

Hochschule Neubrandenburg

Fachbereich Agrarwissenschaften und Lebensmittelwissenschaften

Studiengang Bioprodukttechnologie

WS 2006/2007 – WS 2009/2010

Beeinflussende Faktoren für die Silagequalität, ihre Auswirkungen auf die Biogasproduktion, sowie mögliche Prozessänderungen um sinkenden Methanausbeuten entgegen zu wirken.

Bachelorarbeit

urn:nbn:de:gbv:519-thesis2010-0111-0

Verfasser : Gerrit Ruttloff

Betreuer : Prof. Dr.-Ing. Herald Schöne (Hochschule Neubrandenburg)
Dipl.-Ing. Martin Litschko (agratec)

Neubrandenburg, 07.03.2010

Inhaltsverzeichnis	1
Abstract	4
Abkürzungsverzeichnis	5
1 Ziel der Arbeit	6
2 Einleitung	7
3 Einflüsse von Zusammensetzung und Struktur der Biomasse auf die Gasausbeute	9
3.1 Silagequalität	9
3.1.1 Allgemein	9
3.1.2 Vergärbarkeit	9
3.1.2.1 Gäreignung	9
3.1.2.2 Trockensubstanz (TS) / organische Trockensubstanz (oTS)	10
3.1.2.3 Vergärbarkeitskoeffizient (VK)	10
3.1.2.4 Nitratgehalt	11
3.1.2.5 Häcksellänge	11
3.1.3 Silierung	13
3.1.3.1 Einflüsse auf den Siliererfolg	13
3.1.3.1.1 Trockensubstanzgehalt / Wassergehalt	13
3.1.3.1.2 Häcksellänge / Verdichten / Luftabschluss	14
3.1.3.1.3 Leicht vergärbare Kohlenhydrate	14
3.1.3.1.4 pH – Wert	15
3.1.3.1.5 Pufferkapazität (PK)	15
3.1.3.1.6 Schadstoffe / Schädlingsbefall	16
3.1.4 Prozesse während der Lagerung und deren Beeinflussung	16
3.1.4.1 Phasen der Silierung	16
3.1.4.2 Mögliche Einflussnahme auf die Silagequalität während der Lagerung	20
4 Prozessführung einer Biogasanlage	21
4.1 Wesentlicher Ablauf der Biogasbildung	21
4.2 Prozessparameter	23
4.2.1 Prozesstemperatur	24
4.2.2 pH – Wert	25

4.2.2.1	FOS / TAC Puffersystem	26
4.2.3	Substrat / Substrateinbringung	26
4.2.3.1	Fütterung	26
4.2.3.2	Fütterungsfrequenz	27
4.2.3.3	Substrateinbringung	28
4.2.3.4	Substrat (Zusammensetzung)	28
4.2.3.4.1	Makronährstoffe	30
4.2.3.4.2	Mikronährstoffe (Spurenelemente)	30
4.2.3.4.3	Trockensubstanz / organische Trockensubstanz	31
4.2.4	Raumbelastung	31
4.2.5	Verweilzeit	32
4.2.6	Gasleistung	32
4.2.7	Rühren	33
4.2.7.1	Rührintervalle	33
5	Prozessüberwachung und Prozessregelung	34
5.1	Allgemein	34
5.1.1	Überwachung der technischen Funktionalität	34
5.1.2	Überwachung der biologischen Funktionalität	34
5.2	Erkennen und vorbeugen von häufigen Prozessstörungen	37
5.2.1	Schaumbildung	37
5.2.2	Gehalt an Fettsäuren steigt, Puffervermögen sinkt	37
5.2.3	Sinkender Methangehalt und dadurch schlechte Verbrennung im Blockheizkraftwerk	38
5.2.4	Sinkender pH – Wert	38
6	Vorstellung der Biogasanlage in Malchin	39
6.1	Allgemein	39
6.2	Aufbau und Funktion von Prozesseinheiten der Biogasanlage Malchin	39
6.3	Mess – und Kontrollsysteme in Malchin	41
6.3.1	Allgemein	41
6.3.2	Maßnahmen zur Prozesskontrolle in der Biogasanlage Malchin	41
6.3.2.1	Fermenterkontrolle	41
6.3.2.2	Gaskontrolle	42

6.3.2.3	Kontrolle und Regelung der Prozessbiologie	42
6.3.2.3.1	Fütterung und Substratkontrolle	42
6.3.2.3.2	Zusätze	43
7	Auswertung/Parameterfixierung	44
8	Literaturverzeichnis	46
10	Tabellenverzeichnis / Abbildungsverzeichnis	48
11	Anhang	49
	Erklärung über die selbständige Anfertigung der Arbeit	49

Abstract

This elaboration aims to develop process regulating and preventive procedures via literature research according to the current state of knowledge as a reaction on unsteady silage quality and therewith to counter the loss of gas yield.

For this purpose the term silage quality is clarified as well as possible influences which are listed considering the intended use as a substrate within a biogas plant. Occurring process malfunctions, parameters for early identification, possible causes and options for action are listed as well.

The researched information's and the resulting conclusions will be compared with the current situation in the Agratec Biogas plant in Malchin in order to reveal a possibly need for optimization.

The conclusions are aimed at providing the basis for a potential test arrangement in the master thesis in order to verify the exercise of influence on the loss of gas yield by specific process control or construction measures

Abkürzungsverzeichnis

AS	Aminosäuren
BHKW	Blockheizkraftwerk
°C	Grad Celsius
d	Tag
el	elektrisch
FM	Frischmasse
FOS	flüchtige organische Fettsäuren
g	Gramm
GPS	Ganzpflanzensilage
kg	Kilogramm
K-W-K	Kraftwärmekopplung
l _N	Normliter, Gasmenge unter Normbedingungen (273 K, 1013 mbar)
m ³	Kubikmeter
mbar	Millibar
MS	Milchsäure
MW	Megawatt [kg*m ² / s ³]
NaWaRo	nachwachsende Rohstoffe
oTS	organische Trockensubstanz [% von TS, g]
pH	negativ dekadischer Logarithmus der H ⁺ -Ionenkonzentration
PK	Pufferkapazität [g MS / kg TS]
RP	Rohprotein [%]
TAC	total anorganic Carbon
TS	Trockensubstanz [% von FM, g]
u.a.	unter anderem
VK	Vergärbarkeitskoeffizient
Z	Zucker [% von TS]
z.B.	zum Beispiel

1 Ziel der Arbeit

In dieser Ausarbeitung erfolgt eine Literaturrecherche wie durch vorbeugende Maßnahmen und durch Prozessregulierung Gasausbeuteverluste durch schwankende Silagequalität verhindert oder verringert werden können.

Zu diesem Zweck wird der Begriff Silagequalität unter Berücksichtigung des Einsatzzwecks als Substrat in einer Biogasanlage definiert sowie Möglichkeiten der Qualitätsverbesserung und Einflussnahmen dargestellt.

Weiterhin werden Parameter erarbeitet, die für einen effektiven und stabilen Betrieb einer industriellen Biogasanlage entscheidend sind und zwingend kontrolliert werden müssen.

Außerdem werden häufig auftretende Prozessstörungen, deren Ursachen, Parameter zu deren Erkennung sowie erforderliche Handlungsoptionen zur Abstellung bzw. Vermeidung zusammengestellt.

Die recherchierten Informationen und daraus resultierenden Erkenntnisse werden mit der aktuellen Situation in der Biogasanlage der Firma agratec in Malchin verglichen und Vorschläge zur Prozessoptimierung unterbreitet.

Die Ergebnisse dieser Arbeit können auch als Grundlage dienen für weitere Untersuchungen im Rahmen einer Masterarbeit zur Verbesserung der Gasausbeute durch technologische und bauliche Maßnahmen in der Biogasanlage Malchin.

2 Einleitung

Die Biogasproduktion auf Basis nachwachsender Rohstoffe (NaWaRo) kann erst seit wenigen Jahren wirtschaftlich betrieben werden. Gründe dafür sind in erster Linie die von der Regierung geschaffenen Rahmenbedingungen (EEG 2001; EEG Novellierung 2004, EEG 2009) mit einer garantierten Einspeisevergütung für Strom sowie die Boni für NaWaRo und Kraft-Wärme-Kupplung (K-W-K).

Diese Rahmenbedingungen brachten mit sich, dass das Risiko für mögliche Investoren kalkulierbarer wurde, und seit 2004 ein beachtlicher Anstieg der neu erbauten Biogasanlagen, die Biogas auf industriellem Niveau gewinnbringend produzieren, zu verzeichnen ist. So hat sich die Zahl der Biogasanlagen von 2004 bis 2007 in Mecklenburg – Vorpommern von 30 auf 150 Biogasanlagen verfünffacht.

Aber auch ermittelte Daten und gewonnene Erfahrungswerte in den neu gebauten Biogasanlagen sorgten und sorgen weiterhin für eine Weiterentwicklung der Anlagen und Optimierung der Prozessführung. Diese bessere Datengrundlage macht Investitionen in den Bau industrieller Biogasanlagen noch attraktiver.

Die gestiegene Zahl der Biogasanlagen sorgt aber auch für einen starken Anstieg der Nachfrage an nachwachsenden Rohstoffen. Dazu kommt noch, dass die Nachfrage nach NaWaRo schneller steigt als die Zahl der Biogasanlagen, da diese immer größer dimensioniert gebaut werden und daher größere Mengen an Substrat benötigen, um auf Volllast zu fahren.

Diese Entwicklung treibt den Preis für Biomasse unaufhörlich nach oben. Unter Berücksichtigung der gesetzlich vorgeschriebenen Einspeisevergütung hat das zur Folge, dass die Gasausbeute pro Tonne Futter ein immer entscheidenderer Faktor für die Wirtschaftlichkeit einer jeden industriellen Biogasanlage wird.

Auf die Gasausbeute haben viele Faktoren Einfluss. Schon bei der Planung der Biogasanlagen müssen die Verfügbarkeit der NaWaRo sowie mögliche Veränderungen im Substratangebot über die geplante Laufzeit der Biogasanlagen berücksichtigt werden. Auch die Qualität des Substrats ist schon vor dem Bau der Biogasanlage zu beachten. Da das Substrat ein Naturprodukt ist, wird die Qualität von Witterung, Böden, der Silierung sowie der Lagerung stark beeinflusst und unterliegt von Jahr zu Jahr Schwankungen.

Unterschiedliche Silagequalitäten sollten bei der Bezahlung berücksichtigt werden, weil diese erheblichen Einfluss auf die Fermenterbiologie und damit auf die Gasausbeute und auf die Wirtschaftlichkeit der Biogasanlage haben. Circa 70 % des Gasertrages sind auf die Silagequalität zurückzuführen (agratec).

In diesem Sinne sollen Einflüsse variierender Silagequalität, auf den Fermentationsprozess und damit auf die Gasausbeute benannt werden.

Weiterhin werden am Beispiel der agratec Biogasanlage Malchin Prozessparameter fixiert, die einer Verringerung der Gasausbeute bzw. Gasverlusten vorbeugen oder entgegen wirken.

3 Einflüsse von Zusammensetzung und Struktur der Biomasse auf die Gasausbeute

3.1 Silagequalität

3.1.1 Allgemein

Eine maximale Gasausbeute ist nur mit qualitativ hochwertiger Silage zu erreichen.

Bisher definierte sich die Qualität der Silage für den Einsatzzweck der Tierfütterung.

Der Einsatz von Silagen als Substrat für Biogasanlagen (Energiesilage) eröffnet neue Möglichkeiten für den Einsatz von Siliermitteln mit denen man das Gär säuremuster der Energiesilagen auf die Erfordernisse der Biogaserzeugung optimal einstellen kann.

(Müller, 2003; Hertwig, 2006)

3.1.2 Vergärbarkeit

Die Vergärbarkeit ist die Summe aller physikalischen, chemischen und biologischen Eigenschaften, die in der folgenden Tabelle genannt werden und zum späteren Zeitpunkt einer genaueren Betrachtung unterzogen werden.

Tab. 1: Kenngrößen der Vergärbarkeit

Art der Kenngröße	Beispiele
physikalisch	Wassergehalt, osmotischer Druck, Diffusionseigenschaften, Verdichtbarkeit, Trocknungsgeschwindigkeit
chemisch	Pufferkapazität, Quantität und Qualität der Kohlenhydrate, Nitratgehalt, Gehalt an spezifischen Extraktstoffen
biologisch	Besatz an Epiphyten und Phytoenzymen

Quelle: Müller, 2003

3.1.2.1 Gäreignung

Als Maß für die Bemessung der Gäreignung dient das Ansäuerungsvermögen, d.h. das substratspezifische Potenzial zur Milchsäurebildung. Das Ansäuerungsvermögen wird durch die im Substrat vorhandenen wasserlöslichen Kohlenhydrate und die substratspezifische Befähigung, die gebildete Milchsäure abzupuffern, beeinflusst. Je höher der Gehalt des als Nahrungsquelle für die Milchsäurebakterien dienenden Zuckers ist und je weniger gebildete Milchsäure abgepuffert wird, um so höher ist das Ansäuerungsvermögen. Der Quotient aus

Zuckergehalt (Z) und Pufferkapazität (PK) ist eine geeignete Größe zur Abschätzung der Gäreignung eines Substrates. In der Tabelle 2 unter Punkt 3.1.3.1.5 sind Beispiele für die Gäreignung verschiedener Pflanzen angeführt.

(Müller, 2003; Hertwig, 2006)

3.1.2.2 Trockensubstanz (TS) / organische Trockensubstanz (oTS)

Der Trockensubstanzgehalt ist eine Angabe für die Masse einer Substanz die nach Abzug des Rohwassers übrig bleibt. Der Trockensubstanzgehalt beinhaltet alle organischen sowie anorganischen Inhaltsstoffe.

