gasnetz funktioniert und was die Besonderheit an der Biothan-Anlage in Fulda ist. Hier angegliedert ist ein Exkurs zu so genannten BHKWs (Blockheizkraftwerken). Der abschließende fünfte Abschnitt klärt über die mit dem Bau verbundenen Ausgleichs- und Naturschutzmaßnahmen (E) und die Historie (F) des Ortes auf, der zudem einen Exkurs zu deren Planung enthält.

Jedem Abschnitt ist eine Einführung mit Erläuterungen der wichtigsten Fachbegriffe und Prozessschritte vorangestellt, auf den Sie während des virtuellen Besuchs (der sich in einem zweiten Tab öffnet) hier im Kurs jederzeit zugreifen können. Zudem enthält der Rundgang selbst ein Verständnis förderndes Glossar mit weiteren Fachbegriffen.

Wie der virtuelle Rundgang zu bedienen und zu nutzen ist, erfahren Sie beim Start des ersten Abschnitts. Für eine korrekte und vollständige Darstellung aller Inhalte empfehlen wir die Nutzung eines Desktop-Rechners mit HD-Bildschirm und einen aktuellen Webbrowser. Eine fehlerfreie Nutzung über mobile Endgeräte wie Smartphones und Tablets kann nicht garantiert werden.

Wenn Sie alle 5 Abschnitte mit den Zwischenquizen absolviert haben, werden Sie zur Abschlussprüfung in Form eines 60 Fragen umfassenden Multiple Choice Tests weitergeleitet. Wenn Sie diese Befragung mit mindestens 30 richtig beantworteten Fragen abschließen, erhalten Sie im Anschluss Ihr Zertifikat mit 2 ECTS zum Download.

Und nun viel Freude und Erfolg mit unserem Kurs „Wie entsteht Biogas? – Eine Einführung in moderne Vergärungstechnologien.“

Alter Titel: Vergärungstechnologie als Teil stadttechnischer Infrastruktur aufbereitet im virtuellen Raum

## 1. Der Vergärungsprozess

### Abschnitt (A) Nassfermentation im 360°-Rundgang

Für das Verständnis der Prozesse, die während der Vergärung ablaufen, werden im folgenden Teil die dazu notwendigen Grundlagen geschaffen. Diese sind wichtige Voraussetzung für die Erfassung der Abschnitte Nass- und Trockenfermentation.

## Vergärung – anaerober Abbau

Die Vergärung bezeichnet die Zersetzung von Biomasse durch Mikroorganismen unter Abwesenheit von Sauerstoff. Die Begriffe anaerober Abbau oder Fermentation werden synonym verwendet. Das Hauptziel der Vergärung ist der vollständige Umsatz des Ausgangsmaterials zu Biogas.

Das Grundprinzip des Biogasbildungsprozesses umfasst die Umwandlung des biogenen Materials in energiereiches Biogas basierend auf dem Stoffwechsel einer Vielzahl von Mikroorganismen. Die Mikroorganismen weisen einen einfachen Enzymhaushalt auf, sodass höhermolekulare organische Verbindungen immer nur in die nächst niederen organischen Komponenten zerlegt werden. Der Abbau des komplexen Moleküls wird also in mehreren aufeinander folgenden Schritten von verschiedenen Mikroorganismengruppen durchgeführt. Es handelt sich um eine schrittweise Degradation, bei der eine kontinuierliche Reduktion der Energiegehalte stattfindet. Die Aktivität der Mikroorganismen wird durch die enge Abhängigkeit untereinander und die gegebenen Randbedingungen durch technische, organisatorische und klimatische Einflüsse beeinflusst.

Die Mikroorganismen sind in fakultative und obligate Anaerobier zu unterscheiden. Fakultativ anaerobe Organismen können ohne Sauerstoff leben, erreichen ihr optimales Wachstum aber in Gegenwart von Sauerstoff. Obligate anaerobe Organismen betreiben ihren Stoffwechsel ausschließlich unter Ausschluss von Sauerstoff. Sie vergären die organische Substanz, ohne Sauerstoff zu verbrauchen. Als Sauerstoffakzeptor wird von Anaerobiern der organische Kohlenstoff genutzt. Der Abbau der organischen Substanz zu Methan ( $\text{CH}_4$ ) findet nicht in einem Schritt statt. Er wird von verschiedenen Organismengruppen nacheinander durchgeführt, die voneinander abhängig sind und eine Nahrungskette bilden. Die Kette verläuft in vier Stufen und umfasst hydrolytisch/fermentative, acetogene und methanogene Bakterien.

### Hydrolyse (Verflüssigungsphase)

Die Biopolymere können als unlösliche Fasern oder Körner vorkommen und damit zu groß für die direkte Aufnahme sein. Besondere Atome bzw. Atomgruppen (Hydroxyl-, Amino- oder Sulfidsubstituenten) bieten Angriffsmöglichkeiten für hydrolytische Exoenzyme (Hydrolasen) [4]. In der ersten Stufe, der Hydrolyse, spalten fermentative Bakterien die polymeren Verbindungen wie Kohlenhydrate, Proteine und Fette mit Hilfe von Exoenzymen in die entsprechenden löslichen Monomere, Dimere bzw. Oligomere. An diesen Reaktionen sind sowohl fakultativ als auch obligat anaerobe Bakterien beteiligt. Dies geschieht energieneutral bzw. mit wenig Energieaufwand. Der optimale pH-Bereich für diesen Vorgang liegt dabei bei 5–6.

### Acidogenese (Versäuerungsphase)

In der zweiten Phase werden die löslichen, meist monomeren Abbauprodukte durch die Cytoplasmamembran der fermentativen Bakterien in die Zelle aufgenommen und weiter abgebaut. Die Verbindungen werden zu organischen Säuren (z.B. Propion- und Buttersäure) und Alkoholen sowie zu Wasserstoff ( $\text{H}_2$ ), Kohlendioxid, Ammoniak ( $\text{NH}_4$ ) und Schwefelwasserstoff ( $\text{H}_2\text{S}$ ) vergoren. Entscheidend für den Abbau ist der Wasserstoffpartialdruck. Bei niedrigem Druck werden überwiegend  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$  und Acetat umgesetzt und bei hohem Druck zusätzlich längerkettige organische Säuren und Alkohole gebildet. Das pH-Optimum in dieser Phase liegt bei 4–6.

### Acetogenese (Essigsäurephase)

In der dritten Phase findet die Essigsäurebildung statt. Bei der Gärung von längerkettigen Fettsäuren oder Alkoholen zu Essigsäure oder Essigsäure und Kohlenstoffdioxid wird direkt Wasserstoff freigesetzt. Dafür ist eine syntroph gekoppelte Folgereaktion notwendig, in der die Endprodukte Wasserstoff und/oder Essigsäure ständig verbraucht werden. Dies erfolgt durch acetogene (essigsäurebildende) und methanogene (methanbildende) Bakterien. Beide Bakteriengruppen stehen in einem bezüglich

ihrer wechselseitigen Nahrungsansprüche symbiotischen Verhältnis, sie bilden eine syntrophe (abhängige) Lebensgemeinschaft.

#### Methanogenese (Methanphase)

In der Methanogenese findet die Verwertung der Reaktionsprodukte der fermentativen und acetogenen Bakterien statt. Von der Zwischenproduktion der zweiten Phase können die Methanbakterien nur Essigsäure, Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid direkt in Methan umsetzen. Durch die Umsetzung von Wasserstoff mit Kohlenstoffdioxid zu Methan und durch Acetatumsatz zu Methan und Kohlenstoffdioxid schaffen die Methanbakterien den nötigen niedrigen Wasserstoffpartialdruck und eine niedrige Acetatkonzentration. Die letzte Phase ermöglicht damit einen vollständigen Abbau der organischen Reststoffe zu Biogas. Das pH-Optimum für diese Phase liegt bei 6,6- 7,5.

Die Endprodukte des anaeroben Stoffwechsels sind somit Kohlenstoffdioxid und Methan, deren Gemisch man als Biogas bezeichnet. Die folgende Tabelle stellt den mehrphasigen Prozess vereinfacht dar.

	1. Phase	2. Phase	3. Phase	4. Phase
Name	Hydrolyse	Acidogenese,		
Versäuerung	Acetogenese,			
Essigsäurebildung		Methanogenese/ Methanbildung		
Ausgangsstoffe	Komplexe Kohlenhydrate,			
Eiweiße, Fette	Aminosäuren,			
Zucker,				
Fettsäuren	z.B. Essig-,			
Propion- und				
Buttersäure	Essigsäure, H <sub>2</sub>			
Mikroorganismen	Fermentative	Acidogene / Fermentative	Acetogene	Methanogene
Zwischenprodukte	Einfache organ.			
Verbindungen	Niedere			
Fettsäuren	Essigsäure			
Endprodukte	CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> , NH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub>

Tab. 01: Vereinfachte Darstellung des anaeroben Abbaus organischer Substanzen

Der Gesamtprozess lässt sich auch als Fließbild darstellen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die vier Prozessphasen auch gleichzeitig parallel ablaufen können. An dieser Stelle setzen die Überlegungen zur technischen Umsetzung und Ausgestaltung der biologischen Prozesse an.

#### Abb. 01: Schematischer Ablauf der Vergärung zur Methanbildung

#### 2. Die Vergärungsparameter

##### Abschnitt (B) Trockenfermentation im 360°-Rundgang

#### Monod-Kinetik

Damit die biologischen Prozesse in den Fermentern kontinuierlich und ohne Unterbrechungen funktionieren, werden über die Monod-Kinetik die Umsatzraten und damit die Zuwachsraten der Biomasse gemessen und anhand dieser das Verfahren gesteuert.

Die Wachstums- oder Monodkinetik gibt den empirischen Zusammenhang zwischen Biomassezuwachs pro Zeit (Wachstumsrate) und der Substratkonzentration an. Die Wachstumsrate steigt mit der Zunahme der Substratkonzentration. Bei zunehmender Verdünnungsrate infolge erhöhter



Substratzugabe reagieren die Bakterien mit zunehmender Stoffwechselaktivität, was einen zunehmenden Substratverbrauch zur Folge hat. Die Zunahme des Substratverbrauches erfolgt aber mit einer kleinen zeitlichen Verzögerung, so dass es zu einer Erhöhung der Wachstumsrate kommt.

#### Abb. 02–03: Umsatzraten der Monod-Kinetik

Beim bakteriellen Substratabbau handelt es sich um eine enzymkatalysierte Reaktion, die einer Sättigungskinetik folgt. Daraus folgt, dass die Wachstumsrate nach dem Erreichen der maximalen Wachstumsrate bei weiterer Substratzugabe nicht mehr weiter steigt. Wird die maximale Wachstumsrate erreicht und es erfolgt eine weitere Erhöhung der Substratzugabe (Verdünnung), so bricht das Gleichgewicht am Auswaschpunkt zusammen, da die Auswaschrage nicht mehr durch steigenden Bakterienenertrag kompensiert werden kann. Insbesondere die Veränderung der Trockensubstanz, die mit der Veränderung der Bakteriendichte einhergeht, ist zu berücksichtigen. Ist die Wachstumsrate klein, muss auch die Verdünnungsrate entsprechend klein sein, um das Gleichgewicht konstant zu halten und die Bakterien nicht aus der Lösung zu schwemmen.

#### Bioprozesskinetik

Die Beschäftigung mit den wesentlichen kinetischen Abläufen der Mikroorganismen, insbesondere der Produktbildung und des Wachstums, ist für die optimale Betriebsführung zwingend. Dabei werden auch Limitierungen oder auch Hemmungen betrachtet. Die wird unter dem Begriff der Bioprozesskinetik zusammengefasst.

Das dargestellte Diagramm zeigt die Entwicklung der Mikroorganismen während des anaeroben Abbaus in einer Batch-Prozessführung. Bei einer kontinuierlichen Prozessführung werden die Mikroorganismen in der exponentiellen Phase in ihrem optimalen Bereich gehalten.

#### Abb. 04: Entwicklung der Mikroorganismen während des anaeroben Abbaus, Batch-Prozessführung

In der ersten Phase (Anlauf- oder lag Phase) werden erste Mikroorganismen über eine Impfgutzugabe hinzugefügt. Die Entwicklung der Mikroorganismen ist dann abhängig von der Vorkultur bzw. dem Alter der Vorkultur, der Adaption im Milieu und den Bedingungen im System. Es handelt sich also um die Anzucht der Mikroorganismen. Die zweite Phase (exponentielle Phase) beginnt mit dem Ende der Anlaufphase und der Anpassung der Organismen an die Milieubedingungen. Das Wachstum beginnt und wird ausschließlich durch interne Faktoren wie die Enzymkinetik bestimmt. Die exponentielle Phase hält an, bis essenzielle Nährstoffe verbraucht sind, sich toxische Substanzen bilden oder eine zu hohe Zelldichte besteht. In der folgenden stationären Phase stagniert das Wachstum der Mikroorganismen und die maximale Zelldichte ist erreicht. Ist das Nährstoffangebot verbraucht, verfallen die Organismen in kannibalistische Vorgänge und die Absterbephase beginnt. Die Veränderung der Milieubedingungen kann ebenfalls zum Absterben der Mikroorganismen führen.

#### Enzym

Das Enzym sorgt für die Beschleunigung von biochemischen Reaktionen bzw. Stoffwechselprozessen in Organismen. Als Katalysator bleibt es während der Reaktion unverändert. Enzyme sind komplexe Moleküle und meist Proteine.

#### Enzymkinetik

Die Enzymkinetik beschreibt die Abhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeit einer enzymkatalysierten Reaktion von verschiedenen Parametern wie der Substratkonzentration, Zusammensetzung, Druck, Temperatur, Ionenstärke und pH-Wert.

### Substratdosierung

Der Energiegewinn im anaeroben Abbauprozess wird in jedem Schritt geringer, sodass die Wachstumsgeschwindigkeiten der Bakterien sich zum Ende der Kette hin verringern. Die Substratdosierung muss damit den ersten Abbauschritt limitieren, damit die langsam wachsenden Methanbakterien Zeit für eine Anpassung haben. Wird dies nicht beachtet und die Bakterien der ersten beiden Phasen vermehren sich zu schnell sinkt der pH-Wert in den sauren Bereich und die Methanbakterien werden zusätzlich zur geringen Stoffwechselaktivität gehemmt. Kippt der Prozess komplett ins saure Milieu muss der Gärreaktor komplett geleert und neutralisiert werden. Dies ist in praktischen Anwendungen unbedingt zu vermeiden. Neben dem pH-Wert muss bei der Dosierung auch auf den Wasserstoffgehalt geachtet werden, um eine Wasserstoffhemmung zu vermeiden (siehe Wasserstoffpartialdruck).

### Prozessparameter

#### pH-Wert

Während des anaeroben Abbaus laufen parallel pH-senkende Versäuerungsprozesse (Bildung organischer Säuren durch Acidogenese) und pH-anhebende Abbauprozesse für Säuren (Abbau der organischen Säuren durch Acetogenese und Methanogenese) statt. Der optimale pH Bereich für die ersten beiden Stufen liegt zwischen 5,2 und 6,3. Hingegen ist der Bereich von 6,7 bis 7,5 für die letzten beiden Stufen optimal. Acetogene und methanogene Bakterien reagieren empfindlich auf niedrige pH-Werte, während die Aktivität von hydrolytische und acidogene Bakterien auch noch bei neutralen pH-Werten ausreicht bzw. sie eine größere Toleranz gegenüber pH-Werten im sauren Bereich aufweisen. Der pH-Wert sollte im Prozess somit nicht unter 6,7 fallen.

Die meisten beteiligten Bakteriengruppen erreichen ihr Aktivitätsoptimum im schwach alkalischen Bereich.

#### Temperatur

Es besteht die Möglichkeit den Prozess in verschiedenen Temperaturbereichen zu führen. Der mesophile Bereich mit 30–42 °C weist optimal Umsatzraten bei überschaubarem Aufwand für die Temperierung auf. Der thermophile Bereich mit 50-55 °C erreicht einen intensiveren bzw. schnelleren Abbau, sorgt aber auch für eine geringere Prozessstabilität. Die Option der Hygienisierung des Gärrestes würde einen Vorteil des thermophilen Betriebes darstellen. Dennoch werden die meisten Reaktoren im Zuge des anaeroben Abbaus im mesophilen Temperaturbereich gefahren.

#### Wasserstoffpartialdruck

Der Wasserstoffpartialdruck beeinflusst den Biogasbildungsprozess maßgeblich. Beim anaeroben Abbau organischer Substanzen entsteht während der fermentativen Phase bei der Umsetzung der Monomere und bei der acetogenen Phase beim Abbau von länger-kettigen Fettsäuren und Alkoholen molekularer Wasserstoff. Je höher der Wasserstoffpartialdruck (also mehr Wasserstoff im System enthalten), umso mehr wird das Spektrum der Gärprodukte von Essigsäure und Wasserstoff zu Fettsäuren und Alkoholen verschoben. Insbesondere für den Abbau von länger-kettigen Fettsäuren ist eine acetogene Population obligatorisch für den weiteren (vollständigen) Abbau., da dieser sonst auf der Stufe der Fettsäuren und Alkohole stehen bleibt. Die Vermeidung der Wasserstoffansammlung ist dann auf eine syntrophe Folgereaktion angewiesen, welche den Wasserstoffpartialdruck gering hält. Die Methanbildung verbraucht Wasserstoff und hält den Druck niedrig. Die acetogene Umsetzung wird also zum limitierenden Schritt, da für in der Acetogenese ein niedriger Wasserstoffpartialdruck benötigt wird, der Wasserstoff aber das Substrat für die Methanbakterien darstellt (Substratlimitierung).

## Prozesstechnologien

In der Vergärungstechnologie bestehen verschiedene mögliche Verfahren zur Prozessdurchführung des anaeroben Abbaus. Zu unterscheiden gilt es in thermophile/mesophile, trockene/nasse, einstufige/zweistufige und batch/kontinuierliche Prozessführung.

Bei der Unterscheidung in mesophile und thermophile Prozessführung ist die Temperatur entscheidend. Der mesophile Temperaturbereich liegt bei 30-42 °C, wohingegen der thermophile Bereich bei 50-55°C liegt. In beiden Fällen werden vergleichbare Abbauleistungen erzielt. Allerdings weist die thermophile Führung einen schnelleren bzw. intensiveren Abbau auf, während die mesophile Führung eine längere Verweilzeit benötigt. In der thermophilen Prozessführung kann eine Hygienisierung bei ausreichend langer Verweilzeit stattfinden. Der Vorteil hingegen bei der mesophilen Prozessführung liegt in der höheren Prozessstabilität. Tabelle 02 – Vergleich zwischen mesophiler und thermophiler Verfahrensführung fasst dies zusammen.

Tab. 02: Vergleich zwischen mesophiler und thermophiler Verfahrensführung

Des Weiteren können die Verfahren je nach Trockensubstanzgehalt im Fermenter unterschieden werden. Trockene Verfahren mit einem Gehalt von ca. 35 Gew.-%, wohingegen der Gehalt von Nassverfahren bei ca. 10 Gew.-% liegt. Liegen höhere Trockensubstanzgehalte der Substrate vor, wird Prozesswasser zugeführt, um die Werte der Nassvergärung zu erreichen (Anmaischung). Für die Nassvergärung muss eine pump- und rührfähige Suspension vorliegen. Bei der Trockenvergärung kann man zusätzlich noch in kontinuierliche und diskontinuierliche (batch) Betriebsweise unterscheiden. Tabelle 03 fasst den Vergleich von Trocken- und Nassfermentation zusammen.

Tab. 03: Vergleich zwischen Trocken- und Nassverfahren

Kontinuierliche Verfahren (wie sie auf der Biothananlage durchgeführt werden) zeichnen sich durch eine regelmäßige Substratzuführung mit Entnahme einer entsprechenden Menge Gärrest aus. Dies sorgt für eine größtenteils kontinuierliche Biogasproduktion mit gleichbleibender Qualität. Fermenter von diskontinuierlichen Verfahren werden befüllt und anschließend für 3-4 Wochen verschlossen. Über diesen Zeitraum wird das Substrat mit Perkolat bzw. Prozesswasser berieselt. Anschließend werden die Fermenter vollständig entleert und neu befüllt. Die folgende Tabelle 04 zeigt die Vor- und Nachteile von Trocken- und Nassvergärungsverfahren.

Tabelle 04: Vor- und Nachteile trockener und nasser Vergärungsverfahren

Die folgende Abbildung 03 unternimmt den Versuch einer weiteren Systematisierung nach Prozess- und Betriebsführung.

Abb. 05: Typisierung der Vergärung nach deren Technik und Prozess- und Betriebsführung

## Reaktortypen Fermenter

Je nach zu vergärenden Materialien gibt es unterschiedliche Reaktortypen, die zum Einsatz kommen. Im folgenden Abschnitt werden die drei wichtigsten Typen und ihr Verfahren erklärt.

Abb. 06: Reaktortypen

## DRANCO-Verfahren (Nassfermentation Biothan GmbH)

Beim DRANCO-Verfahren (Organic Waste Systems – OWS) wird zur Aufbereitung von Bioabfällen zunächst eine manuelle Störstoffabtrennung vorgenommen. Anschließend erfolgt eine Zerkleinerung und Siebung auf Korngrößen < 40mm. Vor der Vergärungsstufe kann eine Kugelmühle platziert sein, mit der die zu vergärenden Restabfälle aufbereitet werden. Der Siebunterlauf gelangt nach einer Fe-Scheidung in eine Dosiereinheit, mit deren Hilfe Anlieferungsschwankungen aufgefangen werden. Eine

gezielte aerobe Hydrolyse findet nicht statt. In einem Mischer wird das Material auf einen Trockensubstanzgehalt von ca. 25–35% angemaischt und mit Hilfe einer Kolbenpumpe mit Vorpresseinrichtung in den Reaktor eingetragen. Die Vergärung wird ausschließlich im thermophilen Temperaturbereich betrieben, wobei die Erwärmung des Materials durch die Zugabe von Sattedampf erfolgt. Die Reaktoren werden als stehende zylindrische Behälter in Betonbauweise erstellt. Die Entnahme des Materials erfolgt am konisch ausgeführten Boden des Reaktors, während die angemaischten Abfälle und das rezirkulierte Material am Reaktorkopf zugeführt werden, sodass das Material den Reaktor nach unten durchströmt. Die hydraulische Verweilzeit beträgt etwa 20–30 Tage. Durch den großen Umwälzstrom bei dem Substrateintrag wird der Reaktorinhalt innerhalb zweier Arbeitstage umgewälzt, es liegt somit eine quasi-volldurchmischte Betriebsweise vor. Die Entwässerung des Gärrestes erfolgt mittels Siebschneckenpressen unter Zugabe von Flockungshilfsmitteln.

#### VALORGA-Verfahren

Das VALORGA-Verfahren weist in der Aufbereitung der Abfälle Ähnlichkeiten mit dem DRANCO-Verfahren auf. Die Abfälle werden zunächst zerkleinert, auf eine Korngröße < 40mm abgesiebt und die Feinfraktion dem Reaktor nach Anmischung auf TS-Gehalte von 25 bis 35% mit einer Feststoffpumpe in den Reaktor gefördert. Die Erwärmung des Gärsubstrates erfolgt sowohl durch die Erwärmung des Prozesswassers für die Anmischung als auch durch Zudosierung von Sattedampf in den Reaktor. Ausgeführt sind die Reaktoren als stehende zylindrische Betonbehälter. Eine Besonderheit des Reaktors stellt die Mittelwand im Reaktor dar, die über etwa 2/3 des Reaktordurchmessers verläuft. Sie trennt den Ein- und Austrittsbereich des Gärmaterials, wodurch Kurzschlussströmungen vermieden werden sollen. Das Gärmaterial wird somit zu einer horizontalen kreisförmigen Förderrichtung gezwungen, sodass das System als Pfropfenstromverfahren angesehen werden kann. Die Durchmischung des Reaktorinhaltes erfolgt ohne mechanische Einbauten durch ein pneumatisches System. Periodisch wird Biogas im Kreislauf unter einem Druck von bis zu ca. 10 bar über Düsen am Reaktorboden vertikal eingepresst und auf diese Weise eine effektive Durchmischung angestrebt. Die Betriebsweise erfolgt wahlweise mesophil oder thermophil, mit hydraulischen Verweilzeiten zwischen etwa 14 und 28 Tagen. Ohne den Einsatz mechanischer Fördereinrichtungen werden die Gärreststoffe mittels Schwerkraft ausgetragen. Die Entwässerung ist zweistufig und besteht zumeist aus Siebschnecken- und Bandfilterpresse. Bei Bedarf wird eine Abscheidung feiner Inertstoffe aus dem Prozesswasser durch Hydrozyklone (Sandabscheidung) und Zentrifugen durchgeführt.

