



Hochschule Neubrandenburg  
University of Applied Sciences

**Hochschule Neubrandenburg**  
**Fachbereich Agrarwirtschaft und Lebensmittelwissenschaften**  
Studiengang Bioprodukttechnologie

# **Vergleich bekannter Methoden für den Aufschluss von Stroh zum Einsatz in Biogasanlagen**

Bachelorarbeit

Verfasser: Andrea Reuters

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. H. Schöne  
Dipl. Ing. A. Speetzen

urn:nbn:de:gbv:519-thesis-2012-0103-4

Prillwitz, 11.03.2013

**abstract:**

In Germany wheat straw is a joint product in many agricultural holdings. It is rarely used effectively. The use as a substrate in biogas plants is difficult because of mechanical problems with the long stalks and the opinion that straw is only a useless waste.

There are many researches to improve the use of straw, especially in biogasplants.

One method is the pretreatment of straw with sodiumhydroxide which proved to be to expensiv and to pollutive.

Other treatments as the extrusion and hydrothermal methods seem to be promising.

The most resonable pretreatment seems to be the ensiling of straw and the use as co-substrate for slurry.

## Inhaltsverzeichnis

1.....	Einleitung.....	7
2.....	Aufgabenstellung.....	8
3.....	Grundlagen.....	8
3.1.....	Entstehung von Biogas.....	8
3.2.....	Stroh.....	10
3.2.1.....	Aufbau von Cellulose.....	10
3.2.2.....	Aufbau von Hemicellulose.....	11
3.2.3.....	Aufbau von Lignin.....	11
3.2.4.....	Lignocellulose/ Zellwände.....	12
3.2.5.....	Verfügbarkeit von Stroh.....	12
4.....	Literatur zu Aufschluss von Stroh mit Natronlauge.....	13
4.1.....	Patent für Futtermittel aus Stroh, Dr. Franz Lehmann 1902.....	14
4.1.1.....	Inhalt des Patentes.....	14
4.1.2.....	Bewertung.....	14
4.2.....	Patent von Dr. Ernst Beckmann, 1917.....	15
4.2.1.....	Inhalt des Patentes.....	15
4.2.2.....	Bewertung.....	16
4.3.....	Weiterführung des Patentes von E. Beckmann (1917) von 1918.....	16
4.3.1.....	Inhalt des Patentes.....	16
4.3.2.....	Bewertung.....	17
4.4.....	Weiterführung des Patentes von E. Beckmann (1917) von 1918.....	17
4.4.1.....	Inhalt des Patentes.....	17
4.4.2.....	Bewertung.....	17
4.5.....	Weiterführung des Patentes von E. Beckmann (1917) von 1918.....	17
4.5.1.....	Inhalt des Patentes.....	17
4.5.2.....	Bewertung.....	17
4.6.....	Weiterführung des Patentes von E. Beckmann (1917) aus dem Jahr 1918.....	18
4.6.1.....	Inhalt des Patentes.....	18
4.6.2.....	Bewertung.....	18
4.7.....	Piatkowski, Archiv für Tierernährung 1977.....	18
4.7.1.....	Inhalt der Veröffentlichung.....	18
4.7.2.....	Bewertung.....	19
4.8.....	Arbeiten von Gerhard Flachowsky, 1987.....	19
4.8.1.....	Bericht über den Aufschluss von Stroh.....	19
4.8.2.....	Bewertung.....	20
4.9.....	Untersuchungen über mit NaOH behandeltes Reisstroh, He, Pang 2008 Universität Peking.....	20
4.9.1.....	Inhalt des Artikels.....	20
4.9.2.....	Bewertung.....	21
4.10.....	Arbeit von Chandra et al an der Central Agricultural University Gangtok in Indien 2012.....	21
4.10.1.....	Inhalt der Arbeit.....	21
4.10.2.....	Diskussion der Ergebnisse.....	22
5.....	Bewertung der Ergebnisse.....	23
5.1.....	Monetäre Berechnung.....	24
5.1.1.....	Mehrertrag durch die Behandlung von Stroh mit Natriumhydroxid.....	24

5.1.2	..... Energetische Betrachtung.....	26
5.2	..... Energetische Berechnung.....	27
5.3	..... Abschließende Beurteilung der Methode des Aufschlusses mit NaOH.....	28
6	..... Weitere Methoden zum Aufschluss von Stroh .....	29
6.1	..... Forschungen von op dem Camp et al .....	29
6.1.1	..... Forschungsergebnisse Störung von Lignin bei der Gärung.....	29
6.1.2	..... Bewertung.....	29
6.2	..... Patent von Dr. J. Paechtner (1918) Verfahren des Aufschlusses von Stroh mittels ..... Elektrolyse und Kochsalz.....	30
6.2.1	..... Patent zur Elektrolyse von Stroh, J.Pächtner, 1918.....	30
6.2.2	..... Bewertung.....	30
6.3	..... Aufschluss mit Säure.....	30
6.3.1	..... Patent von H. Bergner 1976 .....	31
6.3.1.1	..... Patent zum Aufschluss von Stroh mit Salzsäure.....	31
6.3.2	..... Bewertung.....	31
6.3.3	..... Patent von H. Bergner 1985.....	31
6.3.3.1	..... Patent zum Aufschluss von Stroh mit Salzsäure.....	31
6.3.3.2	..... Bewertung.....	31
6.4	..... Aufschluss mit Wasserstoffperoxid.....	32
6.4.1	..... Arbeit von Flachowsky und Sundstol 1988.....	32
6.4.2	..... Beurteilung.....	32
6.5	..... Aufschluss mit Temperatur und Druck.....	33
6.5.1	..... Dampfexpansion Dissertation von B.Schumacher 2008.....	33
6.5.1.1	..... Inhalt .....	33
6.5.1.2	..... Bewertung.....	33
6.5.2	..... Patent Behandlung mit Sattdampf Feldmann 2008.....	33
6.5.2.1	..... Inhalt des Patentes .....	33
6.5.2.2	..... Bewertung .....	34
6.5.3	..... Forschungsprojekt Stoffliche und energetische Nutzung 2009 am Prüf- und ..... Forschungsinstitut Pirmasens, Abschlussbericht.....	34
6.5.3.1	..... Inhalt des Forschungsprojektes.....	35
6.5.3.2	..... Bewertung.....	36
6.5.4	..... Versuche zur Vergärbarkeit von Weizenstroh, Chandra et al 2012.....	36
6.5.4.1	..... Inhalt des Artikels.....	36
6.5.4.2	..... Bewertung.....	37
6.5.5	..... Masterarbeit von Ilva Borgström.....	37
6.5.5.1	..... Beschreibung der Versuche .....	37
6.5.5.2	..... Bewertung.....	37
6.5.5.3	..... Fazit Dampfaufschluss und Hydrothermaler Aufschluss .....	38
6.6	..... Mechanischer Aufschluss .....	38
6.6.1	..... Technischer Aufschluss von Substraten, Fachhochschule Münster, Marius Kerkering..	38
6.6.1.1	..... Beschreibung der Versuche.....	38
6.6.1.2	..... Beurteilung.....	38
6.6.2	..... Masterarbeit von Ilva Borgström 2011 Lingköping/ Schweden.....	39
6.6.2.1	..... Beschreibung der Versuche.....	39
6.6.2.2	..... Bewertung.....	39
6.6.3	..... Vortrag Vergärung von Stroh: Stand und Perspektive 2012.....	39
6.6.3.1	..... Vortrag: Vergärung von Stroh: Stand und Perspektiven Dr. Gerhard Reinhold, Dr.Ing. ..... Eberhard Friedrich, Fraunhofer Institut;.....	39
6.6.3.2	..... Bewertung.....	40

6.6.4	Veröffentlichung von Baltic Compass.....	40
6.6.4.1	Projekt / Veröffentlichung von Baltic Compass.....	40
6.6.4.2	Bewertung.....	40
6.7	System der Firma Snowleopard .....	41
6.7.1	Beschreibung des Projektes.....	41
6.7.2	Bewertung.....	41
6.8	System der Firma Maxbiogas.....	41
6.8.1	Beschreibung der Anlage.....	41
6.8.2	Bewertung.....	42
6.9	Aufschluss mit Harnstoff und Ammoniak.....	42
6.9.1	Patent von L. Marienburg von 1985 .....	42
6.9.2	Inhalt des Patentes.....	42
6.9.3	Bewertung.....	42
6.9.4	Schlussfolgerungen.....	43
6.10	Aufschluss durch Silieren.....	44
6.11	Aufschluss mit Pilzen.....	45
6.12	Geeignete Bakterienstämme .....	45
6.13	Schwefelgehalt im Fermenter .....	45
7	Vergleich der Ergebnisse von Chandra mit anderen Aufschlussmethoden.....	46
8	Vergleich von Biogaserzeugung und thermischer Verwertung.....	47
9	Schlussfolgerung .....	48
10	Literaturverzeichnis.....	49
10.1	Bücher, Broschüren, Arbeiten.....	49
10.2	Internet.....	51
11	Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen.....	52
11.1	Abbildungen.....	52
11.2	Tabellen .....	52
	Erklärung über die selbstständige Anfertigung der Arbeit.....	53

## Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen

°C	Grad Celsius
g	Gramm
kg	Kilogramm
h	Stunde
bzw	beziehungsweise
L	Liter
oTS	organische Trockensubstanz
pH	Lat.: <i>pondus hydrogenii</i> , Maß für die saure oder alkalische Reaktion einer wässrigen Lösung
nm	Nanometer
DDR	Deutsche Demokratische Republik
ml	Milliliter
Atm	physikalische Atmosphäre, Druckeinheit, entspricht 101.325 Pascal
NaOH	Natriumhydroxid
d.h.	das heißt
T m <sup>3</sup>	Tausend Kubikmeter
C	Kohlenstoff
N	Stickstoff
z.B.	zum Beispiel
z. T.	zum Teil
BHKW	Blockheizkraftwerk
TS	Trockensubstanz

# 1 Einleitung

Der weltweite Kohlendioxidausstoß ist die Triebfeder für die derzeitigen Klimaveränderungen. Notwendig ist eine nachhaltige Energiewirtschaft. Ein wichtiger Beitrag hierzu sind in Deutschland die Biogasanlagen.

Durch das Vergären von organischen Stoffen wird Biogas erzeugt, das einen Methangehalt von 50 bis 75% (theoretisch) besitzt. Durch den massiven Einsatz von Maissilage sind die Biogasanlagen in Verruf geraten. Es wird von der Maiswüste in Deutschland gesprochen. Die Vorwürfe, dass die Energieproduktion in Konkurrenz zur Nahrungsmittelherstellung steht ist ebenfalls nicht von der Hand zu weisen.

Energetisch und ethisch sinnvoller ist die Verwendung von Substraten, die als Abfallstoffe anfallen.

Ein Abfallprodukt der Nahrungs- und Futtermittelherstellung ist Weizenstroh. In Biogasanlagen findet es kaum Anwendung, da es eine Reihe verfahrenstechnischer Probleme gibt und die Vergärung nur unzureichend abläuft.

Für die Beschickung der Anlagen achten die Landwirte darauf, dass Einstreu nur von Bereichen mit hoher mechanischer Belastung genommen wird und die intakten Halme auf dem Acker ausgebracht werden. Eine bessere Nutzung von Stroh ist erstrebenswert.

Diese Arbeit ist eine Literaturrecherche zu Aufschlussmethoden von Stroh zur Nutzung in Biogasanlagen. Es wurden in den vergangenen 100 Jahren verschiedene Methoden entwickelt, um die Verwertbarkeit von Stroh zu erhöhen. Zuerst erfolgten die Versuche für die Erhöhung des Futterwertes von Stroh. Die neueren Untersuchungen befassen sich mit der Steigerung der Biogasausbeute.

## **2 Aufgabenstellung**

Ziel der Arbeit ist es, durch eine Literaturrecherche zu ermitteln, ob es sich bei der Vorbehandlung von Stroh mit Natronlauge um ein zukunftssträchtiges Verfahren handelt, zu dem weitere Versuche durchgeführt werden sollten. Weiterhin wird untersucht, welche Vorbehandlungsmethode von Stroh gute Aussichten auf einen energetisch effizienten Einsatz in der Biogasanlage bietet. Die Betrachtungen erfolgen in Hinblick auf die Nutzung in bereits bestehenden, durchschnittlichen landwirtschaftlichen Biogasanlagen.

## **3 Grundlagen**

### **3.1 Entstehung von Biogas**

Biogas, das aus einem Gemisch von Methan und Kohlendioxid besteht, wird in einem anaeroben Prozess aus organischen Stoffen erzeugt. Die Bakterien wandelt in einem vierstufigen Prozess Kohlenhydrate, Fett und Proteine in sauerstoffreicher Umgebung in Methan und Kohlendioxid um.

Diese methanbildenden Bakterien führen die Gärungs- und Fäulnisprozesse durch, die in Mooren, am Grund von Seen oder Güllegruben zur Gasbildung führen.

Die Fermentation in den Biogasanlagen erfolgt kontrolliert und wird gezielt gesteuert (Kaltschmitt, 2001).

Biogas wird zu den Erneuerbaren Energien gezählt, die staatlich gefördert werden.

Der Prozess wird in Teilprozesse gegliedert, die Hydrolyse, die Acidogenese, die Acetogenese und die Methanogenese, die jeweils von spezialisierten Bakterien durchgeführt werden.



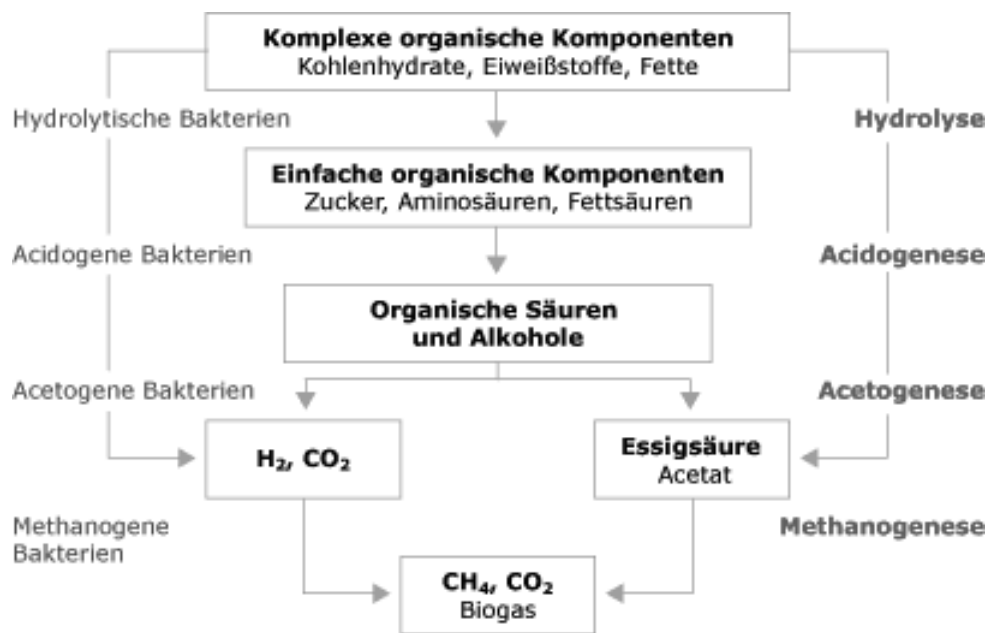


Abb.1 Entstehung von Biogas

Der Abbau von organischer Masse zu Biogas erfolgt durch Bakterien. Dieser anaerobe Abbau wird von verschiedenen Bakteriengruppen durchgeführt. Die einzelnen Teilschritte werden in Serie und in Symbiose vollzogen. Da die einzelnen Bakteriengruppen unterschiedliche Wachstumsgeschwindigkeiten haben, wird die Methanbildung durch die am langsamsten wachsende Gruppe limitiert.

Der erste Schritt des Abbaus organischen Materials ist die Hydrolyse. Die polymeren organischen Verbindungen, wie Kohlenhydrate, Fett und Proteine werden durch hydrolytische und fermentative Bakterien in niedermolekulare Verbindungen umgewandelt. Dabei entstehen zunächst Monomere, wie Aminosäuren, Zucker, dann niedere Fettsäuren, Milchsäure, Alkohole und weitere Stoffe. Ein wichtiger Einflussfaktor auf die Zusammensetzung der gebildeten Zwischenprodukte ist der Wasserstoffpartialdruck.

Im zweiten Schritt, der Acidogenese, werden die Zwischenprodukte zu den Ausgangsstoffen der Methanbildung umgewandelt. Es entsteht Essigsäure, Kohlendioxid und Wasserstoff. Nur bei geringem Wasserstoffpartialdruck können die Zwischenprodukte wie Propion- oder Buttersäure in Essigsäure umgesetzt werden.

In der dritten Stufe wird von den methanbildenden Bakterien zum einen aus der Essigsäure und zum anderen aus Kohlendioxid und Wasserstoff Methan erzeugt.

