



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN

Vienna University of Technology

# Diplomarbeit

## Einsatz von Vakuumtrocknern zur Behandlung flüssiger Gärreste aus der Abfallvergärung – Technische, wirtschaftliche und energetische Bewertung

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

### Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

**Univ.-Prof. Dr. Hermann Hofbauer**

(E166 Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und technische Biowissenschaften)

**DI (FH) Peter Scherl**

(Thöni Industriebetriebe GmbH Industriebetriebe GmbH)

eingereicht an der Technischen Universität Wien

**Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften**

von

**Nils Hackl**

1525810

Nasstal 12a

6130 Schwaz

Telfs, März 2018

---

Nils Hackl



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN  
Vienna University of Technology

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

## **Diplomarbeit**

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und, dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

## Danksagung

Als Erstes möchte ich mich an dieser Stelle bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung meiner Diplomarbeit unterstützt und motiviert haben.

Ganz besonderer Dank gilt meinen zwei Betreuern. An der technischen Universität Wien Univ.-Prof. Dr. Hermann Hofbauer und bei der Firma Thöni Industriebetriebe GmbH Industriebetriebe GmbH DI (FH) Peter Scherl. Durch deren Fachwissen und kompetente Ratschläge wurde mir es erst möglich, diese Arbeit zu verfassen. Darüber hinaus möchte ich mich bei der Firma Thöni Industriebetriebe GmbH mit all ihren Mitarbeitern bedanken, insbesondere bei dem stellvertretenden Bereichsleiter DI Heinz Berger. Das fundierte Wissen, die bereitgestellten Unterlagen und die gute Arbeitsatmosphäre tragen einen maßgeblichen Anteil am Erfolg dieser Arbeit.

Zum Schluss möchte ich mich auch noch bei meiner Familie, meinen Freunden und allen Personen, welche mich in den letzten Jahren während meiner Ausbildung unterstützt haben, und mir die nötige Motivation gegeben haben, jede schwierige Situation zu meistern, bedanken.

## Kurzfassung

Als nachhaltige Technologie sind Biogasanlagen zu einem unverzichtbaren Bestandteil moderner Energieversorgung geworden. Insbesondere die Bioabfall Vergärung gibt die Möglichkeit, nachhaltig Energie zu erzeugen, ohne dabei ein Konkurrenzprodukt zur Lebensmittelindustrie zu sein. Neben dem klassischen Bioabfall kann auch die organische Fraktion des Restmülls, sowie weitere Abfallsorten mit organischem Anteil eingesetzt werden.

Zunehmend zeigt sich, dass die Verwertung der Gärreste, insbesondere der flüssigen Fraktion, zu Problemen führt. Die Ausbringung ist nicht rentabel und wird immer mehr durch Verordnungen begrenzt. Es wird immer schwieriger, den flüssigen Gärrest unbehandelt auszubringen, deshalb muss die Menge des Gärrestes verringert werden. Es gibt nun mehrere Möglichkeiten, wie das Volumen der flüssigen Gärreste vermindert werden kann. Eine Variante ist dabei die Reduzierung des Wassergehaltes durch Verdampfung. Eine besondere Art der Verdampfung ist die Vakuumverdampfung, welche zur Behandlung von Gärresten gewisse Vorteile besitzt.

In dieser Diplomarbeit wird überprüft, ob und unter welchen Bedingungen eine Verdampfung des flüssigen Gärrestes sinnvoll ist. Dabei hat sich gezeigt, dass in Abhängigkeit von den Ausbringungskosten die Behandlung flüssiger Gärreste sinnvoll sein kann. Unter den günstigsten Bedingungen kann, bereits bei Ausbringungskosten von mehr als 10 Euro pro Tonne, die Verdampfung rentabel sein. Übersteigen die Kosten 25 Euro pro Tonne, werden auch bei den schlechtesten Bedingungen Profite erzielt.

Die immer höhere Biogasanlagendichte und striktere Gesetze führen dazu, dass die Ausbringungskosten zukünftig steigen werden. Deshalb ist die Vakuumverdampfung eine gute Möglichkeit Einsparungen zu erzielen. Anlagenbetreiber sollten sich schnell mit diesem Thema auseinandersetzen, da in den nächsten Jahren noch Förderungen vergeben werden.

## Abstract

As a sustainable technology biogas plants have become an important part of modern energy supply. In particular, the biowaste fermentation gives the opportunity to generate sustainable energy without being a competitor to the food industry. In addition to the classic biowaste, the organic fraction of the residual waste, as well as other types of waste with organic content, can be used.

Nevertheless the utilization of fermentation residues, in particular the liquid fraction, leads to problems. The spreading is not profitable and is limited by regulations and as a result it is becoming more and more difficult to use the residuals untreated. Therefore, the amount of the residues must be minimized. There are several ways in which the volume of liquid digestate can be reduced. One possibility is the reduction of the water content by evaporation. A special type is the vacuum evaporation, which has certain advantages for the treatment of the liquid residues.

This diploma thesis examines, if and under what conditions an evaporation of the liquid fermentation residues is useful. It has been shown that, depending on the spreading costs, the treatment of liquid fermentation residues can be valuable. Under the most favourable conditions, evaporation can be profitable even at a cost of more than € 10 per ton. If costs exceed €25 per ton, profits will be made even in the worst conditions.

The increasing biogas plant density and stricter laws cause that the spreading costs will increase in the future. Therefore, the vacuum evaporation is a good way to achieve savings. Plant operators should deal with this topic quickly, as subsidies can still be awarded in the next few years.

---

# Inhalt

1	Einleitung.....	1
1.1	Problemstellung .....	2
1.2	Methodisches Vorgehen.....	3
1.3	Erwartetes Resultat .....	4
2	Theoretische Grundlagen .....	6
2.1	Entstehung von Biogas .....	6
2.2	Zusammensetzung Biogas.....	8
2.3	Milieubedingungen .....	9
2.4	Substrateigenschaften.....	10
2.5	Biogasanlage .....	11
2.6	Gärtechniken.....	12
2.6.1	Nassfermentation.....	13
2.6.2	Trockenfermentation.....	14
2.7	Gärreste Aufbereitung .....	15
2.7.1	Feste Gärreste.....	16
2.7.2	Flüssige Gärreste .....	17
2.7.3	Ammoniumsulfatlösung .....	18
3	Stand der Technik.....	20
3.1	Dekanter.....	20
3.2	Verdampfer .....	22
3.3	Gärreste Lagerung .....	24
3.4	Gärreste Ausbringung .....	26
4	Vorstellung der Lösungsangebote .....	30
4.1	Dekanter.....	30
4.1.1	Pieralisi .....	30
4.1.2	Flottweg .....	31
4.2	Verdampfer .....	32
4.2.1	MKR Metzger GmbH .....	33

---

4.2.2	Biogastechnik Süd – Vapogant.....	34
4.2.3	Arnold Biogastechnik .....	36
5	Massenbilanz.....	37
6	Energiebilanz .....	44
7	Wirtschaftliche Bewertung .....	48
7.1	Einsparungen und Erlöse .....	48
7.2	Kosten .....	50
7.3	Betrachtung der Wirtschaftlichkeit .....	51
8	Diskussion und Ausblick .....	59
9	Anhang .....	63
10	Literaturverzeichnis .....	68
11	Abbildungsverzeichnis.....	74
12	Formelverzeichnis .....	76
13	Tabellenverzeichnis.....	77
14	Symbol- und Abkürzungsverzeichnis.....	78

# 1 Einleitung

Als nachhaltige Technologie sind Biogasanlagen zu einem unverzichtbaren Bestandteil moderner Energieversorgung geworden. Zusätzlich trägt diese Technologie maßgeblich zur Sicherung von Arbeitsplätzen im ländlichen Raum bei. Insbesondere die Bioabfall Vergärung gibt die Möglichkeit, nachhaltig Energie zu erzeugen, ohne dabei ein Konkurrenzprodukt zur Lebensmittelindustrie zu sein. Neben dem klassischen Bioabfall kann auch die organische Fraktion des Restmülls, sowie weitere Abfallsorten mit organischem Anteil eingesetzt werden.

Seit 1992 ist die Zahl von Biogasanlagen in Deutschland von 139 Anlagen auf 9.209 (Stand 2016) gewachsen. [1, S.1] In Summe lieferten all diese Biogasanlagen 31,9 TWh Strom. Dies entspricht rund 8,2 Prozent des gesamten in Deutschland erzeugten Stromes. [2] Der Prozess ist ausgereift und in vielen unterschiedlichen Bereichen einsetzbar. Dennoch gibt es weiterhin Forschungsbedarf.

Zunehmend zeigt sich, dass die Verwertung der Gärreste, insbesondere der flüssigen Fraktion, zu Problemen führt. Die Ausbringung ist nicht rentabel und wird immer mehr durch Verordnungen begrenzt. Es wird immer schwieriger, den flüssigen Gärrest unbehandelt auszubringen, deshalb muss die Menge des Gärrestes verringert werden. Es gibt nun mehrere Möglichkeiten, wie das Volumen der flüssigen Gärreste vermindert werden kann. Eine Variante ist dabei die Reduzierung des Wassergehaltes durch Verdampfung. Eine besondere Art der Verdampfung ist die Vakuumverdampfung, welche zur Behandlung von Gärresten gewisse Vorteile besitzt, welche in den folgenden Kapiteln genauer erörtert werden. Es ist das Ziel dieser Arbeit, das Potential von Vakuumtrockner zur Behandlung der flüssigen Gärreste zu untersuchen, und daraus eine Empfehlung abzuleiten.

## 1.1 Problemstellung

Die Produktion von Biogas ist eine fortschrittliche Technologie und kommt weltweit zum Einsatz. Neben Biogas entstehen bei der Fermentation Gärreste, welche anschließend weiter verarbeitet werden. Durch unterschiedliche verfahrenstechnische Schritte, werden die Gärreste in eine Fest- und eine Flüssigfraktion aufgetrennt. Die festen Bestandteile werden anschließend aerob weiter abgebaut und es entsteht Kompost. [3, S.12]

Die Verwendung der flüssigen Gärreste ist hingegen problematischer. Grundsätzlich darf aufgrund der Düngeverordnung nicht zu jeder Jahreszeit Düngemittel auf Feldern ausgebracht werden. Deshalb müssen große Tanks angelegt werden, um die flüssigen Gärreste für mindestens 6 Monate speichern zu können. [4, §12]

Zusätzlich darf auf Grund einer Novellierung der Düngeverordnung in Deutschland bei organischen Düngern maximal 170 Kilogramm Stickstoff pro Hektar und Jahr ausgebracht werden. [5, S.1310] Dies führt dazu, dass in manchen Gebieten die Ausbringung nicht mehr ausreichend möglich ist. Ein weiteres Problem ist, dass die flüssigen Gärreste, im Verhältnis zu ihrem Volumen, nur einen sehr geringen Nährstoffgehalt besitzen.

Eine Möglichkeit dieses Problem zu lösen ist, durch eine Aufkonzentrierung das Volumen zu verringern. Das Wasser wird aus dem flüssigen Gärrest bis zu einem gewissen Grad entfernt, dadurch steigt die Konzentration an Nährstoffen und das Volumen nimmt ab. Dies kann durch unterschiedliche Verfahren (Membranverfahren, Verdampfung, Verdunstung, etc.) erreicht werden. [3, S.27]

In dieser Arbeit soll im speziellen die Anwendbarkeit von Vakuumverdampfern überprüft werden. Diese haben einen geringeren Energieverbrauch und können auch mehrstufig eingesetzt werden.

Als Erstes muss überprüft werden, inwieweit eine Eindampfung mittels Vakuumverdampfer technisch umsetzbar ist. Anschließend wird eine Energiebilanz erstellt, damit ersichtlich wird, wie viel Energie in den einzelnen Prozessen verbraucht wird und ob ausreichend thermische Energie vorhanden ist, um den Prozess zu betreiben. Abschließend werden die Kosten und Erlöse erhoben und bewertet, ob dieses Verfahren wirtschaftlich sinnvoll ist.

## 1.2 Methodisches Vorgehen

Am Beginn dieser Arbeit muss das Verhalten einer Anlage simuliert werden. Dabei werden vom Input Material ausgehend, bis zum Fermenter Austrag, alle Stoffströme berechnet. Ziel ist es, aus der dabei entstandenen Massenbilanz quantitative und qualitative Aussagen über den Gärrest zu machen. Wichtig ist, dass die simulierte Anlage in ihrer Größe und Art, eine repräsentative Anlage ist, damit das Endergebnis auf möglichst viele andere Anlagen anwendbar ist. Die Wahl des Inputmaterials spielt auch eine zentrale Rolle, da dieses, zusammen mit der Fermentertechnik, einen entscheidenden Einfluss auf die Zusammensetzung des Gärrestes hat.

Zusätzlich muss entschieden werden, wie das entstandene Biogas verwertet wird, weil dadurch Synergien entstehen können, welche sich positiv auf die Energiebilanz auswirken können. Zum Beispiel wirkt sich die Nutzung der Abwärme eines Blockheizkraftwerkes in mehrerlei Hinsicht positiv auf den Prozess aus. Auf der einen Seite kann ein Teil des produzierten Stromes genützt werden, um die Trocknungsanlagen mit elektrischer Energie zu versorgen und auf der anderen Seite kann die Abwärme des Blockheizkraftwerkes genutzt werden, um die, vom Verdampfer benötigte Wärme, bereitzustellen.

Als Nächstes muss ein passender Dekanter und Verdampfer gefunden werden. Hierbei ist es wichtig, die Kennzahlen des Herstellers kritisch zu hinterfragen und gegebenenfalls konservative Annahmen zu treffen, damit ein zuverlässiges Resultat erzielt wird. Es werden sowohl mehrere Dekanter, als auch Verdampfer bei Herstellern angefragt. Dadurch kann ein Überblick über die bestehenden Lösungsansätze gewonnen werden und die Vor- und Nachteile der verschiedenen Technologien gegenübergestellt werden.

Unter Verwendung der Prozessparameter und den technischen Daten der Verdampfer, werden nun die Trennleistungen berechnet.

Der wichtigste Wert ist dabei der Trockensubstanzgehalt, da dieser maßgeblich für die Eigenschaften des Gärrestes verantwortlich ist. Darüber hinaus werden noch weitere Parameter berechnet, wie zum Beispiel der Stickstoffgehalt. Dieser ist

wichtig, da bei der Ausbringung von stickstoffhaltigen Düngern bestimmte Grenzwerte gelten.

Anschließend wird eine Energiebilanz erstellt. Diese dient zur Überprüfung, ob ausreichend Energie für die Verdampfung vorhanden ist und ist ein wichtiger Teil für die anschließenden, wirtschaftlichen Überlegungen. In der Energiebilanz wird sowohl die elektrische Energie, als auch die thermische Energie erfasst.

Der letzte Teil der Arbeit untersucht die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens und so kann in Abhängigkeit der Rahmenbedingungen eine Empfehlung abgegeben werden. Zu diesem Zweck werden Sensitivitätsanalysen erstellt, mit deren Hilfe Veränderungen bei den Kosten und Erlösen simuliert werden können.

### **1.3 Erwartetes Resultat**

Der Einsatz von Vakuumtrockner zur Behandlung flüssiger Gärreste bringt viele Vorteile mit sich. Als Erstes findet eine deutliche Volumenreduktion statt, welche die Lagerkapazität und die Nährstoffkonzentration erhöht. Die Aufkonzentrierung bewirkt, dass die Ausbringung kostengünstiger und konkurrenzfähiger wird.

Die Änderungen in der Düngeverordnung machen es in Deutschland künftig notwendig, den Stickstoff aus den flüssigen Gärresten zu entfernen. Dies ist in einem Vakuumverdampfer einfach mittels eines Brüdenwäschers umsetzbar. Das dabei entstehende Ammoniumsulfat kann anschließend als Dünger verkauft werden.

Vakuumverdampfer arbeiten bei niederen Temperaturen. In Abhängigkeit des Druckes bei einer Temperatur zwischen 40 und 100 °C. [6, S.179] Dadurch kann die, für die Verdampfung notwendige Energie aus der Kühlung des Blockheizkraftwerkes geliefert werden. Diese Synergie bewirkt eine Effizienzsteigerung der gesamten Anlage. In Deutschland ist seit der EEG- Novelle 2012 die Abwärmenutzung von Biogasanlagen verpflichtend. Aus diesen soeben genannten Gründen scheint eine Behandlung der flüssigen Gärreste mittels Vakuumverdampfer als sehr sinnvoll.

Ziel dieser Arbeit ist es, diese Technologie auf Umsetzbarkeit, Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit zu überprüfen und dadurch eine Empfehlung für die Zukunft ableiten zu können. Ist diese Bewertung positiv, könnte sich das Eindampfen flüssiger Gärreste mittels Vakuumverdampfer als standardmäßiges Verfahren durchsetzen.

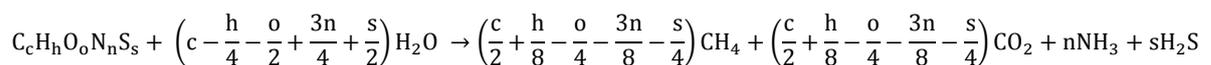
Die unterschiedlichen Technologien der einzelne Hersteller bringen Vor- und Nachteile mit sich. Durch den Vergleich kann festgestellt werden, welches Verfahren am besten zur Behandlung flüssiger Gärreste aus der Abfallvergärung geeignet ist.

## 2 Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen der Biogaserzeugung und der Gärreste Trocknung behandelt. Dieses Verständnis ist sehr wichtig da die Einsatzstoffe und anschließende Umwandlung durch die Vergärung einen großen Einfluss auf die Qualität und Quantität des flüssigen Gärrestes haben. Als Erstes wird auf die Entstehung von Biogas eingegangen.

### 2.1 Entstehung von Biogas

Für die Entstehung von Biogas sind eine Reihe von Mikroorganismen verantwortlich. Diese bauen unter Ausschluss von Sauerstoff (anaerober Prozess) organische Materialien zu Biogas ab. Mit Hilfe der *Formel 1* kann die substratabhängige Zusammensetzung berechnet werden. Die Hauptbestandteile von Biogas sind Methan (50-75 Vol.-%) und Kohlendioxid (25-50 Vol.-%). Zusätzlich können noch geringe Mengen an Wasserstoff, Schwefelwasserstoff, Ammoniak und anderen Spurengasen vorkommen. [7, S.11] Hauptverantwortlich für die Gaszusammensetzung sind die Einsatzstoffe und das Fermentationsverfahren.



*Formel 1: Substratabhängige Zusammensetzung nach Buswell und Boyle [8, S.44]*

Die Umwandlung vom Ausgangsmaterial zum Biogas kann grob in vier Schritte unterteilt werden. Diese sind in *Abbildung 1* graphisch dargestellt. Als Erstes werden bei der Hydrolyse komplexe Verbindungen, wie Fette, Eiweiße und Kohlenhydrate in einfachere Verbindungen, wie Aminosäuren, Zucker, Fettsäuren, etc. zerlegt. Anschließend werden bei der Acidogenese, durch säurebildende Bakterien, die vorher gebildeten Zwischenprodukte, in niedere Fettsäuren sowie Kohlendioxid und Wasserstoff abgebaut. In der Acetogenese werden die niederen Fettsäuren weiter zu Essigsäure, Wasserstoff und Kohlendioxid zersetzt. Zum Schluss wird in der Methanogenese aus den Produkten der Acetogenese Methan gebildet.

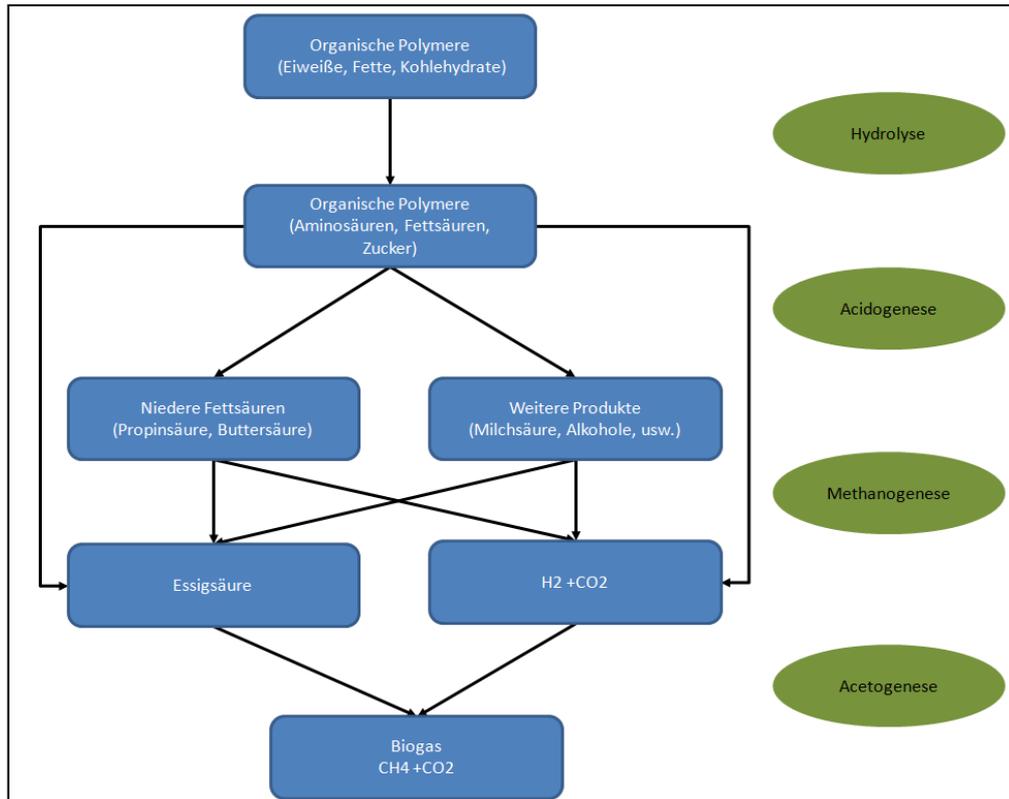


Abbildung 1: Biologische Prozesse bei der Biogasentstehung

Die Bakterien der Acetogenese und der Methanogenese bilden dabei eine Symbiose. Die acetogenen Bakterien bilden bei ihrem Stoffwechsel Wasserstoff. Dieser Wasserstoff hemmt bei steigendem Partialdruck die Funktion dieser Bakterien. Deshalb benötigen sie die methanogenen Bakterien, welche Wasserstoff zur Produktion von Methan brauchen. [7, S.11-12]

Die Vermehrung der Mikroorganismen, welche für den Abbau verantwortlich sind, führt zu der Entstehung neuer, aktiver Biomasse. Bis zu zehn Prozent des Substrates kann in Mikroorganismen- Biomasse umgewandelt werden. [9,S.1611]

## 2.2 Zusammensetzung Biogas

Die Zusammensetzung des Biogases ist von zentraler Bedeutung. In Abbildung 2 sind die Hauptbestandteile mit den einzelnen Bereichen aufgelistet. Jede Komponente hat für die Vergärung eine besondere Bedeutung. Deshalb werden diese im Folgenden kurz erläutert.

