HOCHSCHULE LANDSHUT
HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN

HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN LANDSHUT

MASTERSTUDIENGANG PROZESSMANAGEMENT UND RESSOURCENEFFIZIENZ

Optimierung einer Biogasanlage

Masterarbeit

Verfasser

Tassilo Grichtmaier

Ostpreußenstr. 58

81927 München

Matrikelnummer

1031522

Datum

20.02.2016

Hochschule Landshut

Am Lurzenhof 1

84036 Landshut

Aufgabensteller

Prof. Dr. rer. nat. Josef Hofmann

Erklärung zur Masterarbeit

(gemäß § 31, Abs. 7 RaPO)

Name, Vorname des Studierenden: Grichtmaier, Tassilo

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Landshut

Fakultät Elektrotechnik und Wirtschaftsingenieurwesen

Hiermit erkläre ich, dass ich die Arbeit selbstständig verfasst, noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt, keine anderen als die angegebenen Quellen oder Hilfsmittel benutzt sowie wörtliche und sinngemäße Zitate als solche gekennzeichnet habe.

München, den 20.02.16 Unterschrift_____

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die durch Ihre Unterstützung zum Gelingen dieser Masterarbeit beigetragen haben.

Mein Dank gilt der Familie Kreutzer, welche mich in allen Fragen auf der Biogasanlage und dem Hof unterstützt hat. Besonders bei Josef und Andreas Kreutzer, die immer Zeit für mich hatten und durch ihre Anregungen meine Arbeit unterstützt haben.

Ganz besonders möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Josef Hofmann für die Bereitstellung dieses interessanten Themas bedanken. Er hat meine Arbeit durch seine fachliche und persönliche Unterstützung begleitet.

Ein großer Dank gilt meinem Vorgesetzten und meinen Arbeitskollegen, die es mir ermöglicht haben neben dem Beruf das Studium abzuschließen und diese Masterarbeit anzufertigen.

Auch meiner Familie, insbesondere meinen Eltern, die mich in meinem Studium und bei all meinen Entscheidungen unterstützt haben, gilt mein aufrichtiger Dank.

Darüber hinaus und von ganzem Herzen möchte ich mich bei meiner Frau Rebecca für die Geduld und die moralische Unterstützung während des Studiums und dieser Arbeit bedanken.

Inhaltsverzeichnis

ERKLÄRUNG ZUR MASTERARBEIT ..... **I**
DANKSAGUNG ..... **II**
INHALTSVERZEICHNIS ..... **III**
ABBILDUNGSVERZEICHNIS ..... **V**
TABELLENVERZEICHNIS ..... **VII**
FORMEL- UND ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS ..... **VIII**
1 AUFGABENSTELLUNG 1
2 AUSGANGSSITUATION 2
3 BESCHREIBUNG DER BIOGASANLAGE 3
3.1 Fahrsilos 5
3.3 Güllegrube 6
3.5 Fermenter 7
3.6 Einfülltrichter mit Dosiereinrichtung 10
3.7 Nachgärer 11
3.8 Gärrestelager 12
3.10 Verwendete Substrate 13
3.10.1 Beschreibung der Substrate 13
3.10.2 Eigenschaften der eingesetzten Substrate 15
3.11 Gaszusammensetzung 16
3.11.1 Methan 16
3.11.2 Kohlenstoffdioxid 16
3.11.3 Sauerstoff 16
3.11.4 Schwefelwasserstoff 17
3.11.5 Wasserstoff 17
3.11.6 Stichprobenartige Gasmessung 17
3.12 Motorhaus mit Blockheizkraftwerk 18
3.12.1 Generelle Beschreibung 18
3.12.2 Beschreibung der beiden MAN Motoren 18
3.13 Heizung 21
3.13.1 Auswirkungen der Temperatur auf die Biogasanlage 21
3.13.2 Das Heizsystem der Biogasanlage 21
3.14 Steuerungsraum 23
3.14.1 Steuerung der beiden Motoren 23
3.14.2 Steuerung der Biogasanlage 23
3.15 Holztrocknung, Wärmeleitung Hof und Häuser 25
3.15.1 Warmwasser für Hof und Häuser 25
3.15.3 Holztrocknung 26
4 ANALYSE DER BIOGASANLAGE 27
4.1 Stoffstromanalyse 27
4.3 Fermentergröße 30
4.4 Substrateinbringung und Fütterung 32

4.4.1 Fahrweg vom Silo zum Fermenter ... 32
4.4.2 Dosierung der Substrate in den Fermenter ... 33
4.5 Ermittlung Gasproduktion ... 35
4.6 Bestimmung der BHKW-Leistung ... 37
4.7 Faulraumbelastung bei gegebenem Fermentervolumen ... 38
4.9 Gas-Speichervolumen ... 39
4.10 Analyse der produzierten Gasqualität ... 40
4.10.1 Bestandteile von Biogas ... 40
4.10.2 Gasanalysemessung ... 41
4.10.3 Kritische Betrachtung ... 43
5 SOFTWAREANALYSE ... 45
5.1 Vorstellung der Software ... 45
5.2 Simulation der Biogasanlage ... 45
5.2.1 Grundlagen der Simulation ... 45
5.2.2 Simulation des Standardbetriebes ... 47
5.2.4 Simulation mit reduziertem Substrateintrag ... 48
5.2.6 Simulation des thermophilen Betriebes ... 49
5.3 Kritische Schlussbetrachtung ... 49
6 AUFZEIGEN VON VERBESSERUNGSPOTENTIALEN ... 50
6.1 Minimierung der Faulraumbelastung und hinzufügen von Substrat ... 50
6.1.1 Messung nach den Veränderungen der Biogasanlage ... 51
6.1.2 Kritische Betrachtung der zweiten Messung ... 52
6.2 Einsatz von effektiven Mikroorganismen ... 53
6.2.1 Wirkung und Beschreibung von effektiven Mikroorganismen ... 53
6.2.2 Effektive Mikroorganismen zum Silieren in der Biogasanlage ... 54
6.2.3 Wirtschaftliche Betrachtung und Anwendung ... 55
6.2.4 Kritische Schlussbetrachtung der Berechnungsergebnisse ... 58
6.3 Messsysteme ... 59
6.3.1 Empfehlung verschiedener Messsysteme ... 59
6.3.2 Vorstellung von Gasanalysemessgeräten ... 63
6.3.3 Fazit und Schlussbetrachtung ... 64
6.4 Erstellung einer Checkliste zur Anwendung an Biogasanlagen ... 65
6.4.1 Zielsetzung und Grundlage der Checkliste ... 65
6.4.2 Aufbau der Checkliste ... 65
6.4.3 Auszüge aus der Checkliste ... 66
6.4.4 Kritische Betrachtung ... 67
7 ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE ... 68
8 SCHLUSSBETRACHTUNG & DISKUSSION ... 69
LITERATURVERZEICHNIS ... A
ANHANG ... C

Abbildungsverzeichnis

Hinweis: Wenn keine Quellenangabe, dann eigene Aufnahme.

Abbildung 1: Biogasanlage von oben [3] 3

Abbildung 2: Blockschaltbild der Biogasanlage 4

Abbildung 3: Fahrsilo mit je vier Kammern 5

Abbildung 4: Güllegrube mit Nachgärer im Hintergrund 6

Abbildung 5: Schematische Darstellung eines stehenden Betonfermenters [4, p. 41] 7

Abbildung 6: Fermenter mit Beschickungseinheit 8

Abbildung 7: Anlagenschema Fermenter [6] 9

Abbildung 8: Vorratsbehälter auf Anhöhe 10

Abbildung 9: Nachgärer mit Gasspeicher 11

Abbildung 10: Gärrestelager mit Gassack und Abpumpvorrichtung 12

Abbildung 11: Gasmotor 6 Zylinder 18

Abbildung 12: Gasmotor 8 Zylinder 19

Abbildung 13: Heizungsschema Fermenter & Nachgärer [11] 21

Abbildung 14: Heizungsvor- und Rücklaufrohre mit Umwälzpumpen 22

Abbildung 15: Holzanhänger 26

Abbildung 16: Stoffstromanalyse 27

Abbildung 17: Stoffströme mit Kaizenblitzen 29

Abbildung 18: Relevante Anlagenbestandteile für die Fütterung [3] 32

Abbildung 19: Teleskoplader beim Befüllen der Anlage 33

Abbildung 20; Menge, TS-Gehalt & oTS-Gehälter [2, p. 85] der eingesetzten Substrate 35

Abbildung 21: Methanausbeute [2, p. 85] & Methanertrag der Substrate 36

Abbildung 22: Gasspeicher auf den Lagern 39

Abbildung 23: Schlauchausgang 41

Abbildung 24: Messgerät mit Schlauchanschluss 42

Abbildung 25: Aufbau der Biogasanlage Kreutzer in Simba [19] 46

Abbildung 26: Awite Gasanalysemesssystem [26, p. 4] 64

Abbildung 27: Biogas Checkliste Teil 1 ..... E

Abbildung 28: Biogas Checkliste Teil 2..... F

Abbildung 29: Biogas Checkliste Teil 3.....G

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Aufstellung der Substratmengen für das Jahr 2015 [8] 13

Tabelle 2: Stichprobenergebnisse der Gaszusammensetzungsmessung [10] 17

Tabelle 3: Wärmemengen an die Gebäude 2015 [12] 25

Tabelle 4: Fütterungsmassen und Eintragsvolumen pro Tag 31

Tabelle 5: Messergebnisse vom 13.08.2015 43

Tabelle 6: Simulierte Vol.-Ströme & Gaszusammensetzung bei Standardbetrieb [19] 47

Tabelle 7: Simulierte Vol.-Ströme & Gaszusammensetzung bei reduzierter Maissilage [19] 48

Tabelle 8: Simulierte Vol.-Ströme & Gaszusammensetzung im thermophilen Betrieb [19] 49

Tabelle 9: Messergebnisse vom 10.09.2015 51

Tabelle 10: Simulierte Gaszusammensetzung bei reduzierter Maissilage [19] 52

Tabelle 11: Ersparnis durch Gasertragssteigerung 56

Tabelle 12: Investition in Siliermittel bei 0,4 l pro Tonne Maissilage 57

Tabelle 13: Investition in Siliermittel bei 0,8 l pro Tonne Maissilage 57

Tabelle 14: Investition in Siliermittel bei 0,6 l pro Tonne Maissilage 58

Tabelle 15: Auszug aus der Checkliste 66

Tabelle 16: Übersicht über Substrateigenschaften [2, p. 85] C

Tabelle 17: Mindesteigenschaften an Gase für Gasmotoren [4, p. 73] ..... D

Tabelle 18: Inhaltsstoffe vom Biogas [9, p. 911] ..... D

Formel- und Abkürzungsverzeichnis

€: Euro

°C: Grad Celsius

CCM: Corn-Cob-Mix

BHKW: Blockheizkraftwerk

CH_4: Methan

CO_2: Kohlendioxid

d: Tage

GB: Giga Byte

GmbH: Gesellschaft mit begrenzter Haftung

GPS: Getreideganzpflanzensilage

h: Stunden

H_2: Wasserstoff

H_2S: Schwefelwasserstoff

Hi: Heizwert

HTC: Hydrothermale Carbonisierung

IR: Infrarot

Kg: Kilogramm

kW: Kilowatt

kWh: Kilowattstunden

l: Liter

m: Meter

m^3: Kubikmeter

MAN: Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg

MBE: Messbereichsendwert

ml: Milliliter

MW: Megawatt

MWh: Megawattstunden

MWel: Elektrische Bruttoleistung

NawaRo: Nachwachsende Rohstoffe

OIML: Organisation für das gesetzliche Messwesen

oTS: Organische Trockensubstanz

PPM: Parts per Million

PTB: Physikalisch technische Bundesanstalt

ROI: Return of Invest

t: Zeit

TS: Trockensubstanz

η: Wirkungsgrad

ZR: Ruckerrüben

η_{Gm}: Gasmotor Wirkungsgrad

P_{Gs}: Gasmotors - Sollleistung

V_{GR}: Gasraumvolumen

V_{NF}: Nutzbares Fermentervolumen

V_{SF}: Soll - Gesamtfermentervolumen

V_{SpT}: Substratvolumen pro Tag

m_{oTS}: Gesamttrockenmassevolumen

t_{Vz}: Verweilzeit des Substrates

ρ_{FB}: Faulraumbelastung

1 Aufgabenstellung

In der folgenden Arbeit soll die bestehende Biogasanlage Kreutzer GmbH in Vierkirchen-Esterhofen analysiert und optimiert werden. Durch strukturierte Untersuchung der jeweiligen Bestandteile und Funktionen sollen Optimierungspotentiale aufgezeigt werden. Auf deren Basis ist dem Anlagenbetreiber eine Empfehlung für Verbesserungen zu erstellen.

Im ersten Abschnitt soll der Ist-Zustand der Biogasanlage beschrieben und genauer analysiert werden. Es gilt die jeweiligen Bestandteile der Anlage aufzuführen und deren Funktion für die Biogasanlage zu erläutern. Mit Hilfe einer Stoffstromanalyse sollen die einzelnen Stationen des Substrates von der Lagerung über die Einspeisung in den Fermenter, dessen Umwandlung zu Gas und die Verarbeitung zu Strom und Wärme beschrieben werden. Dabei sollen vor allem Fragen zum Substratmanagement, der Gasproduktion und der Anlagenleistung geklärt werden. Durch den Einsatz von Messsystemen soll die Anlage nicht nur theoretisch betrachtet werden. Es gilt auch den tatsächlichen Zustand der Anlage darzustellen.

Mit Hilfe von Simulationssoftware ist die Biogasanlage nachzubilden und damit das theoretische Potential aufzuzeigen. In diesem Zusammenhang sollen die theoretischen Ergebnisse mit denen aus der praktischen Analyse verglichen werden.

Im weiteren Verlauf gilt es nun auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse Verbesserungspotentiale aufzuzeigen. Dies soll zum einen durch Anpassungen im Funktionsprozess geschehen. Zum anderen soll der Einsatz von effektiven Mikroorganismen in der Anlage im theoretischen Ansatz geprüft werden. Es gilt eine wirtschaftliche Betrachtung mit dem Ziel durchzuführen, am Ende den gleichen Gasertrag bei weniger Substrateintrag zu erhalten.

Es besteht das Interesse seitens des Landwirtes an einer Empfehlung für den Einsatz von Messsystemen. Daher soll eine Marktanalyse unter verschiedenen Herstellern durchgeführt werden. Im weiteren Verlauf sollen dann ein oder mehrere Angebote für Messsysteme eingeholt werden.

Abschließend ist eine Checkliste zu erstellen, welche universell auch auf andere Biogasanlagen angewandt werden kann. Die gewonnenen Erkenntnisse, Methoden und Empfehlungen zur Analyse und Verbesserung sollen darin Anwendung finden.

2 Ausgangssituation

Biogasanlagen haben in den letzten Jahren stark an Bedeutung zugenommen. Im Rahmen der zunehmenden Industrialisierung in der Landwirtschaft hat die Verarbeitung von Substraten zu Biogas, Strom und Wärme enormen Zuwachs errungen.

Alleine in den Jahren 2004 bis 2012 hat sich die Zahl an Biogasanlagen in Deutschland von ca. 2 000 auf über 7 500 erhöht. Die dabei durchschnittlich installierte Energiemenge stieg von ca. 125 kW auf ca. 445 kW an. Wird die installierte elektrische Leistung aller Biogasanlagen in Deutschland betrachtet, so lag diese im Jahr 2004 bei ca. 350 MWel und stieg im Jahr 2012 auf ca. 3 300 MWel. [1]

Diese Zahlen machen die enormen Zuwächse im Bereich der Biogasanlagen deutlich. Es wurden nicht nur mehr Anlagen installiert, sondern damit auch größere Leistungen erzielt. In den meisten Fällen handelt es sich bei den Biogasanlagen um Kraftwerke, welche das Gas in Blockheizkraftwerken in Strom umwandeln und diesen in das Versorgungsnetz einspeisen.

Der Anspruch an eine Biogasanlage liegt demnach nicht nur in einem störungsfreien Betrieb. Mehr noch soll die Anlage möglichst viel eingebrachtes Substrat effizient in Biogas umwandeln.

In den meisten Anlagen werden sogenannte Grund- und Cosubstrate zu Biogas vergoren. Bei Cosubstraten handelt es sich laut Definition um den Rohstoff für eine Vergärung, welcher jedoch nicht der Rohstoff mit dem prozentual größten Anteil am gesamten zu vergärenden Stoffstrom ist [2, p. 266]. Allerdings machen Cosubstrate wie Mais, Getreide oder Grassilage mittlerweile den größten Anteil der eingesetzten Substrate aus. Alleine im Jahr 2006 betrug in Deutschalnd der Anteil an Mais als Cosubstrat über 90 % [1]. Damit handelt es sich beim Grund- oder Basissubstrat überwiegend um Exkremente wie Gülle oder Mist [2, p. 256].

Gerade bei der Verwendung von Cosubstraten zur Gewinnung von Biogas liegt die Forderung ganz klar in einer möglichst effizienten und sparsamen Umwandlung von Substrat in Gas. Das Substrat soll mit möglichst geringem Aufwand in hochwertiges und verwertbares Gas umgewandelt werden.

3 Beschreibung der Biogasanlage

Die Biogasanlage Kreutzer GmbH ist Bestandteil eines Schweinemastbetriebes. Neben der Schweinemast wird auf den landwirtschaftlichen Nutzflächen neben Mais und Kartoffeln auch Getreideganzpflanzensilage (GPS) angebaut.

Die Schweinegülle wird wie Mais- und GPS zum Vergären der Biogasanlage zugefüttert.

Zu der Anlage gehören verschiedene Komponenten der Substratlagerung- und Einbringung sowie Substratvergärung. Im weiteren Verlauf werden in der Biogasanlage zwei Gasmotoren betrieben mit diesen sowohl Strom als auch Wärme als Energieträger produziert werden.

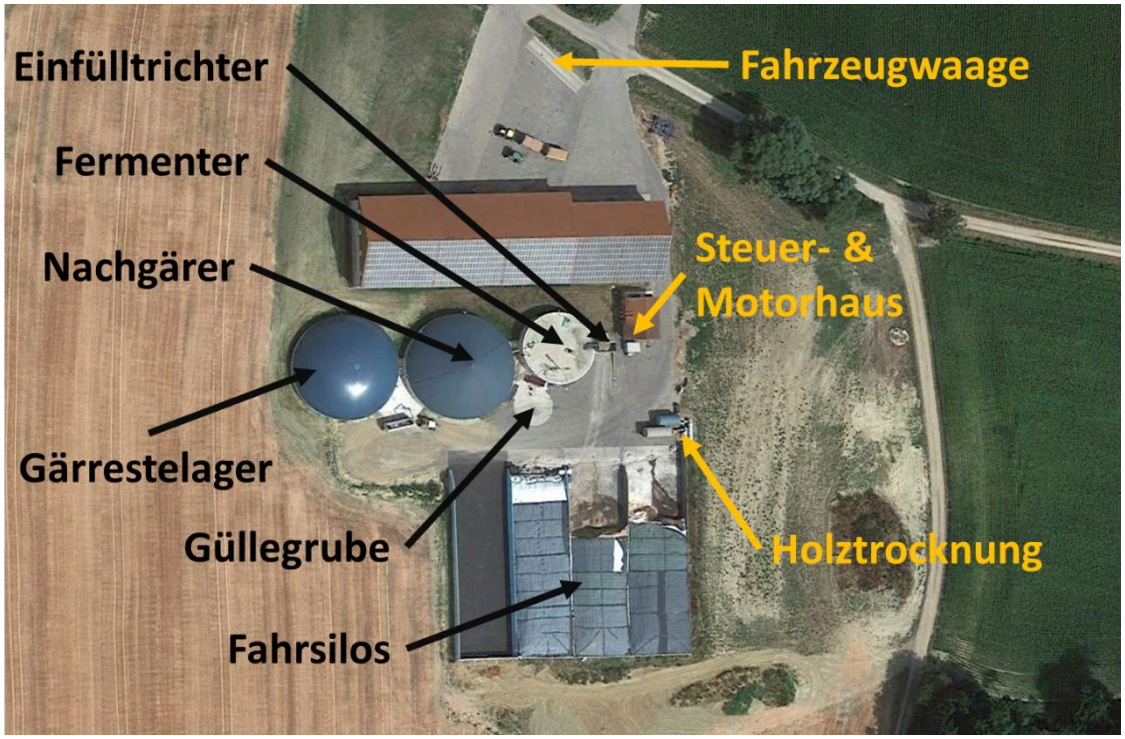

Abbildung 1: Biogasanlage von oben [3]

In den folgenden Kapiteln werden die jeweiligen Bestandteile der Biogasanlage technisch und funktionell beschrieben.

Das nachfolgende Blockschaltbild zeigt die anlagenrelevanten Bestandteile sowie die damit verbundenen Energie- und Massenströme, Volumen und Temperaturen soweit bekannt.

