



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
Fakultät Life Sciences

**Technische Realisierbarkeit und Wirtschaftlichkeit einer Minibiogasanlage**

Bachelor of Science Abschlussarbeit  
Im Studiengang Umwelttechnik

Vorgelegt von

**Steffen Deibler**

**Matrikelnummer 1934975**

Hamburg

am 1. Februar 2016

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Jörn Einfeldt (HAW)

Gutachter: Dipl.-Ing. Wolf-Christian Traxel (Nevisio)

Die Abschlussarbeit wurde betreut und erstellt in Zusammenarbeit mit der Firma Nevisio.

## Vorwort

Im Wintersemester 2013 absolvierte ich mein Praxissemester bei der Firma Nevisio GmbH. In dieser Zeit kam ich aufgrund der breiten Aufstellung der Firma mit vielen unterschiedlichen Projekten im Bereich erneuerbare Energien in Berührung. Unter anderem befasste ich mich mit der Idee, eine kleine Minibiogasanlage für den Eigenbedarf zu Hause zu entwickeln und diese auch zu konstruieren. Nach Absolvierung sämtlicher Klausuren bekam ich die Möglichkeit, dieses Thema im Rahmen meiner Bachelorarbeit zu ergründen.

Die Thematik interessiert mich, da die Abfallenergieverwertung im Hinblick auf Energieeffizienz und Energieeinsparung sehr viel Sinn macht. Auch ist der bewusste Umgang mit den scheinbar grenzenlos vorhandenen Gütern, die uns in Deutschland im Lebensmittelhandel zur Verfügung stehen, ein wichtiger Schritt hin zu einem ökologischen Lebensstil. Dieser ist notwendig, um die Erde davor zu bewahren von der steigenden Anzahl an Menschen und Verbrauchern zu Grunde gerichtet zu werden.

Mein Dank gilt Herrn Christian Traxel, der sich trotz seines vollen Zeitplans und vielen Aufgaben Zeit nahm, mich bei meiner Bachelorarbeit zu unterstützen und Herrn Ralf Otto, auf dessen Hilfe ich mich maßgeblich während der Konstruktionsphase der Minibiogasanlage verlassen durfte.

# Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung .....	1
2. Zielsetzung .....	4
3. Grundlagen .....	5
3.1. Funktionsweise Biogasanlage .....	5
3.2. Biogasanlagenkonzepte und Fahrweisen.....	8
3.2.1. Gärverfahren – Unterscheidungsmerkmale.....	8
3.2.2. Gärverfahren – typische Anwendungen .....	11
3.2.3. Fermenter – Voraussetzungen .....	11
3.3. Bioabfallaufkommen in Deutschland .....	12
3.4. Bioabfallaufkommen in Entwicklungsländern .....	17
3.5. Weggeworfene Lebensmittel.....	18
3.6. Energiepotential Biomüll.....	19
3.7. Nutzungsmöglichkeiten Biogas .....	22
4. Durchführung .....	23
4.1. Ideale Eigenschaften der Minibiogasanlage .....	23
4.2. Berechnung Anlagengröße (Fermenter & Gasbehälter).....	24
4.3. Technologieübersicht und gewählte Technologie .....	26
4.4. Bericht Prototyp I.....	29
4.5. Konzeption Prototyp II.....	32
4.6. Konstruktion Prototyp II .....	34
4.7. Testbetrieb Prototyp II.....	38
5. Ergebnisse .....	44
5.1. Gründe des Scheiterns der Prototypen I und II.....	44
5.2. Lösungsansätze und Fragestellungen .....	45
5.3. Wirtschaftlichkeitsrechnung.....	47
5.3.1. Wirtschaftlichkeit in Deutschland .....	47
5.3.2. Wirtschaftlichkeit in Entwicklungsländern .....	48
6. Schlussbemerkungen .....	49
7. Literaturverzeichnis.....	51
8. Eidesstattliche Erklärung.....	55
Anhang .....	56

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung des Fermentationsprozesses [FNR, 2014] .....	7
Abbildung 2: Kontinuierlicher Rührkessel (CSTR) [USA.GOV, 2015].....	9
Abbildung 3: Propfenstromfermenter [Strabag, 2015].....	9
Abbildung 4: Übersicht Gärverfahren [Kaltschmitt, 2009].....	10
Abbildung 5: Biotonnenanschluss 2006 und 2010 [Statista, 2015c].....	14
Abbildung 6: Entwicklung biologisch abbaubarer Abfall 2006-2013 [Destatis, 2015] .....	15
Abbildung 7: Organischer Abfall nach Bundesländern 2012 [Destatis, 2012] .....	16
Abbildung 8: Biogasertrag verschiedener Substrate [Archea, 2015; BioPower, 2015; Basisdaten FNR, 2015].....	20
Abbildung 9: Methangehalt verschiedener Substrate.....	21
Abbildung 10: Übersicht MABR-Verfahren [Consentis, 2014].....	26
Abbildung 11: Versuchsaufbau MABR Born und Schneider .....	27
Abbildung 12: Gasverhalten MABR-Anlage Born und Schneider [MABR, 2010].....	28
Abbildung 13: Skizze Prototyp I.....	30
Abbildung 14: Prototyp I - Innenleben.....	31
Abbildung 15: Prototyp I - Seitansicht.....	31
Abbildung 16: Prototyp II AutoCAD Skizze .....	33
Abbildung 17: Foto Konstruktion Prototyp II – Frühe Seitansicht .....	35
Abbildung 18: Foto Konstruktion Prototyp II - Nahaufnahme Abdichtung.....	35
Abbildung 19: Foto Konstruktion Prototyp II - Seitansicht .....	36
Abbildung 20: Foto Prototyp II - fertige Anlage mit Wasser gefüllt .....	37
Abbildung 21: Foto Prototyp II mit Bananenschale.....	39
Abbildung 22: Biogasanlage mit Gasbehälter .....	40
Abbildung 23: Protokoll Befüllung Minibiogasanlage .....	41
Abbildung 24: Sicht auf Blasen im Inneren des Fermenters .....	42
Abbildung 25: Aufbau des Heizstrahlers zur Erwärmung des Fermenters .....	43
Tabelle 1: Müllaufkommen Entwicklungsländer (in % Feuchtgewicht).....	17

# Abkürzungsverzeichnis

MSR-Technik – Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik

CSTR - Continuously stirred tank reactor

UASB - Upflow anaerobic sludge blanket

MABR - Multifunctional anaerobic baffled reactor

TS – Trockensubstanz

PP – Polypropylen

MBA – Minibiogasanlage

# 1. Einleitung

Der weltweite Energieverbrauch steigt stetig an. Ein gesteigerter Wohlstand und der damit verbundene vermehrte Zugang zu elektrischen Geräten im Haushalt führt dazu, dass die Menschen mehr Energie verbrauchen. Damit einhergehend werden weltweit immer mehr Autos zugelassen. So stiegen die Neuzulassungen seit 2012 innerhalb von zwei Jahren um 9,5% an [Statista, 2015a]. Der Anstieg der Weltbevölkerung und die industrielle Entwicklung in Schwellenländern führen dazu, dass der Energieverbrauch bis zum Jahre 2035 weltweit um mehr als ein Drittel ansteigen wird [BP, 2014]. Das Ende des fossilen Energiezeitalters wird unter dieser Voraussetzung deutlich schneller erreicht. Eine Konsequenz daraus ist der unvermeidliche Anstieg der Energiepreise für beispielsweise das Heizen, Fernsehen oder Autofahren und letztendlich das Versiegen der fossilen Energiequellen. Um die Energieversorgung der Zukunft zu sichern und bezahlbar zu machen sind Alternativen zur bisherigen Praxis notwendig.

In entwickelten Ländern wie Deutschland setzt langsam ein Umdenken ein, in dem die Menschen den Massenkonsum an Gütern aus aller Welt hinterfragen und sich auf regionale Werte und Produkte besinnen. Von besonders bewussten Verbrauchern wird hinterfragt, ob Speisereste, Obst- und Gemüseabfälle in den normalen Hausmüll oder im besseren Fall in die Biotonne müssen, oder ob es noch anderweitige Nutzungsmöglichkeiten gibt.

Hinzu kommen die enormen Mengen an Lebensmitteln, die – obwohl noch verzehrbar - aufgrund eines abgelaufenen Mindesthaltbarkeitsdatums entsorgt werden. Pro Jahr beläuft sich die Summe von vermeidbaren und teilweise vermeidbaren, entsorgten Lebensmitteln in Deutschland auf 3,14 Millionen Tonnen [Universität Stuttgart, 2012]. Diese Lebensmittel eignen sich hervorragend zur Produktion von Biogas.

Eine erfolgreiche Energiewende hin zu nachhaltiger, regenerativer Energieversorgung gelingt nur, wenn bei einem Großteil der Bevölkerung ein Umdenken stattfindet. Besonders die Endkonsumenten können mit ihrem Verhalten den Markt beeinflussen und zu einem anderen Energiemix beitragen. An diesem Punkt setzen die Idee und das Projekt dieser Bachelorarbeit an.

Energie aus Biomasse kann einen wichtigen Beitrag in der regenerativen Energiestruktur liefern. Hierfür eignet sich Bioabfall in besonderem Maße, da er im Gegensatz zu Energiepflanzen in keiner Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion steht, sondern ein Abfallprodukt ist. Vor diesem Hintergrund ist von einer hohen gesellschaftlichen Akzeptanz auszugehen.

Doch nicht nur die ideelle Basis ist beachtenswert. Das Projekt dieser Bachelorarbeit könnte sogar Energie und Geld einsparen, wenn Bioabfälle nachhaltig zur Gasproduktion genutzt werden würden.

Das Umweltbundesamt attestiert nassen Bio- und Speiseabfällen die Eignung für eine Vergärung mit Biogasnutzung und anschließender stofflicher Verwertung der Gärreste [Umweltbundesamt Dessau, 2014]. Und das österreichische Umweltbundesamt belegt in einer Studie, dass die Vergärung des Biomülls die energieeffizienteste Form der Behandlung des Bioabfalls darstellt [Umweltbundesamt Wien, 2011].

Es existieren jedoch noch weitere Gründe für eine Nutzung der im Bioabfall vorhandenen Energie. Biologisch abbaubare Materialien zählten bis vor wenigen Jahren zu den Hauptursachen der Methanproduktion auf Mülldeponien [Umweltbundesamt Dessau, 2014]. Methan ist ein klimarelevantes Gas, das auf zwanzig Jahre betrachtet ein 56 Mal höheres und auf einhundert Jahre betrachtet ein 21 Mal höheres Treibhausgaspotential als Kohlendioxid aufweist und damit entscheidend zum anthropogenen Treibhauseffekt beiträgt [Lakeman, 1996]. Durch eine Vermeidung von Bioabfällen im Hausmüll, was sich als Nebeneffekt der Minibiogasanlage ergeben würde, ließe sich auch hier ein positiver Effekt erzielen.

Ein weiterer Trend, der die Zukunftsfähigkeit und Massentauglichkeit der Minibiogasanlage untermauert, hat sich in den letzten Jahren entwickelt. Immer mehr Deutsche möchten selbst regenerative Energie erzeugen und so von Preissteigerungen am Markt unabhängig werden. Dies macht eine Umfrage zum Thema Strom deutlich: 26 Prozent der Deutschen stellen in Aussicht, bis zum Jahr 2020 selbst Strom zu erzeugen. Dies entspricht einem Zuwachs von acht Prozent gegenüber einer Umfrage aus dem Jahr 2012 [Lichtblick, 2014].

Biogasanlagen mit organischen Reststoffen zu betreiben ist keine gänzlich neue Idee. In Großenlöder bei Fulda existiert seit dem Jahr 2013 eine Großanlage, die sämtliche Prozesse der Abfallverwertung an einem Standort vereint. Das Besondere an dieser Anlage ist, dass sie ausschließlich mit biogenen Reststoffen gefahren wird, die aus ganz Osthessen zur Verfügung gestellt werden. Bis zur Aufbereitung des Biogases und dessen Einspeisung ins Erdgasnetz werden dort sämtliche Prozessschritte an einem Standort vereint. Diese Anlage ist damit in Deutschland einzigartig [Biothan, 2014]. Die große Befürwortung des Projekts durch die Bevölkerung und Politik bestätigt den Wunsch der Menschen, verantwortungsvoll mit den zur Verfügung stehenden Energieressourcen umzugehen. [Grossenlöder, 2012].

Die Funktionalität einer Biogasanlage im kleinen Maßstab lässt sich unter anderem auf dem Onlineportal Youtube beobachten. Zahlreiche Hobbybastler demonstrieren den erfolgreichen Betrieb einer Minibiogasanlage. Es ist sogar möglich, aus Grassilage Biogas zu gewinnen, wie ein Bastler demonstriert. [Spandow, 2012].

Herkömmliche Biogasanlagen sind auf große Stoffströme ausgelegt und beanspruchen viel Platz. Die Nische zwischen diesen Anlagen und einer Minibiogasanlage füllt die Firma SEAB Energy. Sie

entwickelte den Muckbuster, eine Biogasanlage in einem Schiffscontainer, die 400 Liter organischen Abfall pro Tag verarbeiten kann und für kleinere Firmen wie zum Beispiel Brauereien eine sinnvolle Möglichkeit bietet, den eigenen Abfall sinnvoll zu verwerten [Seabenergy, 2014].

Zahlreiche Magazine weisen mit Artikeln und Beiträgen darauf hin, dass eine Biogasanlage im kleinen Maßstab ein realisierbares Projekt darstellt. Beispielsweise konstruierte ein Student der Hochschule Biberach einen Fermenter aus einer herkömmlichen, blauen Chemietonne eines Pharmaunternehmens. Als Substrat wird hier von Tierdung und menschlichen Fäkalien ausgegangen, die Anlage wurde für Bolivien konzipiert [Energie aus Pflanzen, 2014].

Biogasanlagen existieren heutzutage in fast allen Größen, für viele verschiedene Anforderungen und mit sehr unterschiedlichen Substraten. Eine Nische, die noch nicht erschlossen ist, ist die der Minibiogasanlage für Küchenabfälle in entwickelten Industrienationen. Einen kleinen Beitrag hierzu zu leisten, ist Ziel dieser Arbeit.

## 2. Zielsetzung

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit soll eine Minibiogasanlage entwickelt und konstruiert werden. Die Anlage soll mit biogenen Reststoffen, vor allem Küchenabfällen, gefahren werden. Als langfristiges Ziel der Anlage soll ein Betrieb in Klein- und Großküchen mit direkter Nutzung des gewonnenen Biogases möglich sein. Auch denkbar ist eine Nutzung der Anlage in Entwicklungsländern. Folgende Fragen sollen im Verlauf der Arbeit als Orientierung dienen und geklärt werden:

- Welche wartungsarme Technologie eignet sich für eine Minibiogasanlage?
- Existiert ein theoretischer Absatzmarkt für eine Minibiogasanlage in Deutschland?
- Wie hoch ist die mögliche Gasausbeute für unterschiedlich große Haushalte?
- Welche Nutzungsmöglichkeiten existieren für das gewonnene Gas?
- Ist ein wirtschaftlicher Betrieb möglich? Wenn ja unter welchen Voraussetzungen?
- Kann man eine Minibiogasanlage in Deutschland ohne Heizung betreiben?

Wenn möglich soll die Minibiogasanlage außerdem folgenden Ansprüchen gerecht werden: Das Design soll aus langlebigen, einfach zu beschaffenden Komponenten bestehen und eine einfache Bedienbarkeit vorweisen. Die Anlage soll mit möglichst wenig Mess-, Steuerungs- und Regelungs-Technik (MSR-Technik) auskommen und somit nahezu wartungsfrei funktionieren.

## 3. Grundlagen

### 3.1. Funktionsweise Biogasanlage

Im Folgenden wird die Funktionsweise der anaeroben Vergärung von Substrat in einer klassischen Biogasanlage erläutert und auf eventuelle Besonderheiten der Minibiogasanlage für den Heimbedarf eingegangen.

Es ist nicht die Intention dieses Kapitels, einen aktuellen Stand des Wissens zu den Grundlagen der Biogasgewinnung und –verwertung oder zu den unterschiedlichen Anlagenkonzepten darzustellen. Die Beschreibung der unterschiedlichen Anlagentechniken und –konzepte ist in der Literatur eingehend dokumentiert, vgl. [Edelmann und Engeli, 1992], [Kaltschmitt et al., 2009]. Dieses Kapitel soll lediglich einen Überblick über die Funktionsweise und Arbeitsabläufe der Biogasgewinnung aus organischen Substanzen liefern. Das Buch „Energie aus Biomasse“ von Kaltschmitt, Hartmann und Hofbauer dient als Grundlage dieses Kapitels 3.1.

Auf den für die Minibiogasanlage gewählten Aufbau der Anlage wird im Verlauf dieser Arbeit unter Kapitel 4.2. genauer eingegangen.

Die Grundzüge des in der Biogasanlage genutzten Prozesses zur Energiegewinnung sind folgende: Solarenergie, die als Einstrahlung der Sonne auf die Erde trifft, führt zu Biomasseproduktion. In einer Konversionsanlage, in vorliegendem Fall der Biogasanlage, wird aus der Energie der Sonne chemische Energie in Form von Biogas [Kaltschmitt, 2009].

Um diesen Prozess stattfinden zu lassen, sind zwei Bedingungen notwendig. Zum einen muss das Substrat unter Ausschluss von Sauerstoff gelagert werden und zum anderen ist eine gewisse Temperaturspanne einzuhalten.

Kaltschmitt unterscheidet für anaerobe Prozesse drei verschiedene Bakterienarten für unterschiedliche Temperaturspannen. Psychrophile Bakterien gedeihen bis etwa 25°C, mesophile Stämme weisen ein Temperaturoptimum von 35-43°C auf und thermophile Bakterien besitzen ihr Optimum bei etwa 57°C. Safley und Westermann bestimmen die unterschiedlichen Bakterienstämme wie folgt: <20°C für psychrophil, 20-45°C für mesophil und 45-60°C für thermophil [Safley & Westerman, 1992].

In der Natur findet Methanproduktion zwischen 0°C und 97°C statt [Zeeman, 1988]. Die meso- und thermophile Methanproduktion ist in der Literatur sehr gut dokumentiert – zum psychrophilen Abbau lässt sich hingegen wenig finden.

Ausgangsstoff für eine anaerobe Fermentation sind organische Substanzen, im vorliegenden Fall der im Haushalt anfallende Biomüll. Die Minibiogasanlage soll ausschließlich mit Bioabfall betrieben werden, was viele Schadstoffe im Substrat vermeiden hilft. So sollten etwaige Hemmstoffe wie Desinfektionsmittel oder Antibiotika, wie sie in Industrieabwässern vorkommen können, in der Substratzusammensetzung keine Rolle spielen.

Für große, konventionelle Biogasanlagen muss in der Substratvorbereitung auf viele verschiedene Punkte wie Sedimentation von Sand, Abtrennung von Störstoffen und Reduktion von Hemmstoffen geachtet werden. Ein wichtiger Punkt für die anaerobe Zersetzung ist auch die Korngrößenverteilung, da die Zersetzung der Partikel von der Oberfläche her fortschreitet und feinkörnige Substrate so einen Vorteil gegenüber grobkörnigen Substraten mitbringen [Kaltschmitt, 2009]. Für die Minibiogasanlage ist nur eine Zerkleinerung des Bioabfalls vor der Fermentation vorgesehen.

Anders als beim aeroben Abbau bauen bei der Methanbildung ausschließlich anaerobe Bakterien die organische Masse ab. Das dabei entstehende Gasgemisch besteht zu großen Teilen aus Methan und Kohlendstoffdioxid. In natürlichem Umfeld findet man solche anaeroben Gärungsprozesse in Mooren, am Grund von Seen oder in Festmistlagerstätten [Kaltschmitt, 2009].

