



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Hochschule für angewandte Wissenschaften

Fakultät Life Sciences

Substratdesintegration bei einer Biogasanlage durch Ultraschalltechnik

Bachelor-Thesis

Studiengang Umwelttechnik

vorgelegt von

Katarina Schröder

Matrikelnummer 1935380

am 04.06.2012

Gutachter: Prof. Dr. Marion Siegers (HAW Hamburg)

Gutachter: Dipl.-Ing. Torge Gummels (B.A.U.M. Consult AG)

Die Abschlussarbeit wurde betreut von und erstellt bei der Firma B.A.U.M. Consult AG in Zusammenarbeit
mit der Firma Ultrawaves Wasser & Umwelttechnik GmbH

VORWORT

Steigende Öl- und Gaspreise sowie die Furcht vor den Folgen eines Klimawandels, verursacht durch CO₂-Emissionen aus fossilen Brennstoff-Quellen, haben in den letzten Jahren zu einer großen Nachfrage nach regenerativen Energien geführt. Neben Windkraft- und Solaranlagen hat vor allem die Nutzung von Biomasse an Bedeutung gewonnen. In Form von Holz als Brennstoff schon seit Jahrtausenden von den Menschen genutzt, erschließen sich heute viele neue Möglichkeiten, Biomasse für die Energieversorgung zu verwenden. Neben der Nutzung nachwachsender Rohstoffe wie Grünschnitt, Energiepflanzen und Holz als Brennstoff ist die Umwandlung von biologischem Material in Biogas möglich geworden. Dieses Biogas kann, nach entsprechender Reinigung und Aufbereitung, in das Erdgasnetz eingespeist werden und bietet so den Vorteil einer standortunabhängigen, dezentralen Verwendungsmöglichkeit. In den meisten Fällen wird das Gas in einem Blockheizkraftwerken verstromt. Bei der Verbrennung des Biogases werden Strom und Wärme erzeugt, die entweder direkt vom Erzeuger genutzt werden oder in Nah- beziehungsweise Fernwärmetrassen und das Stromnetz eingespeist werden. Unterstützt durch Instrumente der Bundesregierung wie das Gesetz zum Vorrang Erneuerbarer Energien (EEG) sind Biogasanlagen in vielen Bereichen, zum Beispiel in der Landwirtschaft oder in Anbindung an kleinere Kommunen, lukrativ geworden. Der Ertrag von Biogas kann durch verschiedene Techniken wie dem Einbringen von Enzymen oder der Vorbehandlung des Substrates gesteigert werden. Eine neue Technik zur Behandlung des Substrates und zur Verbesserung der Gasausbeute ist die Beschallung mit Ultraschall, deren Effekte und Möglichkeiten in der vorliegenden Arbeit untersucht werden.

ZUSAMMENFASSUNG

Diese Arbeit befasst sich mit der Untersuchung der Effizienz und den Einflüssen von Ultraschalltechnik im Biogasbereich. Die Firma Ultrawaves Wasser & Umwelttechnologie hat der Firma B.A.U.M. Consult AG probeweise für sechs Monate ein Ultraschallgerät zur Einbindung in ihre Biogasanlage vermietet. Aus dem Nachgärer der Biogasanlage wird Substrat entnommen, welches mit Ultraschall behandelt wird. Der Ultraschall bewirkt die Entstehung von Kavitationseffekten, durch die Scherkräfte hervorgerufen werden, welche die Substratzellen zerstören. Die aufgeschlossenen Zellbestandteile werden zurück in den Hauptfermenter geführt. Durch die verbesserte Verfügbarkeit von Nährstoffen arbeiten die Bakterien im Fermenter besser und der Biogasertrag der Anlage steigt.

In der vorliegenden Arbeit wird untersucht, auf welche Bereiche sich die Ultraschall-Desintegration neben der strukturellen Veränderung des Substrates auswirkt.

Im ersten Kapitel dieser Arbeit wird die Aufgabenstellung der Bachelor-Thesis weiter ausgeführt und erläutert. Daneben werden der Auftraggeber der Arbeit, die Firma B.A.U.M. Consult AG und die Firma Ultrawaves Wasser & Umwelttechnologien GmbH, welche den Ultraschallreaktor entwickelt hat, vorgestellt.

Im zweiten Kapitel wird das benötigte theoretische Hintergrundwissen zum Thema Biogas vermittelt. Es wird auf die Biogassynthese, verfahrenstechnische Messgrößen wie pH-Wert und Trockensubstanzgehalt sowie auf die Betriebsparameter wie Substratzufuhr und Viskosität eingegangen.

Im dritten Kapitel erfolgt die Analyse. Nach einer kurzen Darstellung der durch den Ultraschallreaktor beeinflussten Parameter wird auf diese einzeln eingegangen. Es werden Messwerte der Biogasanlage ausgewertet und analysiert. Abweichungen und Schwankungen werden erklärt und es wird untersucht, ob und wie sich die Ultraschall-Desintegration auf diese Messwerte auswirkt.

Nach der Untersuchung von den Kriterien Gasertrag, Substratzufuhr, Prozessgrößen, Energieverbrauch, Abbaugrad des Substrates und täglicher Betrieb in Kapitel drei wird in Kapitel vier ein Zwischenfazit gezogen.

In Kapitel fünf wird die Anschaffung des Ultraschallreaktors unter Einbeziehung der in Kapitel drei untersuchten Größen wirtschaftlich ausgewertet.

In Kapitel sechs werden die Ergebnisse der fachlichen und wirtschaftlichen Untersuchungen zusammengefasst und Handlungs- beziehungsweise Optimierungsvorschläge gemacht.

Kapitel sieben enthält das Quellen- und Literaturverzeichnis.

Die Fragestellung nach der Effizienz der Anlage kann, aufgrund der bisherigen kurzen Laufzeit der Ultraschalldesintegration (Einbindung des Systems am 02.03.2012, Ende der Datenaufnahme 31.04.2012), in dieser Arbeit nicht eindeutig beantwortet werden. Da die Mikroorganismen im Fermenter, kurz die Biologie, Zeit brauchen, um sich an die veränderten Gegebenheiten anzupassen, konnten nahezu keine Effekte der Ultraschall-Desintegration nachgewiesen werden. Einzig die Viskosität hat sich durch den Einsatz des Ultraschallgeräts verringert, was sich positiv auf den Energiebedarf der Biogasanlage und die Biogasproduktion auswirkt.

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung in Kapitel sechs zeigt, dass sich die Investition in das Ultraschallgerät, sobald Substrateinsparungen von mindestens 10 % auftreten, in 3,5 Jahren amortisieren wird.

INHALTSVERZEICHNIS

Vorwort	I
Zusammenfassung	II
Inhaltsverzeichnis.....	III
Abbildungsverzeichnis.....	V
Tabellenverzeichnis.....	V
Formelverzeichnis	VI
Abkürzungsverzeichnis.....	VI
Einheitenverzeichnis	VI
1 Einführung.....	1
1.1 Aufgabenstellung.....	1
1.2 Der Auftraggeber	1
1.3 Ultrawaves Wasser & Umwelttechnologien GmbH.....	1
2 Theoretischer Hintergrund.....	2
2.1 Biogas	2
2.1.1 Synthese und beteiligte Mikroorganismen	2
2.1.2 Komponenten.....	5
2.1.3 Substrat	5
2.2 Verfahrenstechnische Messgrößen	7
2.2.1 Beeinflussung des Methangehalts	7
2.2.2 Temperatur	7
2.2.3 pH-Wert.....	8
2.2.4 Verhältnis flüchtige organische Säuren zu totalen alkalischen Carbonaten (FoS-TAC-Wert)	8
2.2.5 Trockensubstanz	8
2.2.6 Glühverlust / Gehalt an organischer Trockensubstanz (oTS)	9
2.2.7 Nährstoffversorgung	9
2.3 Betriebsparameter	10
2.3.1 Substratzufuhr.....	10
2.3.2 Faulraumbelastung und Verweilzeit	10
2.3.3 Durchmischung	11
2.3.4 Viskosität	11
2.3.5 Abbaugrad des Substrates	11
2.3.6 Silagesickersaft.....	12
2.4 Biogasanlagen der Firma B.A.U.M. Consult.....	13

2.4.1	Substrat und Zusatzstoffe	14
2.4.2	Substratlager	15
2.4.3	Hauptfermenter und Nachgärer	15
2.4.4	Gärproduktlager	15
2.4.5	Gasaufbereitung und Notgasfackel	16
2.4.6	Energetische Anbindung in Gönnebeck	16
2.5	Ultraschall-Desintegration (USD).....	17
2.5.1	Ultraschall	17
2.5.2	Kavitation	18
2.5.3	Funktionsweise der Ultraschall-Desintegration.....	19
2.5.4	Herstellerversprechen.....	21
2.5.5	Einbindung in die Biogasanlage.....	21
3	Analyse.....	22
3.1	beeinflusste Faktoren	22
3.2	Gasertrag	22
3.2.1	Ertragsbezugsgrößen.....	23
3.2.2	Vergleich zu Vorjahreswerten der Gasproduktion.....	24
3.2.3	Methangehalt.....	27
3.3	Substratzufuhr	29
3.3.1	Substratmengen nach Einbindung der Ultraschall-Desintegration.....	29
3.3.2	Benötigte Spurenelemente	29
3.3.3	Eingesetzte Enzymmenge.....	30
3.4	Physikalische und Chemische Messgrößen	31
3.4.1	pH-Wert.....	31
3.4.2	Sauerstoffkonzentration	31
3.4.3	Schwefelwasserstoffkonzentration	31
3.4.4	Gehalt an Trockensubstanz und organischer Trockensubstanz	33
3.4.5	Viskosität	34
3.5	Energieverbrauch	35
3.6	Abbaugrad des Substrates	37
3.7	Täglicher Betrieb.....	38
4	Zwischenergebnis.....	39
5	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.....	41
6	Fazit und Handlungsempfehlungen	44
7	Quellenverzeichnis	46

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Hydrolytische Spaltung von Amylose.....	3
Abbildung 2: Schematische Darstellung des Anaeroben Abbaus	4
Abbildung 3: Fließschema der Gärstrecke der Biogasanlage	13
Abbildung 4: Substratanalyse der Firma Schaumann BioEnergy	14
Abbildung 5: Frequenzbereich des Ultraschalls	17
Abbildung 6: Blasenbildung bei der Kavitation	18
Abbildung 7: Aufbau des Ultraschallgenerators	19
Abbildung 8: Aufbau des Schwinggebildes	20
Abbildung 9: Schematische Darstellung der Zerstörung der Biomasse nach Ultraschallbehandlung	20
Abbildung 10: Ultraschall-Gerät im Container vor der Biogasanlage	21
Abbildung 11: Ultraschallgerät im Container vor der Biogasanlage	21
Abbildung 12: Durch Ultraschall-Desintegration (USD) beeinflusste Größen.....	22
Abbildung 13: Biogaserträge in Abhängigkeit zur Verweildauer bei zwei unterschiedlichen Häcksellängen.....	24
Abbildung 14: Gasproduktion und Füttermenge der BGA 2	25
Abbildung 15: Verhältnis Gasertrag / Füttermenge.....	26
Abbildung 16: Methangehalt des Biogases der BGA 2.....	28
Abbildung 17: Schwefelwasserstoffkonzentration im Biogas	32
Abbildung 18: Gehalt an organischer Trockensubstanz.....	33
Abbildung 19: Gehalt an Trockensubstanz.....	34
Abbildung 20: Viskositäten der BGA 1 und BGA 2 im Vergleich bei verschiedenen Scherraten.....	35
Abbildung 21: Strombedarf der BGA 2.....	36
Abbildung 22: Kostenersparnis durch USD	42
Abbildung 23: Kostenentwicklung in den nächsten 10 Jahren	43

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Mikroorganismen der Biogasbildung	2
Tabelle 2: Durchschnittliche Werte für den Inhaltsstoffgehalt von Biogas	5
Tabelle 3: Mögliche Substrate für die Biogaserzeugung.....	6
Tabelle 4: Stoffeigenschaften von Maissilage	6
Tabelle 5: Parameter, die sich auf den Methangehalt des Biogases auswirken	7
Tabelle 6: Temperaturbereiche und spezifische Bakteriengruppen	7
Tabelle 7: Mindestanforderungen für die Methanogenese.....	9
Tabelle 8: Gasausbeute pro Station auf der Gärstrecke	15
Tabelle 9: Gaserträge in Abhängigkeit der Silagesaftzusammensetzung.....	23
Tabelle 10: Energie- und Personaleinsparung durch die Ultraschall-Desintegration (USD) im Bereich Fermenterbefüllung	37
Tabelle 11: Zusammenfassung Analyseergebnisse des Kapitels 3	40
Tabelle 12: Änderung der Kostenstruktur durch Ultraschall-Desintegration (USD) im Vergleich zum Betrieb ohne USD.....	41
Tabelle 13: Amortisationszeiten und Gewinn bei unterschiedlichen Substrateinsparungen	42

FORMELVERZEICHNIS

Formel 1: Methanbildung durch Essigsäurespaltung.....	4
Formel 2: Methanbildung aus Kohlenstoffdioxid und Wasserstoff	4
Formel 3: Faulraumbelastung	10
Formel 4: Hydraulische Verweilzeit	10
Formel 5: Viskosität	11
Formel 6: Bernoulli-Gleichung	18

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

\dot{V}	Substratstrom	HRT	Hydraulische Verweilzeit
\dot{v}	Scherrate	m	Masse
BGA	Biogasanlage	N	Stickstoff
BHKW	Blockheizkraftwerk	NaWaRo	Nachwachsende Rohstoffe
BR	Faulraumbelastung	NH ₄	Ammonium
c	Konzentration der organischen Substanz	oTS	organische Trockensubstanz
C ₂ H ₄ O ₂	Essigsäure	P	Phosphor
CH ₄	Methan	p	Statischer Druck
CO ₂	Kohlenstoffdioxid	p ₀	Gesamtdruck
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf	S	Schwefel
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz	TAC	Totale alkalische Carbonate
FM	Frischmasse	TS	Trockensubstanz
FoS	Flüchtige organische Säuren	U	Umdrehung
F _{schub}	Schubspannung	USD	Ultraschalldesintegration
GPL	Gärproduktlager	v	Geschwindigkeit
GPS	Ganzpflanzensilage	V	Viskosität
H ₂	Wasserstoff	V _R	Reaktorvolumen
H ₂ O	Wasser	ρ	Dichte

EINHEITENVERZEICHNIS

g	Gramm	Pa	Pascal
h	Stunde	t	Tonne (1000 kg)
Hz	Hertz	V	Volt
K	Kelvin	Vol.-%	Volumenprozent
kg	Kilogramm	W	Watt
km	Kilometer		
kW	Kilowatt		
m	Meter		
m ³	Kubikmeter		
mbar	Millibar		
mm	Millimeter		
MW	Megawatt		

1 EINFÜHRUNG

1.1 AUFGABENSTELLUNG

Die Firma B.A.U.M. Consult AG betreibt seit 2009 zwei Biogasanlagen in Rendswühren/ Gönnebeck bei Neumünster. Am 03.02.2012 ist dort ein Ultraschallgerät der Firma Ultrawaves Wasser & Umwelttechnologien GmbH probeweise für sechs Monate in eine der beiden Anlagen eingebunden worden. Das Gerät schließt durch ultraschallbedingte Kavitation einen Teil des Substrates in der Biogasanlage auf, um den Gasertrag zu steigern.

Die Firma B.A.U.M. Consult ist an der Effizienz des Ultraschallgerätes von Ultrawaves interessiert. Ziel der Bachelor-Arbeit ist die Beurteilung der Effizienzsteigerung durch Einsatz des Ultraschallgerätes, indem ermittelt wird, welche Parameter für die Bewertung der Effizienzsteigerung relevant sind, zum Beispiel Substrateinsparungen einerseits und erhöhter Energiebedarf andererseits. Es werden Faktoren, die durch die Ultraschall-Desintegration, d.h. der Aufschluss von Material durch ultraschallbedingte Kavitationseffekte, beeinflusst werden, erarbeitet und bewertet. Soweit es nach zwei Monaten Betriebszeit möglich ist, wird ein Trend aufgezeigt, wie sich benötigte Substratmenge für eine definierte Menge Biogas verändert. In einer kurzen Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wird untersucht, ob sich eine Anschaffung des Gerätes lohnt. Zusammenfassend ist zu sagen, dass neben der Analyse von Gasertrag und Substratzufuhr weitere Eckpunkte bezüglich Betriebsweise und Wirtschaftlichkeit herausgearbeitet werden, auf welche die Firma B.A.U.M. zukünftig achten sollte, um das volle Potential der Ultraschall-Desintegration durch das System von Ultrawaves auszuschöpfen. Um diese Eckpunkte zu erarbeiten werden Messdaten der Biogasanlage ausgewertet, interpretiert und beurteilt.

1.2 DER AUFTRAGGEBER

Die Firma B.A.U.M. Consult AG ist eine Energieberatungsfirma mit deutschlandweit rund vierzig Mitarbeitern an fünf Standorten (Hamburg, Hamm, München, Stuttgart, Berlin). Am Standort Hamburg mit sieben Mitarbeitern werden hauptsächlich Energieeffizienzberatungen bei klein- und mittelständischen Unternehmen durchgeführt. Die Einführung von Managementsystemen (Energie- und Umweltmanagement), Betreuung von kommunalen Klimaschutzprojekten sowie Fachplanungen für Energie- und Wärmekonzepte gehören zum Leistungsspektrum.

B.A.U.M. Consult wurde im Jahr 2004 mit dem Bau von zwei Biogasanlagen beauftragt. Nach erfolgreicher Planung und Baubegleitung übernahm sie die Betriebsführung der Anlagen.

1.3 ULTRAWAVES WASSER & UMWELTTECHNOLOGIEN GMBH

Die Firma Ultrawaves ist 1995 aus Forschungsarbeiten von Prof. Dr.-Ing. Uwe Neis und Dr.-Ing. Klaus Nickel an der Technischen Universität Hamburg-Harburg (TUHH) hervorgegangen. Die Firma entwickelt Techniken zur Behandlung von Wasser, Abwasser und Substraten für Biogasanlagen mit Ultraschall. Weiterhin bietet sie Prozessanalysen und -optimierungen und die Erstellung von Stoffbilanzen und Gutachten an. Der Sitz der Firma befindet sich auf dem Campus der TUHH im Northern Institute of Technology (NIT). Die Herstellung des Ultraschallgerätes übernimmt die Firma SONOTRONIC Nagel GmbH.

2 THEORETISCHER HINTERGRUND

2.1 BIOGAS

Biogas ist ein brennbares Gas, bestehend aus verschiedenen Komponenten (siehe Tabelle 2). Es entsteht in der Natur zum Beispiel auf dem Grund von Seen, in Mooren oder im Verdauungstrakt von Wiederkäuern. Im kommunalen Abwasserbereich entsteht Biogas bei der Vergärung von Klärschlamm. Organische Substanz wird von Mikroorganismen über mehrere Zwischenstufen (siehe Abbildung 2) in Methan und andere Gase umgesetzt, welche nach Reinigung und Aufbereitung in einem Kessel, üblicherweise in einem BHKW, verbrannt werden. Die freigesetzte Wärme und der produzierte Strom werden genutzt. Der Methangehalt von Biogas aus Biogasanlage liegt bei rund 50 %. Das Biogas hat einen Brennwert von rund 5,2 kWh/m³.¹

2.1.1 SYNTHESE UND BETEILIGTE MIKROORGANISMEN

Das Biogas wird von Mikroorganismen erzeugt. Die Synthese läuft in vier Schritten ab (Schematische Abbildung siehe Abbildung 2):

1. Hydrolyse
2. Acidogenese
3. Acetogenese
4. Methanogenese

Bei der Synthese des Biogases sind mehrere Gruppen von Mikroorganismen beteiligt. Sie können nach den unterschiedlichen Prozessstufen geordnet werden:

TABELLE 1: MIKROORGANISMEN DER BIOGASBILDUNG (VGL /BAYMIKRO/ S. 20 FF.)

Syntheseschritt	Beteiligte Mikroorganismen
Hydrolyse	Bakterien, Archaeen
Acidogenese	
Acetogenese	Syntrope Bakterien
Methanogenese	Methanogene Archaeen

Im ersten Schritt, der Hydrolyse, werden komplexe organische Verbindungen des Substrates wie Kohlenhydrate, Eiweiße und Fette unter Reaktion mit Wasser in einfachere Bausteine zerlegt (Zucker, Aminosäuren und Fettsäuren). Diese Spaltung wird durch hydrolytische Bakterien durchgeführt, die entsprechende Enzyme produzieren, welche die Molekülketten aufspalten. Die enzymatische Spaltung am Beispiel eines Stärkemoleküls ist in Abbildung 1 dargestellt. Bei den Enzymen handelt es sich um sogenannte Exoenzyme, das heißt, sie wirken nicht innerhalb der Bakterienzelle, sondern werden in das umgebende Medium abgegeben. Dort spalten sie Substrat auf. Die durch die Spaltung gelösten Nährstoffe werden über die Zellmembran der Bakterien aufgenommen und innerhalb der Zelle durch sogenannte Endoenzyme verdaut.

Die hydrolytischen Bakterien sind, im Gegensatz zu den anderen beteiligten Mikroorganismen, fakultativ anaerob². Nach Hydrolyse-Stufe läuft der Prozess vollständig anaerob³ ab. Der Grund dafür ist, dass die Methanbakterien vor drei bis vier Milliarden Jahren entstanden, als es auf der Erde keinen freien Sauerstoff

¹ Brennwert von Methan = 9,97 kWh/m³ (vgl. /Daten/ S.33); 52% · 9,97 kWh/m³ = 5,2 kWh/m³

² Sauerstoff wird zwar vertragen aber nicht benötigt

³ sauerstofffrei

gab. Da Sauerstoff ein starkes Oxidationsmittel ist und die Methanbakterien nicht an den Sauerstoff angepasst sind, sterben sie schon bei geringen Konzentrationen ab. Die hydrolytischen Bakterien hingegen vertragen geringe Sauerstoffgehalte (vgl. /Hand1/ S. 26).

Die Hydrolyse ist der geschwindigkeitslimitierende Faktor im Gesamtprozess, da die langen Stärkemoleküle, die in der Biomasse vorhanden sind, langsam abgebaut werden. Bei Vorhandensein von vielen leicht abbaubaren Verbindungen (z.B. Fetten) ist die Methanogenese der bremsende Faktor, da die hydrolytischen Säurebildner aktiv arbeiten und sich schneller als andere Mikroorganismen im Fermenter vermehren. Wenn dies der Fall ist, sollte nicht zu viel Substrat in den Fermenter eingebracht werden, da es sonst zu einem Übermaß an Säureproduktion und einem Absinken des pH-Wertes kommen kann. Dies kann im ungünstigsten Fall zum Erliegen des Prozesses führen (vgl. /EaB/ S. 646 f.)