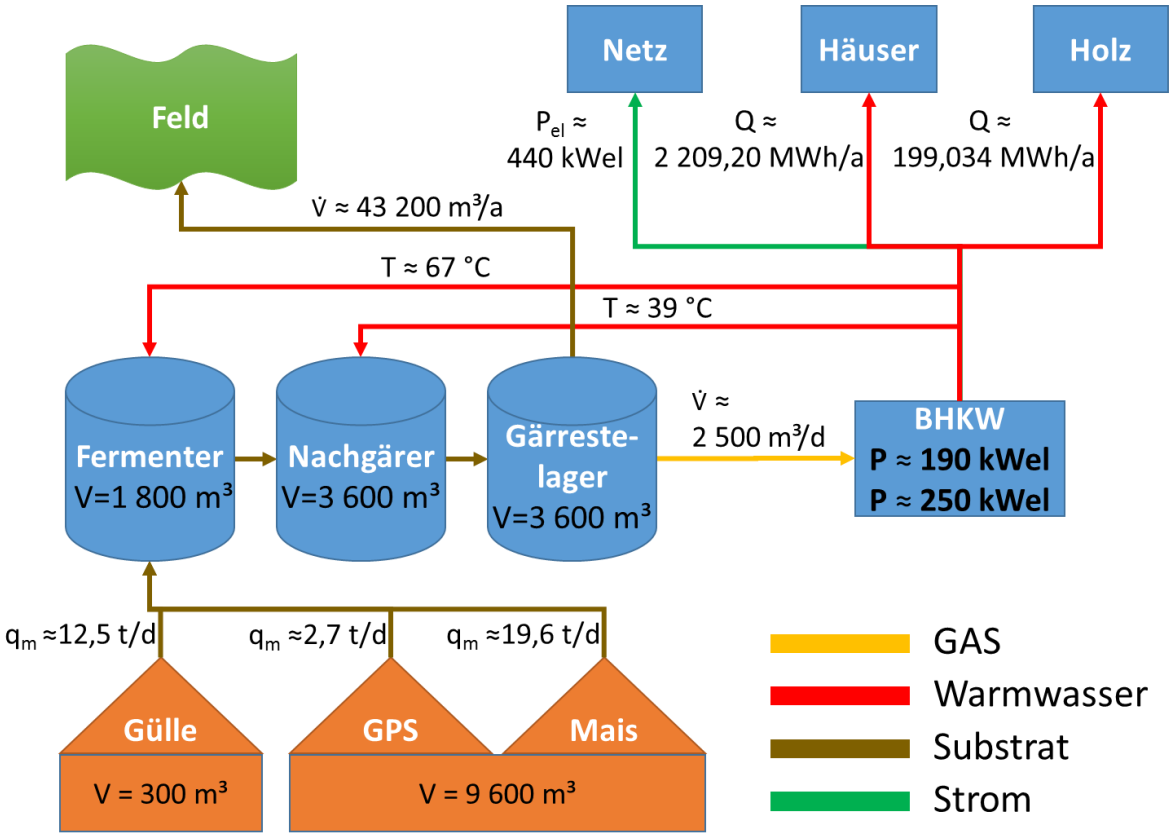

Abbildung 2: Blockschaltbild der Biogasanlage[1]

[1] Die Ermittlung der technischen Daten und Werte wird in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben. Bei den Substratmassenströmen handelt es sich um die am häufigsten vorkommenden Substrate im Jahr 2015. Die Wärmemengen für die Häuser und zur Holztrocknung spiegeln die Werte für das Jahr 2015 wider [12].

3.1 Fahrsilos

Die Fahrsilos der Biogasanlage bestehen aus jeweils vier Einzelkammern mit den Abmaßen 50 m Länge, 16 m Breite und 3 m Höhe. Damit besitzt jede der vier Einzelkammern ca. 2 400 m³ Volumen was einem Gesamtsilovolumen von ca. 9 600 m³ entspricht. Die Fahrsilos werden im Regelfall nicht exakt bis zur Oberkante der Seitenwände, sondern noch höher aufgefüllt. Damit steht ein Volumen von mehr als 10 000 m³ zur Verfügung

Abbildung 3: Fahrsilo mit je vier Kammern

Die Fahrsilos dienen der Speicherung von Mais- und Grassilage für die Sicherung des Ganzjahresbetriebs der Anlage. Sie können mit einem oder mehreren Traktoren bzw. Radladern befahren werden. Sie befinden sich in unmittelbarer Nähe zum Fermenter. Alle vier Fahrsilos haben also eine durchschnittliche Entfernung zum Fermenter von ca. 30 m.

3.3 Güllegrube

In der Güllegrube wird die Gülle vom Schweinemastbetrieb zwischen- bzw. vorgelagert. Sie hat ein Volumen von 300 m³ und befindet sich ebenfalls in unmittelbarer Nähe zwischen dem Fahrsilo und dem Fermenter. Die Grube ist in den Boden eingelassen und dabei lediglich durch eine kreisrunde Bodenplatte sowie einer kleinen Bodenöffnung erkennbar. Sie ist dem Fermenter vorgeschaltet und mit diesem durch eine Rohrleitung verbunden.

Abbildung 4: Güllegrube mit Nachgärer im Hintergrund

Die Beschickung der Güllegrube erfolgt manuell durch den Traktor direkt vom Stall oder von umliegenden Bauernhöfen. Es existiert daher kein unterirdisches Fördersystem zur Güllegrube. Die Lieferungen durch die umliegenden Höfe machen etwa die Hälfte der Gesamtgüllemengen aus.

Um ein Verklumpen der Substrate zu verhindern, kann die Gülle mittels eines Rührpropellers zerkleinert werden.

Bei der Fütterung des Fermenters entstehen Temperaturschwankungen. Diese werden durch die Zugabe von kühlem zu bereits erwärmtem Substrat hervorgerufen. Um diese Schwankungen möglichst gering zu halten wird der Pumpvorgang zwar möglichst kurz, dafür jedoch kontinuierlich über den Tag verteilt durchgeführt. [4, p. 45]

3.5 Fermenter

Der Fermenter ist die erste Einheit der Anlage in welcher Biogas entsteht welches auch zur weiteren Nutzung verwendet werden kann. In ihn gelangen sämtliche Substrate und werden unter anaeroben Bedingungen, das heißt ohne Zufuhr von Sauerstoff, abgebaut.

Bei der hier eingesetzten Fermenterbauart handelt es sich um einen stehenden Fermenter mit rundem Querschnitt welcher nach dem Durchflussverfahren arbeitet. Das Gesamtvolumen des Fermenters beträgt 1 800 m³. Der Gasraum hat in etwa ein Volumen von 146 m³. Daraus folgt das Faulraumvolumen von 1 654 m³.

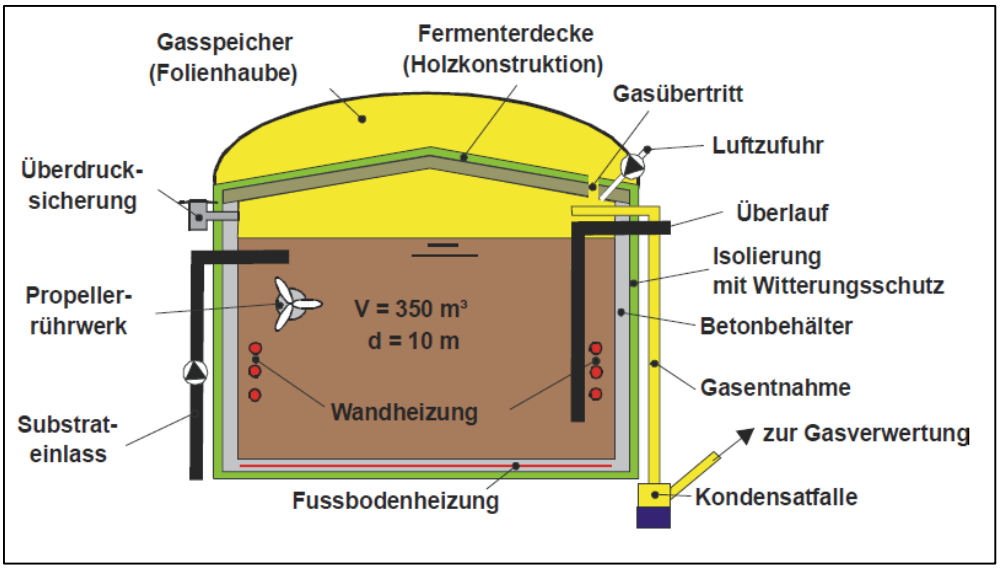

Abbildung 5: Schematische Darstellung eines stehenden Betonfermenters [4, p. 41]

Der Fermenter arbeitet im einstufigen Betrieb. Dabei finden alle Phasen des anaeroben Abbaus von der Hydrolyse bis zur Methanogenese innerhalb des Fermenters statt [4, p. 38].

Das Durchflussverfahren zeichnet sich durch einen kontinuierlichen Substratfluss und eine gleichmäßige Gasproduktion aus. Die Verweilzeiten des Substrates sind zwar nicht gesichert, es herrscht jedoch eine hohe Faulraumeffizienz vor. [4, p. 39]

Abbildung 6: Fermenter mit Beschickungseinheit

Für diesen Gärprozess sind bestimmte Mikroorganismen, hauptsächlich jedoch Bakterien verantwortlich. Ihnen dient das eingebrachte Substrat als Nahrungsgrundlage.

Da die Bakterien sehr sensibel auf Veränderungen reagieren ist eines der obersten Ziele für den Biogasprozess, eine konstante und homogene Umgebungsbedingung für sie zu schaffen.

Der Arbeitsbereich der Bakterienstämme gliedert sich in drei verschiedene Temperaturbereiche auf. Bakterienstämme, welche unter 25 °C existieren werden im sogenannten psychrophilen Bereich betrieben. Der Bereich zwischen 25 °C und 45 °C wird als mesophil bezeichnet. Es können auch Temperaturen über 45 °C gefahren werden. Dies wird dann als thermophil bezeichnet. [5, p. 24]

Der Fermenter der Biogasanlage Kreutzer GmbH hat ein Gesamtvolumen von 1 800m³ und wird mit einer durchschnittlichen Temperatur von 41 °C[2] betrieben. Daher wird der Fermenter im oberen mesophilen Temperaturbereich betrieben.

Auf die Vor- und Nachteile der jeweiligen Temperaturbereiche wird im Abschnitt der Optimierungsmaßnahmen noch näher eingegangen.

---

[2] Quelle: Anlagensteuerung Simatik im April 2015

Der Fermenter ist mit zwei Rührwerken ausgestattet. Diese werden in zeitlich konstanten Abständen betrieben und mischen das Substrat im Fermenter durch, damit das frisch zugegebene Material mit Bakterien versorgt werden kann und eine gleichmäßige Temperaturverteilung erreicht wird. Zudem wird durch das Rühren die Bildung von Schwimm- und Sinkschichten verhindert. Auch wirkt sich die Vermischung positiv auf den Stoffwechsel der Bakterien aus, da Gasblasen ausgetrieben und frische Nährstoffe herangeführt werden. [4, p. 54]

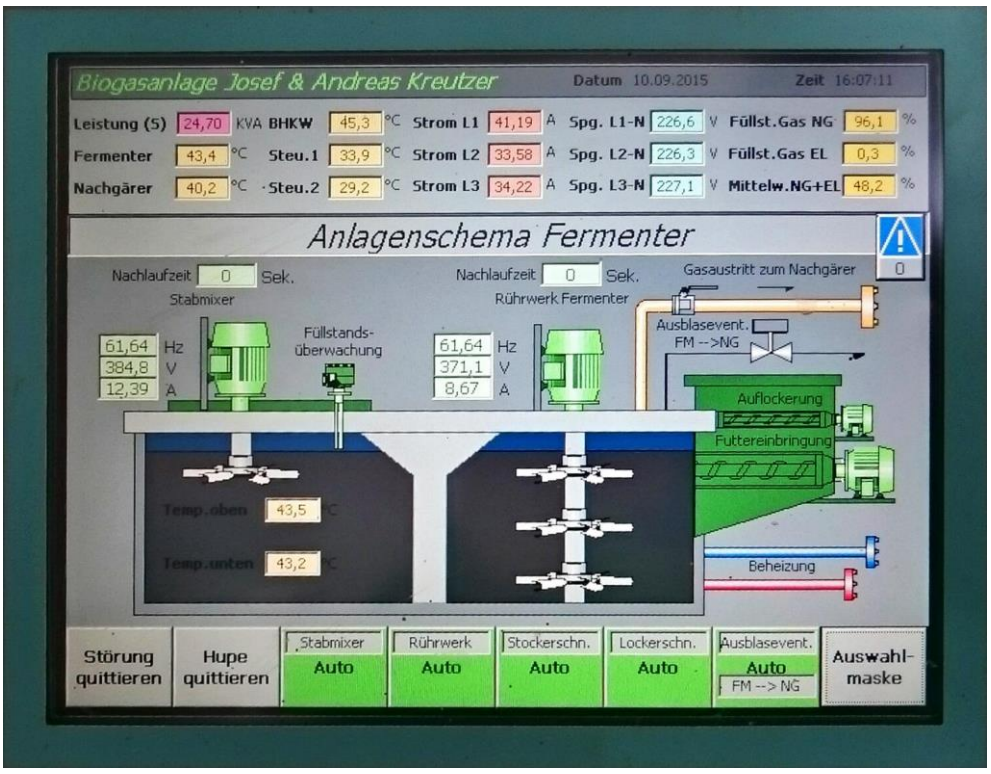

Abbildung 7: Anlagenschema Fermenter [6]

3.6 Einfülltrichter mit Dosiereinrichtung

Direkt am Fermenter ist der Vorratsbunker angebracht. Außer der Gülle gelangt über ihn auch das Substrat in den Fermenter. Dabei ist der Einfülltrichter etwas höher als der Fermenter selbst angebracht und fördert mittels einer Förderschnecke das Substrat.

Bei dieser Schnecke handelt es sich um ein Fördersystem welches auf dem Funktionsprinzip der archimedischen Schraube beruht. Dabei bildet das fördernde Element ein zur Schraubenlinie geformtes Flachmetall, die Schneckenwendel. Diese rotiert um die Längsachse und transportiert das Substrat in einem ruhenden Rohr in axialer Richtung, welches gleichzeitig als Tragorgan dient. [7]

Der Vorratsbunker ist auf einer kleinen Anhöhe gebaut und mit der Schaufel des Traktors oder Radladers zu erreichen.

Abbildung 8: Vorratsbehälter auf Anhöhe

3.7 Nachgärer

Direkt neben dem Fermenter befindet sich der Nachgärer. Aus dem Fermenter gelangt das zum Teil schon vergorene Substrat in den Nachgärer. Ziel ist es dabei, dass schwer abbaubare Substanzen weiter umgesetzt werden können.

Abbildung 9: Nachgärer mit Gasspeicher

Der Nachgärer hat ein Volumen von 3 600m³ und wird mit einer durchschnittlichen Temperatur von 41°C[3] betrieben.

Auf dem Nachgärer befindet sich ein Gassack mit einem Gesamtvolumen von ca. 1 100m³. Das entstandene Biogas aus dem Fermenter und dem Nachgärer sammelt sich im Gassack. Da im Regelfall der Gasverbrauch der Motoren nicht mit der Gasproduktion der Anlage übereinstimmt dient der Gassack quasi als Pufferspeicher.

Sowohl der Fermenter als auch der Nachgärer werden aktiv mit Wärme versorgt um das notwendige Temperaturniveau aufrechterhalten zu können. Die Heizung erfolgt über die Abwärme der Gasmotoren. Dabei führt je eine Zu- und Ableitung als Vor- und Rücklauf von den Gasmotoren in den Fermenter und in den Nachgärer.

[3] Quelle: Anlagensteuerung Simatik im April 2015

3.8 Gärrestelager

Als dritte und letzte Einheit gelangt das Substrat vom Nachgärer in das Gärrestelager. Dieses hat ein Volumen von 3 600 m³ und wird im Gegensatz zum Fermenter und Nachgärer nicht mehr aktiv beheizt.

Auf dem Gärrestelager befindet sich ebenfalls ein Gassack mit 1 400 m³ Volumen. Dieser dient als Pufferorgan zwischen der Gaserzeugung und der Verwertung [4, p. 68].

Abbildung 10: Gärrestelager mit Gassack und Abpumpvorrichtung

Die Lagerdauer im Gärrestelager beträgt in etwa vier bis fünf Monate. Danach kann das vergorene Substrat abgepumpt und auf das Feld als Dünger aufgebracht werden.

3.10 Verwendete Substrate

In der Biogasanlage werden hauptsächlich nachwachsende Rohstoffe (NawaRo) und Grundsubstrate eingesetzt. Zu den NawaRo gehören die Maissilage und die Getreideganzpflanzensilage (GPS). Als Grundsubstrat wird hauptsächlich Gülle und vereinzelt auch Rindermist gefüttert.

Die nachfolgende Tabelle zeigt die Mengen sämtlicher eingesetzter Substrate in die Biogasanlage für das Jahr 2015.

Tabelle 1: Aufstellung der Substratmengen für das Jahr 2015 [8]

Monat	Gülle [t]	Mais [t]	GPS [t]	Kartoffel [t]	CCM [t]	ZR [t]
Januar	419	546	84	161	0	0
Februar	378	493	76	146	0	0
März	390	604	84	10	0	0
April	374	584	81	0	0	0
Mai	354	464	84	0	72	0
Juni	330	408	81	0	90	0
Juli	341	519	19	0	74	0
August	368	659	0	0	1	0
September	360	645	0	0	0	0
Oktober	393	731	0	0	0	0
November	371	681	0	0	0	0
Dezember	372	628	0	0	0	53
Summe	**4448**	**6959**	**508**	**317**	**237**	**53**

3.10.1 Beschreibung der Substrate

Den größten Anteil an Substrat stellt im Regelfall die Maissilage dar. Es wird zudem am häufigsten in Biogasanlagen eingesetzt. Aufgrund der hohen Energieerträge je Hektar sowie der guten Vergärung eignet es sich besonders gut für die Verwendung in Biogasanlagen. Allerdings sind die Ernteerträge stark von den Standort- und Umweltbedingungen abhängig. Der Ertrag liegt durchschnittlich bei 45 Tonnen Frischmasse pro Hektar. Für die Ernte wird die ganze Maispflanze gehäckselt und im Fahrsilo eingelagert. Der Trockensubstratgehalt sollte dabei zwischen 28 % TS und 36 % TS liegen. Bei einem niedrigeren TS-Gehalt als 28 % TS muss mit erheblichem Sickerwasseraustritt gerechnet werden. Dieser geht einher mit großen

Energieverlusten. Sollte der TS-Gehalt jedoch größer als die 36 % TS sein, ist mit einem höheren Ligninanteil zu rechnen, was wiederum die Abbaubarkeit negativ beeinflusst. Des Weiteren kann die Silage nicht mehr optimal verdichtet werden, was somit die Silierqualität und Lagerstabilität negativ beeinflusst. [2, p. 77]

Zusätzlich zur Ganzpflanzennutzung als Silomais hat auch die ausschließliche Kolbennutzung in der Praxis eine Bedeutung. Der sogenannte Corn-Cob-Mix (CCM) und Körnermais sind gängige Varianten, welche durch andere Ernteverfahren- und Zeitpunkte gewonnen werden. Die Energiedichte dieser Substrate ist gegenüber der Maissilage deutlich erhöht. Durch den Verbleib der Restpflanze auf dem Feld fallen jedoch die flächenbezogenen Energieerträge geringer aus. [2, p. 77]

Als GPS wird Triticale eingesetzt. Dabei handelt es sich um eine Getreideart, welche aus den Gattungen Triticum (Weizen) und Secale (Roggen) entstanden ist. Ziel dieser Züchtung war die Kombination aus der hohen Leistungsfähigkeit des Weizens sowie der Anspruchslosigkeit des Roggens. Allerdings ist die Triticale weniger genügsam als der Roggen. Dies zeigt sich unter anderem am höheren Transpirationskoeffizienten. Die Winterfestigkeit liegt nur auf dem Niveau von Weizen, wodurch flache und späte Saaten auswinterungsgefährdet sind. [9, p. 104]

Als Grundsubstrat wird auf der Biogasanlage Flüssigmist eingesetzt. Es kommt hauptsächlich Schweinegülle zum Einsatz. Allerdings wird in geringen Konzentrationen auch Rindergülle eingesetzt. Aufgrund seiner Zusammensetzung stabilisiert die Gülle den Fermentationsprozess und gleicht Schwankungen in der Qualität des Gärsubstrates aus. Die Ausbeute an Methan ist stark vom Tierleistungsniveau und von der Fütterungsintensität abhängig. Allerdings werden die höchsten Methanausbeuten bei mittlerer Tierleistung und bei ausgeglichener Fütterung erreicht. [4, p. 19]

Neben den genannten Substraten werden in geringen Mengen auch Zuckerrüben und Kartoffeln der Biogasanlage zugegeben.

Bei Kartoffeln wird von Reststoffen aus der Landwirtschaft gesprochen, da sie als Stoffe aus der Pflanzenproduktion resultieren. Wegen des hohen Kohlenstoffanteils sowie ihrer hohen Verdaulichkeit sind diese Reststoffe der Pflanzenproduktion gut als Cosubstrate geeignet. [4, p. 20]

Der Anbau von Zuckerrüben stellt spezielle Ansprüche an Boden und Klima. Für hohe Erträge benötigt die Zuckerrübe ein eher mildes Klima und tiefgründige humose Böden. Bei der Zugabe in den Fermenter muss darauf geachtet werden, dass die Rübe von anhaftender Erde befreit wird. Da diese sich sonst im Fermenter am Boden absetzt und den Gärraum verkleinert. [2, p. 78]

3.10.2 Eigenschaften der eingesetzten Substrate

Substrate haben unterschiedliche Eigenschaften welche sie voneinander differenzieren. Durch die Kenntnis dieser Eigenschaften ist es möglich die theoretischen Potentiale, welche sich aus der Verwendung der Substrate ergeben zu errechnen.