Der Abbau findet in unterschiedlichen Stufen statt, in denen Bakteriengruppen, die einander bedingen, jeweils Teilschritte des Abbaus realisieren. Als Endprodukt entsteht das gewünschte Biogas mit je nach Ausgangsmaterial unterschiedlicher Zusammensetzung. Außer dem energiereichen Methan und Kohlendioxid entsteht bei der Vergärung auch Schwefelwasserstoff. In konventionellen Großanlagen ist die Reduzierung des Gehaltes von Schwefelwasserstoff zwingend notwendig, da ansonsten eine erhöhte Korrosion der nachfolgenden Aggregate des Blockheizkraftwerks und der Leitungen durch die mit Wasser entstehende saure Lösung stattfindet. Für die Zwecke einer Minibiogasanlage wird von keiner Notwendigkeit der Schwefelwasserstofftrennung ausgegangen. Eine mögliche Gasbehandlung selbst für die kleine Heimbiogasanlage ist die Gastrocknung, die durch Kühlung oder Durchleitung durch ein hydrophiles Material realisierbar ist.

Als Endstoffe nach dem Gärprozess verbleiben Biogas und das vergorene, organische Substrat, der Gärrest. Es ist technologisch möglich, das Biogas im weiteren Verlauf so aufzubereiten, dass es in das Erdgasnetz eingespeist werden kann. Der Gärrest kann als natürlicher Dünger fungieren und wird oft von den Landwirten auf den eigenen Feldern ausgebracht. Für die Minibiogasanlage ist eine direkte Gasnutzung zum Kochen und Gärrestnutzung zum Düngen eigenen Grünanlagen vorgesehen.

Der Entstehungsprozess des Biogases läuft in mehreren Schritten ab, die im Folgenden beschrieben und mit einer Grafik verdeutlicht werden.

Im ersten Schritt werden die im Substrat befindlichen Eiweiße, Fette und Kohlenhydrate in der Hydrolyse in einfachere, organische Verbindungen wie Aminosäuren, Fettsäuren und Zucker zerlegt.

In der Acidogenese, auch Versäuerungsphase genannt, bauen Bakterien die vorhandenen Stoffe weiter ab und es entstehen neben niederen Fettsäuren (z.B. Propionsäure), Wasserstoff und Kohlendioxid auch geringe Mengen an Milchsäure und Alkoholen.

Fettsäuren, Milchsäure und Alkohole werden in der nun folgenden Essigsäurebildung zu Essigsäure, Wasserstoff und Kohlendioxid umgesetzt.

Im letzten Schritt, der Methanogenese, verbrauchen Bakterien den Wasserstoff und bilden mit Hilfe der Essigsäure Methan. Als Endprodukte entstehen Methan und Kohlendioxid [FNR, 2014].

### Schematische Darstellung des Fermentationsprozesses

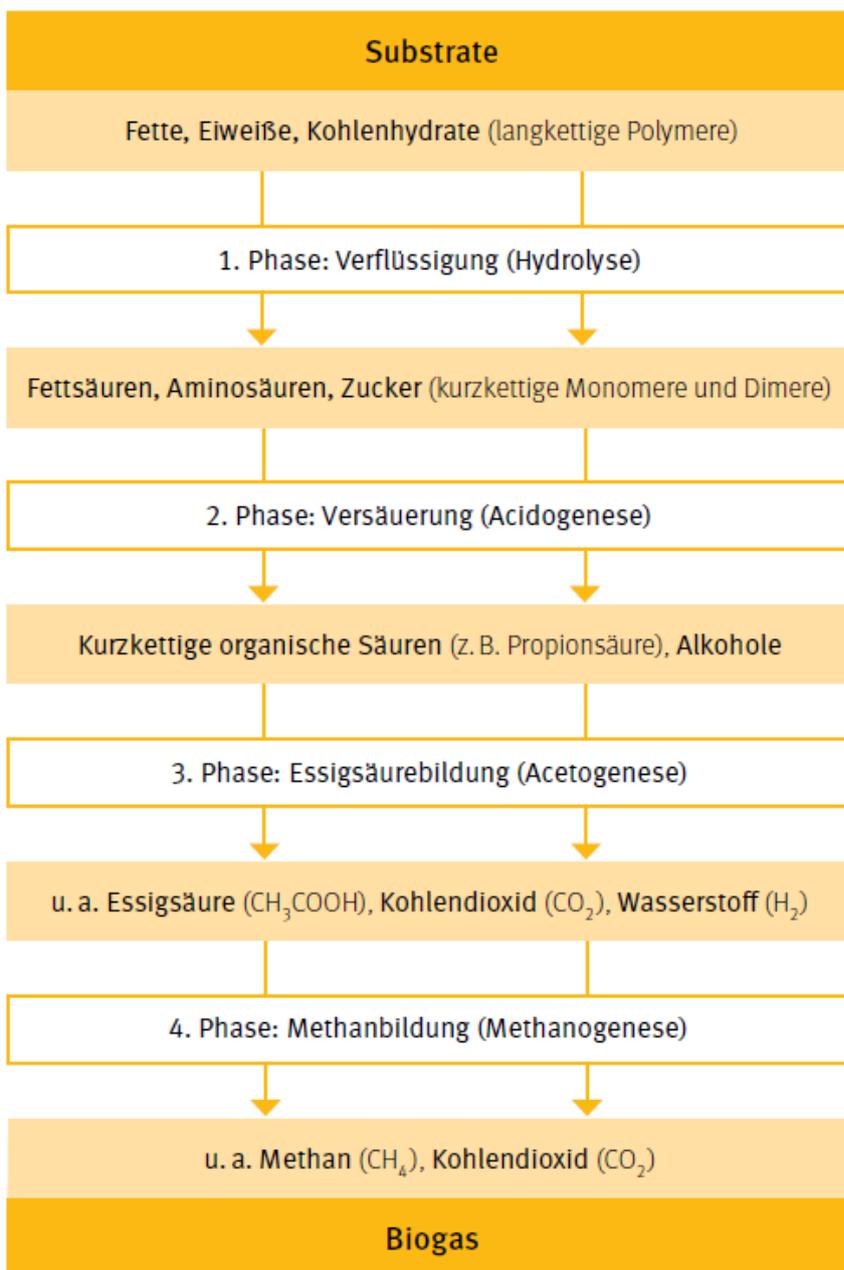


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Fermentationsprozesses [FNR, 2014]

## 3.2. Biogasanlagenkonzepte und Fahrweisen

Vor der Konzeption einer technischen Anlage stellt sich die Frage nach der anzuwendenden Technologie. Im Bereich der anaeroben Biogasproduktion sind verschiedene Bau- und Betriebsweisen Stand der Technik. Selbstverständlich sind die meisten Konzeptionen auf große Biogasanlagen und Substratdurchsatzmengen ausgelegt und nicht für eine Heim-Biogasanlage geeignet. Dieses Kapitel soll einen Überblick über die Bandbreite an Verfahren auf Basis des Lehrbuches „Energie aus Biomasse“ von Kaltschmitt, Hartmann und Hofbauer vermitteln.

### 3.2.1. Gärverfahren – Unterscheidungsmerkmale

Eine Gliederungsmöglichkeit besteht in die Verfahren der Nass- und Trockenfermentation. Die Nassfermentation zeichnet sich durch einen hohen Wasseranteil im Gärsubstrat aus, der die Masse rühr- und fließfähig macht. Die Trockenfermentation (auch Feststoffvergärung) erfolgt mit stapelbarer Biomasse.

Einen weiteren Unterschied in der Verfahrenswahl bildet die Art der Substratbeschickung. Es gibt die Möglichkeit der diskontinuierlichen, semi-kontinuierlichen und kontinuierlichen Beschickung. Die diskontinuierliche Substratzufuhr wird auch als Batch-Verfahren bezeichnet. Der Fermenter wird einmal gefüllt und bis zum Abschluss der Vergärung verschlossen. Bei der semi-kontinuierlichen Zufuhr wird in regelmäßigen Abständen Substrat zugeführt und meist zuvor in Auffangbehältern gesammelt. Die Durchmischung des Gärsubstrats erfolgt auf unterschiedliche Art und Weise.

Meist sind die Fermenter voll durchmischt und man spricht von Rührkesseln (CSTR). Diese lassen sich auf viele verschiedene Weisen technisch realisieren.

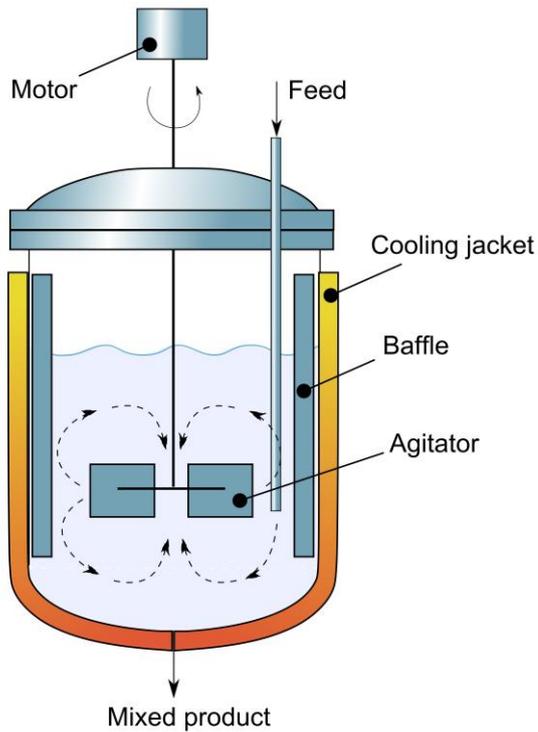


Abbildung 2: Kontinuierlicher Rührkessel (CSTR) [USA.GOV, 2015]

Eine Alternative ist der Propfenstromfermenter, bei dem das Substrat einen länglichen Fermenter durchläuft und quer zur Strömungsrichtung durchmischt wird.

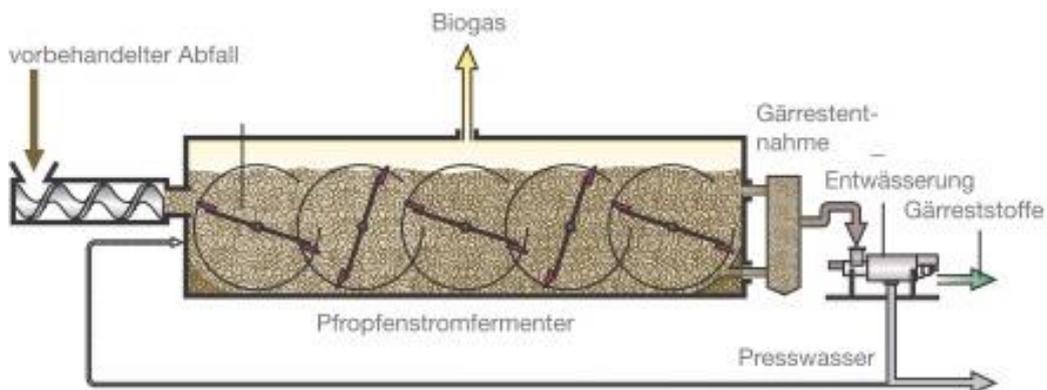


Abbildung 3: Propfenstromfermenter [Strabag, 2015]

Im Batch-Betrieb werden Garagenfermenter betrieben, in denen keine aktive Durchmischung erfolgt.

Die Art und Weise des Rückhalts von aktiver Biomasse ist ein weiteres Unterscheidungsmerkmal von Biogasanlagen. In flüssigen Prozessen werden die ausgetragenen Bakterien meist sedimentiert und dem Prozess wieder zugeführt.

Manche Biogasanlagen werden mehrstufig betrieben, in dem der Gärprozess aufgeteilt wird. Die Hydrolyse und die Methanbildung werden voneinander abgekoppelt. Ziel dieses Verfahren ist es, den methanbildenden Bakterien ein besseres Milieu zu bieten.

In der folgenden Grafik aus dem Buch „Energie aus Biomasse“ werden die behandelten Unterscheidungsmerkmale übersichtlich dargestellt.

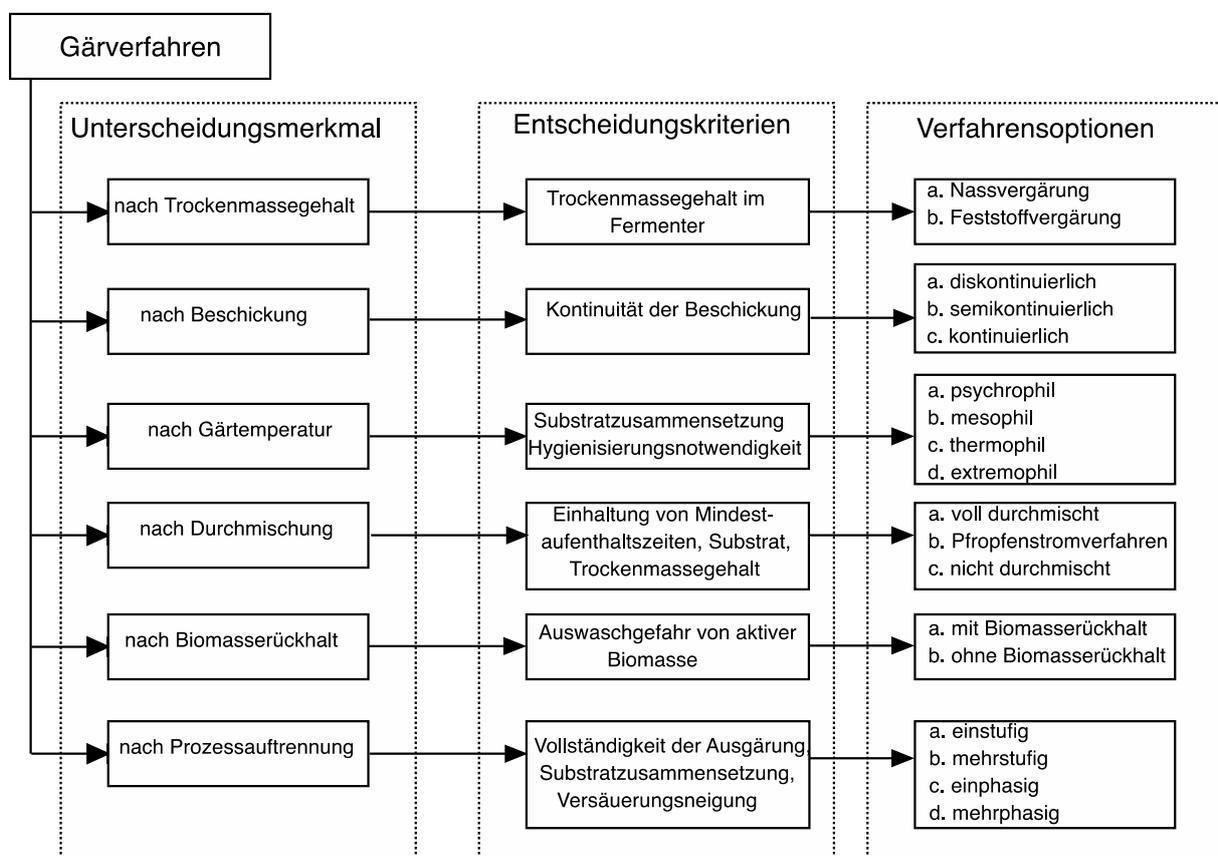


Abbildung 4: Übersicht Gärverfahren [Kaltschmitt, 2009]

### 3.2.2. Gärverfahren – typische Anwendungen

#### Kontaktprozess

In einem Nachgärbehälter wird der Bakterenschlamm abgesetzt, abgetrennt und dem Prozess im Fermenter wieder zugeführt. Durch die somit erreichte, höhere Konzentration an aktiver Biomasse verläuft der Abbau im Fermenter schneller.

#### Schlammbettreaktoren

Die Bakterien bilden von sich aus oder durch Hilfe (Sandkörner) kleine Klümpchen. Durch den sogenannten UASB-Prozess schweben diese Klümpchen an die Oberfläche, wo das Gas dann abgegeben wird. Durch spezielle Einbauten wird verhindert, dass die Bakterien ausgetragen werden.

#### Wirbelbettreaktoren

Wachsen die Bakterien auf inerten Feststoffpartikeln wie zum Beispiel Sand, spricht man vom Wirbelbettreaktor. Hier sind keine besonderen Einbauten, dafür aber höhere Strömungsgeschwindigkeiten notwendig um die Bakterienteilchen zu suspendieren.

#### Anaerobfilter

Die Bakterien wachsen auf Trägermaterialien, die sie vor dem Auswaschen schützen. Trägermaterial ist Kunststoff, Mineralien oder Holz. Anaerobfilter werden als Upflow-, Downflow oder dynamischer Betrieb ausgelegt.

#### Nassfermentationsverfahren

Die meisten Biogasanlagen werden auf diese Weise betrieben. In ein- oder mehrstufigen Prozessen wird das Substrat durchmischt und bei zu hohem Trockenmassegehalt mit Flüssigkeit verdünnt. Hierzu zählt auch das MABR-Verfahren.

### 3.2.3. Fermenter – Voraussetzungen

Das Herzstück der Biogasanlage ist der Fermenter, der folgende Eigenschaften erfüllen sollte

- Gasdichter Behälter mit Gasabzugsvorrichtung
- Heizmöglichkeit des Gärguts
- Eventuelle Option zur Kontaktintensivierung zwischen Bakterien und Substrat
- Eventuelle Vorrichtung zur Biomasserückführung

### Fermentermaterialien

In der Praxis werden unterschiedliche Materialien für den Fermenterbau genutzt. Neben Beton, rostfreiem Stahl und Edelstählen (z. B. V4A) wird auch Holz eingesetzt. Die wichtigste Eigenschaft ist Korrosionsbeständigkeit, was durch spezielle Anstriche und den Verzicht von Einsatz von Metallen gewährleistet wird.

### Durchmischung

Durch Einbringen des Substrates, thermische Konvektionsströme und Aufsteigen von Gasbläschen findet eine minimale Durchmischung statt, die meist nicht ausreichend ist. Eine aktive Durchmischung fördert den Kontakt zwischen Bakterien und Substrat und verbessert die Ausgasung. Neben mechanischen Rührwerken werden auch Pumpen zur Durchmischung eingesetzt.

### Beschickung und Austrag

Die Komponenten zur Beschickung sollten zuverlässig sein und möglichst begünstigen, dass der Fermenter auf seiner ganzen Fläche durchflossen wird. Der Austrag geschieht meist durch Schwerkraft oder bei Zufuhr des Substrates über einen Siphon; auf diese Weise wird ein Gasaustritt vermieden.

### Beheizung

Die meisten Fermenter von Biogasanlagen werden beheizt. Dies geschieht üblicherweise von einem Wärmeüberträger auf das Gärgut. Dies kann vor dem Zuleiten in den Fermenter, währenddessen oder auch im Innern geschehen.