Bestandteil	Konzentration
Methan (CH <sub>4</sub> )	50–75 Vol.-%
Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> )	25–45 Vol.-%
Wasser (H <sub>2</sub> O)	2–7 Vol.-% (20–40 °C)
Schwefelwasserstoff (H <sub>2</sub> S)	20–20.000 ppm
Stickstoff (N <sub>2</sub> )	< 2 Vol.-%
Sauerstoff (O <sub>2</sub> )	< 2 Vol.-%
Wasserstoff (H <sub>2</sub> )	< 1 Vol.-%

Abbildung 2: Zusammensetzung Biogas [7, S.19]

Die wichtigste Komponente ist das Methan, welches im BHKW verbrannt wird, oder in einer Gasaufbereitungsanlage zu reinem Methan gereinigt wird. Soll das Biogas im Blockheizkraftwerk verstromt werden darf die Konzentration nicht unter 40-45% sinken, da ansonsten die Motoren das Gas nicht mehr verwerten können [7, S.78]. Sinkt die Methankonzentration trotz konstanter Beschickung, kann davon ausgegangen werden, dass eine Hemmung der methanogenen Archaeen vorliegt. Der Methangehalt kann mittels Infrarotsensoren oder Wärmeleitfähigkeitssensoren gemessen werden.

Den zweitgrößten Volumenanteil hat das Kohlendioxid. Es entsteht sowohl bei der Hydrolyse, als auch bei der Methanbildung. Das Kohlendioxid löst sich in Wasser und bildet dabei einen Hydrogencarbonatpuffer[7, S.78]. Findet im Fermenter eine Übersäuerung statt sinkt der CO<sub>2</sub> Gehalt. Dies lässt wiederum auf eine Hemmung der methanogenen Bakterien schließen. Für die Messung des Kohlendioxids werden die gleichen Messgeräte wie zur Methan Messung verwendet.

Schwefelwasserstoff hat stark korrosive Eigenschaften und darf deshalb nur in ganz geringen Mengen im Biogas enthalten sein. Die BHKW Hersteller geben die entsprechenden Grenzwerte vor. Bei zu hohen Schwefelwasserstoff Konzentrationen wird Eisen- Chlorid bzw. Eisen- Hydroxid in den Fermenter gegeben und der Schwefel ausgefällt.

Die Vergärung ist ein anaerober Prozess. Deshalb sollte kein Sauerstoff nachweisbar sein. Es kann aber sein, dass Sauerstoff zugegeben wird, wenn eine biologische Entschwefelung durchgeführt wird.

Wasserstoff ist zwar nur in geringen Mengen vorhanden, jedoch ist er ein wichtiges Zwischenprodukt im Methanbildungsprozess. Dadurch können Konzentrationsschwankungen auf Probleme in der Acetogenese hindeuten.

## 2.3 Milieubedingungen

Es ist sehr wichtig, dass die Mikroorganismen optimale Bedingungen für Wachstum und Stoffwechselprozesse vorfinden.

Als Erstes muss bei der Biogasproduktion darauf geachtet werden, dass so wenig wie möglich Sauerstoff in den Fermenter gelangt, da dieser schon in geringen Mengen die methanogenen Archaeen abtötet.

Ein wichtiger Prozessparameter ist die Temperatur. Für die verschiedenen Mikroorganismen gibt es jeweils Temperaturoptima. Werden diese unter- oder überschritten kommt es zu einer Hemmung bzw. im Extremfall zu irreversiblen Schädigungen. Die Temperaturbereiche der einzelnen Mikroorganismen werden in drei Bereiche eingeteilt:

- *Psychrophile Mikroorganismen*: Haben ihr Optimum unter 25°C. Dadurch entfällt das Aufheizen des Fermenters, jedoch sind die Ausbeuten für einen wirtschaftlichen Betrieb zu gering.

- *Mesophile Mikroorganismen:* Das Wachstumsoptimum für diese Methanbildner liegt zwischen 37 und 42°C. Es ist die größte und in der Praxis am weitesten verbreitete Gruppe. In diesem Temperaturbereich sind Gasausbeute und Prozessstabilität relativ hoch.
- *Thermophile Mikroorganismen:* Soll neben der Biogasproduktion eine Hygienisierung des Substrates stattfinden, wird eine Vergärung unter thermophilen Bedingungen eingesetzt. Diese haben ihr Optimum zwischen 50 und 60°C, wodurch gesundheitsschädliche Keime abgetötet werden. Die höhere Temperatur führt auch zu einer schnelleren Abbaugeschwindigkeit. Jedoch ist auch der Energieaufwand für die Beheizung höher.

Die Übergänge zwischen den einzelnen Temperaturbereichen sind fließend. Für die Anwendung ist von vorrangiger Bedeutung, dass es im Fermenter zu keinen abrupten Temperatursprüngen kommt. [7, S.12-13]

Ein weiterer wichtiger Parameter ist der pH-Wert. Die Herausforderung dabei ist, dass in den unterschiedlichen Abbauschritten die beteiligten Mikroorganismen verschiedene pH-Werte benötigen. Die hydrolysierenden und die säurebildenden Bakterien haben ihr Optimum bei einer leicht saueren Umgebung (pH 5,2-6,3), aber können auch bei einem geringfügig höheren pH-Wert Substrat umsetzen. Die Essigsäurebildner und die methanogenen Bakterien benötigen unbedingt einen pH-Wert im neutralen Bereich (pH 6,5-8,0). Unter normalen Bedingungen stellt sich der pH-Wert innerhalb eines Systems selber ein und ist auch auf Grund seiner Trägheit schwierig zu beeinflussen, er sollte jedoch wegen seiner hohen Bedeutung gemessen werden. [7, S.13]

## 2.4 Substrateigenschaften

Die Substrateigenschaften sind für das Biogasbildungspotential von zentraler Bedeutung. Der erste zu bestimmende Parameter ist der Trockensubstanzgehalt. Ermittelt wird dieser, indem eine Probe bis zur Gewichtskonstanz, bei 105°C, getrocknet wird. [7, S.79]

Die getrocknete Masse kann anschließend bei 550°C verglüht werden. Der zu beobachtende Glühverlust wird als organische Trockensubstanz bezeichnet. [7, S.79] Biomassen mit hohem Cellulose, Hemi-Cellulose und Lignin Gehalt (z.B.: Holz, Stroh,...) sind für die Biogasproduktion eher ungeeignet, da die Cellulose vorher mit entsprechenden Verfahren aufgespalten werden muss. Bei Bedarf können solche Stoffe als Strukturmaterial eingesetzt werden. Die Eigenschaften des Substrates entscheiden auch darüber, welche Gärtechnik zum Einsatz kommt.

## 2.5 Biogasanlage

In *Abbildung 3* ist eine Biogasanlage mit den wichtigsten Anlagenteilen dargestellt. Als erstes wird der angelieferte Bioabfall zerkleinert und anschließend über ein Sternsieb und einen Magnetabscheider geführt. Dabei werden unerwünschte Störstoffe abgeschieden. Das aufbereitete Input Material wird nun im Bunkermodul gespeichert und bei Bedarf in den Mischer dosiert.

Im Mischer wird der Biomüll zusammen mit Prozesswasser und Impfmateriale (Gärrest aus dem Fermenter Austrag) vermengt und nach dem Mischvorgang in den Fermenter gepumpt. Dort findet unter anaeroben Bedingungen der Abbauprozess statt und es entsteht Biogas.

Das Biogas wird im Gasspeicher zwischengespeichert und kann danach entweder in einem Blockheizkraftwerk zu Strom verbrannt werden, oder in einer Aufbereitungsanlage gereinigt werden.

Der Gärrest wird mit der Austragspumpe zu den Entwässerungsschnecken gepumpt. Dort findet eine Separierung in festen und flüssigen Gärrest statt. Der feste Gärrest gelangt über Förderbänder zu den Intensiv- und Nachrotten und wird zu Kompost abgebaut. Der flüssige Gärrest wird üblicherweise nach einem Absetzbecken, indem Sedimente abgeschieden werden, im Endlager gespeichert und bei Bedarf auf Feldern ausgebracht. In dieser Arbeit wird jedoch die Möglichkeit untersucht den flüssigen Gärrest weiter zu reduzieren. Deshalb werden nach den Entwässerungsschnecken noch ein Dekanter und ein Verdampfer zwischengeschaltet.

Zusätzlich ist in der Mitte des Schemas die Lüftungstechnik zu erkennen. Diese dient zur Reduktion der Geruchsemissionen.

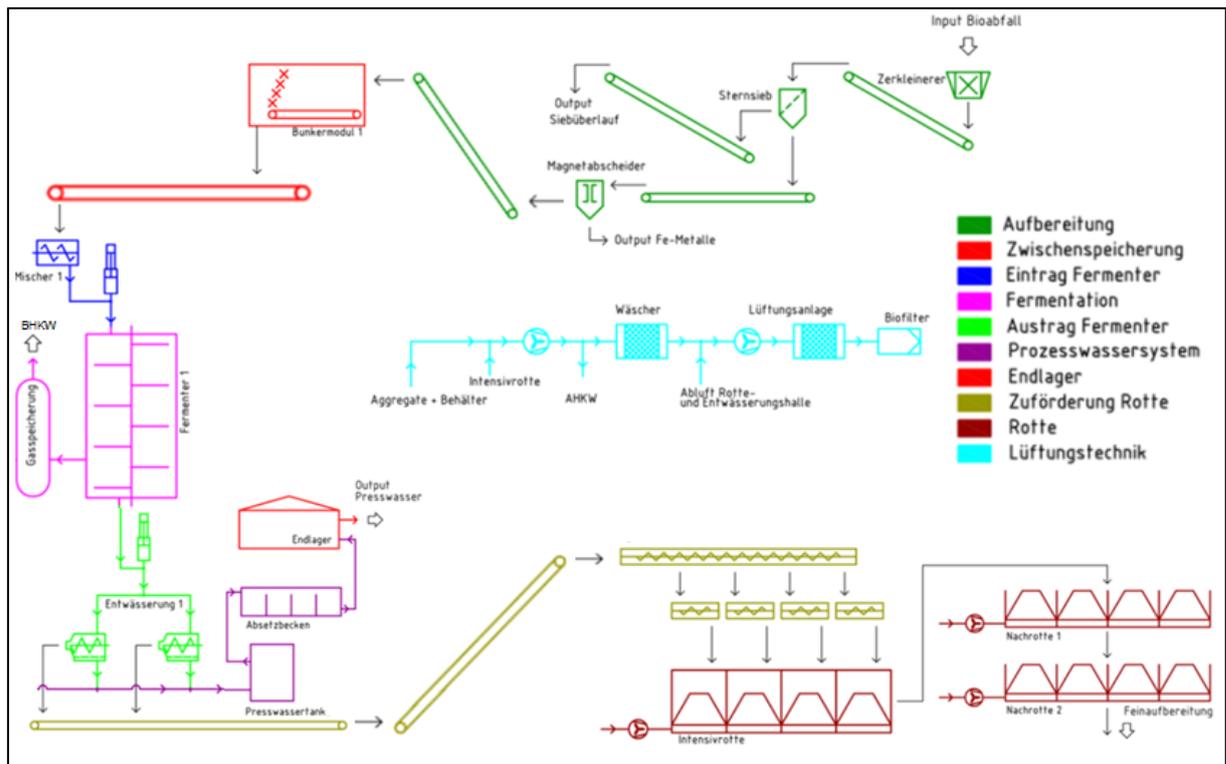


Abbildung 3: Schema Biogasanlage

## 2.6 Gärtechniken

Die im Fermenter eingesetzte Gärtechnik kann auf viele Arten unterschieden werden. Beispiele hierfür sind die Art der Beschickung, die Fermenter Temperatur, der Trockensubstratgehalt oder die Art der Durchmischung. Für die Zusammensetzung des Gärrestes ist der wichtigste Unterschied, ob der Fermenter mit Nassfermentation, oder Trockenfermentation betrieben wird.

Die Wahl, welches Fermentationsverfahren bei der Vergärung biogener Abfälle eingesetzt wird, hängt primär von der Art des Abfalles ab. Abfälle mit hohem Struktur- und Faseranteil eignen sich besser für die Trockenvergärung. Nasse und breiige Abfälle werden in der Nassvergärung behandelt. [10, S.7]

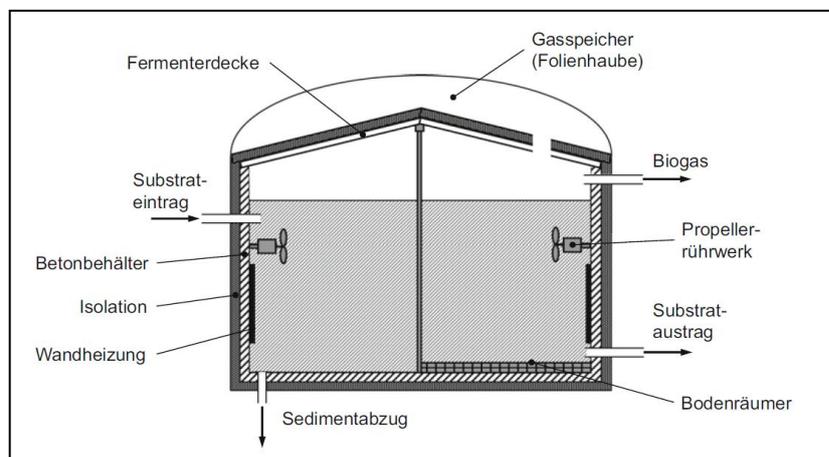
Es gibt keine einheitliche Regelung, die den Unterschied zwischen Trockenvergärung und Nassvergärung exakt beschreibt. Allgemein wird bei einem Trockensubstanzgehalt unter 15 Prozent von Nassvergärung gesprochen. Die Trockenvergärung findet im Bereich von rund 30 Prozent Trockensubstanzgehalt statt. [7, S.22]

Ein wichtiger limitierender Faktor ist die Pumpfähigkeit des Stoffgemisches. Geht diese Fähigkeit verloren, sind kontinuierliche und automatisierte Anlagen schwer umsetzbar.

### 2.6.1 Nassfermentation

Die Nassvergärung kann in kontinuierliche und diskontinuierliche Verfahren unterteilt werden. Bei diskontinuierlichen Verfahren (Batch-Verfahren) wird der Gärbehälter nach der Befüllung verschlossen und erst am Ende des Fermentationsvorganges geöffnet. Dadurch ändert sich die Gaszusammensetzung während eines Vorgangs. Diskontinuierliche Nassvergärungsverfahren kommen in der Praxis selten zum Einsatz.

In *Abbildung 4* ist ein Rührkesselreaktor für kontinuierlichen Betrieb dargestellt. Diese sind weit häufiger und können ein oder mehrstufig. Es kann zwischen Durchfluss, Speicher-Durchfluss und Durchfluss-Speicherverfahren unterschieden werden. [11, S.93]



*Abbildung 4: Rührkesselreaktor für Nassfermentation [9, S.1657]*

Die Nassvergärung ist in Deutschland die mit Abstand am weitesten verbreitete Technologie, weil sich die meisten Anlagen auf landwirtschaftlichen Höfen befinden und hauptsächlich mit Schweine- oder Rindergülle betrieben werden. Durch den

hohen Wasseranteil lässt sich die Nassfermentation günstig und schnell automatisieren. [12, S.38-39]

Ein wichtiger Aspekt bei der Nassvergärung ist, dass das Substrat immer gut durchmischt ist, da eine Entmischung die Biogasproduktion behindert.

## 2.6.2 Trockenfermentation

Die Trockenvergärung kann ebenfalls in kontinuierliche und diskontinuierliche Verfahren unterteilt werden. Bei diskontinuierlichen Verfahren wird ein Raum mit Substrat befüllt und anschließend verschlossen. Im Laufe des Prozesses ändern sich die Milieubedingungen im Fermenter, dadurch kommt es zu einer Änderung in der Gaszusammensetzung. Diese Technik ist sehr einfach und dadurch kostengünstig. Eine schwankende Gasqualität ist für eine anschließende Verwertung von großem Nachteil, deshalb kommen diskontinuierliche Verfahren nur selten zum Einsatz.

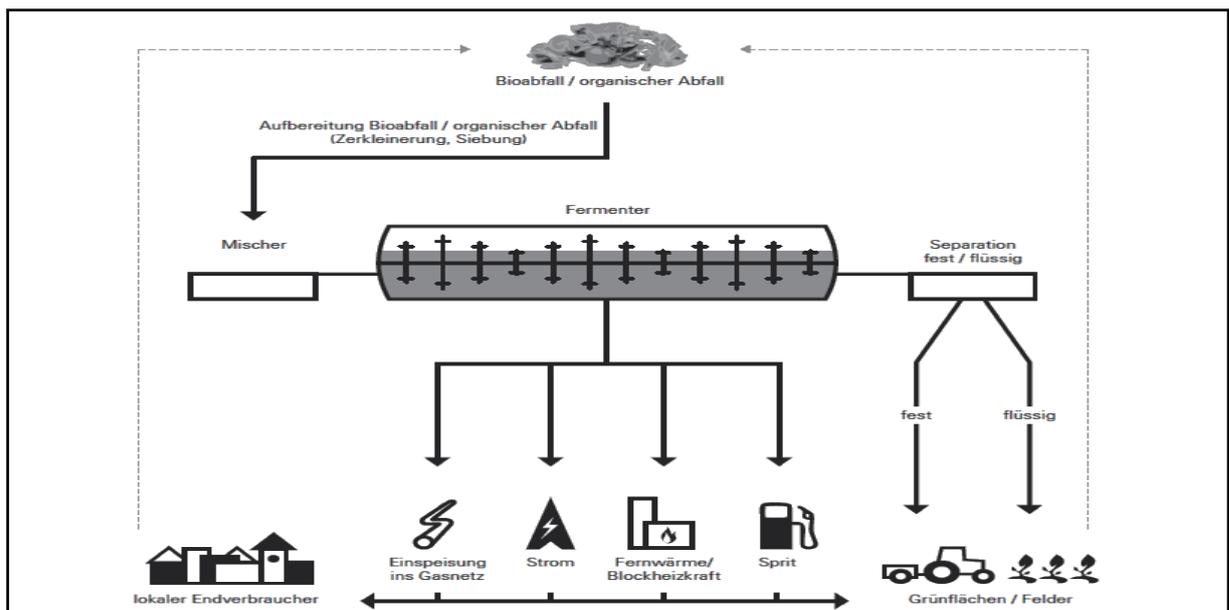


Abbildung 5: Schema einer Trockenvergärungsanlage [13]

Bei kontinuierlichen Verfahren wird das Substrat als Propfenströmung durch den Fermenter geführt (vgl. *Abbildung 5*). Die Propfenströmung wird dadurch charakterisiert, dass es fast ausschließlich zu einer vertikalen Durchmischung kommt. Die kontinuierliche Betriebsweise bewirkt eine stabile Bakterienpopulation und hat eine konstante Biogasproduktion zur Folge. Ein hoher Automatisierungsgrad

ist bei diesem Anlagentyp möglich, aber dadurch ergeben sich auch relativ hohe Investitionskosten. [7, S.36]

Die Reaktoren werden entweder als siloartige Vertikalreaktoren oder als horizontale Gärkanalreaktoren ausgeführt. In Vertikalreaktoren wird das Substrat von oben eingebracht und die Gärreste werden am Boden durch Förderschnecken ausgetragen. Der Trockensubstratgehalt wird bei der Trockenfermentation durch das Mischen mit Prozesswasser eingestellt. Es wird ein Trockensubstratgehalt zwischen 20 und 40 Prozent angestrebt. [14, S.204]

## 2.7 Gärreste Aufbereitung

In Abhängigkeit des angewendeten Verfahrens bleibt bei der anaeroben Biogaserzeugung ein fester und ein flüssiger Gärrest zurück. Die Gärreste bestehen aus Wasser, nicht umgesetztem Substrat, mineralischen Bestandteilen, düngerelevanten Nährstoffen und nichtabbaubaren Komponenten (z.B.: Lignin). Die stofflichen Eigenschaften, sowie die Zusammensetzung sind je nach Einsatzmaterial und Prozessbedingungen im Fermenter unterschiedlich.

Werden die Gärreste unbehandelt auf umliegende landwirtschaftliche Flächen ausgebracht, handelt es sich um die sogenannte Direktausbringung. Diese Ausbringung ist jedoch auf Grund der Düngeverordnung nicht ganzjährig möglich und Untersuchungen haben gezeigt, dass ab einer Distanz von über 10 km die Transportkosten den Düngewert überschreiten. [15, S.953]

Aus diesem Grund ist in den allermeisten Fällen eine Gärresteaufbereitung notwendig.