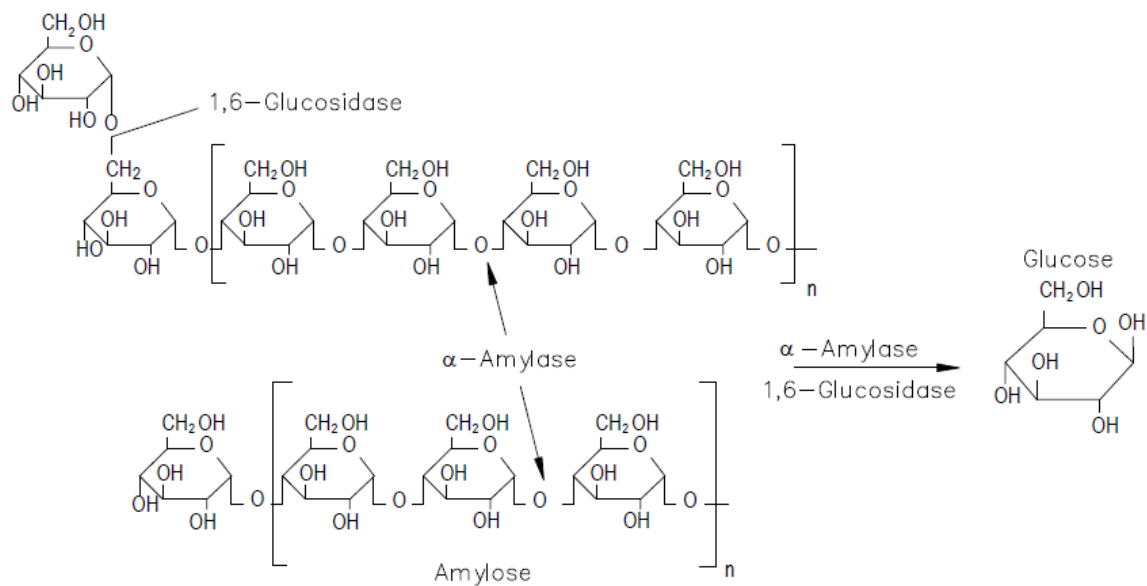


ABBILDUNG 1: HYDROLYTISCHE SPALTUNG VON AMYLOSE (BESTANDTEIL VON STÄRKE) DURCH DAS ENZYM ALPHA-AMYLASE IN GLUCOSE UND WASSER (WASSER HIER NICHT ABGEBILDET). SIEHE /BAYMIKRO/ S. 17

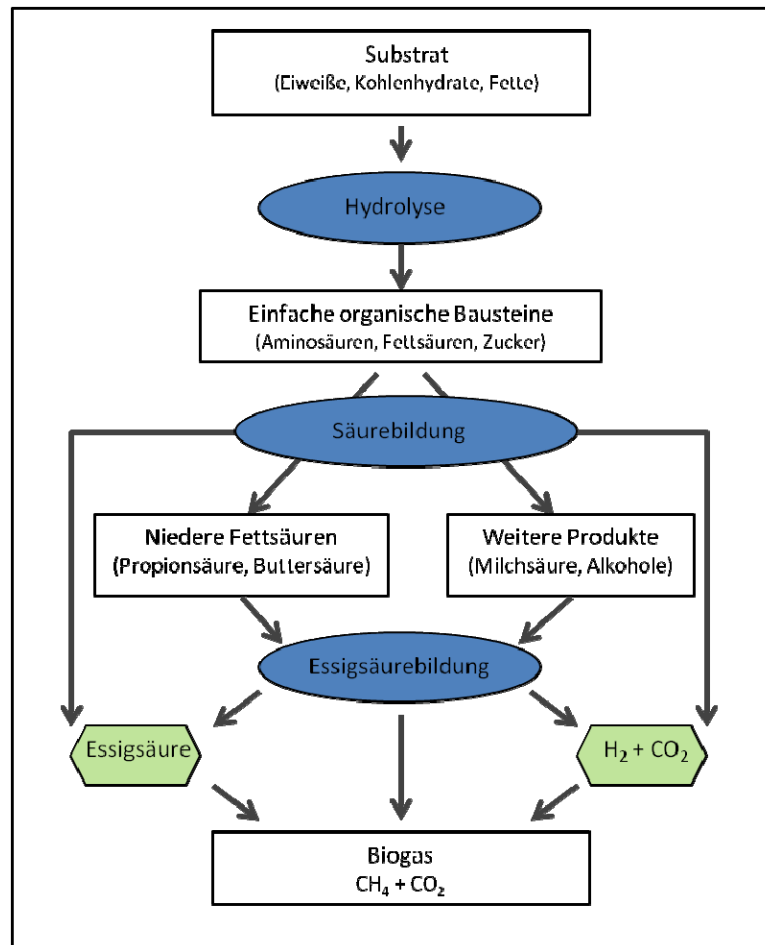


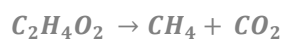
ABBILDUNG 2: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES ANAEROBEN ABBAUS (VGL /HAND1/ S. 25)

Im zweiten Schritt des anaeroben Abbaus werden die Produkte der Hydrolyse durch acidogene Bakterien in kleinere Bestandteile zerlegt wie Propion-, Essig- und Milchsäure und Alkohole sowie Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid. In dieser Stufe können Schwefelwasserstoff und Ammoniak entstehen, wenn ausreichend Schwefel- und Stickstoffverbindungen, welche vorwiegend aus den Proteinen stammen, vorliegen (vgl. /Bay/ S. 9). Die Acidogenese und die Hydrolyse lassen sich nicht strikt voneinander trennen, da die Stoffwechsel der beteiligten Mikroorganismen zusammenhängen (vgl. /BayMikro/ S. 20).

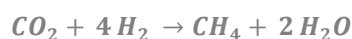
In der Acetogenese findet die Essigsäurebildung statt, bei der die Produkte der Acidogenese in Essigsäure, Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid (CO₂) umgewandelt werden. Sie bilden die Bausteine für Methan.

Im letzten Schritt wird durch methanogene Archäebakterien streng anaerob Methan gebildet. Zu etwa 70% wird Methan durch die Spaltung von Essigsäure (C₂H₄O₂) gebildet. Ein weiteres Produkt ist CO₂. Die verbleibenden 30% entstehen durch die Verbindung von CO₂ und H₂ zu Wasser und Methan (vgl. /EnB/ S. 646).

Dies wird durch nachstehende Formeln verdeutlicht:



FORMEL 1: METHANBILDUNG DURCH ESSIGSÄURESPLTUNG



FORMEL 2: METHANBILDUNG AUS KOHLENSTOFFDIOXID UND WASSERSTOFF

2.1.2 KOMPONENTEN

Biogas besteht etwa zur Hälfte bis zu zwei Dritteln aus Methan und einem Viertel bis einem Drittel aus Kohlenstoffdioxid. Andere Bestandteile kommen im Spurenbereich vor. Die Zusammensetzung von Biogas ist in Tabelle 2 dargestellt. Relevant für den Betreiber der Biogasanlage ist hauptsächlich der Methangehalt, da er gleichbedeutend mit dem Energiegehalt des Biogases ist. Es gilt, den Methangehalt zu maximieren, so dass aus einem Kubikmeter Biogas durch das Blockheizkraftwerk mehr Wärme und Strom gewonnen werden kann als aus Biogas mit einem geringeren Methangehalt und so die Wirtschaftlichkeit der Biogasanlage steigt.

TABELLE 2: DURCHSCHNITTLICHE WERTE FÜR DEN INHALTSSTOFFGEGHALT VON BIOGAS (QUELLE WERTE: /EAB/, S. 676)

Bestandteil	Konzentration
Methan (CH ₄)	50-70 Vol.-%
Kohlenstoffdioxid (CO ₂)	25-45 Vol.-%
Wasser (H ₂ O)	2 (20°C) bis 7 Vol.-% (40°C)
Schwefelwasserstoff (H ₂ S)	20-20.000 ppm (2 Vol.-%)
Stickstoff (N ₂)	< 2 Vol.-%
Sauerstoff (O ₂)	< 2 Vol.-%
Wasserstoff (H ₂)	< 1 Vol.-%

Der Gehalt an Kohlenstoffdioxid steuert nichts zum Energiegehalt des Gases bei. CO₂ dient als Baustein für die Methanbildung. Je mehr Kohlenstoffdioxid im Fermenter in Wasser gelöst ist, desto mehr Methan kann produziert werden.

Eine weitere Komponente ist der Gehalt an Schwefelwasserstoff. Schwefelwasserstoff ist für viele Lebewesen hochgiftig. Es wirkt bereits ab geringen Konzentrationen hemmend auf den Stoffwechsel der Mikroorganismen. Hohe Schwefelwasserstoffkonzentrationen führen zu Korrosionsschäden im Blockheizkraftwerk und zu Versäuerung des Motoröls. Die normale Schwefelwasserstoffkonzentration liegt bei 2.000 – 5.000 ppm bei der Vergärung, im Biogas sollte er mindestens unter 20 ppm liegen (vgl. /Hand1/ S. 31, /BayH2S/ S. 5).

Der Sauerstoffgehalt im Biogas sollte nicht zu hoch sein, da es sich bei der Methanisierung um einen anaeroben, das heißt sauerstofffreien, Prozess handelt. Ein zu hoher Sauerstoffgehalt wirkt hemmend auf einige Mikroorganismen beziehungsweise tötet diese ab (vgl. /Hand1/ S. 26). Neben einer Hemmung der Mikroorganismen birgt ein zu hoher Sauerstoffgehalt auch Explosionsgefahr. Reines Biogas ist, wie andere Brenngase, nicht brennbar. Erst die Zufuhr von Sauerstoff ermöglicht die Brennbarkeit. Ein kleiner Funke bringt das Biogas zum Explodieren, wenn viel Sauerstoff vorhanden ist. Deswegen ist besondere Vorsicht bei Leckagen und Undichtigkeiten der Fermenterabdeckung⁴ geboten (vgl. /Praxis/ S. 127).

2.1.3 SUBSTRAT

Als Substrate für die Biogaserzeugung können nahezu alle organischen Substanzen dienen. Einige davon sind im Folgenden aufgezählt:

⁴ Fermenter = Gärraum, in dem Substrat durch Bakterien umgesetzt wird

TABELLE 3: MÖGLICHE SUBSTRATE FÜR DIE BIOGASERZEUGUNG (VGL. /EAB/ S. 644)

Bereich	Substrat
Kommunale Entsorgung	Nahrungsmittelreste aus Handel und Gastronomie
	Klärschlamm aus Abwasserreinigung
	Garten- und Landschaftspflegeabfälle
Lebensmittelindustrie	Waschwässer
	Filtrationsrückstände
	Traubentrester
	Mälzereirückstände
	Hefe
Landwirtschaft	Schlachtabfälle
	Gülle
	Ernterückstände
	Energiepflanzen (Mais, Zuckerrüben usw.)

Von der Art des Substrates hängen die nötige Aufbereitung und der Biogasertrag ab. Da in der betrachteten Biogasanlage ausschließlich Maissilage verwendet wird, wird im Folgenden auf dieses Substrat näher eingegangen.

Bei Silage handelt es sich um durch Milchsäuregärung vergorene geschnittene Pflanzenteile. Der Vorgang des Vergärens wird als „Silieren“ bezeichnet. Silage kann neben Mais aus Grasschnitt bestehen. Neben dem Einsatz in Biogasanlagen ist Silage ein wichtiges Futtermittel in der Rindviehhaltung.

Maissilage ist eines der in Deutschland am häufigsten in Biogasanlagen eingesetzten Substrate (siehe /Daten/ S. 36, Stand 2010). Dies liegt neben der guten Verfügbarkeit und der unproblematischen Ernte- und Lagerfähigkeit vor allem an den hohen Gaserträgen.

Der Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen wie Mais wird von der Bundesregierung gefördert. Das EEG wurde im Jahr 2000 von der Bundesregierung verabschiedet und fördert den Ausbau der regenerativen Energien. Neben einer Vergütung für die Erzeugung von Biogas gibt es Boni für die Nutzung nachwachsender Rohstoffe (NaWaRo-Bonus), für die Nutzung von fortschrittlicher Technologie (Technologie-Bonus) und die Nutzung von Gülle (Gülle-Bonus) (vgl. /EEG/ § 27, § 27 a-c).

Die Ernteerträge von Mais liegen bei etwa 50 t Frischmasse (FM) pro Hektar (siehe /Daten/ S. 37). Die Erträge sind standort- und sortenabhängig. Mais benötigt generell ausgeprägte Schönwetterperioden bei gleichzeitig guter Bewässerung (vgl. /EaB/ S. 92). Mais hat, zusammen mit der Zuckerrübe, die höchsten Gehalte an organischer Trockensubstanz (oTS, siehe Tabelle 4) und hohe Biogaserträge.

Nach der Ernte und dem Zerkleinern auf eine Stückgröße von 4 mm wird der Mais einsiliert. Dazu wird er möglichst luftdicht abgedeckt und eventuell mit Siliermitteln⁵ behandelt. Anschließend siliert er für 6-8 Wochen. Durch die einsetzende Milchsäuregärung wird das Substrat optimal für die Bakterien im Fermenter vorbereitet und eine stabile Lagerung wird gewährleistet.

TABELLE 4: STOFFEIGENSCHAFTEN VON MAISSILAGE (SIEHE /HAND1/ S. 88)

Eigenschaft	Einheit	Größe
TS	%	20-35
oTS	% TS	85-95
NH ₄	% TS	0,15-0,3
Biogasertrag	m ³ /t FM	170-200
Biogasertrag	m ³ /t oTS	450-700
CH ₄ -Gehalt	Vol.-%	50-55

⁵ Verbessert den Gärvorgang beim Silieren und vermindert Schimmelbildung

2.2 VERFAHRENSTECHNISCHE MESSGRÖßEN

2.2.1 BEEINFLUSSUNG DES METHANGEHALTS

Der Methangehalt des Biogases wird durch unterschiedliche Parameter im Prozess beeinflusst. Die Wesentlichen werden im Folgenden dargestellt:

TABELLE 5: PARAMETER, DIE SICH AUF DEN METHANGEHALT DES BIOGASES AUSWIRKEN (VGL. /EAB/ S. 651., /PAUL/)

Parameter	Günstige Eigenschaften für hohen CH ₄ -Gehalt	Erklärung
Substrat	Möglichst leicht abbaubar, möglichst fettreich	Schwer abbaubare Strukturen wie Lignine (Holzstoffe) und Stärke führen zu einer geringen Abbaurrate pro Zeit. Je fettreicher und sauerstoffärmer das Substrat, desto geringer der Oxidationsgrad; dies ist günstig für die Entwicklung der Methanbakterien
Substratmenge	Möglichst geringe Faulraumbelastung	Je geringer die Faulraumbelastung, desto höher ist der CH ₄ -Gehalt im Gas. Ist die Substratzufuhr zu hoch, kommt es zu einer Anhäufung von Säuren, welche die Methanbakterien hemmen
Wassergehalt Gärgut	Angepasst	Viel CO ₂ im Wasser gelöst, kann als Baustein für Methan genutzt werden. Zuviel Wasser im Fermenter führt zu einer geringeren Raumbelastung
Temperatur	Angepasst	Je höher die Temperatur, desto größer die Stoffwechsel-/Abbaurrate; ist die Temperatur zu hoch, werden die Mikroorganismen geschädigt und es ist wenig CO ₂ im Wasser gelöst
Aufenthaltszeit	Möglichst hoch	Je größer die Verweildauer im Fermenter, desto mehr Substrat kann abgebaut werden
Substrataufbereitung	Möglichst kleine Partikel	Kleine Partikel ermöglichen eine höhere Abbaurrate

2.2.2 TEMPERATUR

Die Temperatur im Fermenter spielt eine zentrale Rolle. Grundsätzlich lässt sich sagen, dass Stoffwechselforgänge bei höheren Temperaturen, d.h. im Bereich um 30-50°C, schneller ablaufen als bei niedrigeren Temperaturen⁶. Innerhalb des Fermenters gibt es verschiedene Arten von Bakterien (vgl. Kapitel 2.1.1). Die verschiedenen Arten bevorzugen verschiedene Temperaturbereiche:

TABELLE 6: TEMPERATURBEREICHE UND SPEZIFISCHE BAKTERIENGRUPPEN (VGL. /EAB/ S. 647)

Bakteriengruppe	Temperaturoptimum
Psychrophil	25°C
Mesophil	35°C
Thermophil	57°C

In den meisten technischen Prozessen werden mesophile und thermophile Bakterien eingesetzt. Die Fermenter müssen beheizt werden. Die Wahl der Temperaturstufe richtet sich vor allem nach der Art des Substrates. Ist

⁶ RGT-Regel: Reaktionsgeschwindigkeit-Temperatur-Regel, vgl. /Mikro/ S. 452

dieses sehr wasserhaltig, wird die Anlage optimal auf einem niedrigen Temperaturniveau gefahren, da ansonsten zu viel des produzierten Biogases für die Wärmebereitstellung benutzt werden muss. Aufgrund der hohen Wärmekapazität von Wasser ist der Energieaufwand, um das Wasser zu erwärmen, höher, als der für die Erwärmung des Substrats nötige Energieaufwand.

2.2.3 PH-WERT

Der pH-Wert, das heißt das Maß für den Säure- beziehungsweise Basengehalt eines Mediums, ist ein weiterer Faktor, der auf das Wachstum der Mikroorganismen wirkt. Der optimale Bereich im Fermenter liegt bei 7-7,5 im leicht basischen Milieu (vgl. /EaB/ S. 648). Bei einer Anhäufung von Säuren und einem pH-Wert unter 6,8 beziehungsweise über 8,2 beginnt die Biologie abzusterben (/Paul/). Vor allem führt das Absinken des pH-Wertes zu einem „Aufschaukelungsprozess“ (siehe /EaB/ S. 648): Sinkt der pH-Wert, können die methanogenen Bakterien die Produkte aus den vorhergehenden Prozessen (z.B. Milchsäure, Essigsäure) nicht mehr verarbeiten und es kommt zu einer Anhäufung von Säuren und einem stärkeren Absinken des pH-Wertes. Ist dies der Fall, muss die Substratzufuhr sofort gedrosselt werden, damit durch die Vergärung des neuen Substrates keine neuen Säuren freigesetzt werden. Im schlimmsten Fall, wenn nicht mit Zugabe von alkalischen Materialien wie Branntkalk gegengesteuert wird, kann es zum „Umkippen“ des Reaktors kommen. Ist dies der Fall, muss der Reaktor komplett entleert und neu befüllt werden, damit eine neue Biologie angesiedelt werden kann.

2.2.4 VERHÄLTNIS FLÜCHTIGE ORGANISCHE SÄUREN ZU TOTALEN ALKALISCHEN CARBONATEN (FoS-TAC-WERT)

Eine weitere relevante Größe zur Charakterisierung der Biologie im Fermenter ist der FoS/TAC-Wert. Die Abkürzung FoS bedeutet „flüchtige organische Säuren“. Gemeint sind die bei der Acidogenese und Acetogenese entstehenden Säuren wie Isovaleriansäure, Propion-, Butter-, Milch- und Essigsäure. Sie sind ein Maß für den Säure- und Basengehalt des Prozesses. Aus denselben Gründen, die für den pH-Wert gelten (siehe Kapitel 2.2.3), sollte der FoS-Gehalt möglichst niedrig sein.

TAC steht für „Totale alkalische Carbonate“, d.h. den Gehalt an Calciumcarbonat (kohlenaurer Kalk).

Der FoS/TAC-Wert gibt das Säure-Basen-Verhältnis im Fermenter wieder und ist ein Indiz für den biologischen Zustand. Er ist nicht gleichzusetzen mit dem pH-Wert, sondern ist ein Maß dafür, wie gut das Medium im Fermenter zugeführte Säuren und Basen tolerieren, d.h. puffern kann. Er reagiert früher auf die Anhäufung von Säuren als der pH-Wert, da dieser sich erst ändert, wenn die Pufferkapazität durch den TAC Wert vollständig erschöpft ist. Zu diesem Zeitpunkt kann es bereits zu einer Bakterienhemmung durch die Anhäufung der Säuren gekommen sein.

2.2.5 TROCKENSUBSTANZ

Die Trockensubstanz ist die im Substrat enthaltene Masse. Der Wassergehalt wird nicht mit hinzugezählt. Dieser wird ermittelt, indem eine Probe der Frischmasse bei 105°C getrocknet wird. Die Massendifferenz nach dem Trocknen zur Frischmasse entspricht dem Wassergehalt in der Frischmasse. Wird sie vom Gewicht der Frischmasse abgezogen, ergibt sich die Masse der Trockensubstanz (vgl. /EaB/ S. 652).

2.2.6 GLÜHVERLUST / GEHALT AN ORGANISCHER TROCKENSUBSTANZ (OTS)

Der Glühverlust ist ein Maß für den Gehalt an organischen Bestandteilen in einer Substanz. Eine Probe der Trockensubstanz wird für die Bestimmung des Glühverlustes gewogen und in einem Ofen bei 550°C verglüht, bis keine Gewichtsabnahme mehr feststellbar ist. Durch das Erhitzen sind die organischen Bestandteile zu CO₂ und Wasser verbrannt und in die Luft entwichen. Übrig bleiben die mineralischen Bestandteile (vgl. /EaB/ S. 652). Der Glühverlust oder oTS (organische Trockensubstanz) ist interessant für die Abschätzung des Gasertrages, da ausschließlich die organischen Bestandteile durch die Mikroorganismen umgewandelt werden. Die Gasausbeute wird in m³/t oTS (siehe Tabelle 4) angegeben.

2.2.7 NÄHRSTOFFVERSORGUNG

Mikroorganismen benötigen für ihren Stoffwechsel und ihr Wachstum Vitamine und Spurenelemente sowie Nähr- und Mineralstoffe. Diese sind in Gülle und Mist ausreichend vorhanden, da die Tiere, die die Exkremente produziert haben, diese Stoffe aufnehmen und ausscheiden. Bei Monovergärungen, d.h. Vergärungen mit nur einem Substrat, z.B. Mais, kommt es leicht zu Stoffmängeln oder –überschüssen. Diese hemmen ab bestimmten Konzentrationen Bakterien bzw. wirken toxisch. Bei zu niedrigen Konzentrationen kann eine Hemmung der Gasproduktion auftreten (vgl. /Praxis/ S. 24). Es gibt in der Literatur Werte zu Nährstoffverhältnissen, die sich in der Biogasproduktion als günstig erwiesen haben. Diese sind in Tabelle 7 dargestellt:

TABELLE 7: MINDESTANFORDERUNGEN FÜR DIE METHANOGENESE (VGL. /PRAXIS/ S. 26)

Elemente/Chemische Verbindungen	Konzentration
Sauerstoff	< 1 ppm
Wasserstoffpartialdruck	6 Pa
Gesamtkohlenstoff	0,2 bis 50 g/l CSB
Natrium	45 bis 200 ppm
Kalium	75 bis 250 ppm
Magnesium	10 bis 40 ppm
Schwefel	50 bis 100 ppm
Eisen	10 bis 200 ppm
Nickel	0,5 bis 30 ppm
Kobalt	0,5 bis 20 ppm
Molybdän, Wolfram, Selen	0,1 bis 0,35 ppm
Zink	0 bis 3 ppm
Phosphat	50 bis 150 ppm
Mengenverhältnis C:N:P:S	2.000:15:5:3

2.3 BETRIEBSPARAMETER

Bei dem Betrieb einer Biogasanlage beeinflussen bestimmte Parameter wie die Substratmenge, -zufuhr usw. die Effizienz der Gasproduktion. Schon kleine Regulierungen verursachen große Unterschiede bei der Gasausbeute. Die wichtigsten sind im Folgenden kurz dargestellt.

2.3.1 SUBSTRATZUFUHR

Die Zufuhr des Substrates kann auf verschiedene Weisen erfolgen:

- Kontinuierlich: Substrat wird kontinuierlich beziehungsweise mehrmals täglich in kleinen Chargen dem Fermenter zugeführt und gleichzeitig dieselbe Menge vergorenes Substrat vom Fermenter in den Nachgärer überführt. Die kontinuierliche Beschickung wird hauptsächlich bei Biogasanlagen mit Maissubstrat-Fütterung angewendet (vgl. /Hand1/ S. 38).
- Diskontinuierlich: Der Fermenter wird mit Substrat gefüllt und luftdicht verschlossen (Batch-Verfahren). Nach der benötigten Verweilzeit wird das Gärsubstrat komplett entfernt, nur ein geringer Rest zum Animpfen⁷ des frischen Substrates verbleibt. Die diskontinuierliche Beschickung wird in der Trockenfermentation angewandt (siehe /Hand1/ S. 37).

Innerhalb dieser beiden möglichen Einteilungen gibt es viele Systeme und Abstufungen, mit denen Biogasanlagen, je nach örtlichen und betriebstechnischen Gegebenheiten, gefahren werden.