Der organische Trockensubstanzgehalt stellt den Teil der TS dar , der energetisch nutzbar ist, also von den Bakterien verwertet werden kann. Anhand der organischen Trockensubstanz und ihrer Zusammensetzung lassen sich Prognosen über den zu erwartenden Biogasertrag stellen.

Der Trockensubstanzgehalt von Mais liegt je nach Kolbenanteil zwischen 28% - 36%TS.

(Müller, 2003; Hertwig, 2006)

3.1.2.3 Vergärbarkeitskoeffizient (VK)

Mit dem Vergärbarkeitskoeffizient lassen sich die Faktoren Trockensubstanzgehalt und Gäreignung in einer Kennzahl zusammenfassen, die eine frühe Grobeinschätzung des Siliererfolges erlaubt.

$$VK = TS_{(\%)} + \left(8 * \frac{Z}{PK} \right)$$

TS Trockensubstanzgehalt [%]

Z Zucker [% von TS]

PK Pufferkapazität [g MS/kg TS]

VK Vergärbarkeitskoeffizient

Quelle: Müller, 2003

Liegt der VK über 45, ist in der Regel von einer stabilen Gärung auszugehen. Bei einem bekannten Z / PK – Quotient kann durch das Umstellen der Formel nach TS ein Mindest – Trockensubstanzgehalt errechnet werden der zum Zeitpunkt der Ernte erforderlich ist.

3.1.2.4 Nitratgehalt

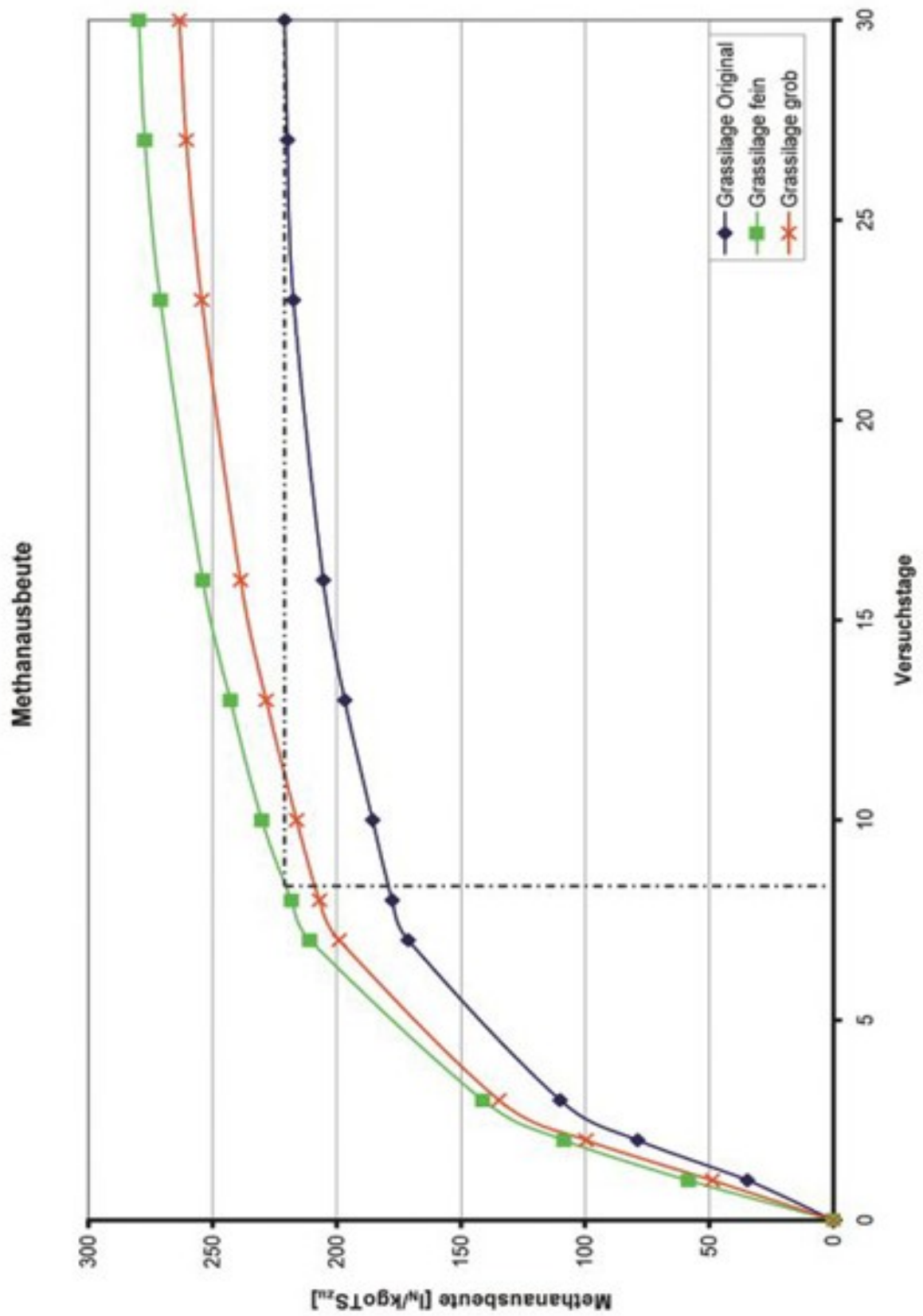
Der Nitratgehalt ist ein wichtiges Kriterium zur Beurteilung der Vergärbarkeit der Frischmasse. Während des Nitratabbaus unter anaeroben Bedingungen entsteht als Zwischenprodukt Nitrit, welches schon in geringer Konzentration hemmend auf Clostridien und Buttersäurebildner wirkt und den Gärungsverlauf positiv beeinflusst.

(Müller, 2003; Hertwig, 2006)

3.1.2.5 Häcksellänge

Die Häcksellänge und ihre Gleichmäßigkeit sind nicht nur von entscheidender Bedeutung bei der Silierung sondern auch später bei der Fütterung und den nachfolgenden Abbauprozessen im Fermenter. Am Beispiel der Grassilage soll der Einfluss der Häcksellänge, auf das Abbauverhalten im Fermenter dargestellt werden.

Abb. 1: Einfluss der Häcksellänge auf das Abbauverhalten im Fermenter



Nachfolgend wird die Bedeutung der Häcksellänge bei der Silierung erläutert.

Der Silierprozess erfordert eine anaerobe Atmosphäre im Siliergutstapel. Diese Bedingung schafft man durch eine maximale Verdichtung der Frischmasse beim Anlegen des Silostapels. Die Verdichtung des Silostapels gelingt bei geringer Häcksellänge besser als mit längerem Häckselgut. Je weniger Luftkanäle im verdichteten Silostapel vorhanden sind, um so ungünstiger sind die Entwicklungsbedingungen für aerobe Mikroorganismen, die für Fehlgärungen und damit für Energieverluste und geringere Gasausbeuten verantwortlich sind. (Müller, 2003; Hertwig, 2006)

3.1.3 Silierung

3.1.3.1 Einflüsse auf den Siliererfolg

Eine gut abgestimmte Häcklerkette ist genauso Grundvoraussetzung für eine erfolgreiche Silierung wie die Qualität und Beschaffenheit der Frischmasse. Dabei muss bedacht werden, dass die benötigte Zeit für die Verdichtung der Frischmasse im Silostapel meist der begrenzende Faktor ist. Das Verdichten sollte möglichst gründlich und zügig geschehen, um unnötigen Lufteinträgen und damit Energieverlusten vorzubeugen. Im Folgenden werden verschiedene Kriterien aufgeführt, die die Frischmasse für eine gute Silierbarkeit und letztendlich für eine hohe Silagequalität entsprechen muss.

(Müller, 2003; Hertwig, 2006) (Schlegel; Ludley, 2007)

3.1.3.1.1 Trockensubstanzgehalt / Wassergehalt

Der Siliererfolg ist von mehreren Parametern abhängig, die zum Teil gezielt beeinflusst werden können. So ist der Trockensubstanzgehalt einerseits durch die Art des Ausgangsmaterials vorgegeben, kann aber durch die Wahl des Erntezeitpunktes beeinflusst werden. Bei Mais beispielsweise ist ab einem Trockensubstanzgehalt von unter 28 % mit verstärkter Sickersaftbildung zu rechnen. Mit dem Austreten von Sickersaft gehen für die Konservierung der Silage wichtige Inhaltsstoffe (u.a. Gärssäuren) verloren und müssen deshalb möglichst gering gehalten werden. Muss ausnahmsweise Mais mit geringerer Trockensubstanz als 28 Prozent siliert werden, so kann man durch eine geringere Stapelhöhe den Sickersaftaustritt etwas entgegenwirken.

Der Trockensubstanzgehalt bzw. Wassergehalt wirkt sich weiter auf die Aktivität der Phytoenzyme unmittelbar nach der Ernte aus. Wasser als Stoffwechselmedium für die an der Gärung beteiligten Mikroorganismen beeinflusst durch Aufkonzentrierung oder Verdünnung die Verfügbarkeit von weiteren Nährstoffen und sollte daher nicht zu hoch oder zu niedrig

sein. Bei Mais besteht ab einem Wassergehalt unter 62 % die Gefahr der Verholzung und damit eine Verminderung des Ertrages (agratec).

(Müller, 2003; Hertwig, 2006; Schlegel; Ludley, 2007)

3.1.3.1.2 Häcksellänge / Verdichten / Luftabschluss

Die Häcksellänge hat entscheidenden Einfluss auf die Lagerstabilität der Silage. Kurze Häcksel lassen sich besser verdichten und weisen eine höhere Schüttdichte auf, die in eine generell bessere Lagerstabilität mündet. Auch nach dem Öffnen des Silos ist eine höhere Schüttdichte vorteilhaft. Je kürzer die Häcksel desto geringer ist die Eindringtiefe des Sauerstoffs und umso weniger Verluste entstehen durch wieder aufgenommene Stoffwechselaktivität von Schadorganismen, vor allem Hefen und Schimmelpilzen. Ein deutliches Zeichen für den Verderb der Silage und damit für einen Energieverlust ist die Erwärmung der Anschnittfläche. Auswirkungen zu langer Häcksel auf die Siliereigenschaften sind zum Beispiel schlechte Verdichtungseigenschaften und Neigung zum Ausbilden von Luftkanälen im Silo.

Höhere Verstopfungswahrscheinlichkeit bei den Substratpumpen, Verlangsamung der Abbauprozesse im Fermenter durch geringere Substratoberfläche und Schwimmschichtenbildung bei der Nassfermentation sind negative Auswirkungen zu langer Häcksel auf den Biogasprozess. (Müller, 2003; Hertwig, 2006) (Schlegel; Ludley, 2007)

3.1.3.1.3 Leicht vergärbare Kohlenhydrate

Ebenfalls von Bedeutung für den Siliererfolg, und durch den Erntezeitpunkt beeinflussbar, ist die Verfügbarkeit von leicht vergärbaren wasserlöslichen Kohlenhydraten. Diese Kohlenhydrate sind von entscheidender Bedeutung für den Siliererfolg. Sie ermöglichen, dass die natürlich im Siliergut vorkommenden Milchsäure- und Essigsäurebakterien unter Luftabschluss schnell verschiedene kurzkettige organische Säuren bilden und der pH – Wert rasch absinkt.

Die Bedeutung eines rasch absinkenden pH – Wertes wird im folgenden Punkt erläutert. (Müller, 2003; Hertwig, 2006) (Schlegel; Ludley, 2007)

3.1.3.1.4 pH – Wert

Ein schnelles Herabsetzen des pH – Werts durch Bildung von kurzkettigen organischen Säuren ist mit unvermeidbaren Verlusten verbunden aber zwingend für eine erfolgreiche Konservierung. Der niedrige pH – Wert unterbindet enzymatische Reaktionen und stoppt den weiteren Energieverlust durch Gärschädlinge, wie Hefen und Schimmelpilze.

(Müller, 2003; Hertwig, 2006) (Schlegel; Ludley, 2007)

3.1.3.1.5 Pufferkapazität (PK)

Die Pufferkapazität ist eine stoffspezifische Größe. Ein hoher Rohproteingehalt in der Frischmasse ist Zeichen einer hohen Pufferkapazität. Aminosäuren die bei der Spaltung von Proteinen entstehen enthalten Stickstoffverbindungen. Diese Stickstoffverbindungen reagieren basisch und können die gebildeten Säuren (z.B. Michsäure, Essigsäure) neutralisieren bzw. die pH – Wertsenkung abschwächen oder verlangsamen.

Tab. 2: Merkmale zur Beurteilung der Gäreignung verschiedener Substrate

Futterpflanze	TS - Gehalt in %	Zucker (Z) *** in % TS	Rohprotein (RP) in % TS	Pufferkapazität in g MS/kg TS	Z / PK - Quotient
Mais (Milchreife)	20	23,0	9,0	35	6,6
Mais (Teigreife)	30	11,0	8,5	32	3,4
GPS (So- Gerste)*	43	6,3	10,0	41	1,5
GPS (Wi- Weizen)**	42	5,5	9,5	22	4,0
Welsches Weidelgras	20	19,0	18,0	55	3,5
Deutsches Weidelgras	21	15,5	17,5	48	3,2
Wiesenrispe	19	8,0	17,5	53	1,5
Rotklee	20	11,5	17,0	69	1,7
Luzerne	18	6,5	22,0	80	0,8

*) - Mitte Teigreife **) - Ende Milchreife ***) - wasserlösliche Kohlenhydrate
GPS-Ganzpflanzensilage

Quelle: Müller, 2003

3.1.3.1.6 Schadstoffe / Schädlingsbefall

Alle unerwünschten aeroben Mikroorganismen, die sich auf bzw. in der zu silierenden Frischmasse befinden, sterben von allein ab. Voraussetzung dafür ist aber eine gute Silierung bei der die Luft durch intensives Verdichten stark reduziert wurde und im Nachhinein kein Luftsauerstoff mehr in die Silage gelangt.