Die wichtigsten Ziele der Gärresteaufbereitung sind: [16, S.6]

- Einsparung von Ausbringungskosten
- Düngerverkauf und Komposterzeugung
- Nährstoffentlastung der Flüssigphase
- Vermeidung flüchtiger Luft- und Atmosphärenschadstoffe
- Abbau geruchsintensiver Komponenten
- Inaktivierung von Krankheitserregern und Unkrautsamen

Als erstes Verfahren wird die Fest/Flüssig- Trennung eingesetzt. Hierbei wird mit Schneckenpressen, Siebpressen, Dekanter, etc. mechanisch separiert. Zusätzlich können Flockungsmittel verwendet werden, jedoch muss beachtet werden, dass nur biologische Flockungsmittel (z.B.: Erbsenstärke) eingesetzt werden dürfen, da die Gärreste ansonsten nicht als Dünger verwendet werden dürfen. [6, S.87]

Abbildung 6 zeigt die Unterscheidung der Aufbereitung nach physikalischen, chemischen und biologischen Verfahren. Soll der Gärrest ausgebracht werden ist es nicht erlaubt chemische Flockungsmittel einzusetzen.

		Aufbereitungsverfahren		
		physikalisch	chemisch	biologisch
Vollaufbereitung	Teilaufbereitung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fest/Flüssig Trennung</li> <li>• Trocknung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flockung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kompostierung</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Strippung</li> <li>• Eindampfung</li> <li>• Membranverfahren</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Strippung inkl. Absorption</li> <li>• Fällung</li> </ul>	

Abbildung 6: Übersicht der verschiedenen Gärresteaufbereitungsverfahren [9, S.1705]

### 2.7.1 Feste Gärreste

Nach der Fest/Flüssigtrennung liegen zwei Fraktionen vor. Eine Möglichkeit zur Weiterbehandlung, der festen Gärreste, ist die Trocknung. Hierbei wird, mittels Heißluft, Wärme eingebracht. Problematisch sind, die bei der Trocknung entstehenden, Geruchsemissionen (vor allem Ammoniak), welche eine zusätzliche Abluftreinigung zwingend erfordern. Der Vorteil dabei ist, dass die Lagerfähigkeit, Lagerstabilität und die Transportwürdigkeit dadurch gesteigert werden. Darüber hinaus können die getrockneten festen Gärreste auch pelletiert werden, um eine bessere Handhabung zu erreichen. Die Trocknung ermöglicht auch eine Verbrennung der pelletierten Gärreste. Der Heizwert ist vergleichbar mit Stroh,

jedoch ist der Aschegehalt relativ hoch und der Ascheschmelzpunkt vergleichsweise niedrig. Zusätzlich ist, durch die im Gärrest enthaltenen Stickstoffverbindungen, ein hoher  $\text{NO}_x$  Anteil zu erwarten. Die genannten Nachteile ergeben, dass die Verbrennung nur in sehr speziellen Feuerungsanlagen möglich ist. [9, S.1734- 1735]

Üblicherweise werden die festen Gärreste jedoch kompostiert. Durch diese aerobe Behandlung findet eine Stabilisierung der Biomasse statt. Der dabei entstandene Gärkompost kann, wie herkömmlicher Kompost, als Bodenverbesserer eingesetzt werden. Nach einer Reifephase in einer Nachrotte, welche mindestens 10 bis 20 Tage dauern sollte, entsteht ein lagerfähiges Produkt. Ist der Kompost für den Verkauf vorgesehen, muss darauf geachtet werden, dass abhängig vom Inputmaterial Störstoffe abgetrennt und aktuell gültige Grenzwerte (z.B.: Schwermetalle) eingehalten werden. [9, S.1706]

### **2.7.2 Flüssige Gärreste**

Im Anschluss an die Fest/Flüssig- Trennung gibt es mehrere Möglichkeiten den flüssigen Gärrest weiter zu behandeln. Grundsätzlich haben die Verfahren zwei zentrale Ziele. Auf der einen Seite wird Wasser entfernt und dadurch das Volumen verringert, auf der anderen Seite werden gezielt Inhaltstoffe aus dem Gärrest entfernt.

Als erstes Verfahren muss hier auf die Eindampfung eingegangen werden, da diese in dieser Arbeit genauer betrachtet wird. Beim Verdampfen kann die Menge an Flüssigkeit in Abhängigkeit vom Trockensubstanzgehalt im Zulauf und Verfahren um bis zu 90 Prozent reduziert werden. Das Kondensat kann je nach Qualität verdunstet, eingeleitet, oder als Prozesswasser rückgeführt werden. Das Konzentrat kann weiter aufbereitet werden, oder als Flüssigdünger in der Landwirtschaft eingesetzt werden. Ein großer Vorteil der Verdampfung ist, dass der Dampf durch einen Brüdenwäscher geführt werden kann. In diesem reagiert Ammonium mit Schwefelsäure zu Ammoniumsulfat, welches ein hochwertiger Stickstoffdünger ist. Als Bauformen kommen Fallstrom, Zwangsumlaufverdampfer oder Vakuumverdampfer zum Einsatz. Der Vorteil von Vakuumverdampfern ist, dass sie Niedertemperaturwärme

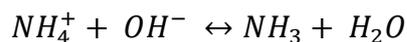
verwenden können. Das bedeutet, dass mit diesem Verfahren Abwärme z.B.: aus einem BHKW genutzt werden kann. [9, S.1707]

Die nächsten Möglichkeiten sind Membranverfahren. Hierbei werden mehrere Filtrationsverfahren hintereinander geschaltet, mit einer Umkehrosmose zum Schluss. Es entsteht ein einleitfähiges Permeat ohne Wärmezufuhr. Der limitierende Faktor ist der Trockensubstanzgehalt. Dieser darf nicht über 3 Prozent liegen, da ansonsten die Membranporen verblocken. [9, S.1707]

Das letzte hier erwähnten Verfahren ist die Fällung. Ziel ist es, gezielt einzelne gelöste Stoffe, durch die Zugabe von Chemikalien, in unlösliche Verbindungen zu überführen. Diese unlösliche Verbindungen fallen aus und können anschließend durch physikalische Trennverfahren (z.B.: Sedimentation, Filtration) abgeschieden werden. [9, S.1707]

### 2.7.3 Ammoniumsulfatlösung

Der Abbau von organischen, stickstoffhaltigen Substanzen führt zu einer Ammoniakbildung. Dissoziiert der Ammoniak in Wasser entsteht Ammonium. Dieser chemische Prozess unterliegt einem Gleichgewicht (*Formel 2*), welches durch den pH-Wert des Wassers eingestellt wird.



*Formel 2: Gleichgewicht Ammonium – Ammoniak*

Die Menge an Stickstoff in Gärresten beträgt ungefähr 4,8 kg/t FM, wobei davon rund 2,9 kg/t FM Ammonium sind. [7, S.185]

Die Ausbringungsmenge an Stickstoff ist gemäß der neuen Düngemittelverordnung mit 170 kg N pro Jahr und Hektar begrenzt. [6, S.1310] Deshalb kann es notwendig werden, den Stickstoff aus dem flüssigen Gärrest zu entfernen. Da das Ammonium im Wasser dissoziiert ist, muss es aus der flüssigen Fraktion entfernt werden. Dies geschieht bei der Verdampfung als nützlicher Nebeneffekt. Bei der sogenannten Strippung werden in einer Flüssigkeit gelösten Stoffe in die Gasphase überführt.

Druck, Temperatur und pH-Wert unterstützen diesen Vorgang. [7, S.199]

Durch die Zugabe von Schwefelsäure, reagiert der gasförmige Ammoniak, welcher zuvor aus der Flüssigkeit ausgetrieben wurde, zu Ammoniumsulfat (*Formel 3*).



*Formel 3: Reaktion von Ammoniak und Schwefelsäure*

Gemäß *Formel 3* kann der Schwefelsäurebedarf bestimmt werden. Dieser liegt bei 96 prozentiger Schwefelsäure bei 3 Kilogramm pro Kilogramm Ammoniak. [17, S.558] Zirka 80 Prozent des, in der Flüssigkeit enthaltenen, Ammoniumstickstoffs gehen bei der Verdampfung in die Gasphase über. Die restlichen 20 Prozent verbleiben im flüssigen Gärrest. [18, S.7]

Kontrolliert wird dieser Vorgang über den pH-Wert. Sobald dieser einen bestimmten Wert überschreitet, wird Schwefelsäure nachdosiert. Im Brüdenwäscher wird der Dampf an Füllkörpern von unten nach oben vorbeigeführt, während von oben die Schwefelsäure hinzugegeben wird. Im Gegenstromprinzip rieselt die Ammoniumsulfatlösung nach unten und kann dort abgezogen werden. Der große Vorteil ist, dass somit der Ammoniak in eine, für Pflanzen, sofort verfügbare Stickstoffquelle umgewandelt wurde. [19, S.4-5] Diese Ammoniumsulfatlösung kann anschließend als Dünger gewinnbringend verkauft werden.

### 3 Stand der Technik

In dieser Arbeit wird die Verdampfung als Methode zur Gärresteentwässerung genau betrachtet. Bisher sind bei Vergärungsanlagen nur Schneckenpressen, Entwässerungssiebe, oder Ähnliches verbaut. Soll eine Verdampfung realisiert werden, muss neben dem Verdampfer auch noch ein Dekanter installiert werden, um den, für die Verdampfung, benötigten Trockensubstanzgehalt zu erreichen. Deshalb wird in diesem Kapitel der aktuelle Stand der Technik von Dekantern und Verdampfern beschrieben.

#### 3.1 Dekanter

Dekanter werden heutzutage in verschiedensten Bereichen eingesetzt und bieten dabei Lösungen für unterschiedliche Trenn- und Klärprobleme. Dekanter sind horizontal gelagerte (Vollmantel-) Schneckenzenrifugen. Sie kommen hauptsächlich bei der Trennung von Suspensionen mit relativ hohem Feststoffanteil zum Einsatz. Der Dichteunterschied zwischen den zwei Phasen kann sehr klein, aber auch sehr groß sein. [20, S.396]

Die Hauptbestandteile eines Dekantern sind Gehäuse, Rotor, Produktfänger, Antrieb und das Zulaufrohr. Der Rotor ist der rotierende Absetzbehälter, welcher zusammen mit dem Produktfänger, im Gehäuse verbaut ist. [20, S.397]

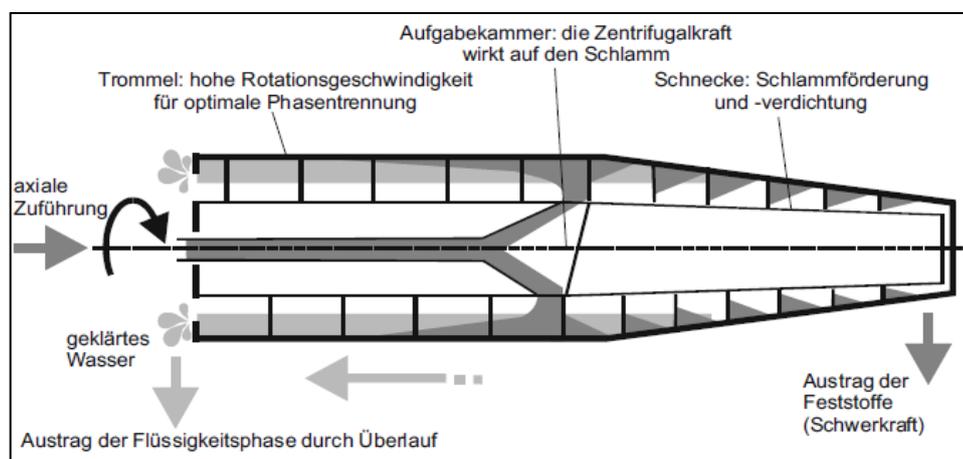


Abbildung 7: Schema eines Zweiphasen Dekantern [9, S.1564]

In *Abbildung 7* ist ein schemenhafter Querschnitt eines Dekaners zu sehen. Im Inneren des Dekaners gibt es drei Zonen. Die erste Zone befindet sich in der Mitte des Dekaners und wird Eintragszone genannt. In der Abbildung ist diese im Bereich, wo der Gärrest als erstes auf die Trommel trifft. Dort gelangt der Gärrest, über ein zentral gelegenes Rohr, von innen nach außen zur Schnecke. Der konische Teil ist die Trocknungszone, an deren Ende der Feststoffaustrag ist. Auf der anderen Seite der Eintragszone befindet sich die Klärzone, an deren Ende die Flüssigkeit abgezogen wird. [21, S.6]

Über das Zulaufrohr wird der Dekanter kontinuierlich beschickt. Durch die Rotation der Trommel sedimentiert der Feststoff infolge der Zentrifugalkraft aus und sammelt sich an der Trommelwand. Die Flüssigphase wird an einem Trommelende abgezogen. In der Trommel selbst befindet sich die Schnecke, welche mit einer etwas höheren Drehzahl, als die Trommel, rotiert. Dies bewirkt, dass der sedimentierte Feststoff zu den Austragsöffnungen transportiert wird. [20, S.399]

Je höher die Drehzahl und die Länge des Dekaners, desto höher ist die Trennwirkung. Natürlich gibt es hierbei auch limitierende Faktoren. Bei steigender Drehzahl nimmt der Verschleiß an den Schneckenblättern stark zu. Der Energieverbrauch steigt deutlich an und durch zu hohe Drehmomente kann es zu einer Überbelastung im Schneckenantrieb kommen. [20, S.422]

Weitere Einflussgrößen sind der Konuswinkel, die Schneckenausführung, der Durchsatz und die Differenzdrehzahl. [20, S.418]

Allgemein kann gesagt werden, dass ein Dekanter Feststoffteilchen in einer Größe zwischen 0,002 und 40 mm und einen Feststoffgehalt zwischen 2 und 60 %Vol. abtrennen kann. Jedoch haben Stoffeigenschaften, wie Dichte, Viskosität und Form der Teilchen einen starken Einfluss auf diese Anwendungsbereiche. [20, S.416]

## 3.2 Verdampfer

Wird eine Flüssigkeit erhitzt, steigt die Temperatur bis die Siedetemperatur erreicht wird. Ab diesem Zeitpunkt, bei dem der Dampfdruck den Systemdruck übersteigt, setzt der Verdampfungsvorgang ein. Werden Gemische verdampft, kann der Dampf entweder einen, oder bis zu allen Stoffen des Gemisches enthalten. Die Zusammensetzung hängt vom den Dampfdrücken der einzelnen Komponenten ab. Haben alle Komponenten den gleichen Dampfdruck, enthält der Dampf auch alle Komponenten. [22, S.385]

Grundsätzlich ist das Verdampfen ein einfaches Grundverfahren. Durch die steigende Stoffvielfalt haben sich jedoch viele Verdampferbauarten und Prozesstechniken entwickelt.

Zum einen wird versucht einen möglichst hohen Wärmeübergangskoeffizient zwischen Verdampferfläche und Medium zu erreichen, damit die Heizfläche und somit die Anlagenkosten reduziert werden können. Auf der andern Seite müssen spezifische Begleiterscheinungen so gut wie möglich unterdrückt werden. Diese Begleiterscheinungen können das Austragen von Flüssigkeitströpfchen mit der Dampfphase, oder das Verkrusten und Verschmutzen der Verdampferflächen sein. Hochmolekulare Stoffe neigen bei hohen Temperaturen zum Zersetzen. Diesem Umstand kann durch Vakuumverdampfung entgegengewirkt werden.

Als Heizmedium kommen unterschiedliche Stoffe zum Einsatz. Üblicherweise Wasser, welches in Form von Dampf im Verdampfer kondensiert. Darüber hinaus können auch organische Substanzen oder Salzschnmelzen zum Einsatz kommen. [22, S.386]

Bei Verdampfern wird zwischen Naturumlauf, Zwangsumlauf und Zwangsdurchlauf unterschieden. Der Naturumlaufverdampfer nutzt den, durch die verschiedenen Temperaturbereiche im Verdampfer hervorgerufenen, Dichteunterschied aus. Dieser bewirkt, dass die Flüssigkeit im Verdampfer zirkuliert. Der Nachteil von Naturumlaufverdampfer ist der geringe Lastbereich und der minimal benötigte Temperaturunterschied. Der Zwangsumlaufverdampfer hat eine Umwälzpumpe, welche für die Zirkulation des Mediums sorgt. Dadurch kann den Nachteilen des

Naturumlaufverdampfers entgegengewirkt werden. Im Zwangsdurchlauferhitzer gibt es keine Zirkulation. Das Medium wird mittels Pumpe durch die Heizfläche befördert, bis es vollständig verdampft. [23, S.330- 332]

Nach Art der Flüssigkeitsführung haben sich auch unterschiedliche konstruktive Ausführungen durchgesetzt. Eine sehr einfache Lösung ist der liegende Rohrbündelverdampfer. Dieser kann als Verdampferblase oder Aufkocher gebaut werden. Eine weite Möglichkeit ist der sogenannte Fallfilmverdampfer, bei dem von außen beheizte Rohre innen mit Produkt berieselt werden. Das Problem bei dieser Art von Verdampfern ist, dass es schwierig ist, den Film gleichmäßig zu verteilen und somit ein Abreißen zu verhindern. [22, S.387-389]

Sind die Verhältnisse im Filmverdampfer zu instabil, bietet sich als Lösung der Dünnschichtverdampfer an. In diesem Apparat kommen rotierende Wischer zum Einsatz, welche die Flüssigkeit gleichmäßig verteilen.

Dadurch werden sehr hohe Wärmeübergangskoeffizienten erzielt und die Temperatur des Heizmediums ist dementsprechend tief. Wird zusätzlich noch unter Vakuum verdampft, kann dies bei sehr niedrigen Temperaturen geschehen. Dünnschichtverdampfer eignen sich besonders gut zur Verdampfung von Suspensionen. [22, S.389-391]

Bei der Verdampfung flüssiger Gärreste entstehen drei Fraktionen. Die Erste ist das Konzentrat, welches in einem Gärrestelager gespeichert, oder noch weiter getrocknet werden kann. Die Eigenschaften des Konzentrats sind vergleichbar mit denen des flüssigen Gärrestes nach den Schneckenpressen.

Die zweite Fraktion ist der im Verdampfer entstandene Wasserdampf. Dieser wird in einem Kondensator verflüssigt und damit Prozesswärme zurückgewonnen. Das dabei entstandene Destillat ist von sehr hoher Reinheit und kann deswegen in einen Vorfluter eingeleitet, verdunstet, oder als Prozesswasser verwendet werden. *Abbildung 8* zeigt einen Verdunstungskühler, indem das Destillat an die Umgebung abgegeben werden kann.



Abbildung 8: Verdunstungskühler

Die dritte Fraktion ist die Ammoniumsulfatlösung. Diese wird getrennt gesammelt und kann als hochqualitativer Dünger verkauft werden.

### 3.3 Gärreste Lagerung

Für die Lagerung der flüssigen Gärreste kommen Hoch- und Tiefbehälter zum Einsatz. Im Normalfall werden stehende Rundbehälter aus Beton oder Edelstahl/Stahl-Emaille verwendet. Diese sind vergleichbar mit Rührkesselfermentern in Grundausführung. Zusätzlich können ein Rührwerk und eine Heizung installiert sein, damit vor der Entnahme der Gärrückstand homogenisiert wird und die gewünschte Viskosität gegeben ist. Für die Gärrestelager ist es mittlerweile vorgeschrieben, dass eine gasdichte Abdeckung eingebaut werden muss. Diese erfüllt mehrere Aufgaben. Zum einen werden die Geruchsbelästigung in der Umgebung und klimaschädliche Emissionen ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ) minimiert und zum anderen kann das Restgaspotential ausgenutzt werden. [7, S.53-54]

Die Größe des Lagers muss mindestens so bemessen sein, dass die Gärreste während des sechsmonatigen Ausbringungsverbot (DüV § 12), dort zwischengelagert werden können.

Im Zuge dieser Arbeit wird die Eindampfung der flüssigen Gärreste untersucht. Deshalb muss auch die Lagerung des Konzentrats nach dem Verdampfer betrachtet werden. Normalerweise werden die flüssigen Gärreste nach der Entwässerung durch eine Schneckenpresse oder Entwässerungssieb in das Gärrestelager gebracht. Der Trockensubstanzgehalt liegt dabei üblicherweise bei rund 16 Gewichtsprozenten.

Durch den Einsatz eines Dekanters wird der TS-Gehalt auf unter 10 Prozent reduziert. Anschließend wird im Verdampfer Wasser dem Gärrest entzogen und der Trockensubstanzgehalt ungefähr verdoppelt. Schlussendlich hat der zu lagernde Gärrest nach dem Verdampfer einen TS-Gehalt zwischen 15 und 20 Gewichtsprozenten. Somit ist der Trockensubstanzgehalt vergleichbar mit dem unbehandelten flüssigen Gärrest. Deshalb ist laut den Herstellern, der hier untersuchten Verdampfer, die Handhabung identisch mit den üblichen flüssigen Gärresten. Diese sind pumpfähig und können gelagert werden. Im Lager ist ein Rührwerk erforderlich, damit vor der Ausbringung die Gärreste homogenisiert werden können. In *Abbildung 9* ist das Konzentrat nach einem Verdampfer zu sehen. Vom Verhalten und den Eigenschaften her besitzt dieses Konzentrat eine gewisse Ähnlichkeit mit Rohöl.



*Abbildung 9: Konzentrat nach Verdampfer*

Die festen Gärreste können nach der Kompostierung und der Nachrotte, wie normaler Kompost gelagert werden. Es ist darauf zu achten, dass sich die Kompostqualität und die Handhabung nicht durch Umwelteinflüsse, wie zum Beispiel Regen, verschlechtert. Werden die festen Gärreste einer Trocknung unterzogen, können diese anschließend pelletiert werden. Danach haben diese Eigenschaften vergleichbar mit Holzpellets und können auch dementsprechend gelagert werden.