Der geschwindigkeitsbestimmende Schritt ist dabei meist die Hydrolyse. Besonders Cellulose und Hemicellulose werden von den Bakterien nur langsam hydrolysiert. Nur bei

der Zugabe von schnell hydrolysierbaren Substanzen kann hier eine erfolgreiche Vergärung erfolgen.

Fermenter für die Biogassynthese werden als einphasiges oder als zweiphasiges System gebaut. Bei dem zweiphasigen System erfolgt die Hydrolyse in einem separaten Behälter.

## **3.2 Stroh**

Als Stroh werden die ausgedroschenen und getrocknete Halme von Getreide, Ölpflanzen, Faserpflanzen oder Hülsenfrüchten bezeichnet.

In dieser Arbeit wird nur das Weizenstroh betrachtet.

Weizenstroh besteht nach der Tabelle "Gehaltswerte für Futtermittel" (LFL-Bayern 2012) zu 86% Trockensubstanz, 42,7% Rohfaser, 3,7% Rohprotein, 0,8% Stärke und Zucker, 14% Rohfett und etwa 5,7% Asche.

Das Stroh besteht zu etwa 35% aus Cellulose, 25% aus Hemicellulose und zu ca. 18% aus Lignin (Pacan, 2009).

### **3.2.1 Aufbau von Cellulose**

Cellulose ist aus beta 1,4 -glycosidisch gebundenen Glucosemolekülen aufgebaut. Die beta-glycosidische Bindung ist von Bakterien schwerer anzugreifen. Das Hauptproblem für die Bakterien ist die räumliche Struktur der Cellulose.

Cellulose ist das wichtigste Strukturelement der Zellwand. Etwa 100 Molekülketten lagern sich parallel zusammen und werden zu einem Micellarstrang. Die Moleküle sind dabei durch Wasserstoffbrücken miteinander verbunden. Dadurch entsteht ein gleichmäßiger Abstand zwischen den Molekülketten und die Struktur wird stabilisiert. Dieser geordnete Zustand wechselt sich mit weniger geordneten Strukturen ab. Etwa 20 Micellarstränge bilden eine Mikrofibrille. Diese Mikrofibrillen können sich zu Makrofibrillen zusammenlagern, die einen Durchmesser von etwa 400nm haben. Zwischen den Makrofibrillen entstehen Zwischenräume (etwa 10nm groß), in denen Lignin, Hemicellulosen und Wasser eingelagert wird (Lüttge, 2012).

### 3.2.2 Aufbau von Hemicellulose

Hemicellulosen sind ein weiterer wichtiger Bestandteil der Zellwände. Laut Definition handelt es sich um eine Gruppe Polysaccharide, die sich durch Alkalilaugen extrahieren lassen. Die Hemicellulosen bestehen aus verschiedenen verzweigten Polysacchariden. Sie enthalten die Hexosen D-Glucose, D-Fructose, D-Galactose und andere. Weiterhin enthalten sie u.a. die Pentosen D-Xylose und L-Arabinose. Als Grundgerüst wird eine  $\beta$ -1,4-Glucankette gebildet, an der in  $\alpha$ -1,6-Verknüpfung Xylosereste glycosidisch gebunden sind, die zum Teil mit D-Galactose und D-Fructose verknüpft sind. Weiterhin sind jeweils zwei L-Arabinosereste an zwei OH-Gruppen der Glucose gebunden (Lüttge, 2003).

### 3.2.3 Aufbau von Lignin

Lignin ist nach Cellulose die zweithäufigste Substanz in der Natur (Jahresproduktion Lignin  $2 \cdot 10^{10}$ t; Cellulose  $2 \cdot 10^{11}$ t).

Es gibt drei verschiedene Formen von Lignin, bei Nadelhölzern, Laubhölzern und bei Monokotyledonen (Einkeimblättrigen), zu denen die Gräser zählen.

Lignin ist ein Polymer, das eine statistische Zusammensetzung aufweist und das in alle Richtungen gleich widerstandsfähig ist.

Die Monomere sind Phenylpropane (Zimtalkohole). Im Lignin der Monokotylen sind Coniferyl- und Sinapylalkohol in etwa gleicher Menge und eine größere Menge an Cumarylalkohol enthalten.

Die Verknüpfung entsteht durch radikalische Reaktionen. Die Radikalbildung erfolgt durch Zellwandperoxidasen und benötigt  $H_2O_2$  als Cosubstrat. Das Polymerisat enthält die einzelnen Bausteine in unterschiedlichen Bindungen. Es entsteht ein dreidimensionales Netz. Die an den Phenylpropanresten vorhandenen Carboxylgruppen bilden mit den Polysacchariden der Zellwände Esterbindungen. Dadurch ist das Lignin fest mit der Cellulose bzw. Hemicellulose verbunden.

Lignin ist wasserabweisend und löslich in Laugen und in Säuren.

Es bildet eine Barriere für den Abbau von Cellulose durch Bakterien.

### **3.2.4 Lignocellulose/ Zellwände**

Cellulose, Hemicellulose und Lignin bilden zusammen eine feste Struktur, die Lignocellulose genannt wird. Sie entsteht durch Lignifizierung der Zellwand und besitzt die Stützfunktion in den Pflanzen

Die Lignifizierung der Zelle lässt sich in drei Phasen unterteilen.

Zuerst erfolgt die Einlagerung von Lignin in die Zellecken und in die Mittellamelle. Es schließt sich die Verholzung der Sekundärwand an. Die Hauptlignifizierung erfolgt nach der Ausbildung der Cellulosemikrofibrillen. Die Ligninzusammensetzung in den drei Zonen unterscheidet sich (Strasburger, 2002).

Die verholzten Wände bestehen zu 2/3 aus Cellulose und Hemicellulose (überwiegend Xylan) und zu 1/3 aus Lignin.

Der Anteil an Lignocellulose in Stroh ist nicht aus bekannten Daten entnehmbar. Die Angaben für Lignin schwanken für Stroh von 8 bis 15%. Der Anteil an Lignin in Lignocellulose beträgt für Bäume zwischen 18 und 41%. Angaben für Stroh wurden nicht gefunden. Unter der Annahme, dass der Ligningehalt in Lignocellulose von Stroh etwa dem von Weichholz entspricht wird die Berechnung mit 18% durchgeführt.

Der Anteil der Cellulose/Hemicellulose der fest gebunden ist, liegt etwa zwischen 44 und 80%. Der Anteil an unverdaubarer Substanz ist im unbehandelten Stroh sehr hoch.

### **3.2.5 Verfügbarkeit von Stroh**

Die Verfügbarkeit von Stroh ist in erster Linie regional unterschiedlich. In Mecklenburg-Vorpommern liegen auf vielen Höfen große Mengen nicht verarbeitetes Stroh.

Es gibt in Deutschland 6,82 Mio Hektar Ackerfläche mit Getreideanbau, pro Hektar fallen 5-6 T Stroh an. Pro Jahr sind in Deutschland etwa 34,1 Mio Tonnen Stroh vorhanden (Bensmann, 2006). Nur ein Teil davon wird direkt genutzt.

Die Verwendung eigenen Strohs ist für die Höfe interessant, wenn dadurch andere Substrate nicht oder nur in deutlich geringerem Umfang verwendet werden müssen.

Heutzutage erfolgt ein kleiner Teil der Tierfütterung mit Stroh, von dem auch mit Natriumhydroxid aufgeschlossenes Stroh zum Einsatz kommt. Das aufgeschlossene Stroh wird als Komponente eines Mischfutters verfüttert.

## **4 Literatur zu Aufschluss von Stroh mit Natronlauge**

Heute werden viele Möglichkeiten angeboten, um die Ausbeute bei Biogasanlagen zu erhöhen. Dabei wird aber häufig die Effizienz nicht berücksichtigt. Unter dem Ziel des Klimaschutzes lohnt sich eine Maßnahme nur, wenn mehr Energie gewonnen wird, als durch die Maßnahme verbraucht wurde.

Die Literaturrecherche beginnt mit Arbeiten zur Verbesserung der Verdaulichkeit von Stroh für die Tierfütterung. Das Funktionsprinzip einer Biogasanlage ist durchaus mit dem Magen einer Kuh zu vergleichen. Im Pansen der Kuh spalten Bakterien die Zellulose auf und machen sie für die Kuh erst verdaulich.

Verfahren, die bei Tieren zu einer besseren Verdaubarkeit führen sind mit hoher Wahrscheinlichkeit auch für die Ertragssteigerung in Biogasanlagen geeignet.

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurden in Deutschland in verschiedenen Städten Untersuchungen zum Aufschluss von Stroh mit Natronlauge zur Tierfütterung durchgeführt. Diese Ergebnisse sind als Patentschriften über [depatris](#) frei zugänglich. Anfragen bei den Universitäten erbrachten keinen Erfolg, so dass die Recherche auf die Patentschriften beschränkt ist.