Die Substrate haben im Regelfall einen nicht unerheblichen Feuchtanteil. Dieser Anteil ist für die Vergärung jedoch ungeeignet. Aus diesem Grund bezeichnet der Trockensubstanzanteil (TS) den um den Wasseranteil verringerten Anteil des Substrates. Der organische Trockensubstanzanteil (oTS) wiederum ist der um den Wasser- und anorganischen Substanzanteil reduzierte Anteil des TS. Beide werden prozentual dargestellt. [2, p. 266]

In Laborversuchen lassen sich weiterhin die Biogas- und Methanerträge ermitteln. Sie dienen ebenfalls als Vergleichsgrundlage für die Eigenschaften verschiedener Substrate.

Im Anhang ist die Tabelle 16 mit Substraten und deren Eigenschaften dargestellt. Hierbei handelt es sich jedoch nicht um gemessene Werte aus den tatsächlichen analysierten Substraten. Es ist vielmehr eine Auflistung von Literaturwerten, mit welchen im weiteren Verlauf auch die Berechnungen durchgeführt werden.

3.11 Gaszusammensetzung

Im nun folgenden Kapitel soll die Gaszusammensetzung von Biogas erläutert werden. Es geht hierbei um die allgemeine Beschreibung der Komponenten in Form einer Vorstellung. Auf die Gaszusammensetzung wie sie durch die Gasanalyse ermittelt werden kann, wird im Kapitel der Anlagenanalyse näher eingegangen.

Für die Beurteilung von Sachverhalten ist die Kenntnis über die Biogaszusammensetzung in vielen Fällen von Vorteil. Die einzelnen Komponenten und welche Bedeutung sie für den Prozess haben wird im Folgenden erläutert. [2, p. 88]

3.11.1 Methan

Methan ist der Bestandteil im Biogas, welcher für die Verbrennung in den Motoren verantwortlich ist. Es dient zudem der Bewertung des Zustandes der methanogenen Biozönose. Es ist dabei möglich über die Gasproduktionsrate auch die Methanproduktionsrate zu errechnen. Sollte trotz konstanter Beschickung die Methanproduktionsrate absinken, so könnte die Ursache eine Hemmung der methanogenen Archaeen sein. Die Konzentration von Methan im Biogas sollte mindestens 45 Vol.-% [9, p. 911] ausmachen.

3.11.2 Kohlenstoffdioxid

In der Phase der Hydrolyse bzw. Säurebildung und der Methanbildung wird Kohlendioxid gebildet. Es ist wasserlöslich und bildet zudem den Hydrogencarbonatpuffer. Sollte das Methan/Kohlendioxidverhältnis im Biogas sinken und gleichzeitig die Substratzusammensetzung nicht geändert worden sein, so könnte dies auf eine verstärkte Säurebildung gegenüber der Methanbildung beruhen. Daraus resultiert eine Gleichgewichtsstörung der Massenströme im Abbauprozess. Sowohl Schwankungen in der Inputmenge als auch eine Hemmung der methanogenen Population könnte die Ursache dafür sein. Der Anteil von Kohlenstoffdioxid im Biogas liegt üblicherweise zwischen 25 bis 55 Vol.-% [9, p. 911].

3.11.3 Sauerstoff

Im Biogas sollte Sauerstoff nur unter bestimmten Bedingungen nachweisbar sein, nämlich wenn er zur biologischen Entschwefelung hinzugesetzt wird. Die Messung des

Sauerstoffs dient dann zur Einstellung seines Gehaltes zur Entschwefelung. Generell sollte der Anteil am Biogas unter drei Vol.-% [9, p. 911] liegen.

3.11.4 Schwefelwasserstoff

Die Oxidationsprodukte von Schwefelwasserstoff weisen starke korrosive Eigenschaften auf. Aus diesem Grund geben die Hersteller von BHKW Grenzwerte für die Konzentration an Schwefelwasserstoff an. Daher dient die Messung vorrangig zum Schutz des BHKW. Erst ab einer Schwefelwasserstoffkonzentration im Prozentbereich (ca. 20000 ppm) kommt es zu einer Beeinflussung der methanogenen Archaeen.

3.11.5 Wasserstoff

Wasserstoff wird vorrangig in der Säure- und Essigsäurebildung freigesetzt, bevor er zu Methan umgewandelt wird. Bei einigen Versuchen wurde die Wasserstoffkonzentration zur Detektierung von Prozessstörungen untersucht. Hierbei ist zu beachten, dass die Verwendung und Verwertung von Wasserstoff zu Methan sowie die Essigsäurebildung aus höherkettigen Fettsäuren theoretisch nur in einem engen Konzentrationsbereich gemeinsam ablaufen kann. Da die Zuordnung der Wasserstoffkonzentration im Biogas mit der Störung nicht immer eindeutig gelingt, ist dieser Parameter als Störindikator jedoch umstritten. Der Anteil von Wasserstoff am Biogas sollte unterhalb von einem Vol.-% [9, p. 911] liegen.

3.11.6 Stichprobenartige Gasmessung

Im April 2015 wurde mit stichprobenartigen Messungen der Gaszusammensetzung begonnen. Diese Messungen erfolgen mit einem mobilen Messgerät. Eine stationäre Messanlage ist nicht vorhanden.

Tabelle 2: Stichprobenergebnisse der Gaszusammensetzungsmessung [10]

Datum	CH_4 [%]	O_2 [%]	H_2S [ppm]
30.04.2015	51,6	0,2	130
12.06.2015	51,4	0,2	138
14.07.2015	51,9	0,1	110

3.12 Motorhaus mit Blockheizkraftwerk

3.12.1 Generelle Beschreibung

Im Motorhaus befindet sich das Blockheizkraftwerk welches sowohl aus dem Verbrennungsmotor als auch aus dem darauf abgestimmten Generator besteht. Zudem existiert ein Wärmeübertragungssystem welches der Rückgewinnung der Wärmeenergie aus Abgas, Kühlwasser- und Schmierölkreislauf dient. [2, p. 128]

Bei den eingesetzten Motoren handelt es sich um speziell für den Gasbetrieb entwickelte Gas-Otto-Motoren. Zur Minimierung der Stickoxidemissionen werden die Motoren als Magermotoren mit hohem Luftüberschuss betrieben. In dieser Betriebsart kann weniger Brennstoff im Motor umgesetzt werden. Dies führt zu einer Leistungsminderung im Motor. Dieses Defizit wird wiederum mittels Abgasturboaufladung ausgeglichen. Um den Betrieb der Motoren aufrechterhalten zu können, muss im Biogas ein Methangehalt von mindestens 45 % erreicht werden. [2, p. 128]

3.12.2 Beschreibung der beiden MAN Motoren

Im Motorhaus befinden sich zwei MAN Viertakt-Otto-Gasmotoren mit je 190 kW und 250 kW.

Abbildung 11: Gasmotor 6 Zylinder

Die Motoren unterscheiden sich nur in der Anordnung sowie der Anzahl der Zylinder voneinander. Während sich beim 190 kW Motor 6 Zylinder in Reihe befinden, hat der 250 kW Motor eine V-Anordnung mit 8 Zylindern. Beide Motoren haben eine Abgasturboaufladung mit wassergekühltem Turbinengehäuse sowie druckölgeschmierten Lagern und wassergekühltem Lagerstuhl. Die Gemischkühlung erfolgt zweistufig mit Hoch- und Niedertemperaturkreis. Allerdings ist keine Gemischwasserpumpe vorhanden. Die Kühlwasserumläufe sind daher durch externe Kühlwasserpumpen mit Gemischtemperaturregelung auf 50 °C auszuführen. Ebenso ist keine Motorwasserpumpe vorhanden. Dieser Kühlwasserumlauf ist ebenfalls durch eine externe Wasserpumpe mit Temperaturregelung auszuführen. Die Schmierung erfolgt bei beiden Motoren durch eine Zahnradpumpe wobei die Schmierölkühler im Kühlmittelkreislauf der Motoren eingebunden sind. Beide Motoren sind mit speziellen Zündkerzen für Industriegasmotoren ausgestattet.

Abbildung 12: Gasmotor 8 Zylinder

Die beiden Gasmotoren speisen den erzeugten Strom direkt in das Versorgungsnetz ein. Der Netzbetreiber hat die Möglichkeit die Motoren nach eigenem Ermessen zu drosseln oder hochzufahren.

Die Wärmeversorgung der Biogasanlage erfolgt ebenfalls aus dem Kühlkreislauf der Gasmotoren.

Hinsichtlich der Qualität muss das Biogas für die Verbrennung im BHKW gewisse Anforderungen erfüllen. Diese sind in der Tabelle 17 im Anhang aufgeführt. Meistens können diese Mindestanforderungen eingehalten werden. Damit die Lebensdauer des BHKW nicht verkürzt wird, sollte der Schwefelwasserstoffgehalt im Biogas die Werte zwischen 150 bis 200 ppm nicht überschreiten. [4, p. 72]

3.13 Heizung

3.13.1 Auswirkungen der Temperatur auf die Biogasanlage

Mit steigenden Temperaturen erhöht sich gleichzeitig die Reaktionsgeschwindigkeit. Allerdings weisen biologische Prozesse hinsichtlich ihrer Temperatur Bestwerte auf, da bei steigenden Temperaturen organische Strukturen instabil werden können und ihre Funktionalität verlieren. Im Wesentlichen werden für die technische Anwendung zwei Temperaturbereiche für anaerobe Prozesse unterschieden. Dies ist, wie im Abschnitt zum Fermenter bereits erwähnt, der mesophile Bereich zwischen ca. 37 °C und 43 °C sowie der thermophile Bereich zwischen ca. 50 °C und 60 °C. [2, p. 88]

Bei der anaeroben Fermentation entsteht, bis auf wenige Ausnahmen kaum Wärme. Daher muss das Substrat auf die Gärtemperatur aufgeheizt werden. Dabei muss die Temperatur konstant gehalten werden. [2, p. 88]

3.13.2 Das Heizsystem der Biogasanlage

Um das Substrat im Fermenter und im Nachgärer auf der geforderten mesophilen Temperatur halten zu können, bedarf es einer kontinuierlichen Erwärmung. Durch die Abwärme der Motoren steht zur Heizung der Behälter ausreichend Leistung zur Verfügung.

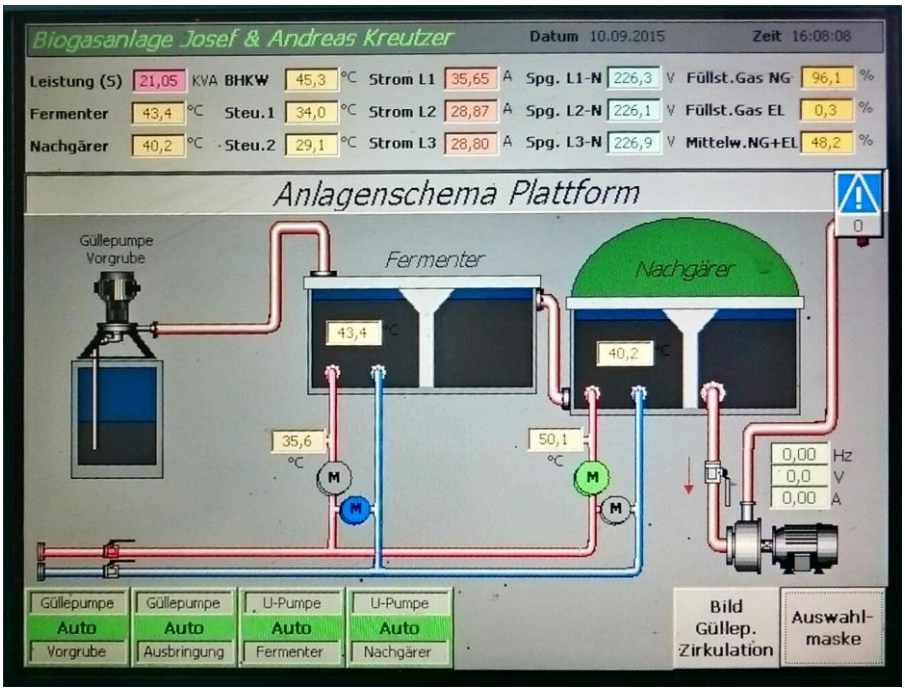

Abbildung 13: Heizungsschema Fermenter & Nachgärer [11]

Das Heizsystem hängt dabei direkt am Wärmeübertragungssystem im Blockheizkraftwerk. Sowohl der Fermenter, als auch der Nachgärer sind mit einer Vorlauf- und Rücklaufleitung verbunden. Die Vorlauftemperatur zum Fermenter beträgt ca. 39 °C wohingegen die zum Nachgärer ca. 68 °C beträgt.

Abbildung 14: Heizungsvor- und Rücklaufrohre mit Umwälzpumpen

Der Wärmebedarf von Fermenter und Nachgärer wird nicht durch Messgeräte erfasst. Daher kann er nur angenommen werden. Je Kubikmeter [m³] Faulraum werden für die Prozessenergie, das heißt zum Aufheizen und Wärmeverlustausgleich durchschnittlich ca. 350 kWh/a [5, p. 182] benötigt.

Bei einem Gesamtfaulraumvolumen des Fermenter und Nachgärer von insgesamt 5 245 m³ ergibt sich daher ein Wärmebedarf von 1 835,75 MWh pro Jahr.

3.14 Steuerungsraum

Der Steuerungsraum bildet gewissermaßen den Mittelpunkt der Biogasanlage. In ihm sind sämtliche Rechner und Steuerungsanlagen der Biogasanlage platziert. Mittels Touchscreen können die beiden Motorrechner und die Steuerung der Biogasanlage bedient werden. Das Display ist druckempfindlich ausgelegt. Das heißt es kann sowohl mit dem Finger, als auch mit einem dafür vorgesehenen Eingabestift bedient werden.

3.14.1 Steuerung der beiden Motoren

Die zwei Motoren sind mit dem gleichen Bedienkonzept ausgestattet. Das Bediensystem ist in verschiedene Kapitel aufgeteilt. Auf der Startseite befindet sich ein Überblick über alle relevanten Kennwerte wie die verbleibende Zeit bis zur nächsten Wartung, der Ladedruck oder Kühlwassertemperaturen. Letztere ist gleichzeitig in Einlauf- und Auslauftemperatur unterteilt. Sowohl die elektrische Leistung als auch die Sollleistung werden ebenfalls auf der Startseite angezeigt.

Als weitere Kapitel sind die Gasverwaltung und der Generator hervorzuheben in denen die jeweils relevanten Daten für die Gassäcke und den Generatorbetrieb abgefragt werden können.

Im Kapitel Meldungen werden Warnungs- und Fehlermeldungen erfasst. Diese werden über einen mehrwöchigen Zeitraum gespeichert.

3.14.2 Steuerung der Biogasanlage

Die Biogasanlage wird über ein Siemens Simatik System gesteuert. Dabei sind sämtliche Anlagenbestandteile als Grafik in verschiedenen Verzeichnissen hinterlegt. So wird zum Beispiel der Fermenter und der Nachgärer auf einer Seite gezeigt, während diese mit Warmwasservor- und Rücklaufleitungen dargestellt sind. Wie bei der Motorsteuerung sind den jeweiligen Komponenten Echtzeitwerte wie Temperatur oder Spannungsdaten hinterlegt.

In einem weiteren Kapitel ist ein Soll- und Istwert Vergleich dargestellt. Diese werden für die Temperaturen im Fermenter und dem Nachgärer sowie den Drehzahlen der Rührwerke und noch weiterer Komponenten aufgestellt.

Im Kapitel der Steuerzeiten sind alle relevanten zeitabhängigen Eingaben möglich. Hier können beispielsweise die Einfütterungszeiten und die Laufzeiten der Rührwerke

eingegeben und festgelegt werden. Auch hier wird wieder zwischen Sollzeiten und aktuell verbleibenden Zeiten unterschieden.

Ein weiteres Kapitel befasst sich mit Trendaufzeichnungen der verschiedenen Parameter. Hierbei muss jedoch angemerkt werden, dass diese Trends nur über einen bestimmten Zeitraum erfasst werden. Obwohl das Steuerungssystem über eine USB-Schnittstelle verfügt, können diese Daten nicht aktiv auf einem Datenträger abgespeichert werden.

Das Grenz- und Alarmwertekapitel befasst sich, wie der Name vermuten lässt mit anlagenrelevanten Grenzwerten welche bei Unter- oder Überschreitung zur Alarmierung führen.

3.15 Holztrocknung, Wärmeleitung Hof und Häuser

Die Trocknung von Holz sowie die Wärmeleitung zu den Häusern ist kein Bestandteil des Biogasprozesses. Da die Abwärme der Gasmotoren gerade für diese Anwendungen genutzt werden kann, sollen auch diese Bestandteile kurz Erwähnung finden.

3.15.1 Warmwasser für Hof und Häuser

Die Gasmotoren versorgen in erster Line den Fermenter sowie den Nachgärer mit Wärmeenergie. Es bleibt jedoch noch mehr an Wärmeleistung übrig, so dass das Wohnanwesen des Bauernhofes, sowie die Stallungen mit Wärmeenergie versorgt werden können. Des Weiteren werden zwei umliegende Häuser ebenfalls mit der Abwärme der Gasmotoren versorgt.

Dies geschieht ähnlich einer Fernwärmeheizung. Das Vorlaufwasser wird mit erhöhter Temperatur in die Häuser gepumpt, gibt seine Wärme an die Speise- und Heizwasserkreisläufe ab und läuft mit verringerter Rücklauftemperatur wieder zu den Gasmotoren zurück.

Die Häuser werden auf diese Weise mit Heizleistung versorgt und bieten dem Landwirt eine weitere Einnahmequelle. Es besteht jedoch immer wieder die Gefahr, dass die Biogasanlage ausfallen könnte. Danach wäre eine Versorgung der Nachbarhäuser nicht mehr möglich. Aus diesem Grund sind die Häuser zusätzlich noch mit einer konventionellen Heizung aus fossilen Brennstoffen ausgestattet.

Die abgegebenen Wärmemengen für die Gebäude werden über Wärmezähler erfasst. In der nachfolgenden Tabelle sind die Wärmemengen für das Jahr 2015 aufgeführt.

Tabelle 3: Wärmemengen an die Gebäude 2015 [12]

Gebäude / Bedarf	Wärme [MWh]
Wohngebäude	63,956
Aufenthaltsraum & Werkstatt	50,685
Kartoffelhalle	24,698
Wohngabäude Nachbar	46,288
Wohngebäude Nachbar	13,407
Summe	**199,034**

3.15.3 Holztrocknung

Eine weitere Verarbeitung der übrigen Wärmemenge geschieht über die Trocknung von Holz. Ähnlich der Fernwärmeleitung zu den Häusern wird hierbei ein Wärmetauscher mit dem heißen Vorlaufwasser der Biogasmotoren versorgt. Über mehrere große Lüfter wird im Wärmetauscher Warmluft erzeugt. Diese Warmluft wird wiederum in zwei Transportanhänger geblasen. Diese Anhänger sind mit Scheitholz befüllt, welches auf diese Art getrocknet wird. Die Anhänger sind mit Planen nach oben hin abgedeckt, wobei jedoch die Warmluft durch Öffnungen an der Seite in die Atmosphäre entweichen kann.

Abbildung 15: Holzanhänger

Dieses Verfahren ist auf Biogasanlagen durchaus üblich. Hierbei wird sich der Wärmebonus aus dem erneuerbaren Energiegesetz zunutze gemacht.

Wie bei den Gebäuden wird auch die Wärmemenge für die Holztrocknung über einen Wärmezähler erfasst. Im Jahr 2015 wurden insgesamt 2 209,20 MWh [12] an Wärmeenergie zur Holztrocknung abgegeben.

4 Analyse der Biogasanlage

4.1 Stoffstromanalyse

Zunächst werden die vorherrschenden Stoff- und Materialströme der Biogasanlage analysiert.

Anhand der Stoffstromanalyse können systematisch Stoff- und Materialströme, welche mit unterschiedlichen Produkten und Verfahren miteinander verbunden sind untersucht werden. [13]

Dabei ist es sinnvoll einen geeigneten Rahmen für die Stoffströme abzustecken.

Um die Grenzen der Stoffströme übersichtlich zu gestalten, wird als Ausgang der Lagerbestand des Substrates und als Abschluss der Endverbraucher der Biogasanlage gewählt.

Die Biogasanlage wird wie in dem vorherigen Kapitel mit verschiedenen Substraten betrieben. Obwohl es sich um eine Anlage in Anlehnung an einen Schweinemastbetrieb handelt, kommt jedoch als Hauptsubstrat Maissilage zur Anwendung.