### 3.4 Gärreste Ausbringung

Die Ausbringung flüssiger Gärreste erfolgt mit der gleichen Technik, wie die Ausbringung von Gülle. Dabei haben sich in den Jahren verschiedene Verfahren entwickelt, welche natürlich jeweils Vor- und Nachteile haben. Grundsätzlich sollte versucht werden, den flüssigen Gärrest so direkt wie möglich in den Boden einzubringen. Dadurch werden Ammoniak- und Geruchsemissionen reduziert. Jedoch sind nicht nur die Ausbringungstechnik, sondern auch die Umgebungsbedingungen (Temperatur, Wind, etc.) für die Quantität der Emissionen verantwortlich. [24, S.5]



Abbildung 10: Ausbringung mittels Breitverteiler[25]

Eine sehr einfache und preiswerte Technik ist der Breitverteiler, welche in *Abbildung 10* zu erkennen ist. Dabei wird der flüssige Gärrest über eine, oder mehrere Düsen nach oben aus dem Tank gesprüht. Dadurch entsteht viel Kontaktfläche mit der Umgebungsluft und die Emissionen sind dementsprechend groß. Zusätzlich kann nicht sehr präzise gedüngt werden. Auf Grund dieser Nachteile kommt diese Technik bei großflächiger Anwendung immer seltener zum Einsatz. [26]



*Abbildung 11: Ausbringung mittels Schleppschlauchtechnik [27]*

Eine weitere Technik ist die sogenannte Schleppschlauchtechnik (vgl. *Abbildung 11*). Bei dieser werden die flüssigen Gärreste, durch einen Verteilerkopf, in die einzelnen Schläuche gepumpt. Jeder Schlauch verteilt die Gärreste linienförmig auf dem Boden. Durch die leichte Bauweise mit Schläuchen lassen sich sehr große Arbeitsbreiten realisieren. Ein Nachteil dieser Methode ist, dass der Gärrest nur auf die Oberfläche des Feldes gelangt und nicht in den Boden eingebracht wird. [26]

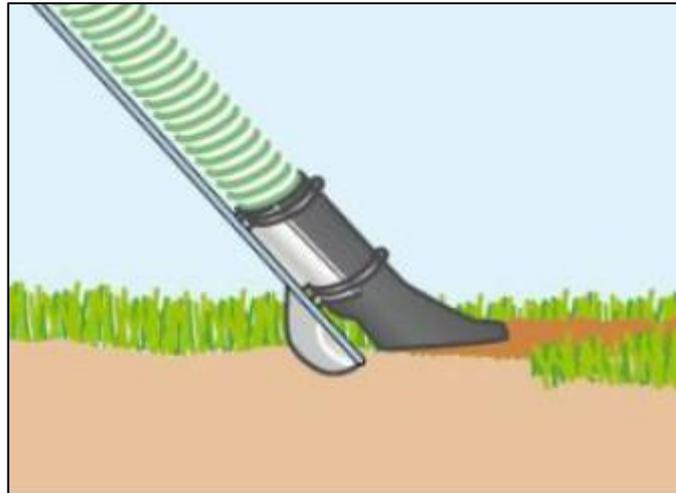


Abbildung 12: Schleppschuhtechnik [28]

Die nächste Technik ist die Schleppschuhtechnik (vgl. *Abbildung 12*). Diese ist besonders bei Gras gut geeignet. Hierbei werden mit Federstäben der Schlauch und die Kufen in den Boden gedrückt. Dadurch entstehen weniger Emissionen.

Die Technik ist leicht, wartungsarm und erfordert wenig Zugkraft. [26]

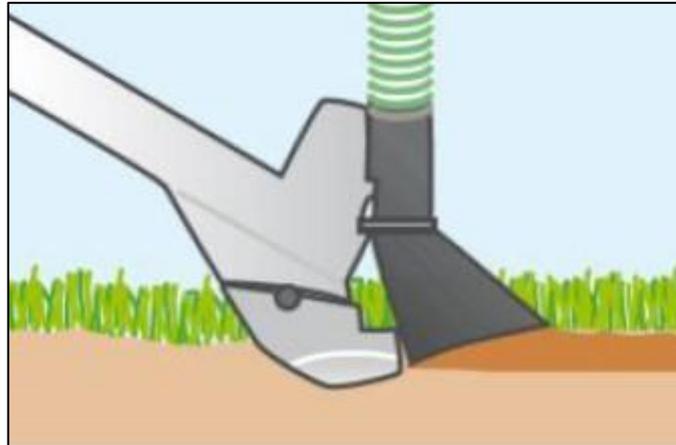


Abbildung 13: Schlitzverfahren [28]

Darüber hinaus gibt es das Schlitzverfahren (vgl. *Abbildung 13*). Dabei wird der Boden, durch eine Scheibe, v-förmig aufgeschnitten und der Gärrest darunter eingebracht. Dies hat den Vorteil, dass die Nährstoffe direkt an die Wurzeln gelangen und deutlich weniger Emissionen, als bei den vorherigen Techniken entstehen. Von Nachteil ist, dass diese Methode relativ teuer und schwer ist. [26]



Abbildung 14: Ausbringung flüssiger Gärreste mittels Injektionsverfahren [26]

Als letzte Technik ist das Injektionsverfahren (*Abbildung 14*) zu erwähnen. Diese kommt hauptsächlich im Ackerbau zum Einsatz. Die Gärreste werden direkt in den Boden eingearbeitet, mit allen damit verbundenen Vorteilen. Die Nachteile sind die massive Bauweise, die begrenzte Arbeitsbreite und hohen Kosten. [26]

Für die Ausbringung der festen Gärreste eignen sich großflächigen Streuer. Diese sind ein Standardgerät in der Landwirtschaft. Die Ausbringungsbreite kann dabei bis zu 20 Meter betragen.

Die Gärreste können auf brachliegendem Ackerland, sowie auch in wachsenden Beständen ausgebracht werden. [26]

## 4 Vorstellung der Lösungsangebote

Auf dem Markt befinden sich für Dekanter und Verdampfer viele unterschiedliche Hersteller. Diese haben für die Gärresteentwässerung verschiedene Lösungsansätze entwickelt. Speziell für die Verdampfer gibt es viele Technologien, welche jeweils Vor- und Nachteile haben. In diesem Kapitel werden die einzelnen Lösungsansätze miteinander verglichen. Neben der technischen Umsetzung sind auch die Investitionskosten von großer Wichtigkeit.

Wie bereits erwähnt kann ein Verdampfer nur in Kombination mit einem Dekanter verbaut werden, da nach den Schneckenpressen der TS-Gehalt für den Verdampfer zu hoch ist. Deshalb werden hier beide Apparate näher betrachtet.

### 4.1 Dekanter

Die hier angeführten Dekanter stammen aus den Angeboten der jeweiligen Hersteller. Da bei beiden Dekantern die gleichen Anforderungen angefragt wurden, haben beide Dekanter einen vergleichbaren Durchsatz (1 m<sup>3</sup>/h) und TS-Gehalt im Ausgang (8 gew.-%).

Auch die Preise sind bei beiden sehr ähnlich (Auflistung befindet sich im Anhang). Deshalb war das Kriterium zur Wahl eines geeigneten Dekanter die zusätzlich vorhandenen Versuchsprotokolle. Diese geben zusätzliches Vertrauen in die angegebenen Leistungsdaten.

#### 4.1.1 Peralisi

Die Firma Peralisi bietet in ihrem Angebot den Dekanter MAIOR 2 aus der gleichnamigen Serie an (*Abbildung 15*). Der Durchsatz ist variabel und in einem Bereich zwischen 1 bis 5 Tonnen pro Stunde möglich. Der, für die Auslegung angenommene, Trockensubstanzgehalt im Zulauf beträgt 16 Gewichtsprozent. Durch den Einsatz von Wolframkarbidelementen besitzt der Dekanter eine hohe Verschleißfestigkeit. Trommel, Schnecke, sowie Feststoff- und Flüssigkeitskammern sind aus Edelstahl gefertigt. Das Angebot umfasst alle für den Betrieb notwendigen Teile, Montage und Inbetriebnahme.



Abbildung 15: Pieralisi Maior 2 [29]

### 4.1.2 Flottweg

Der Dekanter der Firma Flottweg stammt aus der C- Serie. Diese ist für den Einsatz in Wasser- und Klärwerke konzipiert. Laut dem Hersteller zeichnet sich diese Serie durch einen reduzierten Energieverbrauch und einfache Wartung aus.

In dem für diese Diplomarbeit vorliegenden Angebot handelt es sich um den Flottweg Dekanter C2E (Abbildung 16). Dieser ist der Dekanter mit dem geringsten Durchsatz. Der C2E ist eine horizontal gelagerte, konisch-zylindrische Vollmantelschneckenzenrifuge. Der für die Auslegung angenommene Trockensubstanzgehalt im Zulauf beträgt 16 Prozent. Das Angebot umfasst alle für den Betrieb notwendigen Teile, Montage und Inbetriebnahme.



Abbildung 16: Flottweg C2E [21]

## 4.2 Verdampfer

Im Gegensatz zu den Dekantern gibt es bei den Verdampfern deutliche Unterschiede. Preis, Verfahren und Detailinformationen sind bei den einzelnen Angeboten sehr unterschiedlich. Aus diesem Grund wurden die einzelnen Bilanzen für alle drei Verdampfer erstellt und anschließend bewertet. Die Anschaffungskosten der einzelnen Verdampfer sind in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zu finden. Im Anhang befinden sich Tabellen mit den genauen Angebotsinhalten. In diesem Kapitel werden nun die einzelnen Angebote vorgestellt.

In *Abbildung 17* ist ein Blockschema eines vierstufigen Verdampfers zu sehen. Aus dem Endlager werden hier die flüssigen Gärreste zur fest-flüssig Separation (Schneckenpresse und Dekanter) geleitet. Anschließend wird die Flüssigkeit noch durch einen Feinfilter in den Vorlagebehälter geführt. Von diesem Behälter wird die Flüssigkeit auf alle Stufen verteilt und dort verdampft. Mit Hilfe von Schwefelsäure wird der im Dampf enthaltene Ammoniak ausgewaschen und es entsteht Ammoniumsulfatlösung (ASL). Diese wird in einem eigenen Tank gesammelt. Das Konzentrat wird im Sumpf abgezogen und ebenfalls in einem eigenen Tank gesammelt. Der entstehende Dampf wird kondensiert und sequentiell abgepumpt oder bei Bedarf in die Verdampferstufen zurückgeführt. Das Vakuum wird durch die Vakuumstation eingestellt und auf dem gewünschten Niveau gehalten.

Das Fließschema ist für alle Hersteller ähnlich, jedoch können mehrere Stufen in Serie oder parallel geschaltet werden. Der Hauptunterschied liegt in der Konstruktion des Verdampfers selbst, diese werden in den folgenden Kapiteln noch erläutert und gegenüber gestellt.

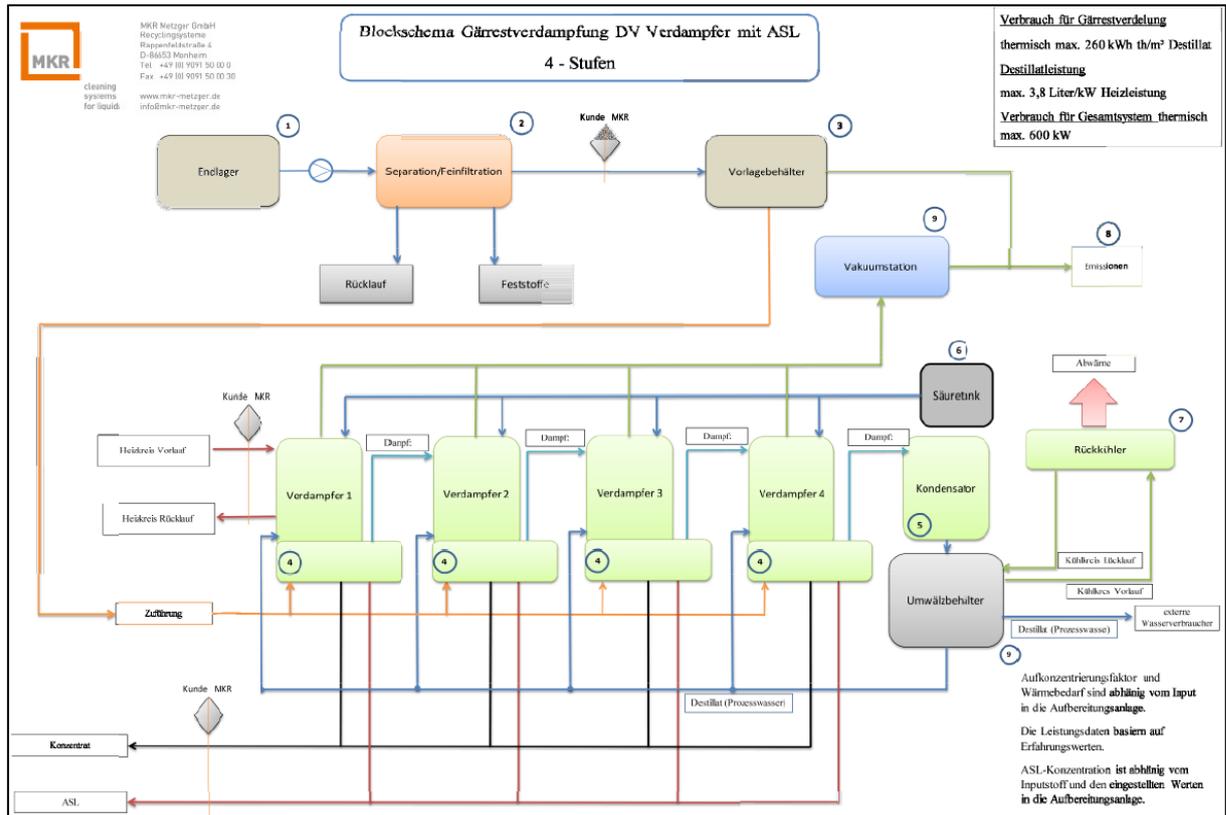


Abbildung 17: Fließschema eines 4-stufigen Verdampfers der Firma MKR [19, S.7]

#### 4.2.1 MKR Metzger GmbH

Das von der Firma MKR angebotene Verdampfersystem trägt den Namen DV1000 (Abbildung 18). Der zweistufige Verdampfer ist eine vollautomatische Eindampfanlage mit Fremdbeheizung. Bevor der flüssige Gärrest in den Verdampfer gelangt, wird dieser noch über einen Feinfilter geführt. Anschließend weist das Filtrat eine Partikelgröße von ca. 100-150 µm auf. Bei dem Verdampfer handelt es sich um einen zwangsbeheizten Vakuum- Dünnschichtverdampfer mit Destillatrückkühlung. Die Rückkühlung erfolgt über eine externe Wärmeabfuhr. Der Gärrest wird im Verdampfer mittels einer Umwälzpumpe kontinuierlich über den Wärmetauscher geführt. Der entstandene Dampf wird über die Dampfreinigung und den Brüdenwäscher zur Kondensation in die nächste Stufe, bzw. in das Kühlkreismodul weitergeleitet. Im Brüdenwäscher wird der Dampf mit 96 %iger Schwefelsäure zur Reaktion gebracht. Dadurch entsteht Ammoniumsulfatlösung, welche sequentiell abgepumpt wird. [19, S.3]



Abbildung 18: Verdampfersystem MKR DV 1000 2-stufig [30]

Der Destillatvolumenstrom wird kontinuierlich auf Trübung, Leitfähigkeit und gegebenenfalls Temperatur überprüft.

Sollten diese Parameter nicht den Vorgaben entsprechen, wird das Destillat in den Vorlagebehälter rückgeführt. Ansonsten wird das Destillat zur weiteren Verwendung (Prozesswasser, Vorfluter, Verdunstungskühler,...) abgepumpt. [19, S.6]

Das Angebot der Firma MKR umfasst folgende Anlagenteile, inklusive Montage und Inbetriebnahme.

#### 4.2.2 Biogastechnik Süd – Vapogant

Die Firma Vapogant bietet einen 400 kW Verdampfer an. In *Abbildung 19* ist der modulare Aufbau zu sehen. Dieser hat vor der Gärresteverdampfung ein engmaschiges Sieb vorgeschaltet. Im Verdampfer wird die flüssige Phase erhitzt und unter Vakuum gesetzt. Je nach gewünschter Trockensubstanzkonzentration wird das Verfahren einstufig oder mehrstufig angewendet. Die Gasphase wird im Brüdenwäscher, durch die Zugabe von 96%tiger Schwefelsäure, gereinigt. Die dabei entstandene Ammoniumsulfat-Lösung kann in separaten Behältern gelagert werden. Der gereinigte Dampf wird in Wärmetauschern zu Wasser kondensiert, dadurch wird Wärme zurückgewonnen. [31, S.5]

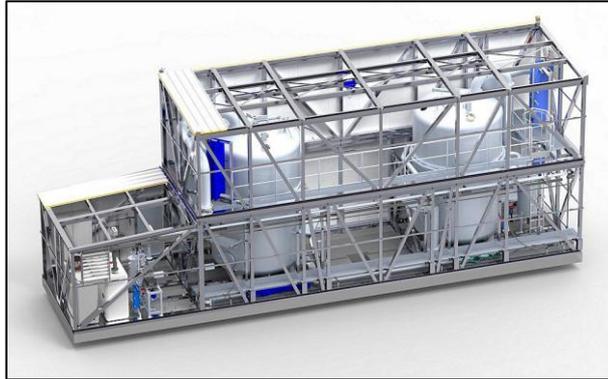


Abbildung 19: Gärrestverdampfung Vapogant [31]

Das Vakuum für den Verdampfer wird durch eine Vakuumpumpe erzeugt, welche druckseitig an den Gasraum der Biogasanlage angeschlossen ist. Dadurch werden austretende Restgase sicher in die Biogasanlage rückgeführt. [31, S.5]

Der konzentrierte, flüssige Gärrest (Konzentrat) wird zum Schluss vakuumdicht aus dem Prozess ausgeschleust und in das Gärrestelager gepumpt. [31, S.5]

Für die Verwendung des Destillates stehen vier Varianten zur Verfügung. Als Erstes kann das Wasser für betriebliche Zwecke benützt werden. Zum Zweiten kann das Destillat in einem Nasskühlturm verdunstet werden. Die dritte Möglichkeit ist das indirekte bzw. direkte Einleiten des Destillats in einen Vorfluter oder durch Versickerung. Die vierte Variante ist die Kaltvernebelung mittels einer Vernebelungsanlage. Das Wasser wird über eine Hochdruckpumpe vernebelt und an die Luft abgegeben. Dieses System eignet sich besonders als Backup, falls eines der anderen Systeme nicht zur Verfügung steht. [31, S.6]

Bei dem Verdampfer der Firma Vapogant handelt es sich um einen Vakuumverdampfer mit integrierten Heizplatten.

Das Angebot der Firma Biogastechnik Süd GmbH - Vapogant umfasst folgende Anlagenteile, inklusive Montage und Inbetriebnahme.

### 4.2.3 Arnold Biogastechnik

Die Firma Arnold bietet einen Verdampfer aus der Baureihe S-500 an (*Abbildung 20*). Bei diesem Verdampfertyp handelt es sich um einen Rohrbündelverdampfer. Das Verdampfersystem ist stufenweise aufgebaut und hat pro Stufe eine thermische Leistungsaufnahme von 125 kW. Diese wird über Heißwasser aus dem Kühlkreislauf eines Blockheizkraftwerkes bereitgestellt. Die Eingangstemperatur beträgt rund 100 °C und die Ausgangstemperatur ungefähr 85 °C. Der Verdampfer hat eine installierte elektrische Leistung von 19,5 kW, wobei im Normalbetrieb 15 kW verbraucht werden. Mit einer Eingangskonzentration von 8 Gewichtsprozent Trockensubstanz erreicht der Verdampfer im Konzentrat einen TS-Gehalt von 18 Gewichtsprozent.



Abbildung 20: Arnold Eindampfer für Gärreste, Gülle und diverse Abwässer [32]

Es war nicht möglich, ein detailliertes Angebot der Firma Arnold Biogastechnik zu erhalten, es wurde jedoch versichert, dass die maximalen Kosten für eine Verdampferanlage mit den bereits erwähnten Anforderungen zirka 500.000 Euro betragen.

## 5 Massenbilanz

Der erste Teil der Betrachtung in dieser Arbeit ist die Massenbilanz. Der wichtigste Parameter ist hierbei die Gesamtmenge an Input. Dieser wurde mit 25.000 [Mg/a] Bioabfall gewählt. *Tabelle 1* zeigt den Vergleich mit anderen Anlagen der Firma Thöni Industriebetriebe GmbH und dabei erscheint diese Menge als repräsentativ und sinnvoll.

Standort	Kapazität [Mg/a]	Input
TTV RMB Frankfurt, Deutschland	22 .000	Bioabfall, Grünschnitt
TTV Gälve, Schweden	25.000	Küchenabfall, Bioabfall, Grünschnitt
TTV Roppen, Österreich	27.000	Bioabfall
TTV Brandholz, Deutschland	25.000	Bioabfall
TTV Augsburg II, Deutschland	105.000	Bioabfall
TTV Augsburg I, Deutschland	55.000	Bioabfall
Passau, Deutschland	39.000	Bioabfall
Belluno, Italien	22.000	Bioabfall
Frankfurt, Deutschland	45.000	Bioabfall

*Tabelle 1: Auszug aus Referenzliste Firma Thöni Industriebetriebe GmbH [13]*

Die Massenbilanz wurde mit Hilfe des Planungstool TTV v.2.4 ut-pa der Firma Thöni Industriebetriebe GmbH erstellt. In *Abbildung 21* ist die Systemgrenze für die Massenbilanz, welche mit Hilfe des Planungstools erstellt wurde eingezeichnet. Inputströme sind der Bioabfall (25.000 [Mg/a]) und Prozesswasser für die Befeuchtung.