Die Mikroorganismen, wie Enterobakterien, Clostridien, Listerien, bestimmte Bacillusarten sowie Hefepilze, die auch unter Sauerstoffabwesenheit existieren können, die aber auf Grund ihrer qualitätsmindernden oder giftigen Stoffwechselprodukte (Enterotoxine, Buttersäure oder Alkohol) unerwünscht sind, werden durch die stark säuernden Laktobakterien ersetzt.

Mit steigender Konzentration organischer Säuren werden die säurebildenden Mikroorganismen in zunehmendem Maß durch ihre eigenen Stoffwechselprodukte in ihrer Aktivität bis hin zur Einstellung gehemmt.

Außer Mikroorganismen sollten keine Antibiotika, Desinfektionsmittel, Herbizide, Schimmel oder Fremdkörper (Steine, Folienreste) in der Silage sein. (Schlegel; Ludley, 2007)

3.1.4 Prozesse während der Lagerung und Beeinflussung

3.1.4.1 Phasen der Silierung

Während der Silierung verändert sich die Zusammensetzung der Silage. Der Silierungsverlauf kann in vier bzw. fünf Phasen untergliedert werden. Die Übergänge zwischen den einzelnen Phasen sind dabei fließend. Aus dem zeitlichen Ablauf der einzelnen Phasen kann die Mindestlagerzeit für Silage abgeleitet werden. Jeder Silostapel sollte mindestens 4 – 6 Wochen geschlossen bleiben. (Hirtz, 2010)

Phase 1 (aerobe Phase):

Zu Beginn der Silierung wird der in der Silage verbliebene Restsauerstoff von aeroben Mikroorganismen verbraucht. In begrenztem Umfang findet auch eine Restatmung von Pflanzenzellen statt. Ist der Restsauerstoff veratmet, sterben die aerobe Mikroorganismen und Pflanzenzellen ab. Zellsaft tritt aus und der Silagestapel sackt dichter zusammen. In einem Silo mit guter Verdichtung und Luftabschluss dauert diese Phase nur Stunden. Mangelhafter Luftabschluss (z.B. durch zu späte Abdeckung) verlängert diese Phase bzw. sorgt dafür, dass der an den Sauerstoff gebundene Stoffabbau später oder gar nicht zum Stillstand kommt. (Hirtz, 2010)

Phase 2:

Im frei gewordenen Zellsaft findet eine schnelle Vermehrung von anaeroben Mikroorganismen statt, bei der zunächst die Enterobakterien dominieren. Auch Hefen können aktiv werden. Als Stoffwechselprodukte werden vor allem Essigsäure, Kohlendioxid und geringe Mengen an Alkohol gebildet. Der sinkende pH – Wert verschlechtert die Lebensbedingungen für Enterobakterien und ermöglicht den Milchsäurebakterien sich stark zu vermehren. Im Normalfall dauert diese Phase nur 1 bis 3 Tage. (Hirtz, 2010)

Phase 3:

Die Milchsäurebakterien haben sich maximal entwickelt und bilden große Mengen an Milchsäure. Neben Milchsäure entstehen noch geringe Mengen an Nebenprodukten wie Essigsäure und Kohlendioxid. Der pH – Wert sinkt weiter ab und säuretolerante Milchsäurebakterien dominieren. Diese Phase dauert ca. 1 bis 2 Wochen und wird als Hauptgärung bezeichnet. (Hirtz, 2010)

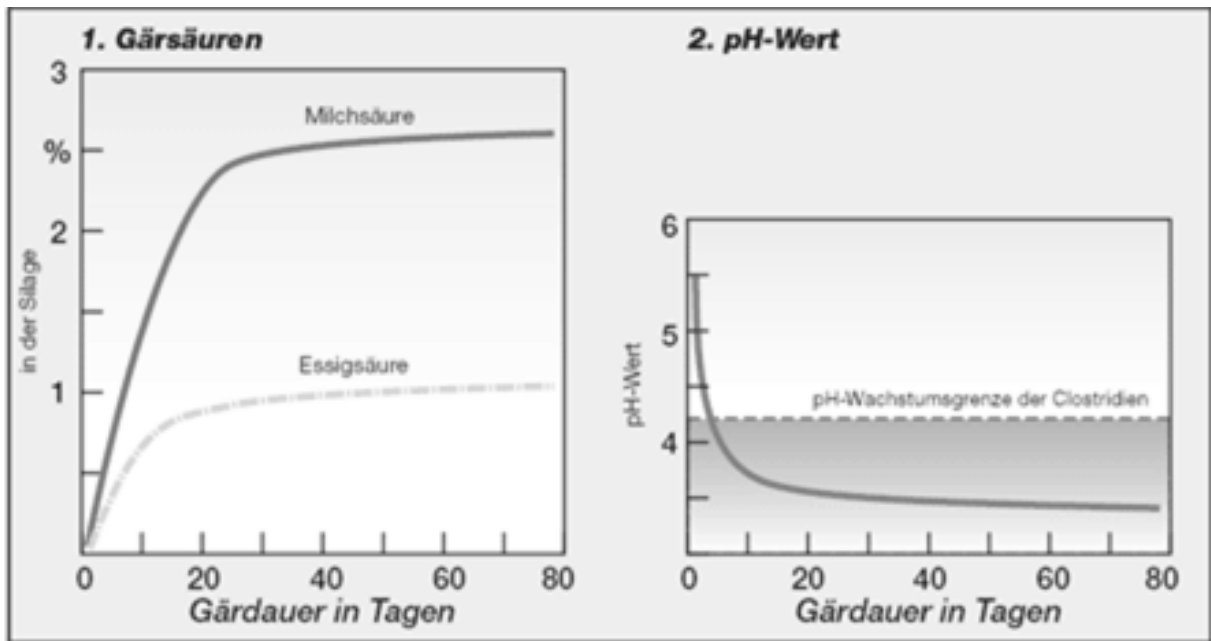
Phase 4:

Die Milchsäuregärung nimmt aufgrund des erreichten pH – Wertes oder wegen Zuckermangel ab. Bei hohen Restzuckergehalten kann es sein, dass dieser durch Hefen zu Alkohol vergoren wird. Diese Phase kann wenige Wochen dauern oder bis zum Ende der Lagerungszeit der Silage anhalten. Der infolge der Anreicherung der Milchsäure erreichte pH – Wert entscheidet über den Erfolg und Misserfolg der Silierung. Lässt dieser unerwünschten Mikroorganismen, z.B. Clostridien, keine Lebensmöglichkeit, ist die Silage als anaerob stabil. Bis zur Auslagerung der Silage treten dann keine bemerkenswerten Stoffumsetzungen mehr ein. Den Gärverlauf in einer solchen anaerob stabilen Silage zeigt die Abb. 2.

Konnte der pH – Wert jedoch nicht ausreichend tief abgesenkt werden, z.B. weil der Zuckergehalt zu niedrig war, ist die Silage nicht lagerstabil. Die Gärung „kippt um“ und wird als labil bezeichnet. In diesem Fall schließt sich eine weitere Gärphase (Phase 5) an.

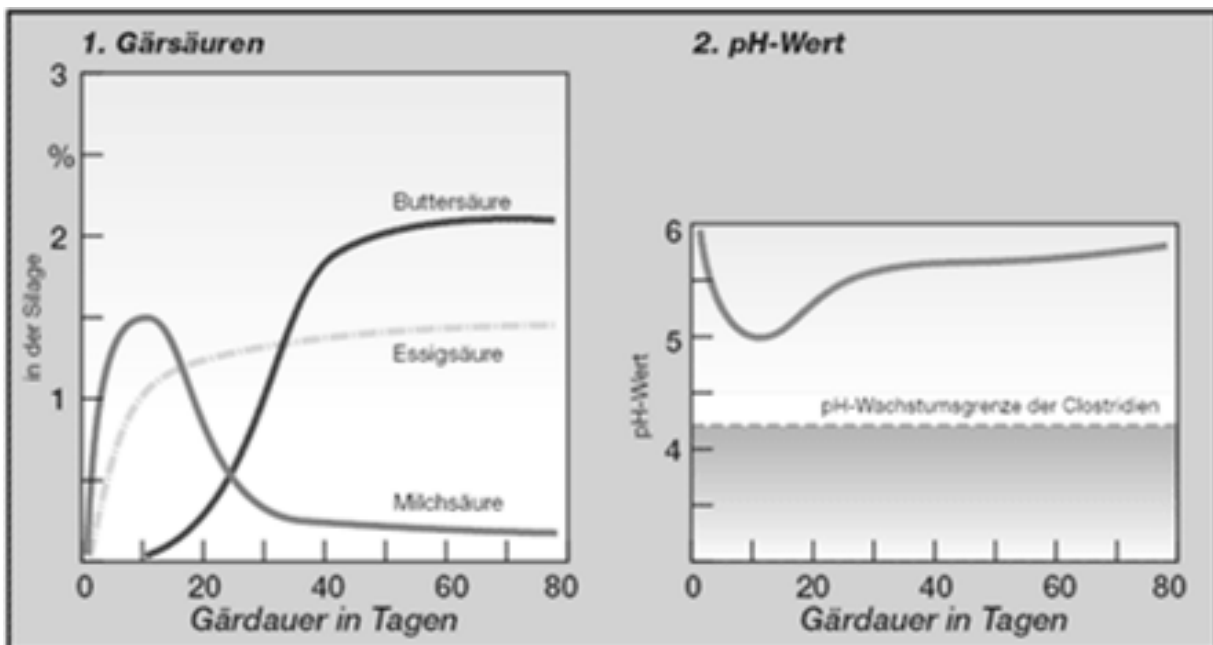
Abb. 3 zeigt den typischen Gärverlauf einer labilen Silage. (Hirtz, 2010)

Abb. 2: Gärungsverlauf einer stabilen Silage



Quelle: Hirtz, 2010

Abb. 3: Gärungsverlauf einer labilen Silage



Quelle: Hirtz, 2010

Phase 5:

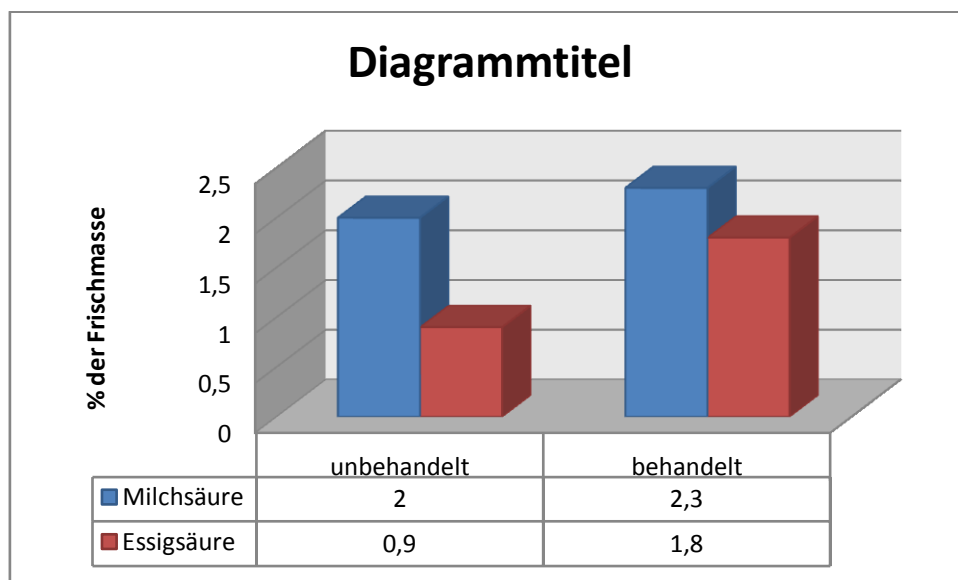
Kommt die Milchsäuregärung zum Stillstand, ist die Silage nicht lagerstabil. Die bereits gebildete Milchsäure wird wieder durch Clostridien abgebaut und der pH-Wert steigt an. Eine Fehlgärung, die mit hohen Verlusten an Nährstoffen und Energie verbunden ist, setzt ein. Im Fall einer einsetzenden Fehlgärung werden auch andere unerwünschte Stoffumsetzungen, z.B. Abbau des Proteins, begünstigt. Diese können in Fäulnisprozesse übergehen und letztendlich zum Verderb der Silage führen.