## 3.3. Bioabfallaufkommen in Deutschland

Bevor mit statistischen Erhebungen begonnen werden kann, muss zunächst festgestellt werden, welche Art von Bioabfall für die Minibiogasanlage relevant ist. Die rechtliche Deklaration des Bioabfalls findet sich in der Bioabfallverordnung, §2 Abschnitt 1. Im Folgenden werden relevante Passagen hieraus zitiert. Der Begriff Bioabfall bedeutet im Sinne dieser Verordnung:

„Abfälle tierischer oder pflanzlicher Herkunft oder aus Pilzmaterialien zur Verwertung, die durch Mikroorganismen, bodenbürtige Lebewesen oder Enzyme abgebaut werden können, einschließlich Abfälle zur Verwertung mit hohem organischen Anteil tierischer oder pflanzlicher Herkunft oder an Pilzmaterialien.“

Die für die Belange dieser Erhebung relevanten Bioabfälle finden sich im Anhang der Bioabfallverordnung unter der Nummer 20 01 08, biologisch abbaubare Küchen- und Kantinenabfälle,

sowie die unter Ziffer 20 03 01 aufgeführten Gemischten Siedlungsabfälle, wozu insbesondere die Biotonne zählt. Hier erwähnt werden muss auch die Ziffer 20 02 01, biologisch abbaubare Abfälle von Sportanlagen, Gärten und Parks. Es ist technologisch möglich, diese pflanzlichen Abfälle zur Biogasproduktion zu nutzen. Da diese Abfälle jedoch sehr schwankend auftreten und 2014 in Deutschland 34,1 Millionen Menschen der über 14-jährigen keinen Garten besitzen, werden diese Garten- und Parkabfälle nicht mit in Berechnungen aufgenommen [Statista, 2015b].

Es sind zahlreiche, unterschiedliche Nutzungsszenarien für eine Minibiogasanlage vorstellbar – von einem Ein-Personen-Single-Haushalt, bei welchem die Küchenabfälle sehr vom jeweiligen Nutzerverhalten abhängen bis hin zu einem Fünf-Personen-Familienhaushalt mit zwei warmen Mahlzeiten pro Tag. Unterschieden werden können diese Nutzergruppen ebenso nach Standorten. Die eine Gruppe an potenziellen Nutzern lebt in entwickelten Industrienationen und unterscheidet sich wie oben erwähnt in der Größe. Auch Restaurants können von der Minibiogasanlage profitieren. Die andere Gruppe, die in dieser Arbeit betrachtet wird, sind die möglichen Nutzer in der dritten Welt, in der die Biogasanlage als ein Baustein in der Entwicklungszusammenarbeit dienen kann. Der entscheidende Vorteil der Minibiogasanlage ist dort nicht die Energieökonomie, sondern der alleinige Zugang zu einer Energiequelle.

Als Beispielland für ein entwickeltes Industrieland wird im Folgenden Deutschland herangezogen, da der Verfasser in Deutschland wohnt und die gesuchten Daten für Deutschland am leichtesten zugänglich sind.

Das Sammelmedium für den für die Minibiogasanlage entscheidenden und relevanten Abfall ist in Deutschland die Biotonne. Die aktuellsten, verfügbaren Anschlusswerte stammen aus dem Jahr 2010 und werden zur Veranschaulichung der Entwicklung mit dem Jahr 2006 verglichen.

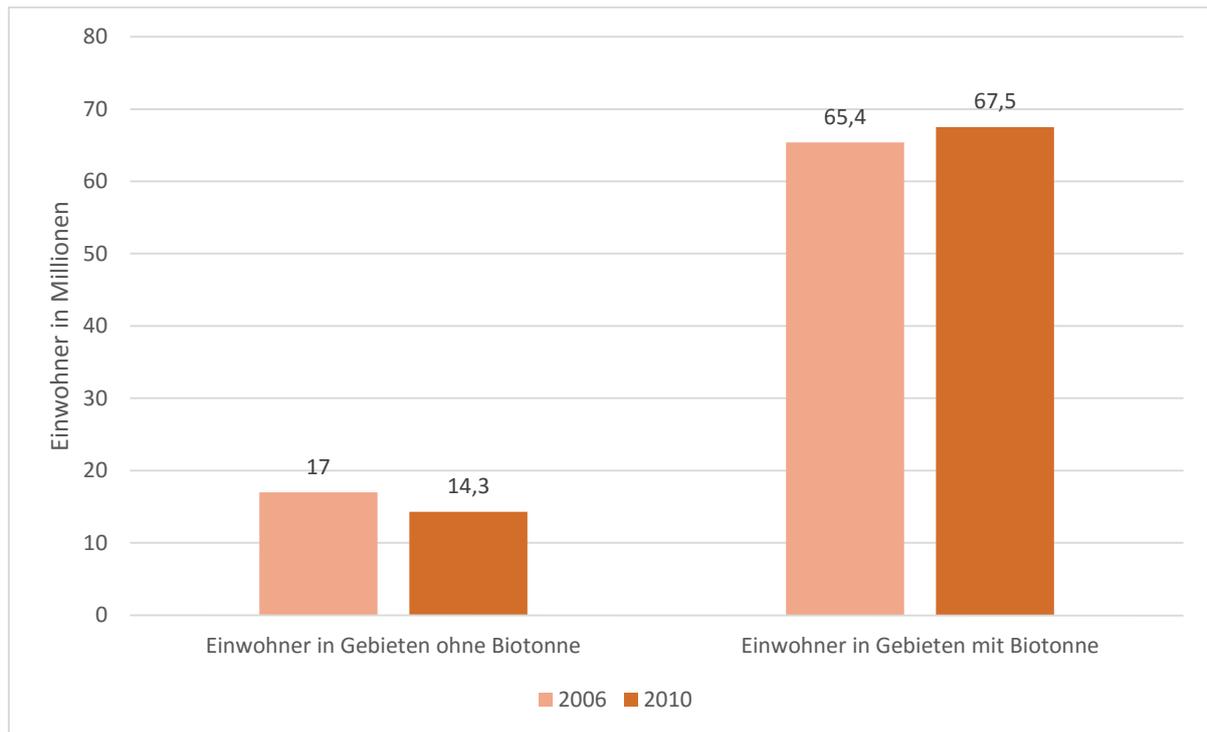


Abbildung 5: Biotonnenanschluss 2006 und 2010 [Statista, 2015c]

Diese Werte sind keine absoluten Anschlusswerte, da auch in Gebieten mit Biotonne keine vollständige Anschlussquote existiert. 2007 lag der Anschlussgrad in Landkreisen, in denen die Biotonne flächendeckend oder in Teilgebieten angeboten wird, im Mittel bei etwa 56 % [Kern, 2009]. Dieser Wert übertragen auf die Anschlusswerte aus dem Jahr 2010 ergibt 37,8 Million Biotonnennutzer. Knapp jeder Zweite Einwohner in Deutschland entsorgt seinen Bioabfall in einer Biotonne. Dieser Wert ist wichtig für anstehende Berechnungen.

Durch das Inkrafttreten der Novelle des Kreislaufwirtschaftsgesetz 2012 besteht laut §11 ab Januar 2015 eine Biotonnenanschlusspflicht für jeden Haushalt. Es ist zu erwarten, dass sich der flächendeckende Anschluss der Haushalte an eine Biotonne positiv auf die erfasste und gesammelte Menge an organischem Abfall auswirkt. In Gebieten mit flächendeckendem Biotonnenanschluss fällt die Restmüllmenge mit 160kg pro Einwohner und Jahr deutlich geringer aus als in Kreisen ohne Biotonne, wo der mittlere Beobachtungswert bei 183,5kg liegt [Wirtschaftsdienst, 2014].

Werte zur Entwicklung des Bioabfallaufkommens nach Inkrafttreten der Biotonnenpflicht existieren zum Zeitpunkt des Verfassens dieser Arbeit noch nicht.

Auch vor der geplanten Einführung der Biotonnenpflicht in Deutschland erhöhte sich die Bioabfallmenge in den letzten Jahren. Dies wird in folgender Abbildung dargestellt und zur Veranschaulichung mit den Werten der Küchen- und Gartenabfälle verglichen. Die Park- und Gartenabfälle sind schneller gestiegen, bei den Küchen- und Kantinenabfällen hat sich die Abfallmenge in den letzten Jahren nur unwesentlich geändert. Da im gleichen Zeitraum die Einwohnerzahl von 82,3

Millionen (2006) auf 80,8 Millionen (2013) rückläufig war, ist das Pro-Kopf-Aufkommen an Bioabfall deutlich um etwa 10% von 45,7 kg auf 50,1kg gestiegen. Bei diesem Wert muss berücksichtigt werden, dass er über alle Einwohner gemittelt ist [Statista, 2015d; Destatis, 2015].

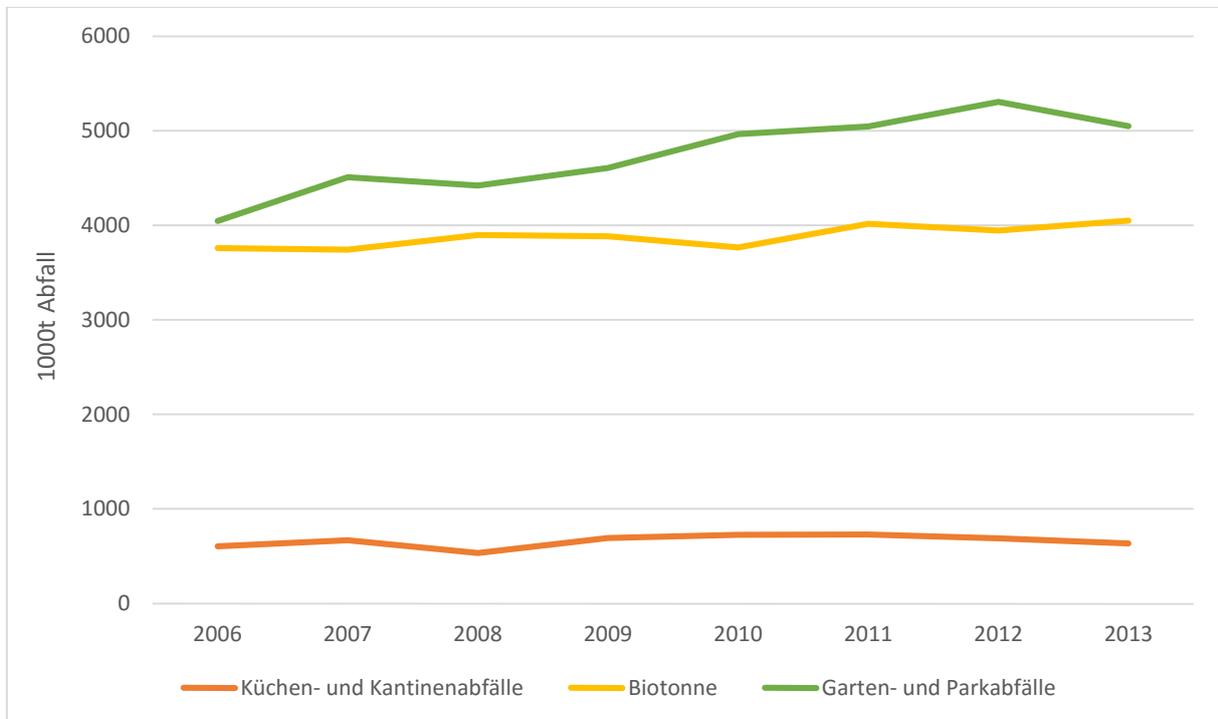


Abbildung 6: Entwicklung biologisch abbaubarer Abfall 2006-2013 [Destatis, 2015]

Für die Biotonnenabfälle liegen dem Verfasser unterschiedliche Werte für die gleichen Jahre vom Statistischen Bundesamt vor. Die Werte der „Abfallbilanz“ und der jeweiligen „jährlichen Erhebung über Haushaltsabfälle“ unterscheiden sich deutlich. Für das Jahr 2012 weist die Abfallbilanz einen Wert von 3944 Mg Biotonnenabfall aus, was bei 80,5 Millionen Einwohner 48,9kg pro Kopf entspricht. Die jährliche Erhebung über Haushaltsabfälle liefert 4359 Mg und somit 54,1kg je Einwohner.

Da ein exakter Wert hierfür nicht zu ermitteln ist und dieses Kapitel dazu dient, eine belastbare Größenordnung aufzuweisen, wird im Folgenden von 50kg erfasstem Biotonnenabfall pro Einwohner in Deutschland ausgegangen. Da dieser Wert über die gesamte Population gemittelt wurde, und wie oben erfasst in Deutschland nur knapp 50 Prozent der Einwohner eine Biotonne nutzen, fallen bei jedem Biotonnennutzer rund 100kg Bioabfall pro Jahr an. Es ist weiterhin davon auszugehen, dass einige Menschen, die aktuell eine Biotonne nutzen, sich bewusst dafür entschieden haben diesen hochwertigen Abfall getrennt zu entsorgen und somit Teil der potentiellen Zielgruppe einer Minibiogasanlage sind.

Beachtenswert ist die Schwankung des Abfallaufkommens innerhalb Deutschlands. Für das Jahr 2012 weist die „Erhebung über Haushaltsabfälle“ für Deutschland im Mittel 113kg organischer Abfall pro Person aus, wovon 54kg auf die Biotonne entfallen. Die restlichen 59kg entfallen auf Garten- und Parkabfälle. Diese Verteilung wird von Bundesland zu Bundesland erheblich schwanken, da Stadtstaaten zum Beispiel deutlich weniger Grünflächen haben als große, weniger besiedelte Länder. Trotzdem ist es bemerkenswert, dass einige Bundesländer in der Summe von Biotonnen- und Parkabfällen sogar unter dem Biotonnenschnitt für Deutschland bleiben. Es ist nicht davon auszugehen, dass die Ernährung in diesen Ländern so grundsätzlich anders ausfällt als in den Ländern mit hohem organischem Abfall. Der Verfasser geht davon aus, dass dort lediglich die Erfassung und Sammlung weniger gut funktioniert. Selbst die hohen Werte in Niedersachsen und Bayern sind auf die Einwohner gemittelt – dies bestätigt laut Verfasser die realistische Einschätzung von 100kg Bioabfall pro Person und Jahr.

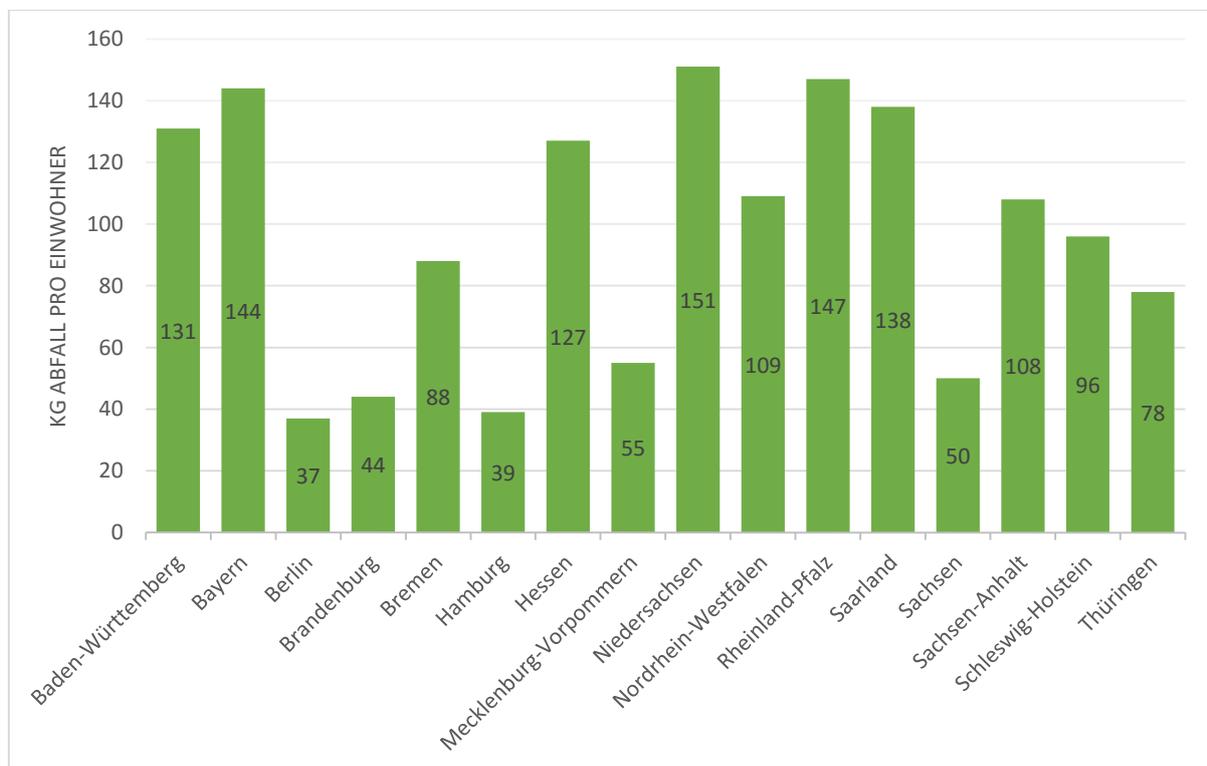


Abbildung 7: Organischer Abfall nach Bundesländern 2012 [Destatis, 2012]

Um eine finale Plausibilisierung der 100kg Bioabfall pro Person und Jahr zu erreichen, wird die täglich zu produzierende Abfallmenge untersucht. 100kg Bioabfall jährlich entspricht täglich 270g. Die Schale einer großen Banane und das Innere eines großen Apfels wiegen etwa 100g. Durch einen Kochvorgang am Tag mit Schalen von Kartoffeln, Karotten und eventuellen Essensresten lassen sich diese 270g mit Leichtigkeit erreichen. Diese Feststellung wurde vom Verfasser im Selbstversuch bestätigt.

Es ist weiterhin davon auszugehen, dass potentielle Nutzer der Minibiogasanlage Wert auf eine gesunde und ausgewogene Ernährung legen und sich des Öfteren von frisch zubereiteten Speisen ernähren. Durch diese Art von Lebensstil ist es auch möglich, deutlich höhere Bioabfallmengen zu erreichen.

Für die folgenden Berechnungen für Deutschland wird jedoch von den oben ermittelten 100kg ausgegangen und festgestellt, dass ein potentieller Absatzmarkt für eine Minibiogasanlage in Deutschland existiert.

### 3.4. Bioabfallaufkommen in Entwicklungsländern

Die Berechnung für verwertbare Einsatzstoffe in Entwicklungsländern ist schwerer durchführbar. Für den Anfall von organischem Müll gibt es erwartungsgemäß weniger Quellen und Statistiken. Laut einem Artikel in dem Magazin Welt-Sichten beträgt der Anteil organischen Mülls am Gesamtmüllaufkommen 50 bis 80 Prozent. Im Vergleich dazu liegt Deutschland zwischen 25 und 30 Prozent. [Welt-Sichten, 2008].

In Daressalam, einer Millionenstadt in Tansania, sind 62 Prozent des Abfalls organischer Art. 2,7 Millionen Einwohner produzieren täglich 2200 Tonnen Müll. Pro Person entspricht das 500g organischem Abfall, der das Potential hat, in einer Minibiogasanlage verwertet zu werden [Schmitt, 2004].

Ähnliche Werte liefern auch [Cointreau, 1982] (1), [Diaz et al., 1999] (2), [Dilewski et al., 2000] (3) und [Hoornweg et al., 1999] (4). Zur Veranschaulichung werden diese Werte für verschiedene Abfallarten in folgender Tabelle dargestellt.

*Tabelle 1: Müllaufkommen Entwicklungsländer (in % Feuchtwicht)*

<b>Fraktion</b>	<b>Industrieländer (1)</b>	<b>Mexico City, Mexico (2)</b>	<b>Phitsanulok, Thailand (3)</b>	<b>Dhaka, Bangladesh (4)</b>
<b>Organische Abfälle</b>	20-50	60	61	84
<b>Papier, Karton</b>	15-40	12	5	6
<b>Kunststoffe</b>	2-10	4	26	2
<b>Glas</b>	4-10	3	2	3
<b>Metall</b>	3-13	1	1	3
<b>Sonstige</b>	5-40	20	5	2

Auf Grundlage dieser Quellen, die auf deutlich höhere organische Anteile im Abfall von Entwicklungsländern hinweisen, ist es legitim festzustellen, dass eine Biogasanlage im kleinen Maßstab auch und besonders dort sinnvoll erscheint. Laut obigen Angaben ist eine größere Dimensionierung als in Deutschland denkbar und die Minibiogasanlagen könnten einen relevanten Anteil zum Energiemix beitragen. Hinzu kommt, dass in den meisten Entwicklungsländern ein anderes, wärmeres Klima herrscht als dies in Deutschland der Fall ist. Dies kann positive Auswirkungen auf die Biogasanlage zur Folge haben, wie ein möglicher Verzicht auf eine zusätzliche Heizung des Fermenters beziehungsweise eine optimalere Betriebstemperatur.