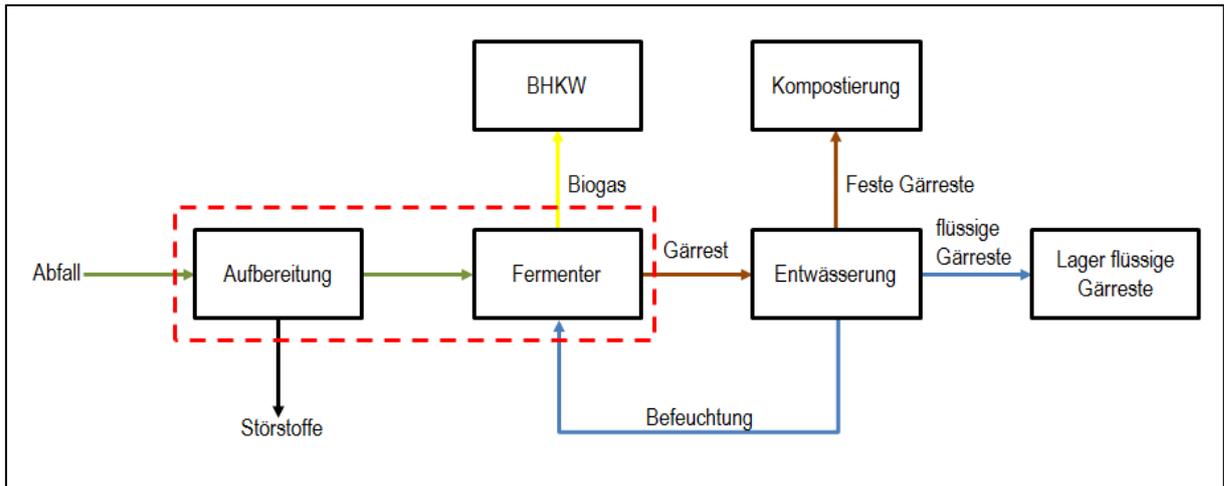


Abbildung 21: Systemgrenze (rot) Planungstool

Die restlichen Daten zur Berechnung stammen aus dem Berechnungstool der Firma Thöni Industriebetriebe GmbH und sind im Anhang ersichtlich. Zum besseren Verständnis, werden hier nun einige beschrieben.

Eine entscheidende Größe ist die spezifische Gasproduktion. Dieser Wert ist stark Abhängig vom Inputmaterial und Jahreszeit. Für die Erstellung der Massenbilanz wurde eine spezifische Gasproduktion von 105 [Nm<sup>3</sup>/t FM] angenommen. In *Abbildung 22* ist zu erkennen, dass bei Bioabfällen ein höherer Gasertrag erzielt werden kann. Jedoch wurde bei dieser Massenbilanz auf Grund der starken Schwankungen ein eher konservativer Wert angenommen.

Für die Trockenvergärung der Firma Thöni Industriebetriebe GmbH hat sich dieser Wert als gute Abschätzung erwiesen. Die Verweilzeit des Substrates ergibt sich aus dem Fermentervolumen und dem Inputmassenstrom.



Abbildung 22: Biogasausbeuten [7]

Bereits im Kapitel 2.6.2 wurde beschrieben, dass in der Trockenfermentation ein Trockensubstanzgehalt zwischen 20 und 40 Gewichtsprozent angestrebt wird. Für die Massenbilanz dieser Arbeit wurde im Eintrag des Fermenters ein Trockensubstanzgehalt von 35 Prozent angenommen. Natürlich wird versucht, so viel Substrat wie möglich in den Fermenter einzubringen. Die Begrenzung ergibt sich aus der Leistung der Eintragungspumpe. Langjährige Erfahrung der Firma Thöni Industriebetriebe GmbH hat ergeben, dass 35 Gewichtsprozent Trockensubstanzgehalt für die Pumpen der maximale Wert sind, bei dem ein störungsfreier Betrieb gewährleistet werden kann.

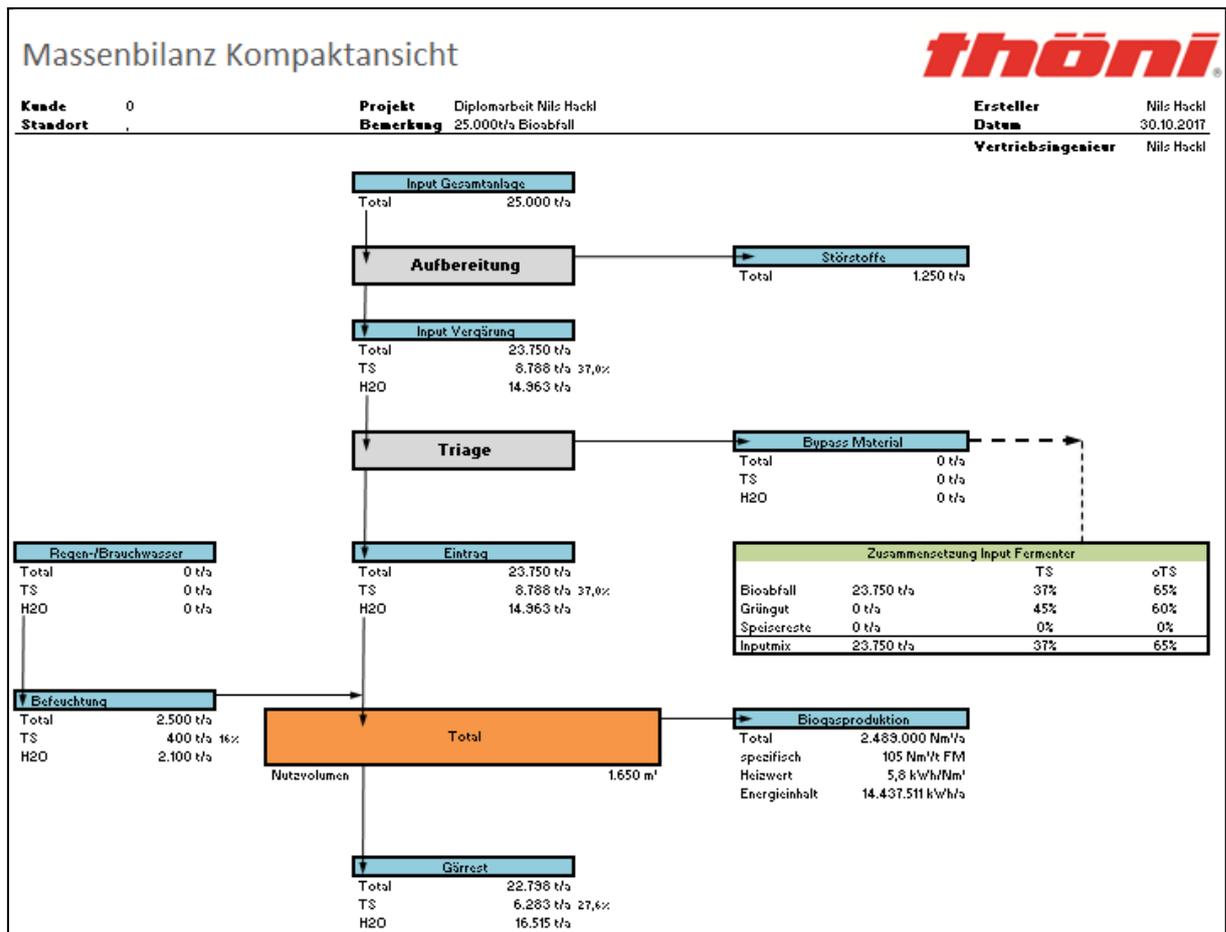


Abbildung 23: Massenbilanz Kompaktansicht aus dem Planungstool [13]

Mit Hilfe des Planungstools der Firma Thöni Industriebetriebe GmbH konnte nun eine Massenbilanz vom rohen Bioabfall bis zum Gärrest erstellt werden (siehe *Abbildung 23*). Der nächste Schritt ist nun eine Massenbilanz, welche alle Ströme vom Überschusswasser bis zu dem Endlager der Gärreste erfasst. Die Systemgrenze (rot) innerhalb der gesamten Anlage ist in *Abbildung 24* dargestellt. Die Entwässerung umfasst drei Apparate. Als erstes gelangt der Gärrest in die Schneckenpressen. Dort findet eine erste fest- flüssig Separierung statt. Anschließend wird der Trockensubstanzgehalt der flüssigen Fraktion im Dekanter noch weiter gesenkt. Zum Schluss wird im Verdampfer eine Aufkonzentrierung des flüssigen Gärrestes durchgeführt. Dabei wird reines Wasser und Ammoniumsulfatlösung gewonnen. Eine detaillierte graphische Darstellung der einzelnen Stoffströme des Entwässerungsprozesses ist in *Abbildung 25* zu sehen.

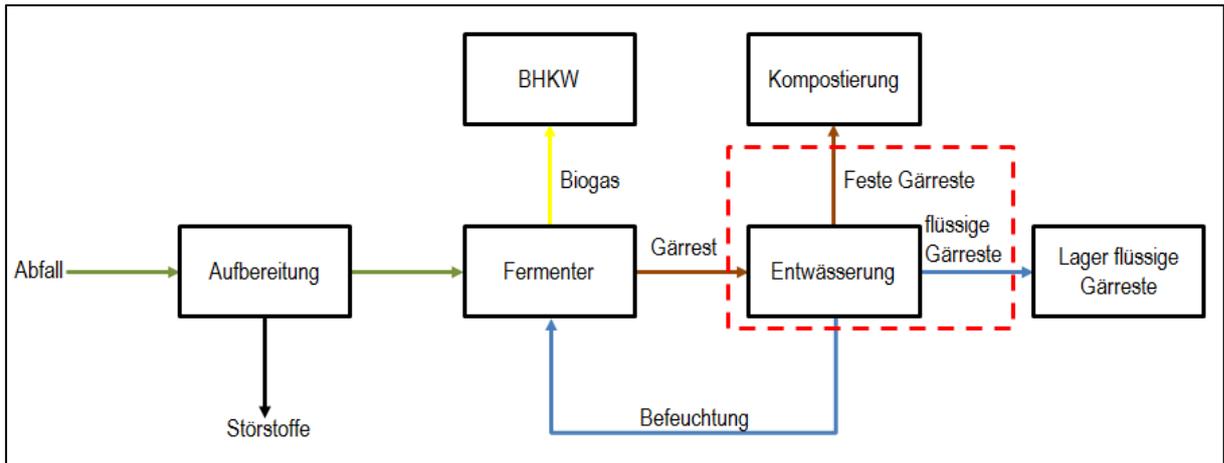


Abbildung 24: Systemgrenze (rot) für Massenbilanz der Entwässerung

Durch die, von den Herstellern gelieferten Daten, können die einzelnen Volumenströme berechnet werden. Neben der Menge ist hierbei der Abscheidungsgrad des Dekaners, beziehungsweise die Aufkonzentrierung des Verdampfers, entscheidend. Ziel ist es nach dem Dekanter einen möglichst niedrigen Trockensubstanzgehalt zu erreichen. Ein zu hoher TS-Gehalt führt zu Anbackungen an den Verdampferflächen. Dadurch wird der Verdampfungsprozess erschwert und im schlimmsten Fall unmöglich.

Die Abscheidungsgrade der einzelnen Anlagen beziehen sich auf Herstellerangaben. Zusätzlich konnten manche Hersteller (MKR, Flottweg) Versuchsprotokolle liefern, welche die Angaben bekräftigen. Alle angebotenen Dekanter haben einen vergleichbaren Abscheidungsgrad. Deshalb wurde die Massenbilanz einfachhalber nur mit einem Dekanter durchgerechnet. Die Wahl fiel auf den Dekanter der Firma Flottweg, da bei diesem die ausführlichsten Informationen zur Verfügung standen und bereits Versuche zusammen mit dem Verdampfer-Hersteller MKR durchgeführt wurden. In der folgenden *Abbildung 25* ist die Massenbilanz vom Fermenter Austrag bis zu den Gärreste-Lagern dargestellt. Die festen Gärreste werden der Kompostierung zugeführt. Ein Teil des Presswassers aus den Schneckenpressen wird zur Befeuchtung mit dem Inputmaterial vermischt, damit der gewünschte TS-Gehalt im Input erreicht wird.

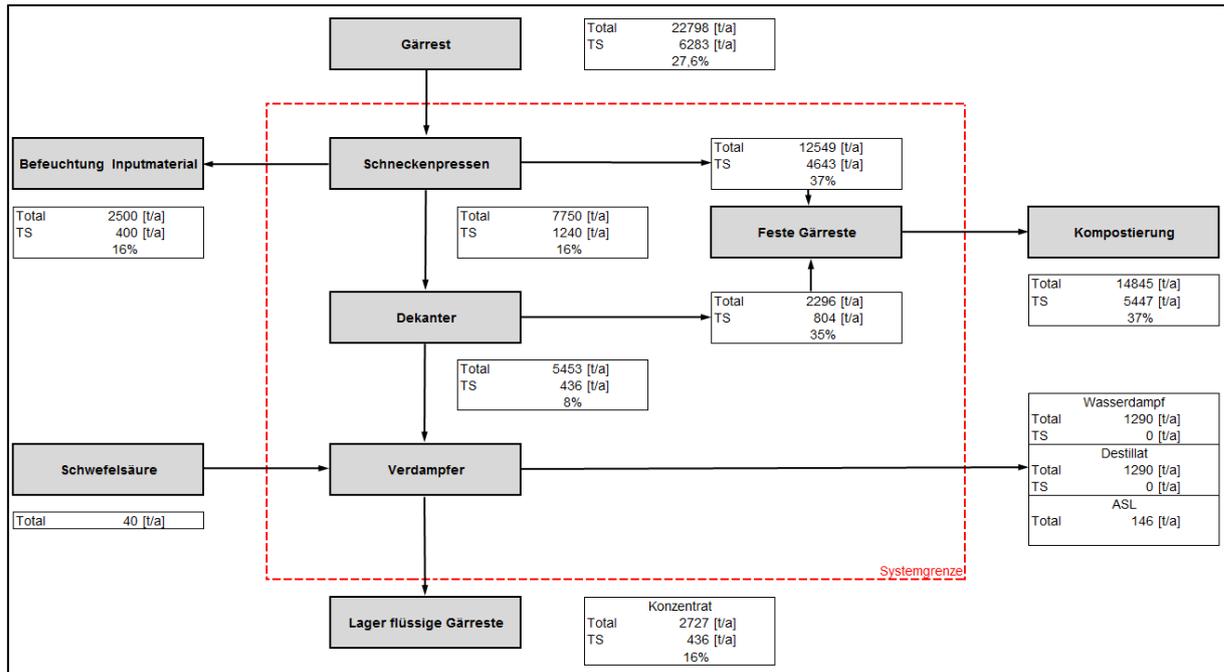


Abbildung 25: Flussdiagramm der Anlagenkombination MKR/Flottweg

Die Reduktion der flüssigen Gärreste ist die Differenz zwischen der Menge nach den Schneckenpressen und dem Konzentrat nach dem Verdampfer.

Für die Berechnung der Menge der ASL Lösung wurden die bereits in Punkt 2.7.3 erwähnten Werte verwendet. Die Ammoniumsulfatlösung hat eine Konzentration von 35 Prozent.

In der folgenden *Tabelle 2* sind die einzelnen Verdampferhersteller und die berechneten Werte für alle Outputströme angegeben. Der Verdampfer der Firma MKR hat größte Menge an Konzentrat, weil der Trockensubstanzgehalt niedriger als bei den anderen Verdampfern ist. Dadurch ergibt sich auch eine geringere Menge an Wasserdampf/Destillat. Die Menge an ASL ist bei allen Verdampfern gleich groß. Der Grund dafür ist, dass bei allen Verdampfern mit derselben Input Menge gerechnet wurde und die Reaktion und Umsätze im Brüdenwäscher als ident angenommen wurden.

---

<b>Hersteller</b>	<b>Konzentrat [t/a]</b>	<b>TS im Konzentrat [%]</b>	<b>Wasserdampf/Destillat [t/a]</b>	<b>ASL [t/a]</b>
MKR	2727	16	2580	146
Arnold	2424	18	2883	146
Vapogant	2437	17,9	2870	146

*Tabelle 2: Vergleich Output Verdampfer*

## 6 Energiebilanz

Die Energiebilanz dient zur Abschätzung, ob die in der Anlage verfügbare Energie ausreicht, alle zusätzlichen Anlagenteile ausreichend zu versorgen. Zentrales Element ist hierbei das Blockheizkraftwerk. In diesem wird das Biogas zu Strom umgewandelt. Neben dem Strom entsteht zusätzlich eine erhebliche Menge an Wärme. In *Abbildung 26* sind die einzelnen Energieströme dargestellt. Die Heizung des Fermenters und des Verdampfers wird über die Abwärme des Blockheizkraftwerkes sichergestellt. Der Strom kann entweder ebenfalls vom BHKW oder aus dem Netz bezogen werden. Die überschüssige Wärme wird an die Umgebung abgegeben. Dies ist hauptsächlich im Sommer der Fall, wenn die Außentemperaturen dementsprechend hoch sind und der Fermenter weniger Energie benötigt.

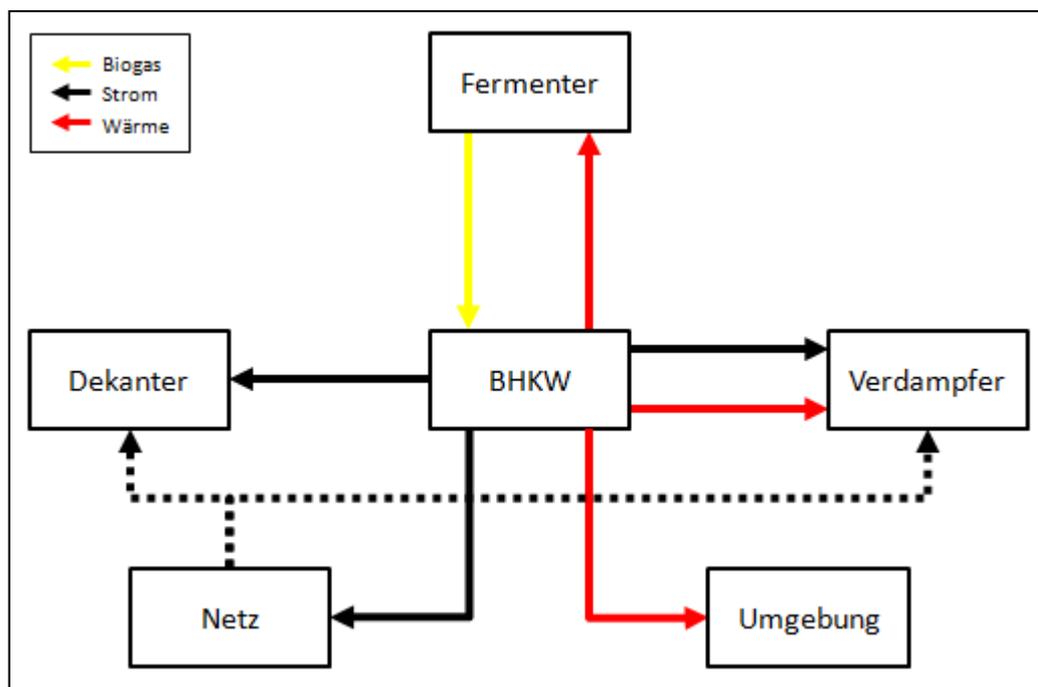


Abbildung 26: Fließbild der einzelnen Energieströme

Die *Abbildung 27* zeigt das Ergebnis einer Umfrage der Firma ASUE. Diese hat 66 Anbietern zu mehr als 1.200 auf dem Markt befindliche BHKW-Anlagen befragt und die Daten ausgewertet. Mit diesen Daten können zuverlässige Aussagen zu

thermischen und elektrischen Wirkungsgraden in Abhängigkeit der Leistung gemacht werden. Durch den Gasertrag aus der Massenbilanz (14.437.511 [kWh/a]) und den gewählten jährlichen Betriebsstunden (8500 [h]) kann, mittels Iteration und Interpolation, die Größe des Blockheizkraftwerkes berechnet werden. Die elektrische Leistung liegt bei rund 665 kW. Damit ergibt sich ein thermischer Wirkungsgrad von 49,6 Prozent und es ergibt sich somit eine thermische Leistung von zirka 842 kW. Der elektrischer Wirkungsgrad liegt bei 39,2 Prozent.

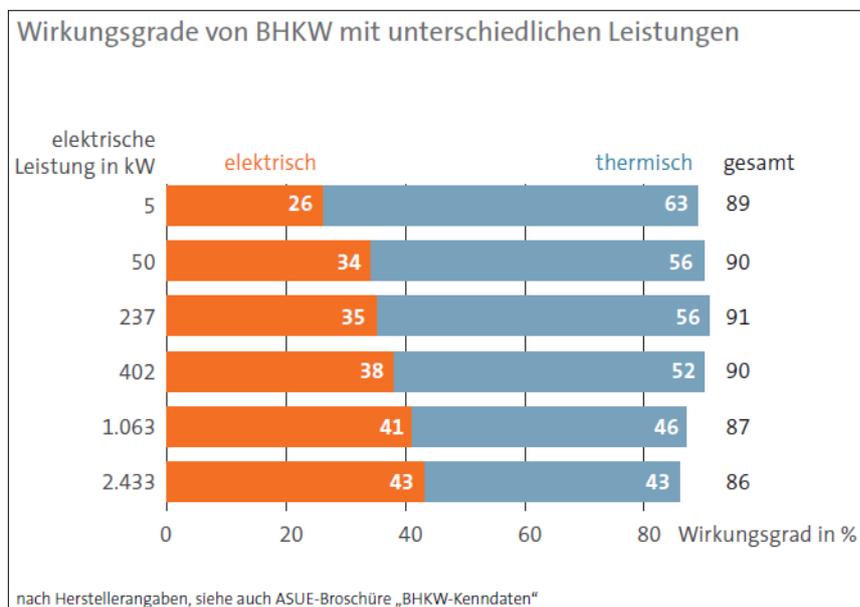


Abbildung 27: Wirkungsgrade von BHKW mit unterschiedlichen Leistungen [33, S. 13]

In *Abbildung 26* wird ersichtlich, dass die Wärme aus dem Blockheizkraftwerk für die Heizung des Fermenters und für die Verdampfung genutzt wird. Der thermische Energiebedarf des Fermenters ist über das Jahr unterschiedlich verteilt. Der höchste Bedarf ist im Januar. In der Literatur wird der Wärmebedarf des Fermenters mit 20 bis 30 Prozent der thermischen Gesamtleistung des Blockheizkraftwerkes angegeben. [34, S.106 ff.] Der maximale Wärmebedarf des Fermenters liegt somit bei zirka 253 kW.