#### KOMPOGAS-Verfahren (Trockenfermentation Biothan GmbH)

Bioabfälle werden bei dem KOMPOGAS-Verfahren vorzerkleinert bzw. auf Korngrößen < ca. 80 mm gesiebt, einer Fe-Scheidung unterzogen und in einer zweiten Zerkleinerungsstufe mit einer Schneidscheibenmühle auf eine Korngrößen < 40mm konfektioniert und in einem Zwischenbunker gespeichert, wie in dargestellt. Die Speicherkapazität ist auf einen Zeitraum von ca. 3 Tagen ausgelegt und ermöglicht eine kontinuierliche Beschickung der Vergärung auch über das Wochenende. Eine gezielte aerobe Hydrolyse wird nicht vorgenommen. Die aufbereiteten Bioabfälle werden mit Prozesswasser auf einen Trockensubstanzgehalt zwischen ca. 25 und 30% angemaischt und mittels Feststoffpumpen quasi-kontinuierlich in den Reaktor eingetragen. Der liegende Reaktor arbeitet nach dem Pfropfenstromprinzip. Die anaerobe Behandlung des Substrates erfolgt ausschließlich bei thermophilen Temperaturen zwischen ca. 50 und 55°C. Der Reaktorzulauf wird in Doppelrohr-Wärmeübertragern erwärmt, während die Abstrahlungsverluste über eine Reaktorbeheizung ausgeglichen werden. Die Verweilzeit im Reaktor beträgt etwa 15–20 Tage. Der Reaktorablauf wird teilweise zur Animpfung des Inputmaterials mit aktiver Biomasse rückgeführt. Das überschüssige Material wird in einer zweistufigen Entwässerung mittels Siebschneckenpresse und Dekanter behandelt und der Dekanterablauf teilweise zur Anmischung der Abfälle genutzt. Die weitergehende Aufreinigung des Prozesswassers erfolgt in der Regel unter Zuhilfenahme von Flockungshilfsmitteln, wodurch der Trockensubstanzgehalt des Wassers auf unter 2% reduziert wird.

### 3. Die Kompostierung

#### Abschnitt (C) Kompostierung im 360°-Rundgang

##### Kompostierung - aerober Abbau

Unter der Kompostierung versteht man den Abbau organischer Substanzen unter Einfluss von Sauerstoff durch heterotrophe Mikroorganismen. Im Unterschied zum anaeroben Abbau findet kein Energiegewinn statt. Unterteilt werden die Kompostierungsverfahren nach der Bewegung des Rottegutes. Bei kontinuierlicher Bewegung spricht man von dynamischen Verfahren, wohingegen bei semidynamischen Verfahren das Rottegut nur in Zeitabständen umgesetzt wird.

Die Kompostierungsverfahren werden u.a. durch die Aktivität der Mikroorganismen beeinflusst. Diese benötigen optimale Lebensbedingungen, wie ein ausreichendes Nährstoffangebot, die Versorgung mit Sauerstoff und Wasser sowie ein entsprechendes Umgebungsmilieu. Für den Rotteverlauf ist damit auch die Struktur des Rottegutes entscheidend, da ein ausreichendes Luftporenvolumen für genügen Sauerstoff gewährleistet sein muss. Sind nicht genügend Poren vorhanden, können die Mikroorganismen mit zu wenig Sauerstoff nicht optimal arbeiten. Des Weiteren gilt der Wassergehalt als entscheidender Parameter, da die Mikroorganismen ihre Nährstoffe nur in gelöster Form aufnehmen können. Er sollte einen Mindestgehalt von 40 Gew. % während der Intensivrotte nicht unter- und einen Höchstgehalt von 65 Gew. % nicht überschreiten. Niedrigere Wassergehalte hemmen die Aktivität, höhere grenzen das für die Sauerstoffzufuhr verfügbare Luftporenvolumen zu sehr ein. Aus den vorgenannten Parametern ergibt sich, dass die Intensivrotte der maßgebliche Verfahrensschritt in einem Kompostwerk und die Einhaltung dieser Randbedingungen Voraussetzung für einen optimalen Rotteverlauf ist.

##### Intensivrotte

Erste, thermophile Phase(n) des mikrobiellen Ab- bzw. Umbaus (mikrobieller Abbau) unter aeroben Bedingungen mit hohem Sauerstoffbedarf. Die Intensivrotte dauert zwischen 7 und 14 Tagen und hat zum Ziel, in dieser Zeit einen maximalen Abbau und gleichzeitig die Hygienisierung des Materials zu erreichen. Dafür müssen über mehrere Tage Temperaturen von über 60 °C erreicht werden.

Anschließend an die Hauptrotte erfolgt die Nachrottezeit von 4–6 Wochen. Durch sie wird der Kompost stabilisiert. Die Nachrotte erfolgt in Mieten, wobei die biologische Aktivität abnimmt und in Folge die Temperatur absinkt.

Die Temperatur im Mietenkörper ist rückläufig, da mit zunehmendem Abbau die chemisch gebundene Energie geringer wird. Der Abbaugrad kann somit mit dem Temperaturverlauf abgeschätzt werden.

##### Kompost

Kompost ist das Endprodukt aerober Behandlungsverfahren zum Abbau organischer Substanz. Auch bei anaeroben Behandlungsverfahren organischer Abfallstoffe wird das entstehende feste Zwischenprodukt i.d.R. aerob weiterbehandelt, sodass letztendlich ebenfalls Kompost entsteht.

Für die Vermarktung von Kompost sind folgende Qualitätskriterien vorausgesetzt und sicherzustellen:

- hygienische Unbedenklichkeit
- weitgehende Freiheit von Verunreinigungen
- niedriger Gehalt an potentiellen Schadstoffen
- ausgewogene Gehalte an Nährstoffen (in Abhängigkeit vom Einsatzbereich im Pflanzenbau)
- gleichbleibende Produktqualität
- Lagerfähigkeit

Das Gütesicherungssystem der Bundesgütegemeinschaft Kompost (BGK) e.V. überwacht die Einhaltung der einzelnen Qualitätskriterien durch:

- kontinuierliche und unabhängige Fremdüberwachung der Qualität
- Eigenüberwachung der Kompostproduktion durch den Betrieb
- Güterichtlinien zur Standardisierung der Produktqualität
- Deklarationspflicht von Komposteigenschaften und -inhaltsstoffen

- Empfehlungen als Basis für die fachgerechte Anwendung

Komposte, die diesen Anforderungen nicht genügen, haben am Markt kaum Chancen; ihre Einhaltung ist daher aus Gründen der Entsorgungssicherheit zwingend.

Wenn Sie mehr über die Prozesse der Kompostierung erfahren möchten, können Sie anschließend den virtuellen Rundgang über die Kompostierungsanlage Umpferstedt bei Weimar besuchen. Hier werden alle Schritte hin zu einem gütegesicherten Kompost detailliert erläutert.

📄 <https://360-degree.education/Umpferstedt/>

#### 4. Biogas

##### Abschnitt (D) Gasaufbereitung im 360°-Rundgang

Was ist Biogas?

Die Hauptbestandteile von Biogas sind Methan (50–75 Vol.-%) und Kohlenstoffdioxid (25–50 Vol.-%). In sehr kleinen Mengen sind auch Wasserdampf, Sauerstoff, Stickstoff, Ammoniak, Wasserstoff und Schwefelwasserstoff vertreten. Das Methan im Faulgas stellt den Energieträger dar, sodass sich für Biogas ein Energiegehalt von 5,0 – 7,5 kWh/m<sup>3</sup> Biogas ergibt. Es handelt sich um ein ungiftiges, geruchloses und brennbares Gas.

Bei Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) und Methan (CH<sub>4</sub>) handelt es sich um farb- und geruchlose Gase. Beide zählen zu den bedeutendsten Treibhausgasen. Methan ist im Gegensatz zu Kohlenstoffdioxid hochentzündlich.

Schwefelwasserstoff ist unter dem Aspekt des Arbeitsschutzes besonders zu betrachten. Noch immer verursacht Schwefelwasserstoff tödliche Arbeitsunfälle, die vermeidbar gewesen wären. Es handelt sich um ein farbloses, leicht entzündliches und hoch giftiges Gas. Zu erkennen ist es schon in sehr geringen Konzentrationen an seinem starken Geruch nach verfaulten Eiern. Bei steigender Konzentration wird es schwerer das Gas zu erkennen, da die Geruchsrezeptoren betäubt werden. Das Gas hat eine höhere Dichte als Luft und sammelt sich am Boden. Besondere Vorsicht gilt also in geschlossenen Bereichen, wo das Gas nicht entweichen kann. Es sollte immer ein Schwefelwasserstoffdetektor mitgeführt werden, der bei Anzeichen von Schwefelwasserstoff Alarm schlägt.

##### Exkurs BHKW / Verstromung

Das produzierte Biogas wird in Deutschland zu großen Teilen direkt am Entstehungsort verstromt. Die Stromerzeugung beruht auf dem Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK). Bei der KWK wird die Energie gleichzeitig in mechanische bzw. elektrische und nutzbare Wärme umgewandelt. Zur Verstromung vor Ort werden in der Regel Blockheizkraftwerke (BHKW) verwendet. Diese bestehen aus Verbrennungsmotor und Generator. Der Motor wird mit Biogas betrieben, welcher den Generator antreibt und somit Strom erzeugt wird. Für die Verstromung von Biogas werden insbesondere Gas-Otto-Motoren und Zündstrahlmotoren eingesetzt. Die parallel zur Stromerzeugung produzierte Wärme wird zur Beheizung vor Ort genutzt oder in die zu versorgenden Objekte bzw. ins Nahwärmenetz eingespeist.

#### 5. Naturschutz & Geschichte

##### Abschnitt (E) Ausgleichs- und Naturschutzmaßnahmen und Historie (F) im 360°-Rundgang

Jedes große Bauprojekt, wie auch die Biothan-Biogasanlage, greift stark in das vorhandene Ökosystem ein. Deshalb müssen bei den Planungen und im Bau immer Ausgleichs- und Naturschutzmaßnahmen berücksichtigt werden, um die durch die Anlage anschließend versiegelten Flächen zu kompensieren und den Artenschutz zu sichern. Dazu werden externe Planungsbüros hinzugezogen, die u.a. zusammen mit Biologen die vorhandene Flora und Fauna untersuchen und Vorschläge erarbeiten, wie vorhandene Arten ggf. umgesiedelt und neue Rückzugsorte geschaffen werden können. Dabei spielt auch die Vorgeschichte des Geländes eine entscheidende Rolle. Im Fall der Biothan Biogasanlage

handelte es sich zuvor um einen Militärstützpunkt der USA mit dort stationierten, mobilen Abschussrampen für Raketen.

Im 360°-Rundgang erhalten Sie direkten Einblick in die Arbeit der Biologen. Es gibt Informationen zu den kartografierten Insekten, Tieren und Pflanzen und Einblicke in das entworfene Pflegekonzept und die Umsetzungskosten der geplanten Maßnahmen. Nach Ende des Baus und im regulären Betrieb der Anlage müssen zudem regelmäßige Kontrollen durchgeführt werden, wie sich die Flora und Fauna entwickelt, um ggf. steuernd einzugreifen und einer Verwaldung und Verbuschung entgegenzuwirken.

## 01 – Start

### 1/2 – Einleitung & Anleitung

Herzlich Willkommen auf der Vergärungsanlage der Firma Biothan GmbH bei Fulda, einer der modernsten Biogasanlagen Deutschlands. Hier werden aus Biomüll, Essensresten, Supermarktabfällen und Gülle Biogas produziert. Wie das alles funktioniert, erfahren Sie hier im 360°-Rundgang.

Mit dem Rundgang laden wir Sie ein, die Biogasanlage in Großenlöder bei Fulda zu erkunden und Einblicke in ihre Arbeit zu erhalten. Mit Hilfe von 50 Wegepunkten führt der Rundgang in sechs themenbasierten Abschnitten über das Gelände. Dabei führt er Sie an den Bereichen der Nass- und Trockenfermentation, der Kompostierung und der Gasaufbereitung, sowie der Gaseinspeisung vorbei. Zudem finden Sie weitere Informationen über die Historie und die Ausgleichsmaßnahmen in Großenlöder.

Die Navigation durch den Rundgang erfolgt über Ihre Maus oder Ihr Touchpad. Mit einem haltenden und bewegenden Klick in ein Panorama oder mittels Pfeiltasten können Sie sich in alle Richtungen umschauen. Über das Mausrad kann die Ansicht vergrößert oder verkleinert werden. Mit Hilfe der Wegpunkte werden Sie über das Gelände geleitet und folgen dem Rundgang über die blinkenden weißen Positionsfelder oder Pfeile. An jedem der Punkte sind Informationen in Form von Texten, Bildern oder Videos abrufbar, indem Sie auf die entsprechenden Piktogramme klicken. Gibt es mehrere Informationen, sind diese durchnummeriert (z.B. 1/3).

Im Bereich unten links befinden sich Navigationshilfen. Diese beinhalten ein Impressum mit Datenschutzerklärung und Quellenangaben (Piktogramm: Person), einen Überblick über die einzelnen Standorte auf dem Gelände (6 kleine Quadrate), eine Online-Karte zur Orientierung (Googlemarker), ein Luftbild (Grundriss) mit den einzelnen Wegepunkten, die Sie von dort aus auch auswählen können und ein Glossar (Piktogramm: i), in dem Sie die wichtigsten Fachbegriffe nachschlagen können.

Oben rechts haben Sie zudem die Möglichkeit mit Hilfe des Pull-down Menüs den Ton ein- und auszuschalten und in den Vollbildmodus zu wechseln. Die Videosequenzen (Drohnenflüge) können Sie über das dann erscheinende Vorspulen Piktogramm unten rechts überspringen.

Und nun wünschen wir Ihnen viel Spaß beim Erkunden der Anlage!

### 2/2 – Feuerlöschteich / Regenwasserspeicher

Der Regenwasserspeicher sammelt unbelastete Niederschlagsabwässer, wie Regen und Tauwasser. Gleichzeitig fungiert der Speicher als Feuerlöschteich. Niederschlagswasser aus verschmutzten Bereichen dient als Anmaischwasser in den Gärbehältern. [1]

Die sich in den eckigen Klammern befindenden Zahlen [1] beziehen sich auf die verwendete/n Literatur / Quellen, die im Impressum zu finden sind.

## 02 – Die Biothan GmbH

### 1/3 – Die Biothan GmbH

Im Landkreis Fulda betreibt die Biothan GmbH eine in ihrer Art einmalige Bio-Erdgas-Anlage, in der aus regionalen organischen Reststoffen Biomethan (Bioerdgas) erzeugt wird. Das Unternehmen ist der RhönEnergie Fulda Gruppe zugehörig, welche zu den wenigen Energieproduzenten in Deutschland gehört, die solch eine Anlage betreiben.

Die Besonderheit der Anlage liegt im Betrieb und in der Energieerzeugung mit dem Verzicht auf nachwachsende Rohstoffe. Es werden ausschließliche organische Reststoffe verwendet. Somit besteht keine Konkurrenz zu Nahrungsmittel- bzw. Futterpflanzen und landwirtschaftlichen Flächen, was für höhere Pachtpreise für Landwirte sorgen würde. Darüber hinaus wird durch die Produktion von Biomethan die Abhängigkeit von Gasimporten verringert. Das Konzept der Biothan GmbH unterstützt die Energiewende auf lokaler Ebene.

Nach der Erneuerbare-Energien-Richtlinie der Europäischen Union (Richtlinie 2009/28 EG) versteht man unter „Biomasse“ den biologisch abbaubaren Teil von Erzeugnissen, Abfällen und Reststoffen der Landwirtschaft mit biologischem Ursprung (einschließlich pflanzlicher und tierischer Stoffe), der Forstwirtschaft und damit verbundener Wirtschaftszweige einschließlich der Fischerei und der Aquakultur sowie den biologisch abbaubaren Teil von Abfällen aus Industrie und Haushalten“.

Es handelt sich also um natürliche organische Stoffe, zu denen nachwachsende Rohstoffe (z.B. Mais) und biogene Reststoffe, wie der Inhalte der braunen Tonne, Nahrungsmittelreste und Fette aus dem Handel oder der Gastronomie sowie landwirtschaftliche Reststoffe wie Gülle gehören. Die Nutzung der Biomasse ermöglicht durch ihre Wetterunabhängigkeit und damit Berechenbarkeit eine zuverlässige Energieversorgung. Über die Vergärung in einer Biogasanlage lässt sich der Energiegehalt der organischen Stoffe nutzen. In diesem Fall geht es insbesondere um biogene Reststoffe, die in der Anlage verwendet werden. Die enthaltene Energie und die Nährstoffe werden zu 100 % genutzt und somit eine Verschwendung von Ressourcen verhindert. Es erfolgt eine Umwandlung in die Wertstoffe Bio-Erdgas und Düngeprodukte.

Auf der Biothan-Anlage wird das entstehende Biogas sofort zu Bio-Erdgas (Biomethan) veredelt. Dieses kommt dann als Heiz- und Antriebsenergie zum Einsatz und kann in das Erdgas-Netz eingespeist werden. Damit ist es an jeder angeschlossenen Abnahmestelle verfügbar. Konventionelle Biogasanlagen hingegen verstromen das Gas vor Ort und verwenden die anfallende Wärme oft nicht. Die Produktion von Biomethan ist also sehr energieeffizient. [1]

### 2/3 – Wertstoffhof

Auf der Anlage befindet sich der Wertstoffhof des Zweckverbandes Abfallsammlung für den Landkreis Fulda und wird im Auftrag der Gemeinde Großenlütder betrieben. Es können Altpapier, Altmetall, elektrische/elektronische Kleingeräte, Leuchtstofflampen, Grünabfälle, Altglas, Altholz (aus Bau-, Umbau- und Renovierungsmaßnahmen), mineralischer Bauschutt und unverwertbare Baurestabfälle angeliefert werden. In einigen Fällen fallen dabei auch Gebühren bei der Abgabe an.

Am Wertstoffhof kann RAL-zertifizierter und qualitätsgeprüfter Kompost der Anlage erworben werden. [1]

### 3/3 – Desinfektionsbecken

Pathogene Keime stellen ein Problem dar, da sie Erkrankungen auslösen können. Zur Vermeidung von Keimeintrag und -austrag müssen die ankommenden und abfahrenden LKWs das Desinfektionsbecken benutzen. Bei der Durchfahrt werden dabei die Reifen desinfiziert. [3]



### 03 – Verwaltungsgebäude und Waage

#### 1/1 – Verwaltungsgebäude und Waage

Am Biothan – Standort besichtigen zahlreiche Besuchendengruppen eine der weltweit modernsten Anlagen zur Verarbeitung organischer Reststoffe. Im Verwaltungsgebäude ist dafür neben den Büroräumen der Mitarbeitenden auch ein Seminarraum angelegt. [1]

Direkt neben dem Eingang befindet sich auch ein Raum zur Bedienung und Überwachung der Waagen. Um die Stoffströme der Anlage zu verfolgen und nachvollziehen zu können, fahren die LKWs bei der Ankunft und Abfahrt über die Waage, sodass die Differenz und damit die Inputmenge bzw. die Biomasse-mengen bestimmt werden können. [3]

### 04 – Auswahl der Teilrundgänge

#### 1/1 – Auswahl der Teilrundgänge

An diesem Punkt können Sie die einzelnen Abschnitte der Anlage auswählen und in getrennten Rundgängen besichtigen.

Zur Verfügung stehen die Bereiche der Nassfermentation (blau = A), Trockenfermentation (orange = B) und Kompostierung (braun = C), sowie Informationen zur Gasaufbereitung und -einspeisung (rosa = D). Darüber hinaus werden die Besonderheiten des Standortes bezogen auf die Ausgleichsmaßnahmen (grün = E) und seine Historie (schwarz = F) dargestellt.

#### Alternativtext für Moodle-Teilrundgänge

##### 1/1 – Auswahl der Teilrundgänge

An diesem Punkt können Sie die einzelnen Abschnitte der Anlage auswählen und in getrennten Rundgängen besichtigen.

Auswählbar ist hier erst einmal nur der erste Abschnitt der Nassfermentation (blau = A).

Die weiteren Abschnitte der Trockenfermentation (orange = B), Kompostierung (braun = C), Gasaufbereitung und -einspeisung (rosa = D), Ausgleichsmaßnahmen (grün = E) und Historie (schwarz = F) werden nach Beendigung der Quizfragen nach und nach im SDG-Campus freigeschaltet.

Folgen Sie vor der Auswahl des ersten Abschnitts dem blinkenden Punkt rechts zu den Biofilter- und den Photovoltaikanlagen, die für alle Rundgänge gleichermaßen relevant sind.

#### 1/1 – Ende Nassfermentation

Mit Beendigung des ersten Abschnitts zur Nassfermentation (blau = A), können Sie nun zum SDG-Campus zurückkehren und die Multiple Choice-Fragen beantworten. Nach erfolgreichem Quiz wird daraufhin der zweite Abschnitt zur Trockenfermentation (orange = B) freigeschaltet.

Sie können dieses Fenster nun schließen. Der nächste Abschnitt wird über einen separaten Link aufgerufen.

#### 1/1 – Auswahl der Teilrundgänge (350x280)

Hier können Sie nun in den Abschnitt der Trockenfermentation (orange = B) starten.

Nach Beendigung dieses Abschnitts, beantworten Sie wieder die Multiple Choice-Fragen im SDG-Campus, um den nächsten Abschnitt der Kompostierung (braun = C) freizuschalten.

### 05 – Biofilteranlagen

#### 1/1 – Biofilteranlagen

Die Biofilter werden zur Reinigung der Abluft eingesetzt und dienen damit dem Emissionsschutz. Dabei wird die Geruchsbelastung maßgeblich verringert. Auf dem Trägermaterial des Filters siedeln sich Mikroorganismen an, welchen die Geruchsstoffe als Nährstoffe dienen. Die bekanntesten Biofilter sind Kompost- und Rindenmulchfilter. [8 S.G-3]

Auf der Anlage gibt es zwei getrennte Filter für die Abluft der Bereiche der Nass- und Trockenfermentation, sowie der nachgelagerten Kompostierung. Auch Hallenluft wird gefiltert.

Darüber hinaus haben die Biofilter einen vorgeschalteten sauren Wäscher für hochbelastete Abluftströme (z.B. von Rottetrommeln, Mietenabluft aus Saugbelüftungen). Über eine Befeuchtungstrecke werden Geruchsstoffe ausgewaschen, was konzentrationsmindernd wirkt. [1][4]

## 06 – Photovoltaikanlagen

### 1/1 – Photovoltaikanlagen

Direkt auf dem Gelände wird auf drei Dachflächen und einer großen Freifläche mit großen Photovoltaik-Anlagen regenerativer Strom erzeugt. Die gewonnene Solarenergie wird direkt für die Prozesse auf der Biothan-Anlage genutzt. Somit kann der Eigenstromverbrauch der Anlage größtenteils abgedeckt und zusätzlich erzeugter Strom ins Netz eingespeist werden. [1]

## A1 – Start Nassfermentation

### 1/1 – Die Nassfermentation

Bei der Nassfermentation handelt es sich um ein kontinuierliches Vergärungsverfahren mit einem Trockensubstanzgehalt < 15 Gew.-% im Fermenter. Verwertet werden Marktückläufer (abgelaufene, verpackte Lebensmittel), Biertreber, Altbrot/Backabfälle, Lebensmittelfehlchargen, Speisereste und Gülle [2].