Ein weiterer Ansatz, der für Minibiogasanlagen in Entwicklungsländern denkbar ist, ist der Einsatz von Fäkalien zur Biogasproduktion. In Deutschland ist solch eine Vorgehensweise nicht vorstellbar, in Entwicklungsländern könnte der Nutzen die wenn überhaupt vorhandenen Bedenken übersteigen. Vorstellbar wäre, den Stuhlgang direkt in den Zulauf zum Fermenter zu integrieren. Dies würde den Zulauf der Anlage erhöhen und gleichzeitig Bakterien liefern.

Die Energiegewinnung aus menschlichen Fäkalien ist nichts Neues. Im größeren Maßstab gibt es einige Unternehmen, die sich damit beschäftigen.

X-Runner Venture ist ein Unternehmen, das die Menschen in den Slums von Lima mit ordentlichen Toiletten ausstattet, welche die menschlichen Fäkalien transportfähig auffangen. Diese werden eingesammelt und zu Kompost verwertet [X-Runner, 2011].

Die britische Firma GenEco hat einen Antrieb für Autos entwickelt, der mit Biogas aus menschlichen Fäkalien funktioniert. 70 Haushalte produzieren pro Jahr eine Biogasmenge, aus der sich mit dem „Bio-Bug“ 16000 km weit fahren lässt. [Süddeutsche Zeitung Online, 2010].

Sogar in Deutschland wird mit der Verwendung von Fäkalien experimentiert. Hamburg Wasser entwickelte den Hamburg Water Cycle. Mit Hilfe von Vakuumtoiletten wird im geplanten Wohnviertel Jenfelder Au in Hamburg das Toilettenabwasser separat gesammelt und in einer Biogasanlage zur Energieproduktion genutzt [Wirtschaftswoche Green, 2014].

Die nachfolgenden Berechnungen werden für den Standort Deutschland fortgeführt, da besonders hier eine Wirtschaftlichkeit gegeben sein muss. Die obigen Ausführungen dienen vor allem dem Beweis, dass sich eine Minibiogasanlage auch in Entwicklungsländern betreiben ließe und dort ausreichend Einsatzstoffe zur Verfügung stehen.

### 3.5. Weggeworfene Lebensmittel

Eine weitere Art von Abfall, die sich hervorragend für Biogasproduktion in der Minibiogasanlage eignet, sind entsorgte Lebensmittel. Das Biogaspotential der verschiedenen Lebensmittel wird im nächsten Abschnitt dieser Arbeit betrachtet. Der Autor ist sich im Klaren darüber, dass sich die

Statistiken zum Bioabfall und weggeworfenen Lebensmitteln überschneiden. Nichtsdestotrotz lohnt sich ein Blick auf die Zahlen, die das Potential der Minibiogasanlage verdeutlichen – vor allem in Entwicklungsländern.

Weltweit werden rund 1,3 Milliarden Tonnen Lebensmittel als Abfall entsorgt – 28 Prozent der weltweiten Ackerflächen werden zum Nahrungsanbau für Lebensmittel genutzt, die nie verzehrt werden. Über die Hälfte, 54 Prozent, der nicht verwendeten Nahrungsmittel geht unmittelbar während der Produktion, der Nachernte und der Lagerung verloren und betrifft damit vor allem Entwicklungsländer. Die restlichen Verluste von 46 Prozent bei der Weiterverarbeitung, der Auslieferung und dem Konsum finden hauptsächlich in den Industrienationen statt [FAO, 2013].

Hier entstehen große Mengen an potentiellem Substrat – sowohl in den Entwicklungsländern als auch in Industrienationen wie Deutschland. Oberstes Gebot ist es, diese Verluste zu vermeiden. Was sich nicht vermeiden lässt und dennoch auftritt, kann in (Mini)Biogasanlagen zur Energieproduktion eingesetzt werden.

In Deutschland entsorgt jeder Bundesbürger täglich 225 Gramm Lebensmittel, wobei den Hauptanteil Gemüse (26 Prozent) und Obst (18 Prozent) ausmachen, gefolgt von Backwaren (15 Prozent) und Speiseresten (12 Prozent) [Universität Stuttgart, 2012]. Die Studie der Universität Stuttgart weist darauf hin, dass eine genaue Bestimmung der Werte schwierig ist und auch Schätzwerte in die Studie eingeflossen sind. Trotzdem sind diese Zahlen sehr hoch, da es sich hier nur um die vermeidbaren und teilweise vermeidbaren Lebensmittelabfälle handelt. Dies bestätigt den Autor dieser Arbeit darin, dass 100kg Bioabfall pro Person und Jahr in Deutschland ein sehr konservativer Wert ist, der leicht übertroffen werden kann.

Die Gründe für das Wegwerfen der Lebensmittel liegen laut Studie an der mangelnden Wertschätzung der Lebensmittel, an Fehlplanung und Fehlkauf, falscher Aufbewahrung und Ablauf des Mindesthaltbarkeitsdatums.

### 3.6. Energiepotential Biomüll

Für die weitere Untersuchung des Potentials einer Minibiogasanlage ist das Energiepotential des Biomülls von entscheidender Bedeutung. Die Menge an Biogas, die bei Vergärung von verschiedenen Substraten entsteht, variiert in der Fachliteratur und auch die Anlagenbetriebsweise, die Temperatur und die Verweilzeit haben einen Einfluss auf die Menge des Gases. Die gebräuchlichste Angabe in der Literatur sind Biogasmengen pro Tonne Einsatzstoff. Folgende Grafik soll einen ersten Überblick über verschiedenen Substrate und ihre Gaserträge liefern und hat keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Zur besseren Darstellung wurden Mittelwerte der aufgeführten Substrate errechnet und dargestellt. Die hier dargestellten Substrate unterliegen jährlichen Qualitätsschwankungen, weshalb die im Folgenden aufgeführten Stoffdaten keine absoluten Werte darstellen.

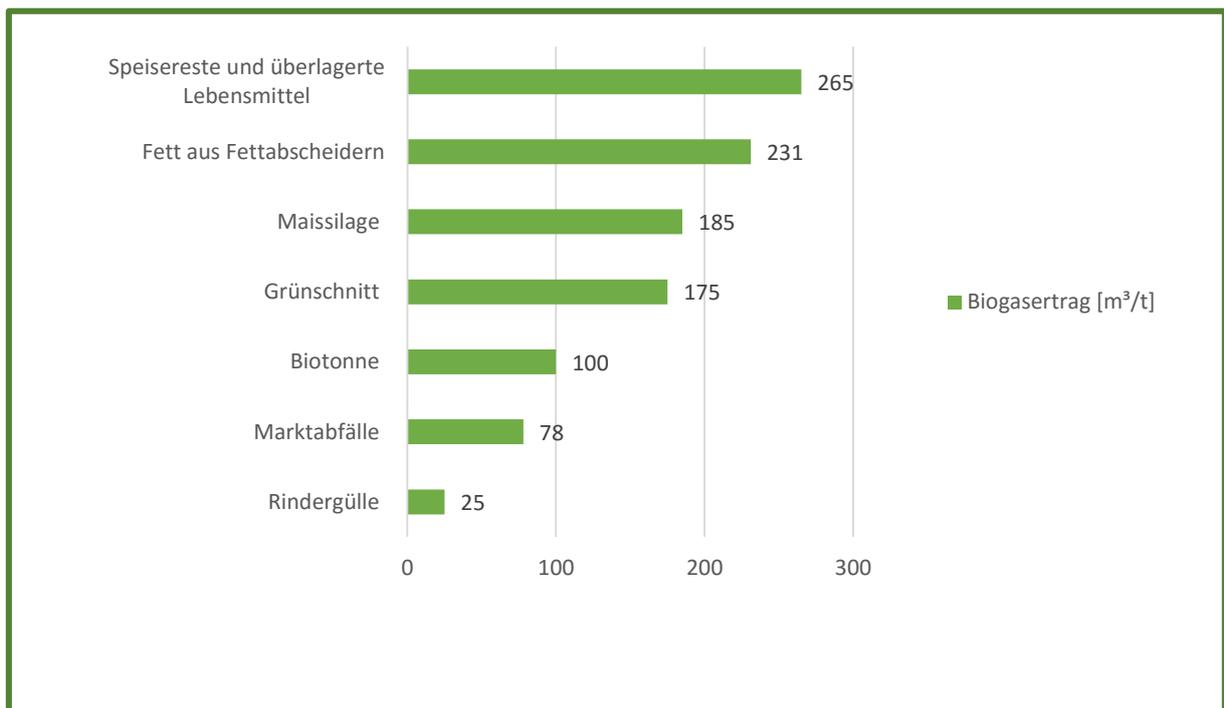


Abbildung 8: Biogasertrag verschiedener Substrate [Archea, 2015; BioPower, 2015; Basisdaten FNR, 2015]

Der für die Minibiogasanlage interessante Wert des Biogasertrags von Bioabfall beziehungsweise der Biotonne von 100 m³/t wird von weiterer Fachliteratur bestätigt. Die Biopower Nordwestschweiz AG gibt den denselben Wert an, die Archea Service GmbH nennt sogar 123 m³/t [Archea, 2015; BioPower, 2015].

Der Energiegehalt von Biogas ist direkt abhängig von dem im Biogas enthaltenen Methan. Die folgende Tabelle veranschaulicht den Methangehalt für die oben gewählten Substrate. Wieder wurde zur Vereinfachung und Veranschaulichung auf die Mittelwerte zurückgegriffen.

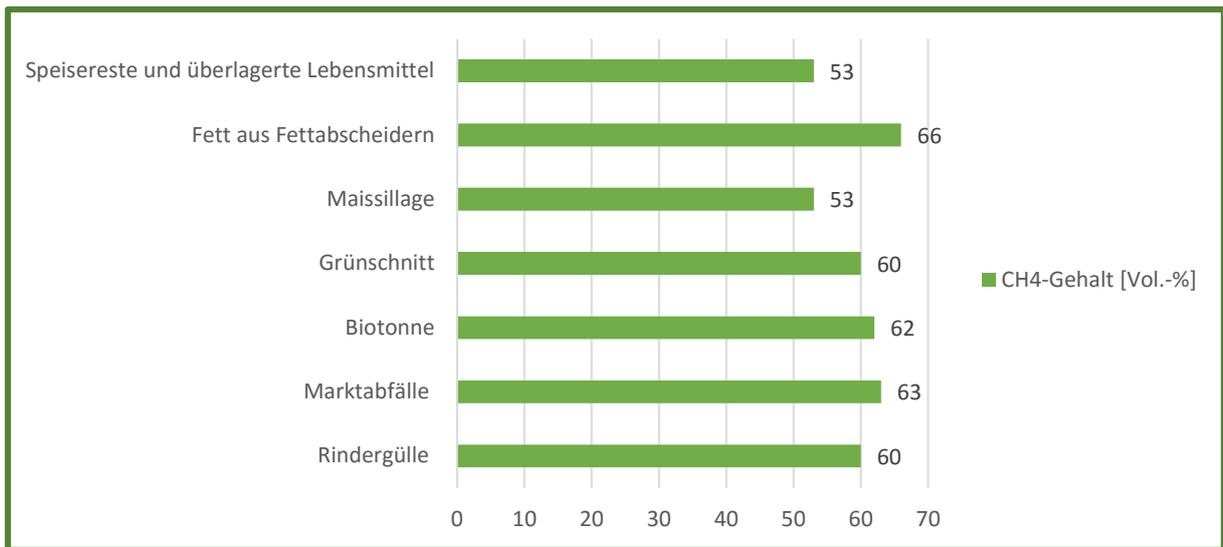


Abbildung 9: Methangehalt verschiedener Substrate

Der Wert von 62 Prozent Methananteil für Biogas aus Bioabfall wird auch von den oben zu Rate gezogenen Experten gestützt. Die Biopower Nordwestschweiz AG beziffert die Methanausbeute pro Kubikmeter Biogas auf 65 Prozent, die Archea Service GmbH erwähnt bei Bioabfall ebenso 60 Prozent Methananteil [Archea, 2015; BioPower, 2015].

Für den weiteren Verlauf dieser Arbeit wird aufgrund der oben recherchierten Werte für den Biogasertrag aus Bioabfall ein Wert von 100m<sup>3</sup> pro Tonne mit einem Methangehalt von 60 Prozent angesetzt. Da ein Kubikmeter Methan einen Energiegehalt von 9,94 kWh aufweist, ergibt sich aus den obigen Überlegungen ein Energiegehalt pro Kubikmeter Biogas aus Bioabfall von 6,0 kWh. Eine Tonne Biomüll ergibt somit 100m<sup>3</sup> Biogas und 600 kWh Energie.



In den vorigen Kapiteln wurde die realistische, jährliche Bioabfall Menge pro Kopf auf 100kg beziffert. Aus 100kg Bioabfall entstehen 10 Kubikmeter Biogas, woraus sich eine Energie von 60 kWh gewinnen lässt. Für eine einzelne Person ergibt sich dann folgendes Schema.



Aus dem Wert von 60kWh je Person und Jahr lässt sich nun für verschiedene Haushaltsgrößen das Biogaspotential ermitteln, wobei das Nutzerverhalten wie erwähnt eine weitere, große Rolle spielt. Kommt ein eigener Garten mit regelmäßigem Grünschnitt oder Haustiere wie Katzen und Hasen mit regelmäßig anfallendem Strohbedarf hinzu, erhöht sich der Anfall von verwertbarem Substrat weiter.

### 3.7. Nutzungsmöglichkeiten Biogas

Für das gewonnene Biogas aus einer Minibiogasanlage existieren verschiedene Nutzungsmöglichkeiten. Die Verstromung des gewonnenen Gases ist aus Sicht des Verfassers nicht sinnvoll, da die Mengen zu gering und der Aufwand als zu hoch einzuschätzen sind.

Es bleibt die Möglichkeit, das Gas direkt zu nutzen. Festgelegt werden muss hier eine eventuelle Trocknung und Aufbereitung des Gases, was je nach Anlagenbetrieb und Substratzusammensetzung neu betrachtet werden muss. Des Weiteren ist zu klären, wie und ob das Gas bis zur Nutzung gelagert wird. Der Praxisversuch dieser Arbeit konnte aufgrund von Zeitmangel nicht bis zu diesen Prozessstadien vorstoßen und liefert deshalb in diesem Kapitel nur Denkanstöße und Hinweise auf mögliche Nutzungsmöglichkeiten.

Als beste Nutzungsmöglichkeit bietet sich das Kochen auf einem Gasherd an. Hier können in direkter Verbindung oder über eine Zwischenlagerung mit dem Biogas Nahrungsmittel zubereitet werden. Die Verwendung des Biogases zum Kochen schließt den Kreislauf der Abfallverwertung auf eine sinnvolle und ansprechende Art und Weise.

Eine weitere denkbare Nutzung des Gases ist, dieses zur Beleuchtung zu nutzen. Hier bleibt die Frage der Speicherung und eventuellen Kompression zu klären. Die meisten Gaslampen funktionieren mit speziellen Kartuschen und ob diese ohne großen Aufwand mit heimischem Biogas zu befüllen sind ist unklar. Gasheizungen bedingen bei der Nutzung ebenso meist eigene Gasflaschen, wobei sich die gleiche Problematik wie bei den Gaskartuschen der Gaslampen ergibt.

Es bleibt die Frage zu klären, wieviel Druck notwendig ist, um mit Biogas kochen zu können. Hier zeigt eine Idee der Universität Hohenheim eine machbare Lösung auf. Die Forscher aus Hohenheim entwickelten einen Biogasrucksack mit einem Kubikmeter Fassungsvermögen, der durch das Beschweren mit Steinen einen für den Kochvorgang ausreichenden Druck aufbringt. Dieses Prinzip bietet sich auch für die Minibiogasanlage an. So könnte ein schon mit Gewichten beschwerter Behälter das Gas sammeln und bei Druckabfall dieser mit etwas zusätzlichem Gewicht beseitigt werden [Weik, 2011].

In Vietnam existiert seit 2002 ein Biogasprogramm um das ländliche Vietnam mit günstiger, emissionsarmer Energie zu versorgen, das „biogas program for the animal husbandry sector of vietnam“. Die dort installierten Minibiogasanlagen sind 4-50m<sup>3</sup> groß, werden nahezu ausschließlich mit Tierdung betrieben und liefern Biogas zum Kochen, zur Beleuchtung und zum Teil auch zur Gewinnung von Elektrizität. Leider lässt sich nicht nachvollziehen, wie genau das Biogas zum Kocher kommt und genutzt wird – wohl aber, dass es funktioniert [UNFCCC, 2012].

In Kenia unterstützt die Firma Rehau ein Projekt, in dem mit Kuhdung betriebene Biogasanlagen Biogas produzieren, welches zum Kochen genutzt wird. Die Anlagen sind in einfachster Art und Weise gebaut und der interne Druck des Fermenters scheint auszureichen, um damit kochen zu können. Hier gilt es zu berücksichtigen, dass in Kenia die erforderlichen Umgebungstemperaturen vorherrschen, um eine Anlage ohne zusätzliche Heizung im Freien zu betreiben. Die Funktionalität, das Biogas zum Kochen zu Nutzen ist jedoch gegeben und unterstützt die Annahme, dass dies ohne großen technischen Aufwand möglich ist [Rehau, 2012].

## 4. Durchführung

### 4.1. Ideale Eigenschaften der Minibiogasanlage

Verschiedene Zielsetzungen und Rahmenbedingungen bestimmen die Konstruktion der Minibiogasanlage. Im Optimalfall soll die Anlage folgende Eigenschaften besitzen und Voraussetzungen erfüllen. Die Liste ist mit der Prämisse erstellt worden, die fertig entwickelte Minibiogasanlage in Europa an technikaffine, umwelt- und ressourcenbewusste Menschen zu verkaufen und an Entwicklungsländer wie Afrika als Entwicklungshilfe zu verschicken. Dem Verfasser ist durchaus bewusst, dass nicht alle Punkte dieser Liste realisierbar sind.

- leichter Aufbau & Inbetriebnahme der MBA mit haushaltsüblichem Werkzeug
- wenig Wartung im Betrieb (Entleerung Gärrest, Säuberung Einlass)
- günstige und einfach zu besorgende Bestandteile
- einfache Größenskalierung (für unterschiedlich viele Personen)
- kompaktes Maß im aufgebauten Zustand (küchentauglich)
- optisch attraktive Verkleidung im aufgebauten Zustand

Folgende gewünschte Eigenschaften sind als priorisiert zu behandeln:

- Größe der Anlage: Die Biogasanlage soll in der Küche oder im Keller stehen. Ein Sicherheitsventil gewährleistet Explosionsschutz
- Baumaterialien: Die Anlage soll günstig sein
- Vorhandene Arbeitsmaterialien: Es steht kein Labor oder ähnliches zur Verfügung
- Durchlaufender Betrieb: Es kann kontinuierlich Substrat zugegeben und entnommen werden
- Wahl der Vergärungstechnologie: Diese bestimmt den grundlegenden Aufbau der Anlage

Über die Internetplattform Youtube ist es möglich, den erfolgreichen Betrieb von Minibiogasanlagen zu beobachten. Die meisten Anlagen sind allerdings Anlagen mit diskontinuierlichem Verfahren. Dies bedeutet, dass die Anlage nach Befüllung versiegelt wird und erst nach vollständiger Zersetzung des Materials wieder neues Material eingebracht werden kann.