Zusätzlich zu dieser groben Abschätzung wurde eine Wärmebedarfsberechnung durchgeführt. Als Standort der fiktiven Anlage wurde Köln gewählt. Mit den

Klimadaten für diesen Ort, der monatlichen Inputmenge, der gewünschten Fermentertemperatur und stoffspezifische Größen, welche durch die langjährige Erfahrung der Firma Thöni Industriebetriebe GmbH validiert sind, ergibt sich ein maximaler Wärmebedarf von 170 kW (siehe *Abbildung 28*).

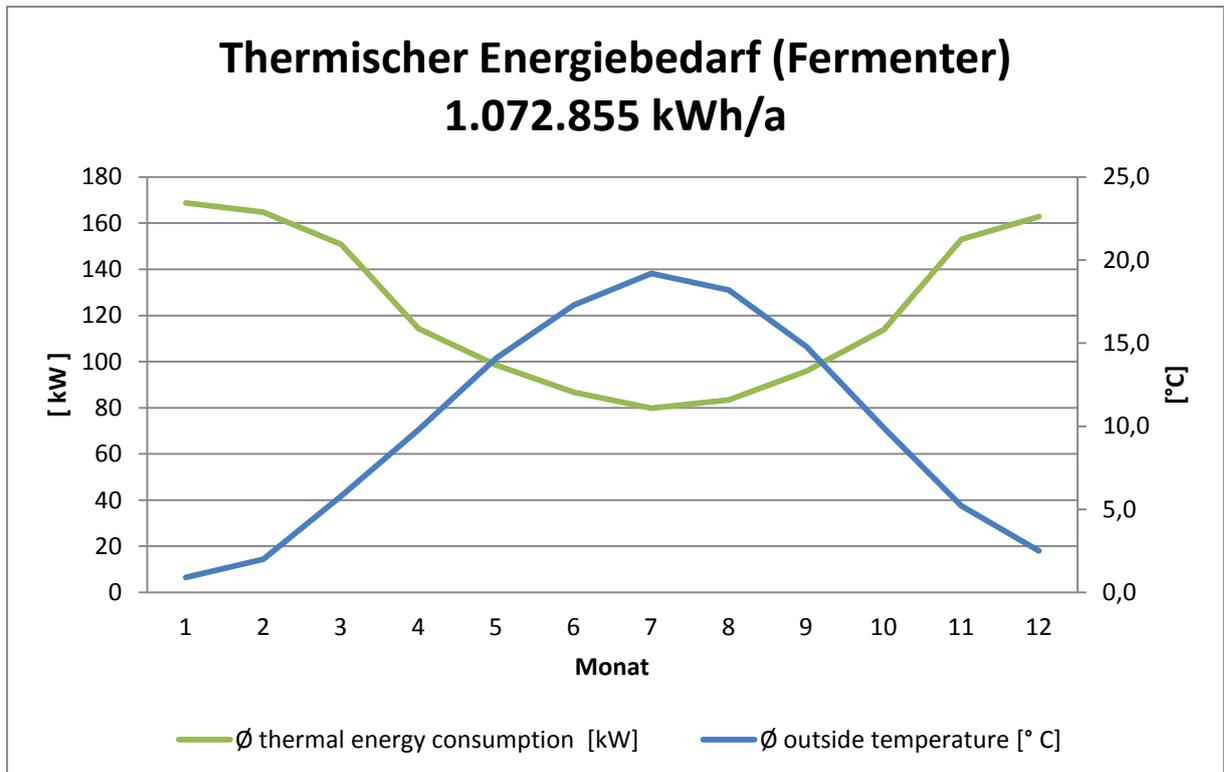


Abbildung 28: Thermischer Energiebedarf des Fermenters

Dies entspricht 24 Prozent der thermischen Gesamtleistung des Blockheizkraftwerks. Grundsätzlich ist zu sagen, dass die Wärmeabnahme durch den Verdampfer eine nützliche Synergie darstellt, welche zusätzlich durch den KWK- Bonus belohnt werden kann. Weitere Erläuterungen dazu sind im nächsten Kapitel zu finden.

Der zweite Wärmeabnehmer innerhalb der Anlage ist der Verdampfer. Der Wärmebedarf ist, in Abhängigkeit der eingesetzten Technik, unterschiedlich. Laut den Angeboten der Hersteller reicht dieser von 151 bis 264 kW. Das heißt, dass im ungünstigsten Fall der Gesamtwärmeverbrauch bei rund 517 kW liegt und somit unterhalb der verfügbaren Energie.

Neben der thermischen Energie wird auch Strom benötigt. Dieser wird hauptsächlich vom Blockheizkraftwerk geliefert. Sollte dieses auf Grund von Revision oder anderen Ursachen nicht zu Verfügung stehen, muss der Strom aus dem Netz zugekauft werden. In der *Tabelle 3* sind alle Stromverbraucher, der für die Entwässerung zuständigen Apparate angeführt.

Apparat	Stromverbrauch [kW]
Schneckenpresse Thöni Industriebetriebe GmbH	22
Dekanter Flottweg	20
Dekanter Peralisi	24
Verdampfer Arnold	15
Verdampfer MKR	12
Verdampfer Vapogant	13

*Tabelle 3: Stromverbrauch Apparate Entwässerung*

Der gesamte Stromverbrauch für die Entwässerung ergibt sich aus einer Kombination von Schneckenpresse, Dekanter und Verdampfer. Da der erste Schritt der Entwässerung (Schneckenpresse, Sieb,...) standardmäßig bei Biogasanlagen zum Einsatz kommt, kann dieser bei der energetischen Betrachtung auch ausgeblendet werden. Der Stromverbrauch von Dekanter und Verdampfer (Flottweg/Vapogant) macht einen Anteil von rund 5 Prozent des im Blockheizkraftwerk erzeugten Stroms aus.

## 7 Wirtschaftliche Bewertung

### 7.1 Einsparungen und Erlöse

Zentraler Betrachtungspunkt der wirtschaftlichen Bewertung sind die Ausbringungskosten. Durch die wachsende Zahl der Biogasanlagen und der damit verbundenen Menge an flüssigen Gärresten steigen die Ausbringungskosten permanent an. In einigen Regionen in Deutschland betragen die Ausbringungskosten bereits 15 Euro pro Kubikmeter. Zusätzlich werden die Regeln und Grenzwerte für die Ausbringung der flüssigen Gärreste laufend restriktiver. (vgl. Kap. 1.1)

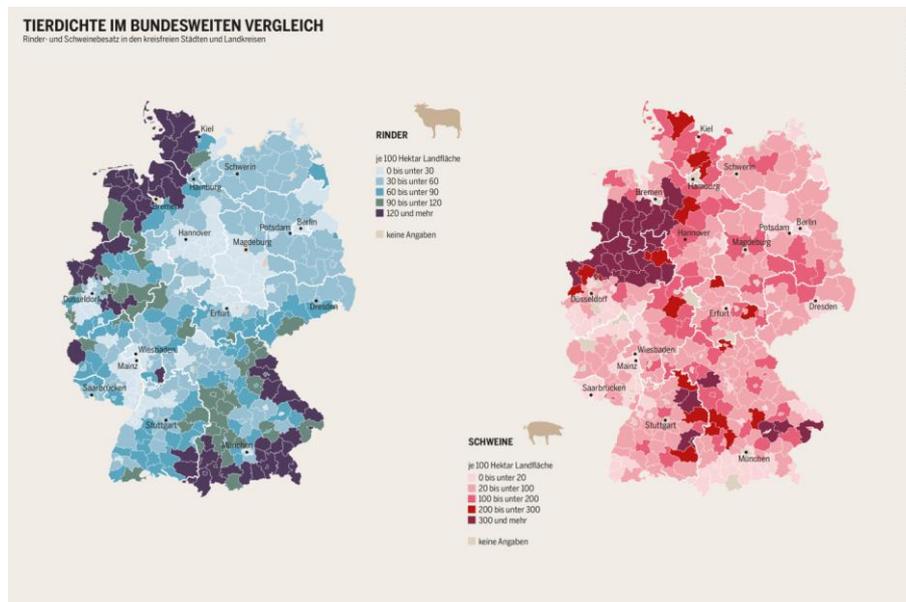


Abbildung 29: Tierdichte in Deutschland [35]

In Gebieten mit sehr hoher Dichte an Mastbetrieben ist es teilweise sogar erforderlich, dass die flüssigen Gärreste aus den Biogasanlagen in kommunalen Kläranlagen entsorgt werden müssen. Dies ist natürlich mit sehr hohen Entsorgungskosten verbunden.

Aus diesem Grund wurde bei der wirtschaftlichen Betrachtung eine Sensitivitätsanalyse bezüglich den Ausbringungskosten durchgeführt. Diese variieren von 0 Euro pro Tonne bis zu 30 Euro pro Tonne. Somit ist der Bereich, in dem sich die Entsorgungskosten in den nächsten Jahren bewegen werden, mit großer Sicherheit abgedeckt.

Darüber hinaus ist ein wichtiger Bestandteil des wirtschaftlichen Erfolgs der KWK-Bonus. Dieser ist im EEG (Erneuerbare Energien Gesetz) beziehungsweise im KWKG (Kraft-Wärme Kopplungs- Gesetz) geregelt. Für die Nutzung von Wärme als Kuppelprodukt ist ein KWK-Bonus von 3 Cent pro Kilowattstunde vorgesehen. [36, S.124] In der im EEG enthaltenen Positivliste (Anlage 3, EEG 2009) wird die Nutzung von Prozesswärme zur Aufbereitung von Gärresten für die Düngemittelherstellung als vergütungsfähige Möglichkeit der Wärmenutzung gesehen. [37, S.1]

Auf Grund der verschiedenen Auslegungsmöglichkeiten und Anwendbarkeit des EEG wird in der wirtschaftlichen Betrachtung immer jeweils einmal mit und einmal ohne KWK-Bonus gerechnet. Ob eine Vergütung im Einzelfall möglich ist, muss immer für die konkrete Anlage bewertet werden. Grundsätzlich ist im aktuellen EEG 2017 kein KWK- Bonus mehr vorgesehen. Das heißt, dass eine KWK Vergütung nur bei bestehenden Anlagen, welche unter älteren EEG Versionen bewilligt wurden. Die Laufzeit beträgt dabei immer 20 Jahre. Aus diesem Grund muss bei einer bestehenden Anlage überprüft werden, ob und wie lange ein KWK- Bonus anrechenbar ist.

Weiteres Einsparungspotential ergibt sich aus der Reduzierung der Gärreste Endlagergröße. Durch den Einsatz eines Dekanters und eines Verdampfers, verringert sich die Menge an flüssigen Gärrest um rund zwei Drittel. (vgl. Kap.4) Dies bewirkt eine Einsparung der Investitionskosten für den Lagerbau von ca. 105.000 Euro für die betrachtete Anlagengröße. (Angebot Wolf Systembau G.m.b.H) Für die vorgeschriebene Lagerdauer von sechs Monaten wird für die Variante ohne Dekanter und Verdampfer ein Lager mit 5.654 m<sup>3</sup> Volumen angeboten. Mit Verdampfer und Dekanter kann der Lagerdurchmesser um zehn Meter verringert werden und es ergibt sich ein Lager mit 2.513 m<sup>3</sup> Volumen. (Angebot Wolf Systembau G.m.b.H)

Es besteht darüber hinaus die Möglichkeit mit dem entstandenen Konzentrat weitere Erlöse zu erzielen. Jedoch konnten bei der Recherche keine belastbaren Zahlen erhalten werden. Deshalb wurde für dieses Produkt kein Erlös angenommen.

Zusätzlich lässt sich durch den Verkauf der ASL Lösung ein Profit erzielen. Es wurde angenommen, dass ein Verkaufspreis von 60 Euro pro Tonne erreicht wird. Dies ist eine sehr konservative Annahme, denn laut MKR-Metzger GmbH und anderen Herstellern sind auch Erlöse von bis zu 220 Euro pro Tonne möglich.

Alle hier beschriebenen Einsparungspotentiale beziehungsweise erzielbare Erlöse sind in *Tabelle 4* auf Seite 52 aufgelistet.

## 7.2 Kosten

Zur Berechnung der Investitionskosten wurde eine Abschreibungsdauer von 10 Jahren gewählt. Die entsprechenden Nutzungsjahre stammen aus den AfA-Tabellen des Bundesministeriums für Finanzen. [38, S.5]

Als kalkulatorischer Zinssatz wurden zwei Prozent angenommen. Der kalkulatorische Zinssatz entspricht dem Wert der Verzinsung, welche das Kapital durch eine andere Anlageform erzielen würde. [39, S.134]

Der für den Betrieb des Verdampfers und des Dekanters benötigte Strom wird vom Blockheizkraftwerk bereitgestellt. Dadurch entstehen keine Kosten, jedoch muss der entgangene Erlös mit einkalkuliert werden. Der Einspeise Tarif für Strom in Anlagen, in denen Bioabfälle vergoren werden, beträgt in Deutschland 13,05 Cent pro Kilowattstunde für Anlagen mit einer Größe bis 20 Megawatt (EEG 2017 §43). Es wird davon ausgegangen, dass die Verfügbarkeit des Blockheizkraftwerks im gleichen Umfang wie die des Verdampfers gegeben ist.

Für die Lohnkosten wurde ein Stundensatz von 17,50 Euro pro Stunde angenommen. (KTBL-Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, Wirtschaftlichkeitsrechner Biogas)

Für die Wartung wurden jährliche Kosten in Höhe von zwei Prozent des Investments der jeweiligen Anlage angenommen. Zusätzlich wurden für die Reparatur und sonstige Kosten ein Prozent der Investitionskosten einkalkuliert.

Im Brüdenwäscher wird 96 prozentige Schwefelsäure verbraucht. Der Preis für das Dihydrogensulfat beträgt 82 Euro pro Tonne. (Angebot TIB Chemicals AG, 16.01.2018)

### **7.3 Betrachtung der Wirtschaftlichkeit**

In der *Tabelle 4*, *Tabelle 5* und *Tabelle 6* sind alle Kosten und Erlöse der Verdampfer und Dekanter aufgelistet. Es handelt sich um die Kombinationen Flottweg/MKR, Flottweg/Vapogant und Flottweg/Arnold. Da die Dekanter auch von den Preisen her sehr ähnlich sind wurde auf die Kombinationen mit der Firma Peralisi verzichtet. In allen Fällen wurden Ausbringungskosten von 15 Euro pro Tonne und ein anrechenbarer KWK-Bonus angenommen. Für die folgenden Sensitivitätsanalysen wurden nur diese beiden Parameter verändert und die restlichen Werte konstant gehalten. Die jährlichen Investitionskosten von Dekanter und Verdampfer ergeben sich aus der Abschreibungsdauer und den Zinsen. Es wurde dabei eine lineare Abschreibung angenommen.

<b>Betriebskosten Dekanter (Flottweg)</b>			
Stromkosten	3.875 [h/a]	19,55 [kW]	
		0,1305 [€/kWh]	9.886,19 €
Wartung u. Reparatur			5.144,87 €
Personal	150 [h/a]	17,5 [€/h]	2.625,00 €
<b>Betriebskosten Dekanter (Flottweg) Gesamt</b>			<b>17.656,06 €</b>
<b>Betriebskosten Verdampfer (MKR)</b>			
Stromkosten	8.000 [h/a]	12 [kW]	
		0,1305 [€/kWh]	12.528,00 €
Wartung u. Reparatur			15.415,51 €
Personal	150 [h/a]	17,5 [€/h]	2.625,00 €
Schwefelsäure	40 [t/a]	82 [€/t]	3.280,0 €
<b>Betriebskosten Verdampfer (MKR) Gesamt</b>			<b>33.848,51 €</b>
<b>Investitionskosten Dekanter (Flottweg)</b>			
Anschaffungskosten			153.550,00 €
Abschreibungsdauer			10 Jahre
Kalkulatorischer Zinssatz			2,0%
<b>Investitionskosten Dekanter (Flottweg) Gesamt</b>			<b>17.149,56 €</b>
<b>Investitionskosten Verdampfer (MKR)</b>			
Anschaffungskosten			460.080,00 €
Abschreibungsdauer			10 Jahre
Kalkulatorischer Zinssatz			2,0%
<b>Investitionskosten Verdampfer (MKR) Gesamt</b>			<b>51.385,03 €</b>
<b>Kosten Gesamt pro Jahr</b>			<b>120.039,16 €</b>
<b>Einnahmen und Einsparungen</b>			
Einnahmen Düngerverkauf	2727 [t/a]	0 [€/t]	0,00 €
Einnahmen ASL	146 [t/a]	60,0 [€/t]	8.760,00 €
Ersparnis aus Ausbringungskosten	5.023 [t/a]	15 [€/t]	75.343,10 €
Ersparnis Lagerausbau		105.000 [€]	11.727,15 €
KWK-Bonus/Wärmebonus	1.600.000 [kWh/a]	0,03 [€/kWh]	48.000,00 €
<b>Einnahmen/Einsparungen Gesamt pro Jahr</b>			<b>143.830,25 €</b>
<b>Gewinn pro Jahr</b>			<b>23.791,09 €</b>
Payback			6,6 Jahre

Tabelle 4: Berechnung des jährlichen Gewinns (Flottweg/MKR)

<b>Betriebskosten Dekanter (Flottweg)</b>			
Stromkosten	3.875 [h/a]	19,55 [kW] 0,1305 [€/kWh]	9.886,19 €
Wartung u. Reparatur			5.144,87 €
Personal	150 [h/a]	17,5 [€/h]	2.625,00 €
<b>Betriebskosten Dekanter (Flottweg) Gesamt</b>			<b>17.656,06 €</b>
<b>Betriebskosten Verdampfer (Vapogant)</b>			
Stromkosten	8.073 [h/a]	13 [kW] 0,1305 [€/kWh]	13.695,84 €
Wartung u. Reparatur			21.338,26 €
Personal	365 [h/a]	17,5 [€/h]	6.387,50 €
Schwefelsäure	40 [t/a]	82 [€/t]	3.280,00 €
<b>Betriebskosten Verdampfer (Vapogant) Gesamt</b>			<b>44.701,60 €</b>
<b>Investitionskosten Dekanter (Flottweg)</b>			
Anschaffungskosten			153.550,00 €
Abschreibungsdauer			10 Jahre
Kalkulatorischer Zinssatz			2,0%
<b>Investitionskosten Dekanter (Flottweg) Gesamt</b>			<b>17.149,56 €</b>
<b>Investitionskosten Verdampfer (Vapogant)</b>			
Anschaffungskosten			636.846,00 €
Abschreibungsdauer			10 Jahre
Kalkulatorischer Zinssatz			2,0%
<b>Investitionskosten Verdampfer (Vapogant) Gesamt</b>			<b>71.127,52 €</b>
<b>Kosten Gesamt pro Jahr</b>			<b>150.634,74 €</b>
<b>Einnahmen und Einsparungen</b>			
Einnahmen Düngerverkauf	2727 [t/a]	0 [€/t]	0,00 €
Einnahmen ASL	146 [t/a]	60,0 [€/t]	8.760,00 €
Ersparnis aus Ausbringungskosten	5.312 [t/a]	15 [€/t]	79.684,50 €
Ersparnis Lagerausbau		105.000 [€]	11.727,15 €
KWK-Bonus/Wärmebonus	2.112.000 [kWh/a]	0,03 [€/kWh]	63.360,00 €
<b>Einnahmen/Einsparungen Gesamt pro Jahr</b>			<b>163.531,65 €</b>
<b>Gewinn pro Jahr</b>			<b>12.896,91 €</b>
Payback			7,8 Jahre

Tabelle 5: Berechnung des jährlichen Gewinns (Flottweg/Vapogant)

<b>Betriebskosten Dekanter (Flottweg)</b>			
Stromkosten	3.875 [h/a]	19,55 [kW] 0,1305 [€/kWh]	9.886,19 €
Wartung u. Reparatur			5.144,87 €
Personal	150 [h/a]	17,5 [€/h]	2.625,00 €
<b>Betriebskosten Dekanter (Flottweg) Gesamt</b>			<b>17.656,06 €</b>
<b>Betriebskosten Verdampfer (Arnold)</b>			
Stromkosten	8.400 [h/a]	15 [kW] 0,1305 [€/kWh]	16.443,00 €
Wartung u. Reparatur			16.753,07 €
Personal	365 [h/a]	17,5 [€/h]	6.387,50 €
Schwefelsäure	40 [t/a]	82 [€/t]	3.280,00 €
<b>Betriebskosten Verdampfer (Arnold) Gesamt</b>			<b>42.863,57 €</b>
<b>Investitionskosten Dekanter (Flottweg)</b>			
Anschaffungskosten			153.550,00 €
Abschreibungsdauer			10 Jahre
Kalkulatorischer Zinssatz			2,0%
<b>Investitionskosten Dekanter (Flottweg) Gesamt</b>			<b>17.149,56 €</b>
<b>Investitionskosten Verdampfer (Arnold)</b>			
Anschaffungskosten			500.000,00 €
Abschreibungsdauer			10 Jahre
Kalkulatorischer Zinssatz			2,0%
<b>Investitionskosten Verdampfer (Arnold) Gesamt</b>			<b>55.843,58 €</b>
<b>Kosten Gesamt pro Jahr</b>			<b>133.512,77 €</b>
<b>Einnahmen und Einsparungen</b>			
Einnahmen Düngerverkauf	2727 [t/a]	0 [€/t]	0,00 €
Einnahmen ASL	146 [t/a]	60,0 [€/t]	8.760,00 €
Ersparnis aus Ausbringungskosten	5.326 [t/a]	15 [€/t]	79.887,60 €
Ersparnis Lagerausbau		105.000 [€]	11.727,15 €
KWK-Bonus/Wärmebonus	1.208.000 [kWh/a]	0,03 [€/kWh]	36.240,00 €
<b>Einnahmen/Einsparungen Gesamt pro Jahr</b>			<b>136.614,75 €</b>
<b>Gewinn pro Jahr</b>			<b>3.101,98 €</b>
Payback			8,6 Jahre

Tabelle 6: Berechnung des jährlichen Gewinns (Flottweg/Arnold)

Die Amortisationszeit wurde nach der Pay-back-Methode berechnet. Der Payback ist ein Entscheidungskriterium, nach welchem Zeitraum das eingesetzte Kapital über die Umsatzerlöse wieder ins Unternehmen zurückfließt. [40, S.227]

In *Formel 4* ist die für die Berechnung des Paybacks eingesetzte Formel zu sehen.

$$\text{Payback} = \frac{\text{Kapitaleinsatz}}{\text{durchschnittlicher Gewinn} + \text{Abschreibungen}}$$

*Formel 4: Berechnungsformel Payback*

Je kürzer die Amortisationszeit, desto geringer ist das Investitionsrisiko, da der Rückfluss des investierten Kapitals kürzer ist.