Die Nassvergärung umfasst eine Behandlungskapazität von 26.000 Mg/a Gewerbeabfällen und 6.500 Mg/a Gülle. Daraus entstehen 3.600 Mg/a Biomethan und 27.000 Mg/a flüssige Gärprodukte [1].

Das Fließschema zeigt die einzelnen Schritte im Prozess der Nassfermentation. In den folgenden Wegpunkten werden diese detailliert erläutert.

## A2 – Anlieferung organischer Reststoffe

### 1/1 – Anlieferung organischer Reststoffe

In der Annahmehalle der Nassfermentation werden organische Reststoffe angenommen, die von verschiedenen Anlieferern stammen. Die Anlieferung kann über mehrere Wege ablaufen, das Material wird am Ende in der unterirdischen Mischgrube zusammengeführt. Rohgülle kann direkt über einen Rohranschluss eingeleitet werden. Trockene Reststoffe wie Treber (Rückstände des Braumalzes bei der Bierherstellung) oder Altbrot, welche direkt eingetragen werden können, können im Flachbunker gelagert und bei Bedarf über den Schüttgutrichter zugeführt werden. Alle weiteren Reststoffe werden von LKWs direkt in die Annahmemulde / Aufnahmebunker gekippt [3].

Fließschema: Annahme organischer Reststoffe

## A3 – Rohgülleannahme & Schüttgutrichter

### 1/2 – Schüttgutrichter / Rohgülleanschluss / Senkrechtührwerk

Über den Schüttgutrichter können zerkleinerte Lebensmittelreste ohne Störstoffe (Kleie und andere feine Materialien) und flüssige organische Gewerbeabfälle in den Vorlagen- und Mischbehälter eingeliefert werden.

Die Rohgülle wird zumeist außerhalb des Gebäudes direkt in den Rohgüllelagertank angeliefert. Aber auch hier in der Halle kann sie dem Vorlagen- und Mischbehälter über Rohgülleanschluss zugeführt werden.

Der Mischbehälter unterhalb des Bodengitters wird durch einen Senkrechtührwerk kontinuierlich durchmischt.

### 2/2 – Warnsignale

Zentral in der Nassfermentationshalle befindet sich eine Warnsignalampel (Ton- und Lichtsignale), die die Mitarbeitenden über eine zu hohe Konzentration an giftigen Gasen in der Raumluft bzw. im Tank informiert.

Angezeigt werden Schwefelwasserstoff ( $\text{H}_2\text{S}$ ), Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ) und Methan ( $\text{CH}_4$ ).

#### A4 – Annahmemulde

##### 1/3 – Annahmemulde / Aufnahmebunker

In die Annahmemulde werden alle Lebensmittelreste mit Störstoffen eingeliefert. Die Mulde oder auch Bunker genannt, besteht aus Edelstahl und fasst 100 m<sup>3</sup> (2 LKW-Ladungen). Dort wird das Material über vier Querförderschnecken, eine Trogförderschnecke und eine Schrägförderschnecke von links nach rechts und weiter nach oben zur Weiterverarbeitung in der Hammermühle transportiert [2].

##### 2/3 – Lebensmittel mit Störstoffen

Die angelieferten Marktrückläufer (abgelaufene, verdorbene Lebensmittel) und Lebensmittelfehlchargen sind zumeist noch original verpackt (in Pappe, Papier und Plastik). Sie werden mit samt ihrer Verpackung in die Annahmemulde gegeben.

##### 3/3 – Prozessüberwachung Substratannahme

Kontrolliert und gesteuert werden die Substratannahme und die anschließenden Prozesse in der Nassfermentationshalle über eine Schalttafel. Hier können unter anderem der Druck, der Durchfluss, aber auch die Temperatur und der Füllstand im Mischbehälter kontrolliert werden.

Auch die Funktion der Siebung, der Pasteurisierung, des Heizwassers und der Trennmühle können hier überprüft und eingestellt werden.

#### A5 – Mischbehälter

##### 1/1 – Mischbehälter & Exzentrerschnecke

Hier ist der Mischbehälter unterhalb der Annahmemulde zu sehen. Der Edelstahltank fasst 100 m<sup>3</sup> und wird durch einen Senkrechtührwerk, das oben neben dem Rohgülleanschluss zu sehen ist, kontinuierlich durchmischt. Zudem verfügt er über eine Abluftabsaugung.

Hier kommen alle ankommenden und aufbereiteten (nach der Entfernung der Störstoffe) organischen Reststoffe zusammen. Das Volumen entspricht dabei einer Tagesration. Die Dosierung zum nächsten Prozessschritt, der Aneorobisierung, erfolgt über eine Exzentrerschneckenpumpe. Diese eignet sich besonders für Medien mit hohem Feststoffgehalt (> 10 Gew.-% Trockensubstanz) und oder hoher Viskosität [2].

#### A6 – Trennverfahren

##### 1/3 – Trennverfahren

In der Hammermühle wird das angelieferte Material wenn nötig automatisch maschinell entpackt und in der Trommel über ein 12 mm Lochsieb vorgesiebt. Die mechanische Entpackung erfolgt über stumpfe Schlegel. Zur Verdünnung werden Rezirkulate beigemischt, bevor das Material der Nassfermentation (Gewerbeabfälle und Gülle) über ein Rohr in den Mischbehälter weitergeleitet wird. [2]

In der Rohrleitung erfolgt eine 0,5 mm Absiebung über Filtersiebe. Das zweistufige Siebverfahren trennt Störstoffe wie z.B. Kunststoffteile ab [1]. Die Hammermühle ist anfällig für Störstoffe und muss bis zu 4-mal in der Woche geöffnet werden [3]. Nach ca. 6 Monaten bzw. ca. 6000 Mg Durchsatz sind die Schlegel abgenutzt und müssen getauscht werden. [2]

##### 2/3 – Feinabsiebung

Am Ende des Prozesses der Nassfermentation werden die Gärprodukte in die Annahmehalle zurückgeführt und durchlaufen eine nachgeschaltete Siebung auf 3 mm zur Fremdstoffabscheidung. Die Siebtechnik der Anlage erreicht einen Abscheidegrad von 0,04 % Kunststoff in der Trockenmasse was deutlich unter den aktuellen und zukünftigen Grenzwerten liegt. Die separierten Störstoffe werden hier in den Container der Annahmehalle geleitet und als Ersatzbrennstoffe energetisch verwertet. [2]

### 3/3 – Pasteurisierung & Hygienisierung

Nach der Feinabsiebung werden die Gärreste aus dem Nachgärer zur nachgeschalteten Pasteurisierung geleitet. Hier erfolgt eine Hygienisierung bevor die Gärprodukte auf die Lager verteilt werden. Dabei handelt es sich um eine Vollstrom-Endhygienisierung in drei Behältern in Parallelschaltung. Das Material muss dazu für mindestens eine Stunde bei mindestens 70 °C gehalten werden. Die Hygienisierung ist für das spätere Ausbringen der Gärreste notwendig. [2]

### A7 – Ausgesiebtetes Material

#### 1/2 – Entwässerung der Reststoffe

Die Reststoffe der Hammermühle durchlaufen eine Pressschnecke (rotes Rohr) zur Entwässerung und werden anschließend hier im Container gelagert.

Zusätzlich werden hier die feinen Störpartikel der Feinsabsiebung der Vergärstufe dem Container zugeführt (silbernes Rohr) [3].

#### 2/2 – Verwertung der Reststoffe

Die aus der Hammermühle abgetrennten Störstoffe werden als Ersatzbrennstoff energetisch verwertet (Heizwert ca. 20500 kJ/kg) [2]. Aus diesem Grund ist auch die Entwässerung mithilfe einer Pressschnecke bedeutend.

Jährlich fallen ca. 1.460 Mg/a Störstoffe an [1]. Zum Teil nehmen Anlieferer auch gleich Anteile der Reststoffe für den Eigenbedarf mit, da die Biothan selbst keinen Abfall für die Heizkesselanlage verwendet, sondern dabei Hackschnitzel zum Einsatz kommen. Der Rest wird von Firmen zur Verbrennung abgeholt [3].

### A8 – Rohgütlelagertank

#### 1/1 – Rohgütlelagertank

Hinter der Nassfermentationshalle befindet sich der Rohgütlelagertank. Die Rohgülle kann somit in beliebig gewünschten Mengen dem Prozess zugeführt werden [1].

Der Rohgütlelagertank besteht aus Ort beton und verfügt über ein Fassungsvermögen von 500 m<sup>3</sup>. Er wird über ein Tauchmotorrührwerk und ein Senkrecht rührwerk durchmischt. Die Rohgülle kann über zwei Stützen an der Annahmeplatte eingelassen werden [2]. In der Annahmehalle selber gibt es einen Rohranschluss der die Rohgülle auch direkt in die Vorlagebehälter führen kann.

### A9 – Vorlagebehälter Außen

#### 1/1 – Vorlagebehälter Außen

Auf der Anlage sind zwei Vorlagebehälter aus Ort beton mit je 400 m<sup>3</sup> Fassungsvermögen vorhanden. Sie ermöglichen eine kontinuierliche Prozessführung, da sie für den Ausgleich und die Speicherung des Materials über mehrere Tage sorgen. Bei einer Bestückung von Montag bis Freitag ist dadurch auch die Grundlage für den anaeroben Abbau in den Fermentern am Wochenende gesichert. Man spricht dadurch auch von Speichern.

Die Vorlagebehälter fungieren als Sedimentationsbecken und sorgen für das Absinken von Sand und schweren Störstoffen. Darüber hinaus beginnt bereits die Hydrolyse des Materials. Die Behälter sind in der Regel in Reihe geschaltet, können aber auch parallel betrieben werden [2]. In diesem Prozessabschnitt findet eine erste Gasbildung statt, sodass die Vorlagenbehälter an das Gassystem angeschlossen sind [3].

Fließschema: Speicherung und Hydrolyse

#### A10 – Vorlagebehälter Innen

##### 1/1 – Vorlagebehälter Innen

Die Vorlagenbehälter müssen einmal im Jahr geleert und gereinigt werden. Dabei wird die Wandheizung sichtbar, welche fakultativ eingesetzt werden kann. Des Weiteren ist eine Trennwand von 1 m Höhe, das Senkrechtrührwerk und der Schutzanstrich der Innenwände vor Betonkorrosion zu erkennen.

Die folgenden Abbildungen zeigen das Innere des entleerten Behälters mit technischen Erklärungen des Aufbaus. Das letzte Bild zeigt den Behälter in gefülltem Zustand.

#### A11 – Orientierungspunkt Gärbehälter

##### 1/1 – Orientierungspunkt Gärbehälter

Zur besseren Orientierung auf dem Gelände ist an dieser Stelle ein Orientierungspunkt ohne weitere Informationen eingesetzt. Aus dem Inneren des Vorlagenbehälters gelangt man so zum Gärbehälter und dem Anaerobbehälter.

#### A12 – Fermenter / Anaerobbehälter

##### 1/1 – Fermenter

Über Pumpen gelangt das Material nach der Sedimentation zunächst in den ersten Fermenter links und anschließend in den zweiten Fermenter rechts (Nachgärer).

Zwischen den Fermentern befinden sich zwei Maschinencontainer mit technischen Geräten zur Gasanalyse und zur Überwachung der Pumpen und Heizungen [2].

Fließschema: Vergärungsstufe

#### A13 – Rührkesselreaktoren

##### 1/3 – Rührkesselreaktoren

Die Fermenter sind zwei kontinuierlich betriebene Rührkesselreaktoren (continuous stirred tank reactor, CSTR) im Reihenbetrieb (Rührkesselkaskade). Die Anaerobbehälter sind Ortbetonbehälter mit je einem Arbeitsvolumen von 2.200 m<sup>3</sup>, je zwei Paddelrührwerken und gasdichten Tragluftdächern. Der Vergärungsprozess findet im mesophilen Temperaturbereich statt. Dafür wird die Temperatur der Fermenter mit Heizschlangen auf 40-42° C gehalten. [2]

##### 2/3 – Feinabsiebung

Bevor die Gärprodukte in das Lager weitergeleitet werden, durchlaufen sie eine nachgeschaltete Siebung auf 3 mm zur Fremdstoffabscheidung. Die Siebtechnik der Anlage erreicht einen Abscheidegrad von 0,04 % Kunststoff in der Trockenmasse was deutlich unter den aktuellen und zukünftigen Grenzwerten liegt.

Die separierten Störstoffe werden in den Container der Annahmehalle geleitet und als Ersatzbrennstoffe energetisch verwertet. [2]

Dieser Prozessschritt ist ebenfalls in Position A6 – Trennverfahren zu finden.

##### 3/3 – Pasteurisierung

Nach der Feinabsiebung werden die Gärreste aus dem Nachgärer zur nachgeschalteten Pasteurisierung geleitet.

Es erfolgt eine Hygienisierung bevor die Gärprodukte auf die Lager verteilt werden. Dabei handelt es sich um eine Vollstrom-Endhygienisierung in drei Behältern in Parallelschaltung. Das Material muss dazu für mindestens eine Stunde bei mindestens 70 °C gehalten werden. Die Hygienisierung ist für das spätere Ausbringen der Gärreste notwendig. [2]

Dieser Prozessschritt ist ebenfalls in Position A6 – Trennverfahren zu finden.

#### A14 – Gärrestlager

##### 1/1 – Gärrestlager

Zu unterscheiden gilt es in ein Verteillager und drei Ausbringlager. Es handelt sich um vier Ortbetonbehälter ohne Dämmung mit je zwei Stabrührwerken.

Das Verteillager hat ein Fassungsvermögen von 5.100 m<sup>3</sup> und ein gasdichtes Tragluftdach. Es ist an das Gasfassungssystem angeschlossen und verfügt über eine Pumpstation, um die Gärprodukte auf die Ausbringlager zu verteilen. Diese weisen je ein Fassungsvermögen von 4.500 m<sup>3</sup> auf und verfügen einmal über ein gasdichtes Tragluftdach und zweimal über einschalige Gasdächer. Sie sind nur an das Schwachgassystem angeschlossen, welches in das Heizhaus führt [2].

#### A15 – Flüssigdüngerabholung

##### 1/2 – Flüssigdüngerabholung aus Gärrestelager

Der Dünger muss Qualitätsanforderungen erfüllen, um für die Ausbringung akzeptiert zu werden. Deshalb erfolgt zur Verminderung von Fremdstoffen eine Feinabsiebung über eine Schneckenpresse vor der Ausbringung. Die Qualität wird von der Bundesgütegemeinschaft Kompost gesichert.

Zwischen Frühjahr und Herbst erfolgt die Ausbringung des Düngers in die Landwirtschaft, wobei die Gärprodukte für Ackerland und Grünland zugelassen sind. Im Jahr wird eine Menge von 27.000 Mg Dünger ausgebracht [2].

##### 2/2 – Ausbringung Flüssigdünger

Video

#### B1 – Start Trockenfermentation

##### 1/1 – Die Trockenfermentation

Bei der Trockenfermentation handelt es sich um ein kontinuierliches Vergärungsverfahren mit einem Trockensubstanzgehalt zwischen 25-40 Gew.-% im Fermenter. Verwertet werden größtenteils feste Reststoffe aus biologischen Abfällen der Biotonne, Blumenabfälle, Fallobst, Garten- und Parkabfälle, Getreidefehlchargen und Zuckerrübenpressschnitzel o.ä. [2].

Die Trockenvergärung umfasst eine Behandlungskapazität von 22.000 Mg/a Biotonne, 8.000 Mg/a Gewerbeabfälle und 3.000 Mg/a Grünabfälle. Daraus entstehen 3.600 Mg/a Biomethan und 11.000 Mg/a flüssige Gärprodukte sowie 12.500 Mg/a Kompost [1].

Probleme treten im Prozess durch eingetragenen Sand und Steine über die generell stark stoffbelastete Biotonne auf. Darüber hinaus besteht das Problem der Gasertragsschwankungen durch täglich variierende Mengen der Abfallarten und -sorten.

Das Fließschema zeigt die einzelnen Schritte im Prozess der Trockenfermentation. In den folgenden Wegpunkten werden diese detailliert erläutert.

#### B2 – Anlieferung Bioabfall

##### 1/2 – Anlieferung Bioabfall

Die Unternehmen können selbstständig den Bioabfall in der Annahmehalle abladen. Dabei unterscheiden sich die Ablademöglichkeiten je nach LKW-Modell. Das Material wird in der Halle mit Radladern transportiert. Diese verfügen über ein eigenes Luftfiltersystem, sodass innerhalb des Radladers gereinigte Luft vorherrscht. [3]

Fließschema: Annahme organischer Reststoffe

## 2/2 – Lagerboxen

In der Halle sind vier Lagerboxen zur Sortierung des ankommenden Materials vorgesehen. Es werden auch Kleie und alte Brötchen angeliefert und separat gelagert, um die Anlage im Sommer zusätzlich zu bestücken, wenn wenig Bioabfall anfällt.

## B3 – Zerkleinerung & Siebung des Bioabfalls

### 1/1 – Zerkleinerung & Siebung des Bioabfalls

Zuerst kommt das Material mit dem Radlader in die Schredderanlage (rechts, Radladerbeschickung). Anschließend durchläuft der Bioabfall über ein Förderband einen Magnetscheider. Die ausgesiebten Metalle werden in einem Container gesammelt. Im nächsten Schritt werden grobe Störstoffe über ein Sternsieb entfernt. Der aufbereitete Biomüll wird anschließend im Bunker für die automatische Beschickung gelagert. [2]

## B4 – Siebung des Materials

### 1/3 – Schredderanlage

Die Schredderanlage besteht aus einem Zweiwellenzerkleinerer mit einer Kapazität von 45 Mg/h. Die Schredderwalzen müssen halbjährig bzw. nach ca. 11.500 Mg Durchsatz ausgetauscht werden. [2]

### 2/3 – Magnetscheider / Metallabscheider

Der Magnetscheider / Metallabscheider hat eine Abscheidemenge von ca. 20 Mg/a. Die ausgesiebten Metalle werden im Container gesammelt (48 Mg/a) und anschließend entsorgt. [1]

### 3/3 – Sternsieb

Das Sternsieb hat eine Siebgröße von 60 mm. Durch diese Grobabsiebung der Störstoffe kann das Siebmaterial als Strukturmaterial zum Pressen und für die Kompostierung genutzt werden. Das Sternsieb hat dabei eine Kapazität von 250 m<sup>3</sup>/h.

Das Unterkorn ( $\leq 60$  mm) wird über ein Verteilförderband weiter in den Lagerbunker für aufbereitete Bioabfälle geleitet, wohingegen das Überkorn ( $\geq 60$  mm) mehrfach im Kreis geführt wird, bis das Material zu schlecht ist und für die Verbrennung separat gelagert wird. In diesem Sortierprozess können Kunststoffe nicht ausgesiebt werden, da diese zu nass und damit zu schwer sind. [2]

## B5 – Lagerbunker / Automatisierter Kran

### 1/1 – Lagerbunker / Automatisierter Kran

Der aufbereitete Biomüll (Unterkorn des Sternensiebs) wird im Bunker gelagert. Der Bunker wird acht Stunden am Tag bestückt, dies reicht dann auch für die Nacht. Der Bunker bietet einen Ausgleich für mehrere Tage, um Sonn- und Feiertage oder Tage ohne Anlieferung auszugleichen.

Mittels eines automatischem Krahnbahnsystems wird die Dosierbunkerwaage oben bestückt. Die Dosiereinrichtung besteht aus einem Vorlagebehälter mit Wägezellen. Wenn zwei Tonnen erreicht sind, wird der Fermenter mit dem Material über Stopfschnecken bestückt. Zur Reduktion von Schwefelwasserstoff wird Eisenhydroxid zugegeben. [2]

## B6 – Prozess der Trockenfermentation

### 1/2 – Trockenfermentation im Gärbehälter

Bei der Trockenfermentation werden zwei doppelwandige Pflöfenstrombehälter (kontinuierlicher Rohrbehälter) eingesetzt. Es handelt sich dabei um zwei liegende Fermenter mit Langachsührwerk, die parallel betrieben werden [3]. Die Anaerobreaktoren verfügen über eine Kapazität von 30.000 Mg/a und haben jeweils ein Arbeitsvolumen von 1.300 m<sup>3</sup>. Direkt nach dem Eintrag des Materials wird es mit Rezyklat verdünnt, bevor es für 20–25 Tage im Fermenter verweilt. Die Vergärung läuft im thermophilen Temperaturbereich bei 55 °C ab. [2]

#### 1. Fließschema: Vergärungsstufe

#### 2. Aufbau Fermenter

### 3. Blick in den leeren Fermenter

#### 2/2 – Blick in den gefüllten und aktiven Fermenter

##### B7 – Überdrucksicherung des Gärbehälters

###### 1/1 – Überdrucksicherung

Das überschüssige Gas tritt an dieser Stelle aus und wird zum Speicher geleitet. Der Prozess wird dadurch vor Über- und Unterdruck gesichert. [3]

##### B8 – Austrag Fermenter

###### 1/1 – Austragung der Gärprodukte

Über zwei hydraulisch betriebenen Kolbenpumpen werden die Gärprodukte aus dem Fermenter ausgetragen und weiter zur Fest-/Flüssigtrennung (Separation) in die Aerobisierungshalle geleitet. [2]

##### B9 – Orientierungspunkt Aerobisierungshalle

###### 1/1 – Orientierungspunkt Aerobisierungshalle

Zur besseren Orientierung auf dem Gelände ist an dieser Stelle ein Orientierungspunkt ohne weitere Informationen eingesetzt.

##### B10 – Aerobisierungshalle – Separation

###### 1/2 – Siebschneckenpressen

Zwei Siebschneckenpressen (grün) pro Fermenter entwässern das Material, trennen es also in eine Fest- und eine Flüssigkomponente auf. Sie verfügen über eine Kapazität von 100 Mg/d [2]. Dafür ist das erwähnte Strukturmaterial entscheidend, da ohne das Material eine matschige Konsistenz entsteht und die Pressen nicht richtig funktionieren. [3]

#### 2/2 – Dekanter

Im Dekanter (blau) wird anschließend auch der Sand des Flüssiganteils noch entfernt. Das entsandete Presswasser wird rezykliert und u.a. für den Trockenfermenter und Speicher verwendet. Der Presskuchen (Festanteil) wird weiter zur Kompostierung bzw. Gärrestkonditionierung transportiert.