In den 80er Jahren wurde in der DDR erneut auf diesem Gebiet geforscht, um günstige Futtermittel für die Tierproduktion zu erzeugen. Inwieweit es auch angewandt wurde ist nicht bekannt. Forschungen auf diesem Gebiet wurden auch in anderen Staaten, wie z.B. Kanada durchgeführt. Bis heute ist die Vorbehandlung ein bekanntes und gängiges Verfahren zur Verbesserung des Futterwertes von Rauhfutter.

In neuerer Zeit wurde dieser Gedanke von chinesischen und indischen Wissenschaftlern aufgegriffen, um den Ertrag von Stroh in Biogasanlagen zu erhöhen.

Im folgenden werden zuerst die Arbeiten vorgestellt und anschließend die Ergebnisse in Hinblick auf die Nutzung von vorbehandeltem Stroh als Substrat in der Biogasanlage bewertet.

## **4.1 Patent für Futtermittel aus Stroh, Dr. Franz Lehmann 1902**

### **4.1.1 Inhalt des Patent**

Das früheste gefundene Patent aus dem Jahr 1902 von Dr. Franz Lehmann in Göttingen wurde beim Kaiserlichen Patentamt in Österreich erteilt. Der Titel lautet: "Verfahren zur Gewinnung hochverdaulicher Futtermittel aus Stroh, Rauhfutter aller Art, Reisig, Holz und Holzabfällen" (Lehmann 1902).

Die Herstellung des Futtermittels erfolgt "durch Kochen mit ätzenden Alkalien in wässriger Lösung unter gewöhnlichem oder besser unter höherem Druck, ebenso durch Behandlung mit schwefeliger Säure, also nach den Methoden, welche in der Papierfabrication zur Freilegung der Pflanzenfaser längst ausgebildet hat."

Dieses Verfahren führt zu Stroh, das von den Tieren nur in sehr geringer Menge gefressen wird.

Die Weiterentwicklung besteht darin, dass das Stroh unter Druck von 4-6 Atm mit Natronlauge erhitzt wird. Dabei hat die Natronlauge eine Konzentration, die zur völligen Aufschließung nicht ausreicht. Das entstandene Produkt ist neutral oder je nach Länge der Aufschlussführung leicht sauer.

Es werden 100kg Stroh mit 4kg Ätznatron (Natriumhydroxid) und 200L Wasser versetzt. Es wird darauf hingewiesen, dass auch Kochlauge der Papierindustrie (Natron- oder Sulfatverfahren) genutzt werden kann.

### **4.1.2 Bewertung**

Die erste Mengenangabe von 4kg NaOH auf 100kg Stroh für ein optimales Ergebnis wird mit späteren Untersuchungsergebnissen verglichen.

Ein interessanter Aspekt ist, dass das Stroh mit Ablauge der Papierindustrie erfolgen kann. Durch die Nutzung von Abfalllauge würde eine Effizienzrechnung einen vollkommen neuen Ansatzpunkt erhalten.

Doch hat sich auch der Einsatz von Chemikalien in der Papierindustrie in den letzten Jahrzehnten drastisch zu Gunsten der Umwelt geändert. Es wird soweit technisch möglich und sinnvoll eine Rückführung von Chemikalien angestrebt.

Problematisch ist auch, dass die Ablauge heute höhere Mengen an Begleitstoffen enthält.

Der Gärrest könnte nicht auf den Acker ausgebracht werden, wenn das Substrat mit Industrieabfällen hergestellt wurde.

## **4.2 Patent von Dr. Ernst Beckmann, 1917**

Der Chemiker Dr. Ernst Beckmann war ab 1912 erster Direktor des Kaiser-Wilhelm-Instituts für Chemie in Berlin-Dahlem.

### **4.2.1 Inhalt des Patent**

Die Patentschrift "Patent zur Behandlung von Stroh mit Natronlauge zur Herstellung eines Futtermittels", patentiert am 26. April 1917, eingereicht von Dr. Ernst Beckmann, verweist darauf, dass bereits vorgeschlagen wurde, Stroh mit Alkalilauge zu behandeln, um das Stroh für die Tiere besser verwertbar zu machen (Beckmann, 1917). Durch die Herauslösung von Lignin wurde das Stroh verdaulicher. Die Methoden sind aufwändig, da Temperaturen von über 100°C, oder Drücke von 5-6 Atm verwendet wurden. Dieses konnte von kleinen Betrieben nicht angewendet werden, da sich die Apparaturen nicht rentierten oder die Kosten für die Wärmeerzeugung zu hoch waren. Eine Zentralisierung war nicht sinnvoll, da dadurch zu hohe Frachtkosten entstanden wären.

Die bekannten Verfahren führten dazu, dass nicht nur das Lignin, sondern auch die verdauliche Stoffe wie Xylan (eine Hemicellulose) herausgewaschen wurde.

Bei dem neuen Verfahren wurde Temperatur und Druck durch Einwirkzeit ersetzt.

Das Stroh wurde gehäckselt und mit Lauge übergossen. Zunächst wurde das Lignin gelöst und Xylan ging nur zu einem kleinen Teil in Lösung. Je geringer die Konzentration der Lauge war, desto länger war die Einwirkzeit.

Für die Aufbereitung von Tierfutter war eine Konzentration von 1% mit einer Einwirkzeit von 48 Stunden und eine Konzentration von 2% mit Einwirkzeit 36 Stunden erfolgreich. Eine höhere Konzentration führte zum Weichwerden der Knoten.

Bei geringerer Konzentration (0,5%) kam es zu einer zu geringen Wirkung, die als Vorbereitung für andere Verfahren aber durchaus sinnvoll sein konnte. Das Alkali wurde vollständig verbraucht und es kam zu einer sauren Reaktion.

Das Stroh (auf 2cm geschnittene) wurde in einen Bottich gegeben mit Natronlauge

aufgefüllt, mit Deckel belegt und beschwert, um die Reaktion von Kohlendioxid und Sauerstoff zu verhindern. Die Beschwerung durfte nicht zu hoch sein, um ein zu starkes Zusammenpressen zu verhindern.

Das Stroh wurde nach dem Einwirken mit Wasser gewaschen, da das NaOH für Tiere ungünstig ist.

#### **4.2.2 Bewertung**

Der Gedanke mit den hohen Transportkosten trifft auch heute noch bei der Vorbehandlung von Stroh zu. Als Futtermittel verwendet kann Stroh heute deutlich besser transportiert werden als in den 20er Jahren. Bei der Biogasproduktion werden täglich sehr große Mengen benötigt (mehrere Tonnen), wodurch eine zentrale Behandlung nicht effizient erscheinen kann.

Für die Gewinnung von Biogas ist das Weichwerden der Knoten unerheblich, daher sind hier diese Einschränkungen in Hinblick auf die Konzentration der Natronlauge nicht angebracht.

Wichtig ist die Erkenntnis, dass die Natronlauge beim Aufschluss verbraucht wird.

### **4.3 Weiterführung des Patentes von E. Beckmann (1917) von 1918**

#### **4.3.1 Inhalt des Patentes**

Am 10. August 1918 erging das Patent für die Veredlungsgesellschaft für Nahrungs- und Futtermittel m.b.H. in Berlin (VNF, 1918a). Es ist ein Zusatz zu dem unter 4.2 besprochenen Patent von Dr. Ernst Beckmann. In den Versuchen zu diesem Patent wurde die Geschwindigkeit des Verbrauches von Natronlauge ermittelt. Der stärkste Verbrauch von Alkali erfolgte zu Beginn des Aufschlusses. Für die Verdaubarkeit des Strohs reichte schon eine deutlich geringere Einwirkzeit von 6 bis 12 Stunden aus.



### **4.3.2 Bewertung**

Auch bei neueren Versuchen könnte eine kürzere Einwirkzeit ausreichen. Es wären dann gegebenenfalls Versuche zur Reaktionskinetik sinnvoll.

## **4.4 Weiterführung des Patentes von E. Beckmann (1917) von 1918**

### **4.4.1 Inhalt des Patentes**

Ein Patent vom 24. August 1918 ist ebenfalls ein Zusatz zu dem Patent 305641 von der Veredlungsgesellschaft für Nahrungs- und Futtermittel m.b.H. in Berlin (VNF, 1918b). In diesem Zusatz ist die Änderung, dass der Aufschluss, wenn Kochbehälter zum Aufschließen vorhanden waren, bei 80°C durchgeführt werden konnte. Dadurch verkürzte sich die Einwirkzeit erheblich. Die Ausbeute war größer als bei Kochstroh.