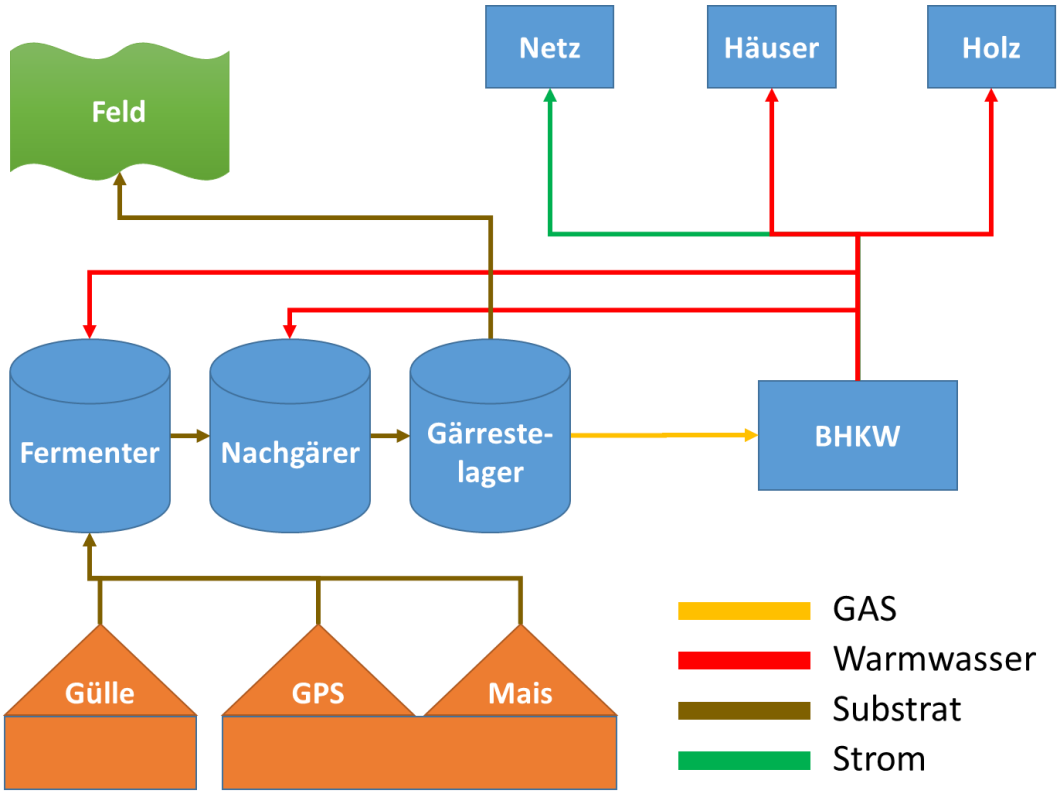

Abbildung 16: Stoffstromanalyse

Die Biogasanlage liefert drei Endprodukte. Dazu gehören elektrischer Strom aus den Generatoren und die Abwärme aus den dazugehörigen Gasmotoren. Des Weiteren ist der Gärrest zu nennen, welcher nach der Vergärung der Substrate entsteht.

Die beiden hauptsächlichen Produkte sind jedoch Strom und Wärme. Der elektrische Strom wird in das örtliche Versorgungsnetz eingespeist. Der Versorgungsdienstleister hat zudem die Möglichkeit die Anlage bei Bedarf zur regeln. Er kann die Motoren herunter- und wieder hochfahren. Im Regelfall werden die Generatoren jedoch mit Volllast, also mit 190 kW und 250 kW betrieben.

Als zweites Hauptprodukt ist bei der Biogasanlage die nutzbare Abwärme der Gasmotoren zu nennen. Diese wird an die Endverbraucher in Form von Warmwasser abgegeben. Zum einen wird es als Heizung für den Fermenter und den Nachgärer der Biogasanlage selber genutzt um die Prozesstemperatur aufrechterhalten zu können. Zum anderen werden mit dem Warmwasser der Bauernhof und die Stallungen beheizt. Des Weiteren werden auch noch zwei angrenzende Wohnhäuser mit dem Warmwasser, quasi mit Fernwärme versorgt. Als letzter Verbraucher ist die Holztrocknungsanlage zu nennen. Das Warmwasser aus den Gasmotoren wird einem Luft/Wasser Wärmetauscher zugefügt durch welche Frischluft von außen durchgeblasen wird. Die so erhitze Luft wird zwei Anhängern mit Frischholz zugeführt welches dann im Laufe der Zeit trocknet.

Bei der Betrachtung der Stoffströme fällt auf, dass einige der ersichtlichen Ströme nicht messtechnisch erfasst werden. So existiert zum Beispiel kein Gaszähler zwischen dem Gärrestelager und den Gasmotoren. Auch eine aktuelle Messung der Gasbestandteile ist aufgrund der fehlenden Messmittel nicht möglich. Außerdem steht nur eine Messeinrichtung zur Ermittlung der Wärmemengen zwischen dem BHKW und den Häusern sowie der Holztrocknung zur Verfügung. Eine Erfassung der Wärmemengen für die Biogasanlage selbst ist nicht vorhanden.

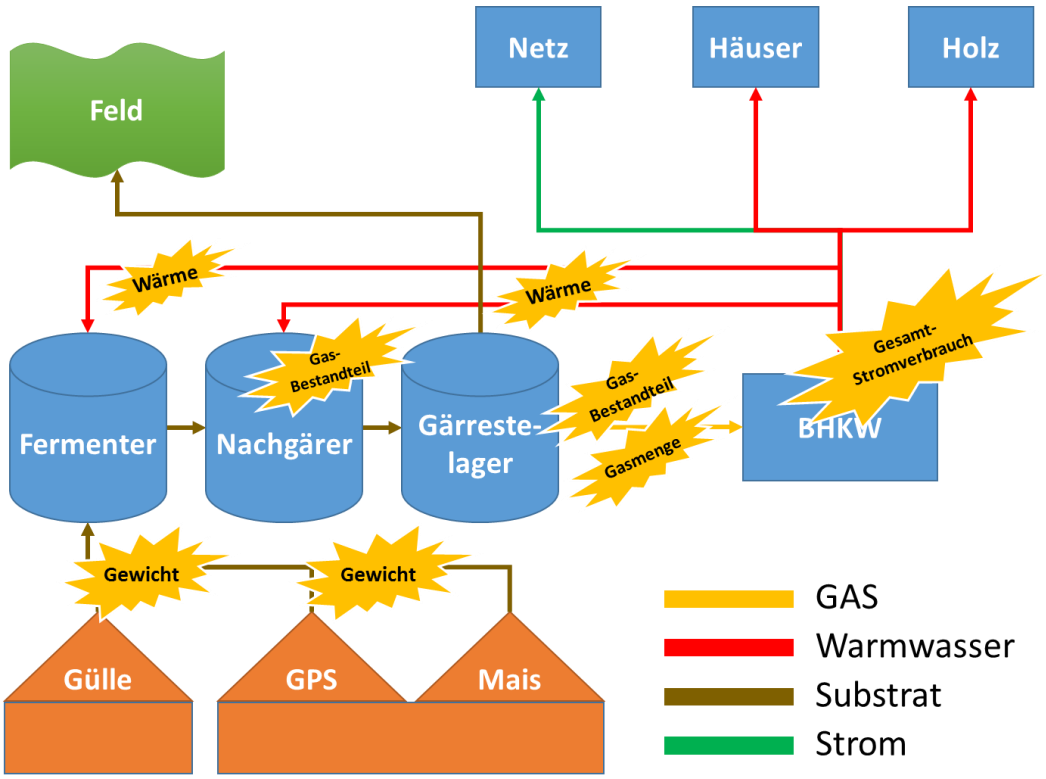

Abbildung 17: Stoffströme mit Kaizenblitzen

Diese und weitere Messmittel werden im weiteren Verlauf im Kapitel der Optimierungspotentiale näher betrachtet.

4.3 Fermentergröße

Um die Größe des Fermenters bestimmen oder überprüfen zu können sollte zunächst zwischen effektiven, bzw. dem nutzbaren Volumen und dem Gesamtvolumen des Fermenters unterschieden werden. Unter dem effektiven Volumen wird der Raum im Fermenter bezeichnet, welcher mit Substrat eingenommen wird. Hierzu kommt der Gasraum, welcher bei der vorliegenden Rundfermenterart mit 60 cm Höhe bedacht wurde.

Ein weiterer wichtiger Wert für die Berechnung der Größe des Fermenters ist der Einfluss der Substratverweilzeit. Bei der vorliegenden Fermenterart handelt es sich wie anfangs beschrieben um einen Durchflussfermenter. Die Verweilzeit ist dadurch nicht eindeutig regelbar.

Um die verschiedenen Substrate wirtschaftlich effektiv ausnutzen zu können ist die Verweilzeit unterschiedlich anzusetzen. Bei reiner Rinder- oder Schweinegülle beläuft sich die Verweilzeit auf mehr als 40 Tage. Werden Gülle und nachwachsende Rohstoffe eingesetzt beläuft sich die notwendige Verweilzeit auf mehr als 80 Tage. Sollte es sich um nachwachsende Rohstoffe oder einer reinen Monovergärung handeln beläuft sich die Verweilzeit auf mehr als 100 Tage. [14, p. 7]

Bei der Berechnung der Fermentergröße wird der tägliche Substrateintrag mit einbezogen. Wird nun die Verweilzeit des jeweiligen Substrates mit dem täglichen Substrateintrag multipliziert ergibt sich daraus das nutzbare Volumen des Fermenters. Durch Addition des Gasraumes lässt sich hieraus das Gesamtfermentervolumen errechnen. Bei dem täglichen Substrateintrag wird vereinfacht angenommen, dass eine Tonne Gülle in etwa einem Kubikmeter Volumen im Fermenter entspricht. [5, p. 180]. Hinzu kommt der Umrechnungsfaktor von 1 Tonne Volumen zu 0,75 m^3 für die Gras- und Getreideganzpflanzensilage [5, p. 241].

Aus diesen Umrechnungsfaktoren in Verbindung mit den Fütterungsmassen ergeben sich die nachfolgenden Eintragsvolumina.

Tabelle 4: Fütterungsmassen und Eintragsvolumen pro Tag

	Massenstrom [kg/d]	Volumenstrom [m³/d]
Mais	20520	15,39
Gülle	12500	12,50
GPS	2700	2,03
Summe	**35720**	**29,92**

Die Berechnung erfolgt nun auf Basis von 29,92 m² Substrat[4] und einer Verweilzeit von 70 Tagen [5, p. 180] bei einem hohen Anteil an nachwachsenden Rohstoffen.

$$\boldsymbol{V_{SF}} = \left(V_{SpT} * \ t_{Vz}\right) + V_{GR} = (29{,}92\ m^3 * 70\ d) + 146\ m^3 = \mathbf{2240}\ m^3 \qquad \text{(GL: 1)}$$

Das errechnete Sollgesamtfermentervolumen (V_{SF}) von 2 240 m³ weicht erheblich von den 1 800 m³ ab. Das spricht zunächst dafür, dass der notwendige Faulraum höher sein müsste um das Substrat am effektivsten abbauen zu können.

Die eingesetzte Verweilzeit sieht jedoch vor, dass das Substrat fast vollständig abgebaut wird. Aus diesem Grund wäre für einen vollständigen Abbau der 35 Tonnen Substrat ein entsprechend großer Behälter notwendig.

Bei der Planung der Anlage wurde jedoch kein vollständiger Abbau des Substrates angestrebt. Vielmehr stand der ökonomische und wirtschaftliche Aspekt im Vordergrund.

Im weiteren Verlauf sollte daher die Faulraumbelastung, das heißt das Verhältnis von eingesetztem Substrat und möglichem Faulraum betrachtet und analysiert werden. Dennoch könnte im Hinblick auf die Optimierung der Biogasanlage eine Reduktion des Substrateintages möglicherweise eine Verbesserung des Gasertrages ermöglichen.

[4] Durchschnittlicher Wert aus dem Biogastagebuch im März 2015

4.4 Substrateinbringung und Fütterung

Die Einbringung von Substrat erfolgt, je nach Art und Beschaffenheit des Substrates unterschiedlich.

4.4.1 Fahrweg vom Silo zum Fermenter

Die Substrate Mais und GPS werden zunächst in eine Füllstation mit dem Traktor bzw. Radlader zweimal am Tag eingebracht. Wie in Kapitel 1.3.1 beschrieben, beträgt die durchschnittliche Entfernung vom Fahrsilo zum Fermenter ca. 30 Meter.

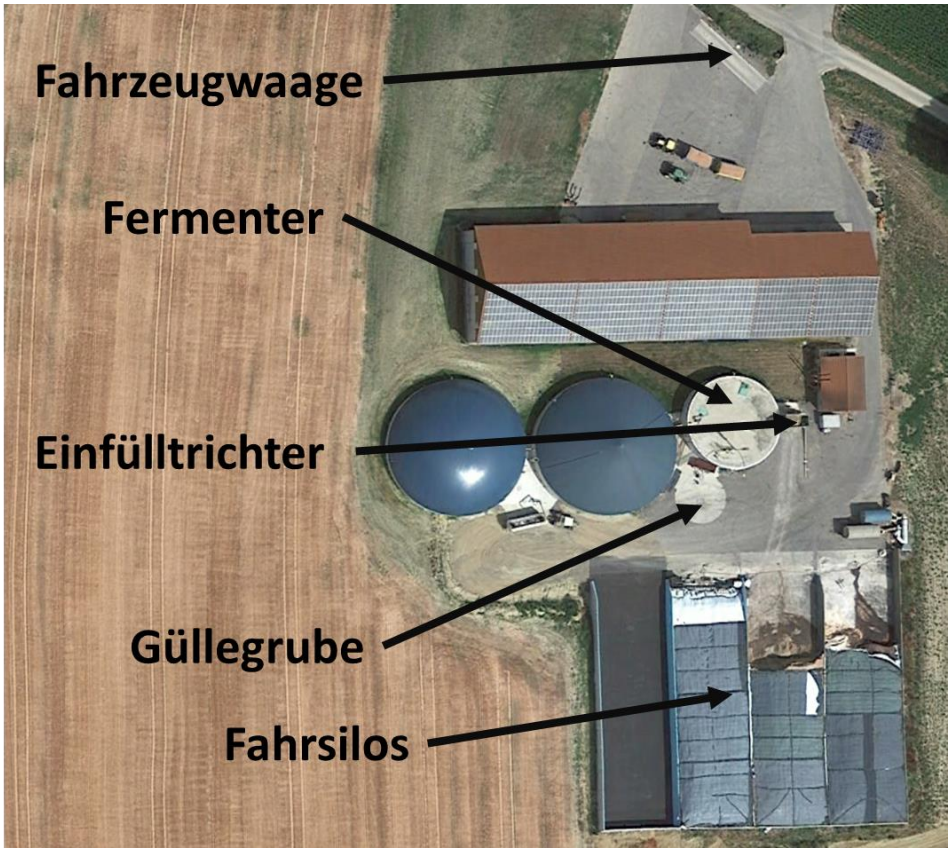

Abbildung 18: Relevante Anlagenbestandteile für die Fütterung [3]

Da der Traktor praktisch keine Umwege fahren muss um vom Fahrsilo zum Fermenter zu gelangen kann der Fahrweg als geeignet betrachtet werden. Es muss jedoch erwähnt werden, dass sich die Fahrzeugwaage zur Erfassung der Fahrzeugmasse auf der gegenüberliegenden Seite der Halle befindet. Daher müsste nach der Aufnahme durch den Radlader oder Traktor theoretisch zunächst der Umweg über die Waage gefahren werden. Die Masse an Substrat wird jedoch nach der ersten Aufnahme

gewogen und für die weiteren Fuhren abgeschätzt. Dadurch entfällt der Weg zur Waage bei jeder weiteren Fahrt zum Fermenter.

4.4.2 Dosierung der Substrate in den Fermenter

Die Gülle befindet sich in einer Vorgrube in unmittelbarer Nähe zum Fermenter. Da die Gülle flüssig ist, kann sie mittels einer Pumpe mehrmals am Tag direkt in den Fermenter gepumpt werden.

Die Füllstation ist mit einer Förderschnecke mit dem Fermenter verbunden und fördert in einem festgelegten Zeitabstand eine gleichmäßige Menge an Substrat in den Fermenter.

Abbildung 19: Teleskoplader beim Befüllen der Anlage

Diese Art der Dosierung bringt erhebliche Ungenauigkeiten mit sich. Zunächst erfolgt die Beladung über die einmalige Gewichtserfassung der Fahrzeugwaage. Allerdings wird diese Gewichtserfassung nicht ständig durchgeführt. Dadurch kann es je nach Beschaffenheit des Substrates zu Schwankungen kommen. Des Weiteren ist das Gewicht des Fahrzeuges aufgrund der Kraftstoffbetankung nicht immer gleich. Die Dosierung über die Förderschnecke, welche in zeitlich konstanten Abständen erfolgt, ist daher nicht ideal.

Eine Gewichtserfassung direkt am Einfülltrichter wäre daher empfehlenswert. Auf diese Optimierungsmaßnahme wird im Kapitel der Messtechnik noch näher eingegangen.

Die Füllstation liegt im Niveau deutlich über dem Fermenter und ist über eine Rampe erreichbar.

Der Vorteil bei dieser erhöhten Anordnung liegt darin, dass das Substrat nicht von unten nach oben in den Fermenter hinaufbefördert werden muss. Vor allem im Energieverbrauch macht sich die so angebrachte Anordnung positiv bemerkbar. Da das Substrat nicht von unten nach oben gepumpt werden muss um in den Fermenter zu gelangen, ergibt sich daraus eine Einsparung von ca. 60 % des durchschnittlichen spezifischen Stromverbrauches. [15, p. 22]

4.5 Ermittlung Gasproduktion

Bei der Analyse der Stoffströme wurde festgestellt, dass die Anlage über keine Messsysteme zur Ermittlung der Gasproduktion verfügt.

Aus diesem Grund wird die theoretisch produzierte Gasmenge anhand der eingesetzten Substratmengen in Verbindung mit den Substrateigenschaften aus der Fachliteratur berechnet.

Für die Ermittlung der Gasproduktion ist der organische Trockensubstanzgehalt [oTS-Gehalt] der eingesetzten Substrate maßgeblich. Dieser errechnet sich aus der eingesetzten Substratmenge und dem daraus resultierenden Trockensubstratgehalt [TS-Gehalt]. Der organische Trockensubstratgehalt wiederum ist ein prozentualer Anteil am Trockensubstratgehalt.

Am Beispiel von Mais soll die Berechnung erläutert werden. Es werden täglich 12 500 kg Mais in den Fermenter zugefüttert. Dieser hat einen TS-Gehalt von 6 %. Daraus resultiert eine TS-Menge von 750 kg. Diese wiederum hat einen oTS-Gehalt von 80 %. Daraus resultiert dann eine oTS-Menge von 600 kg am Tag.

Werden nun alle Substrate zusammengefasst ergeben sich die folgenden Summen an Substrat, TS-Mengen und oTS-Mengen.

Substrat	Menge [kg]	TS-Gehalt [%]	oTS Gehalt [%]	TS-Menge [kg]	oTS Menge pro Tag [kg/d]
Gülle	12500	6%	80%	750	600
GPS	2700	33%	95%	891	846
Mais	19600	33%	95%	6468	6145
Summe	**34800**			**8109**	**7591**

Abbildung 20; Menge[5], TS-Gehalt & oTS-Gehälter [2, p. 85] der eingesetzten Substrate

[5] Durchschnittlicher Wert aus dem Biogastagebuch im März 2015

Jede Art von Substrat hat eine eigene Methanausbeute pro eingesetztes organisches Trockensubstrat. Wird diese nun auf die organische Trockensubstratmenge pro Tag angewandt ergeben sich daraus die folgenden Werte:

Substrat	oTS Gehalt pro Tag	Methanausbeute [ln/kg oTS]	Methanertrag [ln/d]	Methanertrag [m³/d]
Gülle	600	250	150000	150
GPS	846	329	278482	278
Mais	6145	340	2089164	2089
Summe	7591	919	2517646	2518

Abbildung 21: Methanausbeute [2, p. 85] & Methanertrag der Substrate

In Summe produziert die Anlage demnach durchschnittlich 2500 m³ Methangas [V_{CH4}] pro Tag [1 d = 24 h]. Dieser Wert kann nun verwendet werden um die mögliche Leistung des Blockheizkraftwerkes zu bestimmen.

4.6 Bestimmung der BHKW-Leistung

Mit den gegebenen Methangaserträgen soll nun die mögliche Leistung des Blockheizkraftwerkes ermittelt werden. In Verbindung mit dem Wirkungsgrad des Gasmotors und dem Heizwert von Methangas lässt sich die Soll-Leistung der beiden Gasmotoren berechnen.

Die beiden MAN-Gasmotoren haben einen Wirkungsgrad [η] von 40 % [16]. Der Heizwert [H_i] von Methangas liegt bei 10 kWh/m³ [2, p. 109].

Mit der nachfolgenden Formel lässt sich mit diesen Werten die Soll-Leistung der beiden Gasmotoren zusammen ermitteln.

$$\boldsymbol{P_{Gs}} = \frac{\eta_{Gm} * \mathrm{Hi} * \mathrm{V}}{d} = \frac{0{,}4 * 10\mathrm{kWh} * 2500\mathrm{m}^3}{m^3 * 24\ h} = \boldsymbol{417\ kW} \qquad \text{(GL:2)}$$

Das Ergebnis der Soll-Leistung kann nun mit der Nenn-Leistung von 250 kW und 190 kW, in Summe also 440 kW verglichen werden. Es zeigt sich, dass ca. 5% weniger Leistung errechnet wurde als tatsächlich zur Verfügung steht. Nun müssen die errechneten Werte jedoch unter dem Hintergrund betrachtet werden, dass es sich dabei um Durchschnittswerte aus der Literatur handelt. Sie unterliegen natürlichen Schwankungen und sind keinesfalls jeden Tag gleich. Hinzu kommt, dass die Anlage durch den Netzbetreiber aktiv gesteuert werden kann.

Auf dem Nachgärer und dem Gärrestelager sind Gassäcke als Gasspeicher angebracht um die Produktions- und Verbrauchsschwankungen ausgleichen zu können.

Würde nun zu viel Gas produziert, welches durch die Motoren nicht mehr verbrannt werden könnte, so muss es zwangsweise durch die Notfackel behandelt werden. Dieser ökonomische und ökologische Missstand wird durch den etwas geringeren Gasertrag vermieden.

Werden nun die Zahlen unter diesen Umständen betrachtet, so ergibt sich daraus eine positive Situation für den Betrieb der Anlage.

4.7 Faulraumbelastung bei gegebenem Fermentervolumen

Der Fermenter ist mit einer Größe von 1 800 m³ gegeben. Es ist daher zweckmäßig die Faulraumbelastung bei eben dieser Volumengröße zu berechnen und mit den gängigen Literaturwerten zu vergleichen.