##### B11 – Aerobisierungshalle – Intensivrotteboxen

###### 1/2 – Belüftete Intensivrotte / Intensivrotteboxen

Das feste Gärprodukt der Trockenfermentation wird in die fünf Intensivrotteboxen verladen. In den Boxen mit je 144 m<sup>3</sup> Volumen verbleibt das Material ein bis zwei Wochen. Um den Anaerobprozess zu stoppen und Methanemissionen zu vermeiden, wird der feste Gärprodukt in den Boxen intensiv von unten zwangsbelüftet. Die Abluft der Intensivrotten wird oben abgezogen und gelangt in die Biofilter. Nach der Intensivrotte wird das Material zur Nachkompostierung transportiert. [2]

#### 2/2 – Materialkonsistenz nach Separation bei zu wenig Strukturmaterial

##### B12 – Gärproduktelager

###### 1/1 – Gärproduktelager & Ausbringung

Das Presswasser aus der Separation wird weiter zur Speicherung in die zwei Gärproduktlager geleitet. Dabei handelt es sich um zwei Ortbetonbehälter ohne Dämmung mit je 3.200 m<sup>3</sup>. Diese haben keine Rührwerke und sind an das Gasfassungssystem angeschlossen. Nach ca. einem Jahr müssen die Gärbehälter mit einem Spezialsaugfahrzeug von Sedimenten bereinigt werden. Des Weiteren dienen die gasdichten Tragluftdächer als Biogasspeicher für die Trockenfermentation. [2]

Der Flüssigdünger wird in gleicher Weise wie bei der Nassfermentation ausgebracht. Zur Verminderung von Fremdstoffen erfolgt eine Feinabsiebung über eine Schneckenpresse vor der Ausbringung. Anschließend können LKWs wie bei der Nassfermentation den Dünger direkt über Rohranschlüsse in ihre Tanks laden [2]. Im Jahr wird eine Menge von 11.000 Mg Flüssigdünger ausgebracht. [1]



## C1 – Start Kompostierung

### 1/1 – Einleitung Kompostierung

In der Vergärungstechnologie wird zwischen dem biologischem Abbaugrad (maximaler Abbaugrad der Organik) und dem technischen Abbaugrad (Abbaugrad am Ende der Verweilzeit im Fermenter) unterschieden. Wird ein Substrat nicht vollständig abgebaut, verbleibt ein Restgaspotential. Um Emissionen von Treibhausgasen im Sinne des Klimaschutzes so gering wie möglich zu halten, sollte der technische Abbaugrad nah am biologischen liegen.

Zur Reduktion des Restgaspotentials werden flüssige Gärprodukte in Gärproduktlagern gasdicht abgedeckt und feste Gärprodukte kompostiert.

Fließschema: Kompostierung

## C2 – Belüftete Intensivrotte / Intensivrotteboxen

### 1/1 – Belüftete Intensivrotte / Intensivrotteboxen

Das feste Gärprodukt der Trockenfermentation wird in die fünf Intensivrotteboxen verladen. In den Boxen mit je 144 m<sup>3</sup> Volumen verbleibt das Material ein bis zwei Wochen. Um den Anaerobprozess zu stoppen und Methanemissionen zu vermeiden, wird der feste Gärprodukt in den Boxen intensiv von unten zwangsbelüftet. Die Abluft der Intensivrotten wird oben abgezogen und gelangt ebenfalls in die Biofilter. Nach der Intensivrotte wird das Material zur Nachkompostierung transportiert [2].

An dieser Stelle überschneiden sich die Teilrundgänge Trockenfermentation (B) und Kompostierung (C).

## C3 – Nachkompostierung / Mieten

### 1/1 – Nachkompostierung / Mieten

Der Inhalt der Boxen wird in die Halle in Dreiecksmieten umgesetzt. Hier verbleibt das Material drei bis sechs Wochen. Dabei erfolgt alle zwei Wochen eine Durchmischung mit einem frei verfahrbaren Umsetzgerät. Die Kompostierung erfordert keine gezielte Regelung, ist aber von den Einflussfaktoren der Belüftung, des Wassergehaltes; der Temperatur, des Luftporenvolumens, des pH-Wertes und des C/N-Verhältnisses abhängig.

Die Nachkompostierung ist darüber hinaus durch die Wärmeeinwirkung im Rotteprozess für die Hygienisierung verantwortlich. Durch die hohen Temperaturen über einen längeren Zeitraum werden Keime abgetötet. Zur Bestätigung müssen die Temperaturen der Mieten regelmäßig geprüft werden.

Bild 1: Online-Temperatur-Lanze zur Temperaturüberwachung der Mieten.

Bild 2: Wärmebildaufnahme der Freiluftmieten

## C4 – Siebung

### 1/2 – Siebung

Trotz vorgeschalteter Störstoffabtrennung in der Trockenfermentation sind noch viele Störstoffe im Kompost enthalten. Für den Kompostierungsprozess ist dies erwünscht, da die Fremdstoffe Struktur geben und dadurch die Sauerstoffversorgung und damit Kompostierung erleichtern. Dadurch wird allerdings am Ende des Reifeprozesses eine Störstoffabtrennung des fertigen Kompostes nötig. Dazu wird eine mobile Siebanlage mit einem Trommelsieb (10 mm) eingesetzt. Der Kompost wird in zwei Durchläufen gesiebt. Die Störstoffe werden gesammelt und später thermisch verwertet. [3]

### 2/2 – Trommelsieb & ausgesiebte Störstoffe

Mit Hilfe solcher Trommelsiebe (10 mm Lochgröße) werden die Störstoffe aus dem fertigen Kompost herausgesiebt.

## C5 – Mietenumsetzer

### 1/1 – Mietenumsetzer

Die Dreiecksmieten verbleiben drei bis sechs Wochen in der so genannten Rottehalle. Mit diesem frei verfahrbaren Mietenumsetzer erfolgt dabei alle zwei Wochen eine erneute Durchmischung.

## C6 – Fertiger Kompost

### 1/3 – Fertiger Kompost

Der Kompost stellt ein hochwertiges und nährstoffreiches Produkt der Trockenfermentation dar. Auf der Anlage werden ca. 12.500 Mg/a produziert [1]. Die Hauptabsatzzeiten für Kompost liegen im Frühjahr und Herbst, weswegen Lagerkapazitäten bis zu einem halben Jahr auf der Anlage vorhanden sein müssen [4]. Eingesetzt wird der Kompost in der Landwirtschaft, sowie im Garten- und Landschaftsbau. Auch Privatleute können den Kompost über den Wertstoffhof beziehen [3]. Der Kompost ist durch die Bundesgütegemeinschaft Kompost RAL-gütesichert. [1]

### 2/3 – Flüssige Gärprodukte

Auch der Flüssigdünger, der am Ende der Fermentationsprozesse entsteht, ist RAL-gütesichert und wird wegen seiner wertvollen Nährstoffe in der Landwirtschaft eingesetzt. Die Ausbringung erfolgt auf regionalen Feldern durch die Landwirte selbst oder durch externe Dienstleister. Die beinahe Geruchslosigkeit des Flüssigdüngers stellt einen Vorteil gegenüber der Gülle dar. [1].

Abgeholt wird der Flüssigdünger direkt am Gärproduktelager (Punkt B12 der Trockenfermentation) durch LKWs.

### 3/3 – Kompostierungsanlage Umpferstedt

Für einen noch detaillierteren Einblick in den Kompostierungsprozess empfehlen wir den virtuellen Besuch der Kompostierungsanlage Umpferstedt bei Weimar. Diese lokale Anlage bildet in kleinerem Maßstab, aber inhaltlich sehr viel ausführlicher, die einzelnen Prozesse der Kompostierung ab.

Folgen Sie dem Link zur Anlage: <https://360-degree.education/Umpferstedt/>

## D1 – Gastransport zur Aufbereitung

### 1/2 – Gastransport

Auf der ganzen Anlage wird das Gas über Rohre verteilt und geleitet. Diese sind mit gelben Pfeilen bzw. Markierungen gekennzeichnet. Dabei ist in Rohbio-, Produkt- und Schwachgas zu unterscheiden.

Das Rohbiogas beschreibt das Gas vor der Aufbereitung, danach wird es als Produktgas beschrieben. Das Schwachgas betitelt die Gase aus den Gärrestelagern, welche nicht in die Aufbereitung, sondern direkt in das Heizhaus geleitet werden. Das Schwachgas aus der Gasaufbereitung wird ebenfalls in die Gärrestelager und von da mit ins Heizhaus geleitet. [3]

### 2/2 – Notfackel

Rechts neben dem Gasaufbereitungscontainer befindet sich die Notfackel. Diese dient der Betriebssicherheit und dem Emissionsschutz. Die Fackel verbrennt kontrolliert Biogas, welches nicht gespeichert werden kann und verhindert unkontrolliertes Ablassen von Biogas. [3]

## D2 – Aufbereitung des Biogases

### 1/1 – Aufbereitung des Biogases

Die Umwandlung von Rohbiogas zu Produktgas wird auch Veredlung bezeichnet. Dabei entzieht man dem Rohbiogas in einem Spezialverfahren Schwefel, Kohlendioxid und Wasser und hebt so den Gehalt an brennbarem Methan auf über 96 Vol.-% an. Es entsteht dabei hochwertiges Biomethan, das wie Erdgas eingesetzt und eingespeist werden kann. [1]

## D3 – Aufbereitungscontainer

### 1/2 – Aufbereitungscontainer

Im Aufbereitungscontainer sind viele technischen Geräte zu erkennen u.a. zwei Verdichter (links) und zwei Vakuumpumpen (rechts) die für den Prozess benötigt werden. [3]

### 2/2 – Film Gasaufbereitung

Der verlinkte Film „Biogasaufbereitung mit Membrantechnologie für Biogasanlagen | Wie funktioniert es?“ der Firma Bright Renewables erklärt, welche Schritte notwendig sind, um das erzeugte Rohbiogas zu Biomethan zu veredeln, sodass es in das reguläre Erdgasnetz eingespeist werden kann.

Die Aufbereitungsanlage in Fulda stammt von Hitachi Zosen INOVA, funktioniert aber nach dem gleichen Prinzip.

<https://www.youtube.com/watch?v=9OqX-IDF398>

#### D4 – Heizhaus

##### 1/1 – Heizhaus

Das Schwachgas aus den drei Gärrestelagern wird in die Biomasseheizkesselanlage geleitet. Es wird nicht aufbereitet, da es eine verminderte Qualität aufweist und kann demnach nicht eingespeist werden. Im Heizhaus gibt es eine Restgasverbrennungsanlage, die das Schwachgas zusammen mit Hackschnitzeln im Heizkessel zur Wärmenutzung verbrennt. [3]

#### D5 – Biomasseheizkesselanlage

##### 1/1 – Biomasseheizkesselanlage

Mit der in der Biomasseheizkesselanlage erzeugten Wärme werden neben den Verwaltungsgebäuden vor allem die Vorlagebehälter und Fermenter beheizt. Denn nur bei gleichbleibender Temperatur sind auch die Abbauprozesse und damit die Biogaserzeugung stabil.

#### D6 – Exkurs: BHKW / Verstromung

##### 1/1 – Exkurs: BHKW / Verstromung

Die Einspeisung des Biogases in das reguläre Erdgasnetz, so wie es hier auf der Biothan-Anlage in Fulda der Fall ist, kann als Alleinstellungsmerkmal hervorgehoben werden. Denn im Regelfall wird das gesamte vor Ort erzeugte Biogas zur Strom- und Wärmeerzeugung mit Hilfe von Blockheizkraftwerken (BHKWs) verwendet:

Das produzierte Biogas wird in Deutschland zu großen Teilen direkt am Entstehungsort verstromt. Die Stromerzeugung beruht auf dem Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK). Bei der KWK wird die Energie gleichzeitig in mechanische bzw. elektrische und nutzbare Wärme umgewandelt. Zur Verstromung vor Ort werden in der Regel Blockheizkraftwerke (BHKW) verwendet. Diese bestehen aus Verbrennungsmotor und Generator. Der Motor wird mit Biogas betrieben, welcher den Generator antreibt und somit Strom erzeugt wird. Für die Verstromung von Biogas werden insbesondere Gas-Otto-Motoren und Zündstrahlmotoren eingesetzt. Die parallel zur Stromerzeugung produzierte Wärme wird zur Beheizung vor Ort genutzt oder in die zu versorgenden Objekte bzw. ins Nahwärmenetz eingespeist.

Bild: Beispiel für den Aufbau eines BHKWs

#### D7 – Wärmespeicher

##### 1/1 – Wärmespeicher

Links neben dem Heizhaus befindet sich ein großer silberner Wärmespeicher. Dieser dient als Pufferspeicher für die im Heizhaus erzeugte Wärme und hilft dabei die Kontinuität der Abbauprozesse abzusichern. [3]

#### D8 – Biogaseinspeiseanlage

##### 1/1 – Biogaseinspeiseanlage

Vor der Einspeisung des aufbereiteten Gases wird es noch einmal verdichtet. Das eingespeiste Gas hat dieselbe Qualität wie herkömmliches Erdgas und kann genauso vielseitig zum Heizen, zur Erzeugung von Warmwasser, für Strom- und Prozesswärme in Gasturbinen und zum Betanken von Erdgasfahrzeugen verwendet werden. Mit dem Biomethan aus der Nass- und Trockenvergärung kann jährlich der Wärmebedarf von ca. 2.400 Haushalten mit Heizenergie gedeckt werden. Das in der Biothan-Anlage erzeugte Bio-Methan wird von der RhönEnergie Fulda vermarktet. [1]

#### E1 – Ausgleichsmaßnahmen / Naturschutz

##### 1/1 – Ausgleichsflächen

Der Bau der Biogasanlage greift in das Ökosystem auf dem Finkenberg ein. Um für die Flora und Fauna einen Ausgleich zu schaffen, wurden 3,6 ha der 11 ha als Ausgleichsfläche umgestaltet. Diese Ausgleichsfläche wird für die Umsiedlung und Erhaltung der vorhandenen Arten verwendet und dient

damit dem Artenschutz. Der Fokus liegt dabei insbesondere auf den Reptilien (Zauneidechse, Schling- und Ringelnatter) und Schmetterlingen (Rotklee-Bläuling).

Für den funktionalen Ausgleich wurden mehrere Maßnahmen umgesetzt. Die Entsiegelung des asphaltierten Wegenetzes ermöglichte die Entwicklung einer Grasvegetation und damit des Artenreichtums. Insbesondere flugschwache Schmetterlinge bevorzugen diese blütenreiche Grasvegetation. Die Entbuschung und Verjüngung der vorhandenen Heide schaffte einen ökologisch wertvollen Übergangsbereich zum anschließenden Wald. Die Verjüngung wird durch Beweidung mit Schafen umgesetzt und ermöglicht ein Vegetationswachstum von Arten der Eiablage- und Raupenpflanzen für Schmetterlinge. Die Entbuschung verhindert zudem die Ausbildung eines Kiefernwaldes und schafft einen stark besonnten Bereich als optimalen Lebensraum für Reptilien. Die Verteilung von Wurzelstücken und das Anlegen von südexponierten Lesesteinhaufen bieten zusätzliche Verstecke und Sonnenplätze für wechselwarme Reptilien [9].

## E2 – Exkurs: Planung & Kontrolle

### 1/4 – Exkurs: Planung & Kontrolle

Die hier einsehbaren PDFs erläutern die Planungen und späteren Kontrollen der Ausgleichsmaßnahmen auf dem Gelände der Biogasanlage. Neben der detaillierten Bestandsaufnahme von Pflanzen und Tieren, kann ein Einblick in die Arbeiten zur Planung von Ausgleichsflächen bei Großbauprojekten gewonnen werden. Die Unterlagen verstehen sich als weiterführende Literatur für alle Interessierten.

2/4 – Landschaftspflegerischer Begleitplan zum Bau einer Biogasanlage in Großenlöder

3/4 – Pflegekonzept Ausgleichsfläche „Am Finkenberg“

4/4 – Erfolgskontrolle der Tagfalter- und Widderchenfauna auf der Ausgleichsfläche der Biothan GmbH am Finkenberg

## F1 – Historie

### 1/2 – Historie des Geländes

Die Biothan-Anlage befindet sich auf einem ehemaligen Militärgelände auf dem u.a. Raketenabschussrampen der US-Streitkräfte stationiert waren. Davon sind noch immer die Überreste zweier durch Aufschüttungen abgegrenzte, quadratische Flächen zu erkennen, auf denen die Militär-LKWs mit Raketen positioniert waren. Auch die Überreste eines Bunkers sind noch zu erkennen, der heute als Stall umfunktioniert wurde, in dem die zur Beweidung eingesetzten Schafe Unterschlupf finden.

### 2/2 – Zur Entstehung der Biogasanlage

Gegründet wurde die Biothan GmbH 2009 als Tochterunternehmen zweier Unternehmen, die 2013 mit einem weiteren Unternehmen zur RhönEnergie Fulda fusionierten. Für den Bau wurden insgesamt ca. 30 Millionen Euro investiert und keine öffentlichen Zuschüsse verwendet.

Eine Besonderheit der Anlage liegt im Einbezug der Bürgerinnen und Bürger der Gemeinde Großenlöder bei der Vorplanung, sodass bei der Veröffentlichung der Pläne kein einziger Einspruch oder Widerstände auftraten. Im Normalfall ist bei der Realisierung solch großer Anlagen mit Einwänden von verschiedenen Interessengruppen zu rechnen. [1]

## F2 – Nachnutzung

### 1/1 – Nachnutzung

Die Freiflächen der Raketenabschussrampen werden unterschiedlich genutzt. Die Biothan GmbH nutzt sie in ihrem Bereich als Lagerfläche für den eigenen Grünschnitt. Im Bereich der Ausgleichsmaßnahmen wurde eine der Flächen zu einem Feuchtbiotop renaturiert, so dass sich hier an und im Tümpel entsprechende Gräser, Falter, Amphibien und Reptilien ansiedeln können.

## Quellenangaben

1 – Website Biothan GmbH

2 – Vorlesung Wiese

3 – Infos der Besichtigung am 24.05.2023

4 – Vorlesung Kraft

5 – Buch Handbuch zur Bilanzierung von Biogasanlagen für Ingenieure – Band I

6 – Buch Anaerobtechnik - Abwasser-, Schlamm- und Reststoffbehandlung, Biogasgewinnung; 3., neu bearbeitete Auflage

7- WW62

8- WW63

9- Unterlagen Frau Kahlert vom BIL Witzenhausen

## BHKW/ Verstromung

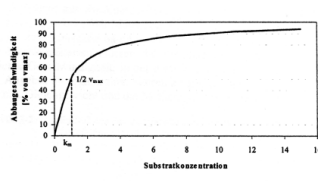
Das produzierte Biogas wird in Deutschland zu großen Teilen direkt am Entstehungsort verstromt. Die Stromerzeugung beruht auf dem Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK). Bei der KWK wird die Energie gleichzeitig in mechanische bzw. elektrische und nutzbare Wärme umgewandelt. Zur Verstromung vor Ort werden in der Regel Blockheizkraftwerke (BHKW) verwendet. Diese bestehen aus Verbrennungsmotor und Generator. Der Motor wird mit Biogas betrieben, welcher den Generator antreibt und somit Strom erzeugt wird. Für die Verstromung von Biogas werden insbesondere Gas-Otto-Motoren und Zündstrahlmotoren eingesetzt. Die parallel zur Stromerzeugung produzierte Wärme wird zur Beheizung vor Ort genutzt oder in die zu versorgenden Objekte bzw. ins Nahwärmenetz eingespeist.

## Monod-Kinetik

**b.is**resources **Umsatzraten**

Monod-Kinetik (Biomasse Zuwachsrate)

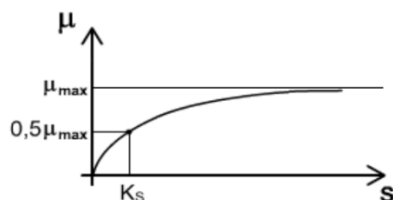
$\mu$	Wachstumsrate	[h <sup>-1</sup> ]
$\mu_{max}$	max. Wachstumsrate	[h <sup>-1</sup> ]
$S_t$	Substratkonzentration zum Zeitpunkt t	[mg/l]
$S_0$	Substratkonzentration zum Zeitpunkt $t_0$	[mg/l]
$K_s$	Halbsättigungskonstante	[mg/l]



$$\mu = \mu_{max} \cdot \frac{S_0}{K_s + S_t}$$

$$\mu = \ln 2 t_d^{-1}$$

Biotechnologie in der Ressourcenwirtschaft    Anaerobtechnik | Grundlagen    22

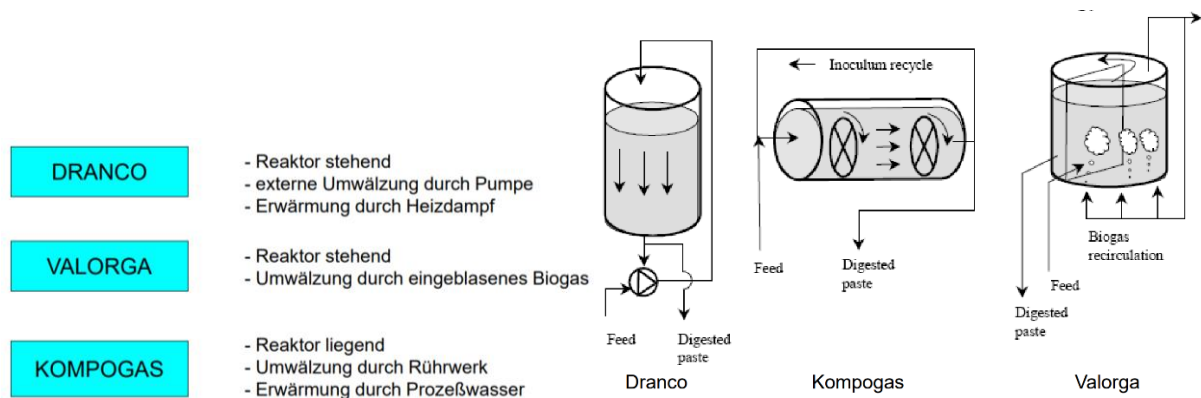


Lag	$\mu = 0$	abfallend	$\mu < \mu_{max}$
beschleunigend	$\mu < \mu_{max}$	stationär	$\mu = 0$
exponentiell	$\mu = \mu_{max}$	Tod	$\mu < 0$

Die Wachstums- oder Monodkinetik gibt den empirischen Zusammenhang zwischen Biomassezuwachs pro Zeit (Wachstumsrate) und der Substratkonzentration an. Die Wachstumsrate steigt mit der Zunahme der Substratkonzentration. Bei zunehmender Verdünnungsrate infolge erhöhter Substratzugabe reagieren die Bakterien mit zunehmender Stoffwechselaktivität, was einen zunehmenden Substratverbrauch zur Folge hat. Die Zunahme des Substratverbrauches erfolgt aber mit einer kleinen zeitlichen Verzögerung, so dass es zu einer Erhöhung der Wachstumsrate kommt.

Beim bakteriellen Substratabbau handelt es sich um eine enzymkatalysierte Reaktion, die einer Sättigungskinetik folgt. Daraus folgt, dass die Wachstumsrate nach dem Erreichen der maximalen Wachstumsrate bei weiterer Substratzugabe nicht mehr weiter steigt. Wird die maximale Wachstumsrate erreicht und es erfolgt eine weitere Erhöhung der Substratzugabe (Verdünnung), so bricht das

Gleichgewicht am Auswaschpunkt zusammen, da die Auswaschrage nicht mehr durch steigenden Bakterienenertrag kompensiert werden kann. Insbesondere die Veränderung der Trockensubstanz, die mit der Veränderung der Bakteriendichte einhergeht, ist zu berücksichtigen. Ist die Wachstumsrate klein, muss auch die Verdünnungsrate entsprechend klein sein, um das Gleichgewicht konstant zu halten und die Bakterien nicht aus der Lösung zu schwemmen.