## 4.2. Berechnung Anlagengröße (Fermenter & Gasbehälter)

Vor der Konstruktion der Biogasanlage gilt es, die Volumina des Fermenters und des Gasbehälters zu bestimmen. Vom Volumen des Fermenters hängt die Verweildauer des Materials ab. Eine längere Verweildauer führt zu einem höheren Ertrag. Ab einer Verweilzeit von 100 Tagen ist von einem geringen Restgaspotential auszugehen [Reinhold, 2010]. Diese Verweilzeit soll auch in der Minibiogasanlage erreicht werden. Hier ist entscheidend zu beachten, dass für den gewählten Anlagentypus ein niedriger TS-Gehalt des Substrats notwendig ist. Hiermit wird ein Verdünnungsverhältnis von 1:1 festgelegt, welches im Betrieb experimentell bestätigt oder verändert werden muss. Küchenabfälle haben laut der Stadt Zürich einen Trockensubstanzgehalt von 20%, der durch dieses Verdünnungsverhältnis auf 10% gedrückt werden kann. Es wird angenommen, dass dieser TS-Gehalt die Obergrenze für eine funktionierende MABR-Anlage darstellt [Stadt Zürich, 2006].

## Berechnung Volumen Fermenter

100kg Eintrag pro Jahr

0,273kg pro Tag

1:1 verdünnt mit Wasser -> 0,546kg pro Tag

100 Tage Verweildauer

Material von 100 Tagen: 54,6kg

Annahme: Dichte = 1 -> 54,6 Liter

Der Fermenter sollte ein Volumen von mehr als 55 Litern aufweisen, damit das Substrat bei dem angenommenen Eintrag von 546g pro Tag eine Verweildauer von mehr als 100 Tagen im Fermenter aufweist.

Für die Berechnung des Volumens des Gasbehälters sind einige Annahmen zu treffen. Die erste ist im vorderen Teil dieser Arbeit recherchierte Biogasausbeute von 10m<sup>3</sup> je 100kg Biomüll. Des Weiteren muss eine Zeitspanne gewählt werden, während der der Behälter auch ohne Nutzung das Gas aufnehmen und speichern kann. Hier hat sich der Verfasser dieser Arbeit für 7 Tage entschieden.

Falls über einen längeren Zeitraum kein Gas entnommen wird und der Gasdruck zu hoch wird, wird automatisch über ein Notventil Gas abgelassen. Dies kann zum Beispiel mit Hilfe eines Fahrradschlauchs geschehen. Eine Möglichkeit, die Aufnahmekapazität des Gasbehälters zu erhöhen ist eine mechanische Druckerhöhung durch Gewichtsaufgabe. Hier bleibt auszutesten, welcher Druck in der Praxis praktikabel ist.

## Volumen Gasbehälter mit Reserve

10m<sup>3</sup> pro Jahr

0,027m<sup>3</sup> pro Tag

7 Tage Reserve -> 0,19m<sup>3</sup>

Annahme: Druck im Behälter durch Gewichtsaufgabe: 2 bar

2bar -> 0,10m<sup>3</sup> Behälter

Um für 100kg Bioabfall eine Reservekapazität von 7 Tagen unter einem Druck von 2 bar zur Verfügung zu stellen, ist ein Gasbehälter in der Größe von 0,1m<sup>3</sup> notwendig. Dies lässt sich beispielsweise durch einen Zylinder mit dem Radius von 0,2m und der Höhe von 0,8m realisieren.

Ob dies mit Farbeimern möglich ist, ist in der Praxis zu klären.

### 4.3. Technologieübersicht und gewählte Technologie

Die im Rahmen dieser Arbeit zu entwickelnde Minibiogasanlage wird in vielen Punkten nicht alle Voraussetzungen einer optimalen Biogasanlage aus Kapitel 3.2. erfüllen können. Ziel ist es, den Mikroorganismen auf kleinem Raum möglichst optimale Lebensbedingungen zu bieten und somit einen maximalen Gasertrag zu begünstigen. Dafür eignet sich nach Ansicht des Verfassers besonders das MABR-Verfahren, das im Folgenden vorgestellt wird.

Das MABR-Verfahren wurde aus dem Anaerobic Baffled Reactor weiterentwickelt, der weltweit zur Abwasserbehandlung eingesetzt wird. Eine Abschrift der Wissenschaftler Liu Rongrong, Tian Qing und Chen Jihua befasst sich mit der Entwicklung verschiedener ABR-Reaktoren. Die MABR-Bauweise dient der Effizienzmaximierung des Vergärungsprozesses und wurde von den Wissenschaftlern nach einer einjährigen Probephase als dafür tauglich empfunden [Rongrong, 2010].

In folgender Abbildung aus dem Werbeprospekt von Consentis wird das Prinzip des MABR deutlich. Das Substrat durchläuft mehrere Kammern, die den Prozess der Vergärung unterteilen. Das Biogas wird aus allen Kammern gesammelt und abtransportiert. Durch die Durchströmung des Fermenters wird eine Durchmischung des Substrats gewährleistet.

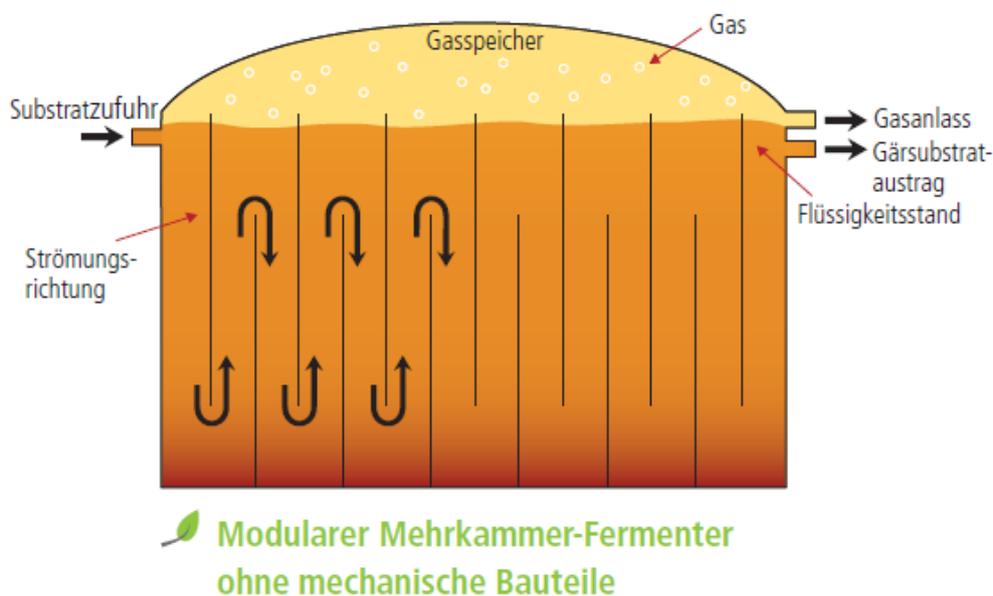


Abbildung 10: Übersicht MABR-Verfahren [Consentis, 2014]

Die beiden deutschen Wissenschaftler Jens Born und Holger Schneider, die an der Universität Flensburg arbeiten, interessierten sich sehr für dieses Konzept der Biogasanlage. Bei der „18th European Biomass Conference and Exhibition 2010“ in Lyon erläuterten und erklärten sie die Funktionsweise und Zukunftsfähigkeit dieser Technologie, auch und vor allem für kleinere Anlagen [MABR, 2010]. Mit aufwendigen Versuchen und genauer Messmethodik bewiesen sie, dass die Technologie funktioniert und viele Vorteile mit sich bringt. Das folgende Bild aus ihrem Vortrag zeigt den Versuchsaufbau von Born und Schneider und veranschaulicht den komplizierten Messaufbau mit vielen Messstellen. Ebenso ersichtlich sind die verschiedenen Kompartimente der MABR-Technologie.



*Abbildung 11: Versuchsaufbau MABR Born und Schneider*

In jedem Abschnitt dieses Versuchsaufbaus wurden Gasanalysen durchgeführt um die Biogasproduktion und vor allem die Entwicklung der Gasproduktion in den unterschiedlichen Abteilen der Anlage zu beobachten. Die untenstehende Grafik veranschaulicht das Gasverhalten in dem Fermenter und verdeutlicht das Verhalten der Biogasproduktion.

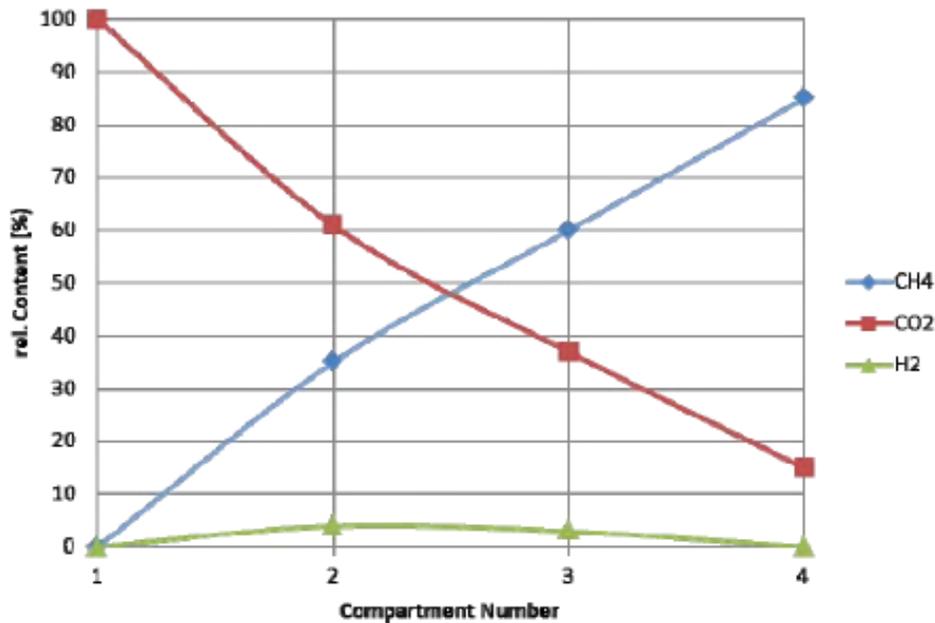


Abbildung 12: Gasverhalten MABR-Anlage Born und Schneider [MABR, 2010]

Born und Schneider bewiesen, dass sich die MABR-Technologie auch in kleinem Maßstab umsetzen lässt, was sie für die Minibiogasanlage prädestiniert. Der Gärprozess funktioniert mit der MABR Technik sehr robust, da die unterschiedlichen Bakterien in den verschiedenen Abschnitten leben und sich so untereinander weniger im Wachstum einschränken. Desweiteren gibt es keine ständige, aktive Durchmischung, die die Mikroorganismen stört und vermischt.

Ihre Studien und Recherchen haben sie so überzeugt, dass Schneider, Geschäftsführer der Conviotec GmbH, diese Erkenntnisse nutzte, um zusammen mit der Consentis Anlagenbau GmbH das Produkt CON2 zur Serienreife zu bringen. Der CON2-Container wurde gemeinsam mit der Fachhochschule Flensburg entwickelt und birgt einen Fermenter, der nach der MABR Technologie funktioniert und eben diese Vorteile hat, die den Verfasser dazu bewogen, die Minibiogasanlage auf Grundlage dieser Technologie zu entwickeln.

Ein wichtiger Vorteil der MABR-Technologie für die Minibiogasanlage ist, dass kein zusätzliches Rührwerk notwendig ist und der Gärrest bei Zufuhr von neuem Substrat automatisch aus dem Fermenter herausgedrückt wird.

## 4.4. Bericht Prototyp I

Im Verlauf des praktischen Teils dieser Arbeit wurden zwei Prototypen geplant und gebaut. Der erste Prototyp soll hier kurz erläutert werden. Dieser musste in einem frühen Stadium der Konstruktion aufgegeben werden, brachte jedoch wertvollen Erkenntnisgewinn. Entstanden ist dieser Prototyp aus der Idee, gebrauchte Farbeimer für den Bau des Fermenters zu nutzen. Dafür sprachen mehrere Gründe. Zum einen lassen sich diese luftdicht verschließen und bestehen aus PP-Kunststoff, der auch die korrosiven Eigenschaften von Biogas verträgt. Des Weiteren wären die notwendigen Bauteile für den Fermenter der Anlage vergleichsweise günstig zu bekommen. Und zum anderen wird auf diese Weise eine nützliche Verwendung von Abfall geschaffen, was sehr gut in das gesamte Konzept der Biogasanlage passen würde. Zusätzlich liefern die Farbeimer direkt eine MABR-kompatible Form.

Für den Betrieb einer Biogasanlage sind außer dem Fermenter weitere Funktions- und Bestandteile notwendig. Die Biogasanlage benötigt eine Möglichkeit zur Substratzufuhr, welches in diesem Fall der Biomüll ist. Dieser wird direkt in den Fermenter gegeben, der aus mehreren Kammern, die ineinander übergehen, besteht. Gas und Gärrest verlassen den Fermenter wieder. Der Gärrest wird in einer Sammelvorrichtung aufgefangen. Das Gas gelangt in einen Gasbehälter.

Die Anlage wird mit 3 Farbeimern mit jeweils 15 Litern Volumen geplant, was ein Gesamtfermentervolumen von 45 Litern ergibt.

Hier ist zu beachten, dass dieses nicht komplett mit Gärgut gefüllt wird, sondern nur zu etwa  $\frac{2}{3}$ . Der Rest wird von der Gasphase in Anspruch genommen. Dies entspricht 30 Litern Fassungsvermögen. Damit werden die angestrebten 55 Liter Fassungsvermögen nicht erreicht und die Verweilzeit des Materials wird fast halbiert. Es ist davon auszugehen, dass etwas Biogas durch Nachgasen verloren geht.

Die folgende Skizze veranschaulicht den gedachten Aufbau der Minibiogasanlage. Aus zwei Farbeimern wird ein Viertel herausgetrennt, und drei halbe Farbeimer dienen als Verbindung zwischen diesen Beiden. Im Inneren verläuft in der Gasphase ein perforierter Gartenschlauch, der das entstehende Gas einfängt und zum Gas auffangbehälter transportiert. Dieser besteht aus zwei ineinander gestülpten (Farb)Eimern, dessen Dichtung durch Wasser realisiert werden soll. Ob dies dem Praxistest standhält konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht evaluiert werden. Der notwendige Gasdruck wird über Gewichtauflage auf der Oberseite des Behältnisses erzeugt. Zur Sicherheit existiert ein Notventil, das bei zu hohem Druck überschüssiges Gas in ein Behältnis, zum Beispiel einen Fahrradschlauch, entweichen lässt.

Eintrag und Austrag findet über Kunststoff-Rohre statt, das Rohr für den Garrestaustag ist schwenkbar montiert. Beide Rohrenden müssen luftdicht verschließbar sein. Dies soll über Gummipropfen und Dichtungsringe realisiert werden.

Eine Beheizung ist nicht geplant. Wärmeenergie wird beim Substrateintrag mit warmem Wasser zugegeben und der Fermenter wird mit Styropor isoliert. Die Dichtigkeit der Anlage soll mit Dachkleber und Bauschaum gewährleistet werden. Dieser unterstützt auch die Stabilität.

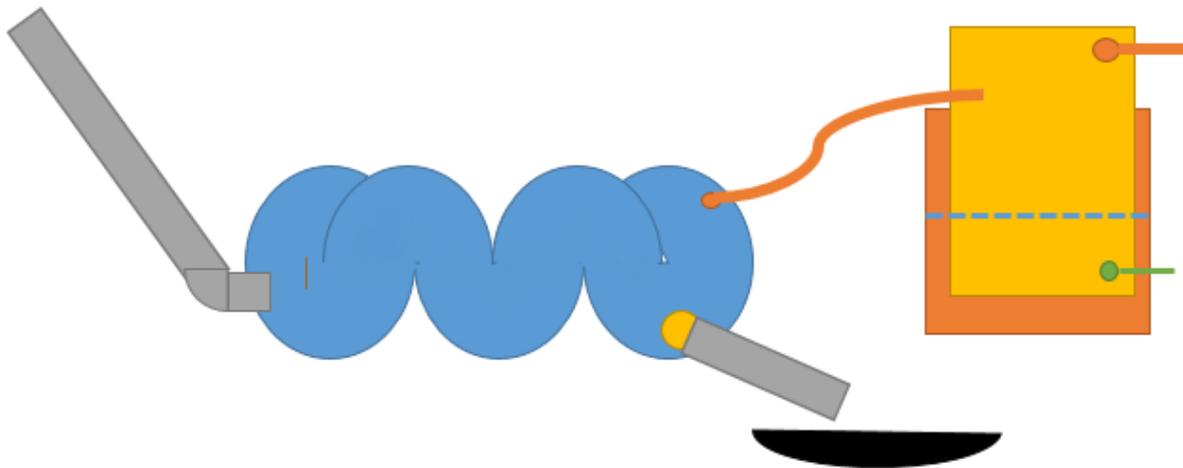


Abbildung 13: Skizze Prototyp I



Abbildung 14: Prototyp I - Innenleben



Abbildung 15: Prototyp I - Seitansicht

Obwohl viele Stunden Arbeit in diesen Prototyp gesteckt wurden, hielt diese Konzeption dem Realitätstest nicht stand. Die Konstruktion erwies sich aus verschiedenen Gründen als untauglich:

- Die Stabilität und Dicke der Farbeimer war zu gering
- Das Verschließen der Schnittnähte wurde mit fortschreitendem Zusammenbau immer schwieriger, da sich die erwärmte Luft nicht mehr so leicht verflüchtigen konnte und den Prozess behinderte
- Das Einsetzen der Dichtungen erwies sich als schwierig
- Nach dem Befüllen der Anlage mit Biomüll und Substrat aus einer Biogasanlage entstanden innerhalb kurzer Zeit durch den Druck des Materials Löcher im Fermenter
- Die Anlage hielt dem durch das Befüllen entstehenden mechanischen Druck nicht stand

#### 4.5. Konzeption Prototyp II

Aus dem Konstruktionsmisserfolg des ersten Prototyps wurde Lehren gezogen und für den zweiten Prototyp auf eine ausreichend stabile und starke Bauweise wertgelegt. Die Wahl des Baumaterials fiel auf Holz. Holz ist stabil, lässt sich gut bearbeiten und ist günstig. Die Alternativen wie Beton oder Stahl sind zu teuer und mit zu viel Aufwand in der Verarbeitung verbunden. Vor allem auf die Schwächen des ersten Prototyps wird mit einer stabileren Konstruktion reagiert.

Die Wände sollen aus 15mm dicken, beschichteten Siebdruckplatten bestehen. Diese sollen, auch an der dem Gärgut zugewandten Seite versiegelt, den korrosiven Eigenschaften des Biogases und Gärguts widerstehen. Ob beschichtetes Holz den korrosiven Eigenschaften des Materials über Jahre widerstehen kann, gilt es herauszufinden. Für die Dauer des Betriebslaufs der Prototypanlage wird von einer ausreichenden Stabilität des Werkstoffes ausgegangen.

Eine Seite der Anlage wird anstatt aus Holz aus einer 5mm dicken, transparenten Acrylglasplatte konstruiert, die es ermöglicht Einsicht in das Innenleben der Anlage zu bekommen, ohne diese öffnen zu müssen. Auf diese Weise soll das Fließverhalten des Gärguts, die Gasbildung und die Homogenisierung des Substrats beobachtet werden können.