### **4.4.2 Bewertung**

Wärme ist bei der Stromerzeugung in Biogasanlagen immer verfügbar und wird häufig nicht sinnvoll genutzt. Der Einsatz von heißer Lauge birgt aber ein großes Sicherheitsrisiko und erfordert große Investitionen in die betriebene Anlage.

## **4.5 Weiterführung des Patentes von E. Beckmann (1917) von 1918**

### **4.5.1 Inhalt des Patentes**

Im Patent vom 23. Oktober 1918 der Veredlungsgesellschaft für Nahrungs- und Futtermittel m.b.H. in Berlin (VNF, 1918c), das ebenfalls ein Zusatz zu Patent 305641 ist, wurde eine niedriger konzentrierte Lauge bei entsprechend größerer Menge genutzt.

### **4.5.2 Bewertung**

Bei weiteren Überlegungen wird dieser Punkt zum Tragen kommen, dass die Menge an

Natriumhydroxid ausschlaggebend ist und nicht die Konzentration. Mit dieser Information ist ein besserer Vergleich der Methoden möglich.

## **4.6 Weiterführung des Patentes von E. Beckmann (1917) aus dem Jahr 1918**

### **4.6.1 Inhalt des Patentes**

In dem Patent vom 27. März 1918 wird der erste Teil des Aufschlusses mit gebrauchter Lauge durchgeführt und erst der letzte Abschnitt mit frischer Lauge (Beckmann, 1918b).

### **4.6.2 Bewertung**

In der landwirtschaftlichen Praxis ist ein Verfahren mit überschüssiger Lauge nicht gut durchführbar, da es einen hohen apparativen Aufwand bedeutet. Das Natriumhydroxid wird bei dem Aufschluss verbraucht. Daher bietet es keinen Vorteil.

## **4.7 Piatkowski, Archiv für Tierernährung 1977**

### **4.7.1 Inhalt der Veröffentlichung**

Die Versuche von Piatkowski et al wurden mit gering konzentrierter Lauge (0 bis 1,5%) und Einwirkzeiten von 1 bis 24 Stunden durchgeführt (Piatkowski et al, 1977)

Die Besten Ergebnisse wurden mit Defibrieren und anschließendem Einweichen in 1%iger Lauge ermittelt. Dabei wurde 1kg Stroh in 8L Lauge eingeweicht.

Eine Erhöhung der Laugenkonzentration führte zu kürzeren Einweichzeiten. Eine Kombination von chemischer Behandlung mit 1%iger Natronlauge und mechanischer Behandlung mittels Defibrieren ergab die höchste erzielte Verdaulichkeit.

#### **4.7.2 Bewertung**

Hier wurde wieder bestätigt, dass die Wirkung nicht auf der Konzentration der Natronlauge beruht, sondern auf dem Zusammenspiel von Konzentration und Einwirkzeit.

Das beste Ergebnis wurde mit 1%iger Natronlauge erzielt. Pro kg Stroh wurden also 8 g NaOH eingesetzt und damit ein Fünftel der Menge von Lehmann. Die Vorbehandlung durch das Defibrieren hatte anscheinend einen hohen Einfluss auf die Verdaubarkeit.

### **4.8 Arbeiten von Gerhard Flachowsky, 1987**

In den 80er Jahren wurde in der DDR auf dem Gebiet des Aufschlusses von Stroh für die Tierfütterung geforscht.

Gerhard Flachowsky war von 1979 bis 1989 an der Universität Jena habilitiert, sein Fachgebiet war die Ernährung von Rindern zur Fleischgewinnung. Ab 1989 war er ordentlicher Professor (vethis, 2013).

#### **4.8.1 Bericht über den Aufschluss von Stroh**

G. Flachowsky veröffentlichte 1987 einen Bericht über den Aufschluss von Stroh mit verschiedenen Methoden in der Wissenschaftlichen Zeitschrift der Karl-Marx-Universität Leipzig, mathematisch-naturwissenschaftliche Reihe (Flachowsky, 1987).

In dieser Zusammenfassung wird auf verschiedene Methoden zum Aufschluss von Stroh eingegangen.

Für den Aufschluss mit Natriumhydroxid werden die drei Verfahren Nassaufschluss, Feuchtaufschluss und Trockenaufschluss besprochen.

Das in monokotylen Pflanzen enthaltene Lignin ist zu 60 bis 90% alkalibil. Dadurch lässt sich ein Verfahren zum Aufschluss mit Natriumhydroxid mit Getreidestroh erfolgreich durchführen.

Der Nassaufschluss, der zu guten Ergebnissen führt, ist in der Anwendung nicht praktikabel, da große Mengen Wasser eingesetzt werden müssen mit entsprechenden

Gefäßen oder Apparaturen und das Abwasser stark belastet wird.

Bei dem Feuchtaufschluss wird gehäckseltes oder gemahlenes Stroh mit 2 bis 6%iger Lauge besprüht. Das Verhältnis Stroh zu Lauge beträgt 1:0,2 bis 1:1.

Zu den Ergebnissen des Feuchtaufschlusses werden keine weiteren Angaben gemacht.

Der Trockenaufschluss wird in Kompaktieranlagen durchgeführt und bedeutet sowohl eine mechanische als auch eine chemische Behandlung, die vor allem durch Druck und Temperatur begünstigt wird.

Die positiven Ergebnisse beruhen auf dem höheren Verzehr der NaOH/Strohpellets im Vergleich zu gehäckseltem Stroh.

#### **4.8.2 Bewertung**

Die Ausführungen sind für die Beurteilung der Methode für den Einsatz in Biogasanlagen nicht ergiebig. Da ein Teil des Fleischmehrertrages durch den höheren Verzehr der Tiere erfolgt, ist eine Übertragung der Ergebnisse auf Biogasanlagen schwierig.

### **4.9 Untersuchungen über mit NaOH behandeltes Reisstroh, He, Pang 2008 Universität Peking**

#### **4.9.1 Inhalt des Artikels**

He, Pang et al führten 2008 Untersuchungen über mit NaOH behandeltes Reisstroh durch (He, Pang et al 2008). Durch Vorbehandlung im Trockenverfahren kann der Biogasertrag bedeutend erhöht werden. Mittels aufwändiger Technologie wurden die Veränderungen des Strohs ermittelt. Die physikalischen Eigenschaften von Lignin, Hemicellulose und Cellulose wurden bestimmt.

Die Biogasausbeute stieg bei mit 6%iger Natronlauge behandeltem Reisstroh um 28-65%. Die Ester-Bindung von Lignin-Kohlenwasserstoff-Komplexen wurden durch die Hydrolysereaktionen zerstört, wodurch mehr Zellulose für die Biogasproduktion gelöst wurde. Die Verbindung der Untereinheiten und funktionellen Gruppen von Lignin, Cellulose und Hemicellulose wurden entweder aufgebrochen oder zerstört, was zu signifikanten

Veränderungen der chemischen Struktur führt. Das ursprüngliche Lignin mit einem hohen Molekulargewicht und dreidimensionaler Netzstruktur wurde nach NaOH-Behandlung eine mit kleinerem Molekulargewicht und linearer Struktur. Die Veränderungen der chemischen Zusammensetzung, chemischen Struktur und physikalischen Eigenschaften macht das Reisstroh besser nutzbar und besser biologisch abbaubar.

Darin liegt die Ursache für die Erhöhung der Biogasausbeute.

#### **4.9.2 Bewertung**

Die Veränderungen der Ligninstrukturen sind auch auf Weizenstroh übertragbar. Es lassen sich jedoch keine direkten Schlüsse auf die Vergärbarkeit von Weizenstroh ziehen, da zu viele Einflüsse eine Rolle bei dem Ergebnis spielen.

### **4.10 Arbeit von Chandra et al an der Central Agricultural University Gangtok in Indien 2012**

#### **4.10.1 Inhalt der Arbeit**

Im Jahr 2012 wurde in der Zeitschrift Energy ein Artikel von R.Chandra et al von der Central Agricultural University Gangtok in Indien veröffentlicht (Chandra et al, 2012). Darin wird die Verbesserung der biologischen Abbaubarkeit und Biogasproduktion von Weizenstroh Substraten unter Verwendung von Natriumhydroxid und hydrothermalen Behandlung besprochen. Es wurden begleitend umfangreiche chemische und physikalischen Eigenschaften des Strohs in Japan (Food Research Laboratorys) analysiert.

Das Ausgangsmaterial für die Versuche war Weizenstroh, das getrocknet und mit einer Mühle (force mill) auf 1mm zerkleinert und gesiebt wurde.