Das **VALORGA-Verfahren** weist in der Aufbereitung der Abfälle Ähnlichkeiten mit dem DRANCO-Verfahren auf. Die Abfälle werden zunächst zerkleinert, auf eine Korngröße < 40mm abgesiebt und die Feinfraktion dem Reaktor nach Anmischung auf TS-Gehalte von 25 bis 35% mit einer Feststoffpumpe in den Reaktor gefördert. Die Erwärmung des Gärsubstrates erfolgt sowohl durch die Erwärmung des Prozesswassers für die Anmischung als auch durch Zudosierung von Sattedampf in den Reaktor. Ausgeführt sind die Reaktoren als stehende zylindrische Betonbehälter. Eine Besonderheit des Reaktors stellt die Mittelwand im Reaktor dar, die über etwa 2/3 des Reaktordurchmessers verläuft. Sie trennt den Ein- und Austrittsbereich des Gärmaterials, wodurch Kurzschlussströmungen vermieden werden sollen. Das Gärmaterial wird somit zu einer horizontalen kreisförmigen Förderrichtung gezwungen, sodass das System als Pfropfenstromverfahren angesehen werden kann. Die Durchmischung des Reaktorinhaltes erfolgt ohne mechanische Einbauten durch ein pneumatisches System. Periodisch wird Biogas im Kreislauf unter einem Druck von bis zu ca. 10 bar über Düsen am Reaktorboden vertikal eingepresst und auf diese Weise eine effektive Durchmischung angestrebt. Die Betriebsweise erfolgt wahlweise mesophil oder thermophil, mit hydraulischen Verweilzeiten zwischen etwa 14 und 28 Tagen. Ohne den Einsatz mechanischer Fördereinrichtungen werden die Gärreststoffe mittels Schwerkraft ausgetragen. Die Entwässerung ist zweistufig und besteht zumeist aus Siebschnecken- und Bandfilterpresse. Bei Bedarf wird eine Abscheidung feiner Inertstoffe aus dem Prozesswasser durch Hydrozyklone (Sandabscheidung) und Zentrifugen durchgeführt.

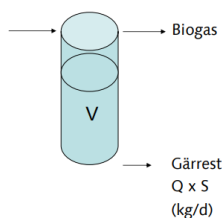
Bei dem **DRANCO-Verfahren** (Organic Waste Systems – OWS) wird zur Aufbereitung von Bioabfällen zunächst eine manuelle Störstoffabtrennung vorgenommen. Anschließend erfolgt eine Zerkleinerung und Siebung auf Korngrößen < 40mm. Vor der Vergärungsstufe kann eine Kugelmühle platziert sein, mit der die zu vergärenden Restabfälle aufbereitet werden. Der Siebunterlauf gelangt nach einer Festscheidung in eine Dosiereinheit, mit deren Hilfe Anlieferungsschwankungen aufgefangen werden. Eine gezielte aerobe Hydrolyse findet nicht statt. In einem Mischer wird das Material auf einen Trockensubstanzgehalt von ca. 25–35% angemaischt und mit Hilfe einer Kolbenpumpe mit Vorpresseinrichtung in den Reaktor eingetragen. Die Vergärung wird ausschließlich im thermophilen Temperaturbereich betrieben, wobei die Erwärmung des Materials durch die Zugabe von Sattedampf erfolgt. Die Reaktoren werden als stehende zylindrische Behälter in Betonbauweise erstellt. Die Entnahme des Materials erfolgt am konisch ausgeführten Boden des Reaktors, während die angemaischten Abfälle und das rezirkulierte Material am Reaktorkopf zugeführt werden, sodass das Material den Reaktor nach unten

durchströmt. Die hydraulische Verweilzeit beträgt etwa 20–30 Tage. Durch den großen Umwälzstrom bei dem Substrateintrag wird der Reaktorinhalt innerhalb zweier Arbeitstage umgewälzt, es liegt somit eine quasi-volldurchmischte Betriebsweise vor. Die Entwässerung des Gärrestes erfolgt mittels Siebschneckenpressen unter Zugabe von Flockungshilfsmitteln.

Bioabfälle werden bei dem **KOMPOGAS-Verfahren** vorzerkleinert bzw. auf Korngrößen  $< \text{ca. } 80 \text{ mm}$  gesiebt, einer Fe-Scheidung unterzogen und in einer zweiten Zerkleinerungsstufe mit einer Schneidscheibenmühle auf eine Korngrößen  $< 40 \text{ mm}$  konfektioniert und in einem Zwischenbunker gespeichert, wie in dargestellt. Die Speicherkapazität ist auf einen Zeitraum von ca. 3 Tagen ausgelegt und ermöglicht eine kontinuierliche Beschickung der Vergärung auch über das Wochenende. Eine gezielte aerobe Hydrolyse wird nicht vorgenommen. Die aufbereiteten Bioabfälle werden mit Prozesswasser auf einen Trockensubstanzgehalt zwischen ca. 25 und 30% angemaischt und mittels Feststoffpumpen quasi-kontinuierlich in den Reaktor eingetragen. Der liegende Reaktor arbeitet nach dem Pfropfenstromprinzip. Die anaerobe Behandlung des Substrates erfolgt ausschließlich bei thermophilen Temperaturen zwischen ca.  $50$  und  $55^\circ\text{C}$ . Der Reaktorzulauf wird in Doppelrohr-Wärmeübertragern erwärmt, während die Abstrahlungsverluste über eine Reaktorbeheizung ausgeglichen werden. Die Verweilzeit im Reaktor beträgt etwa 15–20 Tage. Der Reaktorablauf wird teilweise zur Animpfung des Inputmaterials mit aktiver Biomasse rückgeführt. Das überschüssige Material wird in einer zweistufigen Entwässerung mittels Siebschneckenpresse und Dekanter behandelt und der Dekanterablauf teilweise zur Anmischung der Abfälle genutzt. Die weitergehende Aufreinigung des Prozesswassers erfolgt in der Regel unter Zuhilfenahme von Flockungshilfsmitteln, wodurch der Trockensubstanzgehalt des Wassers auf unter 2% reduziert wird.

#### b.is resources Rührkessel (CSTR – Continuous Stirred Tank Reactor)

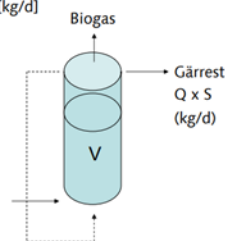
Substratzufuhr  $Q \times S_0$   
[kg/d]



Optimum:  
stationärer Zustand (steady state),  
d.h. Substrat- und Bakterien-  
konzentration konst.

#### b.is resources UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket)

Substratzufuhr  $Q \times S_0 + \text{Rezirkulation}$   
[kg/d]



Mindestzufuhr, Optimum:  
stationärer Zustand (steady state),  
d.h. Substrat- und Bakterien-  
konzentration konst.



Um den anaeroben Abbau besser zu verstehen, ist es wichtig, die Begriffe im Zusammenhang zu betrachten. Der anaerobe Abbau beschreibt den Prozess, bei dem organische Substanzen in Abwesenheit von Sauerstoff zersetzt werden. Die Begriffe "Vergärung" und "Fermentation" sind eng damit verknüpft, da sie spezifisch den anaeroben Abbau organischer Stoffe durch Mikroorganismen bezeichnen, wie beispielsweise die Umwandlung von Zucker in Alkohol durch Hefe. Im Gegensatz dazu sind die Begriffe "Degradation" und "Reduktion" allgemeiner. Degradation beschreibt den Abbau von Substanzen im Allgemeinen, unabhängig davon, ob Sauerstoff vorhanden ist oder nicht, während Reduktion sich auf chemische Prozesse bezieht, bei denen Moleküle Elektronen aufnehmen, was in verschiedenen Kontexten vorkommen kann, nicht nur beim anaeroben Abbau. "Aerober Abbau" und "Oxidation" beschreiben hingegen Prozesse, bei denen Sauerstoff eine wesentliche Rolle spielt. Der aerobe Abbau ist der Abbau von Substanzen unter Sauerstoffeinfluss und die Oxidation ist ein Prozess, bei dem Moleküle Elektronen verlieren, was häufig mit aeroben Bedingungen verbunden ist. Daher sind "Vergärung" und "Fermentation" die treffendsten Begriffe für den anaeroben Abbau, während die anderen Begriffe entweder allgemeinere oder entgegengesetzte Prozesse beschreiben.

Am anaeroben Abbau sind hauptsächlich Bakterien beteiligt, darunter sowohl fakultative als auch obligate Anaerobier. Fakultative Anaerobier sind Mikroorganismen, die in Gegenwart von Sauerstoff leben können, jedoch auch in dessen Abwesenheit überleben und Energie gewinnen können. Obligate Anaerobier hingegen benötigen strikt anaerobe Bedingungen, da sie Sauerstoff als toxisch empfinden und nur in sauerstofffreien Umgebungen gedeihen. Viren spielen hierbei keine aktive Rolle, da sie keine eigenständigen Stoffwechselprozesse besitzen und somit nicht in den Abbau organischer Substanzen involviert sind. Der anaerobe Abbau ist ein komplexer biologischer Prozess, bei dem organische Materie durch Mikroorganismen unter Ausschluss von Sauerstoff abgebaut wird, was zur Produktion von Biogas und anderen Zwischenprodukten führt. Bakterien sind die treibende Kraft hinter diesem Prozess und sorgen durch eine Vielzahl von biochemischen Reaktionen für den Abbau von organischen Stoffen und die Erzeugung von Energie in Form von Methan und Kohlendioxid.

Fakultative und obligate Anaerobier unterscheiden sich grundlegend in ihrer Fähigkeit, mit oder ohne Sauerstoff zu leben. Fakultativ anaerobe Organismen sind flexibel und können sowohl in Gegenwart von Sauerstoff als auch unter Sauerstoffausschluss leben. Sie nutzen Sauerstoff zur Energiegewinnung, wenn er vorhanden ist, können aber auch auf Gärungsprozesse oder andere anaerobe Mechanismen zurückgreifen, wenn kein Sauerstoff verfügbar ist. Diese Anpassungsfähigkeit ermöglicht es ihnen, in verschiedenen Umweltbedingungen zu überleben. Im Gegensatz dazu sind obligat anaerobe Organismen streng auf sauerstofffreie Bedingungen angewiesen. Sie können Sauerstoff nicht tolerieren und sterben oft in dessen Gegenwart, da ihnen die Enzyme fehlen, die schädliche Sauerstoffverbindungen neutralisieren. Daher sind obligate Anaerobier auf spezielle, sauerstofffreie Lebensräume beschränkt, wo sie durch anaerobe Stoffwechselprozesse Energie gewinnen.

Der anaerobe Abbau, auch bekannt als anaerobe Vergärung, umfasst mehrere Phasen, durch die organische Stoffe in Abwesenheit von Sauerstoff abgebaut werden. Diese Phasen sind in der Regel in vier Hauptphasen unterteilt: Hydrolyse, Acidogenese, Acetogenese und Methanogenese. In der ersten Phase, der Hydrolyse, werden komplexe organische Stoffe wie Proteine, Kohlenhydrate und Fette in ihre einfacheren monomeren Bestandteile zerlegt. In der zweiten Phase, der Acidogenese, wandeln Bakterien die entstandenen Monomere in einfache organische Säuren, Alkohole, Wasserstoff und Kohlendioxid um. Während der Acetogenese, der dritten Phase, werden diese organischen Säuren und Alkohole weiter zu Essigsäure, Wasserstoff und Kohlendioxid abgebaut. Schließlich erfolgt in der Methanogenese, der vierten Phase, die Umwandlung von Essigsäure und Wasserstoff in Methan und Kohlendioxid durch methanogene Archaeen. Diese vier Phasen sind entscheidend für den vollständigen anaeroben Abbau organischer Stoffe und die Produktion von Biogas, das hauptsächlich aus Methan besteht.

Der anaerobe Abbau organischer Stoffe erfolgt in mehreren Phasen, die alle eine wichtige Rolle bei der Umwandlung der Ausgangsstoffe in Endprodukte wie Methan und Kohlendioxid spielen. Die erste

Phase ist die Hydrolyse, bei der komplexe organische Moleküle wie Proteine, Kohlenhydrate und Fette durch Enzyme in einfachere Verbindungen wie Aminosäuren, Zucker und Fettsäuren aufgespalten werden. Anschließend folgt die Versäuerungsphase, auch bekannt als Acidogenese, bei der die Produkte der Hydrolyse weiter zu kurzkettigen organischen Säuren, Alkoholen, Wasserstoff und Kohlendioxid abgebaut werden. Danach kommt die Acetogenese, in der die kurzkettigen Säuren und Alkohole in Essigsäure, Wasserstoff und Kohlendioxid umgewandelt werden. Schließlich folgt die Methanogenese, in der Methanbakterien die Essigsäure sowie Wasserstoff und Kohlendioxid in Methan und Wasser umsetzen. Dieser komplexe Prozess stellt sicher, dass die organischen Stoffe vollständig abgebaut und in energetisch nutzbare Produkte umgewandelt werden.

Hydrolyse ist ein biochemischer Prozess, bei dem komplexe polymere Verbindungen durch die Zugabe von Wasser in einfachere Moleküle zerlegt werden. Dieser Prozess wird oft durch Enzyme katalysiert, die von Bakterien oder anderen Organismen abgesondert werden. Diese speziellen Enzyme, sogenannte Exoenzyme, spalten die Bindungen in den polymeren Verbindungen auf, was zur Bildung von Monomeren oder Oligomeren führt. Während der Hydrolyse wird das Wasserstoffatom eines Wassermoleküls an ein Fragment der gespaltenen Bindung und die Hydroxylgruppe (OH-Gruppe) an das andere Fragment addiert. Dies erleichtert die Zerlegung von langkettigen Molekülen wie Proteinen, Kohlenhydraten und Lipiden in ihre grundlegenden Bausteine, die dann von den Zellen aufgenommen und weiterverarbeitet werden können. Dieser Prozess ist entscheidend für den Stoffwechsel vieler Organismen, da er die Verfügbarkeit von Nährstoffen erhöht, die für das Wachstum und die Energieproduktion benötigt werden.

Während der Acidogenese, einem der entscheidenden Schritte im anaeroben Abbau organischer Substanzen, werden die Hydrolyseprodukte, die aus der Hydrolysephase stammen, weiterverarbeitet. Diese Phase wird von fermentativen Bakterien dominiert, die die bereits zerkleinerten organischen Verbindungen aufnehmen. In einem komplexen biochemischen Prozess werden diese Verbindungen innerhalb der Bakterienzellen fermentiert, wobei eine Vielzahl von Zwischenprodukten entsteht. Zu den Hauptprodukten dieser Fermentation zählen organische Säuren, wie Essigsäure, Propionsäure, Buttersäure, und Alkohole. Diese Produkte bilden die Grundlage für die nachfolgenden Phasen des anaeroben Abbaus, insbesondere die Acetogenese und Methanogenese, in denen sie weiter zu Methan und Kohlendioxid abgebaut werden. Die Acidogenese spielt daher eine zentrale Rolle im gesamten Prozess, indem sie die hydrolysierten Moleküle in Formen umwandelt, die für die Methanbildung notwendig sind.

Während der Acetogenese handelt es sich um einen wichtigen biologischen Prozess, der in der anaeroben Umgebung abläuft und insbesondere in der mikrobakteriellen Welt eine zentrale Rolle spielt. In diesem Prozess wandeln bestimmte Mikroorganismen, sogenannte Acetogene, einfache organische Stoffe wie Wasserstoff ( $H_2$ ) und Kohlenstoffdioxid ( $CO_2$ ) in Essigsäure ( $CH_3COOH$ ) um. Die Fähigkeit dieser Mikroorganismen, Essigsäure zu produzieren, ist entscheidend für den Stoffkreislauf in anaeroben Ökosystemen und spielt eine wichtige Rolle im globalen Kohlenstoffzyklus. Diese Essigsäure kann dann von anderen Mikroorganismen, wie Methanogenen, weiterverarbeitet werden, die sie in Methan ( $CH_4$ ) umwandeln. Während der Acetogenese wird kein Wasserstoff freigesetzt; stattdessen wird Wasserstoff als Substrat verbraucht, um  $CO_2$  zu reduzieren und Essigsäure zu bilden. Ebenso werden keine Alkohole produziert, da die Hauptprodukte dieser Reaktion Essigsäure und Biomasse sind.

Die Methanogenese ist ein zentraler Prozess in der biologischen Umwandlung von organischem Material zu Methan, der hauptsächlich durch anaerobe Mikroorganismen, sogenannte Methanogene, durchgeführt wird. Während dieses Prozesses wird Essigsäure (Acetat) oder Wasserstoff ( $H_2$ ) und Kohlenstoffdioxid ( $CO_2$ ) in Methan ( $CH_4$ ) umgewandelt. Es gibt zwei Hauptwege, auf denen Methanogenese abläuft: der aceticlastic Pathway, bei dem Essigsäure direkt zu Methan und Kohlendioxid abgebaut wird, und der hydrogenotrophic Pathway, bei dem Wasserstoff als Elektronendonator dient und Kohlendioxid reduziert wird, um Methan zu produzieren. Langkettige

Verbindungen und komplexere organische Moleküle werden zuvor durch andere Mikroorganismen in Vorstufen wie Essigsäure, Wasserstoff und Kohlendioxid abgebaut, bevor sie von Methanogenen in Methan umgewandelt werden. Diese Prozesse sind entscheidend für die Produktion von Biogas, da Methan den Hauptbestandteil von Biogas bildet und somit eine wichtige Rolle bei der Energiegewinnung aus organischen Abfällen spielt.

Im Prozess des anaeroben Abbaus spielen sowohl acetogene als auch methanogene Bakterien eine entscheidende Rolle, wobei ihre Interaktionen besonders bemerkenswert sind. Acetogene Bakterien sind für die Umwandlung von organischen Stoffen, insbesondere Zucker und Aminosäuren, in Essigsäure (Acetat), Wasserstoff ( $H_2$ ) und Kohlendioxid ( $CO_2$ ) verantwortlich. Dieser Prozess ist essenziell, da er die benötigten Substrate für methanogene Bakterien bereitstellt. Methanogene Bakterien wiederum nutzen diese Substrate, insbesondere Acetat und  $H_2/CO_2$ , um Methan ( $CH_4$ ) zu produzieren. Diese beiden Bakteriengruppen bilden eine sogenannte syntrophe Lebensgemeinschaft, was bedeutet, dass sie in einer wechselseitig abhängigen Beziehung stehen. Die acetogenen Bakterien erzeugen durch ihre Stoffwechselprozesse Produkte, die von den methanogenen Bakterien als Energiequelle genutzt werden können. Gleichzeitig helfen die methanogenen Bakterien, die Konzentration der von den Acetogenen produzierten Wasserstoffgase zu senken, was die Effizienz des Stoffwechsels der Acetogenen verbessert. Diese Kooperation ist ein herausragendes Beispiel für biologische Arbeitsteilung und zeigt, wie Mikroorganismen in komplexen Gemeinschaften zusammenarbeiten, um den anaeroben Abbau organischer Stoffe effizient zu gestalten.

Beim anaeroben Abbau handelt es sich um einen biochemischen Prozess, bei dem organisches Material in Abwesenheit von Sauerstoff durch Mikroorganismen abgebaut wird. Dieser Prozess verläuft in mehreren Phasen: Hydrolyse, Acidogenese, Acetogenese und Methanogenese. Während der Hydrolyse werden große organische Moleküle in kleinere Einheiten zerlegt. In der Acidogenese werden diese Einheiten weiter zu flüchtigen Fettsäuren, Alkohol und Wasserstoff abgebaut. In der Acetogenese entstehen aus diesen Zwischenprodukten Essigsäure, Wasserstoff und Kohlendioxid. Schließlich, in der Methanogenese, wird die Essigsäure und der Wasserstoff von methanogenen Mikroorganismen in Methan und Kohlendioxid umgewandelt. Als Nebenprodukt dieses Prozesses bleiben Gärreste zurück, die hauptsächlich aus unabbaubaren organischen Substanzen und Mikroorganismen bestehen. Diese Gärreste können als Dünger in der Landwirtschaft verwendet werden. Daher sind die Hauptendprodukte des anaeroben Abbaus Gärreste, Methan und Kohlendioxid.

Beim Einfahren in eine Biogasanlage werden bestimmte Stationen durchlaufen, um sicherzustellen, dass die Anlieferung von organischen Materialien ordnungsgemäß und hygienisch abläuft. Zunächst wird das Fahrzeug in einem Desinfektionsbecken gereinigt, um mögliche Verunreinigungen und Keime zu entfernen, die von außen in die Anlage eingebracht werden könnten. Dies ist ein wichtiger Schritt, um die Hygiene und Sicherheit der gesamten Anlage zu gewährleisten. Anschließend wird das Fahrzeug auf eine Waage gefahren. Die Gewichtskontrolle ist essenziell, um die Menge des angelieferten Materials zu erfassen und zu dokumentieren. Diese Daten sind wichtig für die Abrechnung sowie für die Kontrolle der Kapazitäten und des Materialflusses innerhalb der Anlage. Durch diese beiden Schritte – Desinfektionsbecken und Waage – wird sichergestellt, dass nur saubere Fahrzeuge mit exakt erfasstem Ladegut in die Biogasanlage einfahren, was zu einem effizienten und sicheren Betriebsablauf beiträgt.

Ein Biofilter funktioniert, indem er Mikroorganismen nutzt, die sich auf einem speziellen Trägermaterial ansiedeln und dort die Geruchsstoffe aufnehmen und abbauen. Das Trägermaterial kann beispielsweise aus Rindenmulch, Kompost oder speziellen Kunststoffträgern bestehen. Wenn die Abluft durch den Biofilter strömt, kommen die darin enthaltenen Geruchsstoffe in Kontakt mit den Mikroorganismen. Diese Mikroorganismen nutzen die Geruchsstoffe als Nährstoffe, wodurch die Geruchsstoffe biologisch abgebaut werden. Dadurch werden unangenehme Gerüche effektiv reduziert oder vollständig entfernt. Im Gegensatz dazu wird bei anderen Methoden wie der Auswaschung mit Wasser oder der Reinigung

durch Membranen nicht der biologische Abbau der Geruchsstoffe genutzt, sondern physikalische oder chemische Prozesse zur Geruchsbeseitigung angewandt.

Biofilter werden in verschiedenen Anwendungen eingesetzt, um Umwelt- und Gesundheitsprobleme zu lösen, die durch industrielle Prozesse und biologische Abfälle verursacht werden. Ein Hauptgrund für den Einsatz von Biofiltern ist die Verminderung der Geruchsbelastung, die häufig durch die Zersetzung organischer Materialien entsteht. Diese Gerüche können nicht nur unangenehm sein, sondern auch die Lebensqualität in umliegenden Gebieten beeinträchtigen. Darüber hinaus tragen Biofilter zum Emissionsschutz bei, indem sie schädliche Emissionen wie flüchtige organische Verbindungen (VOCs) und andere Luftschadstoffe reduzieren, die bei der Verarbeitung von Industrieabfällen freigesetzt werden. Ein weiterer wesentlicher Vorteil der Biofilter ist die Vermeidung des Austritts giftiger Gase, die nicht nur die Umwelt schädigen, sondern auch erhebliche Gesundheitsrisiken für Menschen darstellen können. Durch den Einsatz von Biofiltern können diese Schadstoffe effektiv abgebaut und neutralisiert werden, bevor sie in die Atmosphäre gelangen, was sowohl den Schutz der Umwelt als auch die Gesundheit der Bevölkerung unterstützt.

Ein Regenwasserspeicher hat verschiedene potenzielle Anwendungen, die auf den spezifischen Anforderungen und der Infrastruktur einer Gemeinde oder eines Unternehmens basieren. Eine häufige Nutzung ist die Bereitstellung von Wasser für Feuerlöschteiche. Diese dienen als wichtige Wasserquelle für die Feuerwehr in Gebieten, in denen möglicherweise keine ausreichende Versorgung mit hydrantengebundenem Wasser vorhanden ist. Eine andere mögliche Anwendung von gesammeltem Regenwasser ist die Nutzung als Anmaischwasser in der Landwirtschaft oder Brauerei. Hierbei wird das Wasser für die Verarbeitung von Maisch verwendet, was eine effiziente und umweltfreundliche Nutzung von Wasserressourcen darstellt. Weniger üblich, aber theoretisch möglich, ist die Verwendung von Regenwasser als Trinkwasser, sofern es entsprechend gefiltert und gereinigt wird. Dies könnte in Regionen ohne ausreichende Trinkwasserquellen eine wichtige Rolle spielen. In der Praxis ist diese Anwendung jedoch aufwändiger und erfordert strenge Qualitätskontrollen, um die Gesundheit der Konsumenten zu gewährleisten.