2.3.2 FAULRAUMBELASTUNG UND VERWEILZEIT

Die Faulraumbelastung B_R gibt an, wie viel Substrat dem Fermenter pro Zeit- und Volumeneinheit zugeführt wird. Sie ist abhängig vom zugeführten Substrat (leicht abbaubar, z.B. Zucker und Stärke oder schwer abbaubar, z.B. Lignine und Cellulosen). Sie ist maßgeblich für die Dimensionierung des Gärbehälters und berechnet sich aus der zugeführten Substratmenge je Zeiteinheit \dot{m} , der Konzentration der organischen Substanz c in Prozent und dem Reaktorvolumen V_R :

$$B_R = \frac{\dot{m} \cdot c}{V_R} \quad \text{FORMEL 3: FAULRAUMBELASTUNG}$$

Eng verbunden mit der Faulraumbelastung ist die hydraulische Verweilzeit HRT (engl.: hydraulic retention time) des Substrates im Fermenter. Steigt die Faulraumbelastung, sinkt die Verweilzeit und umgekehrt. Je länger die Verweilzeit, desto mehr Substrat können die Bakterien umsetzen. Zu hohe Verweilzeiten sind nicht wirtschaftlich, da der Gasertrag nicht konstant bleibt, sondern nach kurzem Anstieg nach einiger Zeit zurückgeht. Der Methangehalt im Biogas verhält sich proportional zur Verweilzeit.

Die Verweilzeit ist der Quotient aus dem Reaktorvolumen V_R und der zugeführten Substratstrom \dot{V} :

$$HRT = \frac{V_R}{\dot{V}} \quad \text{FORMEL 4: HYDRAULISCHE VERWEILZEIT}$$

⁷ Animpfen = Bakterienkultur zum Anfahren der Biogasanlage anlegen

2.3.3 DURCHMISCHUNG

Um einen ausreichenden Kontakt der Mikroorganismen mit dem Substrat zu gewährleisten ist eine gute Durchmischung des Substrates im Fermenter notwendig, damit die Mikroorganismen einen intensiven Kontakt mit dem Substrat haben. Bei unzureichender Durchmischung bilden sich durch Anhaftungen und Verklumpung von Substratpartikeln Schwimm- oder Sinkschichten (vgl. /EaB/ S. 663, /Hand1/ S. 29). Dies kann zu Behinderung des Gasbildungsprozesses kommen. Das Gas kann nicht mehr ungehindert nach oben in die Gasblase entweichen. Bei zu starker Durchmischung werden Bakteriengemeinschaften, die auf Grund ihres Stoffwechsels bei der Bildung von Biogas aufeinander angewiesen sind, wie die acetogenen und methanogenen Bakterien, auseinander gerissen, was zu einer geringeren Gasbildung führt.

Bei der Durchmischung wird das Rührwerk oder die Zirkulation an die Viskosität, das heißt die Zähigkeit des Fermenterinhaltendes angepasst. Die Auswahl des Rührwerkes ist ein wichtiger Faktor, der individuell an das zu bearbeitende Material und die Form des Fermenters angepasst werden muss. Der Austausch oder die neue Positionierung eines Rührwerkes kann erhebliche Veränderungen im Reaktor bezüglich Schwimm- und Sinkschichten und Gasbildungsprozess mit sich bringen.

2.3.4 VISKOSITÄT

Die Viskosität, die umgekehrt proportional mit dem Wassergehalt bzw. der Dichte des Materials im Fermenter zusammenhängt, ist ein weiterer wichtiger Faktor, der die Mikroorganismen beeinflusst. Ein hoher Wassergehalt und eine geringe Viskosität erhöhen die Mobilität der Bakterien, so dass sie sich von Substratflocke zu Substratflocke bewegen können.

Die Viskosität ist das Verhältnis aus Scherrate, Dichte ρ des Mediums und der bei der Gegen-Einander-Bewegung auftretenden Schubspannung F_{Schub} (Einheit Pa/s)(vgl. /PhyD/ S. 442).

Die Scherrate $\dot{\nu}$ ist die Geschwindigkeit, mit der zwei benachbarte Flüssigkeitsschichten sich in einem bestimmten Abstand gegeneinander bewegen (vgl. /Ström/ S. 91 ff.). Ihre Einheit ist 1/s.

$$V = \frac{F_{Schub}}{\rho \cdot \dot{\nu}} \quad \text{FORMEL 5: VISKOSITÄT}$$

2.3.5 ABBAUGRAD DES SUBSTRATES

Der Abbaugrad gibt an, wie viel Prozent des Substrates innerhalb der Verweilzeit abgebaut wird. Ein vollständiger Abbau des Substrates ist praktisch unmöglich, da hierfür eine lange Verweilzeit von mehreren Wochen bis Monaten benötigen wird. Die Abbaugrade hängen unter anderem von der Art des Substrates ab, bei durchschnittlichen Verweilzeiten wird eine Abbaurrate von 60 % erreicht, d.h. bezogen auf den Anfang des Prozesses hat sich der Anteil an organischen Kohlenstoffverbindungen um 60 % verringert (siehe /Praxis/ S. 37).

2.3.6 SILAGESICKERSAFT

Silagesickersaft fällt zwangsläufig bei der Silierung und Lagerung von pflanzlichen Substraten an. Er besteht aus drei Komponenten (vgl. /BaySiSa/ S. 7 f.):

- Gärssaft: Er ist abhängig von dem TS-Gehalt der Frischmasse bei der Ernte. Liegt dieser bei etwa 30 %, fällt Gärssaft an. Er entsteht durch Gärungen und Pressdruck innerhalb des Silagehaufens und ist sehr nährstoffreich, denn er enthält viele organische Säuren und Spurenelemente. Der Gärssaft fällt nicht kontinuierlich an, d.h. kurz nach der Ernte am stärksten, danach abnehmend.
- Sickersaft: Er entsteht bei unvollständiger Abdeckung des Silos. Niederschlag trifft auf die Silage und sickert durch den Haufen nach unten.
- Verunreinigtes Niederschlagswasser: Es entsteht bei Kontakt mit den Anschnittflächen oder mit Substratresten auf der abgeräumten Siloplatte.

Der Silagesickersaft muss vollständig aufgefangen werden, damit er nicht ins Grundwasser gelangt. Dort kann er durch den Nährstoffeintrag und eventuell enthaltene Schwermetalle (diese stammen zum Beispiel aus Anreicherungen der Pflanze auf der Ackerfläche) die Wasserqualität beeinträchtigen. Die enthaltenen Säuren im Sickersaft schädigen Rohre und Leitungen. Das Auffangen des Silagesickersaftes ist unter anderem im Wasserhaushaltsgesetz geregelt (siehe WHG § 48, konkretisiert durch VawS SH § 21 a).

2.4 BIOGASANLAGEN DER FIRMA B.A.U.M. CONSULT

Die Firma B.A.U.M. Consult AG betreibt seit 2009 beziehungsweise 2010 zwei Biogasanlagen in der Gemeinde Rendswühren. Das produzierte Biogas wird über eine Fernleitung ins drei Kilometer entfernte Gönnebeck transportiert, wo es in zwei Blockheizkraftwerken verbrannt wird. Der entstehende Strom wird in das öffentliche Netz eingespeist, die Wärme wird einer Gärtnersiedlung in Gönnebeck zur Verfügung gestellt. Die Gärtnersiedlung hatte bisher ihre Gewächshäuser mit einem Schwerölkraftwerk beheizt, dafür wurde die Heizwerkgenossenschaft Gönnebek e.G. ins Leben gerufen.

Im Jahr 2004 ist diese Genossenschaft an die Firma B.A.U.M. Consult herangetreten und hat diese mit der Planung und Projektierung zweier Biogasanlagen beauftragt. Diese Planung wurde in Zusammenarbeit mit der Firma projekt energy GmbH durchgeführt und der Bau, der von der Firma MT Energie GmbH übernommen wurde, wurde von B.A.U.M. überwacht. Nach der erfolgreichen Fertigstellung der Biogasanlagen übernahm B.A.U.M. den Betrieb der Anlagen.

Auf dem Gelände in Rendswühren stehen zwei baugleiche Biogasanlagen, die vollkommen unabhängig voneinander sind. Anlage 1 ging im Jahr 2009 in Betrieb, Anlage 2, die in dieser Arbeit hauptsächlich untersucht wird, im Jahr 2010. Beide Anlagen bestehen aus je einem Hauptfermenter, einem Nachgärer und einem Gärproduktlager (GPL). Aus zwei Silos werden die Anlagen mit Substrat befüllt. Das gewonnene Biogas wird in einer Gasaufbereitung getrocknet und gereinigt und auf die Gastrasse gegeben. Da es keinen Gasspeicher gibt, wird das Biogas bei Überproduktion über zwei Gasfackeln verbrannt.

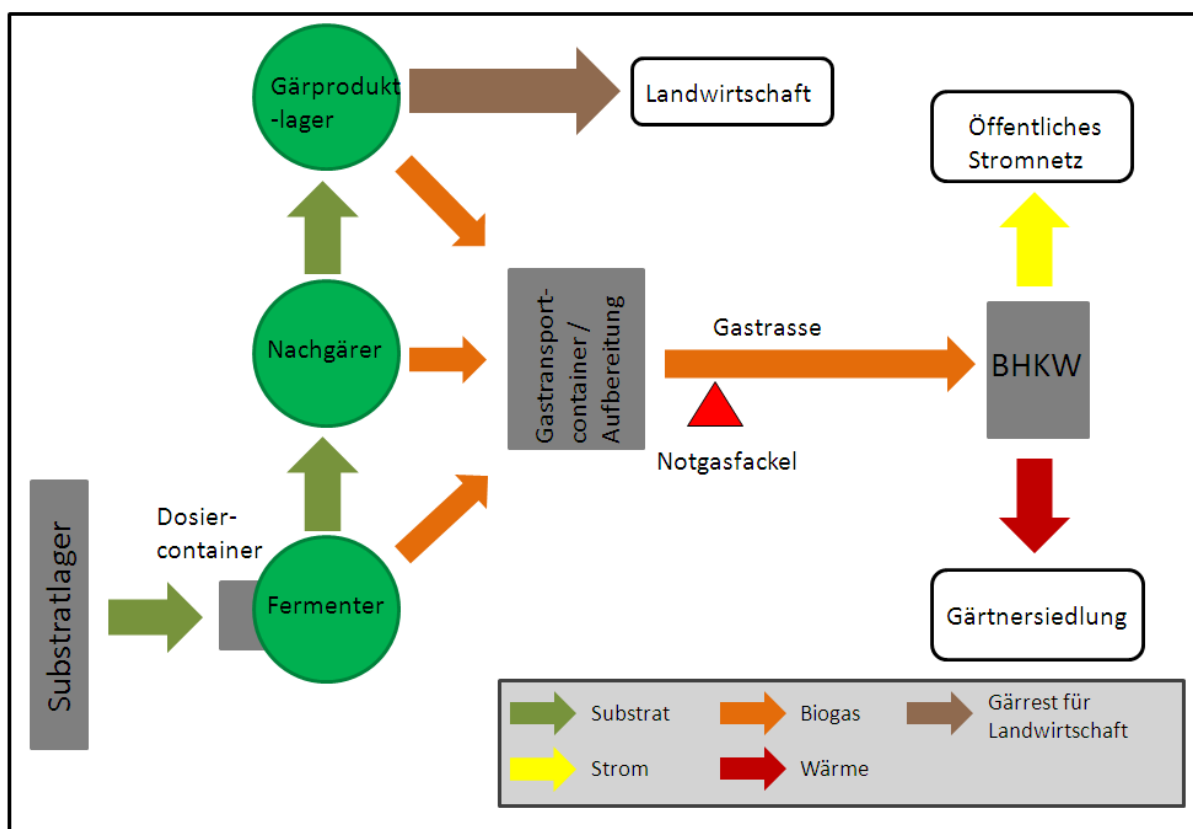


ABBILDUNG 3: FLIEßSCHEMA DER GÄRSTRECKE DER BIOGASANLAGE 1 BZW. 2 IN RENDSWÜHREN/GÖNNEBECK

2.4.2 SUBSTRATLAGER

Die beiden Substratlager haben jeweils eine Länge von 95 m und eine Breite von 40 m bei einer Höhe der Seitenwände von 3,5 m. Insgesamt haben die Silos ein Fassungsvermögen von etwa 40.000 t Mais. Das Substrat wird von einem Radlader in an den Fermentern befindliche Dosiercontainer transportiert. Diese Dosiercontainer transportieren das Substrat über ein Schneckensystem kontinuierlich in den Fermenter.

2.4.3 HAUPTFERMENTER UND NACHGÄRER

In den Hauptfermenter wird kontinuierlich Substrat über den Dosierungscontainer zugeführt. Die Fermenter sind auf eine Substratzufuhr von 40 t pro Tag ausgelegt. Sie haben einen Durchmesser von 23 m und eine Höhe von 6 m, was einem Volumen von 2.493 m³ entspricht. In den Fermentern befinden sich je drei Rührwerke mit einer Gesamtleistung von 18,5 kW, die das Gärgut durchmischen. An den Wänden sind Heizschläuche angebracht, die die Fermentertemperatur auf 42°C, das heißt in einem meso- bis thermophilen Bereich halten (siehe Kapitel 2.2.2). Die Wärme wird von einem Holzhackschnitzelkessel auf dem Gelände mit einer Leistung von 550 kW bereitgestellt. Über dem Fermenter befindet sich eine Gasblase mit einem Volumen von 968 m³, in dem sich das Biogas sammelt.

Die beiden Nachgärer sind wie die Hauptfermenter aufgebaut. Da jeden Tag 40 t Substrat in die Fermenter eingeführt werden, wird täglich dieselbe Menge wieder entnommen und in den Nachgärer geleitet. Eine zentrale Pumpe pro Anlage, mit einer Leistung von 50 m³ pro Stunde, leitet die Substratströme von Station zu Station.

Die durchschnittliche Verweilzeit des Substrates beträgt je 30 Tage im Fermenter und 30 Tage im Nachgärer. Da die gesamte in den Behältern enthaltene Substratmenge bei rund 2000 t liegt, können diese Verweilzeiten trotz Durchmischung und Zuführung bzw. Entnahme des Substrates gewährleistet werden.

Die Gasausbeuten der einzelnen Stationen sind in folgender Tabelle dargestellt:

TABELLE 8: GAS AUSBEUTE PRO STATION AUF DER GÄRSTRECKE (QUELLE: /PAUL/)

Station	Gasausbeute in %
Fermenter	65-70
Nachgärer	20-25
Gärproduktlager	5

2.4.4 GÄRPRODUKTLAGER

Nachdem das Gärgut 60 Tage auf der Gärstrecke, d.h. im Fermenter und im Nachgärer, verbracht hat, wird es in das Gärproduktlager (GPL) gepumpt. Dort verbleibt es rund 3-4 Monate, bis der Gärrest von einem Lohnunternehmer abgeholt wird. Der Gärrest wird von Landwirten als Dünger auf die Ackerfläche verbracht.

Die beiden Gärrestlager haben jeweils einen Durchmesser von 30 m und eine Höhe von 8 m, was ein Volumen von 5.655 m³ ergibt.

2.4.5 GASAUFBEREITUNG UND NOTGASFACKEL

Bevor das Biogas in einem BHKW verbrannt werden kann, wird es aufbereitet. Dafür wird das Gas getrocknet, indem es auf einer Rohrstrecke von 75 m in einer Tiefe von 1m durch den Boden geleitet wird. Die Bodentemperatur von 10-15 °C kühlt das Gas ab. Anschließend wird es durch einen Rohrbündelwärmtauscher mit angeschlossener Kälteanlage auf 0,2°C abgekühlt. Der im Biogas enthaltene Wasserdampf kondensiert und kann als Wasser abgeschieden werden.

Es ist notwendig, das Gas zu entschwefeln, damit Schwefelwasserstoffe bei der Verbrennung Mensch und Umwelt nicht schädigen (vgl. 2.1.2). Schwefelverbindungen fallen hauptsächlich durch im Substrat enthaltene Proteine und Aminosäuren an. In den Biogasanlagen in Rendswühren wird Schwefel intern, das heißt im Fermenter, abgeschieden. Indem Sauerstoff dem Fermenter und Nachgärer zugesetzt wird, wird Schwefelwasserstoff von Mikroorganismen (Thiobazillen) zu elementarem Schwefel oxidiert. Schwefel sammelt sich am Behälterboden und wird zusammen mit dem Gärrest ausgetragen. Sauerstoff wird über Luftdosierpumpen in das flüssige Substrat eingebracht. Die Sauerstoffmenge wird angepasst, so dass ausreichend Sauerstoff für die Schwefelabscheidung bereit steht und gleichzeitig die gasbildenden Bakterien nicht geschädigt werden.

Bei der Biogasanlage existiert kein separater Gasspeicher, so dass die produzierte Menge Biogas in die BHKWs eingespeist werden muss. Allein in den Gasblasen über Fermenter, Nachgärer und GPL können rund 3000 m³ Gas für kurze Zeit zwischengespeichert werden. Fällt zu viel Gas an, dass aus technischen Gründen nicht von den BHKWs genutzt werden kann, wird das überschüssige Gas über eine Notgasfackel vernichtet. Die beiden Fackeln haben eine Leistung von jeweils 700 kW. Die entstehende Wärme geht verloren.

Das Gas wird, bevor es für den Transport zu den BHKWs auf die Gastrasse geleitet wird, auf 180 mbar verdichtet.

2.4.6 ENERGETISCHE ANBINDUNG IN GÖNNEBECK

Das Gas wird jeweils über eine 3 km lange Gastrasse zur Wärmezentrale in Gönnebeck transportiert. Die einzelnen Trassen münden jeweils in einem Blockheizkraftwerk, welches eine Leistung von 800 kW hat. Die beiden BHKWs werden stromgeführt betrieben, das bedeutet, dass sie kontinuierlich durchlaufen und den produzierten Strom ins Netz einspeisen, die anfallende Wärme wird der Gärtnersiedlung zur Verfügung gestellt. Wird diese nicht benötigt, wird diese über Rückkühlwerke mit einer Leistung von 815 kW weggekühlt.

Als Unterstützung der Blockheizkraftwerke befindet sich auf dem Gelände in Gönnebeck ein zusätzlicher Holzhackschnitzelkessel. Mit einer Leistung von 850 kW deckt dieser, zusammen mit den BHKWs, die Grund- und Mittellast der Gärtnersiedlung ab. Die Spitzenlast wird über Leichtölkessel abgedeckt.

2.5 ULTRASCHALL-DESINTEGRATION (USD)

Um die Effizienz einer Biogasanlage zu erhöhen, gibt es mittlerweile unterschiedliche Hilfsmittel und Methoden auf dem Markt. Diese können in chemisch-biologische und mechanische Maßnahmen unterteilt werden. Zur ersten Kategorie gehören Hilfsmittel wie die Zugabe von Siliermitteln in die Silos oder die Zugabe von Spurenelementen und Enzymen in die Gasreaktoren. Zu den mechanischen Methoden zählen unter anderem die Aufbereitung des Substrates vor dem Eintrag in den Fermenter durch Zerkleinerung und Homogenisierung. Der Ultraschallgenerator von Ultrawave lässt sich in letzte Kategorie einordnen. Das Substrat wird aus dem Nachgärer entnommen, mit Ultraschall behandelt und zurück in den Hauptfermenter geleitet. Ziel der Ultraschall-Desintegration ist es, durch den Aufschluss der Zellen die Umsetzungsrate des Substrates deutlich zu verbessern.

2.5.1 ULTRASCHALL

Als Ultraschall werden akustische Schwingungen mit Frequenzen von 20 kHz bis 10 MHz bezeichnet. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit in flüssigen und festen Medien ist deutlich höher als in gasförmigen Medien. Dies liegt an den Absorptionskoeffizienten des entsprechenden Mediums. Je dichter die atomare Struktur eines Materials, desto besser können die Schwingungen von Atom zu Atom weitergegeben werden.

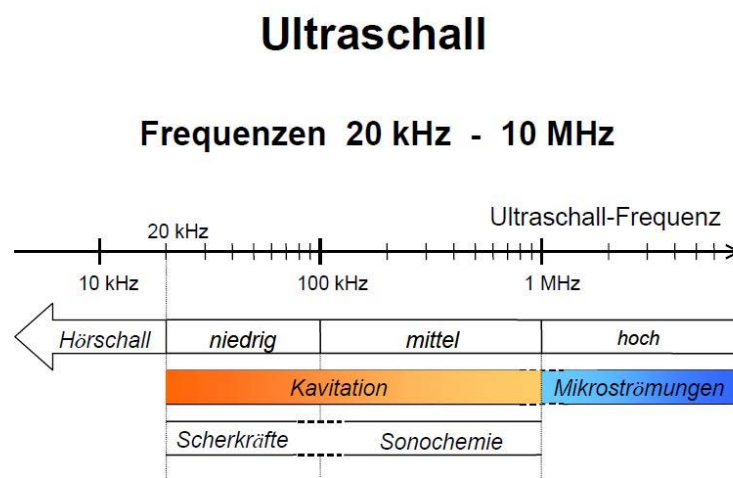


ABBILDUNG 5: FREQUENZBEREICH DES ULTRASCHALLS (QUELLE /NICKEL+NEIS/ FOLIE 6)

Ultraschall wird über elektroakustische Schallgeber erzeugt (vgl. /Physik/ S. 197). Elektrische oder magnetische Schwingungen werden über den umgekehrten Piezoeffekt⁸ in mechanische Schwingungen umgewandelt.

Es gibt vielfältige technische Anwendung für Ultraschall. Neben medizinischen Techniken wie Sonografie und zur Zahnbehandlung gibt es Anwendungen in Sonar- und Echolotortung. In der Messtechnik können Ultraschallsensoren als Entfernungs- oder Durchflussmesser dienen. Werkstücke können auf Risse und Unregelmäßigkeiten geprüft werden.

⁸Umgekehrter Piezoeffekt: Durch mechanische Deformation eines piezoelektrischen Kristalls kommt es zu einer Verschiebung von Ladungen und zu einem Aufbau eines elektrischen Feldes (vgl. /Physik/ S. 316)

2.5.2 KAVITATION

Die Beschallung des Substrates mit Ultraschall ist Mittel zum Zweck, um innerhalb des Mediums Kavitation zu erreichen.

Kavitation, das heißt „die durch spontane Verdampfung ausgelöste Hohlraumbildung in Flüssigkeiten“ (siehe /PhyD/ S. 195), soll in den meisten technischen Anwendungen möglichst vermieden werden, da die Kavitationseffekte Bauteile beschädigen.

Die Bernoulli-Gleichung liefert die mathematische Grundlage zur Erklärung von Kavitationsentstehung. Der Gesamtdruck p_0 in einer stationären, reibungsfreien inkompressiblen Flüssigkeit mit der Strömungsgeschwindigkeit v ist die Summe aus dem statische Druck p und dem Produkt aus halber Dichte ρ und Geschwindigkeit v zum Quadrat (Staudruck) (vgl. /PhyD/ S. 37). Je größer die Strömungsgeschwindigkeit einer Flüssigkeit, desto geringer ihr statischer Druck:

$$p + \frac{\rho}{2}v^2 = \text{const.} = p_0 \quad \text{FORMEL 6: BERNOULLI-GLEICHUNG}$$

Sobald der statische Druck unter den Dampfdruck der Flüssigkeit fällt, reißt die Wasserphase an Kristallisationsstellen auf und es bilden sich kleine, gasgefüllte Hohlräume. Diese werden durch die Ultraschallschwingung gestaucht und gedehnt, bis in der Blase Dampfsättigung vorliegt. Die Blase implodiert und an der Implosionsstelle können Temperaturen von 5200 K und bis zu 500 bar auftreten (siehe Abbildung 6). Diese extremen Bedingungen rufen starke Scherkräfte hervor, welche auf umgebende Materialien wirken und diese beschädigen oder zerstören können (vgl. /UWBro/). Der Kavitations-Effekt wird bei der Ultraschall-Desintegration genutzt, um Substratpartikel aufzubrechen.