Welcher Gärungsverlauf konkret stattfindet, hängt im Wesentlichen von der chemischen Zusammensetzung der Biomasse (Vergärbarkeit der Frischmasse) und vom Besatz an Mikroorganismen ab. (Hirtz, 2010)

3.1.4.2 Mögliche Einflussnahme auf die Silagequalität während der Lagerung

Die Einflussnahme auf die Silagequalität während der Lagerung ist gering. Einmal abgedeckt sollte die Silage auch abgedeckt bleiben, um unnötigen Lufteintrag zu vermeiden. Mehr als die regelmäßige Kontrolle auf Dichtheit der Folien und auf Schädlingsbefall ist kaum möglich. Der größte Einfluss ist bei der Einsilierung gegeben. Versuche der Universität Rostock zum Einfluss der Silierung auf den Biogasprozess haben gezeigt, dass Silagen (Mais als auch GPS – Silagen) mit einem essigsäurebetonten Gärsäuremuster (siehe Abb. 4) neben einer hohen Lagerstabilität auch eine verbesserte Methanausbeute zeigen. Das ermöglicht die positive, also gasausbeutesteigernde Einflussnahme auf die Silagequalität durch den Einsatz spezieller Starterkulturen. Verlängert man die Mindestlagerzeit auf über acht Wochen kann das Verhältnis von Milch – und Essigsäure noch mehr in Richtung der Essigsäure verschoben werden (agratec). (Schlegel; Ludley, 2007)

Abb. 4: Gärsäuremuster behandelter und unbehandelter Maissilage



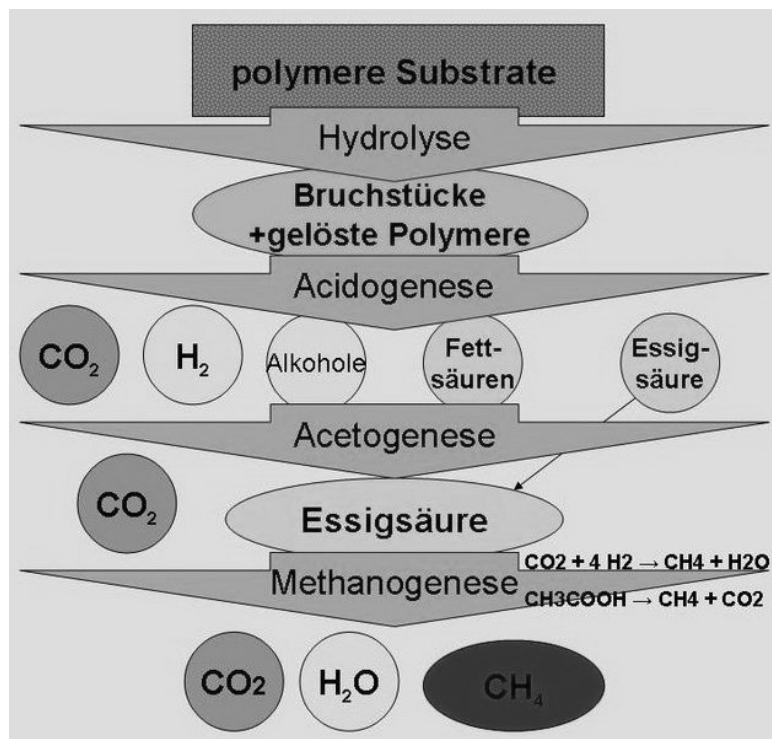
Quelle: Banemann, 2007

4 Prozessführung einer Biogasanlage

4.1 Wesentlicher Ablauf der Biogasbildung

Bei diesem anaeroben Abbauprozesses (= anaerobe Vergärung) werden organische Stoffe unter Sauerstoffausschluss und bei Temperaturen zwischen 20 °C bis 50 °C zu brennbarem Methan (CH₄) vergoren. Als Nebenprodukte entstehen Kohlendioxid (CO₂), Wasser und Spurengase, wie z.B. Schwefelwasserstoff (H₂S), Ammoniak (NH₃), elementarer Stickstoff (N₂) und Wasserstoff (H₂). Während der Vergärung wird der in den Substraten vorhandene Kohlenstoff in vier Phasen (Hydrolyse, Versäuerung, Essigsäurebildung, Methanbildung) die nachfolgend dargestellt und erläutert werden, zu Biogas umgesetzt. (Hecht, 2008)

Abb. 5: Umwandlung von Gärsubstrat in Biogas



Quelle: Kompost-Mohr

Hydrolyse

Die Biomasse, hauptsächlich bestehend aus polymeren Verbindungen, wie Proteinen, Fetten und Polysacchariden, wird in dieser Phase von verschiedenen Mikroorganismengattungen (*Clostridium*, *Enterococcus*, *Bacteroides*) in ihre Bausteine (Monomere) also Aminosäuren (AS), kurzkettige Fettsäuren und Monosaccharide, gespalten. (Hecht, 2008)

Versäuerung (Acidogenese)

Fermentative Mikroorganismen setzen die in der hydrolytischen Phase gebildeten Stoffe zu niedermolekularen organischen Säuren z.B. Propionsäure (CH₃CH₂-COOH), Buttersäure (CH₃CH₂CH₂-COOH), Valeriansäure (CH₃CH₂CH₂CH₂-COOH) aber auch zu CO₂, H₂ und geringe Mengen Alkohol, Schwefelwasserstoff (H₂S) und Milchsäure (CH₃CHOH-COOH) um. (Eder; Schulz(†), 2006). (Hecht, 2008)

Essigsäurebildung (Acetogenese)

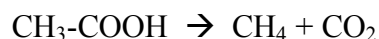
Die Bildung der Essigsäure aus den in der Versäuerungsphase entstandenen organischen Fettsäuren wird von acetogenen Mikroorganismen vollzogen. Die Umwandlung in Essigsäure ist nötig, da die methanogenen Mikroorganismen nur diese abbauen können. Während dieser Phase werden die in der Versäuerungsphase gebildeten Stoffwechselprodukte von acetogenen Mikroorganismen (*Acetobacterium*, *Syntrophomonas*) hauptsächlich zu Essigsäure (CH₃-COOH) und Wasser (H₂) umgesetzt. Es entsteht auch in geringen Mengen Ameisensäure (H-COOH).

In der nächsten Phase bildet die Essigsäure die Grundlage zur Bildung von Methan (CH₄). Wird der so entstandene Wasserstoff durch die Methanogenese nicht verwertet, führt der erhöhte H₂-Partialdruck zur Hemmung der Acetogenese. (Hecht, 2008)

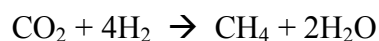
Methanbildung (Methanogenese)

In dieser Phase wird von methanogene Archaeobakterien (*Methanococcus*- und *Methanobacterium*-Arten) Methan auf zwei Wegen gebildet. Aus Essigsäure über den acetotrophen Weg und aus CO₂ und H₂ über den hydrogenotrophen Weg. Ungefähr 70% des gesamt gebildeten Methans werden acetotroph und ca. 30% hydrogenotroph gebildet.

Acetotrophe Methanbildung durch die Gattung *Methanosarcina*:



Hydrogenotrophe Methanbildung durch die Gattungen *Methanococcus*, *Methanobacterium* und *Methanomicrobium*:



Am Ende des Gärungsprozesses liegt dann ein noch aufzubereitendes Gasgemisch [Methan (CH_4), Kohlenstoffdioxid (CO_2), Wasserdampf (H_2O), Schwefelwasserstoff (H_2S), Ammoniak (NH_3), elementarer Stickstoff (N_2)] mit Staubpartikeln und Gärsubstratrückstand, der als Dünger verwendet wird, vor. In der Regel liegt der Methangehalt im Biogas über 50 %, da bei der acetotrophen Methanbildung CH_4 und CO_2 im Verhältnis 1:1 entstehen, während hydrogenotrophe Methanbakterien kein CO_2 bilden und so ein Verhältnis $\text{CH}_4 / \text{CO}_2$ von über 1 vorliegt. (Hecht, 2008)

4.2 Prozessparameter

In jeder Phase der Biogasproduktion wirken verschiedene Mikroorganismen und Enzyme mit unterschiedlichen Milieuoptyma. Mit nachwachsenden Rohstoffen betriebene Anlagen werden aktuell hauptsächlich im einphasigen Prozess gefahren, wie auch die Biogasanlage in Malchin. Das heißt, dass alle Abbauprozesse in einem System ablaufen müssen. In diesem Fall muss in erster Linie auf die Milieuansprüche der methanogenen Mikroorganismen geachtet werden, da diese im erheblichen Maße sensibler auf Umgebungsveränderungen reagieren als die hydrolytischen, acidogenen und acetogenen Mikroorganismen. Hinzu kommt noch ein geringeres Adaptionsvermögen der methanogenen Mikroorganismen gegenüber schwankenden Bedingungen, wie zum Beispiel Veränderungen der Silagequalität durch eine Substratumstellung oder Temperaturschwankungen. Die Veränderungen führen stets zu einer geringeren Entwicklung, besonders der methanogenen Mikroorganismen. Diese Einflüsse und weitere Umstände machen das Einstellen oder der Einhaltung fester Parameter in einer Biogasanlage schwierig. Vielmehr muss auf veränderte Bedingungen reagiert werden. (Döhler; Eckel; Fröba, 2009)

Schlegel (2007) schrieb dazu: „Soll langfristig ein erfolgreicher Betrieb der Biogasanlage erreicht werden, muss der Gärprozess kontinuierlich mit geeigneter Messtechnik kontrolliert werden, damit die im Fermenter lebenden Mikroorganismengruppen optimale Milieubedingungen vorfinden und sich ein Gleichgewicht im Fermenter bildet bzw. aufrechterhalten werden kann.“ Parameter, wie Menge und Zusammensetzung der zugeführten Substrate, Gärtemperatur und pH – Wert, Verweilzeit, Raumbelastung und Gasleistung, das FOS/TAC Verhältnis sowie die Ammoniumkonzentration sollten daher regelmäßig kontrolliert werden. (Schlegel, 2007)

4.2.1 Prozesstemperatur

Generell kann gesagt werden, dass die Temperatur im Fermenter so konstant wie möglich gehalten werden muss, damit sich das angestrebte biologische, chemische und physikalische Gleichgewicht einstellt.

Die Prozesstemperaturen in Biogasanlagen werden in 3 verschiedene Temperaturbereiche eingeteilt:

psychrophil	(< 20°C)
mesophil	(30 – 45°C)
thermophil	(45 – 55°C)

Der Anteil der psychrophil gefahrenen Biogasanlagen ist aufgrund ihrer geringen Umsetzungsrate und damit verbundenen Unwirtschaftlichkeit vernachlässigbar gering.

Die wesentlichen Vor – und Nachteile der mesophilen und thermophilen Prozessführung sollen nachfolgend aufgeführt werden. (Döhler; Eckel; Fröba, 2009; Schlegel, 2007)

Mesophile Prozessführung

Die mesophile Prozessführung im Bereich von 30 – 45°C zeichnet sich im Vergleich zur thermophilen durch eine höhere Prozessstabilität aus. Die Mikroorganismen sind in weitaus geringerem Maße temperaturempfindlich.

Das heißt, dass sich die Mikroorganismen Temperaturschwankungen schneller und besser anpassen können und die Einbußen bei der Methanausbeute im Vergleich zu thermophil betriebenen Biogasanlage geringer ausfallen. Temperaturschwankungen können beispielsweise durch rasches Sinken bzw. Steigen der Außentemperatur, zu kaltes bzw. zu warmes Substrat oder der aufgrund technischer Probleme ausfallenden Reaktorkühlung verursacht werden.

Die mesophile Prozessführung hat außerdem einen geringeren Wärmebedarf, was nicht heißen muss, dass sie dadurch wirtschaftlicher ist.

Begründet durch die geringere Prozesstemperatur erreicht die mesophile Prozessführung nicht die Umsetzungsrate der thermophilen Prozessführung und benötigt daher deutlich längere Verweilzeiten, um die gleiche Methanausbeute bezogen auf ein Kilogramm zugeführte organische Trockensubstanz zu erreichen. Für Substrate mit fragwürdiger Eignung, verursacht durch anhaftende Schadstoffe, wie Pflanzenschutzmittel, Schadorganismen wie Schimmelpilze, Antibiotika oder Desinfektionsmittel, besteht eine geringere Hygienisierungsleistung. (Döhler; Eckel; Fröba, 2009; Schlegel, 2007)

Thermophile Prozessführung

Die thermophile Prozessführung zwischen 45 – 55°C erhöht zwar die Hygienisierungswirkung bei problematischen Einsatzstoffen und die Umsetzungsrate, dies jedoch auf Kosten der Prozessstabilität. Die höhere Fermentertemperatur bewirkt, dass mehr CO₂ aus der gelösten in die gasförmige Form übergeht und hat zur Folge, dass die Pufferkapazität gegenüber Säuren sinkt. Zu tiefe pH – Werte hemmen dann die Acetogenese und Methanogenese, die ohnehin schon langsamer ablaufen als die Hydrolyse und die Acidogenese und sorgen so für Verluste bei der Gasausbeute von bis zu 30%. Ein weiterer Nachteil ist, dass das für Mikroorganismen toxische Ammoniak (NH₃) höher konzentriert vorkommt. Grund dafür ist, dass das sogenannte NH₃ / NH₄ – Gleichgewicht sich durch die höheren Temperaturen in Richtung des NH₃ verschiebt. Dazu kommen steigende Prozesskosten für das Beheizen oder Kühlen der Fermenter und ggf. das Vorwärmen des Inputmaterials. (Döhler; Eckel; Fröba, 2009; Schlegel, 2007)

4.2.2 pH – Wert

Der pH – Wert des Substrates in einem Fermenter einer industriellen 1 – Phasen – Biogasanläge sollte zwischen pH 7 – 8 liegen, weil das pH – Wert – Optimum der methanogenen Bakterien in diesem Bereich sich befindet. Der optimale pH – Bereich der hydrolytischen und der fermentativen Bakterien ist zwar zwischen pH 4,5 – 7,0 angesiedelt, hier aber nicht maßgeblich. In einem Fermenter einer 1 – Phasen – Biogasanlage sind die methanogenen Mikroorganismen der begrenzende Faktor. Die Umsetzung der Essigsäure zu Methan geht deutlich langsamer von statten als die Hydrolyse der Biomasse und die anschließende Versäuerung dieser Hydrolyseprodukte. Die Reproduktionszeit der Methanbildner ist mit 5 – 20 Tagen ebenfalls deutlich langsamer als die der Mikroorganismen der ersten beiden Phasen mit 20 Minuten – 1,5 Tagen und ist ein weiterer Grund dafür zu sorgen, dass die Methanbildner ein möglichst optimales Milieu vorfinden. Dazu kommt, dass die Methanbildner empfindlicher auf selbst sich geringfügig ändernde Bedingungen reagieren und deshalb ist es vorteilhaft, wenn sich die Schwankungen auf ihren optimalen Bereich begrenzen. In der agratec Biogasanlage beträgt die tägliche Schwankungsbreite im Fermenter +/- 2 °C/d. (Döhler; Eckel; Fröba, 2009; Schlegel, 2007)

4.2.2.1 FOS/TAC Puffersystem

Der Anteil flüchtige organische Säuren (FOS) ist ein anlagenspezifischer Wert und wird mit der FOS/TAC – Titration (TAC – Total Anorganic Carbon) bestimmt, wobei fälschlicherweise auch Huminsäuren mit erfasst werden.