Bei der Nassfermentation in einer Biothan-Anlage kommen verschiedene Ausgangsmaterialien zum Einsatz, die sich je nach spezifischer Anlage und ihrem Zweck unterscheiden können. Typischerweise handelt es sich bei diesen Materialien um organische Abfälle, die leicht zu einer fermentierbaren Substanz verarbeitet werden können. Zu den häufig verwendeten Ausgangsmaterialien zählen unter anderem Marktrückläufer und Lebensmittelfehlchargen, die aus abgelaufenen oder nicht mehr verkaufsfähigen Lebensmitteln bestehen und somit eine nachhaltige Entsorgungsmöglichkeit bieten. Auch Maissilage und Biertreber, Nebenprodukte der Landwirtschaft und Brauindustrie, sind gängige Materialien, da sie reich an organischer Substanz sind und eine effiziente Gasproduktion ermöglichen. Darüber hinaus werden auch Rohgülle und Speisereste häufig eingesetzt, da sie ebenfalls hohe Mengen an organischem Material enthalten und somit ideal für den Fermentationsprozess sind. All diese Materialien tragen durch ihre unterschiedlichen Eigenschaften dazu bei, dass der Fermentationsprozess effektiv abläuft und eine maximale Biogasproduktion erzielt wird.

Bei der Nassfermentation, einer Methode zur biotechnologischen Verarbeitung von Biomasse, spielt der Trockensubstanzgehalt eine wesentliche Rolle. Der Trockensubstanzgehalt gibt an, wie viel Prozent der Biomasse nach der Entfernung von Wasser übrig bleiben. Für eine effektive Nassfermentation sollte der Trockensubstanzgehalt relativ niedrig sein, da dies die Verfügbarkeit von Wasser für die Mikroorganismen erhöht, die für die Fermentationsprozesse notwendig sind. Ein niedriger Trockensubstanzgehalt bedeutet, dass die Biomasse mehr Wasser enthält, was die Stoffwechselaktivitäten der Mikroorganismen unterstützt und die Effizienz des Fermentationsprozesses steigert. Im Allgemeinen wird bei der Nassfermentation ein Trockensubstanzgehalt von weniger als 15 Gewichtsprozent bevorzugt. Diese Bedingung gewährleistet optimale Lebensbedingungen für die Mikroorganismen, fördert eine effiziente Zersetzung der organischen Materialien und maximiert die

Ausbeute der gewünschten Fermentationsprodukte. Daher ist die korrekte Antwort auf die Frage, welche Trockensubstanzgehalte bei der Nassfermentation verwendet werden, "< 15 Gew.-%".

Bei der Nassfermentation durchlaufen organische Reststoffe mehrere wichtige Schritte, um effizient in Biogas umgewandelt zu werden. Der Prozess beginnt mit der Annahme der organischen Reststoffe im Annahmehunker, wo sie gesammelt und zwischengelagert werden. Von dort aus werden die Materialien zur Hammermühle transportiert. In der Hammermühle werden die Reststoffe mechanisch zerkleinert und homogenisiert, um die nachfolgende Fermentation zu erleichtern. Nach der Zerkleinerung gelangen die Reststoffe in den Misch- oder Vorlagebehälter. In diesem Behälter werden die zerkleinerten Materialien weiter gemischt und aufbereitet, um optimale Bedingungen für die Fermentation zu schaffen. So wird sichergestellt, dass die organischen Reststoffe gleichmäßig verteilt und in einem geeigneten Zustand sind, um in den Fermenter überführt zu werden, wo die eigentliche Biogasproduktion stattfindet. Diese Schritte gewährleisten eine effiziente und effektive Umwandlung der organischen Reststoffe in Biogas.

Bei der Nassfermentation gibt es verschiedene Möglichkeiten, wie organische Reststoffe angenommen werden können. Diese Optionen sind auf die spezifischen Anforderungen der Nassfermentation abgestimmt, um eine effektive und effiziente Handhabung der Materialien zu gewährleisten. Ein Flachbunker ist eine verbreitete Methode zur Annahme von Feststoffen, die eine einfache Lagerung und Zuführung ermöglicht. Der Schüttguttrichter dient dazu, Schüttgüter wie Hackschnitzel oder andere zerkleinerte Materialien in den Prozess einzubringen, während der Rohgüllelagertank flüssige organische Reststoffe wie Gülle aufnimmt und zwischenspeichert, bevor sie weiterverarbeitet werden. Diese Kombination aus Lager- und Zuführungssystemen stellt sicher, dass sowohl feste als auch flüssige Materialien effektiv in den Fermentationsprozess integriert werden können.

Die Hammermühle spielt eine wichtige Rolle in der Nassfermentation, einem Prozess, der häufig in der Biogaserzeugung eingesetzt wird. Ihre Hauptfunktion ist die Zerkleinerung und Homogenisierung des angelieferten Materials, das als Substrat für den Fermentationsprozess dient. Dieses angelieferte Material kann eine Vielzahl von organischen Stoffen umfassen, darunter landwirtschaftliche Abfälle, Energiepflanzen und organische Reststoffe. Durch die Zerkleinerung des Materials mit der Hammermühle wird die Oberfläche des Substrats vergrößert, was die mikrobielle Zersetzung erleichtert und die Effizienz der Biogasproduktion steigert. Zudem ermöglicht die Homogenisierung eine gleichmäßigere Verteilung der Inhaltsstoffe im Fermenter, was ebenfalls zur Optimierung des biologischen Abbauprozesses beiträgt. Die Hammermühle sorgt somit dafür, dass das Material in einer geeigneten Form vorliegt, um die mikrobiellen Aktivitäten im Fermenter zu maximieren und die Biogasausbeute zu erhöhen.

Das ausgesiebte Material der Hammermühle in der Nassfermentation wird typischerweise nach der Trennung weiterverarbeitet. Dieses Material, das nicht direkt für die Fermentation genutzt werden kann, hat dennoch Potenzial zur energetischen Verwertung. Eine mögliche Verwendung ist die energetische Verwertung als Ersatzbrennstoff. Dabei wird das Material in der Heizkesselanlage der Anlage eingesetzt, um Wärme und Energie zu erzeugen. Dies stellt eine nachhaltige Nutzung dar, indem Abfallprodukte in wertvolle Energie umgewandelt werden, anstatt sie einfach zu entsorgen. Alternativ könnte das Material auch an externe Firmen weitergegeben werden, die auf Recycling spezialisiert sind, um es wiederzuverwerten und in den Produktionskreislauf zurückzuführen. Diese Vorgehensweise fördert eine Kreislaufwirtschaft und trägt zur Ressourcenschonung bei.

Die Dosierung der Reststoffe für die Anaerobstufe in der Nassfermentation erfordert eine präzise und kontrollierte Zufuhr der Materialien, um optimale Bedingungen für den biologischen Abbau zu gewährleisten. Der Vorlagebehälter spielt hierbei eine entscheidende Rolle. Er dient als Zwischenlager für die zu dosierenden Reststoffe und stellt sicher, dass diese in gleichmäßiger Menge und passender Konsistenz in die Anaerobstufe eingebracht werden. Durch diese kontrollierte Zufuhr können die Mikroorganismen im Fermenter effizient arbeiten und die Biomasse in Biogas umwandeln. Obwohl

auch andere Komponenten wie der Mischbehälter und die Exzentrerschneckenpumpe in der Prozesskette eine wichtige Rolle spielen, ist es der Vorlagebehälter, der spezifisch für die Dosierung verantwortlich ist. Der Mischbehälter sorgt für eine homogene Mischung der Substrate, während die Exzentrerschneckenpumpe eine kontinuierliche und druckstabile Förderung der Materialien gewährleistet. Jedoch ohne die genaue Dosierung durch den Vorlagebehälter könnten die optimalen Fermentationsbedingungen nicht erreicht werden.

Der Vorlagebehälter in der Nassfermentation übernimmt mehrere wichtige Funktionen im Prozess der Biogasproduktion. Eine seiner primären Aufgaben ist die kontinuierliche Bestückung des Anaerobbehälters, was sicherstellt, dass die Mikroorganismen im Fermenter stets mit frischem Material versorgt werden und so eine gleichmäßige Fermentation stattfinden kann. Darüber hinaus spielt der Vorlagebehälter eine wesentliche Rolle bei der Sedimentation von Störstoffen, indem er es ermöglicht, dass feste und schwerere Bestandteile im Substrat absinken, bevor das Material in den Fermenter gelangt. Dies trägt dazu bei, Probleme im Fermenter zu vermeiden und die Effizienz des gesamten Prozesses zu erhöhen. Eine weitere Funktion des Vorlagebehälters kann die Hygienisierung des Materials sein, bei der potenziell pathogene Mikroorganismen durch thermische oder chemische Behandlung abgetötet werden, bevor das Substrat in den Fermenter überführt wird. Diese Kombination von Aufgaben macht den Vorlagebehälter zu einer essenziellen Komponente in der Nassfermentation, um einen reibungslosen, effizienten und sicheren Fermentationsprozess zu gewährleisten.

Anaerobe Fermenter, die für die Nassfermentation verwendet werden, arbeiten typischerweise in bestimmten Temperaturbereichen, die entscheidend für die Effektivität des Fermentationsprozesses sind. Diese Temperaturbereiche werden in drei Hauptkategorien unterteilt: extremophil, thermophil und mesophil. Extremophile Mikroorganismen gedeihen bei extrem hohen oder niedrigen Temperaturen, die weit über oder unter den üblichen Umgebungsbedingungen liegen. Thermophile Mikroorganismen hingegen bevorzugen höhere Temperaturen, oft zwischen 50°C und 60°C, und werden häufig in Prozessen eingesetzt, die eine schnelle Zersetzung von organischem Material erfordern. Mesophile Mikroorganismen, die bei moderaten Temperaturen von etwa 20°C bis 45°C arbeiten, sind jedoch am häufigsten in anaeroben Fermentern der Nassfermentation anzutreffen. Der mesophile Bereich wird bevorzugt, da er eine stabile und effiziente Umgebung für den Abbau organischer Stoffe bietet und dabei weniger Energie für die Aufrechterhaltung der optimalen Temperaturen erfordert, was ihn sowohl wirtschaftlich als auch technisch vorteilhaft macht.

Um die Hygienisierung der Gärprodukte während der Pasteurisierung zu gewährleisten, sind spezifische Temperatur- und Zeitparameter einzuhalten. Pasteurisierung ist ein Verfahren zur Abtötung von Mikroorganismen durch Wärmebehandlung. Dabei ist die Temperatur ein entscheidender Faktor. Eine Temperatur von mindestens 70°C für mindestens eine Stunde sorgt dafür, dass die meisten pathogenen Keime abgetötet werden, ohne dass die Qualität des Produkts erheblich beeinträchtigt wird. Eine niedrigere Temperatur, wie 50°C, wäre für die Hygienisierung unzureichend, selbst wenn sie für eine Stunde aufrechterhalten wird, da viele Mikroorganismen diese Temperatur überleben können. Eine Temperatur von 80°C für weniger als eine Stunde könnte zwar effektiv sein, aber es gibt keine allgemein anerkannte Mindestzeit unter einer Stunde, die garantiert, dass alle pathogenen Keime abgetötet werden. Daher ist es entscheidend, mindestens 70°C für mindestens eine Stunde einzuhalten, um die Hygienisierung während der Pasteurisierung sicherzustellen.

Im Gärrestelager wird das flüssige Gärprodukt gespeichert. Dieses flüssige Gärprodukt entsteht als Reststoff bei der Biogasproduktion. Im Prozess der anaeroben Vergärung werden organische Materialien wie Pflanzenreste oder Gülle in einer Biogasanlage abgebaut. Dabei entsteht Biogas, das für Energiezwecke genutzt wird, und als Nebenprodukt bleibt eine flüssige Substanz übrig, die als Gärrest bezeichnet wird. Dieser Gärrest enthält noch wertvolle Nährstoffe und kann als Dünger in der Landwirtschaft verwendet werden. Daher wird er in speziellen Lagern, den Gärrestelagern, gesammelt und gespeichert, bis er weiterverwendet wird. Die Option a, Biogas, bezieht sich auf das Endprodukt

des Vergärungsprozesses, das zur Energieerzeugung genutzt wird, während organische Reststoffe, wie in Option c erwähnt, die ursprünglichen Materialien sind, die dem Prozess zugeführt werden, aber nicht das, was im Gärrestlager gespeichert wird.

Flüssigdünger, auch bekannt als Gülle oder flüssiger organischer Dünger, durchläuft vor der Ausbringung bestimmte Behandlungsschritte, um seine Qualität zu verbessern und seine Effizienz bei der Düngung zu maximieren. Ein wichtiger Behandlungsschritt ist die Entwässerung über eine Schneckenpresse. Dieser Prozess dient dazu, den Wassergehalt im Flüssigdünger zu reduzieren und feste Bestandteile zu entfernen. Durch die Entwässerung wird der Flüssigdünger konzentrierter, wodurch Transport- und Lagerkosten gesenkt werden können. Zudem wird die Geruchsentwicklung minimiert und die Handhabung erleichtert. Alternativ kann eine Feinabsiebung über eine Schneckenpresse durchgeführt werden, um kleinere Feststoffe aus dem Flüssigdünger zu entfernen, ohne jedoch den Wassergehalt signifikant zu verändern. Die Anreicherung mit zusätzlichen Nährstoffen ist ebenfalls eine Möglichkeit, den Flüssigdünger aufzuwerten, jedoch wird dieser Schritt in der Regel nach der Entwässerung oder Absiebung durchgeführt. Alle diese Schritte tragen dazu bei, die Effizienz und Umweltverträglichkeit des Flüssigdüngers zu verbessern, wobei die spezifische Behandlung je nach den Anforderungen des landwirtschaftlichen Betriebs variieren kann.

Die Ausbringung von Flüssigdünger hängt stark von den Wachstumszyklen der Pflanzen und den klimatischen Bedingungen ab. Pflanzen benötigen während ihrer Wachstumsperioden Nährstoffe, um optimal zu gedeihen. Im Frühjahr beginnt das aktive Wachstum vieler Pflanzen, weshalb in dieser Zeit die Versorgung mit Nährstoffen durch Flüssigdünger besonders wichtig ist. Im Sommer setzt sich das Wachstum fort, und auch hier kann eine zusätzliche Nährstoffversorgung notwendig sein, insbesondere bei stark zehrenden Pflanzen. Der Herbst ist ebenfalls eine wichtige Zeit für die Düngung, da viele Pflanzen nach der Ernte regenerieren und sich auf die Winterruhe vorbereiten müssen. Der Winter hingegen ist für die meisten Pflanzen eine Ruhephase, in der sie keine zusätzlichen Nährstoffe benötigen und der Boden durch die kalten Temperaturen oft gefroren ist, was die Aufnahme von Flüssigdünger erschwert. Daher ist die Ausbringung von Flüssigdünger vor allem im Frühjahr und Herbst sinnvoll, um den Pflanzen zu den entscheidenden Wachstumsphasen die nötigen Nährstoffe zuzuführen.

Enzyme sind komplexe Moleküle, hauptsächlich Proteine, die eine entscheidende Rolle im Stoffwechsel von Lebewesen spielen. Sie wirken als Katalysatoren, was bedeutet, dass sie biochemische Reaktionen beschleunigen, ohne dabei selbst verbraucht zu werden. Enzyme senken die Aktivierungsenergie, die für chemische Reaktionen notwendig ist, und ermöglichen so, dass diese Reaktionen unter den milden Bedingungen des Organismus effizient ablaufen können. Durch ihre spezifische Struktur sind Enzyme in der Lage, ganz bestimmte Substrate zu binden und in Produkte umzuwandeln, was sie hochspezialisiert und unerlässlich für zahlreiche lebenswichtige Prozesse macht, wie zum Beispiel die Verdauung von Nahrung, die DNA-Replikation und die Energieproduktion in Zellen.

Die Reaktionsgeschwindigkeit von enzymkatalysierten Reaktionen wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst, die eng miteinander verknüpft sind. Zunächst spielt die Substratkonzentration eine zentrale Rolle: Bei niedrigen Substratkonzentrationen steigt die Reaktionsgeschwindigkeit proportional zur Menge des verfügbaren Substrats, während sie bei hohen Konzentrationen abflacht, da das Enzym gesättigt wird. Auch die Substratzusammensetzung ist wichtig, da unterschiedliche Substrate verschieden stark an das Enzym binden können. Temperatur und Druck sind ebenfalls entscheidend, da Enzyme bei optimalen Temperaturen ihre maximale Aktivität entfalten und extreme Bedingungen zu Denaturierung oder Inaktivierung führen können. Der pH-Wert beeinflusst die Ionenstärke und damit die Ladung und Struktur des Enzyms, was sich auf die Bindung von Substraten und die katalytische Aktivität auswirkt. Zusammen bestimmen diese Faktoren die Effizienz und Geschwindigkeit enzymkatalysierter Reaktionen, indem sie die physikalische und chemische Umgebung des Enzyms beeinflussen.

Im Verlauf des anaeroben Abbaus erfahren Bakterien eine Änderung in ihrer Wachstumsgeschwindigkeit. Zu Beginn des Prozesses ist die Verfügbarkeit von leicht abbaubaren Substraten hoch, was zu einer schnellen Vermehrung der Bakterien führt. Im Verlauf des anaeroben Abbaus werden jedoch die leicht zugänglichen Nährstoffe aufgebraucht, und die Bakterien müssen auf weniger effiziente Energiequellen zurückgreifen. Zudem steigen die Konzentrationen von Abbauprodukten wie organischen Säuren und Gasen, die das Milieu für die Bakterien ungünstiger machen. Diese Faktoren führen dazu, dass die Wachstumsgeschwindigkeit der Bakterien zum Ende des anaeroben Abbaus hin abnimmt. Es wird zunehmend schwieriger für die Bakterien, sich zu vermehren, was zu einer Reduktion ihrer Wachstumsgeschwindigkeit führt.

Beim anaeroben Abbau von organischem Material durchläuft das Substrat mehrere Phasen: Hydrolyse, Acidogenese, Acetogenese und Methanogenese. Jede dieser Phasen ist entscheidend für die Umwandlung von komplexen organischen Molekülen zu Methan und Kohlendioxid. Der limitierende Schritt in diesem Prozess ist die Hydrolyse. Während der Hydrolyse werden komplexe organische Verbindungen wie Proteine, Kohlenhydrate und Lipide in einfachere lösliche Moleküle wie Zucker, Aminosäuren und Fettsäuren zerlegt. Diese Zersetzung erfolgt durch hydrolytische Mikroorganismen und Enzyme. Die Hydrolyse ist oft der langsamste Schritt, da sie von der Verfügbarkeit der hydrolytischen Enzyme und der physikalischen Struktur des Substrats abhängt. Große oder schwer abbaubare Moleküle erfordern mehr Zeit und Energie für die Zersetzung, was diesen Schritt häufig zum Engpass des gesamten Prozesses macht. In der Acetogenese und Methanogenese hingegen werden die bereits zerlegten Moleküle schneller zu Acetat und schließlich zu Methan und  $\text{CO}_2$  weiterverarbeitet. Daher kann die Effizienz der Hydrolyse den Gesamtprozess des anaeroben Abbaus erheblich beeinflussen und limitiert oft die Geschwindigkeit der gesamten Biogasproduktion.

Beim anaeroben Abbau von organischen Substraten ist es von entscheidender Bedeutung, die Substratdosierung genau zu beachten, um den Prozess stabil zu halten. Dies liegt daran, dass eine übermäßige Zufuhr von Substrat den pH-Wert des Systems drastisch beeinflussen kann. Besonders kritisch ist das Risiko, dass der pH-Wert in den sauren Bereich abfällt, was zu einer Übersäuerung des Milieus führt. Ein zu niedriger pH-Wert hemmt die Aktivität der Methanbakterien, die für die Produktion von Methan aus den Zwischenprodukten des Abbauprozesses verantwortlich sind. Diese Bakterien sind sehr empfindlich gegenüber pH-Wert-Schwankungen und arbeiten optimal in einem leicht neutralen bis leicht alkalischen Milieu. Wenn der pH-Wert zu stark abfällt, kann der gesamte Prozess „umkippen“, wodurch die Methanproduktion drastisch reduziert oder sogar ganz gestoppt wird. Daher ist es essenziell, die Substratdosierung so zu steuern, dass der pH-Wert stabil bleibt und die Methanbakterien nicht gehemmt werden.

Das Konzept des „Nadelöhrs“ des pH-Wertes bezieht sich auf eine Engstelle oder einen kritischen Punkt im Verlauf einer pH-Titrationskurve, an dem der pH-Wert besonders empfindlich auf die Zugabe von Säure oder Base reagiert. Dieser Punkt tritt typischerweise in der Nähe des Äquivalenzpunktes auf, wo die zugegebene Menge an Säure oder Base nahezu der Menge der in der Lösung vorhandenen Substanz entspricht. Der pH-Wert ändert sich hier besonders stark, weil die Pufferkapazität der Lösung minimal ist. Bei einer mehrstufigen Titration, beispielsweise einer Titration von mehrprotonigen Säuren oder Basen, gibt es mehrere solcher Punkte. Das „Nadelöhr“ liegt oft zwischen der zweiten und dritten Phase der Titrationskurve, da hier der zweite Äquivalenzpunkt erreicht wird und eine ähnliche empfindliche Reaktion des pH-Wertes beobachtet wird wie beim ersten Äquivalenzpunkt, der zwischen der ersten und zweiten Phase liegt. Dieses Verhalten ist besonders wichtig in der analytischen Chemie, da es präzise Messungen und Berechnungen ermöglicht.

Der pH-Wert spielt eine entscheidende Rolle im anaeroben Prozess, insbesondere weil verschiedene Gruppen von Mikroorganismen auf spezifische pH-Bedingungen angewiesen sind, um optimal zu funktionieren. Während des anaeroben Abbauprozesses sind insbesondere die acetogenen und methanogenen Bakterien empfindlich gegenüber niedrigen pH-Werten. Diese Mikroorganismen sind essentiell für die letzten Schritte des anaeroben Abbaus, bei dem organische Stoffe in Biogas



umgewandelt werden. Ein zu niedriger pH-Wert kann ihre Aktivität stark beeinträchtigen oder sogar zum Absterben dieser Bakterien führen, was den gesamten Prozess zum Erliegen bringen kann. Auf der anderen Seite reagieren hydrolytische und acidogene Bakterien, die für die ersten Schritte des Abbauprozesses verantwortlich sind, weniger empfindlich auf hohe pH-Werte, allerdings kann auch hier eine extrem hohe Alkalität problematisch sein. Daher ist die Überwachung und Regulierung des pH-Wertes von zentraler Bedeutung, um ein Gleichgewicht zu halten und den anaeroben Prozess effizient zu gestalten.

Der optimale pH-Wert für den anaeroben Abbau liegt typischerweise in einem Bereich, der leicht alkalisch ist, also leicht über dem neutralen Wert von 7. Ein pH-Wert im Bereich von 6,8 bis 7,4 wird oft als ideal angesehen, da dies das Wachstum und die Aktivität der anaeroben Mikroorganismen fördert. Wenn der pH-Wert zu niedrig ist (also unter 6,7 fällt), kann dies die Aktivität der methanogenen Bakterien hemmen, die für die Methanproduktion im anaeroben Abbauprozess entscheidend sind. Ein zu hoher pH-Wert kann jedoch auch problematisch sein, da er zu einem Ungleichgewicht im System führen kann. Daher sollte der pH-Wert während des anaeroben Abbaus sorgfältig überwacht und reguliert werden, um sicherzustellen, dass er innerhalb des optimalen Bereichs bleibt. Diese Bedingungen tragen dazu bei, eine effiziente Zersetzung der organischen Materie zu gewährleisten und die Methanproduktion zu maximieren.