Die Faulraumbelastung ergibt sich aus dem Verhältnis von Gesamttrockenmasseaufkommen zu dem nutzbaren Fermentervolumen. [5, p. 181] Das nutzbare Fermentervolumen ergibt sich aus dem Gesamtfermentervolumen abzüglich eines Gasraumes mit der Höhe von mindestens 0,6 m. Bei einem Fermenterdurchmesser von 19 m ergibt sich daraus ein Gasraum von 170 m³ und folglich ein nutzbares Fermentervolumen von 1 630 m³.

$$\boldsymbol{\rho_{FB}} \left[\frac{kg\ oTS}{m^3}\right] = \frac{m_{oTS}\ [\mathrm{kg\ oTS}]}{V_{NF}[m^3]} = \frac{7591\ \mathrm{kg\ oTS}}{1630 m^3} = \mathbf{4,66}\,\frac{kg\ oTS}{m^3} \qquad \text{(GL: 3)}$$

Das gegebene Gesamttrockenmasseaufkommen beträgt ca. 7 591 kg. In Bezug auf das nutzbare Fermentervolumen von 1630 m³ ergibt sich daraus eine Faulraumbelastung (ρ_{FB}) von 4,7 kg oTS/m³ Fermentervolumen.

Die Faulraumbelastung bei stehenden Fermentern sollte zwischen 3 und 5 kg oTS/m³ Fermentervolumen liegen. [4, p. 40] Damit liegt die gegebene Belastung an der oberen Grenze. Es ist davon auszugehen, dass Anlagen, welche mit konstanten Substratmischungen beschickt werden, stärker belastet werden können. Da die Anlage jedoch keine einseitige Substratzusammensetzung erfährt, ist die erhöhte Faulraumbelastung wahrscheinlich mit einem geringeren Risiko verbunden.

Ab einer Faulraumbelastung zwischen 4 bis 5 kg oTS/m³ nimmt die Leistung der Bakterien ab. Dies führt zu sinkender Gasproduktion. [5, p. 41]

Eine zu hohe Faulraumbelastung könnte somit zu einer verringerten Methanbildung führen.

4.9 Gas-Speichervolumen

Die beiden Gasmotoren der Biogasanlage sollen im idealen Fall konstant betrieben werden. Aufgrund von Schwankungen bei der Substratbeschaffenheit und unterschiedlichem Betrieb der Gasmotoren ist sowohl die Produktion als auch der Verbrauch an Biogas nicht immer gleich. Aus diesem Grund sollte das Biogas vor den Motoren zwischengespeichert werden.

Auf dem Nachgärer und dem Gärrestelager sind zur Pufferung des Biogases Gasspeicher angebracht. Je besser die Abstimmung zwischen der Gasproduktion und dem Gasverbraucher ist, desto kleiner können die Gasspeicher ausgeführt werden. [4, p. 68]

Abbildung 22: Gasspeicher auf den Lagern

Je nach Anlagengröße sollte das Fassungsvermögen der Gasspeicher mindestens 20 bis 50 % der täglich erzeugten Biogasmenge betragen. [4, p. 68]

Die Gasspeicher der Anlage haben jeweils 1 000 m³, also insgesamt 2 000 m³ Gasspeichervolumen.

In der nachfolgenden Analyse soll nun die tägliche produzierte Gasmenge mit dem Gasspeichervolumen verglichen werden.

4.10 Analyse der produzierten Gasqualität

Um die Motoren der Biogasanlage betreiben zu können, bedarf es einer entsprechenden Gaszusammensetzung bzw. Gasqualität. Im Kapitel der Anlagenbeschreibung wurde bereits auf die Gaszusammensetzung im Biogas eingegangen. Im folgenden Abschnitt sollen noch einmal kurz die jeweiligen Bestandteile und deren Funktionen im Biogas erläutert werden.

4.10.1 Bestandteile von Biogas

Bei Biogas handelt es sich um ein Gasgemisch, welches zu großen Teilen aus Methan (CH_4) und Kohlendioxid (CO_2) besteht. Neben diesen Bestandteilen existieren noch Wasserdampf und weitere Spurengase im Biogas. [2, p. 30]

Der wichtigste Bestanteil des Biogases für den Betrieb der Gasmotoren ist Methan (CH_4). Es stellt den brennbaren Bestandteil des Biogases dar und beeinflusst somit direkt den Heizwert. [2, p. 30]

Für die Ausbeute an Methan ist in erster Linie die Zusammensetzung der eingesetzten Substrate relevant. Hierbei spielen die Anteile an Fetten, Proteinen und Kohlehydraten eine wichtige Rolle. Beispielsweise ist die Ausbeute an Methan, bezogen auf die Masse bei Fetten am höchsten. [2, p. 31]

In Bezug auf die Qualität des Biogases kommt der Konzentration des Spurengases Schwefelwasserstoff (H_2S) eine wichtige Rolle zu. Da dessen Konzentration hemmend auf den Abbauprozess wirkt, sollte diese nicht zu hoch sein. Des Weiteren führt eine hohe Konzentration im Biogas zu Korrosionsschäden an den Blockheizkraftwerken und in den Heizkesseln. [2, p. 31]

Im Anhang ist die Tabelle 18 mit einen Überblick über die durchschnittlichen Zusammensetzungen von Biogas angefügt.

4.10.2 Gasanalysemessung

Um nun die Gasqualität der Biogasanlage ermitteln und beurteilen zu können, soll eine Gasmessung mit geeigneten Messgeräten durchgeführt werden. Wie im Abschnitt der Stoffstromanalyse bereits angemerkt wurde, verfügt die Biogasanlage nicht über ein integriertes System zur Ermittlung der Gasmenge und vor allem der Gasbestandteile. Der Einsatz eines mobilen Gasanalysegerätes ist daher notwendig.

Für diese Messung an der Anlage steht das mobile Gasanalysegerät COMBIMASS GA-m der Firma Binder zur Verfügung. Dieses Analysegerät kann die drei Bestandteile Methan, Kohlenstoffdioxid und Sauerstoff in Prozent [%] ermitteln. Die beiden Bestandteile Schwefelwasserstoff und Wasserstoff des Biogases werden in „parts per million“ [PPM] gemessen. [17, p. 3]

Die Biogasanlage verfügt über einen separaten Ausgang des Biogases welcher im Motorraum über den Motoren gut zugänglich angebracht ist. Dieser ist durch einen Kugelhahn absperrbar. Daher kann die Gasströmung frei reguliert werden. Um eine Leckage und Konzentration des Biogases im Motorraum zu verhindern, wird mittels eines Schlauches der Ausgang des Biogases aus dem Motorraum nach draußen verlegt. Damit soll auch eine mögliche unkontrollierte Explosion des Gases verhindert werden.

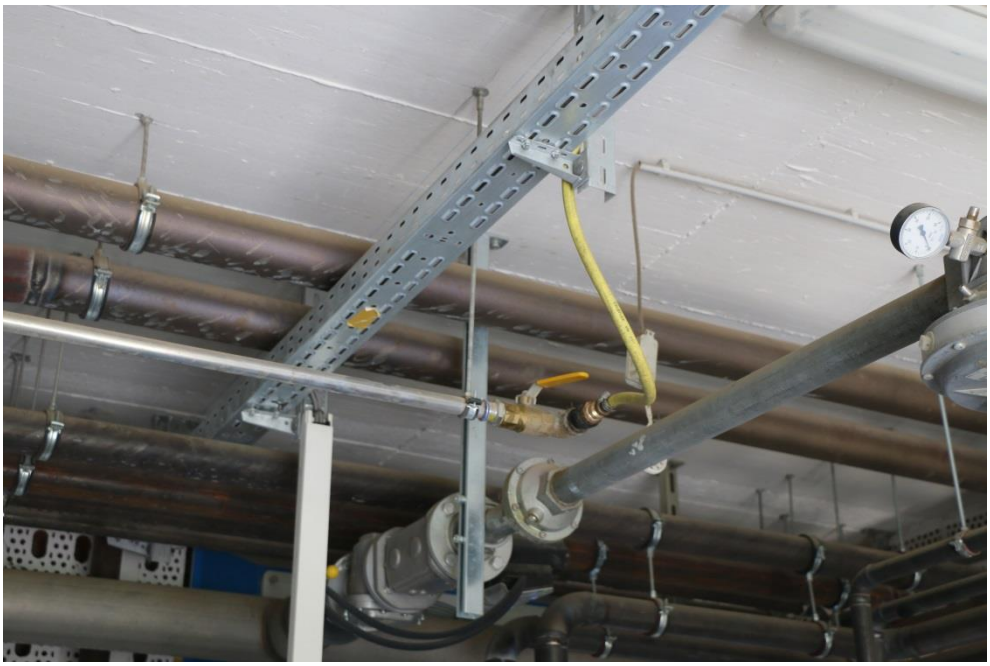

Abbildung 23: Schlauchausgang

Um die jeweiligen Bestandteile des Biogases messen zu können, wird das Analysemessgerät mit dem Biogas durchflutet. Da das Messgerät nicht mit zu hohem Druck beaufschlagt werden darf, kommt hier die Druckregulierung mit dem Kugelhahn zum Tragen.

Um den Verlängerungsschlauch mit dem Messgerät verbinden zu können, wird eine einfache Vorrichtung verwendet, welche mittels Schlauchreduzierungen an den Anschluss des Messgerätes gesteckt werden kann. Die Kugelhahnstellung wird so gewählt, dass am Ende des Schlauches zum Messgerät durch die Fächerprobe nur noch ein geringer Schwefelgeruch feststellbar ist. Durch zuhalten des Schlauches mit dem Finger soll daher nur ein kleiner Druck durch das Gas spürbar sein.

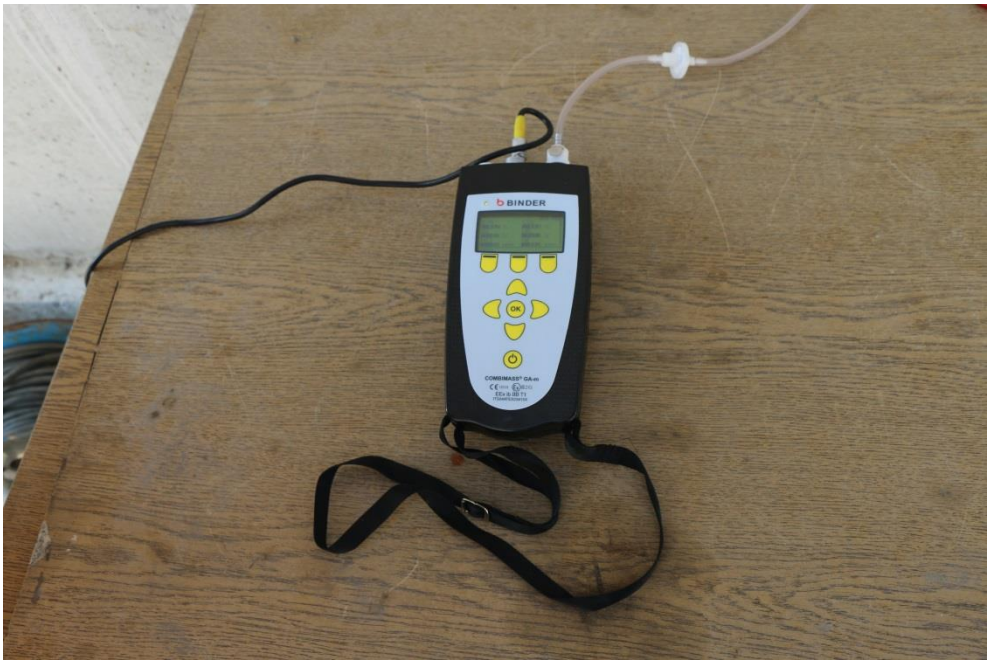

Abbildung 24: Messgerät mit Schlauchanschluss

Vor der eigentlichen Gasanalysemessung wird das Analysemessgerät mit reiner Umgebungsluft „gespült“ Dieser Spülvorgang erfolgt so lange, bis die gemessenen Anteile an Methan, Schwefelwasserstoff und Wasserstoff auf null zurückgegangen sind. Zudem soll dadurch der Bildung eines explosiven Gasgemisches im Gerät entgegengewirkt werden.

Die jeweilige Gasanalysemessung wird im Durchschnitt alle 20 Minuten manuell, das bedeutet per Handauslösung durchgeführt. Jeder Messvorgang wird ca. zwei Minuten andauern. Damit soll sichergestellt werden, dass die Umgebungsluft sicher aus dem Messgerät verdrängt wird und dass das Biogasgemisch durchfluten kann.

Aus einer Messung am 13. August 2015 welche von 09:30 Uhr bis 13:00 Uhr durchgeführt wurde, ergaben sich die folgenden Messergebnisse.

Tabelle 5: Messergebnisse vom 13.08.2015

Uhrzeit	Temp. [°C]	CH_4 [%]	CO_2 [%]	O_2 [%]	H_2S [ppm]	H_2 [ppm]
9:30	-	49,6	45,0	0,0	44	147
9:50	26,9	49,3	44,7	0,0	48	339
10:03	26,8	49,1	44,4	0,0	49	0
10:18	27,2	48,7	44,4	0,0	50	852
10:32	27,7	48,8	44,4	0,0	51	0
10:46	28,7	48,9	44,0	0,0	45	1234
11:03	28,2	48,8	44,5	0,0	51	6
11:17	29,1	48,6	44,6	0,0	53	0
11:33	29,4	48,8	44,5	0,0	54	1449
11:47	30,0	48,8	43,9	0,0	48	1567
12:03	30,3	48,6	44,2	0,0	51	0
12:54	-	48,2	44,0	0,0	51	0
13:00	32,2	48,5	44,2	0,0	54	0

4.10.3 Kritische Betrachtung

Im Vergleich zu den Literaturwerten aus der Tabelle 16 im Anhang wird deutlich, dass vor allem der Methangasanteil im Biogas äußerst niedrig ausfällt. Während der gesamten Messung wurde kein einziger Wert oberhalb oder gleich der 50 % gemessen. Wie erwartet wurde mit null Prozent kein Sauerstoff im Biogas mehr nachgewiesen. Der Anteil an Kohlenstoffdioxid war noch im akzeptablen Rahmen. Der Schwefelwasserstoff macht einen niedrigen Anteil aus.

Mit Ausnahme des Wasserstoffs fielen die Messungen der jeweiligen Gasanteile größtenteils konstant aus. Speziell beim Wasserstoff gab es häufig Ausreißer welche zwischen null und 1 567 PPM schwankten. Die komplette Biogasanlage ist etwa drei Wochen vor der Messung wieder in Betrieb gegangen. Aufgrund eines „Pfropfens“ an Substrat im Fermenter kam es zum Ausfall der Anlage. Möglicherweise arbeiten die Bakterien noch nicht konstant genug, was wiederum die Schwankungen des Wasserstoffs und die niedrigen Methanwerte erklären würde.

Eine weitere Begründung für die erzielten Werte könnte die hohe Faulraumbelastung sein sowie die Fütterung mit Maissilage als Hauptsubstrat neben der Gülle.

Um eine Verbesserung der Gasqualität zu erzielen könnte die Faulraumbelastung verringert werden. Als weitere Maßnahme sollte die Verwendung eines zusätzlichen Substrates in Erwägung gezogen werden.

Um mögliche Resultate aus den Anpassungen registrieren zu können, wurde eine weitere Messung zu einem späteren Zeitpunkt durchgeführt (Siehe Kapitel 6.1.1).

5 Softwareanalyse

5.1 Vorstellung der Software

Simba Biogas ist eine Simulationssoftware für die Modellierung und Simulation von Nassvergärungsanlagen. Dies geschieht unter Einbeziehung beliebiger Verfahrensoptionen inklusive Steuerung und Regelung. Dabei können die Betriebsführungsstrategien und Lastwechsel entwickelt und vorgeplant werden. Des Weiteren sind die Optimierung von Fütterungsstrategien sowie die Analyse der komplexen biologischen Prozesse möglich. Auf den ersten Blick ist zudem die Beurteilung des Betriebszustandes möglich. [18, p. 1]

Zum Funktionsumfang der Software gehören unter anderem die Module für die typischen Verfahrensstufen sowie beliebige biochemische Umwandlungsmodelle. Dabei können unterschiedliche Mischsubstrate verwendet werden. Das Programm erlaubt die Vorhersage der einzelnen Bestandteile im Biogas. Die jeweiligen Module und Prozesse lassen sich mit animierten Visualisierungen darstellen. [18, p. 2]

5.2 Simulation der Biogasanlage

Mit der Software ist es möglich die Biogasanlage nachzubilden und unter verschiedenen Betriebszuständen zu simulieren. Zum Kapitel der Simulation ist anzumerken, dass es sich hierbei nicht um ein Tutorial handelt. Die Handbücher können nach der Installation der Software eingesehen werden. Zudem sind einige der Prozesse selbsterklärend und können durch „Trial and Error“ ausprobiert werden.

5.2.1 Grundlagen der Simulation

Um die Biogasanlage simulieren zu können, muss sie zunächst mit den verschiedenen Modulen welche der Visualisierung dienen aufgebaut werden. Dies geschieht im Großen und Ganzen in Anlehnung an das Modell der Stoffstromanalyse. Jeder Bestandteil der Biogasanlage kann abgebildet und durch Veränderungen an den Variablen und Konstanten angepasst werden. Die folgende Grafik zeigt den Aufbau der Biogasanlage für die Softwaresimulation. Anhand dieser Abbildung werden die wichtigsten Funktionen der jeweiligen Module erklärt.

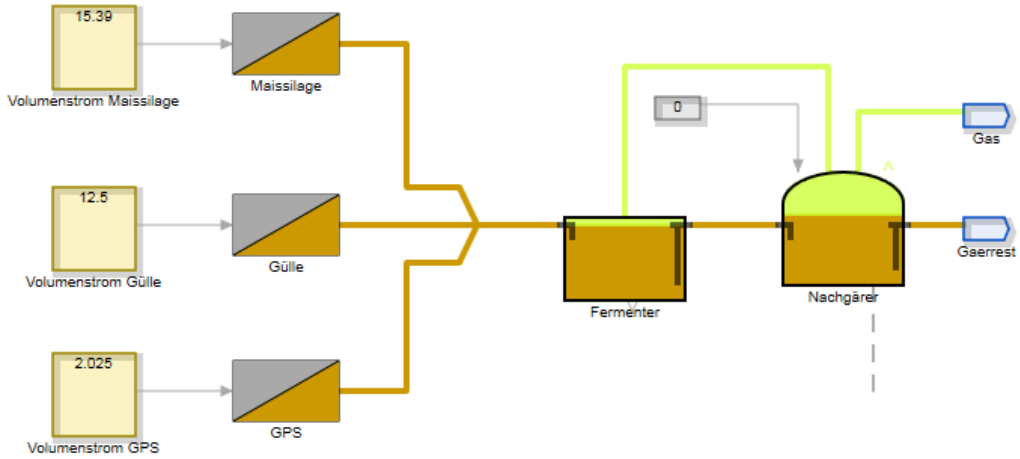

Abbildung 25: Aufbau der Biogasanlage Kreutzer in Simba [19]

Die Biogasanlage wurde anhand von acht unterschiedlichen Modulen aufgebaut. Jedes dieser Module kann ein Block oder eine Line sein. Als Ausgang für die Simulation dienen wie im realen Modell die Blöcke für die Substrate. Jedem Substratblock ist die jeweilige Eigenschaft des darzustellenden Substrates hinterlegt. Hierbei muss angemerkt werden, dass die Software über eine Vielzahl von Substrateigenschaften in der eigenen Datenbank verfügt. Diese spiegeln quasi die Literaturwerte wieder.

Dem Substratblock ist ein Signalblock vorgeschaltet. Dieser simuliert den konstanten Volumenstrom des Substrates in den Fermenter. Als Einheit dient hierbei Volumen in Kubikmeter pro Tag (m^3/d). Die jeweiligen Volumina müssen anhand von Literaturwerten aus den Massenströmen abgeleitet werden. Jedem Substrat wird

ein eigener Signalblock vorgeschaltet.

Alle drei Substratblöcke werden mit dem Module Line zusammengeführt und laufen in den Block Fermenter. Im Block Fermenter können die wichtigen Parameter Größe, Faulraum, effektives Volumen, Gesamtvolumen, Druck und auch die Temperatur eingestellt werden.

Der Fermenter ist mit dem Nachgärer über zwei Leitungen verbunden. Zum einen über die Gasleitung, welche hellgrün und zum anderen über die Substratleitung, welche bräunlich dargestellt ist. Wie im Fermenter können auch im Nachgärer die jeweiligen Parameter für die Volumina und Temperatur eingestellt werden.

Nach dem Nachgärer gelangt das Substrat in den Block Gärrest und das Gas in den Block Gas. Beide stellen einen unendlichen Verbraucher dar. Es wird ein konstanter Verbrauch über die Zeit simuliert.

Im Gegensatz zur realen Biogasanlage ergeben sich in der Simulation einige Unterschiede. So wird zum Beispiel das Substrat über die gesamte Zeit kontinuierlich und mit gleichbleibender Qualität „eingebracht“. Das Programm kennt keine Qualitätsunterschiede. Ebenso wird als Verbraucher auf die Biogasmotoren verzichtet. Viel mehr wird ein konstanter Verbrauch angenommen. Daher befindet sich über dem Nachgärer und dem Gärrestelager auch kein Gasspeicher.

Im folgenden Abschnitt werden nun verschiedene Szenarien simuliert. Angefangen vom Standardfall in welchem die Biogasanlage zu Beginn der Analyse vorgefunden wurde. Anschließend folgt der Fall mit zehnprozentiger Reduktion der Maissilage. Als drittes wird der thermophile Betrieb bei 55 °C simuliert. Bei allen drei Simulationen beträgt die Laufzeit 365 Tage, also ein Jahr.