Das FOS/TAC Verhältnis sollte laut agratec $< 0,4$ sein. Bei diesem Wert ist allerdings nicht die absolute Höhe der Veränderung von Bedeutung sondern in welcher Zeit dies geschieht.

Die pH – Wert – Stabilität im Fermenter wird vor allem durch das Kalk – Kohlensäure – Gleichgewicht realisiert. Bei einem im Fermenter vorherrschenden pH – Wert von $8 - 7$ liegen vor allem Hydrogencarbonate (HCO_3^-) und gelöstes CO_2 vor. (Döhler; Eckel; Fröba, 2009; Hecht, 2008)



Im Fall eines zu hohen Säureeintrages bzw. einer zu starken Säureproduktion kann das HCO_3^- zu CO_2 umgesetzt werden und so der pH – Wert in gewissem Maß stabil gehalten werden. Da das aus der Pufferaktivität entstandenen CO_2 nur in begrenztem Umfang gelöst bleibt, wird es mit den anderen flüchtigen Stoffen ausgetragen. Dem Puffersystem bzw. Gleichgewicht wird bei Beanspruchung, also bei auftretenden Säuren, stetig eine Komponente durch Entweichen entzogen (offenes System). Das hat zur Folge, dass das Puffervermögen mit der Zeit abnimmt. Ein Zeichen dafür ist, dass bei konstantem pH – Wert die CO_2 Konzentration im Biogas zunimmt. Allerdings sind die steigenden CO_2 Werte nur schwer erkennbar aufgrund schwankender Gasqualitäten und oder Ungenauigkeiten bei den Messungen.

(Döhler; Eckel; Fröba, 2009; Hecht, 2008)

4.2.3 Substrat / Substrateinbringung

4.2.3.1 Fütterung

Die Fütterung der Biogasanlage sollte, wie alle anderen Prozesse auch, möglichst gleichmäßig und kontinuierlich ablaufen. Schwankungen in der täglich zugeführten Menge an Substrat müssen vermieden werden. Die Mikroorganismen sind auf eine gleichmäßige Substratzufuhr angewiesen, um effektiv arbeiten zu können. Ferner besteht bei einer unregelmäßigen Fütterung nicht nur die Gefahr der Gaseinbuße sondern auch eine Gefährdung der Prozessbiologie von der ersten bis zur letzten Stufe. Bei zu wenig Substrateintrag sind die Bakterien nicht ausgelastet und die Gaserzeugung und die Gasausbeute fallen dem entsprechend geringer aus. Die Folgen einer konsequenten Überfütterung sind nicht so

gravierend wie die einer zeitweisen Überfütterung. Bei einer konsequenten Überfütterung wird die Biogasausbeute pro Tonne Substrat sinken, da ein Teil des wertvollen Substrates unverwertet den Fermenter durchläuft. Es ist in diesem Fall darauf zu achten, dass der pH – Wert im Fermenter durch Beimischen von Basen oder Puffer nicht zu stark absinkt, um einer Versäuerung vorzubeugen und das Milieu der Methanbildner nicht zu verändern. Ebenfalls eine geeignete Maßnahme einer Versäuerung entgegen zu wirken ist, ein Teil des Fermenterinhalt zu rezirkulieren. So wird ein Teil der methanogenen Mikroorganismen wieder in den Fermenter zurückgepumpt und sie haben mehr Zeit sich an das saure Milieu anzupassen. Beim beispielsweise durch technische Probleme verursachten mehrtägigen Ausfall der Futterzufuhr passen sich die Mikroorganismen dem Futtermangel an. Setzt dann die Futterzufuhr wieder ein, besteht die große Gefahr, dass der pH – Wert zu stark sinkt und der Fermenter letztendlich umkippt und anschließend abgelassen und neu hochgefahren werden muss. Grund dafür ist, dass alle Mikroorganismen im Fermenter dabei waren, sich auf Futtermangel einzustellen. Wird den Mikroorganismen nun wieder die normalerweise gefütterte Menge an Substrat zugeführt, setzt als erstes die Hydrolyse und die Versäuerung und dann erst die Essigsäure- und Methanbildung ein. Bis die Methanbildner aber aktiv werden, kann der pH – Wert durch die früher beginnenden sowie schneller ablaufenden ersten beiden Phasen schon so tief sein, dass kein Methan gebildet wird.

(Döhler; Eckel; Fröba, 2009; Schwab 2005)

4.2.3.2 Fütterungsfrequenz

Die Häufigkeit der Fütterungen pro Tag kann sich laut Döhler, Eckel, Fröba (2009) von unter 12 bis hin zu über 49 Fütterungen erstrecken, wobei etwa 50 Prozent aller Biogasanlagen 13 – 24 – mal pro Tag gefüttert werden. Biogasanlagen, die mit hohen Raumbelastungen und kurzen Verweilzeiten gefahren werden, müssen häufiger gefüttert werden. Durch die vermehrten Fütterungen werden kleinere Substratportionen zugeführt. Diese kleineren Substratportionen lassen sich besser homogenisieren und bewirken so eine schnellere Abbaubarkeit, Zersetzung und Verwertbarkeit. Außerdem kann durch eine höhere Fütterungsfrequenz die Fettsäurebelastung im Fermenter und die H₂S – Belastung im Biogas reduziert werden. Die zu fütternden Mengen sind auch abhängig von Eigenschaften des Substrates, worauf im Punkt 4.2.3.4 eingegangen werden soll. (Döhler; Eckel; Fröba; 2009)

4.2.3.3 Substrateinbringung

Die Futtereinbringung kann mit einem Vorgrubensystem oder durch Direkteinspeisung in den Fermenter erfolgen. Bei der Nutzung einer Vorgrube bei Nassfermentation besteht die Gefahr von Ausbeuteverlusten infolge einsetzender Gärung, sofern die Vorgrube nicht mit einem Biogasspeicher ausgestattet ist.

Die Direkteinspeisung ermöglicht aufgrund der besseren Einmischung (Homogenisierung) geringfügig höhere Gasausbeuten. (Döhler; Eckel; Fröba; 2009)

4.2.3.4 Substrat (Zusammensetzung)

Die für die Biogasproduktion verwendeten Substrate unterscheiden sich teilweise erheblich durch Herkunft, Art und Beschaffenheit. Welche Substrate letztendlich verwendet werden, hängt von der Verfügbarkeit der Substrate und dem Einsatzzweck der Biogasanlagen ab. So gibt es Biogasanlagen, die vor allem zur sinnvollen Abfallverwertung (energetische Nutzung) errichtet werden.

Betreiber von Biogasanlagen, die den Bonus für NaWaRo nutzen wollen, dürfen keine organischen Reststoffe, wie die Schlempe aus der Alkoholproduktion, Prozesswasser und Fruchtwasser der Stärkeproduktion, Speisereste, Bioabfall, behandelter Apfeltrester, usw. verwenden sondern ausschließlich nachwachsende Rohstoffe (Energiepflanzen), wie Mais, Roggen, Weizen, Kartoffeln, Zuckerrüben, Massentrüben und verschiedene Gräser (Klee gras, Sudangras). Die Negativliste der nicht als nachwachsende Rohstoffe geltenden Substrate ist in der 2. Anlage Punkt IV im EEG (idF v. 25.10.2008) nachzulesen.

Die Ansprüche der als nachwachsenden Rohstoffe genutzten Pflanzen unterscheiden sich bezüglich Anbau, Lagerung, erforderlicher Technik und Logistik erheblich und auch ihre Inhaltstoffe, Lagereignung, Verwertbarkeit und damit auch ihre spezifische maximale Methanausbeute variieren beachtlich.

Auch innerhalb einer Pflanzenart und selbst Pflanzensorte kann die Konzentration der Inhaltstoffe je nach Klima, Wetter, Erntezeitpunkt, Standort (Acker, Schlag) und Qualität der Silierung starken Schwankungen unterliegen. In der Tabelle 3 werden für die mit NaWaRo betriebenen Biogasanlagen wichtigsten Substrate mit ihrer für die Gasausbeute relevanten durchschnittlichen Zusammensetzung aufgelistet. Weiterhin soll gezeigt werden, welche Ausmaße der Einfluss des Erntezeitpunktes auf die Gasausbeute haben kann. (Schwab, 2005)

Tab.3: Mittelwerte für Biogas- und Methanerträge aus Laborversuchen mit ausgewählten Substraten (Auszug)

Substrat	Eigenschaften (Zustand, Behandlung)	Ver- suchs- anzahl	TS	oTS % der TS	Bio- gas- ertrag	Variations- koeffizient Biogas- ertrag	Biogas- ertrag	Methan- gehalt
		[n]	[%]	[%]	[Nm ³ /t oTS]	[%]	[m ³ /t FM]	[%]
Mais	Silage, milchreif	7	21,9	95,7	578	14,6	121	51,9
Mais	Silage, Beginn teigreif	9	27,8	94,8	651	9,3	171	51,9
Mais	Silage, teigreif	17	32,6	94,7	642	17,4	198	54
Mais	Silage, vollreif	29	40,1	96,3	593	15,3	229	54
Roggen	GPS	3	29,4	92,9	664	23,5	182	52,3
Weizen	Körner	1	86,6	98	764	-	649	48
Weizen	Stroh	1	90,2	91,8	280	-	232	55
Kartoffeln	zerkleinert	4	20,1	92,2	728	15	134	56,5
Zuckerrüben	-	4	19,5	96	775	8,7	145	49,7
Massen- rüben	-	3	15	93,1	850	19,4	119	54,5
Kleegras	Silage	3	12,7	90,3	482	12,6	55	69,4
Kleegras	Heu	1	89,5	93,1	414	-	345	67,5
Sudangras	frisch	6	40,7	95,6	363	6,3	141	62,9
Sudangras	Silage	6	26,3	93,4	531	24,7	131	53,7

Quelle: Schwab, 2005

In der Tabelle 3 ist am Beispiel Mais deutlich die Abhängigkeit des Trockensubstanzgehaltes und damit auch der Methanausbeute vom Erntezeitpunkt zu erkennen. Betrachtet man den Methangehalt und die Biogasausbeute in m³/t Frischmasse (FM) des milchreifen und des vollreifen Maises kommt man auf etwa die doppelte Methanausbeute. Meist wird teigreifer Mais geerntet, wobei immer noch ein Mehrertrag an Methan von über 50 % in Bezug auf den Erntezeitpunkt bei der Milchreife erzielt wird.

4.2.3.4.1 Makronährstoffe

Für einen stabilen Prozess und eine höchstmögliche Umsetzung der organischen Substanz in Methan ist nicht nur die Menge an sich sondern auch das mengenmäßige Verhältnis der Elemente Kohlenstoff und Stickstoff ausschlaggebend. Das Verhältnis von Kohlenstoff und Stickstoff sollte im Bereich von $15:1 < C/N < 40:1$ liegen. Ist das Verhältnis niedriger, besteht die Gefahr der Hemmung der Methanproduktion durch Bildung toxischer Ammoniakkonzentrationen. Ein C/N Verhältnis über 40:1, also ein N – Mangel, verursacht eine unvollständige Kohlenstoffnutzung. Neben Kohlenstoff und Stickstoff gehören Phosphor und Schwefel zu den wichtigsten essentiellen Elementen. Ein ausgewogenes Verhältnis der Elemente im Substrat wird wie folgt benannt (Weiland, 2006):

C:N:P:S 200:10:2:1 bis 400:10:2:1

Quelle: Weiland, 2006

4.2.3.4.2 Mikronährstoffe (Spurenelemente)

Enzyme können ihre Aufgaben nicht immer allein bewältigen. Einige benötigen ein Co-Enzym.

Eine Reihe von Vitaminen, Mineralstoffen und Spurenelementen fungieren als Co-Enzyme. Dazu gehören vor allem die Vitamine B1, B2, B6 und B12 sowie die Elemente Eisen, Kupfer, Nickel, Kobalt Magnesium, Mangan, Molybdän, Natrium, Selen und Zink. Letzteres ist als Co – Enzym an der Bildung von rund 80 Enzymen beteiligt. Co-Enzyme werden im Gegensatz zu den Enzymen bei ihren Aufgaben verbraucht. Sie müssen daher ständig regeneriert, erneuert bzw. zugeführt werden (Zellmann; Friedmann, 2006). Die Spurenelemente sind nur in gelöster Form bioverfügbar. In Gegenwart von Schwefelwasserstoff werden die Spurenelemente ausgefällt und verlieren somit ihre Bioverfügbarkeit. Ein Mangel an Spurenelementen kann bewirken, dass einzelne Bakteriangattungen ganz fehlen. Dies führt in der Regel zur Verlangsamung des Abbauprozesses infolge einer Anreicherung von Zwischenprodukten.