Die Anlage wurde mit der Software AutoCAD entworfen und geplant. Die folgende Übersicht stellt das Ergebnis dieser Bemühungen dar. Das technologische Verfahren des MABR soll auch in diesem Prototyp Anwendung finden.



Die Zuschnittsliste der Hölzer sowie die Stückliste der notwendigen Teile für den Bau der Anlage sind im Anhang unter Abbildung 1 und Abbildung 2 zu finden.

Das Volumen des zweiten Prototyps lässt sich mit Hilfe der genauen Planung leicht berechnen. Interessant ist der maximale Füllstand der Anlage. Vom Innenmaß des Behälters werden die fünf Trennwände abgezogen. Hier gilt zu beachten, dass die unten aufliegenden Trennwände kleiner sind als jene, die an der Decke des Behälters angebracht sind. Der Füllstand der Anlage beträgt bei vollem Fermenter 78,2% der Höhe des Behälters.

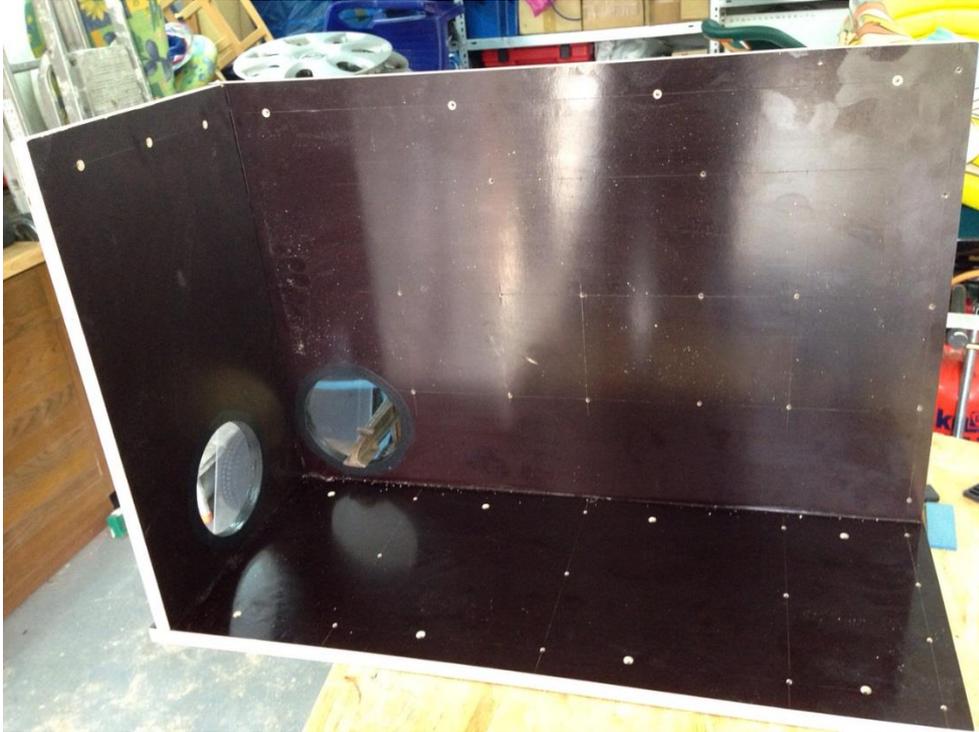
$$\begin{aligned}\text{Füllstand} &= (\text{Volumen Minibiogasanlage} - \text{Volumen Trennwände}) \times (\text{Höhe Füllstand}/\text{Höhe MBA}) \\ &= (285\text{mm} \times 470\text{mm} \times 675\text{mm}) - (3 \times 15\text{mm} \times 270\text{mm} \times 285\text{mm} + 2 \times 15\text{mm} \times 370\text{mm} \times 285\text{mm}) \times \\ &\quad (370\text{mm}/470\text{mm}) \\ &= (90,42\text{L} - 6,63\text{L}) \times 0,78 = 65,5\text{L}\end{aligned}$$

Damit ist der Prototyp 2 groß genug, um die berechnete Menge an Bioabfall aufzunehmen. Es ist sogar möglich, etwas mehr Bioabfall oder etwas mehr Wasser zuzugeben und die Verweilzeit von 100 Tagen einzuhalten.

## 4.6. Konstruktion Prototyp II

Dieser Abschnitt der Arbeit soll mit Hilfe von Fotos dazu dienen, dem Leser einen Eindruck des Konstruktionsprozesses zu liefern. Die Minibiogasanlage wurde innerhalb von anderthalb Wochen und unter dem Einsatz von etwa 16 Stunden Arbeit gebaut. Genutzt wurden hierfür die Heimwerkstatt und das handwerkliche Knowhow von Ralf Otto, ohne die der Verfasser der Arbeit geringe Chancen auf Erfolg gehabt hätte.

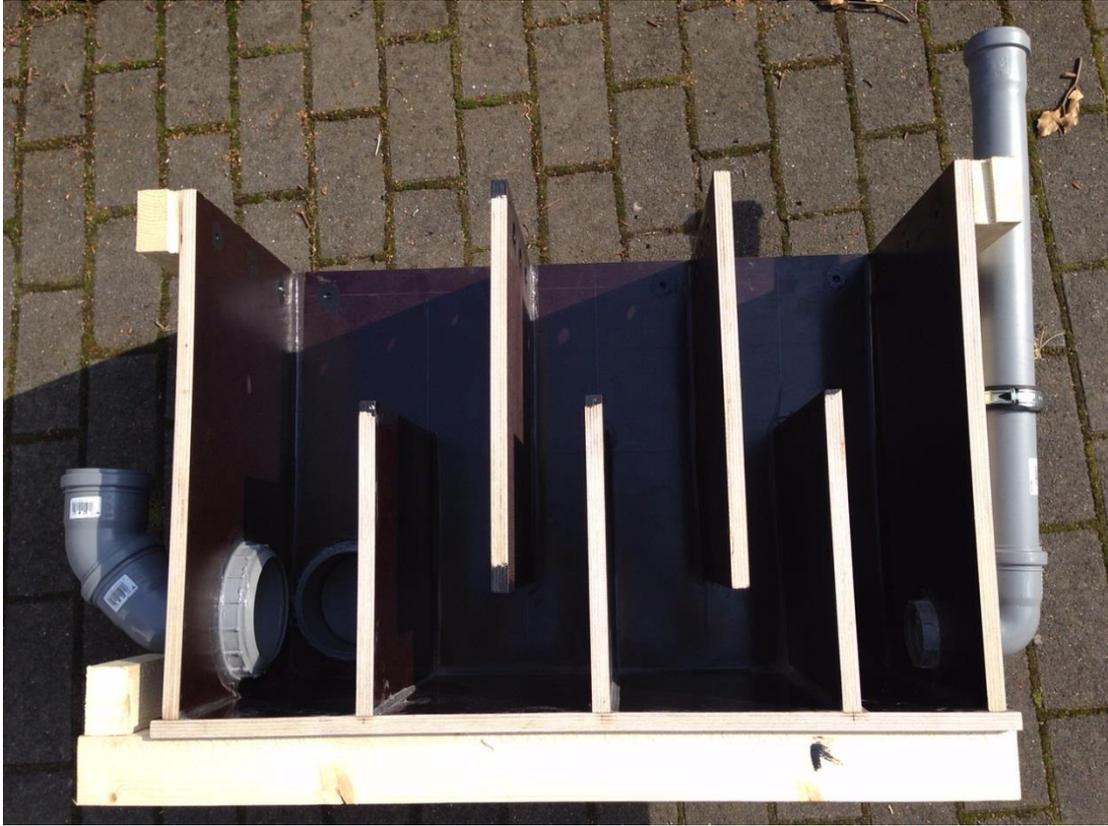
Der Deckel und die Auflagen auf der Unterseite wurden zusätzlich mit Kanthölzern versehen, um einen sicheren Stand und Transport der Anlage zu gewährleisten. Die Dichtigkeit der Biogasanlage wird durch Verwendung von Silikon, Flüssigkunststoff und Holzleim im Verbund mit Verschrauben der Einzelteile sichergestellt. Die Konstruktion der Anlage wurde gewissenhaft ausgeführt und nach Fertigstellung mit Wasser erfolgreich auf Dichtheit getestet.



*Abbildung 17: Foto Konstruktion Prototyp II – Frühe Seitansicht*



*Abbildung 18: Foto Konstruktion Prototyp II - Nahaufnahme Abdichtung*



*Abbildung 19: Foto Konstruktion Prototyp II - Seitansicht*



*Abbildung 20: Foto Prototyp II - fertige Anlage mit Wasser gefüllt*

Auf dem letzten Foto ist die Funktionsweise und Konstruktion der Anlage gut zu erkennen. Durch das linke Rohr wird das Substrat in die Anlage eingebracht. Das Rohr ist fest an der Holzkonstruktion angebracht und wird am unteren Ende durch ein Kantholz gestützt, damit der notwendige Druck aufgebracht werden kann. Das Substrat wandert dann durch die sichtbaren Kompartimente und tritt am Ende über den Siphon wieder aus. Im oberen Teil der Anlage sammelt sich das Gas und wird geschlossen abtransportiert. Der Durchlass vom ersten und dritten Gaskompartiment zum Auslass des Gases ist gewährleistet.

## 4.7. Testbetrieb Prototyp II

### Übersicht des Verlaufs der Inbetriebnahme und des Testbetriebs der Minibiogasanlage

- Ende September 2014 – Mitte November 2014 Beschickung und Inbetriebnahme der Anlage
- Erweiterung der Anlage im Verlauf durch verschiedene Maßnahmen mit dem Ziel der Temperaturerhöhung
- Beobachtung der Anlage bis Ende November 2014 und Feststellung des Scheiterns der Minibiogasanlage

Nach dem bestandenen Wassertest war die Anlage bereit für den Testbetrieb. Standort der Anlage wurde das Kellerabteil von Wolf-Christian Traxel. Zuerst war angedacht, die Anlage in der Küche unterzubringen. Dies ließ sich platztechnisch leider nicht realisieren. Der Testlauf sollte unter möglichst einfachen Randbedingungen vollzogen werden. Grund hierfür war der Gedanke, den Minimalaufwand für das Funktionieren einer Minibiogasanlage herauszufinden. Dies war auch der Hauptgrund für den anfänglichen Verzicht auf eine zusätzliche Heizung. Es herrschte die Erwartungshaltung, dass der Prozess der Vergärung in Kombination mit Isolation genügend Wärme erzeugt. Die notwendige thermische Energie zum Starten des anaeroben Abbaus soll durch Zufuhr von heißem Wasser gewährleistet werden. Einmal in Betrieb sollte durch regelmäßige Zufuhr von heißem Wasser Wärme von außen zugefügt werden.

Befüllt wurde die Anlage zu Beginn mit Gärrest aus der Biogasanlage Süddergellersen. Das Material war zum Zeitpunkt des Eintrags in die Anlage kalt auf Grund des Transportweges. Der Gärrest sollte die notwendige Impfung mit Bakterienkulturen gewährleisten und das Anfahren erheblich erleichtern. Das einzubringende Substrat aus der Küche wurde jeweils grob zerkleinert und unter Zuhilfenahme von warmem bis heißem Wasser in die Anlage eingebracht. Durch die Bauweise und Funktion der Anlage wird das überschüssige Material hinten ausgeworfen. Das heiße Wasser dient hier sowohl zur Verflüssigung des Substrats als auch als Heizung.

Da die Anlage von Beginn an gefüllt war, wurde schon bei der ersten Füllung Gärrest ausgeworfen.



*Abbildung 21: Foto Prototyp II mit Bananenschale*

Wie auf Abbildung 19 ersichtlich, konnte man durch das Acrylglas einen guten Blick in die Anlage werfen. Diese war im normalen Zustand von einer Styroporplatte verdeckt und wurde für das Foto freigelegt. Auch sichtbar ist hier eine Bananenschale, die fast noch im Ganzen im Fermenter schwimmt. Nachträglich gilt hier festzustellen: Die Reste von Schalen und Mahlzeiten müssen der Anlage möglichst stark zerkleinert zugeführt werden. Darauf wurde Wert gelegt, aber wie aus der Abbildung 21 ersichtlich noch nicht genug.

In der Startphase waren die Überlegungen zum Umgang mit dem entstehenden Biogas nicht abgeschlossen. Zu Beginn endete die Gasleitung in einer Konstruktion zur Speicherung des Biogases. Diese bestand aus zwei ineinander gestülpten Eimern. Der Gasschlauch endete im Inneren oberhalb des Wassers, welches hier als Dichtung fungierte. Diese Konstruktion wäre mit zusätzlichen Gewichten auch in der Lage, einen gewissen Druck zu erbringen und so das Bindeglied zwischen Fermenter und Herd darzustellen. Wie auf Abbildung 22 zu sehen ist, fehlte der Gasausgang des obigen Eimers. Auch waren bei diesem Vorgehen kleinste Gasausbeuten nicht sichtbar. Aus diesem Grund wurden die Eimer im Verlaufe des Testbetriebs gegen einen luftdicht verschlossenen Müllbeutel getauscht. Dieser sollte kleinste Gasausbeuten sichtbar machen und auch die Möglichkeit bieten, die Gasausbeute quantitativ zu bestimmen.



Abbildung 22: Biogasanlage mit Gasbehälter

Auf Abbildung 22 ebenso ersichtlich ist der Kinderswimmingpool, in dem die Biogasanlage im Keller stand. Unter dem Siphon, aus dem der Gärrest beim Einfüllen von neuem Substrat fließt, steht im Falle dieses Vorgangs ein Eimer. Die Unterlage der Anlage war vor allem für den ersten Prototyp notwendig, da dieser an einigen Stellen undicht wurde. Für den Prototyp II war dies eine Absicherung gegen mögliche Lecks, die nicht in Anspruch genommen werden musste.

Um den Nutzungsgrad der Anlage berechnen zu können, wurde ein Protokoll der Substratbefüllung geführt. Das Potential der verschiedenen Substrate wurde den Auflistungen der Firmen Archae Service und Biopower entnommen. Auf diesem Protokoll wurden auch wichtige Hinweise wie das Aufbauen der Wärmedämmung und die Installation der Heizdecke vermerkt.

Datum	Art des Substrats	Wasser heiß [L]	Menge des Substrats [kg]	Biogas Potential relativ [Nm <sup>3</sup> /kg]	Biogas Potential absolut [Nm <sup>3</sup> ]	Bemerkungen
26.09.2014	Birne	1,6	0,3	0,15	0,05	
	Bananenschale		0,05	0,15	0,01	
	Espressopulver		0,05	0,15	0,01	
	sonst. Küchenabfälle		0,2	0,15	0,03	
	Gärrest aus Süddgellersen heißes Wasser	1,6L	120	0,01	1,20	
29.09.2014	Mix Gemüse	0,5	1,4	0,15		Wärmedämmung aufgebaut
10.10.2014	sonstige Küchenabfälle		1,75	0,15	0,26	
12.10.2014	heißes Wasser	4				
	heißes Wasser	3				
	heißes Wasser	1,8				
21.10.2014	Mix Gemüse		0,85	0,15	0,13	Bömpeln massiv erforderlich
	Gärrest		10	0,01	0,10	
	heißes Wasser	13,2				
25.10.2014	Küchenabfälle	1,6	0,9	0,15	0,14	
	Mix Gemüse		2	0,15	0,30	
02.11.2014	heißes Wasser	7,8L				
04.11.2014	Küchenabfälle		0,13	0,15	0,02	erst Wasser dann Material zum nachstopfen
	heißes Wasser	6,4				
06.11.2014	Küchenabfälle		0,33	0,15	0,05	Installation Heizdecke und blauer Müllsack
09.11.2014	Küchenabfälle		0,5	0,15	0,08	Heizdecke zwischen Dämmung und Anlage -> geringer Effekt
	heißes Wasser	2				Campingkocher für mehrere Stunden plus Isolation
						leider keine spürbare Temperaturerhöhung
13.11.2014	Küchenabfälle	1,5	0,25	0,15	0,04	Heissluftgebläse nächste Stufe: auch nicht gewünschter Effekt
			theoretische Biogausausbeute		2,3965	

Abbildung 23: Protokoll Befüllung Minibiogasanlage

Die theoretisch ermittelte Gasausbeute betrug durch das eingebrachte Material  $2,4\text{m}^3$ . Die Hälfte davon erbringt der eingebrachte Gärrest.  $1,2\text{m}^3$  in 1,5 Monaten entspräche einer Jahresausbeute von  $9,6\text{m}^3$ , was sich in die Größenordnung der in dieser Arbeit berechneten Werte einfügt.



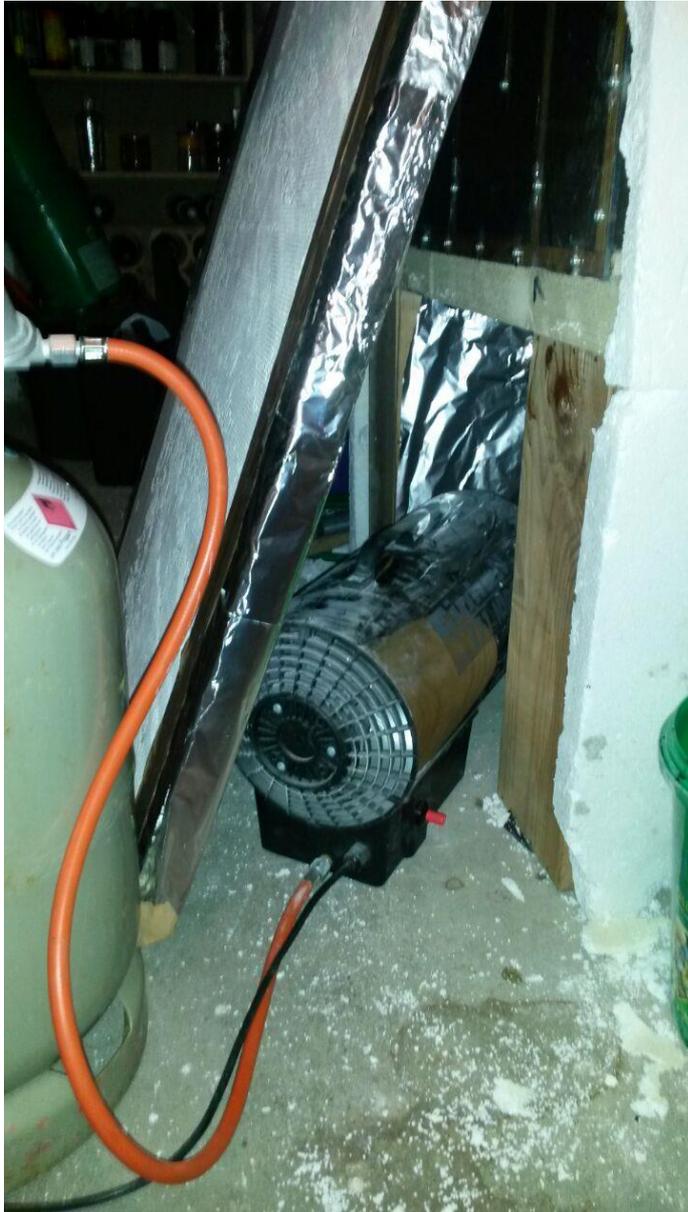
*Abbildung 24: Sicht auf Blasen im Inneren des Fermenters*

Vor allem im letzten Kompartiment der Biogasanlage bildeten sich nach einiger Zeit Blasen an der Oberfläche des Substrats – es schien eine Gasbildung stattzufinden. Nach 30-tägigem Testbetrieb wurde jedoch immer noch keine sichtbare Methanproduktion festgestellt. Die Fermentertemperatur unterschied sich weiterhin nicht von der Umgebungstemperatur und es war keinerlei Gasaktivität zu verzeichnen. Auch den psychrophilen Bakterien war es offensichtlich zu kalt oder sie waren nicht vorhanden, da die Biogasanlage mit Material aus einer Anlage mit thermophilen Bakterien geimpft wurde. Diesem Problem sollte mit zusätzlicher Heizleistung begegnet werden.