5.2.2 Simulation des Standardbetriebes

Die Grenzwerte für die Simulation des Standardbetriebes entsprechen weitestgehend derer der realen Biogasanlage. So beträgt die Temperatur im Fermenter ca. 42 °C und die Anlage wird mit den gleichen Massen an Substrat gefüttert.

Im Gegensatz zur Anlage beträgt der Methangasgehalt über 51 % und der Wasserstoffgehalt liegt bei über 2 000 PPM. Dem gegenüber steht der Schwefelwasserstoffgehalt. Dieser liegt in der Simulation bei 0 PPM und ist damit niedriger als auf der Anlage. Der Gehalt an Kohlendioxid ist in etwa auf dem gleichen Niveau wie auf der Anlage.

Tabelle 6: Simulierte Vol.-Ströme & Gaszusammensetzung bei Standardbetrieb [19]

Q_{ges} [m³/d]	CH_4 [%]	CO_2 [%]	O_2 [%]	H_2S [PPM]	H_2 [PPM]
5631	51,11%	46,71%	0,00%	0	2339
Q [m³/d]	2878	2630	0	0	13

5.2.4 Simulation mit reduziertem Substrateintrag

Bei der Simulation mit reduziertem Substrateintrag wurde auf die erhöhte Faulraumbelastung Rücksicht genommen. Es wurden rund 10 % weniger Maissilage in den Fermenter eingebracht.

In der Simulation zeigt sich jedoch kaum eine Auswirkung auf die Gaserträge. Der Methangehalt ist um etwa zwei Zehntel gestiegen und der Schwefelwasserstoffgehalt um einige PPM gesunken.

Es ist daher schwierig dieses Ergebnis als Verbesserungsmaßnahme zu deuten. Da es sich jedoch um eine reine Aneinanderreihung von Berechnungen handelt, könnte der leicht erhöhte Methangasgehalt doch als positives Resultat gewertet werden.

Tabelle 7: Simulierte Vol.-Ströme & Gaszusammensetzung bei reduzierter Maissilage [19]

Q_{ges} [m³/d]	CH_4 [%]	CO_2 [%]	O_2 [%]	H_2S [PPM]	H_2 [PPM]
5241	51,22%	46,32%	0,00%	0	2268
Q [m³/d]	2684	2428	0	0	12

5.2.6 Simulation des thermophilen Betriebes

Mit der dritten Simulation soll die Gasentwicklung bei erhöhten Betriebstemperaturen im thermophilen Bereich betrachtet werden. Hierbei wurde die Fermenter und Nachgärertemperatur auf 55 °C erhöht.

Es zeigt sich, dass der Methangasgehalt im Vergleich zu den vorherigen Simulationen um ca. einen Prozentpunkt gesunken ist. Allerdings hat sich auch der Wasserstoffgehalt massiv verringert. Letzteres wäre als positiver Nebeneffekt zu werten. Jedoch dürfte ein verminderter Methangasertrag einen größeren Einfluss auf die Kosten haben als ein verringerter Wasserstoffgehalt. So lange die Motoren mit dem höheren Wasserstoffgehalt betrieben werden können spielt dieser eine geringere Rolle.

Hinzu kommt, dass im realen thermophilen Betrieb die Gefahr eines „Umkippens“ der Anlage höher ist und damit ein noch größerer Schaden an der Anlage entstehen könnte.

Tabelle 8: Simulierte Vol.-Ströme & Gaszusammensetzung im thermophilen Betrieb [19]

Q_{ges} [m³/d]	CH_4 [%]	CO_2 [%]	O_2 [%]	H_2S [PPM]	H_2 [PPM]
5834	50,29%	45,54%	0,00%	0	2
Q [m³/d]	2934	2657	0	0	0,01

5.3 Kritische Schlussbetrachtung

Die Simulation eignet sich gut um mögliche Szenarien durchzuspielen und Trends aufzuzeigen. Allerdings steckt hinter der Simulation eine Abfolge von Berechnungen. Schwankungen wie sie durch die Natur in etwa der Substratqualität gegeben sind werden nicht berücksichtigt. Es sollte daher immer bedacht werden, dass es nur eine Simulation darstellt, welche den realen Ablauf nicht vollkommen abbilden kann.

6 Aufzeigen von Verbesserungspotentialen

6.1 Minimierung der Faulraumbelastung und hinzufügen von Substrat

Die Analysen am Fermenter haben ergeben, dass vor allem die Faulraumbelastung im oberen Bereich liegt. Dies hat zur Folge, dass die Bildung von Methangas zurückgehen und auch die Gasqualität abnehmen könnte.

Des Weiteren wurde zum Zeitpunkt der ersten Gasanalysemessung neben der Gülle als Cosubstrat lediglich Maissilage der Biogasanlage zugeführt. Aus diesem Grund könnte der Methangasgehalt ebenfalls minimiert ausfallen.

Um nun eine Steigerung des Methananteils zu erreichen wurde noch während der ersten Messung eine Reduktion des Eintrages an Maissilage vorgenommen. Die ursprüngliche Menge von 22,8 Tonnen pro Tag wurde um 10 % auf 20,5 Tonnen verringert. Wie in der Tabelle 5 ersichtlich ist, stieg der Anteil an Methangas während der Messung nicht an. Die Reduktion der Faulraumbelastung hatte daher keine kurzfristige Auswirkung auf die Gasqualität.

Kurz nach der Messung wurde neben der Gülle und der Maissilage auch noch GPS als Substrat der Anlage hinzugefüttert. Diese Maßnahme könnte ebenfalls eine Verbesserung der Gasqualität bewirken.

6.1.1 Messung nach den Veränderungen der Biogasanlage

Die zweite Messung soll zeigen, ob die jeweiligen Maßnahmen Verbesserungen erbringen. Zwischen der ersten Messung am 13. August 2015 und der zweiten Messung am 10. September 2015 liegt knapp ein Monat.

Die Messung erfolgte mit den gleichen Messmitteln wie die Erste. Im Unterschied zur ersten Messung wurde jedoch von einem 15 Minuten Abstand auf einen 10 Minuten Abstand zwischen den jeweiligen Messungen gewechselt.

In der nachfolgenden Tabelle sind die durchschnittlichen Messergebnisse aufgezeigt. Die Messung wurde am 10 September 2015 zwischen 15:40 Uhr und 16:35 Uhr durchgeführt.

Tabelle 9: Messergebnisse vom 10.09.2015

Uhrzeit	Temp. [°C]	CH_4 [%]	CO_2 [%]	O_2 [%]	H_2S [ppm]	H_2 [ppm]
15:40	15,6	51,6	45,3	0,0	50	119
15:45	15,5	51,7	45,3	0,0	49	56
15:55	15,6	51,8	45,3	0,0	51	165
16:05	15,8	51,1	45,3	0,0	51	226
16:15	16,0	51,5	45,3	0,0	52	312
16:25	16,1	51,5	45,4	0,0	51	335
16:35	16,4	51,4	45,1	0,0	51	373

Das Messergebnis lässt sich zunächst positiv zusammenfassen. Vor allem der Methangasgehalt im Biogas ist um einige Prozentpunkte angestiegen und wies, wie auch der CO_2 Wert fast keine Schwankungen auf. Im Vergleich zur ersten Messung ließen sich beim Wasserstoff keine signifikanten Schwankungen erkennen. Die Werte stiegen zwar im Laufe der Messung weiter an, jedoch konnten keine Ausreißer verzeichnet werden.

6.1.2 Kritische Betrachtung der zweiten Messung

Zunächst kann festgestellt werden, dass die zweite Messung im Vergleich zur ersten Messung eine hochwertigere Gasqualität bescheinigt. Dennoch müssen die Messergebnisse beider Messungen unter verschiedenen Gesichtspunkten betrachtet werden.

Die erste Messung fand nicht unmittelbar, jedoch in einem überschaubaren Zeitraum nach dem Totalausfall der Biogasanlage statt. Die zweite Messung hingegen wurde wieder zu einem späteren Zeitpunkt durchgeführt. Es kann durchaus sein, dass sich der Gärprozess in dieser Zeit weiter eingependelt hat und sich dadurch eine Verbesserung der Gasqualität feststellen lässt.

Ein weiterer Grund für die verbesserte Gasqualität könnte die Reduktion der Faulraumbelastung sein. Diese wurde noch während der ersten Messung vorgenommen, konnte dabei so kurzfristig aber keine Ergebnisse erzielen.

Der dritte Grund für das positive Ergebnis der Messung kann der Einsatz von GPS-Triticale als zusätzliches Substrat sein.

Bemerkenswert ist auch der Vergleich mit der Simulation. Denn der Methangasgehalt fällt in Praxis höher aus als in der Simulation. Wohingegen der Kohlenstoffdioxid- und vor allem der Wasserstoffanteil in der Simulation höher ausfällt als in der Praxis.

Tabelle 10: Simulierte Gaszusammensetzung bei reduzierter Maissilage [19]

CH_4 [%]	CO_2 [%]	O_2 [%]	H_2S [PPM]	H_2 [PPM]
51,22%	46,32%	0,00%	0	2268

6.2 Einsatz von effektiven Mikroorganismen

Eine weitere Optimierungsmaßnahme hat zum Ziel, aus dem gleichen Eintrag an Substrat eine größere Menge an Gas zu erzeugen. Zum aktuellen Zeitpunkt gibt es jedoch keine Möglichkeiten eine größere Menge an Bio- bzw. Methangas zu verarbeiten. Die beiden Gasmotoren arbeiten grundsätzlich im 100 % Bereich. Allerdings ist die Anschaffung eines dritten Motors zum aktuellen Zeitpunkt nicht geplant und wäre zudem aus Platzgründen nur mit erheblichem Umbauaufwand möglich.

Aus diesem Grund liegt der Focus viel mehr in der gleichbleibenden Gasproduktion bei reduziertem Substrateintrag. Unter Zuhilfenahme von sogenannten effektiven Mikroorganismen soll der Gasertrag bei der Vergärung gesteigert werden.

6.2.1 Wirkung und Beschreibung von effektiven Mikroorganismen

Bei effektiven Mikroorganismen handelt es sich um eine Zusammenmischung einer Vielzahl von verschiedenen Mikroorganismen. Diese werden traditionell in der Herstellung von Lebensmitteln verwendet. Trotz der großen Anzahl an unterschiedlichen Bakterienstämmen welche verschiedene Nährstoffe und unterschiedliche Umgebungsbedingungen bevorzugen sind effektive Mikroorgansimen stabil. Konkret hat dies zur Bedeutung, dass die einen Mikroorganismen die Ausscheidungspunkte der anderen für ihr Wachstum und ihre Vermehrung nutzen und umgekehrt. [20]

Bei den fünf am häufigsten vorkommenden effektiven Mikroorgansimen handelt es sich unter anderem um Milchsäurebakterien. Durch sie werden organische Materialen fermentiert und organische Säuren produziert. Diese wiederum hemmen das Wachstum von pathogenen[6] Keimen. [20]

Weiterhin kommen Hefen zum Einsatz, welche organisches Material fermentieren und Vitamine sowie Aminosäuren produzieren. [20]

Photosynthese Bakterien helfen durch ihre Stoffwechselprodukte mit, das Gleichgewicht zwischen den anderen Mikroorganismen aufrechtzuhalten. Dabei bauen sie nützliche Substanzen wie zum Beispiel Aminosäuren und Nukleinsäuren

[6] Mikroorganismen mit krankmachenden Eigenschaften [29]

aus organischem Material oder schädlichen Gasen auf. Dafür nutzen sie das Sonnenlicht oder die Erdwärme. [20]

Sogenannte Aktinomyzeten produzieren aus Aminosäuren antimikrobielle Stoffe welche schädliche Pilze und Bakterien unterdrücken. [20]

Als letztes sind die Ferment-aktiven Pilzarten zu nennen. Diese zersetzen schnell organisches Material, wodurch Alkohol, Ester und antimikrobielle Stoffe entstehen. Sie verhindern das Auftreten von Ungeziefer und unterdrücken schlechte Gerüche. [20]

6.2.2 Effektive Mikroorganismen zum Silieren in der Biogasanlage

Die effektiven Mikroorganismen sollen zur Steigerung des Gasertrages in der Biogasanlage eingesetzt werden. Messungen und Analysen in anderen Biogasanlagen haben ergeben, dass mit effektiven Mikroorganismen unter anderem eine schnelle pH-Wert-Absenkung in den Silagen registriert wurde. Hinzu kommt eine Erhöhung der Essig- und Prionsäuregehalte was vermutlich auf die verbesserte aerobe Stabilität zurückzuführen ist. [21]

Es wurden mehrere Substrate mit effektiven Mikroorganismen unter Laborbedingungen behandelt. Dabei stellte sich heraus, dass die Methanausbeute beim zweiten Grasschnitt zwischen drei und fünf Prozent gesteigert wurde. Es muss beachtet werden, dass beim ersten Grasschnitt die Methanausbeute durch das Siliermittel kaum nennenswert beeinflusst wurde. Bei der Behandlung von Maissilage stieg die Methanausbeute um bis zu 18 % an. Es muss auch hier angemerkt werden, dass es sich hierbei um Laborwerte handelt. [21]

Ein weiterer Effekt beim Einsatz von effektiven Mikroorganismen wurde in Bezug auf die Schwefelwasserstoffproduktion festgestellt. Der Schwefelwasserstoffgehalt wurde beim zweiten Grasschnitt dabei um 17 % gesenkt. Bei Tests mit unsiliertem frischem Schnittgut wurde eine Absenkung um 26 % festgestellt. [21]

In Bezug auf die zu optimierende Biogasanlage könnte der Einsatz von effektiven Mikroorganismen einige Vorteile mit sich bringen. Im Folgenden soll nun der Nutzen und die Wirtschaftlichkeit von effektiven Mikroorganismen betrachtet und wenn möglich berechnet werden.

6.2.3 Wirtschaftliche Betrachtung und Anwendung

Der Einsatz von effektiven Mikroorgansimen bei der Biogasanlage Kreutzer GmbH soll nun wirtschaftlich betrachtet werden. Dabei geht es vielmehr um eine Abschätzung, ob sich der Einsatz lohnen würde, oder ob es sich in erster Linie lediglich um eine zusätzliche Belastung ohne nennenswerten Ertrag handelt.

Wie im vorhergehenden Kapitel beschrieben lag die Steigerung der Methanausbeute bei bis zu 18 % beim Substrat der Maissilage. Eine Nachfrage beim Hersteller des Siliermittels hat jedoch ergeben, dass für eine realistische und praxisnahe Berechnung unter Nicht-Laborbedingungen viel mehr ein Gasertrag von anfangs fünf Prozent angenommen werden sollte. Die Berechnung findet jedoch nur unter der Annahme statt, dass Maissilage mit effektiven Mikroorganismen behandelt wird.

Die Berechnung basiert auf der Annahme, dass die zu produzierende Gasmenge immer gleich bleiben soll. Wie anfangs erwähnt, könnte eine größere Gasmenge nicht abgenommen werden. Aus diesem Grund wird die Ersparnis an Maissilage unter Berücksichtigung einer prozentualen Gasertragssteigerung betrachtet. Dazu wird der Ertrag an Methangas pro Tag ohne Einsatz von effektiven Mikroorgansimen als Basis betrachtet. Dieser Methangasertrag resultiert wiederum einer bestimmten Menge an organischer Trockensubstanz, einfacher Trockensubstanz und am Ende der Siliermasse an Mais wie sie in den Fermenter gefüttert wird. Da es sich über den gesamten Prozess um einen linearen durchgängigen Zusammenhang handelt, kann vereinfacht betrachtet die prozentuale Einsparung an Methangas wiederum direkt auf die Ausgangssilage angewandt werden.

Die so ermittelte Einsparmasse an Maissilage kann nun mit dem gängigen Börsenwert pro Gewichtseinheit multipliziert werden. Dies ergibt zunächst den Ertrag, welcher alleine durch die Ersparnis an Substrat erzielt wurde.

Tabelle 11: Ersparnis durch Gasertragssteigerung[7]

Preis pro Tonne Maissilage [€]				**35,00 €**
Gas-Steigerung	**Methaneinsparung [m³/d]**	**Silageeinsparung pro Tag [kg]**	**Silageeinsparung pro Jahr [t]**	**Gesamtersparnis [€]**
5%	104	977	357	12.483,00 €
7%	143	1342	490	17.149,54 €
10%	199	1865	681	23.831,18 €
12%	234	2199	802	28.086,75 €
15%	285	2677	977	34.192,57 €
18%	334	3130	1143	39.987,92 €

Dem Ertrag aus der Substrateinsparung muss im nächsten Schritt die Investition in das Siliermittel gegenübergestellt werden. Diese errechnet sich aus dem jeweiligen Siliermittelpreis pro Mengeneinheit sowie aus dem möglicherweise notwendigen technischen Hilfsmittel zur Ausbringung.

In der folgenden Aufstellung ist sowohl das Siliermittel als auch die Ausbringungshilfe aufgelistet. Da die Biogasanlage quasi als Großabnehmer betrachtet werden kann, wurde die größte Verpackungseinheit gewählt, welche den günstigsten Mengenpreis aufweist.

- ➔ EM-Silan, Silierhilfsmittel 1000 Liter, IBC: 3051,92€ [22]
- ➔ Dosierpumpe (Vernebelungsgerät für Silage): 282,03€ [23]

Das Siliermittel wird direkt beim Befüllen des Siloraumes der Silage beigegeben. Unter Zuhilfenahme der Dosierpumpe wird das Siliermittel über der Silage vernebelt. Als

[7] Bei den in dieser Berechnung angezogenen 35,00 € pro Tonne Maissilage handelt es sich um eine Schätzung des Landwirtes im Sommer 2015. Für weitere aktuelle Berechnungen muss der jeweilige Silagepreis neu ermittelt werden.

Richtwert dienen 400 - 800 ml EM-Silan Siliermittel mit ca. 2 l Wasser pro Tonne Maissilage. [24]

Die nachfolgende Berechnung stützt sich auf unterschiedliche Randbedingungen. Es wird zum einen zwischen 400 ml und 800 ml Siliermitteleinsatz unterschieden. Weiterhin erfolgt die Annahme verschieden hoher Gaserträge, wobei diesbezüglich von einer mindestens fünf prozentigen Gasertragssteigerung ausgegangen wird.

Tabelle 12: Investition in Siliermittel bei 0,4 l pro Tonne Maissilage

EM-Silan Menge [Liter pro Tonne Substrat]			**0,4**
Gas-Steigerung	**Substratmenge [t]**	**EM-Menge [l]**	**EM-Kosten**
5%	7133	2853	8.708,14 €
7%	7000	2800	8.545,37 €
10%	6809	2724	8.312,32 €
12%	6687	2675	8.163,88 €
15%	6513	2605	7.950,91 €
18%	6347	2539	7.748,77 €

Tabelle 13: Investition in Siliermittel bei 0,8 l pro Tonne Maissilage

EM-Silan Menge [Liter pro Tonne Substrat]			**0,8**
Gas-Steigerung	**Substratmenge [t]**	**EM-Menge [l]**	**EM-Kosten**
5%	7133	5707	17.416,28 €
7%	7000	5600	17.090,74 €
10%	6809	5447	16.624,63 €
12%	6687	5350	16.327,76 €
15%	6513	5210	15.901,82 €
18%	6347	5078	15.497,54 €

6.2.4 Kritische Schlussbetrachtung der Berechnungsergebnisse

Die errechneten Erträge aus der Gassteigerung sowie der Investitionen in das Siliermittel müssen nun gegenübergestellt werden. Dabei wird ersichtlich dass die einzusetzende Menge an Siliermittel einen erheblichen Einfluss auf die Investitionen ausmacht.

Bei einer Siliermitteldosierung von 400 ml pro Tonne Maissilage tritt schon bei einer fünfprozentigen Gasertragssteigerung ein positiver Return of Invest (ROI) auf. Je höher die Gasertragssteigerung ausfällt, desto niedriger fallen die Investitionen am Siliermittel aus.

Dem gegenüber steht die Investition bei einer notwendigen Siliermitteldosierung von 800 ml pro Tonne Maissilage. Im durchgeführten Rechenmodell erfolgt ein positiver ROI erst ab einer siebenprozentigen Gasertragssteigerung. Dieser fällt durch die doppelte Siliermitteldosierung jedoch wesentlich geringer aus.

In der Praxis muss der tatsächliche Gasertrag durch Versuche zunächst noch ermittelt werden. Die Schwelle zwischen den jeweiligen Steigerungswerten ist relativ gering und fließend. Es empfiehlt sich daher mit einer Dosierung von 600 ml Siliermittel pro Tonne zu beginnen. Im Zweifelsfall würden sich bei dieser Dosierung und einer fünfprozentigen Gasertragssteigerung die Investition sowie der Ertrag in etwa gegenseitig aufheben.

Tabelle 14: Investition in Siliermittel bei 0,6 l pro Tonne Maissilage

EM-Silan Menge [Liter pro Tonne Substrat]			**0,6**
Gas-Steigerung	**Substratmenge [t]**	**EM-Menge [l]**	**EM-Kosten**
5%	7133	4280	13.062,21 €
7%	7000	4200	12.818,06 €
10%	6809	4085	12.468,47 €
12%	6687	4012	12.245,82 €
15%	6513	3908	11.926,37 €
18%	6347	3808	11.623,15 €

6.3 Messsysteme

Die Stoffstromanalyse zu Beginn der Analysephase hat ergeben, dass viele wichtige Größen und Werte aufgrund von nicht vorhandenen Messsystemen nicht erfasst werden können.