Der Bedarf an Kobalt, Nickel und Molybdän ist charakteristisch für Methanbakterien und sollte unbedingt abgedeckt sein, damit die Methanbildner nicht in ihrer Aktivität gehemmt sind und es nicht zu einer Akkumulation von Säuren im Fermenter kommt. Ohne ein gedeckten Mikronährstoffbedarf ist das sichere betreiben einer Biogasanlage mit hohen Raumbelastungen nicht möglich, da sich die Mikroorganismen nicht schnell genug vermehren. (Zellmann; Friedmann, 2006)

4.2.3.4.3 Trockensubstanz / organische Trockensubstanz

Der Trockensubstanzgehalt sollte - je nach Substrat - gewisse Grenzen nicht überschreiten, da es sonst, wie auch bei zu großen Häcksellängen, zur Ausbildung von Schwimmschichten im Fermenter bzw. im Nachgärer kommen kann. Das ist aber eher ein Problem bei der Nassfermentation. Mit zunehmender Dicke der Schwimmschichten wird der Gasaustausch zwischen Gärschlamm und Gasspeicher immer stärker behindert. Bei über 30 Zentimeter dicken Schwimmschichten besteht die Gefahr, dass sie mit den Rührwerken nicht mehr auflösen sind und machen den Einsatz von Hilfsstoffen erforderlich. Auch die täglich zugeführte Menge an organischer Trockensubstanz sollte nicht unkontrolliert bleiben. Eine geeignete Kontrollmöglichkeit hierfür ist die sogenannte Faulraumbelastung, oft auch nur Raumbelastung genannt. Bei dem Anfahrbetrieb einer Biogasanlage ist darauf zu achten das eine wöchentliche Steigerungsrate der Substratzufuhr von 0,5 kg oTS / m³*d nicht überschritten wird (agratec). (Döhler; Eckel; Fröba; 2009)

4.2.4 Raumbelastung

Die Raumbelastung ist eine wichtige Größe zur Beurteilung der biologischen Belastung des Prozesses. Sie gibt Auskunft, welche Menge organische Trockensubstanz höchstens zugeführt werden darf, ohne eine Überlastung bzw. eine Überfütterung der Anlage zu riskieren, die letztendlich den Fermenter umkippen (Versauern) lassen würde. Die Raumbelastung wird wie folgt ermittelt:

$$\text{Raumbelastung} \left[\frac{\text{kg oTS/d}}{\text{m}^3} \right] = \frac{\text{tägl. zugeführte oTS} \left[\text{kg oTS/d} \right]}{\text{nutzbares Gärbehältervolumen} [\text{m}^3]}$$

Quelle Gruber, 2002

Die Gasausbeute sinkt bei übermäßiger Raumbelastung. Die Raumbelastung muss immer in Verbindung mit der Verweilzeit betrachtet und schon bei der Planung einer BGA berücksichtigt werden. Für verschiedene Substrate sind entsprechend ihrer Abbaugeschwindigkeit unterschiedliche Richtwerte für Verweilzeit und Raumbelastung anzunehmen. Bei Steigerung der Raumbelastung um nur 1kg oTS/m³*d kann die spezifische Gasausbeute um bis zu 10 % abfallen. (Gruber, 2002)

4.2.5 Verweilzeit

Die theoretische hydraulische Verweilzeit gibt an, wie lange sich das Substrat durchschnittlich im Fermenter befindet. Sie errechnet sich wie folgt (Döhler; Eckel; Fröba; 2009):

$$\text{Verweilzeit}[d] = \frac{\text{genutztes Gärbehältervolumen [m}^3\text{]}}{\left(\frac{\text{tägl. zugeführte} + \text{abgeführte Substratmenge}}{2}\right) \left[\text{m}^3/d\right]}$$

Quelle: agratec

Die Verweilzeit kann 10 – 150 Tage betragen. Es ist von größter Bedeutung, darauf zu achten, dass ein Ausspülen der Bakterienpopulationen durch zu kurze Verweilzeiten vermieden wird. Auch bei einem vorhandenen Rücklauf an Gärsubstrat sollte die Verweilzeit nicht unter 20 Tage sinken.

Die Gasausbeute nimmt mit steigender Verweilzeit zu und nähert sich der theoretisch maximalen Gasausbeute. Bei den Bemühungen, die Gasausbeute zu maximieren, darf die Gasleistung nicht außer Acht gelassen werden. Für gute wirtschaftliche Ergebnisse muss die Gasleistung im Idealfall exakt so hoch sein, dass die geplante bzw. installierte Kapazität der BHKW genutzt werden kann. Langfristiges Ziel ist also maximale Gasausbeute bezogen auf die Menge zugeführten Substrats bei Beibehaltung der optimalen Gasleistung der Anlage.

(Döhler; Eckel; Fröba, 2009; Schwab, 2005)

4.2.6 Gasleistung

Die Gasleistung gibt an, wie viel Kubikmeter Gas pro Tag erzeugt wird und bezieht sich, bei der Biogasproduktion auf Basis nachwachsender Rohstoffe, auf das nutzbare Fermentervolumen und wird wie folgt ermittelt:

$$\text{Gasleistung} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{m}^3 \times d} \right] = \frac{\text{tägl. erz. Gasvolumen} \left[\frac{\text{m}^3}{d} \right]}{\text{Gärbehältervolumen} \left[\text{m}^3 \right]}$$

Quelle: Gruber, 2002

In Batch – Anlagen nimmt bei längerer Verweilzeit die Gasausbeute zu, die Gasleistung aber im zunehmenden Maße ab. Dieser Zusammenhang wird aus der Abb. 1 in Punkt 3.1.2.5 deutlich. In kontinuierlichen Verfahren werden sich, bei gleichmäßigen Bedingungen, die

Gasausbeute wie auch die Gasleistung auf einen Wert einstellen bzw. um einen Wert schwanken.

4.2.7 Rühren

Das Rühren im Fermenter hat mehrere Aufgaben, die je nach Auslegung der Biogasanlagen variieren können. Eine gute Homogenisierung, also die möglichst gleichmäßige Verteilung von Gärschlamm und neu zugeführter Silage, ist Bauarten übergreifend zu erreichen. Ob flüssiges, festes oder pastöses Material gerührt werden muss, hat großen Einfluss auf die Gestaltung und Anordnung der Rührwerke. Durch Rühren wird auch erreicht, dass die in den mittleren und unteren Schichten gebildeten Gasbläschen schneller nach oben steigen, also dem System entzogen werden und so die Umsetzung zum Methan begünstigt wird. Sind die Rührwerke nicht für die anlagenspezifischen Erfordernisse ausgelegt, wird ein immer größerer Teil an Substrat den Fermenter ungenutzt durchlaufen und die Gasausbeute verringert sich. Solche anlagenspezifischen Erfordernisse sind beispielsweise die Paddelgröße, die Höhe der Drehzahlen und nicht aufgelöste Schwimmschichten (bei Flüssigfermentation) bzw. Sinkschichten. (Gers-Grapperhaus, 2009)

4.2.7.1 Rührintervalle

Die Rührintervalle sind zweckmäßig einzustellen. Es sollten die Rührzeiten mit den Fütterungszeiten abgestimmt werden, so dass das gefütterte Substrat sofort mit dem Fermenterinhalt vermischt wird und damit für die Mikroorganismen verfügbar ist. Zugleich müssen ausreichend lange Ruhezeiten eingehalten werden, damit die Tätigkeit der Mikroorganismen weitgehend ungestört ablaufen kann. (Gers-Grapperhaus, 2009)

5 Prozessüberwachung und Prozessregelung

5.1 Allgemein

Für den effizienten Betrieb einer Biogasanlagen ist eine hohe Verfügbarkeit und Auslastung des Gesamtprozesses notwendig. Eine hohe Auslastung wird durch die Funktionalität und Betriebssicherheit der eingesetzten Technik sowie einer konstant hohen Abbauleistung des biologischen Prozesses bestimmt. Für das Erreichen dieser betriebswirtschaftlich notwendigen hohen Verfügbarkeit werden alle Biogasanlagen, insbesondere industrielle Biogasanlage mit umfangreichen Überwachungssystemen ausgestattet. Die möglichst kontinuierliche und zeitnahe Überwachung des gesamten Prozesses ist bei industriellen Biogasanlagen von besonderer Bedeutung. Sie reagieren wesentlich empfindlicher auf Störungen als die kleineren landwirtschaftlichen Biogasanlagen, da die industriellen Biogasanlagen immer größer dimensioniert gebaut werden und oft im Grenzbereich des technisch und biologisch Möglichen betrieben werden.

Die Überwachung und Regelung der Prozesse von Biogasanlagen kann in die technische und biologische Funktionalität unterteilt werden. (Kaltschmitt; Hartmann; Hofbauer, 2009)

5.1.1 Überwachung der technischen Funktionalität

Heute werden alle technischen Komponenten von Biogasanlagen kontinuierlich überwacht. Das betrifft folgende technische Funktionalitäten:

- Fermentertemperatur
- Füllstände in Fermenter, Substratlager und Vorlagebehälter
- Gasqualität (Methangehalt, Sauerstoffgehalt, Schwefelwasserstoffgehalt)
- produzierte Gasmenge
- Inputmengen und Outputmengen
- Betriebszustände der BHKW
- Betriebszustände der Pumpen, Rührwerke und Sicherheitseinrichtungen

Damit ist eine wichtige Grundlage geschaffen worden, Störungen einfach und frühzeitig zu erkennen. (Kaltschmitt; Hartmann; Hofbauer, 2009)

5.1.2 Überwachung der biologischen Funktionalität

Die Möglichkeiten der direkten kontinuierlichen Überwachung der biologischen Abbauprozesse, deren Zustand und vor allem deren Zustandsänderungen sind bis heute begrenzt, da kaum Messverfahren zu vertretbaren Kosten verfügbar sind. Aus diesem Grund bietet nur die Überwachung einiger kontinuierlich und diskontinuierlich kontrollierter

Parameter eine Basis, zur Beurteilung des Zustandes des biologischen Prozesses. Es wurde ein System geschaffen, das auf einem guten Zusammenspiel von elektronischen Sensoren, Stellgliedern und dem Anlagenpersonal beruht.

Die in der Tabelle 4 aufgeführten Messgrößen sind einzeln wenig aussagekräftig. Erst in Kombination miteinander lassen sich realitätsnahe Aussagen über die Prozessbiologie treffen. Als eine geeignete Kontrollgrundlage für die Prozessbiologie stellte sich die Kombination aus Durchflussrate, Gasproduktionsrate, Methangehalt im Biogas und pH – Wert heraus. Die Betrachtung dieser Messwerte im Verbund lässt, unter der Voraussetzung der Abwesenheit von Hemmwirkung z.B. durch hohe Ammoniakkonzentrationen, die Unterscheidung der Prozesszustände Substratmangel, Überlastung oder Optimalbetrieb zu. Bei hohen Ammoniakkonzentrationen weist die Prozessdynamik veränderte Eigenschaften auf, die eine zusätzliche Bilanzierung der Abbauprozesse oder eine Überwachung der Konzentration der organischen Säuren erforderlich macht.

Als ein wichtiger Indikator für Störungen der Biologie ist noch der H_2S – Gehalt im Biogas zu nennen. Die sprunghafte Veränderung, Ab – oder Zunahme, des H_2S – Gehalt ist das erste Anzeichen für Unregelmäßigkeiten in der Prozessbiologie. Bei der Bewertung der Messgrößen sind ebenfalls die regelmäßige Kalibrierung, Funktionsüberprüfung sowie mögliche Störfaktoren am Ort der Messung nicht zu vernachlässigen. (Kaltschmitt; Hartmann; Hofbauer, 2009)

Tab. 4: Messgrößen zur Prozessbewertung von Biogasanlagen

Messgröße	Aussage zum Prozesszustand	Verfügbare Messtechnik
Gebildetes Gasvolumen	Leistung des Gasbildungsprozesses, volumenbezogen und substratbezogen	Onlinemesstechnik verfügbar
Methan(CH ₄)-Gehalt im Biogas	Verhältnis von Methanbildung und Versäuerung	Onlinemesstechnik verfügbar
Kohlenstoffdioxid(CO ₂) - Gehalt im Biogas	Verhältnis von Versäuerung und Methanbildung	Onlinemesstechnik verfügbar
Schwefelwasserstoff (H ₂ S)- Gehalt im Biogas	Hemmwirkung des Schwefelwasserstoffes; Garantiewert für BHKW Hersteller	Onlinemesstechnik verfügbar
pH - Wert	beeinflusst direkt die Stoffwechselaktivität sowie indirekt die Hemmung der organischen Säuren, des Ammoniaks und des Schwefelwasserstoffes	Onlinemesstechnik verfügbar
Temperatur	Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der Mikroorganismen	Onlinemesstechnik verfügbar
Menge an organischen Säuren	Hemmwirkung, Anreicherung zeigt Ungleichgewicht in den Abbauprozessen	Onlinemesstechnik nicht Stand der Technik, Laboranalysen
Zusammensetzung der organischen Säuren	Hemmwirkung, Art der vorhandenen Säuren lässt Schlüsse auf die Art der Störung zu	Onlinemesstechnik nicht Stand der Technik, Laboranalysen
Gehalt an organischer Trockensubstanz (oTS)	Bestimmung der Raumbelastung, Bilanzierung der Abbauprozesse	Onlinemesstechnik nicht verfügbar, Laboranalyse
Gehalt an Trockensubstanz (TS)	Bestimmung der Raumbelastung, Bilanzierung der Abbauprozesse	Onlinemesstechnik verfügbar, gebräuchlicher als Laboranalyse
Volumen-Input	Verweilzeit, Durchflussrate	Onlinemesstechnik verfügbar
Gehalt an Ammonium (NH ₄)	Hemmwirkung des Stickstoffs	Onlinemesstechnik nicht verfügbar
Säure- und Basekapazität des Gärsubstrates	Neigung zu Veränderungen des pH-Wertes, Säureanreicherung	Onlinemesstechnik nicht Stand der Technik
Gehalt an flüchtigen organischen Säuren (FOS) bzw. an gesamten alkalischen Karbonat (TAC)	Zweipunkttitration, Abschätzung des Säuregehaltes und der Alkanität	Onlinemesstechnik nicht Stand der Technik
Gasbildungstest	Substrateigenschaften Abbaugrad, Abbaugeschwindigkeit	Onlinemesstechnik nicht verfügbar

Quelle: Kaltschmitt; Hartmann; Hofbauer, 2009

5.2 Erkennen und vorbeugen von häufigen Prozessstörungen

5.2.1 Schaumbildung

Die Schaumbildung ist keine typische Störungserscheinung der Trockenfermentation wird hier aber, als häufiger Störfall der Nassfermentation, der Vollständigkeit halber angeführt.