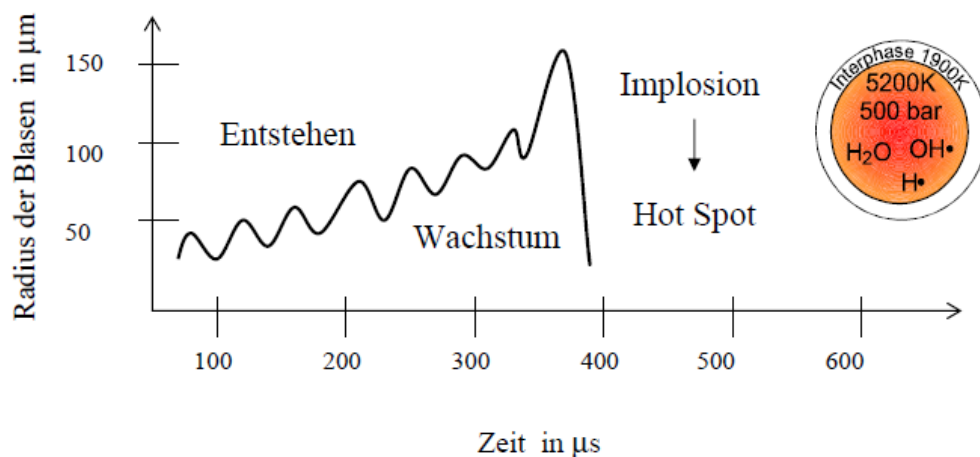


ABBILDUNG 6: BLASENBILDUNG BEI DER KAVITATION (QUELLE /NICKEL+NEIS/ FOLIE 7)

2.5.3 FUNKTIONSWEISE DER ULTRASCHALLDESINTEGRATION

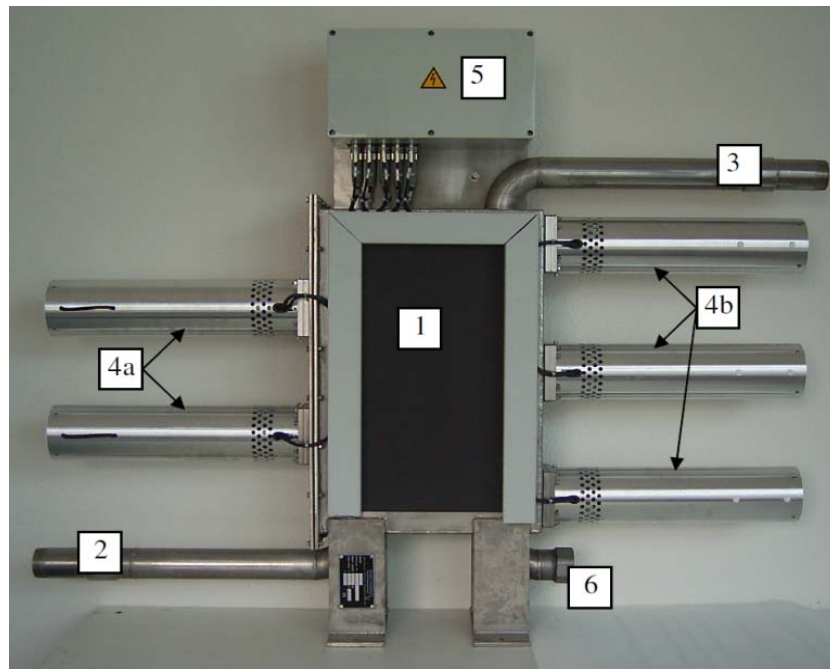


ABBILDUNG 7: AUFBAU DES ULTRASCHALLGENERATORS. 1:REAKTORBEHÄLTER; 2:ZUFLUSSROHR AUS DEM NACHGÄRER; 3:ABFLUSSROHR ZUM HAUPTFERMENTER; 4A+4B: SCHWINGGEBILDE MIT LÜFTUNGSROHR; 5:ELEKTRISCHER ANSCHLUSSKASTEN; 6: ABLAUFSTUTZEN ZUR NOTENTLEERUNG; QUELLE: /UWBET/

Der Ultraschallgenerator besteht aus einem zentralen Reaktorbehälter, von dem fünf sogenannte Schwinggebilde abzweigen. Durch das Zufuhrrohr fließt das Substrat in den Reaktor und wird nacheinander durch alle fünf Schwinggebilde geleitet, wo es mit Ultraschall behandelt wird, bevor es den Reaktor wieder verlässt. Ein Generator pro Schwinggebilde erzeugt die benötigte Leistung von 1000 W. Die Energieintensität liegt bei $25\text{-}50\text{ W/cm}^2$. Die elektrische Netzfrequenz von 230 V und 50 Hz wird in eine mechanische Sinusschwingung von 20 kHz umgewandelt, welche über eine Hochfrequenzleitung an die Schwinggebilde weitergegeben wird. Diese übertragen die Schwingungen auf das durchfließende Substrat.

Das Schwinggebilde besteht aus drei Elementen. Oben befindet sich der Wandler, welcher die elektrischen Netzschwingungen in mechanische Ultraschallschwingungen umwandelt und an die unteren Elemente weitergibt. Darunter befindet sich der sogenannte Booster, der die Schwingungen verstärkt, mit einem Flansch. Das ganze Gebilde ist so dimensioniert, dass an dem Flansch keine Ultraschallschwingungen auftreten. Unten liegt das wichtigste Bauteil, die Sonotrode. Diese überträgt den Ultraschall an das durchfließende Medium. Sie besteht aus Titan und ist das einzige Teil, welches Verschleißerscheinungen aufweist (abgesehen von Pumpenmotoren etc.)(Quelle:/UW/). Die Standzeiten, bis die Sonotrode ausgewechselt werden muss, liegen bei 1,5-2 Jahren. In dieser Zeit wird sie durch die Kavitation stark beansprucht, so dass das Titan teilweise abgetragen wird.

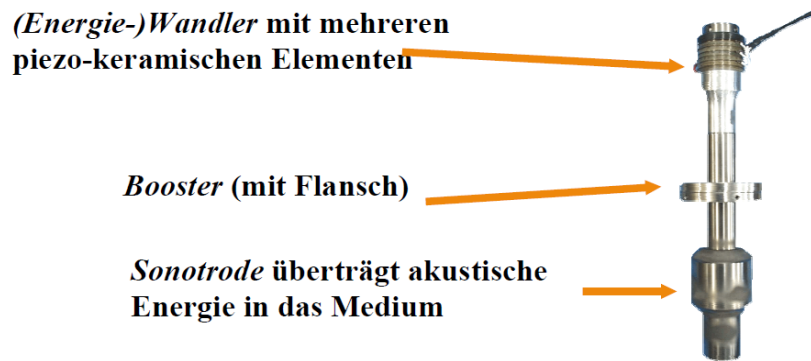


ABBILDUNG 8: AUFBAU DES SCHWINGGEBILDES (QUELLE: /NICKEL+NEIS/ FOLIE 9)

Der Ultraschallreaktor hat eine Leistungsaufnahme von 5 kW, dazu kommen 0,75 kW benötigte Pumpenleistung.

Die durch den Ultraschall auftretende Kavitation zerstört die vorbeifließenden Zellen. Die Zellbestandteile werden freigesetzt und können von den Bakterien leichter werden. Die Kontaktfläche zwischen Mikroorganismen und Substrat wird vergrößert. Enzyme werden freigesetzt, welche den bakteriellen Abbau intensivieren. Die Desintegration setzt im geschwindigkeitslimitierenden Hydrolyseschritt ein (siehe Kapitel 2.1.1). Die Schritte der Gassynthese, d.h. die Synthese von CO_2 und Wasser zu Methan sowie die Spaltung von Essigsäure durch die Methanbakterien werden beschleunigt und intensiviert.

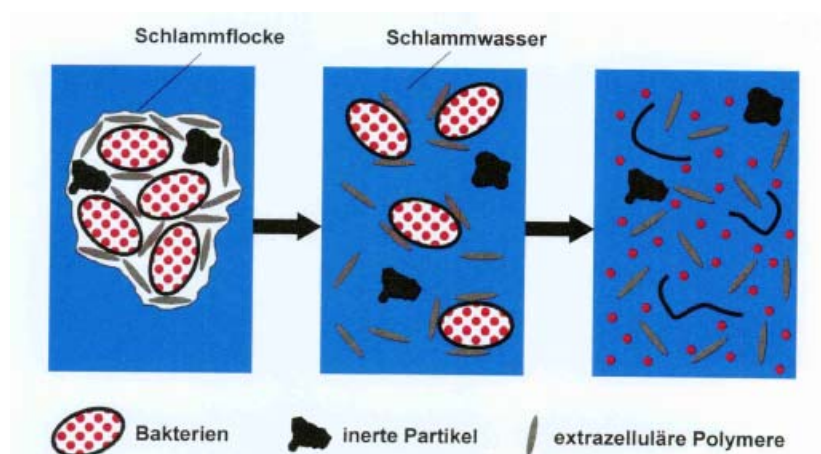


ABBILDUNG 9: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER ZERSTÖRUNG DER BIOMASSE NACH ULTRASCHALLBEHANDLUNG (ENERGIEEINTRAG NIMMT VON LINKS NACH RECHTS ZU, FREISETZUNG AN GELÖSTEM CSB (CHEMISCHER SAUERSTOFFBEDARF) WIRD ERST NACH ZELLZERSTÖRUNG GEMESSEN. DIE MESSUNG DES FREISETZTEN CSB IST EIN MAß DAFÜR, WIE VIELE KOHLENSTOFFVERBINDUNGEN THEORETISCH IN BIOGAS UMGESETZT WERDEN KÖNNEN). (QUELLE /UWLAB/)

Die Ultraschall-Desintegration von Ultrawaves wird zurzeit vor allem in Kläranlagen eingesetzt. Diese Methode verbessert den Abbau des Klärschlammes, so dass mehr Biogas gewonnen wird und weniger Restschlamm übrig bleibt. Die Bildung von Blähschlämmen und Schäumen wird reduziert und die Denitrifikation in der Abwasserreinigung wird unterstützt.

Der Einsatz der Ultraschall-Desintegration in Biogasanlagen ist im Vergleich dazu relativ neu. Er birgt laut Hersteller Ultrawaves großes Potential, da Substrat eingespart beziehungsweise der Gasertrag erhöht werden kann. Primär werden bei Einsparungen von Substrat Kosten gespart beziehungsweise der Gewinn durch erhöhte Gasausbeute maximiert.

Der Einsatz von Ultraschall-Desintegration lohnt sich, wenn der Energiegehalt des zu bearbeitenden Mediums hoch genug und der TS-Gehalt möglichst niedrig ist (sonst schlecht pumpfähig). Bei Biogasanlagen, die rein mit

Gülle gefahren werden, lohnt sich der Einsatz nicht, da Gülle wenige verwertbare Kohlenstoffverbindungen enthält. Wirtschaftlich rentiert sich ein weiterer Aufschluss durch die geringe Energiedichte nicht.

2.5.4 HERSTELLERVERSPRECHEN

Das Ziel der Ultraschallbehandlung ist eine bessere Umsetzung des Substrates durch die Bakterien, sozusagen eine größere Ausschöpfung des im Substrat enthaltenen Energiepotentials.

Durch die Zerstörung der Zellstrukturen sinkt die Viskosität im Fermenter, so dass das Substrat besser pumpfähig ist, was sich positiv auf Rührzeiten und Leistungsaufnahme von Pumpen auswirkt. Die aufgeschlossenen Partikel sind für die Mikroorganismen leichter zu verstoffwechseln, wodurch die Gasproduktion pro Zeit bzw. pro eingesetzte Masse Substrat steigt. Eine Steigerung der Gasproduktion von 10-25 % kann erreicht werden. Als Nebeneffekt kann eine Steigerung des Methangehalts im Biogas eintreten, was zu einer höheren Energiedichte im Gas führt.

2.5.5 EINBINDUNG IN DIE BIOGASANLAGE

Der Ultraschallgenerator ist in der Biogasanlage 2 zwischen den Hauptfermenter und den Nachgärer geschaltet. 1,7 m³ Substrat pro Stunde werden aus dem Nachgärer entnommen und mit Ultraschall behandelt bzw. der Kavitation ausgesetzt. Dann wird es in den Hauptfermenter zurück gepumpt. Das entspricht einem 50 prozentigen Teilstrom bezogen auf das Inputvolumen und einem Massestrom von 40,8 t/Tag. Der Ultraschallreaktor ist in einem kleinen Container direkt neben der Biogasanlage untergebracht.



ABBILDUNG 10: ULTRASCHALL-GERÄT IM CONTAINER VOR DER BIOGASANLAGE. ZU SEHEN IST DAS ABFLUSSROHR IN DEN NACHGÄRER SOWIE DREI SCHWINGGEBILDE UND DIE SCHUTZVERKLEIDUNG DES GERÄTES (EIGENES FOTO)

ABBILDUNG 11: ULTRASCHALLGERÄT IM CONTAINER VOR DER BIOGASANLAGE. ZU SEHEN IST LINKS DIE SCHUTZVERKLEIDUNG DES ULTRASCHALLGERÄTES, RECHTS UNTEN DIE PUMPE, DIE DAS SUBSTRAT BEFÖRDERT UND RECHTS OBEN DER KASTEN FÜR DIE ELEKTRONISCHE ANSTEUERUNG. NICHT IM BILD: HINTER DEM STEUERUNGSKASTEN BEFINDEN SICH DIE ULTRASCHALLGENERATOREN (EIGENES FOTO)



3 ANALYSE

In diesem Kapitel wird untersucht, auf welche Faktoren sich die Ultraschall-Desintegration (USD) auswirkt und wie und in welchem Umfang sie durch die Ultraschallbehandlung beeinflusst werden.

3.1 BEEINFLUSSTE FAKTOREN

Primäres Ziel ist es, durch die Zuschaltung des Ultraschallgenerators von Ultrawaves die Biogasproduktion zu steigern. Zahlreiche andere Größen werden von dem Einsatz des Gerätes beeinflusst. Diese sind im Folgenden in Form einer Mind Map dargestellt:

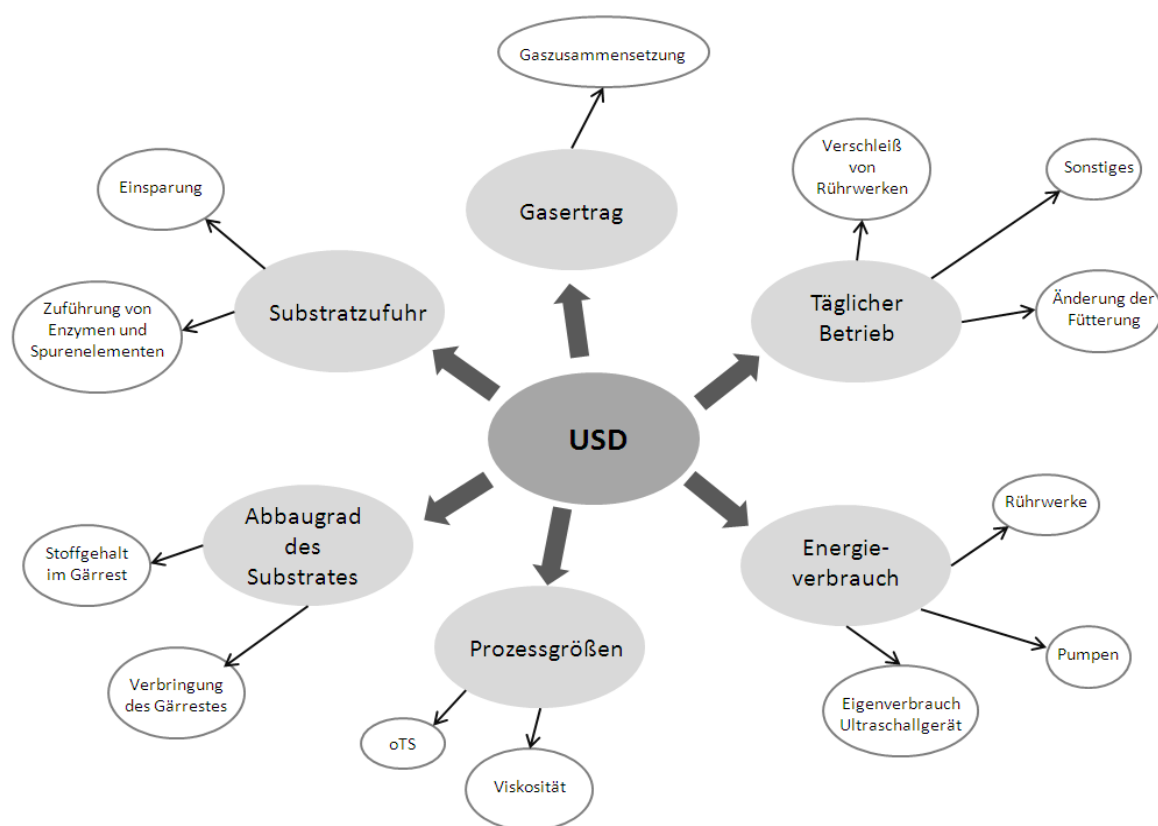


ABBILDUNG 12: DURCH ULTRASCHALL-DESINTEGRATION (USD) BEEINFLUSSTE GRÖßEN

3.2 GASERTRAG

Durch Ultraschall-Desintegration wird die Biogasproduktion auf der Gärstrecke erhöht und der Gasertrag pro Einheit zugeführten Substrats steigt. Um beurteilen zu können, wie groß die Steigerungsrate ist, müssen mehrere Fragen geklärt werden:

1. Auf welche Größe wird der Gasertrag bezogen? (m^3 Gas pro t FM/ m^3 Gas pro t TS/ m^3 Gas pro t oTS, ...)
2. Wie hoch ist die Steigerung im Vergleich zu Vorjahreswerten und zur Schwesteranlage ohne USD?
3. Ändert sich der Methangehalt im Gas?

3.2.1 ERTRAGSBEZUGSGRÖßEN

Für gewöhnlich wird der Gasertrag auf die zugeführte t oTS (vgl. 2.2.6) bezogen (vgl. /Hand1/ S.30). Da die Frischmasse während des Silierens und Lagerns einen großen Teil an Wasser verliert und nur die organischen Bestandteile des Substrates verwertet werden, scheint dieser Bezug zweckmäßig. Der entstehende Silagesaft wird bei den hier betrachteten Biogasanlagen in der Gärstrecke wieder eingebracht. Da der Sickersaft stark mit Nährstoffen angereichert ist (vgl. 2.3.6), ist diese Rückführung sinnvoll.

Es stellt sich die Frage, ob es korrekt ist, den Gasertrag pro eingesetzte Tonne organische Trockenmasse anzugeben. Falls der Silagesickersaft berücksichtigt werden muss, müssen oTS-Gehalt des Silagesaftes und der Anteil der Niederschlagsmenge am Silagesaft bekannt sein. Abzuschätzen ist, inwiefern die Zugabe des Silagesaftes eine Rolle spielt, denn diese wird durch den Einsatz der USD nicht verändert. Das Verhältnis Zugabe Substrat/Zugabe Silagesaft bleibt gleich.

Der Einfluss des Silagesickersaftes wird in einer Rechnung untersucht (siehe Anhang 1). Vereinfachend wird eine konstante Silage-Füttermenge von 40 t am Tag, eine Silagesaftmenge von konstant 6 t (der Sickersaft der BGA Rendswühren besteht hauptsächlich aus Niederschlagswasser) am Tag sowie ein konstanter Gasertrag von 9000 m³ angenommen. In drei Varianten wird berechnet, wie sich der Gasertrag pro Tonne oTS in Abhängigkeit vom Gärstaftanteil im Silagesaft verändert.

Die Rechnung ergibt, dass die Zusammensetzung des Silagesaftes kaum eine Rolle spielt, da die durch den Silagesaft beigesteuerte Menge oTS nur etwa 2,3 % der Gesamtmenge oTS beträgt. Im Beispiel entspricht dies einer Menge von 245 kg oTS. Durch Variation der Silagesaft-Zusammensetzung ergibt sich eine maximale Änderung des Wertes für die Gasmenge pro Tonne oTS von 3 %.

TABELLE 9: GASERTRÄGE IN ABHÄNGIGKEIT DER SILAGESAFTZUSAMMENSETZUNG. EIGENE RECHNUNG.

Gärstaft-Anteil am Silagesaft	Gasertrag in m ³ /t oTS	Gasertragsschwankungen
0%	833	101,09 %
50%	824	100,00 %
100%	815	98,91 %

Auf Grundlage der Rechnung kann der Silagesaft in weiteren Betrachtungen vernachlässigt werden. Die Rechnung berücksichtigt nicht die Verfügbarkeit des oTS im Silagesaft. Die organischen Säuren und Nährstoffe liegen im Silagesaft hauptsächlich in gelöster Form vor und sind für die Bakterien viel leichter zu verwerten als oTS aus reiner Silage. Der Gasertrag pro m³ Sickersaft ist in der Realität deutlich höher als berechnet.

Eine weitere Einflussgröße auf die oTS-Verfügbarkeit ist die Häcksellänge der Silagepartikel, d.h. wie fein die Biomasse bei der Ernte zerkleinert wird. Substrat mit einer Häcksellänge von 4 mm hat einen deutlich größeren Gasertrag als Substrat mit einer Häcksellänge von 20 mm bei gleichem oTS-Gehalt (vgl. Abbildung 13).

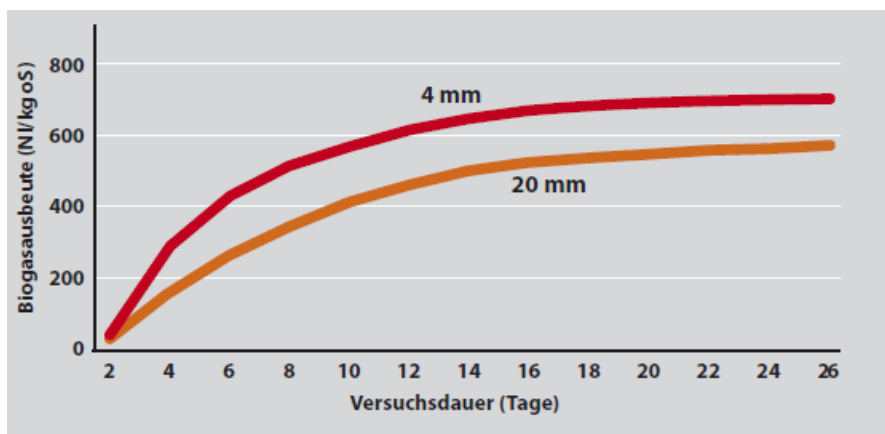


ABBILDUNG 13: BIOGASERTRÄGE IN ABHÄNGIGKEIT ZUR VERWEILDUER BEI ZWEI UNTERSCHIEDLICHEN HÄCKSELLÄNGEN. BATCH-VERSUCH (VGL. KAPITEL 2.3.1) DER FIRMA SCHAUMANN ÜBER 26 TAGE (QUELLE: /FIBEL/ S.6)

Da in der Rechnung vereinfachend dieselbe Verfügbarkeit des oTS im Silagesaft wie im Substrat angenommen wurde, wird der Einfluss beziehungsweise der Gasmehrertrag durch den Silagesaft nicht wiedergegeben. Erfahrungswerte zeigen, dass durch den Einsatz von 1 m³ Silagesaft rund 500 kg Silage gespart werden können (/Paul/).