Zu allererst wurde eine Heizdecke zwischen Isolation und Fermenter gelegt, um auf diese Weise das Substrat im Inneren zu erwärmen. Der Effekt dieser Maßnahme war zu vernachlässigen.

Weitere Versuche zur Erhöhung der Temperatur wurden mit Hilfe eines Gaskochers vollzogen. Die Anlage wurde aufgebockt und der Gaskocher unter dieser platziert. Die der Flamme zugewandte Unterseite der Anlage wurde mit Alu-Folie ausgekleidet. Nach dem Entzünden der Flamme wurde die Styroporisolation wieder aufgestellt und die Flamme und Anlage beobachtet, um eventuelle Gefahren rechtzeitig zu erkennen. Zwei volle Gaskartuschen wurden aufgebraucht. Leider erhöhte sich die Temperatur der Anlage nicht – die Heizleistung und die Wärmeübertragung auf das zu große Fermentervolumen war offenbar zu gering.

Mehr Heizleistung versprach ein Heißluftgebläse. Auch hier war bei der Handhabung Vorsicht geboten, da das Gerät schnell überhitzen kann und auch ein Entflammungsrisiko besteht. Der Versuchsaufbau ist auf folgendem Foto ersichtlich. Die Temperatur des Fermenters wurde an verschiedenen Stellen der Acrylglascheibe gemessen und auch diese Bemühungen trugen nicht zur erwünschten Temperaturerhöhung bei.



*Abbildung 25: Aufbau des Heizstrahlers zur Erwärmung des Fermenters*

Die Heizversuche mit Hilfe des Heißluftgebläses wurden einige Male wiederholt. Mitte November 2014 wurden diese eingestellt und die Anlage für 2 Wochen sich selbst überlassen. Es bestand die kleine Hoffnung, dass sich durch weitere Verweilzeit Gas ausbilden würde.

Ende November wurde dann das Scheitern des Testbetriebs und Anfahrens des Prototyps II festgestellt.

## 5. Ergebnisse

### 5.1. Gründe des Scheiterns der Prototypen I und II

Aus den Fehlversuchen lassen sich einige Schlüsse ziehen, die es wert sind, einen weiteren Anfahrversuch zu starten. Diesen selbst durchzuführen war dem Verfasser aufgrund von Zeitmangel im Rahmen dieser Bachelorarbeit nicht möglich.

Es gilt zu konstatieren, dass der Konstruktion der Anlage weiterhin eine Funktionsfähigkeit zugetraut wird. Nach ausführlicher Diskussion sind folgende Fehler ursächlich für den fehlgeschlagenen Testbetrieb der Minibiogasanlage:

- Keine Heizung. In Deutschland sind die Umgebungstemperaturen in einem Keller nicht ausreichend, um eine Biogasanlage ohne zusätzliche Heizung zu betreiben. Die mesophilen Bakterien, mit denen die Anlage geimpft wurde, konnten unter diesen Lebensbedingungen kein Biogas produzieren.
- Zu hoher Trockensubstanz-Gehalt des Substrats. Das einzubringende Substrat muss noch stärker zerkleinert werden und es muss penibel auf einen niedrigen TS-Gehalt im Fermenter geachtet werden. Nur auf diese Weise funktionieren die Umwälzung und der Transport des Substrats im Fermenter.
- Falsches Anfahren der Anlage. Die Anlage wurde komplett mit kaltem Biogasmaterial der Anlage Südergellersen gefüllt und dann zusätzlich mit den eigentlichen Substraten aus der Küche gefüttert. Auf diese Weise waren der TS-Gehalt schon beim Anfahren zu hoch und die Fermentertemperatur von Beginn an zu niedrig. Diese Umgebungsbedingungen führten zu einer schnellen Versauerung des Substrats im Fermenter.

## 5.2.Lösungsansätze und Fragestellungen

### **Heizung**

Die Wärmeenergiezufuhr mit heißem Wasser in das bestehende Gärsubstrat hinein war in dem Versuchsaufbau dieser Bachelorarbeit nicht ausreichend, um den Fermenter zu erwärmen und die Bakterienaktivität in Gang zu bringen. Auch die nachträglichen Heizungsversuche verzeichneten keinen Erfolg. In dem Fall des hier betrachteten Versuchsaufbaus war es nicht möglich, ohne eine zusätzliche Heizung Biogas aus Bioabfall zu gewinnen. Im optimalen Fall wird die Biogasanlage mit einer Heizung mit Temperatursteuerung ausgestattet, um eine konstante Temperatur im Fermenter zu gewährleisten. Der Einsatz von Heizenergie sollte so gering wie möglich und hoch wie nötig ausfallen, um die Betriebskosten der Anlage nicht in die Höhe zu treiben.

Bezüglich dieses Themas sind verschiedene Fragestellungen denkbar. Interessant wäre es zu klären, ob die Zufuhr von heißem Wasser einer warmen, aktiven und gut isolierten Anlage als Wärmezufuhr genügt und wenn ja, wieviel davon notwendig ist und wie häufig die Wärmezufuhr erfolgen muss. Falls dies nicht der Fall ist stellt sich die Frage, wieviel Heizleistung notwendig ist um die Anlage in einem mesophilen Temperaturbereich zu fahren. Eine weitere interessante Fragestellung ist, ob es möglich ist, eine Minibiogasanlage im psychrophilen Temperaturbereich zu betreiben. Mit einer Verweilzeit des Materials von 40-50 Tagen lässt sich auch bei einer Fermentertemperatur von 20°C eine ähnliche Methanausbeute erreichen wie bei einer Anlage im mesophilen Temperaturbereich mit der halben Verweilzeit [Sutter & Wellinger, 1988].

Dies würde es eventuell ermöglichen, auf die zusätzliche Heizung zu verzichten und somit potentielle Probleme mit der Heizungsanlage und zusätzliche Verschleißmöglichkeiten zu vermeiden.

### **TS-Gehalt**

Durch die Temperaturproblematik wurde ein anderes Problem wenig beachtet, was bei Beseitigung eben dieser zu einer weiteren Herausforderung werden kann. Wie im Protokoll ersichtlich, war zum Teil erhebliches Pumpen notwendig, um das Substrat im Fermenter zu bewegen. Der TS-Gehalt war deutlich zu hoch und das zugeführte Substrat vermutlich nicht ausreichend zerkleinert. Trotz Wertlegung auf ausreichende Zufuhr von Wasser war dies in Kombination mit den groben Küchenabfällen nicht ausreichend, um einen flüssigen Fermenterinhalt zu gewährleisten. Auch hier gilt es in weiteren Versuchen herauszufinden, wie stark das Substrat zerkleinert werden muss und welcher TS-Gehalt auf keinen Fall überschritten werden darf, um eine reibungslose Funktionalität der Anlage zu gewährleisten. Es ist davon auszugehen, dass das Material bei der zu erstrebenden Bakterienaktivität in einem Maße zerkleinert wird, die für die Funktion der Anlage ausreichend ist. Diese Annahme basiert jedoch auf Spekulation und muss durch empirische Versuche bestätigt werden. Hier ist die Aufenthaltsdauer des Substrats im Fermenter von entscheidender Bedeutung.

## **Anfahren**

Ein geringer TS-Gehalt schon beim Anfahren ist von entscheidender Bedeutung. Ein Lösungsansatz ist, die Anlage mit Wasser gefüllt auf die notwendige Temperatur zu bringen und anschließend mit Biogasmaterial und Substrat zu impfen und den TS-Gehalt langsam zu steigern. Auch eine teilweise Rückführung von Material des Ablaufes in den Zulauf könnte das Anfahren beschleunigen.

Die vorgestellten Lösungsansätze beziehen sich ausschließlich auf die Minibiogasanlage dieser Bachelorarbeit. An einen Prototyp, der in einem warmen Entwicklungsland getestet wird, werden andere Anforderungen gestellt und es werden sich andere Probleme ergeben.

Abseits der gemachten Fehler existieren weitere Fragestellungen, die es zu klären gilt.

Im Falle einer erfolgreichen Gasproduktion ist die Konzeption und Konstruktion eines geeigneten Gasbehälters notwendig. Die zumindest in Deutschland einzig sinnvolle Nutzung des gewonnenen Biogases besteht wie in Kapitel 3.7. erläutert darin, dieses zum Kochen zu nutzen. Der Gasbehälter sollte eine direkte Brücke zwischen Anlage und Gasherd darstellen und den notwendigen Druck für den Kochvorgang erzeugen.

Ein weiteres Thema, das es bei Biogasproduktion zu beachten gilt, ist das deutsche Recht und die Betriebssicherheit. Wie groß ist die Explosionsgefahr, welche Abstände müssen eingehalten werden? Die Idee, ein Notablassventil zu installieren und ausströmendes Gas in einem Fahrradschlauch aufzufangen, entstand im Rahmen dieser Arbeit. Ob dies eine praktikable und funktionsfähige Lösung sein kann, muss getestet werden und auch hier der Sicherheitsschutz gewährleistet sein.

Im Falle eines voll funktionsfähigen Modells gilt es zu klären, wie die rechtliche Situation im jeweiligen Land die Nutzung einer Biogasanlage zulässt beziehungsweise einschränkt. Hier ist mit rechtlichen Hürden zu rechnen. Eine Einschätzung und Aufbereitung dieses Themas würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen.

Geklärt werden muss auch, wie die funktionierende, aktive Biogasanlage darauf reagiert, einige Tage ohne neues Substrat auszukommen (der Betreiber ist zum Beispiel im Urlaub) und wie die Anlage auf Diäten und damit einhergehende Substratzusammensetzungsänderungen reagiert.

## 5.3. Wirtschaftlichkeitsrechnung

### 5.3.1. Wirtschaftlichkeit in Deutschland

Die Materialkosten des Prototyps II dieser Bachelorarbeit belaufen sich auf 316 Euro. Etwa 16 Arbeitsstunden wurden benötigt, die Minibiogasanlage fertigzustellen. Die Kosten für einen Prototyp sind ungleich höher als dies bei einem Serienprodukt der Fall wäre. Um eine Wirtschaftlichkeitsberechnung vornehmen zu können, ist es notwendig, einen Preis für die Minibiogasanlage festzusetzen. Es wird die Annahme getroffen, dass es möglich ist, die Arbeitsstunden und Materialkosten so zu reduzieren, dass die gesamten Kosten in etwa den jetzigen Materialkosten entsprechen. Dieser Kostenfaktor wird auf 320 Euro festgelegt. Der Verfasser der Arbeit geht davon aus, dass die Anlage eher günstiger wird als diese Kostenannahme.

Kosten für das Substrat der Biogasanlage entstehen nicht. Im Gegenteil, es werden Kosten für die Biotonne und deren Abtransport gespart. Ein 80L-Gefäß, welches bei monatlicher Leerung für die berechnete Menge an Bioabfall von maximal 31 Tage  $\times 0,270\text{g} = 8,4\text{kg}$  ausreicht, kostet in Hamburg monatlich 1,72 Euro. In dieser Rechnung wird davon ausgegangen, dass die Gärreste im eigenen Garten verbraucht oder ohne zusätzliche Mehrkosten entsorgt werden. Die jährliche Ersparnis beläuft sich somit auf  $12 \times 1,72 \text{ Euro} = 20,64 \text{ Euro}$  [Stadtreinigung Hamburg, 2015].

Durch die Nutzung des von der Anlage produzierten Biogases wird Energie eingespart. Da das Biogas idealerweise zum Kochen genutzt wird, ersetzt dies den dafür benötigten Strom. Der Übersicht und Einfachheit halber wird hier darauf verzichtet, auch das Backen mit Gas in die Rechnung miteinzubeziehen. In einem Singlehaushalt fallen etwa 8 Prozent des Stromverbrauchs beim Kochen an. Dies entspricht pro Jahr 178 kWh [Energieagentur NRW, 2011].

Ein Singlehaushalt produziert wie in Kapitel 3.3 aufgezeigt 60 kWh Energie in Form von Biogas. Dies ist ziemlich genau ein Drittel des anfallenden Verbrauchs und auch an dieser Stelle sei noch einmal angemerkt, dass die veranschlagten 60kWh mit Leichtigkeit zu überbieten sind. Zum Beispiel jede dritte Mahlzeit könnte mit Biogas zubereitet werden.

Die Stromkosten pro kWh im Herbst 2015 belaufen sich auf durchschnittlich 520 Euro pro Jahr bei einem Verbrauch von 2000kWh. [Verivox, 2015; siehe auch Abbildung 3 im Anhang]. Damit kostet 1 kWh 0,26 Euro – 60 kWh entsprechend 15,60 Euro. Können pro Jahr 60 kWh Energie durch Biogas ersetzt werden, beläuft sich die Ersparnis auf 15,60 Euro. Hier gilt festzuhalten, dass eine Steigerung des Strompreises zu erwarten ist und sich die Summe dieser Einsparung in der Zukunft erhöht.

Bei  $15,60 + 20,64 = 36,24$  Euro Ersparnis pro Jahr und einem Kostenaufwand von 320 Euro hat sich die Anlage rein wirtschaftlich nach etwa 9 Jahren amortisiert. Betriebs-, Personal- und Entsorgungskosten werden hier nicht berücksichtigt. Weiterhin ist davon auszugehen, dass die Biogasanlage innerhalb von 9 Jahren repariert werden muss und somit weitere Kosten produziert. Geht man von einer doppelten Gasproduktion und einem doppelt so hohen Strompreis aus, amortisiert sich die Anlage schon nach knapp 2,5 Jahren und ein wirtschaftlicher Betrieb der Minibiogasanlage ist in Reichweite.

Dieses Rechenbeispiel zeigt, dass es hier in Deutschland momentan nicht allein um den wirtschaftlichen Vorteil gehen kann, wenn man sich eine Minibiogasanlage zulegt. Die Idee, den Bioabfall und seine Energie zu nutzen und Müll zu vermeiden, kombiniert eventuell mit einem sinnvoll genutzten Gärrest, macht den Charme und die Attraktivität dieser Anlage aus. Der Nutzer hat das Gefühl, seinen Teil zur Müllproblematik und Energiewende beizutragen. Es ist anzunehmen, dass dies viele Menschen motivieren könnte, sich auch ohne wirtschaftliche Attraktivität mit diesem Thema zu befassen.

### 5.3.2. Wirtschaftlichkeit in Entwicklungsländern

Es ist davon auszugehen, dass die Menschen zum Beispiel in Afrika nicht in der Lage sind, den vollen Preis für eine technische Anlage wie diese Minibiogasanlage zu zahlen. Hier wird Entwicklungshilfe notwendig sein, die diesem Projekt finanziell unter die Arme greift und einen wirtschaftlichen Vertrieb auch in Dritte-Welt-Länder ermöglicht. Plakativ werden hier zwei Einsatzmöglichkeiten der Minibiogasanlage erläutert. Eine genauere wirtschaftliche Betrachtung für Entwicklungsländer war im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich.

Die erste Einsatzmöglichkeit ist in ländlichen Gegenden armer Länder wie Afrika. Die Biogasanlage würde hier ebenso zum Kochen genutzt werden und ersetzt den Brennstoff Holz. Dies bedeutet einige Vorteile. Der Transport von Holz entfällt, es entsteht ein besseres Arbeitsklima in der Hütte dank der emissionsärmeren Verbrennung von Biogas und der Gärrest der Anlage kann als Dünger genutzt werden. Die Biogasanlage bietet einen einfachen und sauberen Zugang zu Energie und macht das Leben angenehmer und effizienter. Da Zeit und ein erheblicher Energieaufwand für die Beschaffung und den Transport von Holz entfällt, kann diese überschüssige Zeit und Energie in Entwicklung und Bildung investiert werden.

Ebenso denkbar ist der Einsatz der Minibiogasanlage in großen Städten wie es in Indien viele gibt. Strom wird mit Hilfe von Dieselgeneratoren gewonnen. Aufgrund der hohen Bevölkerungsdichte ist es hier denkbar, die Anlagengröße so zu skalieren, dass eine Stromgewinnung aus dem Biogas sinnvoll wird. Dieser Strom könnte den schmutzigen, teuren Strom aus Dieselgeneratoren ersetzen und durch den

Wegfall der Geräusch- und Abgasbelastigung der Dieselgeneratoren zu einem angenehmeren Wohnumfeld beitragen. Gelingt es zusätzlich, den Strompreis der Dieselgeneratoren zu unterbieten, kann das gesparte Geld ähnlich wie in Afrika in die Entwicklung des Landes investiert werden.

## 6. Schlussbemerkungen

Eines der Ziele dieser Bachelorarbeit war die Konstruktion einer funktionsfähigen Minibiogasanlage. Dieses Ziel wurde nicht erreicht. Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei Prototypen geplant und gebaut. Der erste Prototyp musste aufgrund von Konstruktionsfehlern schnell aufgegeben werden. Der zweite Prototyp scheiterte nicht an Konstruktionsmängeln, sondern an zu wenig Erfahrung und falscher Handhabung der Biogasanlage. Im Rahmen dieser Arbeit konnten dennoch Erkenntnisse gewonnen werden, die einen zukünftigen Probetrieb deutlich vereinfachen und die Erfolgchancen steigern. Hier muss auch konstatiert werden, dass die Herausforderungen bei Planung und Realisierung und die Schwierigkeiten der Konstruktion unterschätzt wurden. Der zur Verfügung stehende Zeitrahmen und das vorhandene Know-how waren hierbei limitierend.

Der Prototyp 2 wurde nach dem misslungenen Anfahren im Rahmen dieser Bachelorarbeit entleert und unter korrigierten Bedingungen erneut getestet. Die Anlage wurde mit warmem Gärrest befüllt und steht isoliert direkt vor einer Heizung. Nach einem Absinken der zu Beginn bestehenden 50°C auf 40°C und einem Anpassen der thermophilen Bakterien an diesen mesophilen Temperaturbereich produziert die Anlage Biogas. Ein Protokoll des erneuten Anfahrens und Bilder lassen sich im Anhang unter Abbildung 4-7 einsehen. Damit ist der Beweis einer grundsätzlichen Machbarkeit erbracht.

Während der Entstehung dieser Arbeit beschäftigte sich ein Forschungsteam in Israel mit dem gleichen Ziel. Auf der Crowdfunding-Plattform Indiegogo sammelte dieses aus 9 Unternehmern und Ingenieuren bestehende Team über 150 000 Dollar ein und entwickelten die Anlage „Homebiogas“. Die Idee dahinter ist genau dieselbe wie die dieser Bachelorarbeit und die Umsetzung so gut wie abgeschlossen [Indiegogo, 2015]. Dies bestätigt die Aktualität der Idee, Energie aus Bioabfall zu gewinnen und inhaltlich auch den richtigen Ansatz dieser Arbeit.

Für den Fall, dass der Strom deutlich teurer wird als dies heute der Fall ist, ist auch eine Verstromung des Biogases denkbar. Dies wäre zum Beispiel mit einer Minibrennstoffzelle möglich und würde gänzlich neue Nutzungsmöglichkeiten der Energie ermöglichen. Die Aussicht ermöglicht gerade in den kommenden Jahren und Jahrzehnten einen hohen Anschlussgrad in der Bevölkerung.

Es existieren verschiedene Motivationsgründe, sich mit der Thematik einer Minibiogasanlage zu beschäftigen. Autarke Versorgung und Unabhängigkeit vom Netzbetreiber kann eine große Motivationsquelle sein. Ebenso das Wissen, dass man mit einer Minibiogasanlage einen Beitrag zu einem anderen Energiemix und somit zur Energiewende tätigt. Und abschließend kann auch die Wirtschaftlichkeit eine entscheidende Rolle spielen, zum Beispiel bei einem Restaurant, das bedeutende Mengen an Strom und Abfall einspart und eventuell sogar neue Kunden gewinnt, die diese Art der Bewusstheit zu schätzen wissen.