Der anaerobe Abbau von organischem Material durch Mikroorganismen kann in verschiedenen Temperaturbereichen stattfinden, die jeweils unterschiedliche Mikrobenarten und Abbauraten begünstigen. Im mesophilen Bereich, der etwa zwischen 20°C und 45°C liegt, finden viele biologische Abbauprozesse statt, da diese Temperaturen für eine Vielzahl von Mikroorganismen, einschließlich vieler Bakterien und Pilze, ideal sind. Der thermophile Bereich erstreckt sich von etwa 45°C bis 70°C, wobei thermophile Mikroorganismen, die hohe Temperaturen bevorzugen, den Abbau übernehmen. Diese Organismen sind oft effizienter und schneller im Abbau von organischem Material als mesophile Mikroorganismen, was zu einer schnelleren Umwandlung und Methanproduktion führen kann. Extremophile Mikroorganismen, die bei extremen Temperaturen oder unter extremen Bedingungen leben, kommen in noch heißeren Umgebungen vor, typischerweise über 70°C. Solche Organismen sind an solche extremen Bedingungen angepasst und können den Abbau in Umgebungen vorantreiben, die für die meisten anderen Lebensformen unwirtlich sind. Jeder dieser Temperaturbereiche ermöglicht spezifischen Mikroorganismen die effiziente Zersetzung organischer Stoffe unter anaeroben Bedingungen, was den vielfältigen Einsatz anaerober Abbauprozesse in unterschiedlichen Umgebungen und Anwendungen erklärt.

Der optimale Temperaturbereich für den anaeroben Abbau hängt von verschiedenen Faktoren ab, darunter Prozessstabilität, Umsatzraten und der Aufwand für die Temperierung. Der mesophile Temperaturbereich, der etwa zwischen 20°C und 45°C liegt, bietet eine gute Balance zwischen diesen Faktoren. Er sorgt für stabile Prozesse bei gleichzeitig optimalen Umsatzraten und erfordert zudem weniger Energieaufwand für die Temperierung im Vergleich zu höheren Temperaturen. Im thermophilen Temperaturbereich, der zwischen 50°C und 70°C liegt, erfolgt der Abbau zwar intensiver, und es bietet die Möglichkeit der Hygienisierung, was bedeutet, dass schädliche Mikroorganismen effizienter abgetötet werden. Allerdings ist der thermophile Bereich oft mit höheren Energiekosten für die Aufrechterhaltung der Temperatur verbunden und kann zu einer geringeren Prozessstabilität führen, weshalb er sorgfältig überwacht werden muss. Letztendlich ist die Wahl des optimalen Temperaturbereichs eine Abwägung zwischen den spezifischen Anforderungen und Ressourcen des anaeroben Abbauprozesses.

Der thermophile Temperaturbereich, der bei Temperaturen zwischen 50 und 70 Grad Celsius liegt, bietet mehrere Vorteile für biologische und chemische Prozesse. Einer der wesentlichen Vorteile ist die höhere Umsatzrate. Bei diesen höheren Temperaturen sind die Mikroorganismen, die den Abbau organischer Materialien vornehmen, besonders aktiv und effizient, was zu schnelleren Reaktionsgeschwindigkeiten führt. Darüber hinaus erfolgt der Abbau organischer Substanzen

intensiver und schneller, was bedeutet, dass komplexe organische Materialien rascher in einfachere Moleküle zerlegt werden. Dies beschleunigt den gesamten Prozess der organischen Zersetzung erheblich. Ein weiterer entscheidender Vorteil ist die Hygienisierung des Gärrestes. Die hohen Temperaturen im thermophilen Bereich sind effektiv darin, pathogene Mikroorganismen abzutöten, wodurch der Gärrest hygienisch unbedenklich wird und sicherer für die weitere Nutzung oder Entsorgung ist. Diese Aspekte machen den thermophilen Temperaturbereich besonders vorteilhaft für industrielle und landwirtschaftliche Anwendungen, bei denen Effizienz und Sicherheit eine zentrale Rolle spielen.

Der Wasserstoffpartialdruck spielt eine entscheidende Rolle im anaeroben Abbau organischer Substanzen. Ein niedriger Wasserstoffpartialdruck ist wesentlich für den effizienten Ablauf dieses Prozesses. Während der Methanbildung wird Wasserstoff von methanogenen Mikroorganismen verbraucht, was den Wasserstoffpartialdruck niedrig hält. Diese Absenkung des Wasserstoffpartialdrucks ist entscheidend, da Acetogene, die Vorstufen von Methan produzieren, auf ein niedriges Wasserstoffniveau angewiesen sind, um effektiv zu arbeiten. Ein hoher Wasserstoffpartialdruck würde hingegen die Aktivität der Acetogenen hemmen, da sie unter solchen Bedingungen energetisch weniger effizient arbeiten können. Daher ist ein niedriger Wasserstoffpartialdruck sowohl für die Acetogenese als auch für die Methanogenese von großer Bedeutung, da er eine optimale Umgebung für den anaeroben Abbau und die Produktion von Methan schafft.

Beim anaeroben Abbau von organischem Material gibt es verschiedene Verfahren der Prozessführung, die jeweils spezifische Eigenschaften und Vorteile bieten. Erstens, der Prozess kann einstufig oder zweistufig durchgeführt werden. Im einstufigen Verfahren laufen alle biologischen Prozesse in einem Reaktor ab, während im zweistufigen Verfahren die Hydrolyse und Fermentation vom Methanogenese-Prozess getrennt werden, um eine bessere Kontrolle und Effizienz zu ermöglichen. Zweitens gibt es das trockene und das nasse Verfahren. Beim trockenen Verfahren wird mit höherem Feststoffanteil gearbeitet, was weniger Wasser und somit geringere Kosten für die Behandlung bedeutet. Das nasse Verfahren hingegen nutzt eine flüssige Phase und ist für Materialien mit hohem Wassergehalt besser geeignet. Schließlich gibt es den Batch- und den kontinuierlichen Betrieb. Beim Batch-Verfahren wird das Material in Chargen verarbeitet, wobei jede Charge eine bestimmte Zeit im Reaktor verbleibt. Der kontinuierliche Betrieb führt das Material kontinuierlich zu und ab, was zu einer gleichmäßigeren Produktion und effizienteren Nutzung des Reaktors führt. Jedes dieser Verfahren hat spezifische Anwendungsbereiche und kann je nach den Eigenschaften des zu behandelnden Materials und den gewünschten Ergebnissen gewählt werden.

Die Trockenfermentation ist ein Verfahren zur Erzeugung von Biogas, das sich durch die Nutzung fester organischer Materialien auszeichnet. Zu den Ausgangsmaterialien, die hierbei verwendet werden können, zählen unter anderem Marktrückläufer und Lebensmittelfehlchargen, biologische Abfälle der Biotonne sowie Getreidefehlchargen und Zuckerrübenfehlchargen. Alle diese Materialien haben gemeinsam, dass sie organische Stoffe enthalten, die bei der Zersetzung durch Mikroorganismen in einem anaeroben (sauerstofffreien) Umfeld Methan und andere Gase freisetzen. Marktrückläufer und Lebensmittelfehlchargen sowie Getreide- und Zuckerrübenfehlchargen sind häufige Ausgangsmaterialien, weil sie in großen Mengen anfallen und biologisch abbaubar sind. Ebenso sind biologische Abfälle aus der Biotonne eine wertvolle Ressource, da sie aus Küchen- und Gartenabfällen bestehen, die ebenfalls reich an organischen Stoffen sind. Insgesamt bieten diese Materialien eine effiziente Möglichkeit zur Biogasproduktion, da sie Abfälle reduzieren und gleichzeitig erneuerbare Energie erzeugen.

Die Trockenfermentation ist ein Prozess zur Gewinnung von Biogas aus organischen Abfällen mit einem hohen Feststoffanteil. Bei der Trockenfermentation werden spezifische Trockensubstanzgehalte angestrebt, um optimale Bedingungen für die mikrobiellen Aktivitäten zu schaffen, die für die Biogasproduktion verantwortlich sind. Der Trockensubstanzgehalt beschreibt den Anteil der festen

Bestandteile im Substrat, die nicht durch Wasser gebunden sind. Für eine effiziente Trockenfermentation sollte der Trockensubstanzgehalt in einem Bereich liegen, der die Mikrobiologie unterstützt, ohne die Durchlässigkeit des Materials zu beeinträchtigen. Ist der Gehalt zu niedrig, könnte dies auf eine Feuchtvergärung hindeuten, die andere technische Anforderungen hat. Ist er zu hoch, könnte es zu Problemen bei der Durchmischung und bei der Gasdiffusion kommen. Ein optimaler Bereich für die Trockenfermentation liegt daher typischerweise zwischen 25 und 40 Gew.-%. In diesem Bereich wird genügend Wasser bereitgestellt, um die Mikroorganismen zu unterstützen, während gleichzeitig genug Feststoffe vorhanden sind, um die spezifischen Vorteile der Trockenfermentation zu nutzen.

Bei der Trockenfermentation, einem Verfahren zur Biogasproduktion aus festen organischen Abfällen, können mehrere Probleme durch die Eigenschaften der Ausgangsstoffe auftreten. Ein häufiges Problem ist die hohe Störstoffbelastung, die durch nicht-organische Materialien wie Plastik, Metall oder Glas verursacht wird. Diese Störstoffe können die technischen Anlagen beschädigen und die Effizienz des Fermentationsprozesses beeinträchtigen. Ein weiterer kritischer Faktor ist der Wassergehalt der Ausgangsstoffe. Ein zu hoher Wassergehalt kann die Konsistenz des Materials verändern, was die Durchmischung und den Abbau der organischen Substanz erschwert und somit die Biogasproduktion reduziert. Schließlich kann auch der Eintrag von Sand und Steinen erhebliche Probleme verursachen. Diese schweren Partikel setzen sich oft am Boden der Fermenter ab, was zu Verstopfungen und mechanischen Problemen führt. Das Entfernen solcher Ablagerungen ist arbeitsintensiv und kostspielig, was die Wirtschaftlichkeit des Prozesses negativ beeinflussen kann. Insgesamt müssen die Ausgangsstoffe sorgfältig aufbereitet werden, um diese Probleme zu minimieren und eine effiziente Biogasproduktion sicherzustellen.

Bei der Trockenfermentation werden die angenommenen organischen Reststoffe in mehreren Schritten aufbereitet, um die Effizienz des Prozesses zu maximieren und hochwertige Gärprodukte zu erzeugen. Zunächst durchlaufen die Materialien eine Schredderanlage, wo sie in kleinere Partikel zerkleinert werden, um die Oberfläche für den mikrobiellen Abbau zu vergrößern. Anschließend erfolgt die Trennung von metallischen Verunreinigungen durch einen Magnetscheider, der sicherstellt, dass keine Metallteile den weiteren Prozess stören oder die Anlagen beschädigen. Schließlich werden die zerkleinerten und gereinigten Reststoffe durch ein Sternsieb geführt, das die Partikel nach Größe sortiert und somit eine homogene Ausgangsmasse für die Fermentation gewährleistet. Diese Schritte sind entscheidend, um eine effiziente und störungsfreie Trockenfermentation zu ermöglichen und qualitativ hochwertige Biogasprodukte zu erzielen.

Der Bunker bei der Trockenfermentation spielt eine entscheidende Rolle in der Aufrechterhaltung eines reibungslosen und effizienten Fermentationsprozesses. Einer seiner Hauptzwecke ist es, den kontinuierlichen Betrieb des Fermenters sicherzustellen, selbst an Tagen, an denen keine Materialanlieferungen erfolgen. Dies bedeutet, dass der Bunker als Puffer dient und somit Schwankungen in der Materialverfügbarkeit ausgleichen kann. Durch die Speicherung von ausreichend Material im Bunker wird gewährleistet, dass der Fermenter ständig mit frischem Material bestückt werden kann, was essenziell für einen stabilen und unterbrechungsfreien Abbauprozess ist. Diese Kontinuität ist besonders wichtig, da Unterbrechungen im Fermentationsprozess zu Ineffizienzen und einer verminderten Biogasproduktion führen könnten. Daher ist der Bunker ein kritisches Element, das den reibungslosen und kontinuierlichen Betrieb der Trockenfermentation absichert, indem er Ausgleich für Tage ohne Materialanlieferungen schafft.

Bei der Trockenfermentation handelt es sich um ein spezielles Verfahren zur anaeroben Vergärung von Biomasse mit hohem Feststoffanteil. Dabei wird das Substrat in einen Fermenter eingebracht, wo es unter Sauerstoffausschluss durch Mikroorganismen abgebaut wird, wobei Biogas entsteht. Ein wichtiger Aspekt dieses Verfahrens ist die Art des Fermenters, der zum Einsatz kommt. Ein kontinuierlicher Rührkessel, auch als CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor) bekannt, ist nicht geeignet, da er für Substrate mit hohem Wasseranteil und niedriger Viskosität ausgelegt ist und durch

ständiges Rühren eine homogene Mischung gewährleistet. Ebenso ungeeignet ist ein kontinuierlicher Rohrbehälter, der typischerweise für Flüssigkeiten und Gase verwendet wird und aufgrund seiner Konstruktion nicht mit der hohen Viskosität und den Feststoffen der Biomasse bei der Trockenfermentation zurechtkommt. Stattdessen wird häufig ein Pfpfenstrombehälter nach dem KOMPOGAS-Verfahren verwendet. Dieser ist speziell für die Verarbeitung von Biomasse mit hohem Feststoffanteil konzipiert und ermöglicht eine effiziente und kontinuierliche Vergärung, indem das Substrat in einem geschlossenen System durch den Fermenter transportiert wird. Hierbei entsteht ein gleichmäßiger „Pfpfenstrom“, der eine optimale Kontaktzeit mit den Mikroorganismen gewährleistet und so die Biogasproduktion maximiert.

In der Trockenfermentation, die häufig in der Biogasproduktion verwendet wird, variiert die Verweildauer des Materials im Fermenter abhängig von mehreren Faktoren wie der Art des eingesetzten Substrats, der Temperatur, den Betriebsbedingungen und dem Design des Fermenters. Im Allgemeinen bewegt sich die Verweildauer im Bereich von 20 bis 25 Tagen. Diese Dauer ist erforderlich, um sicherzustellen, dass die Mikroorganismen ausreichend Zeit haben, das organische Material effizient abzubauen und die maximale Menge an Biogas zu produzieren. Kürzere Verweildauern könnten zu einer unvollständigen Fermentation führen, während längere Verweildauern die Effizienz und Wirtschaftlichkeit des Prozesses beeinträchtigen könnten. Daher stellt eine Verweildauer von 20 bis 25 Tagen oft den optimalen Kompromiss zwischen einer vollständigen Fermentation und einer effizienten Biogasproduktion dar.

Die Trockenfermentation, auch als Feststoffvergärung bekannt, ist ein Prozess, bei dem organische Abfälle unter anaeroben Bedingungen abgebaut werden, um Biogas zu erzeugen. Dieser Prozess findet in speziellen Fermentern statt, die es ermöglichen, eine kontrollierte Umgebung für die Mikroorganismen zu schaffen, die für den Abbau der organischen Materie verantwortlich sind. Die Temperatur spielt hierbei eine entscheidende Rolle, da sie die Aktivität der Mikroorganismen direkt beeinflusst. Während der Trockenfermentation wird typischerweise eine Temperatur im Bereich von 40-42°C aufrechterhalten. Diese Temperatur ist ideal für die mesophile Vergärung, bei der mesophile Mikroorganismen am aktivsten sind und effektiv Abfall in Biogas umwandeln. Temperaturen um 35°C oder 55°C sind für andere Arten der Fermentation charakteristisch. Beispielsweise arbeiten psychrophile Mikroorganismen bei niedrigeren Temperaturen und thermophile Mikroorganismen bei höheren Temperaturen. Daher ist die optimale Temperatur für die Trockenfermentation spezifisch auf die Aktivität der mesophilen Mikroorganismen abgestimmt, was den Bereich von 40-42°C zur besten Wahl macht.

In der Trockenfermentation zur Biogaserzeugung sind mehrere Prozessschritte involviert, die verschiedene Funktionen erfüllen. Einer dieser Schritte, der speziell die Kompostierung des Gärmaterials ermöglicht, ist die Fest-/Flüssigtrennung. Bei diesem Schritt wird das feste Gärmaterial vom flüssigen Gärsubstrat getrennt. Diese Trennung ist entscheidend, da das feste Material nach dem Fermentationsprozess eine Konsistenz aufweist, die sich ideal für die Kompostierung eignet. Durch die Fest-/Flüssigtrennung wird das feste Gärmaterial entwässert und aufbereitet, sodass es stabiler ist und sich besser kompostieren lässt. Im Gegensatz dazu sorgen Schritte wie die Überdrucksicherung für den sicheren Betrieb der Fermentationsanlage und die Anmischung für das Mischen und Aufbereiten des Ausgangsmaterials, aber sie tragen nicht direkt zur Kompostierung des festen Gärmaterials bei. Durch die Trennung wird das Material so vorbereitet, dass es anschließend effektiv kompostiert werden kann, was eine nachhaltige und umweltfreundliche Methode zur Verwertung von Gärresten darstellt.

Kompostierung dient mehreren wichtigen Zwecken, von denen jeder eine entscheidende Rolle in der Abfallbewirtschaftung und dem ökologischen Kreislauf spielt. Zum einen führt die Kompostierung zu einem vollständigen Abbau organischer Materialien, wodurch wertvolle Nährstoffe in den Boden zurückgeführt werden und der Humusgehalt erhöht wird. Dies fördert die Bodenfruchtbarkeit und unterstützt das Pflanzenwachstum. Ein weiterer wesentlicher Zweck der Kompostierung ist die Reduktion des Restgaspotentials. Durch den kontrollierten Abbau organischer Abfälle werden

klimaschädliche Gase wie Methan reduziert, die sonst bei der Deponierung dieser Abfälle entstehen könnten. Somit trägt die Kompostierung aktiv zum Klimaschutz bei. Zusätzlich dient die Kompostierung als eine Form der Rechtfertigung und Vorbereitung für die Vergärung, indem das Material zunächst stabilisiert und dessen Zusammensetzung optimiert wird, bevor es in Biogasanlagen weiterverarbeitet wird. Dies gewährleistet eine effizientere Biogasproduktion und verbessert die Gesamteffizienz des Abfallbehandlungsprozesses. Insgesamt zeigt sich, dass die Kompostierung ein wesentliches Element in der nachhaltigen Abfallwirtschaft und im Umweltschutz ist.

Die Kompostierung durchläuft zwei zentrale Phasen, die wesentlich für den Abbau organischer Materialien und die Bildung von Kompost sind. Die erste Phase ist die sogenannte "Intensivrotte", die auch als "Heißrotte" bezeichnet wird. In dieser Phase findet eine intensive mikrobielle Aktivität statt, bei der Mikroorganismen wie Bakterien und Pilze die leicht abbaubaren organischen Substanzen zersetzen. Dieser Prozess erzeugt viel Wärme, wodurch die Temperatur im Komposthaufen auf bis zu 70 Grad Celsius ansteigen kann. Diese hohen Temperaturen sind entscheidend, da sie pathogene Keime und Unkrautsamen abtöten. Die zweite Phase ist die "Nachrotte" oder "Reifephase". In dieser Phase nimmt die mikrobielle Aktivität ab und der Kompost kühlt sich allmählich ab. Hier erfolgt die weitere Zersetzung der stabileren organischen Materialien und die Bildung von Humus, einem wichtigen Bestandteil des fertigen Komposts. Während der Nachrotte wird der Kompost stabiler und erhält seine endgültige Struktur und Nährstoffzusammensetzung, wodurch er schließlich als hochwertiger Bodenverbesserer verwendet werden kann.

Der Prozess, den der Kompost vor der Ausbringung durchläuft, umfasst mehrere wichtige Schritte, um sicherzustellen, dass er als hochwertiger Dünger verwendet werden kann. Zunächst wird der Kompost einer Störstoffabtrennung unterzogen, bei der unerwünschte Materialien wie Plastik, Glas und Metall entfernt werden. Dies ist ein entscheidender Schritt, da solche Störstoffe die Qualität des Komposts erheblich beeinträchtigen und sogar schädlich für Pflanzen und Boden sein können. Nach der Störstoffabtrennung kann der Kompost gegebenenfalls weiter bearbeitet werden, um seine Nährstoffzusammensetzung zu optimieren. Dies kann durch Zugabe von bestimmten Nährstoffen oder durch Mischen mit anderen Materialien erfolgen, um die ideale Balance für spezifische landwirtschaftliche Anwendungen zu erreichen. Schließlich wird der Kompost vor der Ausbringung nicht gepresst, da dies die Struktur des Komposts und seine Wirksamkeit als Bodenverbesserer beeinträchtigen könnte. Zusammengefasst durchläuft der Kompost vor der Ausbringung eine sorgfältige Störstoffabtrennung, um seine Reinheit und Effektivität als natürlicher Dünger sicherzustellen.

Der Unterschied zwischen aeroben und anaeroben Abbau liegt in den Bedingungen, unter denen organisches Material abgebaut wird, und den beteiligten Mikroorganismen. Aerober Abbau findet in Gegenwart von Sauerstoff statt, während anaerober Abbau unter Ausschluss von Sauerstoff erfolgt. Beim aeroben Abbau zersetzen Mikroorganismen organisches Material unter Nutzung von Sauerstoff, was zur Produktion von Kohlendioxid, Wasser und Wärme führt. Dieser Prozess ist effizienter und schneller als der anaerobe Abbau und wird oft in Kompostieranlagen verwendet. Anaerober Abbau hingegen erfolgt in sauerstofffreien Umgebungen, wie sie in Deponien oder speziellen Biogasanlagen zu finden sind. Hierbei produzieren Mikroorganismen Methan, Kohlendioxid und andere Nebenprodukte. Anaerobe Prozesse sind langsamer und weniger effizient im Abbau, führen jedoch zur Gewinnung von Biogas, das als erneuerbare Energiequelle genutzt werden kann. Beide Abbauarten benötigen Mikroorganismen, um den Abbauprozess durchzuführen. Weder die Aussage, dass beim aeroben Abbau kein technischer Energiegewinn stattfindet, noch dass kein organisches Material abgebaut wird, noch dass keine Mikroorganismen benötigt werden, trifft zu.

Der aerobe Abbau ist ein biologischer Prozess, bei dem organische Substanzen durch Mikroorganismen unter Einwirkung von Sauerstoff zersetzt werden. Dieser Abbauvorgang spielt eine wesentliche Rolle in der Umwelt, da er die Umwandlung von komplexen organischen Verbindungen in einfachere, stabilere Formen ermöglicht, die wiederum von Pflanzen und anderen Organismen genutzt werden können.

Heterotrophe Mikroorganismen, die organische Stoffe als Energiequelle nutzen, sind hierbei von zentraler Bedeutung. Sie benötigen Sauerstoff, um ihre Stoffwechselprozesse durchzuführen und Energie zu gewinnen. Durch den aeroben Abbau werden Kohlenstoffdioxid, Wasser und Energie freigesetzt, was zur Reduktion organischer Abfälle und zur Erhaltung des ökologischen Gleichgewichts beiträgt. Dieser Prozess unterscheidet sich wesentlich vom anaeroben Abbau, bei dem der Abbau ohne Sauerstoff erfolgt und oft zur Bildung von Methan und anderen Gärungsprodukten führt. Die Kenntnis des aeroben Abbaus ist insbesondere in der Abfallwirtschaft und in der biologischen Abwasserbehandlung von großer Bedeutung.