Weil der Silagesaft nicht kontinuierlich anfällt, es keine Analysen zum seinem Nährstoffgehalt gibt und sich seine Zusammensetzung je nach Jahreszeit und Niederschlagsmenge ändern kann, ist es schwer, den Einfluss des Silagesaftes zu quantifizieren. Es scheint nicht sinnvoll, die Ertragsbezugsgröße m³ Gas/t oTS anzunehmen. Da die beiden Biogasanlagen in Rendswühren in Bezug auf Baugleichheit, Biologie und Fütterung nahezu gleich sind, wird der Gasmehrertrag durch die Ultraschall-Desintegration im Folgenden in m³ pro zugeführte Substratmenge (Silage und Silagesaft) angegeben und der Silagesickersaft nicht weiter berücksichtigt.

3.2.2 VERGLEICH ZU VORJAHRESWERTEN DER GASPRODUKTION

Die Bewertung des Mehrertrages durch die Ultraschall-Desintegration wird auf die Produktionswerte der Anlage im Vorjahr bezogen. Durch die Analyse dieser Werte kann festgestellt werden, welche die durchschnittliche Gasproduktion ist und erlaubt einen Vergleich zu den neuen, ultraschallbeeinflussten Werten. Im Folgenden werden die Werte der Anlage 2, an die der Ultraschallreaktor angeschlossen ist, und der Anlage 1 ohne USD im Zeitraum vom 18.01.2011 bis 30.11.2011 untersucht und verglichen. Für diesen Zeitraum stehen verlässliche Werte, die nicht durch technische (Mess-)Probleme beeinflusst wurden, zur Verfügung.

Die Füttermenge wird in t Substrat angegeben (vgl. Kapitel 3.2.1). Die Sickersaftmengen werden in nachstehender Analyse nicht berücksichtigt, weil sie einen geringen Anteil an der Gasproduktion haben und die Mengen über das Jahr nicht gleichmäßig verteilt sind.

Da es keinen separaten Gaszähler für die produzierten Biogasmengen der Biogasanlage gibt, wurden die Gaserträge auf der Basis von Gasverbrauch des BHKWs, Gasverbrauch der Gasfackel (Laufzeit der Fackel multipliziert mit Leistung der Fackel [700 kW]) und Gasverluste durch die Behälterabdeckungen (0,3 m³ Gas pro Tag⁹) errechnet. Diese Werte, ausgenommen die Dachverluste, werden automatisch alle 24 h von einem

⁹Der Wert wurde einer Leckageuntersuchung von September 2011 durch die Firma gewitra GmbH entnommen.

Messsystem erfasst. Die Auswertungen in Anhang 2 und Anhang 4 enthalten neben den Messwerten technische Vorkommnisse, die aus dem Betriebstagebuch der BGA entnommen sind.

Die aus der Analyse der Vorjahreswerte der Anlage 2 ergibt sich eine durchschnittliche Gasproduktion von 9.110 m³ pro Tag. Der Wert wird ermittelt, indem der Mittelwert der einzelnen Gaserträge pro Tag gebildet wird. Gasmengen von unter 8.500 und über 10.000 m³ werden in der Rechnung nicht mit einbezogen. Diese niedrigen oder sehr hohen Erträge deuten auf technische Probleme des BHKWs hin (Anhang 2) und haben nichts mit der Gasproduktion der Biogasanlagen zu tun.

Die durchschnittliche zugeführte Substratmenge pro Tag liegt bei 39,074 t.

Markante Punkte in der Grafik (siehe Abbildung 14) wurden mit Nummern versehen und werden im Folgenden erläutert:

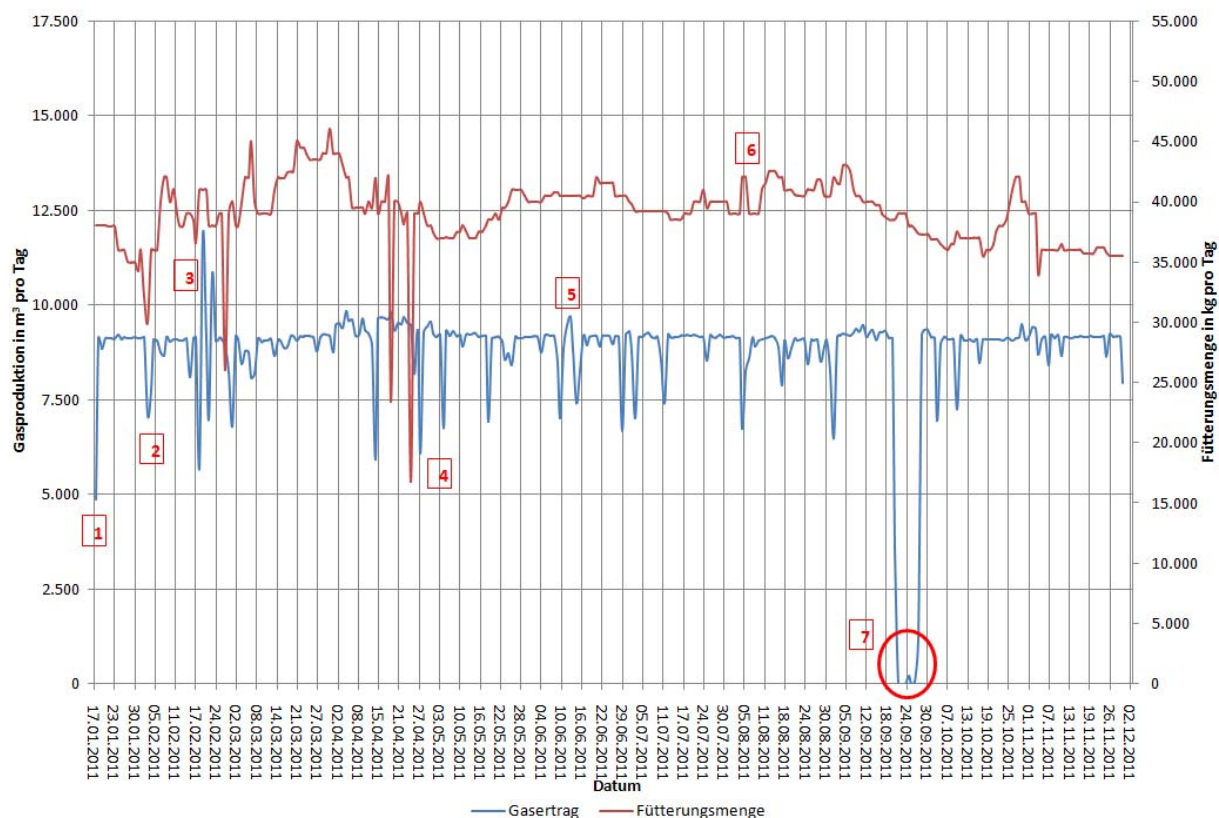


ABBILDUNG 14: GASPRODUKTION UND FÜTTERMENGE DER BGA 2 (MIT ULTRASCHALL-DESINTEGRATION) IM ZEITRAUM VOM 18.01.-30.11.2011

Punkt 1 im Januar 2011 zeigt eine sehr niedrige Gasproduktion bei unter 5000 m³ pro Tag. In diesem Zeitraum befand sich die Anlage im Anfahrvorgang, die reguläre Gasproduktion begann erst ab dem 18. Januar.

Punkt 2 ist ein typischer Einbruch der Gas-Kurve von rund 2000 m³ am Tag, die über das ganze Jahr verteilt vorkommen. Dies liegt nicht an einer verminderten Gasproduktion sondern an kurzzeitigen Abschaltungen des BHKWs. Um Ölwechsel durchzuführen oder Zündkerzen auszutauschen oder Reparaturen durchzuführen (siehe Spalte „Vorkommnisse“ in Anhang 2), wurden diese Abschaltungen vorgenommen. An Punkt 5 ist ebenfalls ein Einbruch der Gasproduktion zu erkennen, gleich danach ein Peak nach oben und wieder ein Einbruch. Beim ersten Abschalten des BHKWs am 10.06. lief 3 Stunden lang die Gasfackel. Das Biogas, was nicht verbrannt werden konnte, wurde in den Gasblasen zwischengespeichert. Am 13.06., als das BHKW wieder lief, wurde diese gespeicherte Menge verbrannt, was zu dem starken Anstieg führte. Am 15.06. fiel der Gasverbrauch des BHKWs wieder auf Grund von technischen Problemen ab. In diesem Zeitraum lief die Gasfackel für 7 Stunden.

Nach einer Drosselung oder Abschaltung des BHKWs für einige Stunden tritt ein Peak auf. Die in den Gasblasen gespeicherte Gasmenge wird verbrannt. Punkt 4 lässt sich auf dieselbe Weise wie Punkt 2 und 5 erklären.

Punkt 3 zeigt Ausschläge nach oben und nach unten in der Gaskurve. Am 18.02. liegt die Gasproduktion bei 9148 m^3 , die Fütterungsmenge liegt mit $36,6 \text{ t}$ rund 3 t unter der durchschnittlichen Fütterungsmenge von 39 t . Das weist auf technische Störung des BHKWs hin. Durch Motorprobleme war am 19.02. die Notkühlpumpe angeschaltet. Am 19.02. liegt der Gasverbrauch 3300 m^3 unter dem Durchschnitt. Am 20.02. liegt der Gasverbrauch des BHKWs bei rund 2800 m^3 über der durchschnittlichen Produktion von 9110 m^3 , was daran lag, dass die am 19.02. nicht genutzte Gasmenge am 20.02. zusätzlich verbrannt wurde. Eine ähnliche Schwankung auf Grund des überhitzten Motors liegt zwischen dem 21.02. und dem 23.02. vor.

Ab Punkt 6 ist im Betriebsprotokoll vermerkt, dass der Gaszähler des Blockheizkraftwerkes defekt war. Dies erklärt das Fehlen von Werten über einen Zeitraum von sechs Tagen.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass Einbrüche und daraufhin ansteigende Kurven der Gasproduktion sämtlich auf technische Probleme beim BHKW zurückzuführen und aus der technischen Dokumentation erklärbar sind.

Die Füttermenge unterliegt ebenfalls zeitlichen Schwankungen. Diese verlaufen in größeren Zeiträumen als bei der Gasproduktion. Die Substratmengen werden je nach Maisqualität oder Drosselung des BHKWs erhöht oder gesenkt.

Die Darstellung von Gasmengen und Füttermengen im Vergleich sagt nichts über die Gasproduktion pro Menge Substrat aus. Um die Abhängigkeit von Gasertrag zur Füttermenge zu verdeutlichen, wird im nächsten Schritt das Verhältnis von Gasertrag zu Füttermenge in Abhängigkeit zur Zeit dargestellt:

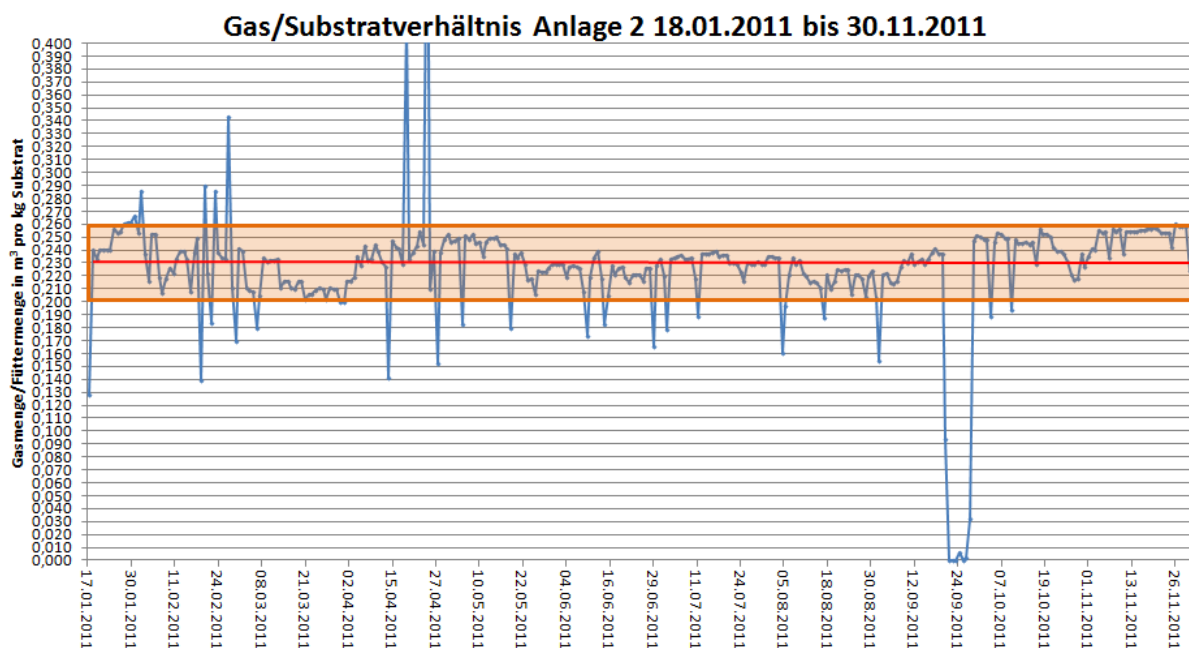


ABBILDUNG 15: VERHÄLTNIS GASERTRAG / FÜTTERMENGE, D.H. GASMENGE PRO KG SUBSTRAT DER BGA 2 (MIT ULTRASCHALL-DESINTEGRATION)

Wie in Abbildung 15 erkennbar, liegt das durchschnittliche Verhältnis von Gasertrag zu Füttermenge bei $0,23 \text{ m}^3/\text{kg}$ Substrat (vgl. Anhang 2). Der Mittelwert wird innerhalb einer Spanne von $0,15 - 0,30 \text{ m}^3/\text{kg}$ (oranger Bereich in Abbildung, d.h. $0,20-0,25 \text{ m}^3/\text{kg}$) berechnet, damit er nicht durch Extremwerte verfälscht wird. Diese Extrema¹⁰ kommen unter anderem durch fehlende Messwerte oder plötzlich herunter gefahrene

¹⁰abrupte Schwankungen nach oben oder unten

Füttermengen zustande. Um den Mittelwert wird ein Bereich von $\pm 0,03$ festgelegt, um die Schwankungsbreite der Werte darzustellen. Dieser Bereich wird so breit gewählt, dass 90 % aller Messwerte darin liegen.

Zum Vergleich wird das Verhältnis aus Gasertrag und Füttermenge mit Werten der Anlage 1 ohne USD gebildet (siehe Anhang 4 und Anhang 5). Bei Anlage 1 schwankt das Verhältnis von Gas und Füttermenge um $0,23 \text{ m}^3/\text{kg}$, der durchschnittliche Gasertrag liegt mit 9147 m^3 knapp über der Produktion von Anlage 2 (9.100 m^3 pro Tag). Die durchschnittliche Füttermenge liegt bei 36.892 t pro Tag. Grund dafür waren zahlreiche technische Störungen im Laufe des Jahres, weswegen die Fütterung gedrosselt wurde. Ab dem 23.06. fiel der Gaszähler des BHKWs aus. Von Juni bis November liefert das Messsystem kaum Werte für den Gasverbrauch des BHKW 1. Kleine Ausschläge der Gasproduktionskurve lassen sich auf kurzzeitiges Anspringen des Zählers und den Gasbedarf der Notgasfackel zurückführen.

Die Untersuchungen zeigen, trotz Messausfällen und technische Problemen, dass die Anlagen 1 und 2 sehr gut miteinander vergleichbar sind, denn die produzierten Einheiten Gas pro t eingesetztes Substrat sind nahezu gleich. Eine Steigerung des Gasertrages durch die Ultraschall-Desintegration in Anlage 2 kann im Vergleich zu dem voraussichtlich gleichbleibenden Ertrag aus Anlage 1 dargestellt werden.

Wird von einer Steigerung von 15 % mehr Gas pro Einheit Substrat ausgegangen, müsste sich in Zukunft ein mittleres Verhältnis von $0,26 \text{ m}^3$ Gas pro t Substrat ergeben. 90 % der zukünftigen Werte sollten in einem Bereich von $\pm 0,03$, d.h. $0,23-0,29$ schwanken.

3.2.3 METHANGEHALT

Der Methangehalt ist der wesentliche Faktor für die Qualität des Biogases. Je höher der Methangehalt, desto höher die Energiedichte. Um zu prüfen, ob die von der Firma Ultrawaves vorhergesagte Erhöhung des Methangehaltes im Gas auftritt, werden die Methangehalte vom 18.01.2011 bis zum 31.04.2012 verglichen.

Die Entwicklung des Methangehalts im Gas ist in Anhang 7 und in Abbildung 16 dargestellt. In dem Diagramm sind der Methan-Gehalt in Volumenprozent, die Füttermenge in t und der Gasertrag in m^3 gegen die Zeit aufgetragen. Der durchschnittliche Gasertrag liegt bei $52,0 \%$.

Gut erkennbar ist in der Grafik, wie sensibel die Methanproduktion, d.h. indirekt das biologische System im Fermenter, auf Schwankungen in der Fütterung reagiert:

Am 27.02.2011 wird die Füttermenge an einem Tag von 39 t auf 26 t reduziert und am folgenden Tag wieder auf 39 t angehoben. Der Methangehalt sinkt daraufhin am 28.02. von 51,6 auf 47,9 Vol.-% um 3,7 Vol.-%. Leicht verzögert sinkt der Gasertrag am 01.03. auf einen Tiefstwert um 2125 m^3 (siehe Anhang 7).

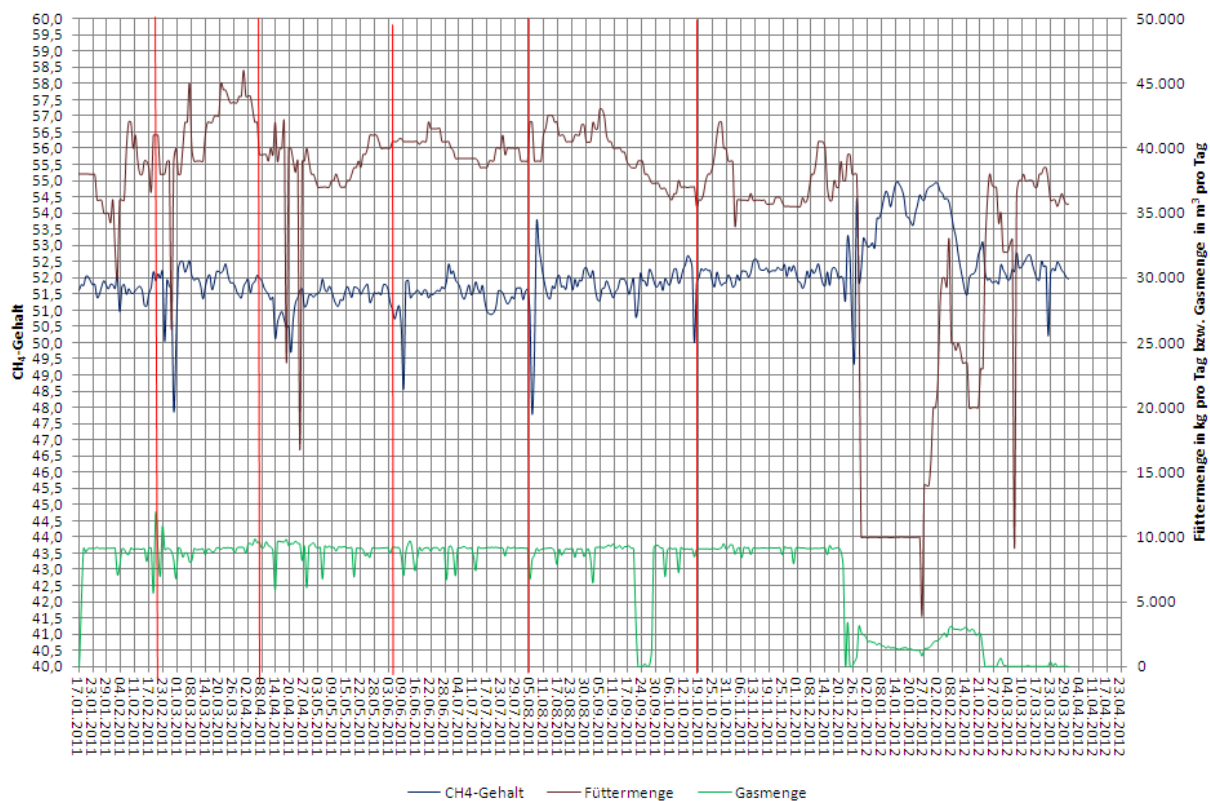


ABBILDUNG 16: METHANGEHALT DES BIOGASES DER BGA 2 IM VERGLEICH ZU FÜTTERMENGE UND GASMENGE. MIT EINER SENKRECHTEN ROTEN LINIE SIND MARKANTE PUNKTE IN DER GRAFIK MARKIERT.

Dieses Absinken der Werte liegt an der plötzlichen Anhebung der Füttermenge von 26 t auf 39 t um 13 t an einem Tag. In einem kurzen Zeitraum steht deutlich mehr Substrat für die Bakterien zu Verfügung. Die hydrolytischen Bakterien reagieren nach kurzer Zeit und steigern ihre Aktivität, so dass mehr organisches Material gespalten wird und es zu einer gesteigerten Freisetzung von Säuren kommt. Die Methanbakterien werden durch die Säuren daran gehindert, weiteres Substrat abzubauen und in Methan umzuwandeln. Neben der Methankonzentration fällt die Gasausbeute.

Nach diesem kurzfristigen Absinken des Methangehaltes ist nach einer Gewöhnungszeit von 1-2 Tagen wieder ein Anstieg des Methangehaltes zu beobachten. Die Mikroorganismen haben sich an die veränderten Umstände gewöhnt und können die erhöhte Substratmenge verwerten.

Im Dezember 2011 traten technische Störungen am Blockheizkraftwerk auf und die Gasverbrennung wurde gestoppt. Da, bis auf die Gasblasen, keine Gasspeicher auf der BGA vorhanden sind, wurde die Füttermenge stark gedrosselt. Im Februar 2012 wurde das BHKW komplett ausgetauscht und die tägliche Substratmenge wurde langsam wieder erhöht. Im März war die Füttermenge wieder auf einem Stand von rund 39 t am Tag. Auffällig ist in diesem Zeitraum, dass der Methan-Gehalt mit etwa 54 % deutlich über dem durchschnittlichen Wert von 52 % liegt. Durch die gedrosselte Substratzufuhr verringerte sich die Raumbelastung, d.h. die Substratzufuhr pro Volumen. Die Verweilzeit im Fermenter erhöht sich, was sich positiv auf den Methangehalt auswirkt (vgl. Kapitel 2.3.2).

Am 03.02. fand die Einbindung des Ultraschallreaktors statt. Da zu diesem Zeitpunkt die Füttermenge stark gedrosselt und somit das biologische System nicht im Gleichgewicht war, lässt sich der Einfluss der Ultraschall-Desintegration in der Grafik nicht nachweisen.

3.3 SUBSTRATZUFUHR

3.3.1 SUBSTRATMENGEN NACH EINBINDUNG DER ULTRASCHALL-DESINTEGRATION

Primäres Ziel des Einsatzes von Ultraschall-desintegration ist die Einsparung von Substrat und die verbundene Kosteneinsparung. Die Einsparung wird ermöglicht durch einen besseren Aufschluss des eingesetzten Substrates und eine bessere Verwertung der Inhaltsstoffe.

Es ist nicht sinnvoll, die Gasmehrerträge beziehungsweise die Substrateinsparungen in m^3 pro t oTS anzugeben (vgl. Kapitel 3.2.1). Die Anlagen 1 und 2 werden mit derselben Maisqualität gefüttert. Die Biologie in den Fermentern hat eine ähnliche Struktur, d.h. sie basieren auf derselben Startkultur (Anlage 2 wurde mit einer Probe aus Anlage 1 angeimpft), die sich möglicherweise unterschiedlich in Bezug auf Menge und Struktur entwickelt hat. Darum wird der Gasertrag in m^3 pro t zugeführtes Substrat angegeben.