Die Ursachen für Schaumbildung sind vielfältig. Schaumbildung kann ein Hinweis auf Versäuerung des Fermenters, verursacht durch eine Überlastung des Gärprozesses, sein. Eine Versäuerung kann ebenfalls durch den Eintrag von Schadstoffen, wie Schimmel oder Desinfektionsmitteln, verursacht werden. Infolge der geringeren Anpassungsfähigkeit sowie einer generell höheren Empfindlichkeit gegenüber schwankenden Milieubedingungen der Methanbildner werden diese stärker und länger durch die Schadstoffe in ihrer Aktivität gehemmt als die Mikroorganismen für die Hydrolyse und die Acidogenese. Da die methanogenen Mikroorganismen die gebildeten Säuren nur beschränkt zu Methan abbauen können, kommt es zu einer Akkumulation von organischen Säuren.

Auch Temperaturschwankungen können Schaumbildung verursachen.

Eine geeignete Maßnahme wäre die Belastung zu senken, unter Umständen sogar die Anlage auszuhungern. Weiter sind der Einsatz von Schaumbremsen (z.B. Pflanzenöle) oder eine Verlängerung der Verweilzeit denkbare Reaktionen auf die Schaumbildung. Zu beachten ist, dass die richtigen Maßnahmen getroffen werden. Ist der Grund der Schaumbildung eine Akkumulation von organischen Säuren, ist der alleinige Einsatz von Pflanzenölen nicht ausreichend, da auf diese Weise nur das Symptom behandelt wird, aber nicht die Ursache der Versäuerung. Bei Nichtbeachtung ist mit erheblichen Methaneinbußen und ggf. mit dem totalen Zusammenbruch der Prozessbiologie zu rechnen. (Döhler; Eckel; Fröba, 2009)

5.2.2 Gehalt an Fettsäuren steigt, Puffervermögen sinkt

Der Anstieg an Fettsäuren ist ein Zeichen für eine Störung der Prozessbiologie. Gründe hierfür können Temperaturschwankungen sowie eine generelle Überlastung sein.

In industriellen Biogasanlagen, in denen täglich große Mengen an Silage zugeführt werden, kann eine Substratumstellung, begründet durch einen Silowechsel, erheblichen Einfluss auf die Biologie haben. Plötzliche Änderungen der Substratqualität z.B.

der organischen Trockensubstanz – Gehalte, der Schadstoffbelastung, Menge und Verhältnis an Makro- und Mikronährstoffen oder die Häcksellänge, sind daher zu vermeiden. Die Reaktion auf die Symptome von schwankenden Silagequalitäten ist sehr unvorteilhaft. Es sollte daher im Voraus die Futterqualität in allen Silos bestimmt werden. Bei genauer Kenntnis der Zusammensetzung der Silagen besteht die Möglichkeit, durch gezielte

Mischung der Substrate die Mängel der Einzelnen auszugleichen. Ein weiterer Vorteil, der sich aus der genauen Kenntnis der Silagequalität ergibt, ist eine stufenweise Umstellung des Substrates. Die Mikroorganismen haben so die Möglichkeit, sich nach und nach auf die neue Substratzusammensetzung einzustellen.

Kommt es trotz aller vorbeugenden Maßnahmen zu einem Anstieg der Fettsäuren, kann mit der Reduzierung der Substratzufuhr Abhilfe geschaffen werden. Ebenfalls eine geeignete Maßnahme ist die Kalkung. Durch die Zugabe von Kalkmilch oder Brantkalk kann der pH – Wert stabilisiert und das Puffervermögen erhöht werden. (Döhler; Eckel; Fröba, 2009)

5.2.3 Sinkender Methangehalt und dadurch schlechte Verbrennung im BHKW

Sinkender Methangehalt im Biogas kann durch übermäßig freigesetztes CO₂ aus dem Hydrogencarbonat-Puffersystem (siehe Punkt 4.2.2.1) oder durch sinkende Aktivität der Methanbakterien verursacht werden.

Technische Ursachen können Undichte im Gassystem und eine zu hohe Lufteinspeisung sein. Es sollten die Lufteinblasmenge (Entschwefelung) sowie die Gasstrecke überprüft werden. (Döhler; Eckel; Fröba, 2009)

5.2.4 Sinkender pH – Wert

Ein sinkender pH – Wert ist ein Zeichen für eine gravierende Prozessstörung. Die Pufferkapazität ist erschöpft und die Säuren beginnen die methanogenen Mikroorganismen zu schädigen. Es müssen sofort Prozess- und pH – Wert stabilisierende Maßnahmen, wie starke Reduzierung der Substratzufuhr und oder Kalkung eingeleitet werden. Die Veränderung des pH – Wertes ist ein Anzeichen für Störungen die schon bis zu 14 Tage zurück liegen, und ist daher kein geeignetes Instrument zur Prozessüberwachung oder Vorbeugung von Prozessstörungen.

(Döhler; Eckel; Fröba, 2009)

6 Vorstellung der Biogasanlage Malchin

6.1 Allgemein

Im August 2009 hat agratec den Anlagenbetrieb in Malchin aufgenommen. Als Ausgangsmaterial wurde Vollgärssubstrat, mit 8,5t oTS/m³ maximal verträglicher Raumbelastung, aus einem Fermenter einer anderen Biogasanlage aus Jessen entnommen und damit ein Fermenter der Biogasanlage Malchin bis zu zwei Drittel gefüllt. Ein Drittel wurde mit Substrat ergänzt. Mit dem Output des ersten Fermenter wurde dann der zweite Fermenter nach und nach aufgefüllt. Es wird hier Trockenfermentation im thermophilen Bereich betrieben. Der tägliche Silagebedarf beträgt ca. 200 t. Dieser Bedarf wird durch einen Substratmix gedeckt der sich aus ca. 80 % Maissilage und ca. 10 % Grassilage und ca. 10 % Roggen GPS zusammensetzt. Hinzu kommen täglich 10 t Getreideschrot sowie Gärhilfsstoffe, die für einen schnell einsetzenden bzw. stabilen Gärprozess sorgen.

6.2 Aufbau und Funktion von Prozesseinheiten der BGA Malchin

Die Substratannahme, das Substratlager, die Vorlagebehälter sowie die beiden Fermenter sind in einer verschlossenen Halle untergebracht. Das hat den Vorteil, dass die Geruchsemission durch die Silage möglichst gering gehalten wird. Hinzu kommt, dass die Fermenter weniger Wärme an die Umgebung verlieren. Die Halle wird durch die Abwärme der Verstromung beheizt. Positiv ist, dass die Substrate nicht direkt aus der Umgebung in die Fermenter gelangen, sondern noch einige Zeit im Substratlager verweilen. Der Vorteil hierbei ist, dass der Temperaturunterschied zwischen der Silage und den Fermentertemperaturen nicht nur in den kalten Monaten sondern das ganze Jahr über niedrig gehalten wird. Dadurch müssen die Mikroorganismen weniger Anpassungsarbeit leisten und beginnen schneller mit dem Abbauprozess (Hydrolyse) der Substrate.

Andererseits können während dieser Zeit energetische Verluste durch den Kontakt mit Sauerstoff (O₂) auftreten, die bei den zu fütternden Mengen von ca. 200 t/d kaum vermeidbar sind.

Das Substrat gelangt von der Annahme über Förderschnecken und Förderbänder oder bei Bedarf auch direkt vom Silagehänger in eine der vier Boxen des Substratlagers.

Durch einen Kratzboden wird dann entsprechend des Bedarfs die Silage auf ein Förderband gekratzt und gelangt auf diese Weise in die Vorlagebehälter. Hierbei wird die Masse registriert, gespeichert und anschließend in Intervallen über Quer-, Hoch- und Stopfschnecken in die Fermenter gepresst. Die liegenden Fermenter haben jeweils ein

effektives Volumen von 2150m³. Die Temperatur in den Fermentern beträgt durchschnittlich 51 °C. Sie werden von der Abwärme der Verstromung (BHKW) beheizt.

Die Durchmischung gewährleistet horizontal (in Fließrichtung) laufende Paddelrührwerke.

Nachdem das Gärsubstrat den Fermenter durchlaufen hat werden die Gärreste in die Gärproduktlager abgeführt.

Aus den Gärproduktlagern werden die Gärreste dem Separator zugeführt, der die festen und flüssigen Bestandteile voneinander trennt. Die feste Komponente wird aus dem geschlossenen System ausgeschleust und später als Dünger an die Landwirte abgetreten. Die flüssige Komponente wird in die Gärproduktlager zurück gepumpt und ebenfalls später als Flüssigdünger an die Landwirte abgetreten.

Das produzierte Biogas wird getrocknet, entschwefelt und anschließend der Verstromung (BHKW) zugeführt. Anlage Malchin verfügt über 4 BHKW; je zwei mit einer Leistung von 1 MW_{el} und je zwei mit 1,4 MW_{el}.

Die beiden Gärproduktlager sind im Kopfraum mit Gasspeicherfolien ausgestattet, welche die Speicherung von ca. 600 m³ Biogas zulassen.

6.3 Mess – und Kontrollsysteme in Malchin

6.3.1 Allgemein

Die Biogasanlage Malchin ist mit einer Schaltwarte ausgerüstet in der die Informationen eines umfangreichen Messsystemes automatisch zusammen laufen, registriert, dargestellt und gespeichert werden. Dies erlaubt den Anlagenführern einen guten Überblick über den Gesamtzustand des Prozesses sowie einzelner Abschnitte. Außerdem erleichtert bzw. ermöglicht dieses System sich anbahnende Prozessstörungen zu erkennen sowie das prophylaktische Einleiten entsprechender Gegenmaßnahmen. Die Ursachenforschung sowie das Entwickeln eines Maßnahmenkataloges für wiederkehrende Störfaktoren (Schwankungen der Temperatur, unregelmäßige Substratzufuhr, mangelnde Silagequalität) werden dadurch ebenfalls erleichtert und beschleunigt.

6.3.2 Maßnahmen zur Prozesskontrolle in der Biogasanlage Malchin

6.3.2.1 Fermenterkontrolle

In den Fermentern wird die Temperatur jeweils an fünf Stellen und zusätzlich an der Stelle der Probenahme kontinuierlich gemessen. Die Temperatur wird automatisch beim Erreichen einprogrammierter Grenzwerte nachreguliert. Ebenfalls kontinuierlich wird die Vorlauf – und die Rücklaufemperatur der Fermenterkühlung gemessen.

Die Füllstände der Fermenter werden an je zwei Stellen überwacht.

Auch die Rührwerke der Fermenter werden durchgehend kontrolliert. Es wird der Leistungsbedarf, der Stromverbrauch und die Umdrehungszahl registriert und gespeichert. Das ermöglicht, bei einer Störung der Rührtechnik das Ermitteln des Zeitpunktes und in Verbindung mit weiteren Messwerten auch der Ursache der Unregelmäßigkeit.

Laufzeit, Stromverbrauch, und Leistungsbedarf der Pumpen, die für den Transport der Silage bzw. der Gärprodukte erforderlich sind, werden ebenfalls kontinuierlich überwacht und aufgezeichnet.

In dem Kopfraum der Fermenter wird zusätzlich der Gasdruck gemessen. Die Messung des Gasdruckes gibt Aufschluss über die Veränderungen der Gasleistung (rückgängig, gleichbleibend oder ansteigend).

Bei allen Kontrollen wird das Über – und Unterschreiten von Grenzwerten automatisch registriert, protokolliert sowie ein Anlagenführer benachrichtigt.

Zusätzlich werden die Störmeldungen und die eingeleiteten Maßnahmen in einem Tagesprotokoll eingetragen, damit auch bei langwierigen Korrekturmaßnahmen, der Verlauf über mehrere Tage und Wochen weiter vom Anlagenpersonal beobachtet wird.

6.3.2.2 Gaskontrolle

Zuerst wird die gesamte produzierte Biogasmenge gemessen und registriert. Durch die nachfolgende kontinuierliche Ermittlung der Zusammensetzung des Biogases kann die Menge an produziertem Methan ermittelt werden. Der Anteil der einzelnen Komponenten (CH_4 , CO_2 , H_2S , O_2 , NH_3 , N_2 , H_2), sowie deren Veränderungen, lassen ebenfalls Rückschlüsse auf den Zustand der im Fermenter befindlichen Mikroorganismen zu (siehe Punkt 5.2.3). Die Gaskontrolle vor und nach der Gasaufbereitung gibt Aufschluss über die Verbrennungseigenschaften des Methangases und den Zustand der Aufbereitungsanlagen (z.B. Entschwefelungs – und Trocknungsanlagen).