Die anaerobe Vergärung unseres täglich anfallenden Abfalls im kleinen Maßstab vor Ort birgt das Potential, einen Beitrag zur Energiewende zu leisten. Etliche Projekte und Initiativen auf der ganzen Welt zeugen davon. Mit dieser Arbeit wurde hoffentlich ein kleiner und feiner Beitrag auf dem Weg zu diesem Ziel geleistet.

## 7. Literaturverzeichnis

Archea (2015): PDF mit Gaserträgen und Nährstoffgehalten. Abgerufen am 29.01.2016 unter [http://www.archea-biogas.de/\\_mediafiles/9-substrate.pdf](http://www.archea-biogas.de/_mediafiles/9-substrate.pdf)

Basisdaten FNR (2015): PDF mit Basisdaten Bioenergie Deutschland 2015. Biogasertrag und Methangehalt auf Seite 41. Abgerufen am 29.01.2016 unter [http://www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/Broschuere\\_Basisdaten\\_Bioenergie\\_2015\\_Web.pdf](http://www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/Broschuere_Basisdaten_Bioenergie_2015_Web.pdf)

BioPower (2015): PDF mit Gaserträgen und CO<sub>2</sub>-Anteil. Abgerufen am 29.01.2016 unter [http://www.bio-power.ch/files/4GQ89DX/biogasertrag\\_und\\_co2\\_anteil.pdf](http://www.bio-power.ch/files/4GQ89DX/biogasertrag_und_co2_anteil.pdf)

Biothan (2014): Flyer Biothan, abrufbar unter [http://re-fd.de/sites/default/files/flyer\\_biothan.pdf](http://re-fd.de/sites/default/files/flyer_biothan.pdf), abgerufen am 29.11.2015

BP (2014): BP, Energy Outlook 2035, January 2014.

Cointreau (1982): S.J. Cointreau; Environmental Management of Urban Solid Wastes in Developing Countries: A Project Guide; Urban Development Paper No. 5, World Bank, Washington DC.

Consentis (2014): Flyer zum CON2 Biogasfermenter von Consentis. Abgerufen am 15.9.2015 unter [http://www.consentis.de/pdf\\_files/broschueren\\_und\\_flyer/flyer\\_con2\\_dinlang\\_web.pdf](http://www.consentis.de/pdf_files/broschueren_und_flyer/flyer_con2_dinlang_web.pdf)

Destatis (2012): Erhebung über Haushaltsabfälle, Statistisches Bundesamt Wiesbaden 2012, erschienen März 2014

Destatis (2015): Abfallbilanz 2013, Statistisches Bundesamt Wiesbaden, erschienen am 7. Oktober 2015.

Diaz et al. (1999): L.F Diaz, G.M. Savage & L.L. Eggerth; Overview of Solid Waste Management in Economically Developing Countries; in: Proceedings of the International Conference Orbit 99 on Biological Treatment of Waste and the Environment, p. 749-758.

Dilewski et al. (2000): G. Dilewski, G. Janikowski & F. Kebekus; Untersuchungen zur Machbarkeit einer mechanisch-biologischen Restabfallbehandlungsanlage in Phitsanulok/Thailand; GTZ

Energieagentur NRW (2011): Energieagentur NRW, Erhebung „Wo im Haushalt bleibt der Strom?“ vom 9. Mai 2011

Energie aus Pflanzen (2014): Heft 5, 2014, Seite 14+15, Artikel „Biogas aus der Tonne“, Heinz Wraneschitz

FAO (2013): Food and Agriculture Organization of the United Nations; Food Wastage Foodprint, 2013; ISBN 978-92-5-107752-8

FNR (2014): Basisdaten Bioenergie Deutschland 2014, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Bestellnummer 469, Seite 34

Grossenlüder (2012): Artikel auf [www.grossenlueder.de/magazin/artikel.php?artikel=1399&type=&menuid=29&topmenu=29](http://www.grossenlueder.de/magazin/artikel.php?artikel=1399&type=&menuid=29&topmenu=29), erstellt am 15.08.2012

Hoornweg et al. (1999): D. Hoornweg & L. Thomas; What a Waste: Solid Waste Management in Asia; Urban & Local Government Working Paper Series No. 1, World Bank, Washington DC.

Indiegogo (2015): Homebiogas – ein Projekt aus Israel. Abrufbar unter <https://www.indiegogo.com/projects/homebiogas-turn-your-waste-into-energy#/story>, abgerufen am 26.12.2015.

Kaltschmitt (2009): Energie aus Biomasse, Springer Verlag, Martin Kaltschmitt, Hans Hartmann, Hermann Hofbauer, 2. Auflage Berlin 2009

Kern (2009): Optimierte stoffliche und energetische Bioabfallverwertung, erschienen in Bio- und Sekundärrohstoffverwertung IV. Stofflich – energetisch. Michael Kern, Thomas Raussen. Hrsg. Witzenhausen-Institut, Kassel

Lakeman (1996): Climate Change 1995, The Science of Climate Change, J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg and K. Maskell, Cambridge 1996

Lichtblick (2014): Trendumfrage Energiewende 2020, Faktenkontor GmbH

MABR (2010): Vortragsunterlagen von Jens Born und Holger Schneider zur 18th European Biomass Conference in Lyon 2010. Käuflich erwerbbar unter <http://www.etaflorence.it/proceedings/?detail=6152>

Rehau (2012): Pilot-Biogas-Projekt der Firma Rehau, Informationen abrufbar unter [http://www.sautikuufoundation.org/sautikuufoundation.org/programme\\_rehau.html](http://www.sautikuufoundation.org/sautikuufoundation.org/programme_rehau.html), abgerufen am 20.10.2015

Reinhold (2010): Dr. Ing. Gerd Reinhold, Dr. Katja Gödeke; Restgaspotential in landwirtschaftlichen Biogasanlagen, Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Jena 2010

Rongrong (2010): Rongrong Liu, Qing Tian & Jihua Chen, African Journal of Biotechnology Vol. 9(2011), pp. 1535-1542, 15 March 2010

Safley & Westerman (1992): Safley Jr., L.M., Westerman, P.W., 1992. Performance of a low temperature lagoon digester. Biores. Technol. 41, 167–175.

Schmitt (2004): Müll in Tansania. Lilian Schmitt. In: Hager Fritjof (Hrsg.) Müll und Verantwortung, Seite 143 - 164, ökom, München

Seabenergy (2014): Informationsflyer Muckbuster, abrufbar unter <http://river-of-hope.org/wp-content/uploads/2011/04/anaerobic-digesters-seab-muckbuster.pdf>, abgerufen am 25.11.2015

Spandow (2012): Internetseite über Biogasanlage mit Substrat Grassilage, abrufbar unter <http://www.trading-schneider.de/biogas/eigene-minibiogasanlage/>, abgerufen am 20.11.2015

Stadt Zürich (2006): Stadt Zürich, Entsorgung + Recycling Zürich, Verwertung der biogenen Abfälle in der Stadt Zürich, ERZ, 6.April 2006, 60 Seiten.

Stadtreinigung Hamburg (2015): Gebühren für die Abfallentsorgung in Hamburg, gültig ab 1. Januar 2011, abrufbar unter <http://www.stadtreinigung.hamburg/privatkunden/gebuehren.html>, abgerufen am 15.11.2015

Statista (2015a): PKW-Neuzulassungen in den Jahren 2012-2015, Quelle: Scotiabank

Statista (2015b): Anzahl der Personen in Deutschland, die einen Garten besitzen. Quelle: VuMa

Statista (2015c): Anzahl der Einwohner in Deutschland mit und ohne Anschluss an die Biotonne. Quelle: Abfallbilanzen der Länder.

Statista (2015d): Bevölkerung – Zahl der Einwohner in Deutschland von 2002 bis 2014. Quelle: Statistisches Bundesamt.

Strabag (2015e): Grafik Propfenstromfermenter. Abgerufen am 23.12.2015 unter [http://www.strabag-umwelttechnik.com/databases/internet/\\_public/files.nsf/SearchView/769FC48083380296C1257EE30047F683/\\$File/Trockengaerungsverfahren.jpg](http://www.strabag-umwelttechnik.com/databases/internet/_public/files.nsf/SearchView/769FC48083380296C1257EE30047F683/$File/Trockengaerungsverfahren.jpg)

Sutter & Wellinger (1988): Sutter, K., Wellinger, A., 1988. The ACF system: a new low temperature biogas digester. In: Welte, E., Szabolcs, I. (Eds.), Agricultural Waste Management and Environment Protection, Proceedings 4th International Symposium of CIEC, pp. 61–70.

Süddeutsche Zeitung Online, (2010): Artikel vom 11. August 2010 „Käfer mit Pups-Antrieb“; Autor: Fabian Mader, abgerufen am 10.9.2015

Traxel (2015): Mündliche Aussage von Wolf-Christian Traxel am 7.12.2015

Umweltbundesamt Dessau (2014): Artikel unter [www.umweltbundesamt.de/daten/abfall-kreislaufwirtschaft/entsorgung-verwertung-ausgewaehlter-abfallarten/bioabfaelle](http://www.umweltbundesamt.de/daten/abfall-kreislaufwirtschaft/entsorgung-verwertung-ausgewaehlter-abfallarten/bioabfaelle), Unterpunkt „Verwertung im Detail“, abgerufen am 19.10.2015

Umweltbundesamt Wien (2011): Report „Klimarelevanz und Energieeffizienz der Verwertung biogener Abfälle“; Christoph Lampert, Maria Tesar, Peter Thaler; REP 0353; Wien 2011

UNFCCC (2012): United Nations Framework Convention on Climate Change, Biogas Program for the Animal Husbandry Sector of Vietnam, CDM-PDD Version 3.1

Universität Stuttgart (2012): Studie „Ermittlung der weggeworfenen Lebensmittelmengen und Vorschläge zur Verminderung der Wegwerfrate bei Lebensmitteln in Deutschland“, Projektleiter Prof. Dr. M. Kranert, Februar 2012

Verivox (2015): Screenshot des am 23.9.2015 abgerufenen Strompreises auffindbar im Anhang der Bachelorarbeit

Weik (2011): Hannes Weik & Florian Klebs, „Energie zum Einpacken: Universität Hohenheim entwickelt Biogasrucksack“, abrufbar unter [www.unihohenheim.de/pressemitteilung?&tx\\_ttnews%5bttn\\_news%5d=11119&cHash=09c46114d08139136224cc24579cf7c2](http://www.unihohenheim.de/pressemitteilung?&tx_ttnews%5bttn_news%5d=11119&cHash=09c46114d08139136224cc24579cf7c2), abgerufen am 26.10.2015

Welt-Sichten (2008): Ausgabe 4-2008, Interview mit Günther Wehenpol „Im Müll liegen die Rohstoffe der Zukunft“

USA.GOV (2015): Grafik kontinuierlicher Rührkessel. Abgerufen am 29.01.2016 unter <http://netl.doe.gov/research/on-site-research/research-portfolio/coal-research/carbon-capture/post-combustion-solvents-for-carbon-capture>

Wirtschaftsdienst (2014): Siedlungsabfallaufkommen in Deutschland; Friso Schlitte, Sven Schulze; DOI: 10.1007/s10273-014-1733-3

Wirtschaftswoche Green (2014): Artikel vom 1.8.2014 „Strom aus dem Klo: Ein Abwassersystem macht aus Fäkalien Energie“; Autor: Wolfgang Kempkens

X-Runner (2011): Informationen zum Unternehmen X-Runner Venture sind verfügbar auf [www.xrunner-venture.com](http://www.xrunner-venture.com), aufgerufen am 26.10.2015

Zeeman (1988): Zeeman, G., Sutter, K., Vens, T., Koster, M., Wellinger, A., 1988. Psychrophilic digestion of dairy and pig manure: startup procedure of batch, fed-batch and CSTR-type digesters. Biol. Wastes 26, 15–31.

## 8. Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Datum:

-----

# Anhang

Abbildung 1: Zuschnittsliste Prototyp 2

Abbildung 2: Stückliste Prototyp 2

Abbildung 3: Strompreis für 2000 kWh

Abbildung 4: Laborversuch MBA Protokoll

Abbildung 5: Laborversuch MBA Bild 1

Abbildung 6: Laborversuch MBA Bild 2

Abbildung 7: Laborversuch MBA Bild 3

<b>Zuschnittslisten</b>				
Siebdruckplatten 15mm				
Pos.:	Anzahl:	Breite in mm	Länge in mm	Bemerkung
1	1	310	725	Boden
2	1	385	785	Deckel
3	1	715	470	Außenwand
4	2	285	470	Außenwand
5	3	285	270	Trennwand unten
6	2	285	370	Trennwand oben
Acrylglas transparent 5mm				
Pos.:	Anzahl:	Breite in mm	Länge in mm	Bemerkung
1	1	715	490	Außenwand lang
Kanthölzer 40x60				
Pos.:	Anzahl:	Länge in mm	Bemerkung	
1	2	785	Kranz oben	
2	2	305	Kranz oben	
3	2	725	Auflager unten	

Abbildung 1: Zuschnittsliste Prototyp 2

<b>Stücklisten</b>				
Pos.:	Anzahl:	Länge	Einheit	
1	1			Schlauchanschluss
2	1	0,5	m	Schlauch
3	4			HT DN50 - 90 Grad Bogen
4	1	0,25	m	HT DN50 - Rohr
5	1	0,25	m	HT DN70 - Rohr
6	1			HT DN70 - 90 Grad Bogen
7	1	0,25	m	HT DN70 - Abwasserrohr Übergang
8	1			HT DN50 - Anschraub Muffe
9	1			HT DN70 - Anschraub Muffe
10	1			HT DN100 - Anschraub Muffe
11	1			HT DN100 - Verschlussdeckel
12	1	0,5		Dümpelrohr
13	2			Dichtungen für Dümpel
14	1		300 ml	Silikon schwarz
15	1		300 ml	Silikon Transparent
16	1		1 Liter	Flüssigkunststoff schwarz
17	30			Unterlegscheiben 4mm für Acrylglas
18	30			Schrauben 3,5 x 30 Lisenkopf
19	140			Senkkopfschrauben 3,5 x 40
20	1		300 ml	Holzleim oder Montagekleber
21	2			HT DN50 - Rohrhalter
22	2			HT DN70 - Rohrhalter

Abbildung 2: Stückliste Prototyp 1

Aktueller Verbrauch **2.000 kWh pro Jahr** in **22307 Hamburg** [Ändern](#)

Ihr derzeitiger Stromanbieter und -tarif:

Vattenfall Europe Sales GmbH

Hamburg Basis Privatstrom

Nur Öko- und Klimatarife anzeigen

Einmaligen Bonus in Kosten einrechnen

**Grünwelt Energie**

Eine Marke von Stromio grünstrom classic

- 12 Monate eingeschränkte Preisgarantie
- 12 Monate Vertragslaufzeit
- Onlinetarif
- Gültig seit 22.09.2015

**VERIVOX 1. PLATZ PREISLEISTUNG 09/2014**

**110,97 € gespart**  
518,63 € im 1. Jahr

[Mehr zum Tarif](#)

Tarifdetails + Anbieterdetails + ★★★★★ (435) +

Filtereinstellungen Tarife (52 von 425)

**Nur empfohlene Tarife zeigen (52)**

Aktuell zeigen wir Ihnen **nur Tarife, die den Verivox-Tarifempfehlungen entsprechen.**

Nur regionale Tarife zeigen (11) **NEU**

Alle Tarife zeigen (425)

**Vertragslaufzeit** bis 12 Monate

**Kündigungsfrist** bis 6 Wochen

**Verlängerung** bis 12 Monate

**Preisgarantie** min. 12 Monate

**Paket-Tarife** Nein

**Kautions** Nein

**Vorauskasse** Nein

**Direkte Wechselmöglichkeit** Ja

**Tarife erfüllen Verivox-Richtlinien** Ja

**Nur regionale Anbieter** Nein

**Tarife pro Anbieter** 1

Ihre ermittelten Ergebnisse

**ENSTROGA** AKTIENGESELLSCHAFT

1. **EinfachNatur**

- 12 Monate eingeschränkte Preisgarantie
- 12 Monate Vertragslaufzeit
- Onlinetarif
- Gültig ab 24.09.2015

**120,75 € gespart**  
508,85 € im 1. Jahr

[Mehr zum Tarif](#)

Tarifdetails + Anbieterdetails + ★★★★★ (7) +

**extraenergie**

2. **Extrastrom Natur Pur**

- 12 Monate eingeschränkte Preisgarantie
- 12 Monate Vertragslaufzeit
- Onlinetarif
- Gültig seit 19.09.2015

**120,00 € gespart**  
509,60 € im 1. Jahr

[Mehr zum Tarif](#)

Tarifdetails + Anbieterdetails + ★★★★★ (403) +

**GRÜNERFUNKE**

Eine Marke von Fuxx Home

- 12 Monate eingeschränkte Preisgarantie
- 12 Monate Vertragslaufzeit
- Gültig seit 22.09.2015

**112,34 € gespart**  
517,26 € im 1. Jahr

[Mehr zum Tarif](#)

Tarifdetails + Anbieterdetails + ★★★★★ (69) +

Abbildung 3: Strompreis für einen Verbrauch von 2000 kWh pro Jahr vom 23.09.2015

Protokoll Laborversuch Minibiogasanlage		
Dienstag	01.12.2015	Versuchsstart
		Temperatur 40 - 50°C
		Erstbefüllung mit ca. 70 Litern Flüssigsubstrat
		aus Nachgärbehälter der Linie 1
Donnerstag	03.12.2015	Sichtkontrolle
		noch keine Sichtbare Reaktion
Montag	07.12.2015	ca. 10 Liter Flüssigsubstrat aus Nachgärer 1 nachgefüllt,
		noch keine erkennbare Gasbildung
Mittwoch	09.12.2015	ca. 10 Liter Flüssigsubstrat aus Nachgärer 1 nachgefüllt,
		noch keine erkennbare Gasbildung
		zusätzliche Zugabe von ca. 0,25 Liter Roggenschrot
Donnerstag	10.12.2015	ca. 10 Liter Flüssigsubstrat aus Nachgärer 1 nachgefüllt,
		gering erkennbare Gasbildung
		zusätzliche Zugabe von ca. 0,3 Liter Melasse
Montag	14.12.2015	ca. 10 Liter Flüssigsubstrat aus Nachgärer 1 nachgefüllt,
		erkennbare Gasbildung
		zusätzliche Zugabe von ca. 0,3 Liter Melasse
		Temperatur der Anlage: zwischen 38 - 42°C
Dienstag	15.12.2015	weitere 10 Liter Flüssigsubstrat nachgefüllt,
		deutlich erkennbare Gasbildung,
		nochmalige Zugabe von 0,3 Liter Melasse
Mittwoch	16.12.2015	weitere 10 Liter Flüssigsubstrat nachgefüllt,
		weiterhin deutlich erkennbare Gasbildung,
Donnerstag	17.12.2015	weitere 10 Liter Flüssigkeit (Wasser) nachgefüllt,
		weiterhin deutlich erkennbare Gasbildung,
		Zugabe von Roggenschrot, Becher ca. 0,25 Liter,
		Melasse, Becher ca. 0,25 Liter
		weiterhin deutlich erkennbare Gasbildung,

Abbildung 4: Protokoll Laborversuch MBA



Abbildung 5: Laborversuch MBA Außenansicht isoliert



Abbildung 6: Laborversuch MBA Thermometer



Abbildung 7: Laborversuch MBA Draufsicht ohne Isolierung