Bis zum Ende der Datenaufnahme (31.03.2012) sind keine Reduktionen der Füttermenge, bezogen auf eine konstante Gasmenge von rund 9100 m^3 (vgl. Abbildung 16) festzustellen, d.h. pro Kubikmeter Biogas wird genauso viel Substrat (0,23 kg) benötigt wie vor der Einbindung der USD. Dies liegt vor allem daran, dass das BHKW der Anlage 2 seit Dezember letzten Jahres bis zur Mitte Februar 2012 auf Grund von technischen Schwierigkeiten still stand. Die Füttermenge wurde auf ein Minimum reduziert, um möglichst wenig Gas zu produzieren, da das produzierte Biogas nicht über das BHKW verwertet werden konnte. Im Februar wurde der Motor des BHKWs ausgetauscht und daraufhin die Füttermenge schrittweise wieder angehoben. Bis zum Zeitpunkt der Einbindung der USD war die Biologie im Fermenter nicht in ihrem Normalzustand, d.h. die Füttermenge bei rund 39 t pro Tag und der Gasertrag bei 9100 m^3 . Die ermittelten Werte für Gasertrag und Füttermenge lassen keine Hinweise auf einen Mehrertrag durch die Ultraschall-Desintegration zu, da sich die Biologie erst wieder an die Veränderungen anpassen muss.

Laut der Firma Ultrawave ist ein Mehrertrag erst nach drei Verweilzeiten messbar. Dies wäre bei der BGA der Firma B.A.U.M. nach 90 Tage der Fall, etwa Anfang Mai. Die Auswertung dieser Daten muss in Zukunft die Firma B.A.U.M. übernehmen. Im Zuge dieser Arbeit wurden dafür Auswertungstabellen erstellt, die den Vergleich mit den Vorjahreswerten ermöglichen.

3.3.2 BENÖTIGTE SPURENELEMENTE

Wie in Kapitel 2.4.1 dargestellt, werden dem im Fermenter eingesetzten Substrat täglich rund 15 kg Spurenelemente zugesetzt. Das Ultraschallsystem macht Zellbestandteile leichter verfügbar, das erhöht die Aktivität der Bakterien (Erhöhung der Stoffwechselrate, schnellere Substratumsetzung). Daraus ergibt sich die Fragestellung, ob mit dem Einsatz des Ultraschallsystems mehr Spurenelemente gebraucht werden, um den gestiegenen Bedarf der Bakterien durch die erhöhte Stoffwechselaktivität zu decken oder ob weniger Spurenelemente benötigt werden, da durch die Desintegration Enzyme und Nährstoffe freigesetzt werden.

Die Firma Ultrawaves hat bislang keine Erfahrungen auf diesem Gebiet.

Die Firma Schaumann BioEnergy, die die Spurenelemente ausgehend von eigenen Messungen je nach Bedarf für die BGA in Rendswühren mischt, hat ebenfalls keine Erfahrungen in diesem Bereich. Ein Gespräch mit der Firma ergab, dass sich durch Substrataufschluss die Zusammensetzung im Fermenter nicht ändere. Der Bedarf an Spurenelementen sei „chemisch festgelegt“ und eine Reduktion sei nur mengenmäßig zu erwarten, d.h.

wenn 15 % weniger Substrat zugeführt wird, werden 15 % weniger Spurenelemente benötigt. Das Verhältnis bliebe gleich. Ein erhöhter Bedarf an Spurenelementen sei nicht zu erwarten.

Voraussichtlich ändert sich die benötigte Menge an Spurenelementen nicht. Trotzdem sollte der Bedarf an Spurenelemente überprüft werden, um die zuzusetzende Menge an Spurenelemente ggf. zu reduzieren (finanzielle Einsparung). Dies kann durch folgende Messungen geschehen:

- Vierteljährliche Analysen des Fermenterinhalt durch die Firma Schaumann
- Variation der Spurenelementezugabe und Vergleich der Gaserträge

Die Analysen des Fermenterinhalt oder des Gärrestes belegen, ob Stoffüberschüsse oder –mängel vorliegen. Die Variation der Spurenelementezugabe ist mit einem gewissen finanziellen Risiko verbunden, da sich der Gasertrag verringern kann. Bei der Variation der Spurenelementezugabe sind einerseits die erhöhten Kosten durch erhöhte Zugabe gegen andererseits den erhöhten Nutzen abzuwägen.

3.3.3 EINGESETZTE ENZYMMENGE

Da die Enzyme zum Einsatz kommen, wenn das Substrat im Fermenter sehr dickflüssig und schlecht pumpfähig ist oder wenn Schwimmschichten vorhanden sind, lässt sich die Wirksamkeit der Ultraschall-Desintegration in diesem Feld erst auf längere Sicht, d.h. mindestens ein Jahr, bestimmen. Da durch den Ultraschallreaktor die Viskosität gesenkt wird, ist zu erwarten, dass diese Schwimmschichten deutlich seltener auftreten, so dass der Einsatz von Enzymen stark reduziert werden kann.

Zum Thema Enzym-Einsatz in Biogasanlagen wurde die Firma Schaumann BioEnergy befragt. Laut der Firma komme es darauf an, welches das Ziel des Enzymeinsatzes sei¹¹:

- Wenn die Viskosität gesenkt werden soll, kann der Enzymeinsatz durch die Ultraschalldesintegration überflüssig werden. Da beide Hilfsmittel dieselbe Funktion übernehmen, nämlich, die Viskosität zu senken, sollte eines der beiden angewendet werden.
- Soll durch Enzyme der Gasertrag erhöht werden, was durch Enzyme bis zu einem gewissen Grad, d.h. 1-5 % möglich ist, können sich die Effekte von Ultraschall-Desintegration und Enzymen addieren. D.h., wenn die Gasausbeute sich durch die Enzyme um 2 % erhöht und durch den kavitationsbedingten Aufschluss um 15 %, beliefen sich die gesamte Erhöhung um 17 %.

Diese Vermutungen der Firma Schaumann BioEnergy sind nicht durch Versuche oder Anwendungen belegt, sondern basieren auf Erfahrungen der Mitarbeiter im Bereich Enzymeinsatz¹².

Seit Einbindung des Ultraschallsystems im Februar war kein Enzymeinsatz in BGA 2 notwendig, da das Substrat sehr gut pumpfähig war. Da das Ziel des Enzymeinsatzes auf der BGA Rendswühren nicht die Erhöhung der Gasausbeute ist (ansonsten müssten die Enzyme regelmäßig, d.h. täglich oder wöchentlich zugegeben werden), ist keine Änderung der Gasmenge möglich. Ob der Bedarf an Enzymen durch die Ultraschall-Desintegration gesenkt wird, lässt sich zu diesem Zeitpunkt nicht sagen.

^{11,12} Telefonat mit Mitarbeit der Firma Schaumann BioEnergy

3.4 PHYSIKALISCHE UND CHEMISCHE MESSGRÖßEN

Beim Betrieb der Biogasanlagen in Rendswühren werden regelmäßig Messwerte festgehalten. Neben dem Methan-Gehalt werden vom automatischen Messsystem auf der Anlage der pH-Wert im Fermenter sowie Sauerstoff- und Schwefelwasserstoff-Werte im Gas erfasst.

Von der Firma Ultrawaves werden wöchentlich bis zweiwöchentlich der Trockensubstanzgehalt und der Gehalt an organischer Trockensubstanz in allen drei Gärbehältern (Fermenter, Nachgärer, Gärrestlager) analysiert.

Nachstehend werden diese physikalischen und chemischen Parameter einzeln geprüft. Es wird untersucht, wie der Ultraschallreaktor sich theoretisch auf die Messgrößen auswirkt. Diese Thesen werden mit Messwerten belegt.

3.4.1 PH-WERT

Eine Änderung des pH-Wertes durch die Ultraschall-Desintegration ist nicht zu erwarten. Durch die USD wird einerseits mehr Substrat in organische Säuren umgesetzt, andererseits werden diese von den Methanbakterien effektiver zu Biogas umgesetzt. Die Säuren/Basen-Verhältnisse ändern sich nicht, was wichtig ist, denn die Mikroorganismen können nur bei pH-Werten zwischen 6,8 und 8,2 überleben (siehe Kapitel 2.2.3).

3.4.2 SAUERSTOFFKONZENTRATION

Bei der Konzentration des Sauerstoffs sind keine Veränderungen zu erwarten. Da er in Form von Luft durch eine Dosierpumpe in den Fermenter eingebracht wird, um Schwefel abzuscheiden (siehe 2.4.5), ist seine Konzentration nicht vom Ultraschallreaktor beeinflusst, zumal es sich bei der Biogasbildung um einen überwiegend anaeroben Prozess handelt (vgl. Kapitel 2.1.1).

3.4.3 SCHWEFELWASSERSTOFFKONZENTRATION

Durch den verbesserten, kavitationsbedingten Aufschluss ist es möglich, dass durch die Aufspaltung von Aminosäuren mehr Schwefelverbindungen und Schwefelwasserstoff freigesetzt werden. Die Werte der Schwefelwasserstoffkonzentration im Biogas seit Anlaufen der BGA 2 sind in Anhang 8 und Abbildung 1 dargestellt:

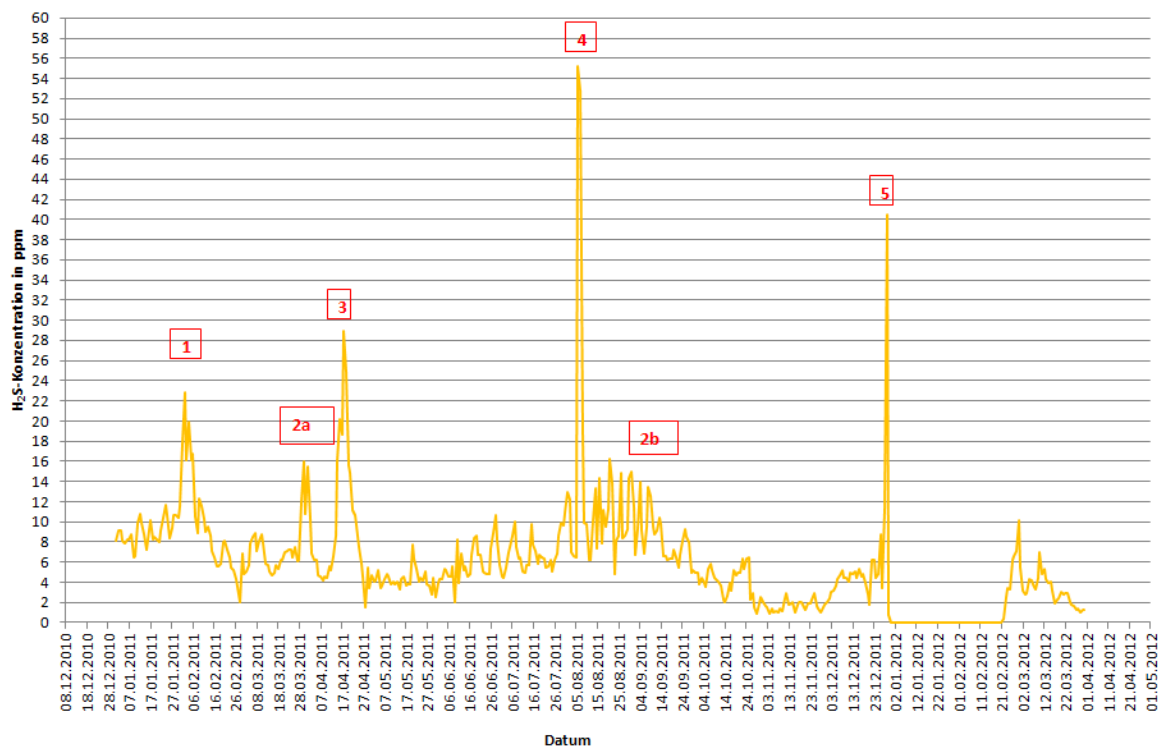


ABBILDUNG 17: SCHWEFELWASSERSTOFFKONZENTRATION IM BIOGAS DER BGA 2, 01.01.2011-31.03.2012

Die Grafik zeigt die Schwefelwasserstoffkonzentration in ppm abhängig von der Zeit im Zeitraum vom 01. Januar 2011 bis zum 31. März 2012. Die Werte liegen in einem Bereich von 0 - 55 ppm. Die mittlere Schwefelwasserstoffkonzentration, ermittelt vom 01.01.2011 bis zur Einbindung des Ultraschallgeräts am 03.02.2012, liegt bei 7 ppm.

Wie zu erkennen, liegen 6 erhöhte Werte der Schwefelwasserstoffkonzentration vor. Die Peaks 1-3 lassen sich auf Schwankungen der Füttermenge zurückführen. Bei Punkt 1 steigt die Füttermenge vom 02.02. auf den 03.02. um 2 t Substrat an und wird vom 04.02. auf den 05.02. um zwei Tonnen gesenkt. Vom 05.02. auf den 06.02. wird die Menge um 2 t gesenkt. Diese Schwankungen führten zu den drei dicht zusammenliegenden Peaks bei Punkt 1. Vermutlich bedingt durch die hohe H_2S -Konzentration wurde an diesen Tagen wenig Gas produziert (Schwefelwasserstoff hemmt Mikroorganismen, siehe Kapitel 2.1.2). Die Werte für die Gas- und Füttermengen werden Anhang 2 entnommen.

Auch bei Punkt 4 wurde die Füttermenge von einen auf den anderen Tag von 41 auf 39 t gesenkt. Zu diesem Zeitpunkt wurde eine Mischung aus Ganzpflanzensilage und Mais gefüttert. Nur die Menge an Mais wurde gesenkt. Da GPS eiweißreicher als Mais ist, das heißt, mehr Schwefelverbindungen enthält, kommt es zu dem rapiden Anstieg des Schwefelwasserstoffs im Gas auf 55 ppm. Am 07.08. trat eine BHKW-Störung auf, die vermutlich auf den hohen Schwefelwasserstoffgehalt zurückzuführen ist (Versäuerung des Motoröls oder Korrosionsschäden). Die Werte bei Punkt 2b von August bis Anfang September liegen über der mittleren Konzentration von 7 ppm. In dieser Zeit wurde eiweißreiche GPS zugefüttert, woraus die hohen H_2S -Werte resultierten.

Am 29.12.2011 entstand ein hoher Peak. Dieser lässt sich dadurch erklären, dass die Menge drastisch um 18 t gesenkt wurde. In diesem Zeitraum traten schwere BHKW-Störungen auf, weshalb wenig Substrat gefüttert wurde.

Für den Zeitraum vom 31.12. bis zum 21.02. hat das Messsystem keine Werte erfasst.

Nach den hohen Peaks sinkt die Schwefelwasserstoffkonzentration jedes Mal schnell wieder ab. Die Sauerstoffzufuhr, die die Grundlage für die biologische Entschwefelung ist, wird manuell gesteuert. Wird an einem Tag ein hoher Wert gemessen, wird sie manuell reguliert, um den erhöhten Bedarf an Sauerstoff zu decken und so die H₂S-Konzentration wieder zu senken.

Seit Inbetriebnahme der Ultraschall-Desintegration liegt die mittlere Schwefelwasserstoffkonzentration im Biogas bei 3 ppm. Das passt nicht zu der oben aufgestellten These, dass der Gehalt eher zunimmt, da proteinreiche Verbindungen besser aufgeschlossen werden. Erklären lässt sich das dadurch, dass die H₂S-Konzentration sehr stark vom Substrat abhängt und sensibel auf Schwankungen reagiert. Ob die niedrige H₂S-Konzentration von 3 ppm repräsentativ ist, zeigt sich erst, wenn der Wert über die nächsten Monate konstant niedrig bleibt. Dies würde den Einfluss der Ultraschall-Desintegration belegen.

3.4.4 GEHALT AN TROCKENSUBSTANZ UND ORGANISCHER TROCKENSUBSTANZ

Es ist zu erwarten, dass der oTS-Wert, d.h. der Gehalt an organischer Trockensubstanz, durch den Einsatz der Ultraschall-Desintegration spürbar sinkt. Die organischen Strukturen werden durch das Gerät zersetzt und so für die Bakterien besser zugänglich gemacht. Die bisherigen Ergebnisse sind in Abbildung 18 ersichtlich.

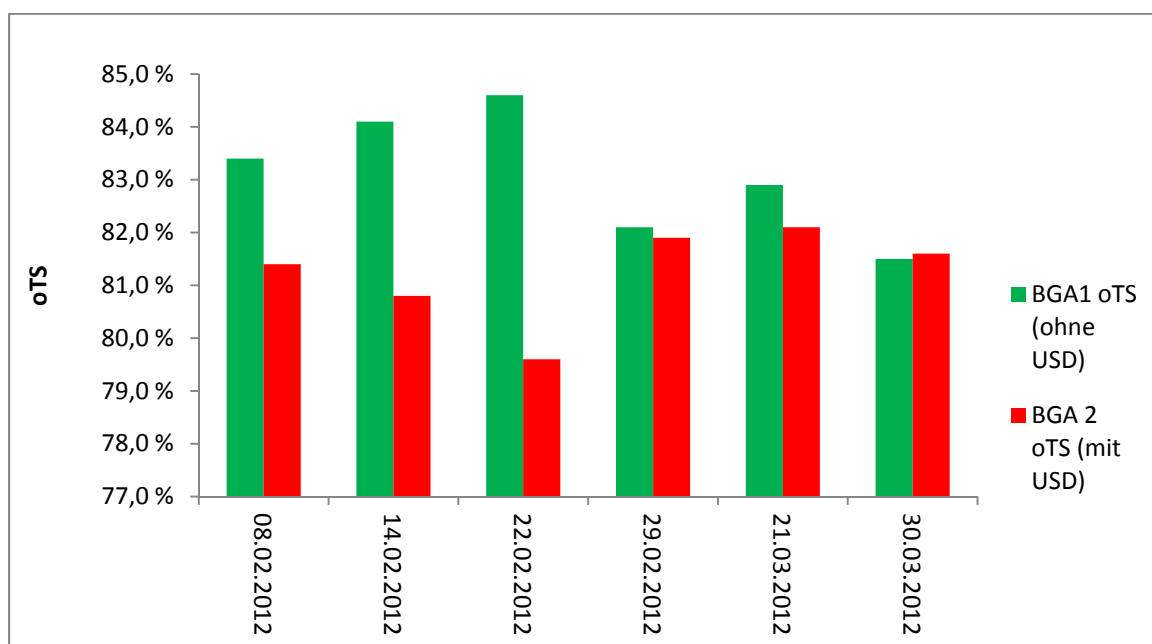


ABBILDUNG 18: GEHALT AN ORGANISCHER TROCKENSUBSTANZ DER ANLAGEN BGA 1 UND BGA 2 IM VERGLEICH

Der Trockensubstanzgehalt wird, parallel zum oTS-Gehalt, sinken, da die Strukturen durch den Ultraschallreaktor zersetzt werden. Er sinkt nicht so stark wie der oTS-Gehalt, da in der Trockensubstanz neben den organischen Strukturen sehr festes, schlecht zersetzbares Material vorhanden ist, wie Lignine oder langkettige Cellulosen. Die bisherigen Ergebnisse sind in Abbildung 19 dargestellt.

In der Abbildung 18 ist zu erkennen, dass sich der oTS-Gehalt der Anlage 2 mit USD bis zum 29.02. verhält wie in der oben aufgestellten These vorhergesagt: Der oTS-Gehalt sinkt. Da zwischen dem 22.02. und 29.02. schrittweise die Fütterung beider Anlagen auf eine andere Maissorte umgestellt wurde, stieg der oTS-Gehalt der Anlage 2 wieder an. Zwischen 29.02. und 30.03. ist eine leichte Abnahme des oTS-Gehaltes von 0,3 % zu erkennen.

Der oTS-Gehalt in Anlage 1 ohne USD steigt zwischen dem 08.02. und dem 22.02. um 1,2 %. Nach Umstellung der Fütterung sinkt der oTS-Gehalt um 2,5 % auf 82,1 %, steigt wieder um 0,8 % an und sinkt wieder leicht auf 81,5 %.

Obwohl beide Anlagen mit derselben Maisqualität gefüttert werden, liegen die oTS-Gehalte anfangs um 2 % auseinander. Das kann daran liegen, dass die Anlage BGA 2 in diesem Zeitraum wenig gefüttert wurde. Das Substrat hatte eine lange Verweilzeit im Fermenter, und die organische Substanz konnte gründlicher aufgeschlossen werden als in Anlage BGA 1, die normal gefüttert wurde und eine kurze Verweilzeit hat.

Da der oTS-Gehalt der Anlage 2 mit USD nach Umstellung geringfügig sinkt und der oTS-Gehalt der Anlage 1 ohne USD ebenfalls sinkt, ist diese Abnahme vermutlich nicht auf die Ultraschall-Desintegration sondern auf die Maisqualität zurückzuführen.

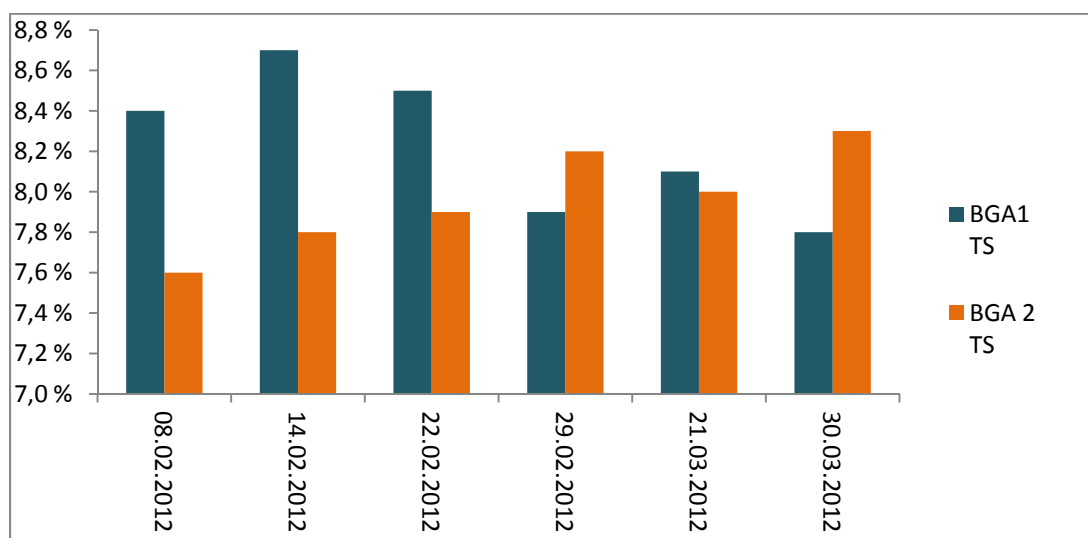


ABBILDUNG 19: GEHALT AN TROCKENSUBSTANZ DER ANLAGEN BGA 1 UND BGA 2 IM VERGLEICH

Der Gehalt an Trockensubstanz in den beiden Anlagen verhält sich sehr ähnlich wie der oTS-Gehalt. Der Gehalt in BGA 2 ist deutlich niedriger als in der BGA 1. Die Begründung für diese Entwicklung ist dieselbe wie für die organische Trockensubstanz, denn der TS-Gehalt unterscheidet sich um den (relativ geringen) Gehalt an anorganischer Substanz vom oTS-Gehalt.

Die Auswirkungen der Ultraschall-Desintegration lassen sich bisher nicht am oTS-, bzw. TS-Gehalt ablesen, zumal sich die Maissorte der Fütterung innerhalb des Messzyklus ändert. Ein Einfluss der USD ist zukünftig eindeutig messbar, wenn die Fütterung über mehrere Wochen bis Monate bezogen auf Menge und Qualität konstant bleibt.

3.4.5 VISKOSITÄT

Es wird untersucht, ob die Viskosität, wie vom Hersteller versprochen, durch den Einsatz der USD sinkt. Am 20.03.2012 wurde eine Viskositätsmessung vorgenommen. Es wird jeweils eine Probe der BGA 1 und BGA 2 verglichen. Bei unterschiedlichen Scherraten bzw. Schergeschwindigkeiten wird die Viskosität der Proben ermittelt

In Abbildung 20 sind die Viskositäten der beiden Proben bei unterschiedlichen Scherraten dargestellt. Deutlich erkennbar liegt die Viskositäts-Kurve der BGA 2 unter der der BGA 1, die Viskosität ist geringer und der Fermenterinhalt ist flüssiger und rührfähiger.