Für die Untersuchungen mit der Natronlauge wurden 20g getrocknetes Stroh mit 0,8g festem Natriumhydroxid mit 97% iger Reinheit vermischt und Wasser zugesetzt, bis ein

Trockensubstanzgehalt von 10% erreicht wurde, d.h. 20g Stroh wurden mit etwa 180ml Wasser versetzt. Die Probe wurde für 5 Tage bei 37°C inkubiert.

Danach wurde das Kohlenstoff/Stickstoffverhältnis durch Zugabe von Harnstoff auf 25,0 eingestellt. Die nicht genauer bezeichnete Impfkultur wurde für sieben Tage bei 37°C vorinkubiert. Dadurch wurde sichergestellt, dass noch verbliebene leichtverdauliche Reststoffe in der Impfkultur entfernt werden. Das entstandene Methan wurde entfernt, um die Messergebnisse nicht zu verfälschen.

Die Vergärung erfolgte über 40 Tage. Nach 25 Tagen war die Methanbildung abgeschlossen, nur bei den hydrothermal aufgeschlossenen Proben war noch ein Anstieg bis zum 40. Tag zu verzeichnen.

Die Untersuchungen führten zu folgenden Ergebnissen:

Biogasertrag bei unbehandeltem Stroh betrug 167,5 und 188,4 L/kg in 35 Tagen hydraulischer Verweilzeit. Die Methanausbeute betrug 69,7 und 78,4 L/kg in 30 Tagen hydraulische Verweilzeit.

97,6% des Biogases und 99,2% des Methans wurden in 25 Tagen hydraulische Verweilzeit erzielt. Diese Messwerte korrespondieren mit einer spezifischen Biogasausbeute von 183,9 L/kg oTS und einer spezifische Methanausbeute von 77,8 L/kg oTS.

Die spezifische Biogasausbeute von mit 4%iger Natronlauge vorbehandeltem Weizenstroh beträgt 314 und 353,2 L/kg oTS bei einer Methanausbeute von 147,5 und 165,9 L/kg oTS. 95,7% der Biogas- und 97% der Methanausbeute wurden während der ersten 20 Tage erreicht.

#### **4.10.2 Diskussion der Ergebnisse**

Auffällig sind die Zeiten zu denen verstärkt an der Verfütterung von Stroh geforscht wurde. Im Vorfeld des ersten Weltkrieges, in den 20er Jahren, in der DDR zu Zeiten, in denen die Versorgung der Bevölkerung mit Nahrungsmitteln nur unzureichend gesichert war, wurde verstärkt nach Alternativen zur Tierfütterung gesucht, die nicht in Konkurrenz zur pflanzlichen Nahrungsmittelherstellung steht.

Die Untersuchungen von Chandra et al waren sehr umfangreich und mit modernsten Methoden durchgeführt.

Sowohl in den Untersuchungen von Dr. Franz Lehmann von 1901 als auch in den Untersuchungen von R. Chandra aus dem Jahr 2012 war das Ergebnis, dass Stroh, das mit 4% Natriumhydroxid behandelt wurde, die besten Ergebnisse erzielt. Lehmann setzte 100 kg Stroh mit 4kg NaOH und 200 L Wasser an. Bei Chandra wurde nur 1/10 der Wassermenge verwendet. Beckmann wies 1918 darauf hin, dass für den Aufschluss von Stroh mit NaOH nicht die Konzentration der Lauge sondern die Menge Natriumhydroxid ausschlaggebend ist, da das Natriumhydroxid verbraucht wird.

Bei dem Vergleich von Methoden für Tierfutterherstellung und für die Biogasproduktion ist zu beachten, dass die Cellulose von den Wiederkäuern im Pansen aufgeschlossen wird. Im Biogasfermenter benötigt dieser Aufschluss sehr viel Zeit. Ein Großteil Zellulose verlässt den Fermenter nahezu unverdaut.

Die von R.Chandra erzielten Ergebnisse sind auf den ersten Blick beeindruckend. Die Methanausbeute des Strohs wird mehr als verdoppelt.

Für die Effizienz der Methode wird eine monetäre Berechnung und eine energetische Betrachtung durchgeführt.

## **5 Bewertung der Ergebnisse**

Nur die Arbeiten von Chandra ermöglichen eine Berechnung für die Anwendung der Aufbereitungsmethode für Substrat in Biogasanlagen. Die folgenden Berechnungen sind auf gängige Biogasanlagen in landwirtschaftlichen Betrieben ausgelegt (Einphasensystem 3,5Tm<sup>3</sup> Fermenter 3Tm<sup>3</sup> Nachgärer)

Die Berechnung wird idealisiert vorgenommen unter der Voraussetzung, dass Stroh als Einzelsubstrat vergoren wird. Praktisch ist es so nicht möglich. Durch das ungünstige Kohlenstoff/Stickstoff-Verhältnis von Stroh muss eine Stickstoffquelle zugeführt werden. In den Versuchen von Chandra erfolgte es über die Zugabe von Harnstoff. Das wäre in der Praxis zu kostenintensiv. Auch weitere Mikronährstoffe müssen zugeführt werden. Die Übertragung von Ergebnissen aus stationären Versuchen auf kontinuierliche Prozesse, wie bei herkömmlichen landwirtschaftlichen Biogasanlagen, ist immer mit einem nicht kalkulierbaren Fehler behaftet.

Die Steigerungen der Methanausbeute können bei kontinuierlichem Betrieb gegebenenfalls deutlich geringer liegen. Dieser Faktor muss ebenfalls berücksichtigt werden.

## 5.1 Monetäre Berechnung

### 5.1.1 Mehrertrag durch die Behandlung von Stroh mit Natriumhydroxid

Tabelle 1: Aufstellung der Vergleichswerte (Chandra, 2012)		
Substrat	Gasaubeute jekg oTs	Methanausbeute je kg oTS
unbehandeltes Stroh	167,5	69,7
mit NaOH 4% behand. Stroh	314,0	147,5
	353,2	165,9 d 355,9

In Tabelle 1 sind die aus dem Text (Chandra, 2012) entnommenen Werte aufgeführt. Aus der Grafik 4 wurden 6200ml Biogas entstanden aus 20g Stroh mit NaOH behandeltem Stroh abgelesen. Umgerechnet ergibt das 301 L Biogas aus 1kg Stroh, auf oTS-Gehalt von 88,9% ergeben sich 349 L pro kg oTS. Die angegebenen Werte und die Grafik stimmen überein, obwohl das Ablesen der Grafik schwierig ist. Der Vergleich wurde durchgeführt, da ein Fehler in der Grafik aufgefallen war. Die Werte für den hydrothermalen Aufschluss betragen laut Grafik 4 für Methan ca. 1500ml, für Kohlendioxid ca. 1000 ml und für Biogas 3700ml. In der Summe müssten es etwa 2500 ml sein.



Die Rechnung wird mit 350 L pro kg oTS, oder 310 L pro kg Stroh durchgeführt, da wegen der Schwankung der Messwerte eine genauere Berechnung nicht notwendig ist.

Für die Berechnung der monetären Ersparnis wird ein Biogasreaktor mit einem Fassungsvermögen von 3,5 T m<sup>3</sup> ( mit 3 T m<sup>3</sup> Nachvergärer) mit zwei angeschlossenen BHKWs mit einer Leistung von je 275 kW angenommen, welches gängigen landwirtschaftlichen Anlagen entspricht.

Durch diese Berechnung kann auch abgeschätzt werden, ob ein realistischer Betrieb mit Stroh in Betracht kommt.

Bei der rein theoretischen Betrachtung wird nicht berücksichtigt, dass das Vergären von Stroh deutlich länger dauert als bei anderen Substraten (z.B. Maissilage).

Es wird berechnet, wieviel Stroh pro Stunde beschickt werden muss, um eine Ausbeute von 300 m<sup>3</sup> Biogas zu erzeugen.

Ein BHKW mit 275kW verbrennt bei Vollast pro Stunde 150 m<sup>3</sup> Biogas. Die Anlage wäre mit 300m<sup>3</sup> pro Stunde im Vollastbereich.

Aus einem Kilogramm zerkleinertem und ansonsten unbehandeltem Stroh wurden im Labormaßstab 178 L Biogas mit ca 40% Methan erzeugt.

Das Biogas aus dem NaOH-behandeltem Stroh hat einen Methananteil von 47%.

Für eine vergleichende Berechnung wird das Biogasvolumen des unbehandelten Strohs so berechnet, dass das erzeugte Methan einem Anteil von 47% entspricht.

$$74L/0,47= 157 L$$

Ein Kilogramm des unbehandelte Strohs erzeugte im Durchschnitt 157 L Biogas mit einem Methananteil von 47%.

Ein Kilogramm des mit NaOH behandelte Strohs erzeugte im Durchschnitt 330 L Biogas mit einem Methananteil von 47%.