In den folgenden zwei Abbildungen ist der jährliche Gewinn bei verschiedenen Ausbringungskosten dargestellt. In *Abbildung 30* wird angenommen, dass die Anlagen die Kriterien für den KWK- Bonus erfüllen. *Abbildung 31* zeigt das Ergebnis ohne KWK- Bonus. Das Verdampfersystem der Firma MKR- Metzger erzielte schon bei Ausbringungskosten von 10 Euro pro Tonne flüssigen Gärrestes ein positives Ergebnis (mit KWK- Bonus). Die Ursache dafür sind die Investitionskosten. Diese sind bei MKR mit jährlichen Kosten von 51.385,03 € am niedrigsten. (Arnold:55.843,58 €, Vapogant:71.127,52 €) Durch die höheren Investitionskosten steigen ebenfalls die Wartungs- und Reparaturkosten (vgl. 7.2).

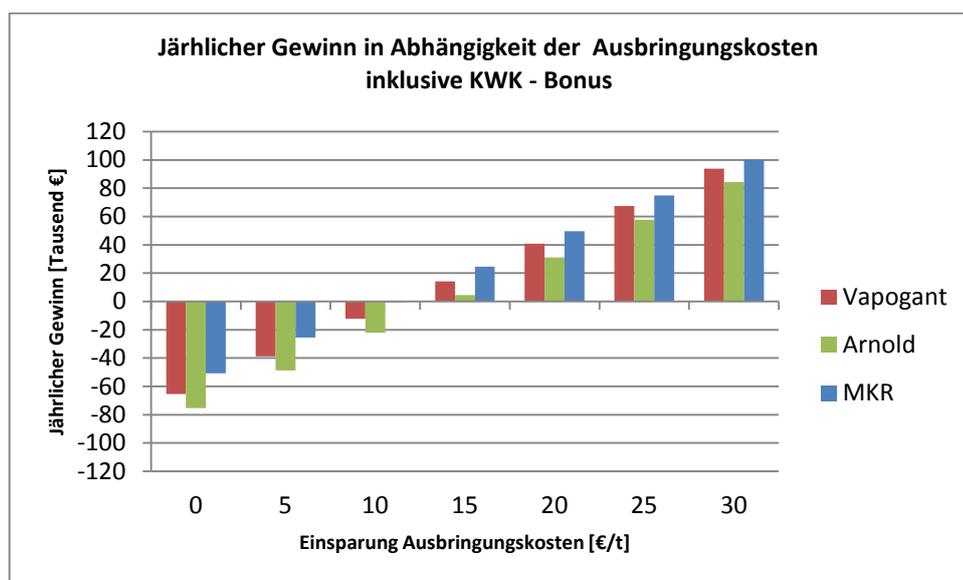


Abbildung 30: Gewinn in Abhängigkeit der Ausbringungskosten inkl. KWK-Bonus

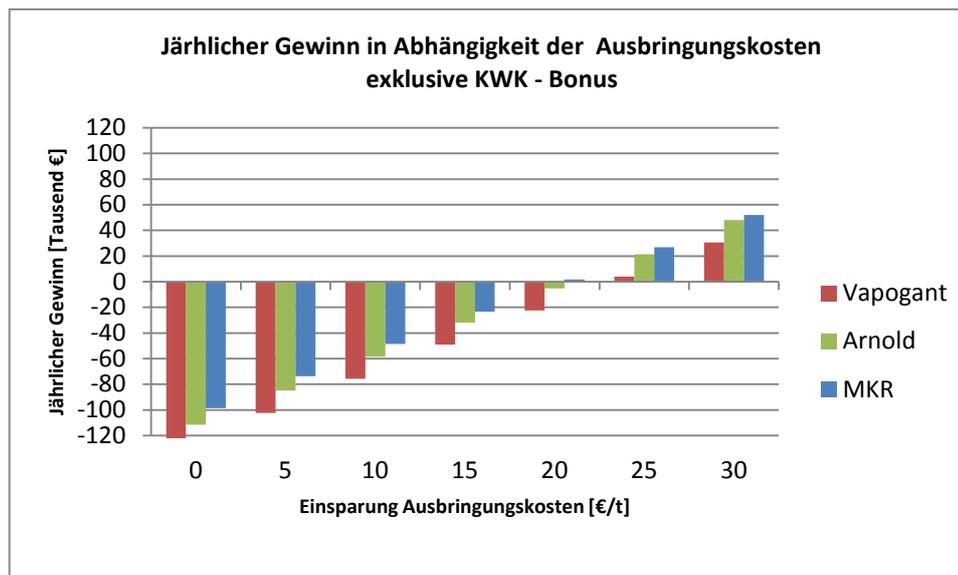


Abbildung 31: Gewinn in Abhängigkeit der Ausbringungskosten exkl. KWK-Bonus

In *Abbildung 32* und *Abbildung 33* ist die Amortisationszeit (Payback) in Abhängigkeit der Ausbringungskosten sowohl mit, als auch ohne KWK-Bonus dargestellt. In *Abbildung 32* fehlen, bei Ausbringungskosten von 0 Euro pro Tonne, die Werte für die Verdampfersysteme von KKR, Vapogant und Arnold. Dies liegt daran, dass durch die Unwirtschaftlichkeit die Werte extrem hoch sind und dadurch nicht dargestellt werden. Aus demselben Grund sind auch bei *Abbildung 33* erst ab 15 Euro pro Tonne Werte von allen drei Herstellern verfügbar. Bei allen Sensitivitätsanalysen wird davon ausgegangen, dass die Ausbringungskosten in der Betrachtungszeit denselben Wert haben. Durch die bereits in anderen Kapiteln beschriebene Entwicklung ist anzunehmen, dass die angenommenen Ausbringungskosten während der Betrachtungsphase nur steigen können. Deshalb ist der jeweilige Wert ein Minimum und in der Laufzeit von zehn Jahren kann das Ergebnis noch besser ausfallen.

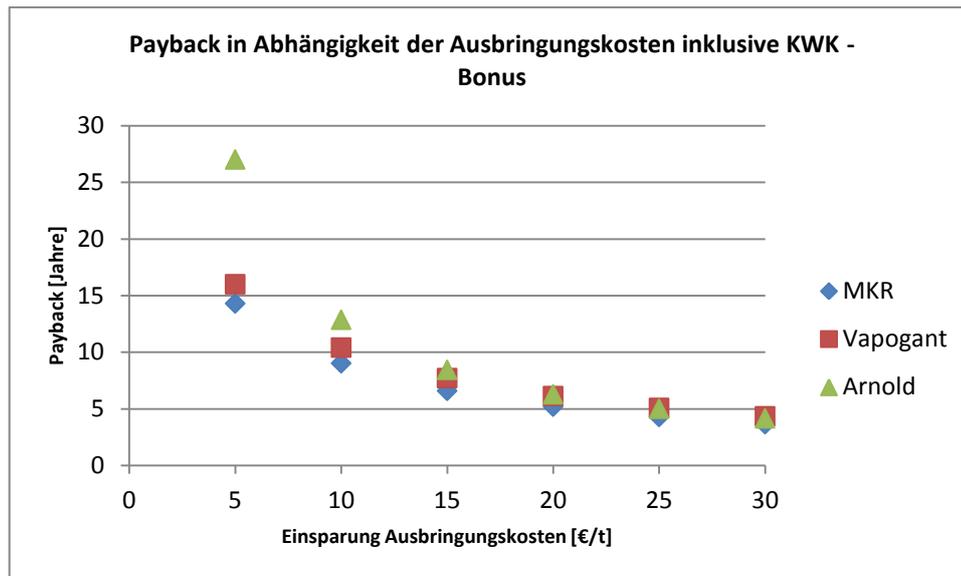


Abbildung 32: Payback in Abhängigkeit der Ausbringungskosten inkl. KWK-Bonus

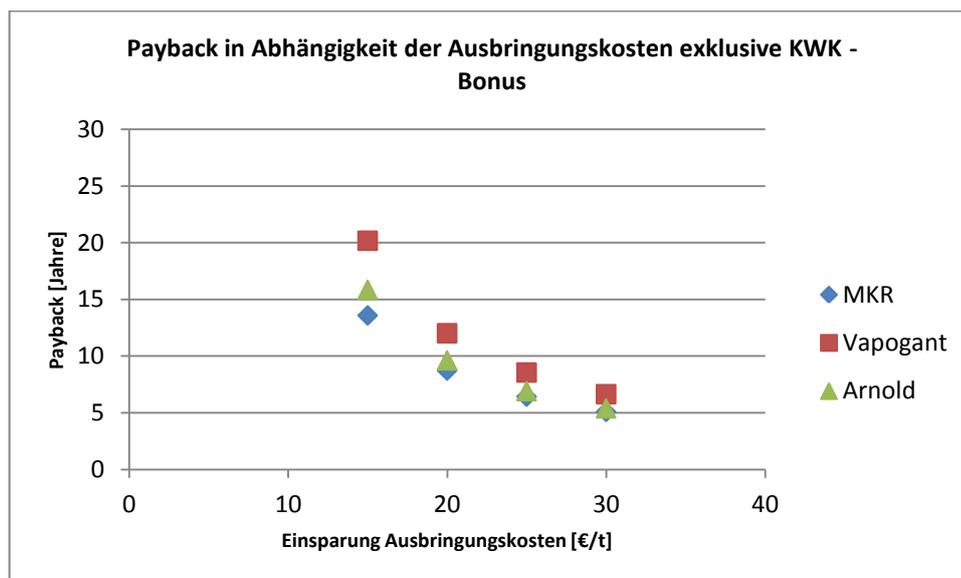


Abbildung 33: Payback in Abhängigkeit der Ausbringungskosten exkl. KWK-Bonus

Sowohl in *Abbildung 32*, als auch in *Abbildung 33* ist zu erkennen, dass die Amortisationszeit mit steigenden Ausbringungskosten rasch abnimmt. Der Payback sollte geringer sein als die für die Abschreibung verwendete Nutzungsdauer. Diese wurde mit zehn Jahren angenommen. [38, S.5]

Die Ursache dafür, dass in *Abbildung 32* die Firma Arnold zu Beginn die längste Amortisationszeit hat und in *Abbildung 33* das Verdampfersystem der Firma Vapogant, liegt an der Berechnung des KWK- Bonus.

Da der Verdampfer der Firma Vapogant den höchsten thermischen Energieverbrauch hat und der KWK – Bonus pro kWh verrechnet wird, ist somit auch der Bonus am höchsten. Bei sehr hohen Ausbringungskosten nähert sich die Amortisationszeit aller Verdampfersysteme an, weil hier die Einsparungen immer dominierender werden.

## 8 Diskussion und Ausblick

Die drei Verdampfer unterscheiden sich nicht nur in ihrer technischen Ausführung, sondern auch in den Kosten. Da bei dieser Arbeit keine Versuche durchgeführt wurden, können in Bezug auf die Anwendbarkeit und Komptabilität nur Vermutungen angestellt werden. Natürlich untermauern Versuchsprotokolle und Vergleichsanlagen diese Annahmen.

Vom technologischen Standpunkt erscheint die Dünnschichtverdampfung als das sinnvollste Verfahren, da hierbei zum einen die Verdampferfläche maximiert wird und zum anderen durch die rotierenden Bürsten das Anbacken von Feststoffen verhindert wird. Bei dem Rohrbündelverdampfer versichert der Hersteller, dass trotz hoher Trockensubstanzgehalte keine Probleme zu erwarten sind. Dies scheint ein attraktives Angebot zu sein, aber die Zuverlässigkeit und Rahmenbedingungen dieses Verfahren müssen noch überprüft werden. Das dritte Verfahren ist der Blasenverdampfer mit integrierten Heizplatten. Diese Technologie ist die einfachste, benötigt jedoch die meiste Energie. Dies wirkt sich natürlich positiv auf den KWK-Bonus aus, jedoch kann durch eine Adaptierung der anderen Anlagen auch ein nominell höherer Wärmebedarf künstlich erzeugt werden. Dies geschieht durch eine Parallelschaltung mehrere Verdampferstufen. Ohne den KWK-Bonus ist ein hoher thermischer Energieverbrauch natürlich nicht wünschenswert.

Die hohen Investitionskosten bewirken gleichzeitig hohe Betriebskosten. Der Grund dafür ist, dass die Wartungs- und Reparaturkosten mit Hilfe der Investitionskosten berechnet wurden (2 bzw. 1 % von der Investition).

Die preislichen Unterschiede aller angebotenen Verdampfer lassen sich nur bedingt erklären, da bei dem günstigsten Angebot die verwendete Technologie am besten erscheint. Zusätzlich ist auch die werkstoffliche Ausführung sehr gut. Auch das mehrmalige Nachfragen, wie die höheren Investitionskosten zustande kommen, brachte kein befriedigendes Ergebnis. Deshalb muss der Preis in dieser Form akzeptiert werden und wirkt sich natürlich negativ auf die wirtschaftliche Bewertung dieses Herstellers aus.

Bei allen zur Berechnung verwendeten Werten wurden immer die gleichen Annahmen verwendet, außer es gab vom Hersteller dezidiert Angaben, welche nicht offensichtlich zu optimistisch waren (z.B.: dreifache Aufkonzentrierung im Verdampfer)

Ein großer Einflussfaktor auf den wirtschaftlichen Erfolg ist der KWK- Bonus. Da dieser, wie bereits erwähnt, im neuen EEG nicht mehr vergeben wird, sinkt die Zahl der Anlagen, welche noch einen KWK- Bonus erhalten können. Aus diesem Grund sollten Anlagenbetreiber, welche für den Einsatz von Verdampfern in Frage kommen, rasch handeln. Damit ein jährlicher Gewinn erzielt werden kann, müssen ohne KWK-Bonus die Ausbringungskosten um zirka 10 Euro höher liegen als mit diesem.

Es ist zu erwarten, dass die Ausbringungskosten in den nächsten Jahren, speziell in Gebieten mit intensiver Land- und Viehwirtschaft, immer weiter steigen werden. Zusätzlich wird dieser Umstand durch den Gesetzgeber verschärft. Denn in der Düngeverordnung wird vorgeschrieben, dass die auszubringende Menge an Gesamtstickstoff 170 Kilogramm je Hektar und Jahr nicht überschreiten darf.

[6, S.1310]

Der Stickstoffanteil beträgt 4,8 kg/t FM, wobei davon 2,9 kg/t FM Ammonium sind.

[7, S.185]

Rund 80 Prozent des Ammoniums können im Brüdenwäscher aus dem flüssigen Gärrest entfernt werden. [18, S.7] Das heißt, dass durch die Verdampfung ungefähr die Hälfte des im Gärrest enthaltenen Stickstoffs entfernt werden kann. Dadurch bietet die Eindampfung eine hervorragende Möglichkeit, in Gebieten mit hoher Biogasanlagendichte, gezielt Stickstoff aus dem Gärrest zu entfernen.

Natürlich ist es auch möglich, statt der Lagerung und des Ausbringens des flüssigen Gärrestes, noch weitere Verfahrensschritte zu unternehmen und somit die flüssige Fraktion komplett zu trocknen. Dies kann mit einem Bandtrockner geschehen. Das Konzentrat wird nach dem Verdampfer mit festem Gärrest vermischt und gleichmäßig auf dem Bandtrockner verteilt. Ziel ist es, den Gärrest soweit zu trocknen, dass dieser in die Kompostierung gegeben werden kann.

Versuche haben gezeigt, dass die Mischung und Aufbringung der beiden Fraktionen sehr schwierig ist und das Mischungsverhältnis von flüssigem zu festem Gärrest bei mindestens 1:4 liegen muss. [41, S.7]

Zusätzlich ist die Durchmischung und Ausbreitung der Gärreste im Bandtrockner sehr schwierig zu realisieren. Deshalb muss für diese Art der Weiterbehandlung der Gärreste noch weiter geforscht und optimiert werden.

*Abbildung 34* zeigt eine weitere Möglichkeit, das Konzentrat direkt zu trocknen. Es ist der Einsatz eines Wasserbettrockners. Diese kommen üblicherweise in der Lebensmittelindustrie zum Einsatz. Versuche haben gezeigt, dass diese Technologie vielversprechend sein könnte. Das Verfahren wurde jedoch bisher nur unter Laborbedingungen getestet. Weitere Versuche im größeren Maßstab und unter realen Bedingungen wären sehr hilfreich.



*Abbildung 34: Getrocknetes Konzentrat auf einem Wasserbettrockner*

Ein großer Vorteil des Wasserbettrockners ist die geringe Temperatur des Wasserbades und, dass keine Mischung mit festen Gärresten erforderlich ist. In *Abbildung 34* ist das bereits getrocknete Konzentrat zu sehen. Ein Nachteil dieses Verfahrens ist, dass die Verweilzeit auf dem Band sehr groß sein muss und dadurch der Durchsatz verhältnismäßig klein ist.

Zum Schluss ist zu sagen, dass die Weiterverarbeitung der flüssigen Gärreste auch in Zukunft ein wichtiges Thema bleiben wird. Mit Hilfe der Vakuumverdampfung kann die Situation deutlich verbessert werden und durch die steigenden Ausbringungskosten wird diese Technologie mit Sicherheit an Bedeutung gewinnen. Zum einen haben Förderungen, wie der KWK- Bonus die Entwicklung dieses Verfahrens gefördert, zum anderen werden immer striktere Verordnungen und Limitierungen die Weiterbehandlung der flüssigen Gärreste unverzichtbar machen. Anlagen, die noch unter älteren EEG's bewilligt worden sind und somit einen KWK-Bonus erhalten, müssen sich so schnell wie möglich mit der Vakuumverdampfung auseinandersetzen, da sich bei diesen Anlagen die Verdampfung schon bei den derzeitigen Ausbringungskosten schnell amortisiert.

Jede Biogasanlage ist in gewisser Weise einzigartig. Unterschiedliche Inputmaterialien und Verfahrensbedingungen sorgen dafür, dass die Gärrestzusammensetzung nie gleich ist. Deshalb sollte bevor eine Anlage mit einem Verdampfer ausgestattet wird, die Komptabilität überprüft werden und an bestehenden Verdampfern Versuche mit dem Gärrest aus der Biogasanlage gemacht werden.