Da vorläufig erst eine Viskositätsmessung durchgeführt wurde, lässt sich der Einfluss der Ultraschall-Desintegration nicht eindeutig belegen. Weitere Messungen werden zeigen, ob die Viskosität in der BGA 2 mit USD langfristig geringer ist als die der BGA 1 ohne USD.

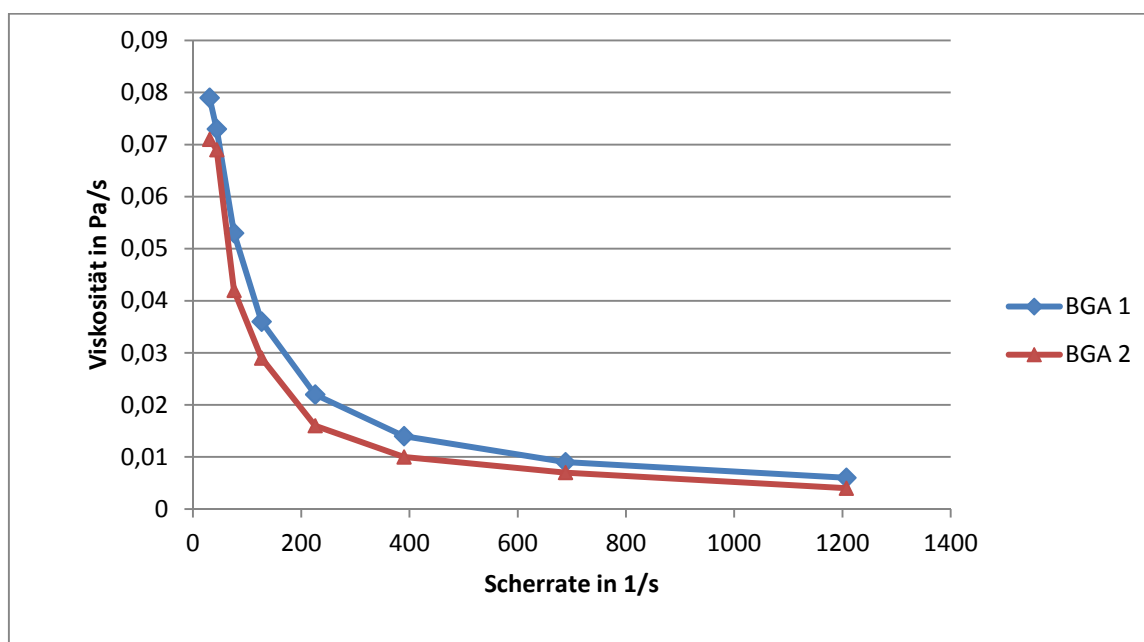


ABBILDUNG 20: VISKOSITÄTEN DER BGA 1 UND BGA 2 IM VERGLEICH BEI VERSCHIEDENEN SCHERRATEN. QUELLE: MESSUNG FIRMA ULTRAWAVES

3.5 ENERGIEVERBRAUCH

Die Anschlussleistung des Ultraschallgeräts beträgt 5 kW für den Ultraschallgenerator und 0,75 kW für die benötigten Pumpen. Die Ultraschall-Desintegration läuft 24 Stunden am Tag, die benötigte elektrische Energie beträgt 132 kWh am Tag und 48,3 MWh im Jahr (Laufzeit 350 Tage). Das wäre zukünftig ein Anteil am Gesamtenergiebedarf der Gärstrecke von 17,5 %.

Auf der einen Seite kommt es zu einer deutlichen Erhöhung des Strombedarfs durch das Ultraschallgerät. Ob es andererseits möglich ist, durch den Einsatz des Ultraschallgeräts Energie einzusparen, wird im Folgenden untersucht.

Durch die Veränderung der Viskosität durch die Ultraschall-Desintegration ist es theoretisch möglich, Antriebsenergie bei den Rührwerken zu sparen. Die Firma Ultrawaves berichtet von einer Anwendung des Ultraschallreaktors in einer Biogasanlage, bei der die Energieaufnahme durch verringerte Rührzeiten und Pumpzeiten um etwa ein Drittel gesenkt wurden.

Es handelt sich bei den Rührwerken der BGA um schnelllaufende Tauchmotor-Propellerrührwerke mit Drehzahlen über 100 U/min, welche nicht frequenzgeregelt, das heißt leistungsgeregelt sind. Sie sind mit einem Motorvollschutz gegen thermische und mit einem Motorschutzschalter gegen elektrische Überlastung

ausgestattet. Übersteigen Stromaufnahme oder Temperatur einen Schwellenwert, schaltet sich der Motor ab. Schwankungen in den Mediumseigenschaften wie veränderte Viskosität können schlechter berücksichtigt werden als beispielsweise bei langsam laufende (Paddel-)Rührwerke. Diese laufen permanent und sind mit Hydraulikantrieben ausgestattet, die eine stufenlose Drehzahländerung ermöglichen (vgl. /Praxis/ S. 102). Sie können auf eine verminderte Viskosität im Medium reagieren und ihre Leistungsaufnahme reduzieren.

Eine Messung der Leistungsaufnahme der Rührwerke ist geplant. Messwerte standen zum 31.03. (Ende Aufnahme der Messwerte) nicht zur Verfügung. Auf längere Sicht sollte untersucht werden, ob sich die Laufzeit von Pumpen und Rührwerken verringern lässt.

Es sind keine Messungen der Leistungsaufnahmen der Rührwerke und Pumpen vorhanden. Damit zukünftig ermittelt werden kann, ob es in diesem Bereich zu Stromeinsparungen kommt, wird der Strombedarf der gesamten Biogasanlage aus den Vorjahren aus Messprotokollen ermittelt und grafisch dargestellt. Treten zukünftig Stromeinsparungen durch die USD auf, kann durch den Vergleich der Gesamtstrommengen der BGA aus Vorjahres- und zukünftigen Werten auf die Höhe der Einsparungen geschlossen werden, d.h. verringert sich die Stromaufnahme von Pumpen und Rührwerken, sinkt der Gesamtenergiebedarf der BGA.

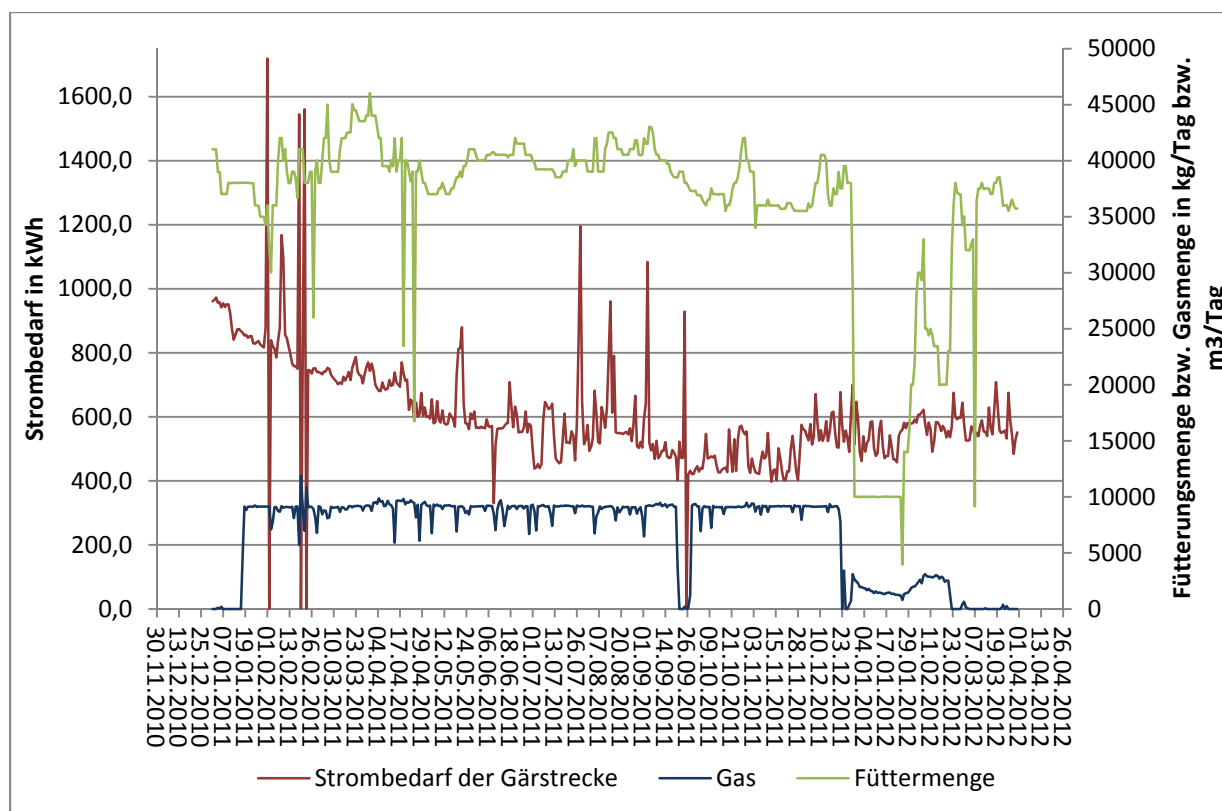


ABBILDUNG 21: STROMBEDARF DER BGA 2 (GÄRSTRECKE) VOM 01.01.2011 BIS ZUM 31.03.2012

Der Strombedarf der BGA 2 setzt sich zusammen aus dem Bedarf des zentralen Pumpenverteilers, der das Substrat vom Fermenter in den Nachgärer und vom Nachgärer ins GPL pumpt, die Rührwerke in Fermenter und Nachgärer, den Pumpenverteiler, der die Entnahme aus dem GPL steuert, die angeschlossene Messtechnik, die Pumpen für die Heizung und die Luftdosierpumpen. Der Zeitraum der Datenerfassung erstreckt sich vom 01.01.2011 bis zum 30.03.2012.

Der mittlere Leistungsbedarf der BGA 2 liegt bei 603 kWh pro Tag, der Gesamtenergiebedarf bei 227.034 kWh in 2011. Der mittlere Energiebedarf wurde unter Ausschluss von Extremwerten, d.h. Werte über 1000 kWh und unter 200 kWh berechnet. Bei diesen Extremwerte (Werte vom 01.+02.02., 19.+20.02., 22.+23.02. und

25.+26.09) liegt ein Fehler im Messsystem vor. Das System hat jeweils am ersten der Tage die Energiemengen von beiden Tagen angezeigt, am zweiten Tag nahezu keine Energieabnahme, z.B. 01.02.: 1718,0 kWh, 02.02.: 0,3 kWh. Für die anderen Ausschläge wurden keine Erklärungen gefunden, die zu dem erhöhten Strombedarf führen (es wurden geprüft: technische Vorkommnisse, Gas- und Füttermenge).

Nach Auswertung der Strommengen vom 01.01.2011 bis zum 30.03.2012 zeigen sich keine Einsparungen bezüglich des Strombedarfs durch das Ultraschallsystem. Die ermittelten Daten bilden eine Grundlage für spätere Auswertungen durch die Firma B.A.U.M. Consult.

Durch eine von der Firma Ultrawaves veranschlagte Substratminderung von rund 15 % kann rund 6 % Energie im Bereich der Fermenterbefüllung eingespart werden. Die dafür angestellten Rechnungen sind im Anhang 12 dargestellt. Die Befüllung der Dosiercontainer wird durch einen Radlader vorgenommen. Dieser kann pro Fuhre eine Masse von durchschnittlich 4,8 t transportieren. Bei einer angenommenen Füttermenge von 38 t benötigt der Radlader demzufolge rund acht Fahrten für eine vollständige Befüllung des Fermenters

Sinkt die nötige Substratzufuhr um 15 % auf 32 t, benötigt der Radlader etwa 7 Fahrten zur vollständigen Befüllung. Die verminderte Anzahl der Fahrten führt zu einer Einsparung von 1425 l Dieselkraftstoff und einer Personalersparnis von 6,34 % bezogen auf den Diesel- und Personalbedarf von beiden Biogasanlagen zusammen.

TABELLE 10: ENERGIE- UND PERSONALEINSPARUNG DURCH DIE ULTRASCHALL-DESINTEGRATION (USD) IM BEREICH FERMENTERBEFÜLLUNG

	Ohne USD	Mit USD	Ersparnis durch USD
Füttermenge	38 t	32 t	6 t
Benötigte Fahrten	7,9	6,7	1,2
Dieselbedarf	22.813 l	21.387 l	1426 l
Personalbedarf	1460 h	1369 h	91 h

3.6 ABBAUGRAD DES SUBSTRATES

Durch den Ultraschallreaktor wird das im Substrat enthaltene Gaspotential besser ausgeschöpft, das bedeutet, dass der anfallende Gärrest einen geringeren Energieinhalt hat als Gärrest aus einer Anlage ohne USD. Diese Energie liegt gebunden in Form von Kohlenstoffverbindungen vor. Die Anzahl der Kohlenstoffverbindungen im Gärrest reduziert sich mit der Zeit durch den Einsatz von Ultraschall-Desintegration, der Anteil an Mineralstoffen im Gärrest bleibt gleich, da diese nicht im Biogas gebunden werden.

Eine Gärrestanalyse wurde im April 2011 durch die Laborgruppe Agrolab durchgeführt. Der Gehalt an Kohlenstoffverbindungen (TS-Gehalt) und Spurenelementen (Gesamtstickstoff, Phosphat, Kalium) wurde gemessen. Es wurde der Gehalt an polychlorierten Dioxinen und Furanen (giftige Verbindungen) sowie Salmonellen und Clostridien festgestellt. Stickstoffgehalt und Phosphatgehalt sind wichtige Kenngrößen für die Düngewirkung des Gärrestes, sind daher relevant für den Landwirt, der den Gärrest auf seinem Feld ausbringt. Dioxine, Furane, Salmonellen und Clostridien können die menschliche Gesundheit bedrohen. Sie unterliegen daher gesetzlich geregelte Grenzwerte.

Der relevante Wert in Bezug auf das Ultraschallsystem ist der TS-Gehalt des Gärrestes. Der Trockensubstanzgehalt wird im Laufe der Zeit durch den Einsatz des Ultraschallgeräts sinken, da dieses die Strukturen des Substrates zerstört und dieses von den Bakterien besser umgesetzt werden kann. Werte dafür lagen zum Ende der Datenaufnahme nicht vor.

Der Gärrestbehälter wurde zuletzt im März 2011 geleert. Es wird empfohlen, innerhalb der nächsten Wochen eine Probe auf ihren organischen Trockensubstanzgehalt analysieren zu lassen, da der Gärrestbehälter zurzeit hauptsächlich Material enthält, welches nicht durch den Ultraschallreaktor beeinflusst wurde. Im Abstand von einigen Monaten wird eine zweite Probe gezogen werden, um zu ermitteln, wie sich der TS-Gehalt im Gärrest verändert hat.

Da für die Entsorgung des Gärrestes ein fester Preis pro m³ vereinbart wurde, wirkt sich eine Veränderung der Qualität des Gärrestes nicht finanziell (z.B. durch verbesserte Düngewirkung durch verbesserten Abbau) aus.

3.7 TÄGLICHER BETRIEB

Im täglichen Betrieb der Biogasanlage finden durch die Einbindung der Ultraschall-Desintegration keine größeren Veränderungen bezüglich des Arbeitsaufwands o.ä. statt. Täglich ist eine Sichtkontrolle nötig, um festzustellen, ob alle Komponenten des Ultraschallsystems (Pumpen, Reaktor, Ultraschallgenerator, Anschlusselektronik) einwandfrei arbeiten. Alle zwei Tage wird der Ultraschallreaktor etwa 10 Minuten lang gespült, um festgesetzte Sedimente freizuspülen.

Am 08.02., eine Woche nach Inbetriebnahme der USD fiel diese zwei Tage lang aus, weil es Probleme in der elektronischen Ansteuerung gab. Die Pumpen wurden neu justiert, da sie zu viel Substrat gepumpt hatten. Seitdem läuft das System einwandfrei (Stand 13.04.2012).

Die durch Ultraschall-Desintegration verminderte Viskosität kann theoretisch zu einem geringeren Verschleiß von Pumpen und Rührwerken führen. Grobe Partikel nutzen die Oberfläche der Propellerrührwerke ab, die geringere Partikelgröße durch die USD kann sich in diesem Bereich positiv auswirken. Der Motor wird durch die geringere Viskosität entlastet (weniger Schutzabschaltungen durch Motorvollschutz und Motorschutzschalter).

Da die Biogasanlage 1 und 2 erst seit 2009 bzw. 2010 in Betrieb sind, gibt es keine zuverlässigen Angaben, wie oft Motoren, Pumpen etc. ausgetauscht werden. Eine längere Standzeit der Komponenten durch den Ultraschallreaktor kann ohne Erfahrungswerte nicht gezeigt werden. In Zukunft wird sich zeigen, ob die Komponenten der BGA 2 mit USD eine längere Standzeit haben und wartungsärmer sind als die Komponente der BGA 1 ohne USD.

Die Firma Ultrawaves hat diesbezüglich keine langjährigen Erfahrungswerte.

4 ZWISCHENERGEBNIS

In Kapitel 3 werden die Parameter Gasertrag, Substratzufuhr, physikalische und chemische Messgrößen, Energieverbrauch, Abbau des Substrates und täglicher Betrieb auf mögliche Veränderungen durch die Ultraschall-Desintegration untersucht.

Bei keinem der Parameter kann eine eindeutige Änderung durch die Ultraschall-Desintegration belegt werden. Einzig die Viskosität des Substrates im Fermenter der BGA 2 (mit USD) zeigt tendenziell einen Einfluss durch das Ultraschallgerät (Viskosität ist geringer als in der BGA 1 ohne USD), eindeutig belegen lässt sich dies nicht.

Grund dafür, dass noch keine Änderungen der Parameter eingetreten sind, ist, dass das Ultraschall-Gerät erst seit zwei Monaten in die Biogasanlage eingebunden ist. Die Biologie im Fermenter braucht etwa drei Verweilzeiten, um sich an die veränderten Bedingungen anzupassen. Die Änderungen der Parameter sind Anfang Mai zu erwarten.

Im Rahmen der Ausarbeitung werden Werte ermittelt, die zukünftig als Referenzwerte für weitere Untersuchungen relevant sind:

- Die Untersuchung von Vorjahreswerten der Gas- und Füttermenge hat ergeben, dass das durchschnittliche Verhältnis von Gas zu Substrat bei $0,23 \text{ m}^3 \text{ Gas/kg Substrat}$ liegt.
- Der Eigenstrombedarf der Ultraschall-Desintegration liegt bei rund 50 MWh/a bzw. $17,5 \%$ am Gesamtenergiebedarf der Gärstrecke.

Des Weiteren werden Prognosen angestellt, wie sich die Parameter zukünftig durch die Ultraschall-Desintegration entwickeln werden. Diese sind im Folgenden kurz zusammengefasst:

- Der Methangehalt im Biogas wird steigen.
- Die Substratmenge, um eine definierte Menge Biogas zu produzieren, wird sinken.
- Der Bedarf an Spurenelemente pro Menge Substrat wird sich nicht verändern, die benötigte Gesamtmenge wird sinken (weniger Substrat nötig, weniger Spurenelemente nötig).
- Der Bedarf an Enzymen zum Auflösen von Schwimm- und Sinkschichten wird sinken. Die Funktion, die Viskosität im Fermenter zu senken, übernimmt die USD.
- Der oTS- und TS-Gehalt im Fermenter werden sinken.
- Leistungsaufnahme von Pumpen und Rührwerken in der BGA 2 mit USD werden durch die verringerte Viskosität sinken.
- Energieeinsparungen von bis zu 6% sind bei der Befüllung des Fermenters möglich. Sinkt die Menge an benötigtem Substrat, sinkt der Energie- und Personalbedarf des Radladers, der die Anlage befüllt.

Diese Aspekte sollten in Zukunft von der Firma B.A.U.M. Consult beachtet werden, um ggf. weitere finanzielle Einsparungen zu bewirken.

In einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung im folgenden Kapitel werden Einsparpotentiale, die sich in Kapitel 3 ergeben haben, finanziell bewertet. Dies ist eine Entscheidungshilfe für die Firma B.A.U.M. Consult, ob das Ultraschallgerät angeschafft werden sollte oder nicht.

TABELLE 11: ZUSAMMENFASSUNG ANALYSEERGEBNISSE DES KAPITELS 3

Bereich	theoretisch durch Ultraschallgerät beeinflusst	mit Messwerten/ Rechnungen belegt	Effekt durch Ultraschall-Gerät zum jetzigen Zeitpunkt darstellbar
Silagesickersaft	Nein	Ja	Nein
Gasausbeute	Ja	Ja	Nein
Methangehalt	Ja	Ja	Nein
Substratzufuhr	Ja	Ja	Nein
Einsatz von Spurenelementen	Nein	Ja	Nein
Einsatz von Enzymen	Ja	Ja	Nein
O ₂ -Gehalt	Nein	Ja	Nein
pH-Wert	Ja	Ja	Nein
H ₂ S-Gehalt	Ja	Ja	Nein
oTS	Ja	Ja	Nein
TS	Ja	Ja	Nein
Viskosität	Ja	Ja	Teilweise
Energiebedarf Ultraschallgerät	Ja	Ja	Nein
Energiebedarf Rührwerke/Pumpen	Ja	Ja	Nein
Nutzung des Radladers zu Befüllung der Anlage	Ja	Ja	Nein
Abbaugrad des Substrates	Ja	Nein	Nein
Täglicher Betrieb	Ja	Nein	Nein

5 WIRTSCHAFTLICHKEITSBETRACHTUNG

In den vorangegangenen Kapiteln wurden Parameter erarbeitet, die durch den Einsatz des Ultraschallreaktors der Firma Ultrawaves beeinflusst werden. In diesem Kapitel werden diese Faktoren finanziell quantifiziert, um eine Abschätzung vorzunehmen, ob sich die Ultraschall-Desintegration für die BGA der Firma B.A.U.M. Consult lohnt.

Durch den Einsatz der Ultraschall-Desintegration ändert sich die Kostenstruktur wie folgt:

TABELLE 12: ÄNDERUNG DER KOSTENSTRUKTUR DURCH ULTRASCHALL-DESINTEGRATION (USD) IM VERGLEICH ZUM BETRIEB OHNE USD

Ohne USD	Mit USD
Kosten:	Mehrkosten durch:
Substratkosten	Stromverbrauch US-Generator
Kosten Spurenelemente	Stromverbrauch US-Pumpen
Kosten Enzyme	Abschreibungskosten
Personalkosten Radlader	Wartungskosten
Dieselskosten Radlader	Kosten für Ersatzteile
Stromverbrauch Pumpe	Personalkosten
Stromverbrauch Rührwerke	Einsparungen bei:
	Substratkosten
	Kosten Spurenelemente
	Kosten Enzyme
	Personalkosten Radlader
	Dieselskosten Radlader
	Stromverbrauch Pumpe
	Stromverbrauch Rührwerke

Es entstehen einerseits Mehrkosten durch erhöhten Strombedarf, Anschaffungskosten, Wartung, Kosten für Ersatzteile und Personal, andererseits ergeben sich viele Möglichkeiten zur Kosteneinsparung durch veränderte Fütterung und veränderte Betriebskosten.