Die Anlage ist dennoch mit einigen Sensoren ausgestattet. Vor allem die Temperatur in den Gärbehältern sowie in den Vor- und Rücklaufleitungen wird erfasst. Des Weiteren werden die Füllstände der Gasspeicher gemessen. Von den Rühreinrichtungen im Fermenter, Nachgärer und Gärrestelager sowie den Ventilatoren im BHKW-Haus werden auch die Drehzahlen sowie die elektrischen Kennwerte erfasst.

6.3.1 Empfehlung verschiedener Messsysteme

Die Bandbreite an möglichen Messeinrichtungen für Biogasanlagen ist enorm groß. Es ist möglich mit Sensorik und Messmitteln unterschiedlichste Daten zu erfassen und zu verwerten. Hierbei muss angemerkt werden, dass eine Vielzahl von Daten zwar erfasst werden, jedoch für den Betrieb und die Aufrechterhaltung des Betriebes nicht von großer Bedeutung ist. Auf der anderen Seite wiederum sollten einige grundlegende Daten sehr wohl erfasst und wenn möglich auch gespeichert werden. Gerade im Bereich der Gasanalyse können frühzeitig erkannte Schwankungen oder Unstimmigkeiten spätere Ausfälle der Anlage womöglich verhindern.

Im Folgenden sollen nun verschiedene Bereiche der Biogasanlage betrachtet und Empfehlungen für mögliche Messsysteme gegeben werden.

6.3.1.1 Erfassen der Substratmenge

Wie anfangs beschrieben wird die Substratmenge vor dem Einbringen in den Einfülltrichter derzeit über eine zentrale Waage über die Achslast des Radladers oder Traktors erfasst. Dies ist eine gängige Methode und eignet sich solange die Massen der Fahrzeuge bekannt sind. Bei den Fahrzeugen variiert jedoch das Eigengewicht schon aufgrund der Füllstände an Treibstoff. Hinzu kommt, dass das Fahrzeug gar nicht erst gewogen wird, da die Waage nicht auf dem Weg zwischen Fahrsilo und Fermenter liegt.

Wesentlich zuverlässiger kann die Erfassung der Substratmassen direkt am Einfülltrichter erfolgen. Hierbei werden Wägezellen direkt an jedem Fuß des Einfülltrichters angebracht. Die Futtermenge wird nicht mehr über eine Zeitsteuerung geregelt, sondern über eine Differenzmessung des Behälterinhaltes gesteuert. Diese Wägezellen haben im Allgemeinen eine gute Messgenauigkeit, sind langlebig und sollten alle zwei Jahre auf ihre Genauigkeit geprüft werden.

Da bei der Biogasanlage mittels Förderschnecke das Substrat vom Einfülltrichter in den Fermenter eingebracht wird, sollte die Fördertechnik über eine ausreichende eigene Standfestigkeit verfügen. Es muss verhindert werden, dass durch die übertragene Last bei Anlauf und Betrieb der Schnecke das Messergebnis und damit die Futtermenge beeinflusst werden. Die Fördereinrichtung muss daher ausreichend mechanisch entkoppelt werden. [25, p. 4]

6.3.1.2 Stromverbrauch der gesamten Anlage

Da die abgebebene Strommenge eine wichtige Messgröße vor allem auch für die Abrechnung mit dem Netzbetreiber darstellt, wird diese zwangsläufig erfasst. Allerdings wäre auch die Stromaufnahme der Anlage selbst interessant.

Anhand dieser Messung können Rückschlüsse auf die Belastung der Rührwerke in Abhängigkeit vom Trockenmassegehalt des Gärgemisches gezogen werden. Die Messung der Motoren erfolgt schon auf der Anlage. Allerdings wäre ein separater Zähler ausschließlich für den Verbrauch der Biogasanlage zweckmäßig. [4, p. 84]

6.3.1.3 Wärmemengenmessung

Die Anlage versorgt sich selbst, den Hof sowie angrenzende Häuser und auch die Holztrocknung mit Wärme in Form von Warmwasser. Hierbei wäre es zweckmäßig, wenn die abgegebene Wärmemenge an den Fermenter und den Nachgärer erfasst werden könnte.

Diese Wärmemengenzähler bestehen im Regelfall aus einem Durchflussgeber, sowie gepaarten Temperaturfühlern für den Vor- und Rücklauf und einem Rechenwerk. Je nachdem, ob mit dem Wärmemengenzähler auch Abrechnungsmessungen durchgeführt werden sollen, müssen die Zähler von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) oder der internationalen Organisation für das gesetzliche

Messwesen (OIML) freigegeben und zugelassen sein. Sollte die Eichzeit abgelaufen sein, ist eine Nachkalibrierung unbedingt erforderlich. [25, p. 7]

6.3.1.4 Gasmengenmessung

Ein wichtiger Faktor für die Bestimmung des Anlagenzustandes ist die Erfassung der produzierten Gasmenge. Derzeit erfolgt nur eine indirekte Erfassung über den Füllstand der Gasspeicher.

Über die produzierte und verwendete Gasmenge können Rückschlüsse auf die Stabilität und Effizienz des Gärprozesses gezogen werden. Für die Lufteinblasung zur biologischen Entschwefelung dient sie als Bemessungsgrundlage. Allerdings stellt das Biogas wegen des Feuchtegehaltes und der korrosiven Eigenschaften erhöhte Anforderungen an das Messequipment. Dadurch haben sich vor allem strömungsmechanische Durchflussmesser und Massenstrommesser bewährt, welche ohne bewegliche Teile arbeiten. Bei der Volumenstrommessung ist zur Messung des Normvolumens eine Temperatur- und Druckkompensation am Messort erforderlich. Sollte eine direkte Messung des Massenstromes erfolgen, kann der Normvolumenstrom über die Biogas Normdichte errechnet werden. Diese hängt jedoch von der Biogaszusammensetzung ab. [4, p. 61]

6.3.1.5 Gasanalyse

Eine wichtige Messgröße bildet die Gaszusammensetzung. Sie gibt Auskunft über den aktuellen Zustand des produzierten Gases.

Die Gaszusammensetzung ist einerseits ein Indikator für die Stabilität des Gärprozesses. Andererseits kann in Verbindung mit der Gasmengenerfassung auch die Effizienz der Gasverwertung im BHKW beurteilt werden. Die drei wichtigsten Messwerte sind dabei der Gehalt an Methan (CH_4), der des Schwefelwasserstoffs (H_2S) sowie des Sauerstoffs (O_2). Über den Methangehalt im Biogas kann dessen Energiegehalt bestimmt werden. Zudem ist er ein sehr guter Indikator für den Zustand des Gärprozesses. Der Schwefelwasserstoffgehalt gibt Aufschluss über die Wirksamkeit des eingesetzten Entschwefelungsverfahrens. Er ist eine wichtige Messgröße für den Schutz der verwendeten Gasmotoren. Der Sauerstoffgehalt regelt mittels Luftzufuhr die biologische Entschwefelung. Eine weitere Messgröße ist die Erfassung des Wasserstoffanteils (H_2). Dieser ist ein guter Indikator für den Belastungsgrad der Fermenterbiologie. Hierzu muss angemerkt werden, dass dieser

Messwert bei biologischer Entschwefelung durch Lufteinblasung verfälscht werden könnte. Zur Plausibilitätsprüfung kann zudem noch die Messung des Kohlendioxidanteils (CO_2) optional erfolgen. [4, p. 63]

Die Gasanalyse kann an verschiedenen Orten der Anlage gemessen werden. Für die Analyse der Brenngaszusammensetzung sollte noch vor dem BHKW gemessen werden. Dadurch kann eine ausreichende Entschwefelung sowie die Verbrennungseigenschaften des Biogases ermittelt werden. Wird die Biogaszusammensetzung in den Gärbehältern ermittelt, ist eine bessere Kontrolle des Fermentationsprozesses möglich. Gleichsam ist dadurch eine bessere Anlagensteuerung möglich. Sollte das zu messende Gas noch vor der Analyse gekühlt werden um Feuchtigkeit auszukondensieren, so ist diese Messung besser reproduzierbar. Der so gewonnene Messwert gibt jedoch nicht direkt den Methanertrag wieder, da im Gasdurchflussmesser der feuchte Gasstrom gemessen wird.

Es gibt verschiedene Systeme welche zur Gasanalyse zum Einsatz kommen können. Die einfachste Möglichkeit stellt die Variante mit Reaktionsröhrchen („Dräger-Röhrchen“) dar. Dabei wird die ungefähre Konzentration einzelner Gaskomponenten bestimmt indem ein definiertes Gasvolumen durch ein Glasröhrchen gepumpt wird. Dafür müssen im Gasleitungssystem entsprechende Entnahmestellen für das Biogas vorgesehen sein.

Die manuelle Bestimmung mehrerer Gaskomponenten kann über Handmessgeräte erfolgen. Diese Methode wurde im Übrigen auch bei den Gasanalysen dieser Biogasanlage angewandt. Sollte die Erfassung automatisch erfolgen, kann die Gasanalyse durch stationäre Biogasanalysatoren an sogar mehreren Messstellen durchgeführt werden. Im Regelfall kann mit diesen Geräten das Hauptspektrum an Gasbestandteilen erfasst werden. Für die Messung von Methan und Kohlendioxid kommt meistens die Infrarot (IR)-Technik zum Einsatz. Zwar kann auch mittels Wärmeleitfähigkeitssensoren gemessen werden, jedoch weisen diese eine erhöhte Querempfindlichkeit auf. Daher sollte für die Messung des Sauerstoffgehaltes ein separater Sensor verwendet werden. Sauerstoff, Schwefelwasserstoff und Wasserstoff werden dabei elektrochemisch bestimmt. Gerade der Sauerstoff kann auch paramagnetisch bestimmt werden. Mit Ausnahme von Wasserstoff und Schwefelwasserstoff liegt die Genauigkeit der Geräte bei ca. +/-2 % vom Messbereichsendwert (MBE). Die des Wasserstoffs liegt bei ca. +/-3 % vom MBE und

der des Schwefelwasserstoff bei ca. 10 % vom Messwert. Da die Sensoren Veränderungen unterliegen, sollten sie mindestens ein- bis zweimal im Jahr kalibriert werden. Bei elektrochemischen Sensoren muss zudem beachtet werden, dass diese im Laufe der Zeit „verbraucht“ werden können. Dies ist abhängig von der Häufigkeit der Messungen. [25, p. 9]

6.3.2 Vorstellung von Gasanalysemessgeräten

Auf dem Markt ist eine Vielzahl von Anbietern mobiler sowie stationärer Gasanalysemessgeräte vertreten. Bei der Messung und Analyse von Biogasen muss auf die Eignung der Messgeräte für die Biogasanwendung geachtet werden. Ein Gasdurchflussmessgerät, welches aus der Haustechnik zum Messen von Erdgas verwendet wird, könnte beispielsweise nicht für Biogas verwendet werden. Die aggressiven und korrosiven Eigenschaften würden das Messgerät beschädigen.

Die Firma AWITE Bioenergie GmbH bietet in diesem Zusammenhang ein stationäres Gasanalyse- und Durchflussmessgerät an, welches im Folgenden näher beschrieben wird. Es handelt sich dabei um das Analysesystem AwiFLEX Cool+. Ein Preis- und Komponentenangebot, welches auf die Anforderungen der Biogasanlage abgestimmt wurde ist zudem dem Anhang angefügt.

Den größten Anteil der Komponenten macht die Gasanalyseeinheit aus. Sie ist in der Lage Methan, Kohlendioxid, Schwefelwasserstoff, Wasserstoff sowie Sauerstoff zu messen. Die Erfassung der Gasbestanteile erfolgt sowohl im Fermenter als auch im BHKW.

Alle Messwerte können digital erfasst und mittels USB-Anschlusses auf einen USB-Stick geladen werden. Hierfür ist die Software AwiView notwendig. Des Weiteren wären analoge-, RS232-, Profibus- und Ethernetausgänge als Datenschnittstellen für das Messsystem erweiterbar. Innerhalb der Anlage erfolgt die Datenspeicherung auf einer 4 GB microSD Speicherkarte. Die Bedienung erfolgt über ein 7“ TFT Touchdisplay. [26, p. 3]

Abbildung 26: Awite Gasanalysemesssystem [26, p. 4]

Die Gasanalyseeinheit wird im Angebot um das Modul zur Gasmengenmessung erweitert. Dabei handelt es sich um einen thermischen Gasmassendurchflussmesser inklusive Methankompensation.

6.3.3 Fazit und Schlussbetrachtung

Die Messsysteme- und Anlagen sind zunächst mit einem hohen Investitionsaufwand verbunden. Diese Einmalkosten in Verbindung mit jährlichen oder zumindest regelmäßigen Wartungsaufwänden schrecken im ersten Moment ab. So lange die Biogasanlage gut läuft und keine Probleme aufzuweisen sind, mag eine Investition in Messmittel wenig sinnvoll erscheinen.

Tatsächlich ist es jedoch so, dass gerade eine frühzeitige Erkennung von Unregelmäßigkeiten in den erfassten Werten einem Ausfall der Anlage vorbeugen könnte. Dabei ist der Ausfall der Anlage für mehrere Wochen möglicherweise noch mit geringeren Kosten anzusetzen als eine mögliche notwendige Reparatur von Anlagenkomponenten.

Aus diesem Grund ist ein Messsystem in jedem Fall als Werterhaltungsmaßnahme anzusehen. Mit dieser Optimierungsmaßnahme kann der Wert der Anlage aufrechterhalten und mögliche Folgeschäden vermieden oder verringert werden.

Dem Anlagenbetreiber wurde ein Angebot der Firma Awite Bioenergie GmbH übergeben. Angebote weiterer Anbieter wurden zwar angefordert, entsprachen jedoch nicht den gewünschten Umfängen in Bezug auf das Messsystem.

6.4 Erstellung einer Checkliste zur Anwendung an Biogasanlagen

6.4.1 Zielsetzung und Grundlage der Checkliste

Die Checkliste soll dem Anwender helfen, auf einfache Art und Weise einen Gesamtüberblick zum Stand über seine jeweilige Biogasanlage zu erhalten. Mittels einfachen Fragen zur Biogasanlage soll der Benutzer durch die Checkliste geführt werden. Die Checkliste basiert in erster Linie auf den bisher gewonnenen Erkenntnissen dieser Arbeit. Durch sie soll dem Anwender die Möglichkeit gegeben werden eventuelle Schwachstellen aufgezeigt zu bekommen. Auch wenn eine Biogasanlage auf den ersten Blick gut funktioniert, können durch genauere Betrachtungen mögliche Defizite aufgezeigt werden.

6.4.2 Aufbau der Checkliste

Die Checkliste ist modular aufgebaut. Das bedeutet, dass viele Punkte unabhängig von den anderen betrachtet werden können. Dennoch gibt es einige Punkte welche in Abhängigkeit eines einzelnen Punktes stehen.

Zu jedem Punkt gibt es eine Erklärung zum Zweck der Fragestellung. Der Anwender soll damit in die Überprüfung der jeweiligen Anlage mit eingebunden werden und zu weiteren Lösungsmöglichkeiten angeregt werden. Sind für einen Checkpunkt Formeln oder Zusatzinformationen notwendig, so werden diese im Bereich Berechnung & Rechenweg hinzugefügt. Des Weiteren können die Ergebnisse einer Berechnung oder Messung in den Checkpunkt mit aufgenommen werden.

Mit der Checkliste werden verschiedene Einflüsse zusammengefasst. Diese Zusammenfassung ist so zu verstehen, als dass die einzelnen Checkpunkte jeweils Einfluss auf einen Themenbereich nehmen. So hat zum Beispiel der Fahrweg vom Silo zum Einfülltrichter einen Einfluss auf den Energieverbrauch. Außerdem wird neben dem Energieverbrauch auch der Anlagenzustand, die Gasproduktion- und Qualität sowie die Messtechnik betrachtet.

Im Analysekapitel dieser Arbeit war es aufgrund der fehlenden Messeinrichtungen beispielsweise nicht möglich, eine Aussage über die tatsächlich produzierte Gasmenge zu bilden. Da die erforderliche Gasmengenmesseinrichtung nicht vorhanden ist, musste die Gasmenge aus den eingesetzten Substraten errechnet werden. In Verbindung mit der Checkliste sollen nun beide Möglichkeiten in Betracht

gezogen werden. Wenn nun eine Messeinrichtung zur Erfassung der produzierten Gasmenge vorhanden ist, kann dieser Messwert einfach in die Checkliste mit aufgenommen werden. Sollte jedoch diese Messeinrichtung nicht gegeben sein, so wird dem Anwender mittels der Formeln und Rechenwege in der Checkliste die Möglichkeit zur Berechnung der produzierten Gasmenge gegeben. Dem Anwender stehen hierzu im Anhang an die Checkliste die Nährstoffgehalte sowie die Gaserträge der jeweils gängigsten Substrate und Cosubstrate zur Verfügung.

Beim Berechnungsverfahren muss jedoch angemerkt werden, dass die Ergebnisse immer auf Literaturwerten basieren. Sie bilden daher nur einen theoretischen Wert in Verbindung mit der real erfassten Massenerfassung ab. Aus diesem Grund sind diese errechneten Werte kritisch und nur als Anhaltswert zu betrachten.

Sämtliche Checkpunkte der Gasqualität sind abhängig vom Checkpunkt der Gasanalysemessung. Das bedeutet, dass die jeweiligen Gasbestandteile erst mit einem geeigneten Messmittel erfasst werden können.

6.4.3 Auszüge aus der Checkliste

Der folgende Auszug aus der Checkliste zeigt zwei markante Checkpunktarten und den allgemeinen Aufbau.

Die einzelnen Felder sind farblich markiert und zusammengefasst. Ist ein Mess- oder Berechnungsergebnis zu erwarten so können diese Werte immer in die hellblau markierten Felder eingefügt werden. Ist ein Feld nicht in Gebrauch oder soll es nicht genutzt werden, so wird es grau mit einem Kreuz hinterlegt.

Tabelle 15: Auszug aus der Checkliste

Bezeichung	Einfluss	Erklärung	Berechnung, Rechenweg oder notwendige Maßnahmen zur Bestimmung	Spezifizierte Werte	Ergebnis
Gasmengenmessung	Messtechnik	Die produzierte Gasmenge soll über ein Gasmengenmessgerät erfasst werden	Erfolgt die Gasmengenmessung über ein Gasmengenmessgerät? Die Gasmenge sollte zusätzlich und alternativ errechnet werden. Siehe dazu den Checkpunkt "Gasmengenberechung".		
Analyse Ergebnisse	Die Gasmenge wird über ein Messgerät erfasst.				
	Wenn Erfassung möglich, die Gasmenge stimmt mit der Gasmengenberechnung annähernd überein.				
	Wenn Erfassung möglich, die Gasmenge stimmt mit der Gasmengenberechnung nicht überein.				
	Die Gasmenge wird nicht erfasst.				
Faulraumbelastung (FB)	Gasproduktion	Die Faulraumbelastung hat Einfluss auf die Gasproduktion und sollte sich daher in einem spezifizierten Rahmen befinden.	$\frac{Gesamttrockenmasseaufkommen\ [kg]}{Fermentervolumen\ [m^3]}$	$FB_{unter} \leq 2\frac{kg}{m^3}$ $FB_{innen} \leq 4\frac{kg}{m^3}$ $FB_{über} > 4\frac{kg}{m^3}$	
Analyse Ergebnisse	Die Faulraumbelastung liegt innerhalb der spezifizierten Grenzwerte.				
	Die Faulraumbelastung liegt im oberen Bereich der spezifizierten Grenzwerte.				
	Die Faulraumbelastung liegt oberhalb der spezifizierten Grenzwerte.				
	Die Faulraumbelastung liegt unterhalb oder im unteren Bereich der Grenzwerte.				

Die vollständige Checkliste ist im Anhang hinterlegt und wird auch als PDF Datei dem Landwirt übergeben.

6.4.4 Kritische Betrachtung

Die Checkliste wurde in Anlehnung an die Erkenntnisse aus der Anlagenanalyse erstellt. Aus diesem Grund wurden die Punkte aus der Analysephase soweit wie möglich in die Checkliste übernommen. Soweit es möglich ist, sollen die Checklistenpunkte auch auf andere Biogasanlagen übernommen werden können. Die Checkliste hat jedoch noch keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Sie ist so aufgebaut, dass sie erweitert und ergänzt werden kann.

Es gibt eine Vielzahl von Biogasanlagen, welche sicherlich den gleichen oder ähnlichen Aufbau wie die zu untersuchende haben. Dennoch wird es auch immer Anlagen geben, welche unterschiedliche Prozessverfahren aufweisen.

Mit der Checkliste soll daher auch eine Anregung geschaffen werden wie sie bei anderen Biogasanlagen eingesetzt werden kann.

7 Zusammenfassung der Ergebnisse

Nach der Analyse des Anlagenzustandes und dem Vergleich mit den Literaturwerten kann der Biogasanlage ein überwiegend positiver Zustand ausgesprochen werden. Die Anlage funktioniert weitestgehend fehlerfrei und auch die ermittelten Messwerte stimmen meist mit den Literaturwerten überein. Dennoch gibt es Verbesserungspotential, welches vor allem in Bezug auf die Vorhersage von Problemen auf der Anlage eingesetzt werden könnte.

Durch die Stoffstromanalyse konnte die Anlage systematisch analysiert und deren Bestandteile untersucht werden. Hierbei ergaben sich vor allem Defizite im Bereich der Messtechnik. Durch den Einsatz von stationären Messmitteln könnten frühzeitig Maßnahmen gegen mögliche Anlagenausfälle ergriffen werden. Durch intensive Recherche bei den Herstellern konnte dem Anlagenbetreiber ein umfangreiches Angebot für eine messtechnische Ausstattung unterbreitet werden.