Um pro Stunde ein Biogasvolumen von 300 m<sup>3</sup> zu erzeugen sind notwendig:

157 L pro kg entspricht 157m<sup>3</sup> pro Tonne unbehandeltes Stroh

Vom unbehandelten Stroh werden (theoretisch) pro Stunde zwei Tonnen Stroh benötigt.

330L pro kg entspricht 330 m<sup>3</sup> pro Tonne behandeltes Stroh.

Vom behandelten Stroh wird (theoretisch) pro Stunde fast eine Tonne Stroh benötigt. Das entspricht der tatsächlichen Beschickung dieser Anlagen von etwa 1 Tonne pro Stunde.

Für die Behandlung von 20g Stroh werden 0,8g NaOH benötigt, also werden für die Behandlung einer Tonne Stroh 40kg NaOH benötigt.

1m<sup>3</sup> Biogas erzeugt 1,5 bis 2,2 kWh Strom (Checkliste Biogas, 2012).

Mit einem Methangehalt von 47 % liegt der Wert im unteren Bereich, theoretisch müssten Werte ab 50% erfolgen, der Wert von 41 und 47% ist praktisch gemessen.

Demzufolge wird mit den niedrigsten Wert von 1,5 kWh Strom pro m<sup>3</sup> Biogas gerechnet.

Durch die Behandlung des Strohs werden pro Tonne 330m<sup>3</sup> - 157 m<sup>3</sup> = 173 m<sup>3</sup> mehr Biogas erzeugt.

Daraus ergibt sich erzeugter Strom: 173 m<sup>3</sup> \* 1,5kWh/m<sup>3</sup>= 260 kWh

Bei einer Vergütung von 9Ct/kWh ergibt sich eine Mehreinnahme von 0,09€/kWh\* 260 kWh= 23€

Als Vergleich werden die Mehrkosten für das Natriumhydroxid berechnet. Auf weitere Kosten, wie bauliche Veränderungen für die Lagerung und das Anmischen von NaOH, für die Transportkosten, für geschultes Personal, Maßnahmen zum Umweltschutz wird verzichtet, da es sich nur mit hohem Aufwand ermitteln ließe.

Für eine fünftägige Behandlung mit NaOH wären Behälter für 5\*24T Stroh/Laugegemisch notwendig. Das ist ein hoher baulicher Aufwand, selbst wenn die Einwirkzeit auf drei Tage verkürzt werden kann.

### 5.1.2 Energetische Betrachtung

Für die Aufbereitung einer Tonne Stroh sind 40kg Natriumhydroxid mit einer Reinheit von 97% notwendig. Eine Tonne NaOH kostet 120 bis 250 € (dibata, 2013). 40 kg NaOH kosten (mit einem mittleren Preis von 180€ berechnet)

$(180€/1000kg)*40kg = 7,20€$

Der Bezug einer verdünnten Lauge würde zu erheblichen Mehrkosten und Mehrenergie bei dem Transport führen und wird deshalb hier nicht betrachtet.

Nur mit dem Materialwert gerechnet würde ein Gewinn von etwa 15€ pro 1000kg Stroh

erzielt werden. Bei der Berücksichtigung aller anderer Kostenfaktoren schrumpft dieser Gewinn deutlich.

Der Gewinn könnte auch durch einen höheren Strohanteil erzielt werden.

Bei der theoretischen Betrachtung, dass pro Stunde eine Tonne mit NaOH behandeltes Stroh vergoren wird (in der Praxis nur mit Co-Substrat möglich), ergibt sich ein Jahresbedarf von

$40 \text{ kg} * 24 * 365 = 350.400 \text{ kg} = 350 \text{ T NaOH}$  mit 97%iger Reinheit.

Bei einer europäischen Jahresproduktion von 10 Millionen Tonnen Natriumhydroxid erscheint dieser Wert sehr hoch. Eine gesteigerte Nachfrage durch die Biogasindustrie könnte zu einer Erhöhung der Preise führen und so den ohnehin fraglichen Gewinn weiter schmälern.

## 5.2 Energetische Berechnung

Die Herstellung von Natriumhydroxid ist energieaufwändig. Sie erfolgt mittels Elektrolyse aus Steinsalz. Heute ist das Diaphragmaverfahren gängig.

Aus der Bindungsenergie von  $-426,7 \text{ kJ/mol}$  berechnet ergibt sich  $(-426,7 \text{ kJ/mol})/0,04 \text{ kg/mol} = 10700 \text{ kJ/kg} = 10,7 \text{ MJ/kg}$  als Vergleichswert (wikibooks, 2013).

Nach der Aufstellung des Umweltbundesamtes wird bei dem Herstellungsprozess von NaOH im Diaphragmaverfahren  $4,77 * 10^{-6} \text{ TJ}$  pro kg NaOH verbraucht (Umweltbundesamt 2013).

Der Wert von knapp 5 MJ/kg beträgt etwa die Hälfte der Standardbildungsenthalpie. Bei dem Energieaufwand für die Produktion von NaOH wird berücksichtigt, dass auch Chlorgas bei der Elektrolyse hergestellt wird. Die Energie wird anteilig auf die Produkte berechnet.

Bei dem Kumulierten Energieaufwand KEA wurden sämtlicher Energieaufwand berücksichtigt, auch die Herstellung der Rohstoffe. Mögliche Transportwege wurden nicht berücksichtigt.

Der Aufwand beträgt  $308 * 10^{-9} \text{ TJ}$  andere,  $243 * 10^{-9} \text{ TJ}$  erneuerbare,  $14,4 * 10^{-6} \text{ TJ}$  nicht erneuerbare Energien. Das sind  $14,9 * 10^{-6} \text{ TJ} = 14,9 \text{ MJ}$  je kg NaOH die heute fast

ausschließlich aus nicht erneuerbaren Energien aufgewendet werden müssen.

Für die Herstellung von 40kg NaOH, die zur Behandlung von einer Tonne Stroh benötigt werden, wird Energie in Höhe von  $14,9 \text{ MJ/kg} \cdot 40\text{kg} = 600 \text{ MJ}$  verbraucht.

Der Energiegewinn aus der Mehrleistung der Biogasanlage liegt bei

$260 \text{ kWh} = 260 \text{ kJ/s} \cdot 3600\text{s} = 1.000.000\text{kJ} = 1.000 \text{ MJ}$

Damit werden 60% der gewonnenen Energie als Energie für die Herstellung des NaOH benötigt. Diese Energie besteht zur Zeit zu 96% aus nicht erneuerbarer Energie.

### **5.3 Abschließende Beurteilung der Methode des Aufschlusses mit NaOH**

Allein die Energiebetrachtung lässt die Vorbehandlung mit NaOH sinnlos erscheinen. Viele weitere Komponenten wurden nicht berücksichtigt. Im Hinblick auf das Ziel Klimaschutz ist das Verfahren grober Unfug.

Auch der praktische Einsatz ist nicht realistisch. Durch die großen Mengen an Natriumhydroxid müssen umfassende Maßnahmen zur Sicherung ergriffen werden. Die Gefahr für die Mitarbeiter und die Umwelt ist groß.

Weiterhin muss der Gehalt an Natriumionen betrachtet werden. Bei der Vergärung wirken Konzentrationen zwischen 6 und 30g/L hemmend. Angepasste Kulturen können bis zu 60g/L ertragen (Kaltschmitt 2001). In den Versuchen von Chandra waren etwa  $0,8\text{g} \cdot 23\text{g}/40\text{g} = 0,46\text{g}$  in 180ml. Das ergibt eine Konzentration von etwa 2,6 g/L. Damit ist eine Hemmung der Vergärung nicht zu erwarten. Es müsste noch geprüft werden, ob der Gärrest mit diesem Anteil Natriumionen auf den Acker ausgebracht werden kann, wie es ein Großteil der landwirtschaftlichen Betriebe praktiziert.

Die Summe der Nachteile führt zu der Erkenntnis, dass es für den Betrieb von Biogasanlagen kein sinnvolles Verfahren ist.

Da die Energiekosten für die Herstellung und Bereitstellung des Natriumhydroxids so hoch sind, erübrigt sich die Frage nach dem Sinn einer Pilotanlage.

## **6 Weitere Methoden zum Aufschluss von Stroh**

Es existieren weitere Methoden zum Aufschluss von Stroh für die Tierfütterung oder als Substrat für die Biogasanlage.

Der Sulfat und Sulfidaufschluss von Holz in der Papierindustrie ist ebenfalls ein Ansatzpunkt für Überlegungen. Jedoch werden für diese Methoden große Mengen an Chemikalien benötigt.