Um die Kosten zu quantifizieren, wird für jeden Kostenfaktor der Bedarf an Kosteneinheiten ermittelt (z.B. Kostenfaktor Stromverbrauch USD, benötigt 5 kWh elektrische Energie pro Stunde). Es wird ermittelt bzw. abgeschätzt, wie viele Kosteneinheiten im Jahr benötigt werden (z.B. Kostenfaktor Stromverbrauch USD 5 kWh pro Stunde, 24 Stunden pro Tag, Laufzeit 350 Tage im Jahr) und wie groß der Preis pro Kosteneinheit ist (z.B. Kostenfaktor Stromverbrauch USD € pro kWh). Daraus werden die jährlichen Gesamtkosten berechnet. Die Berechnungen dazu finden sich in Abbildung 22. (Da es sich um sensible, firmeninterne Daten handelt, werden alle Kosten normiert, indem davon ausgegangen wird, dass die jährlichen Gesamtkosten 100 entsprechen. Alle anderen Kosten werden dazu ins Verhältnis gesetzt, so dass keine absoluten €-Beträge erkennbar sind.)

Demgegenüber wurde auf demselben Wege die jährliche Kostenersparnis ermittelt. In mehreren Rechnungsvarianten wurden die eingesparten Kosten für eine Substrateinsparung von 5, 6, 10, 15 und 20 % berechnet sowie einer Enzymkosteneinsparung von 75 % und einer Stromeinsparung bei Pumpen und Rührwerken von 2 %.

TABELLE 13: AMORTISATIONSZEITEN UND GEWINN BEI UNTERSCHIEDLICHEN SUBSTRATEINSPARUNGEN

Substrateinsparung in %	Amortisationszeit in Jahren	Gewinn (normiert auf 100)
5	9,63	-9,91
6	7,16	6,91
10	3,53	74,19
15	2,16	158,28
20	1,56	242,38

Bei der Gegenüberstellung von Mehrkosten und Kostenersparnis stellt sich heraus, dass sich erst bei Einsparungen von mindestens 6 % Substrat die Investition in die Ultraschalltechnik lohnt. Erst ab diesem Wert ist die Bilanz im Jahr positiv.

Die Amortisationszeit liegt bei einer Einsparung von 6 % bei 7,16 Jahren, was für eine solche Investition relativ lang ist, da derartige Anlagen von der Buchhaltung über 8 Jahre abgeschrieben werden. Lohnend ist die USD für die Firma B.A.U.M. erst ab 10 % Substrateinsparung und optimal erst bei einer Einsparung von 15 %. Die Amortisation liegt bei einer Einsparung von 15 % bei 2,16 Jahren.

In Abbildung 22 sind die verschiedenen Einsparpotentiale quantitativ im Vergleich zueinander dargestellt. Ein Großteil der Kosten, rund 90 %, werden durch Substratkosten eingespart und etwa 3 % durch Einsparung bei den Enzymen. Die restlichen Kostenfaktoren machen zusammen etwa 7 % aus.

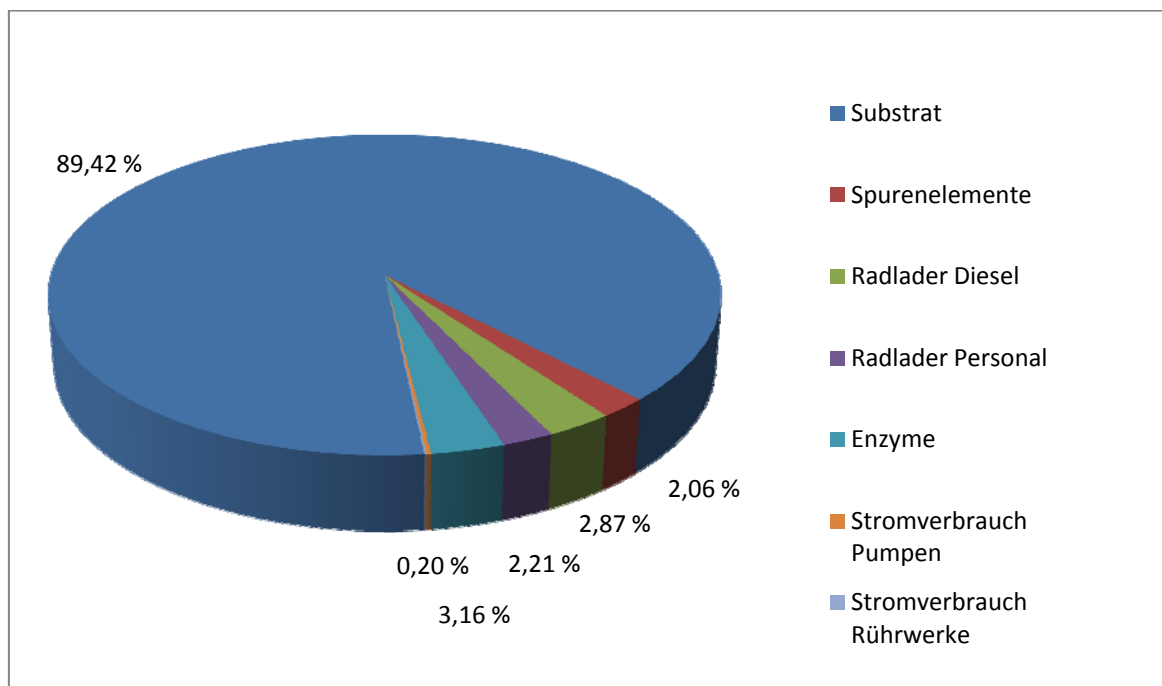


ABBILDUNG 22: KOSTENERSPARNIS DURCH USD (BEI EINER EINSPARUNG VON 10 % SUBSTRAT), DIE EINZELNEN EINSPARFAKTOREN IM VERGLEICH DARGESTELLT

Im nächsten Schritt werden die Preis- und die Kostenentwicklung der nächsten Jahre untersucht. Dafür werden Preissteigerungsraten im Bereich Strom und Substrat von 5 % und im Bereich laufende Kosten von 3 % pro Jahr angenommen. Für die folgenden zehn Jahre wird die Kostenentwicklung berechnet und in Abbildung 23 dargestellt. Es zeigt sich, dass die Kosten bei Einbindung der Ultraschall-Desintegration unter den Kosten ohne USD liegen und sich die Kosten weniger steil entwickeln. Das ist dadurch begründet, dass die hohen

Preisentwicklungen von 5 % für das Substrat durch die verminderte Menge an benötigtem Substrat abgefangen werden.

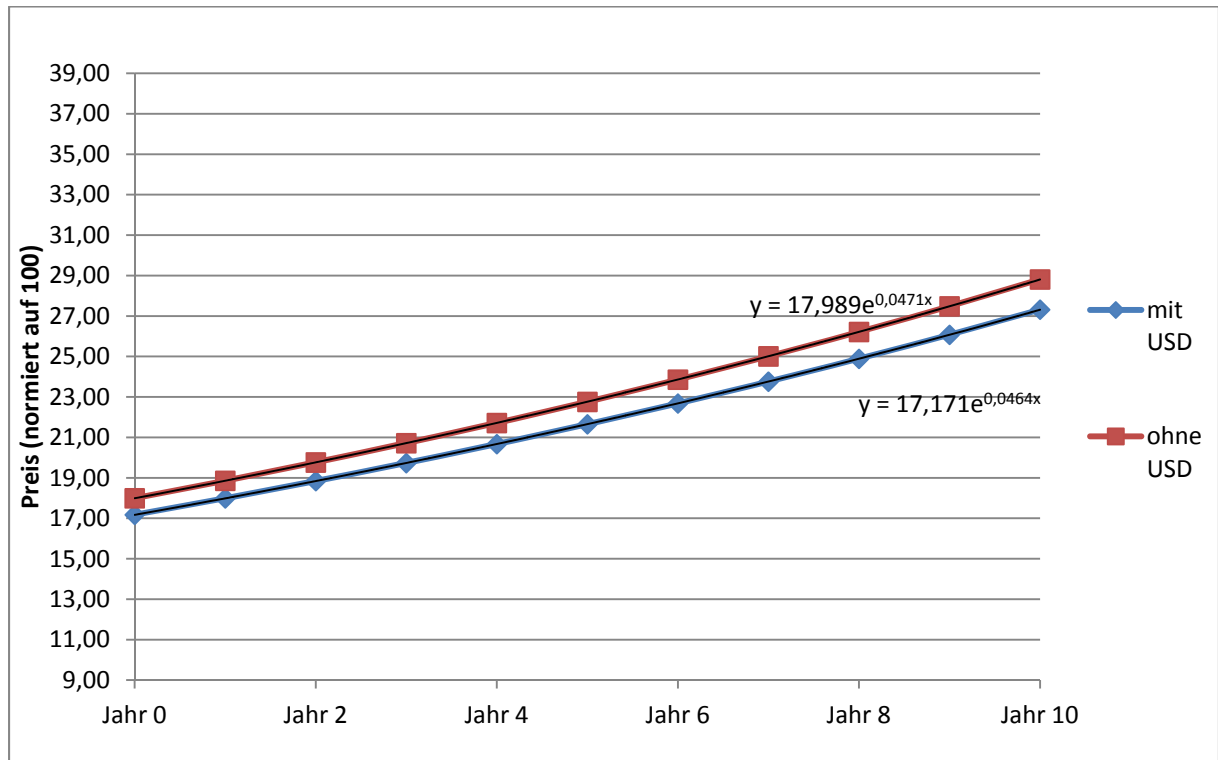


ABBILDUNG 23: KOSTENENTWICKLUNG IN DEN NÄCHSTEN 10 JAHREN, BETRIEB MIT USD IM VERGLEICH ZUM BETRIEB OHNE USD; ES WIRD VON EINER SUBSTRATEINSPARUNG VON 10 %, EINER ENZYMEINSPARUNG VON 75 % UND EINER STROMEINSPARUNG VON 2 % AUSGEGANGEN. DIE PREISENTWICKLUNG IST MIT EINER STEIGERUNG VON 5 % P.A. BEI SUBSTRAT UND STROM UND 3 % P.A. BEI DEN LAUFENDEN KOSTEN DARGESTELLT.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass sich der Ultraschallreaktor der Firma Ultrawaves nach rund 3 Jahren rentiert, wenn er mindestens eine Einsparung von 10 % bringt. Die in Kapitel 3 ermittelten Kostenfaktoren haben einen deutlich kleineren Einfluss auf die Kosten als das Substrat, trotzdem sind sie mit etwa 10 % der Einsparungen nicht zu vernachlässigen.

Durch den verminderten Substrateinsatz wird langfristig die Kostenentwicklung der Biogasanlage geringer ausfallen als ohne die Ultraschall-Desintegration.

6 FAZIT UND HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN

Die Zielstellung der vorliegenden Arbeit ist die Erarbeitung von Kriterien zur Effizienz-Bewertung des Ultraschallgerätes, das von der Firma Ultrawaves Wasser & Umwelttechnologie entwickelt wurde. Die Ergebnisse dieser Arbeit dienen der Firma B.A.U.M. Consult als Entscheidungsgrundlage, ob das Ultraschallsystem für die Biogasanlage gekauft wird. Im Rahmen der Ausarbeitung wird untersucht, wie sich die Ultraschall-Desintegration auf die Bereiche der Biogasanlage auswirkt und welche finanziellen Effekte sie bewirkt.

Um die Aufgabenstellung zu erfüllen, wird untersucht (siehe Tabelle 11) auf welche Bereiche sich die Ultraschall-Desintegration auswirkt (siehe Abbildung 12). Alle Bereiche werden einzeln untersucht. Es werden Überlegungen angestellt, wie und in welchem Umfang sich die USD auswirkt. Daraufhin werden Messwerte aus verschiedenen Quellen analysiert und auf Einflüsse des Ultraschallgerätes untersucht. Da die USD am 03.02.2012 eingebunden wurde und die Aufnahme der Messwerte am 31.03.2012 endet, waren kaum Änderungen seit Anschluss der Anlage in den betrachteten Messwerten erkennbar.

Um eine belastbare Bewertung vorzunehmen, müssen im Laufe der nächsten vier Monate (d.h. bis zum Ende der vereinbarten Mietdauer) weitere Messungen von der Firma B.A.U.M. Consult durchgeführt werden. Dies sind im Wesentlichen:

- Die Messung bzw. Auswertung der eingesetzten Füttermengen
- Die Beobachtung des Methan-Gehaltes im Biogas
- Die Messung vom oTS- und TS-Gehalt in den Gärbehältern und im Gärrest
- Die Messung der Viskosität in BGA 1 und BGA 2 (Vergleichsmessung, da keine Vorjahreswerte vorhanden sind)
- Die Messung des Energieverbrauchs der Rührwerke und Pumpen
- Die Beobachtung von Verschleißerscheinungen an den technischen Komponenten

Für die Auswertung dieser Daten werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit Protokollvorlagen erstellt, die die Firma B.A.U.M. zur Datenanalyse nutzen kann.

Darüber hinaus sollte zukünftig von der Firma B.A.U.M. Consult darauf geachtet werden, dass keine umfangreichen zusätzlichen Kosten durch das Ultraschallsystem verursacht werden. Beispielsweise können Bauteile des Ultraschallsystems wie der Titankopf zur Übertragung der Ultraschallschwingungen in einer kürzeren Zeit verschleifen als vom Hersteller garantiert. Kosten für diese Teile, wie der Titanpreis, können unvorhergesehen stark steigen. Es ist in regelmäßigen Wartungsintervallen auf solche Verschleißteile zu achten.

Die durchgeführte Wirtschaftlichkeitsbetrachtung hat ergeben, dass sich die Anschaffung der Ultraschall-Desintegration nach 3,5 Jahren bei Einsparungen von 10 % Substrat rentiert. Die eingesparten Kosten setzen sich zu rund 90 % aus eingesparten Substratkosten und zu 10 % aus eingesparten Kosten für Enzyme, Spurenelemente, Strom, Personal und Dieselmotorkraftstoff zusammen. Die steigenden Kosten der nächsten Jahre, verursacht durch die Preisentwicklung, würden durch den Einsatz der Ultraschall-Desintegration geringer ausfallen.

Die Aufgabe, belastbare Messwerte für die Effizienz-Bewertung der Ultraschall-Desintegration zu erarbeiten und zu bewerten, kann im Rahmen des engen Zeitfensters und des Zeitpunktes der Arbeit erfüllt werden. Es werden wichtige Kriterien erarbeitet, anhand derer die Effizienz des Ultraschallsystems beurteilt werden kann, wenn zukünftig Messwerte dafür vorliegen. Im Rahmen der Arbeit werden Referenzwerte, wie die durchschnittliche Gasproduktion, die durchschnittliche Füttermenge oder der Energieverbrauch der BGA 2

erarbeitet, indem Messdaten aus verschiedenen Quellen zusammengeführt und bewertet werden. Zusammenhänge, zum Beispiel zwischen Fütterung und Methanertrag, werden in Grafiken verdeutlicht, die es der Firma B.A.U.M. ermöglichen, die Biogasanlage Rendswühren in Zukunft effektiver zu fahren.

Die Berücksichtigung der erarbeiteten Faktoren wie Energieverbrauch und Enzymeinsatz bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zeigt, dass die Ultraschalldesintegration mehr (finanzielle) Vorteile bietet als bisher angenommen. Ein Beispiel dafür ist die Logistik bei der Befüllung der Biogasanlage. Im Fall der BGA Rendswühren ist der Weg, den der Radlader zwischen Silo und Befüllcontainer fahren muss, zwischen 30 und 100 m (je nach Entnahmestelle) lang, kann bei anderen örtlichen Gegebenheiten entsprechend länger sein und somit höhere Kosten verursachen. Diese Kosten werden, bei entsprechenden Substrateinsparungen durch das Ultraschallsystem, gespart.

Die oben erwähnte Logistik und der Effekt der USD auf dieselbe zeigt, dass, wenn Biogasanlagen anders strukturiert sind als die Anlage in Rendswühren, die Einbindung der Ultraschall-Desintegration individuell abgewogen werden muss. Dennoch lassen sich verallgemeinerbare Erkenntnisse aus der Arbeit ableiten:

- Die entwickelte Methode der Bewertung kann für andere Biogasanlagen angewendet werden
- Die herausgearbeiteten Faktoren können in eine technische bzw. wirtschaftliche Betrachtung einer anderen BGA einbezogen werden

Für den Anwender beziehungsweise potentiellen Anwender der Ultraschall-Desintegration bietet die Arbeit eine Entscheidungsgrundlage für die mögliche Investition in ein Ultraschallsystem. Für die Firma Ultrawaves als Hersteller der Anlage werden Argumente herausgearbeitet, die bei dem Verkauf des Systems relevant sein können.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass, sollten bei der Biogasanlage Rendswühren in den folgenden vier Monaten Einsparungen des Substrates von mindestens 10 % eintreten, es für die Firma B.A.U.M. Consult sinnvoll ist, das Ultraschallsystem der Firma Ultrawaves anzuschaffen.

7 QUELLENVERZEICHNIS

- /Bay/ **Arbeitsgemeinschaft Landtechnik und landwirtschaftliches Bauwesen in Bayern e.V. (Hrsg.), (2010):** *Prozessmodell Biogas*. In: www.biogas-forum-bayern.de. Letzter Zugriff: 07.02.2012, URL: http://www.biogas-forum-bayern.de/publikationen/Prozessmodell_Biogas.pdf
- /BayH2S/ **ATZ Entwicklungszentrum** (beauftragt vom Bayerischen Landesamt für Umweltschutz)(**2004**): *Ergebnisbericht zum Forschungsvorhaben „Grundlegende Untersuchungen zur effektiven, kostengünstigen Entfernung von Schwefelwasserstoff aus Biogas“*. In: www.lfu.bayern.de. Letzter Zugriff: 04.04.2012. URL: http://www.lfu.bayern.de/energie/biogas/doc/ergebnisbericht_endfassung.pdf
- /BayLab/ **Arbeitsgemeinschaft Landtechnik und landwirtschaftliches Bauwesen in Bayern e.V. (Hrsg.), (2010):** *Schlüsselparameter zur Kontrolle der Gärprozesses. Laboranalytik*. In: www.biogas-forum-bayern.de, Letzter Zugriff: 07.02.2012, URL: http://www.biogas-forum-bayern.de/publikationen/Schlüsselparameter_zu_Kontrolle_des_Garprozesses_Laboranalytik.pdf
- /BayMikro/ **Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) (Hrsg.), (2009):** *Mikrobiologische Prozesse in landwirtschaftlichen Biogasanlagen*. In: www.lfl-bayern.de, Letzter Zugriff: 07.02.2012, URL: http://www.lfl.bayern.de/publikationen/daten/schriftenreihe/p_36964.pdf
- /BaySiSa/ **Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) (Hrsg.), (2009):** *Silagesickersaft und Gewässerschutz. Anfall und Verwertung von Silagesickersaft aus Futtermitteln und Biomasse für Biogasanlagen*. In: www.aelf-ka.bayern.de, Letzter Zugriff 20.02.2012, URL: http://www.aelf-ka.bayern.de/pflanzenbau/linkurl_16.pdf
- /BroSchau/ **Schaumann BioEnergy (Hrsg.):** *Broschüre: Enzymeinsatz in Biogasanlagen*. In: www.schaumann-bioenergy.eu, Letzter Zugriff: 26.03.2012, URL: http://www.schaumann-bioenergy.eu/PDF/de/pro_bc_zym_de_2009_10.pdf
- /Daten/ **Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hrsg.)(2011):** *Basisdaten Bioenergie Deutschland. September 2011. Festbrennstoffe. Biokraftstoffe. Biogas*. Gülzow.
- /EaB/ **Werner Edelmann (2001):** *Biogaserzeugung und Nutzung*. In: *Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren*. 1.Aufl., Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Hongkong, London, Mailand, Paris, Singapur: Springer Verlag
- /EEG/ *Erneuerbare-Energien-Gesetz - Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (2012)*. Stand: 22.12.2012. In: Bundesgesetzblatt Nr. 49 vom 31.10.2008
- /Fibel/ **Schaumann BioEnergy (Hrsg.):** *Schaumann Biogas-Fibel. Eckpunkte zur erfolgreichen Aufbereitung und Lagerung von Gärsubstraten*. In: www.schaumann-bioenergy.eu, Letzter Zugriff: 07.03.2012, URL: http://www.schaumann-bioenergy.eu/PDF/de/lit_biogasfibel_d_200707.pdf
- /Hand1/ **Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hrsg.),(2006):** *Handreichung. Biogasgewinnung und –nutzung*. 3.Aufl., Gülzow
- /Mikro/ **Katharina Munk (Hrsg.), (2008):** *Taschenlehrbuch Biologie. Mikrobiologie*. 1. Aufl., Stuttgart, New York: Georg Thieme Verlag
- /Nickel+Neis/ **Dr.-Ing. Klaus Nickel, Prof. Dr.-Ing. Uwe Neis (2011):** *Ultraschall auf Biogasanlagen. Anspruch, Ziel und Nutzung*. Präsentation bei der Enertec 2011 in Leipzig

/Paul/ Gespräch mit Dirk Paulwitz, Mitarbeiter von B.A.U.M. Consult AG und Betriebsleiter der Biogasanlage in Rendswühren/Gönnebeck

/PhyD/ **Dipl.-Phys. Martin Bergmann (Redaktionelle Leitung) (2001): Duden Physik. Die Grundlagen der modernen Physik. Begriffe und Methoden, Zusammenhänge und Gesetze anschaulich erklärt.** 4. Aufl., Mannheim, Leipzig, Wien, Zürich. Dudenverlag.

/Physik/ **Prof. Dr. Dieter Meschede (Hrsg.) (1956): Gehrtsen Physik. Die ganze Physik im 21. Jahrhundert.** 22. Aufl., Berlin, Heidelberg, New York, Springer-Verlag

/Praxis/ **Barbara Eder, Heinz Schulz (2007): Biogas Praxis. Grundlagen. Planung. Anlagenbau. Beispiele. Wirtschaftlichkeit.** 4. Aufl., Staufen: ökobuch Verlag

/Ström/ **E. Becker (1986): Technische Strömungslehre.** 6. Aufl., Stuttgart: B. G. Teubner Verlag

/UW/ Gespräche mit Mitarbeitern (Herr Dipl.-Ing Pagel, Frau Dr. Velten) von der Firma Ultrawaves Wasser & Umwelttechnologien GmbH

/UWBet/ Betriebshandbuch des Ultraschallgenerators, erstellt von der Firma Sonotronic Nagel GmbH

/UWBro/ Broschüre der Firma Ultrawaves Wasser & Umwelttechnologien, Ausgabe 02/2012

/UWLab/ *Labortest zur Ultraschalluntersuchung – Ergebnisse.* Analyse einer Probe aus der Biogasanlage der Firma B.A.U.M. Consult AG durch das Institut für Abwasserwirtschaft und Gewässerschutz (Mai 2011)

/VawS/ *Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen und über Fachbetriebe (Anlagenverordnung – VAWs).* Stand: 02.09.2010. In: Gesetz- und Verordnungsblatt für Schleswig-Holstein vom 29.04.1996

/WHG/ *Wasserhaushaltsgesetz.* Stand: 22.12.2011. In: Bundesgesetzblatt I Nr. 51 vom 06.08.2009

Anhang

Anhang 1	Berechnungen zum Silagesickersaft
Anhang 2	Werte zur Gasproduktion der Anlage 2
Anhang 3	Grafische Auswertung der Gasproduktion im Zusammenhang mit der Fütterung der BGA 2
Anhang 4	Werte zur Gasproduktion der Anlage 1
Anhang 5	Grafische Auswertung der Gasproduktion im Zusammenhang mit der Fütterung der BGA 1
Anhang 6	Verhältnis Gasproduktion/Füttermenge BGA 1 und BGA 2
Anhang 7	CH ₄ -Gehalt Biogas im Zeitraum Januar 2011 bis inklusive März 2012
Anhang 8	Schwefelwasserstoffgehalt
Anhang 9	Messungen der Firma Ultrawaves von oTS- und TS-Gehalten auf der Gärstrecke
Anhang 10	Viskosität
Anhang 11	Auswertungen der Stromrechnungen der BGA 2 seit November 2010
Anhang 12	Rechnungen zum Radlader
Anhang 13	Wirtschaftlichkeitsberechnung
Anhang 14	Lageplan der Biogasanlage Rendswühren