Nach der Reduzierung der Futtermengen wurde eine Steigerung des Methangasgehaltes gemessen. Hierbei muss jedoch angemerkt werden, dass zusätzlich noch GPS als Substrat der Anlage hinzugegeben wurde. Diese Maßnahme könnte ebenfalls für die Verbesserung der Gasqualität verantwortlich sein.

Durch den Einsatz von effektiven Mikroorganismen konnte, zumindest rechnerisch, eine Steigerung des Gasertrages ausgemacht werden. Die wirtschaftliche Betrachtung ergab zudem eine Amortisierung der Investitionen bei schon gering gesteigerten Gasmengen. Hierbei muss der Praxiseinsatz zeigen, ob die Berechnungen mit den tatsächlichen Resultaten übereinstimmen.

Mittels Software wurde die Anlage in ihrem aktuellen Zustand simuliert. Die Ergebnisse stimmen weitestgehend mit den tatsächlich ermittelten Werten überein. Zudem wurde noch die reduzierte Futtermenge sowie der Betrieb im thermophilen Temperaturbereich simuliert. Die simulierten Gaszusammensetzungen waren in allen drei Betriebszuständen nahezu identisch. Für eine detaillierte Vorhersage von Volumenströmen und Gaszusammensetzungen eignet sich die Software jedoch nur bedingt, da natürliche Schwankungen wie beispielsweise in der Substratqualität nicht mit in die Berechnungen eingebunden werden.

Abschließend wurde eine Checkliste für die Analyse von Biogasanlagen erstellt. Die Checkliste lehnt sich an die Erkenntnisse aus der Anlagenanalyse an. Es ist möglich, die Checkliste auch bei anderen Biogasanlagen universell einzusetzen.

8 Schlussbetrachtung & Diskussion

Die Optimierungen von bestehenden Biogasanlagen wird in den nächsten Jahren einen immer größeren Stellenwert einnehmen. Wie die Beschreibung und Analyse der Anlage zeigte, ist das hauptsächliche Siliermittel zum Betrieb der Anlage Mais.

Im Übrigen gilt dies für die meisten in Bayern betriebenen Anlagen. Das bedeutet, dass durch die vielen Anlagen auch mehr Mais angebaut wird. Für die Böden, das Trinkwasser und die Artenvielfalt sowie das Landschaftsbild hat dies meist negative Folgen. Aufgrund der enormen Maisverbräuche schnellt der Pachtpreis für Ackerland nach oben was letztendlich die Landwirte unter Druck setzt. In einigen Regionen mussten schon Betriebe aufgegeben werden, weil die Pachtpreise nicht mehr beglichen werden konnten. [27]

Eine weitere Negativentwicklung aus betriebswirtschaftlicher Sicht stellt der Stopp der Anlagenförderung vor eineinhalb Jahren dar. Somit sind seit dem Förderungsstopp keine 20 Anlagen in Bayern mehr in Betrieb gegangen. [27]

Ein weiterer wichtiger Ansatz ist die humanitäre Sichtweise. Letztendlich werden für den Betrieb der Biogasanlagen Futtermittel eingesetzt. Dies mag aus Sicht eines Landes mit guter Lebensmittelversorgung als zweitrangig erscheinen. Doch sollte in diesem Zusammenhang beachtet werden, dass die Bevölkerungszahl stetig wächst und der Platz für den Anbau von Lebensmitteln und auch für die Versorgung von Nutztieren immer begrenzter wird.

Die Forschung für die effiziente Nutzung der Betriebsmittel sollte daher immer weiter vorangetrieben werden.

Der Begriff des „Repowering“ hat sich in der Biogasbranche zu einer gängigen Definition für die Optimierung von Biogasanlagen entwickelt. Forciert wird neben dem Ausbau der Wärmenutzung sowie der Erhöhung der BHKW-Leistung auch der Ersatz des BHKW durch ein Aggregat mit höherem Wirkungsgrad. Generell zeichnet sich jedoch auch ab, in Zukunft mehr den Gesamtprozess zu betrachten. Dieser erstreckt sich von einer verbesserten Substratnutzung über die Verringerung des Energieverbrauches bis hin zur Verwertung schwieriger Substrate. Allerdings stellt sich auch vermehrt heraus, dass zunächst die bestehenden Anlagen in Ordnung gebracht werden sollen bevor ein Ausbau durch weitere Komponenten stattfindet. [28, pp. 12-14]

Auf den ersten Blick, zu Beginn der Arbeit machte die Anlage einen tadellosen und gut funktionierenden Eindruck. Doch bei näherer Betrachtung stellten sich verschiedene Mängel heraus. Diese können durch geeignete Maßnahmen im überschaubaren Rahmen behoben oder zumindest in Angriff genommen werden. Es wird auch hier immer wieder Verbesserungspotential geben. Damit wird durch kontinuierlichen Einsatz ein wirtschaftlicherer Betrieb der Biogasanlage ermöglicht.

Literaturverzeichnis

[1] J. Rath, „http://www.maiskomitee.de/web/public/Fakten.aspx/Statistik/Deutschland/Statistik_Biogas," OINK Media GmbH. [Online]. [Zugriff am 15 11 2015].

[2] A. Ö. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., Leitfaden Biogas, Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), 2010.

[3] „https://www.google.de/maps," [Online]. [Zugriff am 06 12 2015].

[4] B. L. f. Umwelt, Biogashandbuch Bayern - Materialienband, Grundlagen und Technik, Augsburg, 2007.

[5] B. Eder, Biogas Praxis, Staufen bei Freiburg: Ökobuch, 2012.

[6] Siemens Simatik Anlagensteuerung, „Anlagenschema Fermenter," Vierkirchen, 2015.

[7] Schrage Rohrkettensystem GmbH Conveying Systems, „http://www.schrage.de/schrage-informiert/technik-lexikon/schneckenfoerderer.html," ARTgerecht Werbeatelier, 2014. [Online]. [Zugriff am 07 02 2016].

[8] Josef & Andreas Kreutzer GmbH, Biogastagebuch, Vierkrichen, 2015.

[9] M. Kaltschmitt, H. Hartmann und H. Hofbauer, Energie aus Biomasse, Berlin, Heidelberg: Springer, 2009.

[10] A. Kreutzer, „Stichproben Gaszusammensetzung Messung," Vierkirchen, 2015.

[11] Siemens Simatik Anlagensteuerung, „Anlagenschema Plattform," Vierkrichen, 2015.

[12] A. Kreutzer, Interviewee, *Wärmemengen 2015.* [Interview]. 01 02 2016.

[13] Umweltbundesamt, „http://www.umweltbundesamt.de/stoffstromanalyse," Studio Good, Berlin. [Online]. [Zugriff am 27 10 2015].

[14] A. Lemmer, „Biogaserzeugung in kleinen," Landesanstalt für Agrartechnik und , Hohenheim, 2012.

[15] G. Häring, M. Sonnleitner, W. Zörner, E. Brügging, C. Bücker, C. Wetter und R. Vogt, „Handreichung zur Optimierung von Biogasanlagen," Hochschule Ingolstadt, Fachhochschule Münster, IFEU Heidelberg, Ingolstadt, 2010.

[16] MAN, „Biogasmotor E 2876 LE 302 Technische Daten," 2010.

[17] Binder GmbH, „Technische Daten Combimass GA-m," Ulm, 2013.

[18] IFAK e.V. Magdeburg, „SIMBA biogas," Magdeburg, 2015.

[19] IFAK e.V. Magdeburg, „Simba Version 1.1.42," Magdeburg, 2014.

[20] J. Laaß, „EM-Sanierung," webdesign, [Online]. Available: http://www.em-sanierung.de/5. [Zugriff am 10 11 2015].

[21] E. H. mbH, „EM Einsatz bei Holz als Brennstoff," [Online]. Available: http://www.em-rako.de/html/energie.html. [Zugriff am 2015 07 06].

[22] P. &. B. Preusche, „EM-Silan, Silierhilfsmittel 1000,0L inkl. IBC," Gambio.de, 2012. [Online]. Available: http://em-natur.de/Garten/Bodenverbesserung/EMIKO-Garten-und--Bodenaktivator--Bodenhilfstoff--13-14-15-16-17-18-19-74-75-76-121-122-123-127-128-129-130-131.html. [Zugriff am 12 11 2015].

[23] E.-T. Z.-S. GmbH, „Dosierpumpe für Silage," Internetagentur 8works, 2014. [Online]. Available: http://em-sued.de/dosierpumpe-silage. [Zugriff am 12 11 2015].

[24] J. Laaß, „Effektive Mikroorganismen, FAQ Landwirtschaft," www.korschmedia.de, [Online]. Available: http://www.em-sanierung.at/modules/smartfaq/faq.php?location_id=410&faqid=13993. [Zugriff am 2015 11 12].

[25] ALB Bayern e.V., „Emfehlungen für die messtechnische Ausstattung landwirtschaftlicher Biogasanlagen," Freising, 2012.

[26] AWITE Bioenergie GmbH, „Technische Daten AWIFLEX COOL+ / XL," Langenbach, 2015.

[27] C. Sebald, „http://www.sueddeutsche.de/bayern/subventionen-laufen-aus-die-angst-der-biogas-bauern-1.2748751-2," https://www.plista.com/. [Online]. [Zugriff am 29 12 2015].

[28] W. Rudolph, „"Mehr rausholen"," *Biogas Jornal,* Nr. 1, pp. 12-14, 2016.

[29] Spektrum Akademischer Verlag, „http://www.spektrum.de/lexikon/ernaehrung/pathogene-keime/6766," 2001. [Online]. [Zugriff am 2016 02 2016].

Anhang

Tabelle 16: Übersicht über Substrateigenschaften [2, p. 85]

Substrat	TS [%]	oTS [% TS]	N [a]	P_2O_5 [% TS]	K_2O	Biogasertrag [Nm³/t FM]	CH_4-Ertrag [Nm³/t FM]	CH_4-Ausbeute [Nm³/t oTS]
Wirtschaftsdünger								
Rindergülle	10	80	3,5	1,7	6,3	25	14	210
Schweinegülle	6	80	3,6	2,5	2,4	28	17	250
Rindermist	25	80	5,6	3,2	8,8	80	44	250
Geflügelmist	40	75	18,4	14,3	13,5	140	90	280
Pferdekot ohne Stroh	28	75	n. a.	n. a.	n. a.	63	35	165
Nachwachsende Rohstoffe								
Maissilage	33	95	2,8	1,8	4,3	200	106	340
Getreide-GPS	33	95	4,4	2,8	6,9	190	105	329
Grünroggensilage	25	90				150	79	324
Getreidekörner	87	97	12,5	7,2	5,7	620	329	389
Grassilage	35	90	4,0	2,2	8,9	180	98	310
Zuckerrüben	23	90	1,8	0,8	2,2	130	72	350
Futterrüben	16	90	n. a.	n. a.	n. a.	90	50	350
Sonnenblumensilage	25	90	n. a.	n. a.	n. a.	120	68	298
Sudangras	27	91	n. a.	n. a.	n. a.	128	70	286
Zuckerhirse	22	91	n. a.	n. a.	n. a.	108	58	291
Grünroggen[b]	25	88	n. a.	n. a.	n. a.	130	70	319
Substrate der verarbeitenden Industrie								
Biertreber	23	75	4,5	1,5	0,3	118	70	313
Getreideschlempe	6	94	8,0	4,8	0,6	39	22	385
Kartoffelschlempe	6	85	9,0	0,7	4,0	34	18	362
Obstschlempe	2,5	95	n. a.	0,7	n. a.	15	9	285
Rohglycerin[c]	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	250	147	185
Rapspresskuchen	92	87	52,4	24,8	16,4	660	317	396
Kartoffelpülpe	13	90	0,8	0,2	6,6	80	47	336
Kartoffelfrucht-wasser	3,7	73	4,5	2,8	5,5	53	30	963
Z-Pressschnitzel	24	95	n. a.	n. a.	n. a.	68	49	218
Melasse	85	88	1,5	0,3	n. a.	315	229	308
Apfeltrester	35	88	1,1	1,4	1,9	148	100	453
Rebentrester	45	85	2,3	5,8	n. a.	260	176	448
Grün- und Rasenschnitt								
Grünschnitt	12	87,5	2,5	4,0	n. a.	175	105	369

a. N-Gehalte im Gärrest ohne Berücksichtigung von Lagerverlusten
b. angewelkt
c. in der Praxis stark variierende Ergebnisse, abhängig vom Verfahren der Biodieselherstellung

Tabelle 17: Mindesteigenschaften an Gase für Gasmotoren [4, p. 73]

Eigenschaften	Einheit
Unterer Heizwert	> 4 kWh / m^3_n
Methangehalt	> 40 Vol.-%
Gesamtschwefel	< 2.300 mg / m^3_n CH_4
Chlor	< 100 mg / m^3_n CH_4
Fluor	< 50 mg / m^3_n CH_4
Summe Chlor und Fluor	< 100 mg / m^3_n CH_4
Silizium	< 10 mg / m^3_n CH_4
Feststoffanteil (Teilgröße < 1 µm)	< 30 mg / m^3_n CH_4
Schwefelwasserstoff	< 0,15 Vol.-%

Tabelle 18: Inhaltsstoffe vom Biogas [9, p. 911]

Bestandteil	Konzentration
Methan (CH_4)	45 bis 75 Vol.-%
Kohlenstoffdioxid (CO_2)	25 bis 55 Vol.-%
Wasser (H_2O)	2 (20 °C) bis 7 Vol.-% (40 °C)
Schwefelwasserstoff (H_2S)	20 bis 20 000 ppm (2 Vol.-%)
Stickstoff (N_2)	< 5 Vol.-%
Sauerstoff (O_2)	< 3 Vol.-%
Wasserstoff (H_2)	< 1 Vol.-%

Bezeichung	Einfluss	Erklärung	Berechnung, Rechenweg oder notwendige Maßnahmen zur Bestimmung	Spezifizierte Werte	Ergebnis
Fahrweg vom Silo zum Einfülltrichter	Energieverbrauch	Die Fahrwege vom Fahrsilo zum Einfülltrichter sollen möglichst kurz sein.	Bestimmung der Strecke zwischen Silo und Einfülltrichter. Ist möglicherweise noch ein Umweg über die Waage notwendig?		
Analyse Ergebnisse	Der kürzeste Fahrweg wird gewählt.				
	Es sind Verbesserungen möglich.				
	Der Fahrweg ist nicht ideal, aber eine Verbesserung ist unter gerechtfertigtem Aufwand nicht möglich.				
Substrateinbringung	Energieverbrauch	Die Einbringung von Substrat aus dem Einfülltrichter soll mit möglichst wenig Energieverbrauch möglich sein.	Ist der Einfülltrichter im Niveau oberhalb des Fermenters angebracht, oder muss das Substrat zunächst nach oben befördert werden?		
Analyse Ergebnisse	Der Einfülltrichter befindet sich oberhalb des Fermenters - das Substrat muss nach unten gepumt werden.				
	Der Einfülltrichter befindet sich unterhalb des Fermenters - das Substrat muss nach oben gepumt werden.				
Massenerfassung	Messtechnik	Die Massenerfassung soll möglichst genau erfolgen und keinen Spielraum für Messungenauigkeiten bieten.	Erfolgt die Massenerfassung durch die Fahrzeugwaage, oder direkt über den Einfülltrichter? Findet die Futterdosierung in den Fermenter über die Zeit, oder über eine Wägevorrichtung nach einem bestimmten Gewichtsmenge statt?		
Analyse Ergebnisse	Die Dosierung findet nicht über die Zeit statt, sondern über eine Wägevorrichtung direkt vor dem Fermenter.				
	Die Dosierung findet über einen konstanten Zeitrahmen statt, die Masse wird über die Fahrzeugwaage durch Abzug des Fahrzeuggewichtes ermittelt.				
Gasmengenmessung	Messtechnik	Die produzierte Gasmenge soll über ein Gasmengenmessgerät erfasst werden.	Erfolgt die Gasmengenmessung über ein Gasmengenmessgerät? Die Gasmenge sollte zusätzlich und alternativ errechnet werden. Siehe dazu den Checkpunkt "Gasmengenberechung".		
Analyse Ergebnisse	Die Gasmenge wird über ein Messgerät erfasst.				
	Wenn Erfassung möglich, die Gasmenge stimmt mit der Gasmengenberechnung annähernd überein.				
	Wenn Erfassung möglich, die Gasmenge stimmt mit der Gasmengenberechnung nicht überein.				
	Die Gasmenge wird nicht erfasst				

Abbildung 27: Biogas Checkliste Teil 1

Bezeichung	Einfluss	Erklärung	Berechnung, Rechenweg oder notwendige Maßnahmen zur Bestimmung	Spezifizierte Werte	Ergebnis
Gasmengenberechnung	Messtechnik	Die Gasmenge soll anhand der eingesetzten Subsrtrate berechnet werden.	$\frac{Substratmenge\ [kg]\ x\ TS\ Gehalt\ [\%]\ x\ oTS\ Gehalt\ [\%]\ x\ Methanausbeute\ [ln/kg\ oTS]}{1000}$		
Analyse Ergebnisse	Die errechnete Gasmenge stimmt mit der gemessenen Gasmenge annähernd überein				
	Die errechnete Gasmenge stimmt mit der gemessenen Gasmenge nicht überein				
BHKW Leistung	Anlagenzustand	Die Leistung soll anhand der produzierten Gasmenge ermittelt werden, vornehmlich über die Messtechnik	$\frac{Wirkungsgrad\ Gasmotor\ [\eta]x\ Heizwert\ Gas\ [Hi]x\ \ Produziertes\ Gasvolumen\ [V]}{24}$		
Analyse Ergebnisse	Die errechnete Leistung stimmt mit der spezifizierten Motorleistung annähernd überein				
	Die errechnete Leistung stimmt mit der spezifizierten Motorleistung überein				
Faulraumbelastung (FB)	Gasproduktion	Die Faulraumbelastung hat Einfluss auf die Gasproduktion und sollte sich daher in einem spezifizierten Rahmen befinden	$\frac{Gesamttrockenmasseaufkommen\ [kg]}{Fermentervolumen\ [m^3]}$	$FB_{unter} \leq 2\frac{kg}{m^3}$ $FB_{innen} \leq 4\frac{kg}{m^3}$ $FB_{über} > 4\frac{kg}{m^3}$	
Analyse Ergebnisse	Die Faulraumbelastung liegt innerhalb der spezifizierten Grenzwerte.				
	Die Faulraumbelastung liegt im oberen Bereich der spezifizierten Grenzwerte.				
	Die Faulraumbelastung liegt oberhalb der spezifizierten Grenzwerte.				
	Die Faulraumbelastung liegt unterhalb oder im unteren Bereich der Grenzwerte.				
Gasspeichervolumen	Anlagenzustand	Der Gasspeicher soll Schwankungen im Gasverbrauch ausgleichen.	$\frac{Täglich\ produzierte\ Biogasmenge[m^3]}{Gasspeichervolumen[m^3]}$	$V_{über} > 50\%$ $V_{innen} > 20\%$ $V_{unter} < 20\%$	
Analyse Ergebnisse	Das Speichervolumen liegt oberhalb des spezifiezierten Grenzwertes.				
	Das Speichervolumen liegt innerhalb des spezifiezierten Grenzwertes.				
	Das Speichervolumen liegt unterhalb des spezifiezierten Grenzwertes.				

Abbildung 28: Biogas Checkliste Teil 2

Bezeichung	Einfluss	Erklärung	Berechnung, Rechenweg oder notwendige Maßnahmen zur Bestimmung	Spezifizierte Werte	Ergebnis
Gasanalysemessung	Messtechnik	Die Anlage sollte über ein Messequipment zur Gasanalyse verfügen.	Die Gasbestanteile werden über Messpunkte am Fermenter und vor dem Motor gemessen.		
Analyse Ergebnisse	Der Methangasgehalt kann erfasst werden.				
	Der Kohlenstoffdioxidgehalt kann erfasst werden.				
	Der Sauerstoffgehalt wird erfasst.				
	Der Schwefelwasserstoffgehalt wird erfasst.				
	Der Wasserstoffgehalt wird erfasst.				
Temperatur	Messtechnik	Die Anlage sollte über ein System zur Erfassung der Temperatur verfügen	Erfassung der Temperatur an den Warmwasservor- und Rücklaufleitungen, sowie im Fermenter und Nachgärer.		
Analyse Ergebnisse	Die Temperatur wird erfasst				
	Die Temperatur wird nicht erfasst				
Wärmemenge	Messtechnik	Die Anlage sollte über ein System zur Erfassung der Wärmemenge verfügen.	Erfassung der Wärmemenge an den relevanten Warmwasservor- und Rücklaufleitungen.		
Analyse Ergebnisse	Die Wärmemenge wird erfasst.				
	Die Wärmemenge wird nicht erfasst.				
Ausfälle der Anlage	Anlagenzustand	Die Anlage sollte keine Ausfälle aufweisen, welche durch Vorhersage vermeidbar gewesen wären.	Sollte es in der letzten Zeit zu Ausfällen der Anlage gekommen sein, so könnten die Gründe in den folgenden Ursachen liegen.		
Analyse Ergebnisse	Die Anlage ist aufgund höherer Gewalt ausgefallen, wodurch eine Vorhersage nicht möglich war (z.B. Stromausfall).				
	Die Anlage ist ausgefallen und die Ursachen sind weitestgehend ergründet.				
	Die Anlage ist ausgefallen und die Ursachen sind weitestgehend unergründet.				
	Der Ausfall der Anlage hätte durch Messtechnik vorhergesehen werden können.				
	Der Ausfall der Anlage hätte durch Messtechnik nicht vorhergesehen werden können.				

Abbildung 29: Biogas Checkliste Teil 3