Der aerobe Abbau bezeichnet den biologischen Prozess, bei dem organisches Material durch Mikroorganismen unter Anwesenheit von Sauerstoff zersetzt wird. Dies führt zur Umwandlung von komplexen organischen Stoffen in einfachere Verbindungen wie Kohlendioxid, Wasser und Mineralien. Der Begriff, der synonym für den aeroben Abbau verwendet wird, ist "Kompostierung". Dies ist ein natürlicher Prozess, bei dem organische Abfälle durch Mikroorganismen in nährstoffreichen Humus umgewandelt werden. Während der Kompostierung benötigen die Mikroorganismen Sauerstoff, um effizient zu arbeiten, was den Prozess aeroben macht. Im Gegensatz dazu bezieht sich die Fermentation auf den anaeroben Abbau, bei dem kein Sauerstoff benötigt wird, und die Hydrolyse beschreibt lediglich die chemische Spaltung von Verbindungen durch Reaktion mit Wasser. Daher ist "Kompostierung" der korrekte Begriff, der den aeroben Abbau synonym beschreibt.

Bei der Bewertung der Qualität von Kompost werden mehrere wichtige Kriterien berücksichtigt, um sicherzustellen, dass das Endprodukt sowohl sicher als auch effektiv ist. Erstens ist die hygienische Unbedenklichkeit von entscheidender Bedeutung, was bedeutet, dass der Kompost frei von Krankheitserregern und weitgehend frei von Verunreinigungen sein muss. Dies gewährleistet, dass der Kompost für die Nutzung in der Landwirtschaft oder im Gartenbau sicher ist und keine Gesundheitsrisiken für Menschen, Tiere oder Pflanzen darstellt. Zweitens spielt der Gehalt an potenziellen Schadstoffen eine zentrale Rolle. Ein niedriger Gehalt an Schadstoffen wie Schwermetallen ist erforderlich, um Umweltbelastungen zu vermeiden und die langfristige Bodenfruchtbarkeit zu erhalten. Gleichzeitig sollte der Kompost einen ausgewogenen Gehalt an Nährstoffen aufweisen, um als effektiver Dünger dienen zu können. Schließlich ist die gleichbleibende Produktqualität ein weiteres wesentliches Kriterium. Dies bedeutet, dass der Kompost eine konsistente Zusammensetzung und Struktur haben sollte, um eine zuverlässige Leistung zu gewährleisten. Auch die Lagerfähigkeit des Komposts ist von Bedeutung, da dies die Handhabung und Lagerung erleichtert und die Nutzbarkeit über längere Zeiträume hinweg sicherstellt. Zusammenfassend lassen sich die Qualitätskriterien für Kompost in hygienische Sicherheit, niedrigen Schadstoffgehalt, ausgewogene Nährstoffzusammensetzung, gleichbleibende Qualität und gute Lagerfähigkeit zusammenfassen.

Das semidynamische Verfahren bei der Kompostierung bezeichnet eine Methode, bei der das Rottegut, also das organische Material, das kompostiert wird, in bestimmten Zeitabständen bewegt wird. Diese Bewegungen sind weniger häufig und kontinuierlich im Vergleich zu vollständig dynamischen Verfahren, bei denen das Material ständig umgewälzt wird. Im semidynamischen Ansatz wird das Rottegut periodisch umgeschichtet, um die Belüftung zu verbessern und den Kompostierungsprozess zu optimieren. Diese Methode ermöglicht eine bessere Kontrolle der Temperatur und Feuchtigkeit im Komposthaufen, was zu einer effizienteren Zersetzung des organischen Materials führt. Die regelmäßigen, aber nicht kontinuierlichen Bewegungen sorgen dafür, dass die Mikroorganismen im Rottegut ausreichend Sauerstoff erhalten und dadurch ihre Arbeit effektiver verrichten können.

Der Begriff "Miete" hat verschiedene Bedeutungen, je nach Kontext. Im Bereich der Abfallwirtschaft und Kompostierung bezeichnet "Miete" einen bestimmten Prozess oder Zustand. Eine Miete ist keine Aufschüttung von Abfallstoffen, wie es bei einer Deponie der Fall wäre. Auch steht der Begriff nicht synonym für den Kompostierungsprozess insgesamt, der verschiedene Schritte und Verfahren umfasst. Stattdessen bezeichnet "Miete" im Zusammenhang mit Kompostierung eine spezifische Methode oder einen Zustand im Verlauf des Prozesses. Es handelt sich hierbei um einen Haufen organischen

Materials, der zur Kompostierung aufgeschichtet wird und dabei regelmäßig belüftet und umgeschichtet wird, um die Verrottung zu fördern. Am Ende dieses Prozesses entsteht fertiger Kompost, der ebenfalls als Miete bezeichnet werden kann. Somit beschreibt der Begriff "Miete" letztlich den fertigen Kompost, der aus dieser organischen Materialaufbereitung hervorgegangen ist.

Die Intensivrotte ist eine entscheidende Phase im Kompostierungsprozess, bei der organisches Material durch mikrobiellen Abbau intensiv zersetzt wird. Während dieser Phase ist die mikrobielle Aktivität am höchsten, was zu einer erheblichen Freisetzung von Wärme führt und die Temperaturen im Komposthaufen auf bis zu 70 °C ansteigen lassen kann. Diese hohe Temperatur hilft dabei, pathogene Keime abzutöten und Unkrautsamen zu zerstören. Die Dauer der Intensivrotte hängt von verschiedenen Faktoren ab, darunter die Art und Menge des Ausgangsmaterials, die Feuchtigkeit, die Belüftung und die Temperaturverhältnisse. Allgemein dauert die Intensivrotte typischerweise zwischen 7 und 21 Tagen. In der Regel wird sie aber nicht kürzer als eine Woche und kann, je nach Bedingungen, bis zu drei Wochen dauern. Diese Zeitspanne gewährleistet, dass das organische Material ausreichend zersetzt und die Hygieneanforderungen erfüllt werden, bevor der Kompost in die Reifungsphase übergeht, in der die weitere Stabilisierung und Vererdung erfolgt.

Der Wassergehalt ist ein entscheidender Faktor für den erfolgreichen Kompostierungsprozess, da er die mikrobiellen Aktivitäten beeinflusst. Ein zu niedriger Wassergehalt führt dazu, dass die Mikroorganismen nicht effektiv arbeiten können, da sie ein feuchtes Milieu für ihre Stoffwechselprozesse benötigen. Auf der anderen Seite kann ein zu hoher Wassergehalt die Sauerstoffzufuhr behindern und zu anaeroben Bedingungen führen, was unangenehme Gerüche und eine Verlangsamung des Kompostierungsprozesses zur Folge haben kann. Studien und praktische Erfahrungen haben gezeigt, dass ein Wassergehalt im Bereich von 40 – 65 Gewichtsprozent optimal ist, um die besten Bedingungen für die Mikroorganismen zu schaffen und eine effiziente Zersetzung des organischen Materials zu gewährleisten. Daher wird empfohlen, den Wassergehalt innerhalb dieses Bereichs zu halten, um eine erfolgreiche Kompostierung zu fördern.

Während des Kompostierungsprozesses durchläuft das organische Material mehrere Phasen der Zersetzung. Die anfängliche Phase, bekannt als "Intensivrotte", ist durch eine hohe mikrobielle Aktivität gekennzeichnet, bei der die Temperatur aufgrund der intensiven biologischen Prozesse stark ansteigt. Diese Phase ist entscheidend für den schnellen Abbau von leicht abbaubaren organischen Materialien. Nach dieser intensiven Phase folgt die "Hauptrotte", in der die Zersetzung weiter fortschreitet, aber die Abbaugeschwindigkeit allmählich abnimmt, da die leichter abbaubaren Substanzen bereits größtenteils zersetzt sind. Schließlich tritt die "Nachrotte" ein, in der die Abbauleistung deutlich zurückgeht. Diese Phase ist gekennzeichnet durch eine weitere Stabilisierung des Materials, eine Abnahme der mikrobiellen Aktivität und eine Abkühlung des Komposts. In der Nachrotte werden die letzten schwer abbaubaren organischen Reste zersetzt, und das Material reift zu stabilem Humus heran.

Der Begriff "Luftporenvolumen" beschreibt den Anteil des Volumens eines Bodens oder eines anderen porösen Materials, der von Luft gefüllt ist. Dieses Konzept ist besonders relevant in der Agrarwissenschaft und Bodenkunde, da es entscheidend für die Belüftung des Bodens ist, die wiederum das Wachstum von Pflanzenwurzeln und die Aktivität von Bodenorganismen beeinflusst. Ein ausreichendes Luftporenvolumen stellt sicher, dass genügend Sauerstoff im Boden vorhanden ist, um die Atmung der Wurzeln und die Aktivität aerober Mikroorganismen zu unterstützen. Somit kann die Sauerstoffversorgung für Mikroorganismen im Rahmen von Prozessen wie der Rotte, bei der organisches Material zersetzt wird, gesichert werden. Dieses Verständnis ist wichtig, um die Bodenqualität zu bewerten und geeignete Maßnahmen zur Bodenverbesserung zu ergreifen.

Während der sechswöchigen Nachkompostierung ist es wichtig, die Kompostmieten regelmäßig umzusetzen, um den Zersetzungsprozess gleichmäßig zu fördern und eine homogene Verteilung von Feuchtigkeit und Mikroorganismen zu gewährleisten. Das Umsetzen der Mieten trägt auch dazu bei, Sauerstoff in den Kompost zu bringen, was für die aerobe Zersetzung notwendig ist. Wird dies nicht

regelmäßig getan, kann es zu einer ungleichmäßigen Kompostierung und sogar zu Geruchsproblemen kommen. Durch das Umsetzen kann man auch sicherstellen, dass höhere Temperaturen, die für die Abtötung von Pathogenen notwendig sind, gleichmäßig im gesamten Komposthaufen erreicht werden. In der Regel wird während der sechswöchigen Nachkompostierung die Miete mehrmals umgesetzt, um die bestmöglichen Bedingungen für die Zersetzung zu schaffen und ein hochwertiges Endprodukt zu erhalten.

Biogas ist ein vielseitiger und erneuerbarer Energiequelle, die durch die anaerobe Zersetzung von organischen Materialien wie Pflanzenresten, Mist, und Abfallstoffen produziert wird. Dieser Prozess erfolgt in Abwesenheit von Sauerstoff, wodurch verschiedene Gase freigesetzt werden. Die Hauptbestandteile von Biogas sind Methan ( $\text{CH}_4$ ) und Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ). Methan, ein farbloses und geruchloses Gas, ist der primäre Energieträger in Biogas und macht etwa 50-75% der Zusammensetzung aus. Es ist leicht entzündlich und wird daher als Brennstoff genutzt. Kohlenstoffdioxid hingegen, das etwa 25-50% des Biogases ausmacht, ist nicht brennbar, trägt jedoch zur Gesamtmasse des Gases bei. In geringen Mengen können auch andere Gase wie Wasserstoff ( $\text{H}_2$ ), Stickstoff ( $\text{N}_2$ ), Sauerstoff ( $\text{O}_2$ ) und Spuren von Schwefelwasserstoff ( $\text{H}_2\text{S}$ ) im Biogas enthalten sein, aber sie spielen eine untergeordnete Rolle. Die Zusammensetzung des Biogases hängt stark von den Ausgangsmaterialien und den Bedingungen des Zersetzungsprozesses ab.

Biogas besteht hauptsächlich aus Methan ( $\text{CH}_4$ ) und Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ), aber es enthält auch eine Vielzahl von anderen Gasen in sehr geringen Mengen. Diese geringfügigen Bestandteile resultieren aus dem komplexen biologischen Abbauprozess organischen Materials durch Mikroorganismen. Wasserdampf ist fast immer in Biogas vorhanden, da der Abbauprozess in wässrigen Umgebungen stattfindet und Wasser als Nebenprodukt freigesetzt wird. Sauerstoff kann in geringen Mengen enthalten sein, insbesondere wenn der Prozess nicht vollständig anaerob abläuft. Stickstoff wird oft in Spuren gefunden, da er ein Bestandteil der Luft ist und bei der Erzeugung des Biogases in das System gelangen kann. Ammoniak entsteht als Nebenprodukt der Zersetzung stickstoffhaltiger Verbindungen im organischen Material. Wasserstoff ist ebenfalls ein mögliches Nebenprodukt des Abbauprozesses, insbesondere in den anfänglichen Phasen der Fermentation. Schließlich ist Schwefelwasserstoff ein häufiges Nebenprodukt, das durch den Abbau schwefelhaltiger Verbindungen im organischen Material gebildet wird. Schwefelwasserstoff ist besonders bedeutend wegen seines unangenehmen Geruchs und seiner Korrosivität, die besondere Maßnahmen zur Gasaufbereitung erforderlich machen. Diese vielfältigen Bestandteile beeinflussen die Eigenschaften und die Nutzbarkeit von Biogas und erfordern spezielle Aufbereitungs- und Sicherheitsmaßnahmen.

Der Hauptunterschied zwischen Methan und Kohlenstoffdioxid liegt in ihren chemischen und physikalischen Eigenschaften sowie ihren Auswirkungen auf die Umwelt. Methan ( $\text{CH}_4$ ) ist ein farbloses, geruchloses Gas, das als bedeutendes Treibhausgas und in der Atmosphäre als potentes Treibhausgas bekannt ist. Es hat eine viel höhere Wärmefalleffizienz als Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ), obwohl es in geringeren Mengen in der Atmosphäre vorhanden ist. Ein besonders markanter Unterschied ist jedoch die Entflammbarkeit: Methan ist hochentzündlich und kann leicht mit Luft explosive Gemische bilden, was es in vielen industriellen Anwendungen und im Alltag gefährlich macht. Im Gegensatz dazu ist Kohlendioxid ein nicht brennbares, farbloses und geruchloses Gas, das hauptsächlich als Produkt der Verbrennung fossiler Brennstoffe entsteht und eine wesentliche Rolle im Kohlenstoffkreislauf der Erde spielt. Beide Gase haben erhebliche Auswirkungen auf den Klimawandel, doch Methan's Rolle als hochentzündliches Gas und seine hohe Treibhauspotenz heben es besonders hervor.

Schwefelwasserstoff ( $\text{H}_2\text{S}$ ) ist eine gefährliche Chemikalie, die besondere Vorsicht erfordert, da sie eine Kombination von Risiken aufweist, die sowohl die menschliche Gesundheit als auch die Sicherheit erheblich bedrohen. Eine der wichtigsten Eigenschaften von Schwefelwasserstoff ist seine hohe Toxizität, selbst in sehr geringen Konzentrationen. Schon ab einer Konzentration von 10-20 ppm (parts per million) können Menschen erste Symptome wie Kopfschmerzen und Schwindel verspüren, während höhere Konzentrationen schnell zu schweren Vergiftungen und sogar zum Tod führen können.



Zudem ist Schwefelwasserstoff leicht entzündlich und kann sich in Gegenwart einer Zündquelle entzünden, was das Risiko von Bränden oder Explosionen erhöht. Ein weiterer kritischer Aspekt ist die Dichte von Schwefelwasserstoff, da es schwerer als Luft ist und sich deshalb in Bodennähe oder in schlecht belüfteten Räumen ansammeln kann. Dies führt dazu, dass Menschen in solchen Bereichen unbemerkt hohen Konzentrationen ausgesetzt sein können, was das Risiko für Vergiftungen und gesundheitliche Schäden weiter erhöht. Daher ist es unerlässlich, Schwefelwasserstoff sorgfältig zu überwachen und geeignete Sicherheitsmaßnahmen zu ergreifen, um die damit verbundenen Gefahren zu minimieren.

Das Hauptunterscheidungsmerkmal zwischen Produkt- und Rohbiogas liegt in der Aufbereitung. Rohbiogas wird direkt aus dem Prozess der anaeroben Vergärung von organischen Materialien gewonnen und enthält eine Vielzahl von Verunreinigungen wie Schwefelwasserstoff, Kohlendioxid, Ammoniak und Wasserdampf. Dieses unaufbereitete Biogas kann aufgrund seiner Zusammensetzung und der enthaltenen Schadstoffe nicht direkt in das Erdgasnetz eingespeist oder als hochwertiger Brennstoff verwendet werden. Um es in diesen Anwendungen nutzen zu können, muss es umfassend gereinigt und aufbereitet werden. Während dieses Aufbereitungsprozesses werden die unerwünschten Komponenten entfernt und der Methangehalt erhöht, um die Qualitätsstandards zu erfüllen, die für die Einspeisung in das Erdgasnetz oder für den Einsatz als Treibstoff erforderlich sind. Daher ist die Aufbereitung der wesentliche Unterschied zwischen Produktbiogas, das gebrauchsfertig ist, und Rohbiogas, das noch bearbeitet werden muss.

Schwachgas bezieht sich auf eine spezifische Form von Biogas. Biogas ist ein gasförmiges Brennstoffgemisch, das durch den anaeroben Abbau von organischem Material wie Abfällen oder Energiepflanzen in Biogasanlagen entsteht. Der Begriff "Schwachgas" wird verwendet, um Biogas zu beschreiben, das eine relativ niedrige Methankonzentration aufweist, typischerweise unter 50%. Diese niedrige Methankonzentration macht das Gas weniger energiereich im Vergleich zu aufbereitetem Biogas, das einen höheren Methangehalt hat und somit effizienter als Brennstoff genutzt werden kann. Schwachgas kann entstehen, wenn das Biogas nicht weiter aufbereitet wird, um den Methangehalt zu erhöhen. Es kann auch vorkommen, wenn das Gas aus bestimmten Quellen wie Gärrestlagern stammt und direkt ins Heizhaus geleitet wird, ohne vorherige Aufbereitung. Daher bezieht sich der Begriff „Schwachgas“ im Wesentlichen auf Biogas mit einem niedrigen Energiegehalt, das in bestimmten Situationen nicht die gleiche Effizienz bietet wie aufbereitetes Biogas.

Um die genaue Konzentration von Methan im Produktgas zu bestimmen, ist es notwendig, den Produktionsprozess und die spezifischen Bedingungen, unter denen das Gas hergestellt wird, zu berücksichtigen. In vielen industriellen Prozessen, wie z.B. bei der Herstellung von Biogas oder der Erdgasaufbereitung, wird ein hoher Methangehalt im Produktgas angestrebt. Typischerweise kann der Methangehalt im Produktgas bei optimalen Bedingungen über 96 % betragen, insbesondere wenn effiziente Reinigungs- und Aufbereitungsmethoden eingesetzt werden, um Verunreinigungen zu entfernen. Ein Methangehalt von über 85 % ist ebenfalls üblich, jedoch weist ein solcher Wert auf eine weniger gründliche Aufbereitung oder die Anwesenheit von anderen Gasen wie CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, oder Spuren von Schwefelverbindungen hin. Werte unter 90 % würden typischerweise auf eine signifikante Präsenz von Verunreinigungen oder ineffiziente Aufbereitungsverfahren hindeuten. Daher, unter Berücksichtigung der typischen industriellen Standards und der Effizienz moderner Technologien, würde man erwarten, dass der Methangehalt im Produktgas häufig über 96 % liegt, sofern die Prozesse optimiert und kontrolliert sind.

Die Gasfackel dient in erster Linie der Betriebssicherheit. Gasfackeln werden in Industrieanlagen wie Raffinerien, chemischen Fabriken und Erdöl- und Erdgasförderanlagen eingesetzt, um überschüssiges Gas sicher zu verbrennen. Diese überschüssigen Gase können aus verschiedenen Gründen entstehen, beispielsweise bei Wartungsarbeiten, Systemstörungen oder Sicherheitsventilauslösungen. Anstatt das Gas unkontrolliert in die Atmosphäre entweichen zu lassen, was sowohl gefährlich als auch umweltschädlich sein könnte, wird es durch die Gasfackel verbrannt. Dies minimiert das Risiko von

Explosionen und sorgt dafür, dass potenziell gefährliche Gase sicher und effizient entsorgt werden. Darüber hinaus trägt die Gasfackel auch zum Emissionsschutz bei, da die kontrollierte Verbrennung von Gasen die Freisetzung von schädlichen Stoffen in die Umwelt reduziert. Im Gegensatz zur Stromerzeugung, die nicht die Hauptfunktion der Gasfackel ist, steht die Gewährleistung der Betriebssicherheit im Vordergrund.

Biomethan, ein aufbereitetes Produkt aus Biogas, hat am Ende seines Produktionsprozesses mehrere mögliche Verwendungswege, die jeweils unterschiedliche Vorteile und Einsatzgebiete haben. Eine der Optionen ist die Verstromung vor Ort, bei der das Biomethan direkt an der Produktionsstätte in elektrische Energie umgewandelt wird, oft mithilfe von Gasmotoren oder Turbinen. Eine weitere Möglichkeit ist die Verstromung in einem Blockheizkraftwerk (BHKW), das eine besonders effiziente Methode darstellt, da es gleichzeitig Strom und Wärme erzeugt, was zu einer besseren Gesamtnutzung der Energie führt. Schließlich kann Biomethan auch in das Erdgasnetz eingespeist werden, wo es wie herkömmliches Erdgas genutzt werden kann. Diese Option ermöglicht eine flexible Nutzung, da das eingespeiste Biomethan überall dort verwendet werden kann, wo Erdgas benötigt wird, sei es für Heizung, industrielle Prozesse oder als Kraftstoff für Fahrzeuge. Jede dieser Verwendungen hat spezifische Vorteile und trägt auf unterschiedliche Weise zur nachhaltigen Energieversorgung bei.

Während Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ) das bekannteste Treibhausgas ist, gibt es andere Gase, die noch klimaschädlicher sind, weil sie eine deutlich stärkere Wirkung auf den Treibhauseffekt haben. Ein solches Gas ist Methan ( $\text{CH}_4$ ). Methan hat ein erheblich höheres Treibhauspotenzial als  $\text{CO}_2$ , was bedeutet, dass es in der Lage ist, wesentlich mehr Wärme in der Atmosphäre zu speichern. Über einen Zeitraum von 20 Jahren ist Methan etwa 84-86 Mal stärker als  $\text{CO}_2$  in Bezug auf die Erwärmung der Erde. Methan wird hauptsächlich durch landwirtschaftliche Aktivitäten, wie die Viehzucht und den Reisanbau, sowie durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe und Abfallentsorgung freigesetzt. Aufgrund seines hohen Treibhauspotenzials trägt Methan somit erheblich zur globalen Erwärmung und zum Klimawandel bei, obwohl es in der Atmosphäre weniger häufig vorkommt als  $\text{CO}_2$ .

In einer Biomasseheizkesselanlage, die sowohl Schwachgas als auch Hackschnitzel verwendet, wird die erzeugte Wärme für spezifische Zwecke innerhalb eines Betriebs verwendet. Es ist wichtig zu verstehen, dass Schwachgas ein Nebenprodukt von anaeroben Vergärungsprozessen ist, während Hackschnitzel aus zerkleinertem Holz bestehen, das als erneuerbarer Brennstoff dient. Diese Kombination ermöglicht eine effiziente und nachhaltige Energieerzeugung. Die erzeugte Wärme kann auf verschiedene Weise genutzt werden. Eine Möglichkeit ist die Beheizung von Verwaltungsgebäuden, was jedoch nicht immer der primäre Fokus solcher Anlagen ist. Ein anderer wichtiger Verwendungszweck ist die Beheizung der Fermenter. Fermenter sind entscheidend für die biologische Umwandlung von organischen Materialien, da sie konstante Temperaturen benötigen, um Mikroorganismen optimale Bedingungen zu bieten. Schließlich gibt es noch die Beheizung der Rottehalle, in der Kompostierungsprozesse stattfinden und ebenfalls eine bestimmte Temperatur gehalten werden muss, um die Zersetzung von organischem Material zu fördern. Insgesamt spielt die erzeugte Wärme eine wesentliche Rolle in verschiedenen Bereichen der Betriebsführung, wobei die spezifische Anwendung je nach Anlage und deren primären Zweck variieren kann.