6.3.2.3 Kontrolle und Regelung der Prozessbiologie

Die Überwachung der biologischen Vorgänge im Fermenter ist nach aktueller Literatur für einen effektiven und stabilen Betrieb von größter Bedeutung. Auch in der Biogasanlage Malchin wird der Kontrolle des biologischen Zustandes größte Aufmerksamkeit gewidmet.

In diesem Sinne wird täglich dem Fermenter eine Probe entnommen, der pH – Wert ermittelt und einer FOS/TAC-Bestimmung unterzogen. Ergänzend wird wöchentlich eine Fermenterprobe an ein selbständiges Prüflabor übergeben, das weitergehende Untersuchungen (u.a. Fettsäuremusterbestimmung) durchführt.

6.3.2.3.1 Fütterung und Substratkontrolle

Die Fütterung wird unter anderem entsprechend der Untersuchungsergebnisse der Fermenterproben reguliert. Für eine genaue Substratdosierung reicht es nicht aus, allein die Masse des zuzuführenden Substrats zu steuern. Es ist die Kenntnis der Trockensubstanz sowie der organischen Trockensubstanzgehalte erforderlich. Um entsprechend der temporären Bedürfnisse der Mikroorganismen, eine möglichst gleichbleibende Menge mit weitgehend konstanter Zusammensetzung füttern zu können, wird von jeder Anlieferung (Mais, Roggen, Grass) eine Probe entnommen und eine Trockensubstanzbestimmung durchgeführt. Die aktuellen Trockensubstanzgehalte der einzelnen Silagearten werden dann bei der Substratzusammenstellung und bei der zu fütternden Menge berücksichtigt.

6.3.2.3.2 Zusätze

Auf Basis der Ergebnisse regelmäßig untersuchter Fermenterproben wird eine, speziell auf die Bedürfnisse der Mikroorganismen-Population abgestimmte Zusatzmischung zusammengestellt. Diese sorgt für den Ausgleich mangelnder Nährstoffe und dadurch für einen stabilen Anlagenbetrieb.

7 Auswertung / Parameterfixierung

Die Literaturrecherche erbrachte Erkenntnisse darüber, wie eine Biogasanlage zu führen ist, damit ein stabiler Prozess mit einer hohen Gasausbeute auf Dauer realisiert werden kann.

Es wurde der Begriff der Silagequalität zur Biogasproduktion diskutiert sowie typische Qualitätsschwankungen und deren Einfluss auf die Gasausbeute dargestellt.

Außerdem wurden Parameter benannt, die zur Überwachung, Bewertung und Regulierung der Prozessbiologie notwendig sind.

Es stellt sich heraus, dass es nicht ausreicht, nur über den Prozess der Biogasbildung genaue Kenntnis zu haben. Die Kontroll- und Regulationsaufgaben fangen bereits vor der Ernte der Frischmasse an. Es muss dem Anlagenbetreiber möglich sein, auf alle Stationen (Ernte, Silierung, Lagerung, Entnahme aus den Silos, Fütterung und Prozessbedingungen der Biogasanlage) regulatorisch einzuwirken, um eine hohe Gasausbeute zu erzielen. Unter Berücksichtigung, dass ca. 70 % des Gasertrages auf die Silagequalität zurückzuführen ist (agratec), kommt der Kontrolle und Einflussnahme auf die Substratbereitstellung besondere Bedeutung zu. Die Silagequalität kann und muss durch die Sortenwahl, den Erntezeitpunkt, die Siliertechnik, den Einsatz von Siliermitteln und die Substratzusammenstellung (Substratmix) auf die anlagenspezifischen Bedürfnisse eingestellt werden

Häufig auftretende Störquellen, ihre Ursachen, Möglichkeiten zu ihrer frühzeitigen Erkennung sowie geeignete Gegenmaßnahmen wurden herausgestellt.

Im Vergleich der recherchierten Informationen und der aktuellen Situation der agratec Biogasanlage am Standort Malchin schneidet diese sehr gut ab. Die Anlage ist mit der Messtechnik ausgestattet, die nach dem Wissensstand für eine stabile und effektive Prozessführung mit hoher Gasleistung und Gasausbeuten notwendig ist. Mit hoher Frequenz werden auch die Parameter (z.B. FOS/TAC) überwacht, die mangels aktuell verfügbarer Messtechnik, noch mit viel Aufwand im Labor bestimmt werden müssen. Hinsichtlich der technischen Ausrüstung mit Mess- und Regeltechnik werden in der Biogasanlage Malchin weitgehend alle technischen Möglichkeiten genutzt, so dass gegenwärtig nur wenig Optimierungspotential gesehen wird.

Zur Sicherstellung und Überprüfung der Silagequalität verfügt die agratec Biogasanlage über ein umfangreiches Qualitätsmanagement. Es werden u. a. die maximale Gasausbeute, der Trockensubstanzgehalt und das Gär säuremuster bestimmt. So ist es den Anlagenführern möglich den Siliererfolg zu bewerten und den weiteren Verlauf der Lagerung als auch den zu erwartenden Gasertrag einzuschätzen.

Allerdings wird die Anlage mit einer hohen Raumbelastung (bis zu 16 kg oTS / m³*d) und sehr kurzen Verweilzeiten (20 d) gefahren. Die gängige Literatur rät eine Verweilzeit von 20 Tagen nicht zu unterschreiten, da sonst die Gasausbeute zurück geht und zu viel Substrat unverbraucht den Fermenter verlässt. Unter diesen der Gasausbeute abträglichen Umständen ist es umso bemerkenswerter, dass die Anlagenführer noch Spitzengasausbeuten von 730 Nm³ / t oTS verzeichnen können. Die Raumbelastung lässt im Falle der agratec Biogasanlage keinen großen Spielraum zu, da diese zwingend für die Gasleistung und damit für die Auslastung der BHKW notwendig ist. Allerdings besteht bei der Verweilzeit eine Optimierungsoption. Die Anlage Malchin ist nicht mit einem Nachgärer ausgestattet sondern nur mit zwei Gärproduktlagern.

Daraus ergeben sich die Möglichkeiten in einen neuen zwischengeschalteten Nachgärer zu investieren oder das aktuelle Gärproduktlager zu einem Nachgärer umzurüsten und ein neues Gärproduktlager zu bauen. Ein Nachgärer würde dadurch die aktuelle theoretische Verweilzeit deutlich erhöhen und die Gasausbeute somit steigern. In einer Masterarbeit könnte die weitere Verbesserung der Gasausbeute durch Versuche mit Zahlen belegt und auf Basis dieser Ergebnisse betriebswirtschaftliche Betrachtungen dieser Investitionsoptionen vorgenommen werden.

8 Literaturverzeichnis

Banemann D., Engler N., Fritz T., Mathies E., Nelles M., Universität Rostock Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät Institut für Umweltingenieurwesen (Hrsg.): 1. Rostocker Bioenergieforum: Bioenergieland Mecklenburg-Vorpommern: Praxisorientierte Bestimmung der Gasbildungspotenziale als Basis für den wirtschaftlichen Betrieb von Biogasanlagen, Band 5, Rostock: Universität Rostock, 2007 ISBN 978-3-86009-013-8

Döhler H., Eckel H., Fröba N., Grebe S., Hartmann S., Häußermann U., Klages S., Sauer N., Nakazi S., Niebaum A., Roth U., Wirth B., Wulf S., KTBL – Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (Hrsg.): Faustzahlen Biogas. 2. Auflage. Darmstadt: KTBL, 2009 ISBN 978-3-941583-28-3

Eder B., Schulz H.: Biogas Praxis: Grundlagen, Planung, Anlagenbau, Beispiele. 2. Auflage. Staufen bei Freiburg: Ökobuch Verlag, 2001 ISBN 3-922964-59-1

Eder B., Schulz H. (†): Biogas-Praxis: Grundlagen, Planung, Anlagenbau, Beispiele, Wirtschaftlichkeit. 4. Auflage. Staufen bei Freiburg: Ökobuch Verlag, 2007 ISBN-3936896-13-5

Gers-Grapperhaus C., Hoffstede U., Maciejczyk M., Mitterleitner H., Oechsner H., Reinhold G., Schüsseler P., Weiland P., Welsch W., KTBL – Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.(Hrsg.): Schwachstellen an Biogasanlagen verstehen und vermeiden. 2. Auflage. Heft 84. Darmstadt: KTBL, 2009 ISBN 978-3-941583-28-3

Gorisch U., Helm M.: Biogasanlagen: Planung, Errichtung und Betrieb von landwirtschaftlichen und industriellen Biogasanlagen. 2. Auflage. Stuttgart: Eugen Ulmen KG, 2007 ISBN-978-3-8001-5573-6

Gruber W. (Text), AID – Infodienst Verbraucherschutz, Ernährung, Landwirtschaft e.V. (Hrsg.): Biogasanlagen in der Landwirtschaft. 2. Auflage. Bonn: AID, 2002 ISBN3-8308-0373-7

Gruber W. (Text), AID - Infodienst Verbraucherschutz, Ernährung, Landwirtschaft e.V. (Hrsg.): Biogasanlagen in der Landwirtschaft. 4. Auflage. Bonn: aid, 2007 ISBN978-3-8308-0682-0

Hecht M.: Die Bedeutung des Carbonat-Puffersystems für die Stabilität des Gärprozesses landwirtschaftlicher Biogasanlagen. Bonn: 2008

Hertwig F., Honig H., Steinhöfel O., Bundesarbeitskreis Futterkonservierung (Hrsg.): Praxishandbuch Futterkonservierung: Silagebereitung, Siliermittel, Dosiergeräte, Silofolien. 7. Auflage. Frankfurt am Main: DLG-Verlag, 2006

Hirtz F., AGRAVIS Raiffeisen AG – Unternehmenskommunikation(Hrsg.): Erzeugung, Lagerung und Verwertung von Energiepflanzen für Biogasanlagen http://www.biogasanlagen-fuettern.de/biogasanlagen_fuettern/natur_hintergrund/phasen.php 24.02.2010; 25.02.2010

Kaltschmitt M., Hartmann H., Hofbauer H. (Hrsg.): Energie aus Biomasse: Grundlagen, Technik und Verfahren. 2. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2009 ISBN-978-3-540-85094-6

Kompost-Mohr (Hrsg.): Biogas 03.11.2009. <http://www.kompost-mohr.de/biogas.htm>. 03.11.2009; 17.12.2009

Meiners B., AgroEnergien(Hrsg.): Gras und Stroh Aufbereitung (GuS-Aufbereitung) 12.05.2009
<http://www.agroenergien.de/index.php/gus-aufbereitung> 2010; 20.01.2010

Müller J., Pahlow G., Hoffmann H., Wichardt W., Seale D.R., Fübbecker A., Chr Hansen A/S (Hrsg.): Bemerkungen über das Silieren. 1. Auflage. Horsholm: Behrens Scheeßel GmbH, 2003

Schlegel M., Ludley H., Kanswohl N., Orth M., Schmidt K., Universität Rostock Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät Institut für Umweltingenieurwesen (Hrsg.): 1. Rostocker Bioenergieforum: Bioenergieland Mecklenburg-Vorpommern: Optimierungspotentiale bei der Biogaserzeugung und -verwertung in Mecklenburg-Vorpommern. Band 5, Rostock: Universität Rostock, 2007 ISBN 978-3-86009-013-8

Schumann W., Gurgel A., Universität Rostock Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät Institut für Umweltingenieurwesen (Hrsg.): 1. Rostocker Bioenergieforum: Bioenergieland Mecklenburg-Vorpommern: Schwachstellenanalyse an ausgewählten Biogasanlagen in Mecklenburg-Vorpommern, Band 5, Rostock: Universität Rostock, 2007 ISBN 978-3-86009-013-8

Schwab M.(Redaktion), KTBL – Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (Hrsg.): Gasausbeute in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. 1. Auflage. Darmstadt: KTBL-Schriften-Vertrieb im Landwirtschaftsverlag GmbH, 2005

Weiland P., Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL)Institut für Technologie und Biosystemtechnik(Hrsg.): Anforderungen an Pflanzen seitens des Biogasanlagenbetreibers 02.11.2006
<http://www.tll.de/ainfo/pdf/biotag/bt061106.pdf>. 18.01.20010;

Weiland P., Engler N., Sprenger B., Matzmohr R., Kraft E., Haupt T., Tscherpel B., FNR – Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hrsg.): Trockenfermentation-Stand der Entwicklung und weiterer F+E-Bedarf. Band 24. Gülzow: FNR e.V., 2006

Zellmann H., Friedmann H., Agraferm technologies(Hrsg.): Optimierung des Fermentationsprozesses bei der Vergärung nachwachsender Rohstoffe 08.03.2006
<http://www.fnr-server.de/cms35/fileadmin/allgemein/pdf/veranstaltungen/dechema2006/Praesentationen/Friedmann.pdf>. 08.03.2006

9 Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Kenngrößen der Vergärbarkeit	10
Tab. 2: Merkmale zur Beurteilung der Gäreignung verschiedener Substrate	15
Tab. 3: Mittelwerte für Biogas- und Methanerträge aus Laborversuchen mit Ausgewählten Substraten (Auszug)	28
Tab. 4: Messgrößen zur Prozessbewertung von Biogasanlagen	35

10 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Einfluss der Häcksellänge auf das Abbauverhalten im Fermenter	12
Abb. 2: Gärungsverlauf einer stabilen Silage	17
Abb. 3: Gärungsverlauf einer labilen Silage	18
Abb. 4: Gärsäuremuster behandelter und unbehandelter Maissilage	19
Abb. 5: Umwandlung von Gärsubstrat in Biogas	20

Erklärung über die selbständige Anfertigung der Arbeit

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig angefertigt und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Ort, Datum

Unterschrift