## 9 Anhang

Pos.	Anzahl	Beschreibung	Einzelpreis [€]	Gesamtpreis [€]
1	1	Pieralisi Dekanter MAIOR 2, Schaltschrank, Dokumentation, Transport und Verpackung	92.100,00	92.100,00
2	1	Verschleiß und Ersatzteile	8.100,00	8.100,00
3	1	Ersatzschnecke	30.100,00	30.100,00
4	1	Aufarbeitung Schnecke (Richtpreis)	15.000,00	Option
5	1	Inbetriebnahme	k.A.	k.A.
		<b>Netto-Angebotspreis</b>		<b>130.300,00</b>

Tabelle 7: Angebot Pieralisi MAIOR 2

Pos.	Anzahl	Beschreibung	Einzelpreis [€]	Gesamtpreis [€]
1	1	Flottweg Decanter C2E-4/454 HTS mit Antrieb SP 3.09	55.000,00	55.000,00
2	1	Automatische Fettzentralschmierung	1.900,00	Option
3	1	Dekantergestell	2.150,00	2.150,00
4	1	Feststoffschieber	5.100,00	Option
5	1	Förderschnecke	14.500,00	14.500,00
6	1	Schlammpumpe	2.950,00	2.950,00
7	1	Zulaufmessung	1.750,00	1.750,00
8	1	Schaltanlage	26.400,00	26.400,00
9	1	Mechanische Montage	5.800,00	5.800,00
10	1	Installation	25.000,00	Schätzung
11	1	Verpackung und Transport CIP Telfs	1.000,00	1.000,00
12	1	Projektierung	5.500,00	5.500,00
13	1	Inbetriebnahme und Schulung	6.500,00	6.500,00
		<b>Netto-Angebotspreis</b>		<b>121.550,00</b>

Tabelle 8: Angebot Flottweg Dekanter C2E

Pos.	Anzahl	Beschreibung	Einzelpreis [€]	Gesamtpreis [€]
1	1	Verdampfer DV 1000 2-Stufig	195.440,00	195.440,00
2	2	Brüdenwäscher DV-1000 PP	27.010,00	54.020,00
3	1	Qualitätsüberwachung Destillat	13.920,00	19.920,00
4	1	Vakuumstation Größe 100 Basismodul	14.910,00	14.910,00
5	1	Hauptsteuerschrank	21.440,00	21.440,00
6	2	Schaltschrank für Kolonne	6.020,00	12.040,00
7	1	Kühlturm – Kühlleistung 220 kW für DV 1000	17.750,00	17.750,00
8	1	Schwefelsäure-Lagertank 15m <sup>3</sup> , Innenaufstellung	24.520,00	24.520,00
9	1	Feinseparation 40“ aus Edelstahl	29.760,00	29.760,00
10	1	Hebestation ASL 1 m <sup>3</sup>	2.730,00	2.730,00
11	1	Vorlagebehälter kompl. Als Vorlage zum Verdampfer	10.010,00	10.010,00
12	1	CIP Reinigung 0,9 m <sup>3</sup>	12.780,00	12.780,00
13	2	Verpackung-Verladung RT/DV Anlagen	1.160,00	2.320,00
14	1	Montage u. Inbetriebnahme d. einzel. Komponenten	26.880,00	26.880,00
15	1	Projektierung Steuerung	3.680,00	3.680,00
16	1	Zubehör für Verdampfersysteme RT/DV	17.880,00	17.880,00
17	1	Biofilter dreistufig 200 m <sup>3</sup> /h 500 GE	22.330,00	Option
		<b>Netto Angebotspreis</b>		<b>460.080,00</b>

Tabelle 9: Angebot MKR DV 1000 2-stufig

Pos.	Anzahl	Beschreibung	Einzelpreis [€]	Gesamtpreis [€]
1	1	Vapogant 400kw 1 stufig inkl. Montage	488.246,00	488.246,00
2	1	Überwachung der Leitfähigkeit im Kondensat	3.800,00	3.800,00
3	1	pH Anhebung im ASL	5.900,00	5.900,00
4	1	Säurelager extern, 18m <sup>3</sup> , liegend	30.200,00	30.200,00
5	1	Montagematerial für 2 ASL Tank´s	6.300,00	6.300,00
6	1	Einbindung und Anschluss der Zu u. Ableitung zum Vapogant	30.000,00	30.000,00
7	1	Thermische Einbindung inkl. Zuführpumpe	27.000,00	27.000,00
8	1	Zu- und Abfuhr von Materialien	5.000,00	5.000,00
9	1	Erdarbeiten entsprechend Ausführungsplanung	5.000,00	5.000,00
10	1	Fundamente entsprechend Ausführungsplanung	10.000,00	10.000,00
11	1	Gräben für Rohrleitungen und Kabel und Wiederverfüllen entsprechend Ausführungsplanung	3.000,00	3.000,00
		<b>Netto Angebotspreis</b>		<b>636.846,00</b>

Tabelle 10: Angebot Vapogant 400kw einstufig

Pos.	Anzahl	Beschreibung	Einzelpreis [€]	Gesamtpreis [€]
1	1	Verdampfersystem Arnold inkl. Montage & Inbetriebnahme	500.000,00	500.000,00
		<b>Netto Angebotspreis</b>		<b>500.000,00</b>

Tabelle 11: Angebot Arnold Biogastechnik

Bioabfall	Grüngut	Speisereste	-	Mischung
100%	0%	0%	0%	100%
25.000 Mg/a	0 Mg/a	0 Mg/a	0 Mg/a	25.000 Mg/a
5,0%	0,0%	0,0%	0,0%	5,00%
1.250 Mg/a	0 Mg/a	0 Mg/a	0 Mg/a	1.250 Mg/a
23.750 Mg/a	0 Mg/a	0 Mg/a	0 Mg/a	23.750 Mg/a
<b>Bioabfall</b>				
100%	0%	0%	0%	100%
23.750 Mg/a	0 Mg/a	0 Mg/a	0 Mg/a	23.750 Mg/a
37%	45%	0%	0%	37,0%
8.788 Mg/a	0 Mg/a	0 Mg/a	0 Mg/a	8.788 Mg/a
65%	60%	0%	0%	65%
5.712 Mg/a	0 Mg/a	0 Mg/a	0 Mg/a	5.712 Mg/a
57%	55%	0%	0%	57%
3.227 Mg/a	0 Mg/a	0 Mg/a	0 Mg/a	3.227 Mg/a
100%	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	100%
<b>Bioabfall</b>				
100%	0%	0%	0%	100%
23.750 Mg/a	0 Mg/a	0 Mg/a	0 Mg/a	23.750 Mg/a
37%	45%	0%	0%	37,0%
8.788 Mg/a	0 Mg/a	0 Mg/a	0 Mg/a	8.788 Mg/a
65%	60%	0%	0%	65%
5.712 Mg/a	0 Mg/a	0 Mg/a	0 Mg/a	5.712 Mg/a
57%	55%	0%	0%	57%
3.227 Mg/a	0 Mg/a	0 Mg/a	0 Mg/a	3.227 Mg/a
24%	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	24%
<b>Bioabfall</b>				
32%	34%	35%	40%	44%
73%	70%	67%	61%	58%
68%	62%	59%	43%	29%
	120%	120%	120%	
81%	74%	71%	52%	35%
<b>Bioabfall</b>				
3.227 Mg/a	0 Mg/a	0 Mg/a	0 Mg/a	3.227 Mg/a
0 Nm³/t	0 Nm³/t	0 Nm³/t	0 Nm³/t	0 Mg/a

Abbildung 35: Eingabe Materialinput Thöni Planungstool

Grenzwerte		Kontrollspalte
spezifische Gasproduktion	4 Nm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	OK
spezifische Gasproduktion	6 Bm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	OK
Beladung	9 kg oTS/m <sup>3</sup> d	OK
Beladung	5,4 kg oTSan/m <sup>3</sup> d	OK
mittlere Verweilzeit	25,2 d	
hydraulische Durchlaufzeit	19 d	

Fermenter	1.650 m <sup>3</sup>
Fermenter Anzahl	1
Fermenter Nutzvolumen	1.650 m <sup>3</sup>

Aufbau	
Primärprozess	
Entwässerung mit Absetzbecken	

Erträge	
spezifische Gasproduktion	105 Nm <sup>3</sup> /t FS
spezifische Gasproduktion	283 Nm <sup>3</sup> /t TS
spezifische Gasproduktion	1.194 Nm <sup>3</sup> /t oTS
Gasvolumenstrom	2.489 Nm <sup>3</sup> /a
Gasvolumenstrom	6.820 mNm <sup>3</sup> /d + Fermenter
IST Leistung gewählt	1.000 kW
elektrische Energie produziert	5.615.759 kWh/a
thermische Energie produziert	6.021.886 kWh/a

Primärprozess  
 Entwässerung mit Absetzbecken  
 Entwässerung ohne Absetzbecken  
 Dekanter 1-stufig, Vollstrom  
 Dekanter nur Befeuchtungswasser mit Absetzbecken  
 Dekanter nur Befeuchtungswasser ohne Absetzbecken  
 Dekanter 2-stufig, Vollstrom, mit Absetzbecken  
 Dekanter 2-stufig, Vollstrom, ohne Absetzbecken

Abbildung 36: Eingabe Materialinput Thöni Planungstool

Eingabedaten		<b>thöni</b> <sup>®</sup>	
<b>Projekt</b>		Diplomarbeit Nils Hackl	
<b>Anlieferung "Trocken"</b>			
Durchsatz	23.750 Mg/a		
TS	37%		
oTS	65%		
oTSan	57%		
<b>Störstoffe</b>			
Anteil von Anlieferung	5,00%		
TS	50%		
oTS	0,0%		
<b>Abbau Zwischenbunker</b>			
Abbau Feststoff	0,0%		
Abbau organische Trockensubstanz	0,0%		
<b>Fermentation</b>			
Volumen Fermenter	1.650 m <sup>3</sup>		
Verhältnis Impfung zu Input+Befeuchtung	1/3		
TS-Gehalt Eintrag	35%		
<b>Biogas</b>			
Wassergehalt (55°C)	10,0%		
Methangehalt	58%		
Heizwert	5,80 kWh/Nm <sup>3</sup>		
<b>Korrekturfaktor Gasertrag (oTSan)</b>			
	1,25		
<b>Abluftsystem</b>			
Abluftmenge	20.000 m <sup>3</sup> /h		
Temp. Winter	6 °C		
Temp. Sommer	20 °C		
Feuchte Abluft	65%		
Temp. Zuluft BF min	20 °C		
Feuchte Zuluft Biofilter	97%		
<b>Austrags Pressschnecke</b>			
TS-Gehalt Presswasser		16,0%	
TS-Gehalt Presskuchen		37%	
oTS-Gehalt Presswasser		42%	
<b>Sandabscheidung</b>			
Abgeschiedener Sand		0%	
TS		35%	
oTS		70%	
<b>Überschusswasserbehandlung</b>			
Absetzb. Überschussw (ja/nein)		ja	
Dekanter Befeuchtungsw. (ja/ nein)		nein	
Dekanter Stufe 1 Abwasser (ja/ nein)		nein	
Dekanter Stufe 2 Abwasser (ja/nein)		nein	
<b>Dekanter für Prozesswasser</b>			
TS- Befeuchtungswasser		16%	
TS-Gehalt Zentrat		9,0%	
oTS-Gehalt Zentrat		40%	
TS-Gehalt Retentat		35%	
oTS-Gehalt Retentat		40%	
<b>Flockungsmittel</b>			
Dosierung (norm 5)		0 kg/d TS	
FHM Brauchlösung		40%	
<b>Presskuchen</b>			
TS		35,0%	
oTS		38%	
<b>Gereinigtes Abwasser</b>			
TS		1,9%	
oTS		40%	

Abbildung 37: Eingabedaten Thöni Planungstool

## 10 Literaturverzeichnis

- [1] Fachverband Biogas e.V.. Branchenzahlen 2016 und Prognose 2017. 2017
- [2] Umwelt Bundesamt. Erneuerbare Energie in Zahlen. Online im Internet unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen#strom> (22.01.2018)
- [3] Raussen T, Kern M. Der Leitfaden „Optimale Aufbereitung von Gärresten aus der Bioabfallbehandlung“. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg. Kernerplatz 9, 70182 Stuttgart. September 2016, 2.Auflage.
- [4] Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. Düngemittelverordnung. 2017
- [5] Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. Verordnung zur Neuordnung der guten fachlichen Praxis beim Düngen. Bundesanzeiger Verlag. 53113 Bonn. Juni 2017
- [6] Dirschka J, und andere. Indirekteinleitung Band 653 Kontakt und Studium. Expert Verlag. 2004

- 
- [7] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR). Abteilung Öffentlichkeitsarbeit. Leitfaden Biogas - Von der Gewinnung zur Nutzung. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR). 18276 Gulzow-Pruzen. 2013, 6. Überarbeitete Auflage.
- [8] Rosenwinkel K-H, Helmut K, Dichtl N, Seyfried C-F, Weiland P. Anaerobtechnik: Abwasser-, Schlamm- und Reststoffbehandlung, Biogasgewinnung. Springer Vieweg. Berlin. 3. Auflage 2015.
- [9] Kaltschmitt M, Hartmann H, Hofbauer H. Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren. Springer Vieweg. Berlin 2016, 3. Auflage.
- [10] Braun, R. Prinzipien und Systeme von Vergärungsanlagen für Biogene Komunalabfälle. Abteilung Umwelttechnologie – IFA Tulln. 2004
- [11] Weitz M. Biokraftstoffe – Potenzial, Zukunftsszenarien und Herstellungsverfahren im wirtschaftlichen Vergleich. Diplomica Verlag GmbH. Hamburg. 2007.
- [12] Arbeiter M, Bühring W, Stihl H, Schwab S, Höche R. Die Zukunft aktiv gestalten II. Springer-Verlag. Berlin 2016
- [13] Thöni Industriebetriebe GmbH

- 
- [14] Frötsch G, Meinholz H. Handbuch Betriebliche Kreislaufwirtschaft. Springer Verlag. Berlin 2016
- [15] Raussen T, Lootsma A. Verfahren der Gärrestaufbereitung, Biomasseforum. Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH, Kassel 2008
- [16] Greulich U. „Möglichkeiten zur weiteren Aufbereitung der Gärrest-Flüssigphase“, KoNaRo-Fachgespräch „Biogas – Schwerpunkt: Verwertung der Gärreste“. 2005
- [17] Heindl A. Praxisbuch Bandtrocknung: Grundlagen, Anwendung, Berechnung. Springer Verlag 2016.
- [18] Effenberger M, Möhrle H, Winkler G, Krodel T. Technische Empfehlungen für Gärrestetrocknung. Arbeitsgemeinschaft Landtechnik und landwirtschaftliches Bauwesen in Bayern e.V.. Freising 2015.
- [19] MKR- Metzger GmbH. Funktionsbeschreibung zur Aufbereitung von Gärprodukten. Mohnheim. 2017
- [20] Luckert K. Handbuch der mechanischen Fest- Flüssig- Trennung. Vulkan-Verlag. Essen. 2004

- 
- [21] Flottweg SE. Flottweg Dekanter für den Einsatz in Wasser- und Klärwerken. Flottweg SE. Vilsbiburg 2017
- [22] Mersmann A. Thermische Verfahrenstechnik: Grundlagen und Methoden. Springer. Berlin 2005. 2.Auflage.
- [23] Bilitewski B, Härdtle G. Abfallwirtschaft: Handbuch für Praxis und Lehre. Springer-Verlag. Berlin 2014. 4.Ausgabe.
- [24] Wendland, M. Lichtl, F. „Biogasgärreste - Einsatz von Gärresten aus der Biogasproduktion als Düngemittel“. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft Institut für Agrarökologie, Ökologischen Landbau und Bodenschutz. 2012
- [25] NWZ online. Online unter: [https://www.nwzonline.de/wesermarsch/wirtschaft/gruene-laden-ein-zum-guelle-gipfel\\_a\\_9,4,2169449513.html](https://www.nwzonline.de/wesermarsch/wirtschaft/gruene-laden-ein-zum-guelle-gipfel_a_9,4,2169449513.html) (14.03.2018)
- [26] Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen. Technik der Gülle Ausbringung. Online im Internet unter: <https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/ackerbau/duengung/guelle/technik/index.html> (15.11.2017).
- [27] ISN-Interessengemeinschaft der Schweinehalter Deutschlands e.V., Online im Internet unter: <https://www.schweine.net/news/niedersachsen-beschraenkt-guelle-transporte-aus-nl.html> (13.03.2018)

- 
- [28] top agrar online. Online im Internet unter: <https://www.topagrar.com/news/Home-top-News-Guelleduengung-auf-Gruenland-Vor-und-Nachteile-der-heutigen-Systeme-1501531.html> (13.03.2018)
- [29] Angebot Piralisi vom 08.01.2018
- [30] MKR- Metzger GmbH. Prospekt Veerdampfer RT. Mohnheim. 2017
- [31] Biogastechnik Süd GmbH. Gärresteverdampfung Vapogant. Isny im Algäu. 2017
- [32] Arnold & Partner AG. Online unter:  
<https://www.arnoldbiogastechnik.ch/de/verfahrenstechnik> (14.03.2018)
- [33] ASUE Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. BHKW- Fiebel
- [34] Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, Abschlussbericht 2004 „Projekt Biogas Rheinland“- Ergebnisse messtechnischer Untersuchungen an landwirtschaftlichen Biogasanlagen im Rheinland. Münster 2004

- 
- [35] Heinrich Böll Stiftung. Online im Internet unter:  
<https://www.boell.de/sites/default/files/phpdsDFKD> (14.03.2018)
- [36] Koch M. Ökologische und ökonomische Bewertung von Co-Vergärungsanlagen und deren Standortwahl. KIT Scientific Publishing. 2009
- [37] Fachverband Biogas e.V.. Infopapier- Kriterien für die Gärproduktaufbereitung. 2016
- [38] Bundesministerium der Finanzen. AfA-Tabelle für den Wirtschaftszweig „Brauereien und Mälzereien“. 1996
- [39] Janes, G. Kostenrechnung: For Studium und Praxis. Kohlhammer Verlag. 2017
- [40] Weber M. Kaufmännisches Rechnen von A - Z: Formeln, Rechenbeispiele, Tipps für die Praxis. Haufe-Lexware 2005.
- [41] Walke, R. Mischungs- und Trocknungsversuch am 17.09.2015 bei NewEcoTec – Mühldorf a. Inn. Rovi Energie AG. 2015

## 11 Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 1: Biologische Prozesse bei der Biogasentstehung</i> .....	7
<i>Abbildung 2: Zusammensetzung Biogas [7, S.19]</i> .....	8
<i>Abbildung 3: Schema Biogasanlage</i> .....	12
<i>Abbildung 4: Rührkesselreaktor für Nassfermentation</i> .....	13
<i>Abbildung 5: Schema einer Trockenvergärungsanlage</i> .....	14
<i>Abbildung 6: Übersicht der verschiedenen Gärresteaufbereitungsverfahren</i> .....	16
<i>Abbildung 7: Schema eines Zweiphasen Dekanters</i> .....	20
<i>Abbildung 8: Verdunstungskühler</i> .....	24
<i>Abbildung 9: Konzentrat nach Verdampfer</i> .....	25
<i>Abbildung 10: Ausbringung mittels Breitverteiler</i> .....	26
<i>Abbildung 11: Ausbringung mittels Schleppschauchtechnik</i> .....	27
<i>Abbildung 12: Schleppschuhtechnik</i> .....	28
<i>Abbildung 13: Schlitzverfahren</i> .....	28
<i>Abbildung 14: Ausbringung flüssiger Gärreste mittels Injektionsverfahren</i> .....	29
<i>Abbildung 15: Pieralisi Maior 2</i> .....	31
<i>Abbildung 16: Flottweg C2E</i> .....	31
<i>Abbildung 17: Fließschema eines 4-stufigen Verdampfers der Firma MKR</i> .....	33
<i>Abbildung 18: Verdampfersystem MKR DV 1000 2-stufig</i> .....	34
<i>Abbildung 19: Gärresteverdampfung Vapogant</i> .....	35
<i>Abbildung 20: Arnold Eindampfer für Gärreste, Gülle und diverse Abwässer</i> .....	36
<i>Abbildung 21: Systemgrenze (rot) Planungstool</i> .....	38
<i>Abbildung 22: Biogausausbeuten</i> .....	39
<i>Abbildung 23: Massenbilanz Kompaktansicht aus dem Planungstool [13]</i> .....	40
<i>Abbildung 24: Systemgrenze (rot) für Massenbilanz der Entwässerung</i> .....	41
<i>Abbildung 25: Flussdiagramm der Anlagenkombination MKR/Flottweg</i> .....	42
<i>Abbildung 26: Fließbild der einzelnen Energieströme</i> .....	44
<i>Abbildung 27: Wirkungsgrade von BHKW mit unterschiedlichen Leistungen</i> .....	45
<i>Abbildung 28: Thermischer Energiebedarf des Fermenters</i> .....	46
<i>Abbildung 29: Tierdichte in Deutschland</i> .....	48
<i>Abbildung 30: Gewinn in Abhängigkeit der Ausbringungskosten inkl. KWK-Bonus</i> ...55	

---

<i>Abbildung 31: Gewinn in Abhängigkeit der Ausbringungskosten exkl. KWK-Bonus..</i>	<i>56</i>
<i>Abbildung 32: Payback in Abhängigkeit der Ausbringungskosten inkl. KWK-Bonus.</i>	<i>57</i>
<i>Abbildung 33: Payback in Abhängigkeit der Ausbringungskosten exkl. KWK-Bonus</i>	<i>57</i>
<i>Abbildung 34: Getrocknetes Konzentrat auf einem Wasserbettrockner .....</i>	<i>61</i>
<i>Abbildung 35: Eingabe Materialinput Thöni Planungstool .....</i>	<i>65</i>
<i>Abbildung 36: Eingabe Materialinput Thöni Planungstool .....</i>	<i>66</i>
<i>Abbildung 37: Eingabedaten Thöni Planungstool.....</i>	<i>67</i>

## 12 Formelverzeichnis

<i>Formel 1: Substratabhängige Zusammensetzung nach Buswell und Boyle</i> .....	6
<i>Formel 2: Gleichgewicht Ammonium – Ammoniak</i> .....	18
<i>Formel 3: Reaktion von Ammoniak und Schwefelsäure</i> .....	19
<i>Formel 4: Berechnungsformel Payback</i> .....	54

## 13 Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1: Auszug aus Referenzliste Firma Thöni Industriebetriebe GmbH</i> .....	37
<i>Tabelle 2: Vergleich Output Verdampfer</i> .....	43
<i>Tabelle 3: Stromverbrauch Apparate Entwässerung</i> .....	47
<i>Tabelle 4: Berechnung des jährlichen Gewinns (Flottweg/MKR)</i> .....	52
<i>Tabelle 5: Berechnung des jährlichen Gewinns (Flottweg/Vapogant)</i> .....	53
<i>Tabelle 6: Berechnung des jährlichen Gewinns (Flottweg/Arnold)</i> .....	54
<i>Tabelle 7: Angebot Peralisi MAIOR 2</i> .....	63
<i>Tabelle 8: Angebot Flottweg Dekanter C2E</i> .....	63
<i>Tabelle 9: Angebot MKR DV 1000 2-stufig</i> .....	64
<i>Tabelle 10: Angebot Vapogant 400kw einstufig</i> .....	64
<i>Tabelle 11: Angebot Arnold Biogastechnik</i> .....	64

## 14 Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

AfA	Abschreibung für Abnutzung
ASL	Ammoniumsulfatlösung
BHKW	Blockheizkraftwerk
BM	Bundesministerium
EEG	Erneuerbare Energien Gesetz
e.V.	Eingetragener Verein
FM	Frischmasse
KWK	Kraft Wärme Kopplung
KWKG	Kraft Wärme Kopplungsgesetz