### **6.1 Forschungen von op dem Camp et al**

Eine wichtige Fragestellung für den Einsatz von Aufschlussmethoden ist, ob Lignin bei der Vergärung störend wirkt.

#### **6.1.1 Forschungsergebnisse Störung von Lignin bei der Gärung**

In dem Bericht zu Forschungen über die Effekte von Lignin auf die anaerobe Vergärung von (ligno) cellulosehaltigen Abfällen durch Rumenmikroorganismen von op den Camp et al der Universität Nijmegen, Niederlande wurde geklärt, ob die Anwesenheit von Lignin (Kraft pine lignin) den Abbau von Cellulose und Hemicellulose stört (op den Camp 1988). Bei einem Mischungsverhältnis von Cellulose und Lignin (Kraft pine lignin) 5 zu 1 beträgt die Verringerung des Celluloseabbaus 10%.

#### **6.1.2 Bewertung**

Der Ligningehalt von Stroh beträgt ca. 8 bis 15%. Die untersuchten Proben hatten 20% Lignin. Das untersuchte Lignin war von Pinien. Die Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass die Anwesenheit von Lignin auch bei Stroh den Abbau von freier Cellulose hemmt, jedoch in einem relativ geringem Ausmaß, der eine Notwendigkeit der Abtrennung sehr fraglich erscheinen lässt. Mit dem Lignin werden auch lösliche vergärbare Stoffe wie Glucose ausgetragen.

## **6.2 Patent von Dr. J. Paechtner (1918) Verfahren des Aufschlusses von Stroh mittels Elektrolyse und Kochsalz**

Dr. Johannes Pächtner war von 1915 bis 1926 Professor für Physiologie an der Tierärztlichen Hochschule Hannover.

### **6.2.1 Patent zur Elektrolyse von Stroh, J.Pächtner, 1918**

Ein Patent vom 22. August 1918 von Dr. Johannes Paechtner aus Hannover beinhaltet ein Verfahren zum Aufschluss von Stroh zur Futtermittelherstellung durch Elektrolyse. Stroh wird von einer einprozentigen Kochsalzlösung durchströmt, an die ein elektrisches Feld angelegt ist (Pächtner, 1918).

Es bildet sich in geringer Konzentration Natron- und Kalilauge, die direkt in den Strohfasern wirkt.

Durch die ebenfalls gebildete Salzsäure erfolgt eine Neutralisation. Die Flüssigkeit wird mit dem aufgeschlossenen Stroh verfüttert.

### **6.2.2 Bewertung**

Der Ansatz ist interessant und benötigt nur Kochsalz als Chemikalie, welches in großen Mengen günstig verfügbar ist. Es ließ sich nicht ermitteln, wieviel Strom für diese Methode verwendet wurde. Es erscheint apparativ zu aufwändig, um damit große Mengen an Stroh zu behandeln. Des Weiteren ist es ein Sicherheitsrisiko eine Elektrolyseanlage für eine Tonne Stroh zu betreiben.

## **6.3 Aufschluss mit Säure**

Der Aufschluss mit Säure ist für den Einsatz von Stroh in Biogasanlagen wenig erfolgversprechend, da eine Neutralisation erfolgen müsste um die Vergärung im optimalen pH-Bereich zu ermöglichen.

### **6.3.1 Patent von H. Bergner 1976**

#### **6.3.1.1 Patent zum Aufschluss von Stroh mit Salzsäure**

In einem 1978 beantragten Patent von Prof. Dr. Hans Bergner von der Humboldt-Universität Berlin wird ein Verfahren beschrieben, in dem ein Teil hochprozentige Salzsäure mit 9 Teilen Stroh vermischt wird (Bergner, 1976) Dabei wird die Cellulose aus dem Stroh zum Teil verzuckert, wie es aus anderen Verfahren der Holzverzuckerung bekannt ist.

Für den Einsatz sind hochprozentige Chemikalien notwendig.

#### **6.3.2 Bewertung**

Die in der Holzverzuckerung praktizierte Rückgewinnung der Salzsäure ist in einem gängigen landwirtschaftlichen Betrieb nicht praktikabel.

### **6.3.3 Patent von H. Bergner 1985**

#### **6.3.3.1 Patent zum Aufschluss von Stroh mit Salzsäure**

In einem Patent von 1985 von Prof. Dr. Hans Bergner et al von der Humboldt-Universität in Berlin wird ein Verfahren zum Aufschluss von u.a. Stroh beschrieben, mit dem Ziel die Verdaulichkeit von Futtermitteln zu erhöhen (Bergner, 1985).

In einem Ausführungsbeispiel werden 25g Stroh mit 25g Reisextraktionsschrot mit 5,5ml Salzsäure mit einer Konzentration von 5 bis 33,7% vermischt und für eine Stunde stehen gelassen. Dann werden 11ml Wasser hinzugefügt, wieder vermischt und für zwei Stunden bei 105°C im Trockenschrank belassen. Danach erfolgt eine Neutralisierung mit Calciumhydroxid.

#### **6.3.3.2 Bewertung**

Die Menge an eingesetzten Chemikalien ist so hoch, dass sich eine weitere Betrachtung erübrigt. Weiterhin ist ein Einsatz von Säure in hohen Konzentrationen nur bei

anschließender Neutralisation möglich.

Generell ist der Einsatz von Säuren problematisch bei Biogasanlagen, da eine zu starke Absenkung des pH-Wertes vermieden werden muss um im optimalen pH-Bereich der Bakterien zu bleiben. Eine anschließende Neutralisation benötigt noch mehr Chemikalien. Dabei muss berücksichtigt werden, dass der Gärprozess durch hohe Ionenkonzentrationen gestört werden kann.

Wie schon bei dem Aufschluss mit Natriumhydroxid ist auch hier der Aufwand an Chemikalien nicht zu rechtfertigen.

## **6.4 6.4 Aufschluss mit Wasserstoffperoxid**

### **6.4.1 Arbeit von Flachowsky und Sundstol 1988**

In einer Arbeit von G. Flachowsky und F. Sundstol wurde die Wirksamkeit von NaOH und Wasserstoffperoxid auf die Abbaubarkeit von Stroh in Wiederkäuern beschrieben (Flachowsky, 1988).

Bei dem Abbau von Lignin durch Pilze spielt Wasserstoffperoxid eine Schlüsselrolle, da es Lignin oxidiert und den Lignocellulosekomplex zerstört. Die Versuche wurden mit 1%iger Wasserstoffperoxidlösung durchgeführt und es erhöhte sich die Verdaubarkeit um etwa 70%.

### **6.4.2 Beurteilung**

Reste von Wasserstoffperoxid müsste bei der Verwendung als Biogassubstrat ausgewaschen werden, um die Bakterienkolonie im Fermenter nicht zu schädigen. Der Energieaufwand zur Herstellung von Wasserstoffperoxid ist relativ hoch und der Umgang mit dieser Chemikalie erfordert Fachpersonal und entsprechenden apparativen Aufwand. Eine Erforschung dieser Behandlungsmethode erscheint für den Einsatz in landwirtschaftlichen Anlagen nicht sinnvoll.



## **6.5 Aufschluss mit Temperatur und Druck**

Bei dem Betrieb von Biogasanlagen mit BHKW entsteht Wärme, die häufig nicht sinnvoll genutzt wird. Die Nutzung zum Aufschluss von Stroh wäre eine Alternative.

Die frühen Methoden zur Verbesserung der Verdaulichkeit von Stroh wurden durch Kochen des Strohs zum Teil mit Chemikalien wie Natronlauge erreicht.

### **6.5.1 Dampfexpansion Dissertation von B.Schumacher 2008**

#### **6.5.1.1 Inhalt**

Dissertation von Britt Schumacher 2008 Untersuchungen zur Aufbereitung und Umwandlung von Energiepflanzen in Biogas und Bioethanol (Schumacher, 2008).

In der Dissertation werden verschiedene Methoden für den Aufschluss von u.a. Stroh zum Einsatz in Biogasanlagen beschrieben.

Die Dampfbehandlung mittels Schnellkochtopf hatte für Triticale einen positiven Einfluss von 4% Mehrertrag, für Weizenstroh einen negativen Einfluss bei der Vergärung.

#### **6.5.1.2 Bewertung**

Die Dampfbehandlung scheint so, wie es hier durchgeführt wurde, wenig erfolgreich zu sein.

### **6.5.2 Patent Behandlung mit Sattdampf Feldmann 2008**

#### **6.5.2.1 Inhalt des Patent**

Michael Feldmann beschreibt die Nachteile, die bei der Verwendung von unbehandeltem Stroh in der Biogasanlage entstehen (Feldmann, 2008).

Die Erfindung ist eine Einrichtung zum chemischen, mechanischen und /oder thermischen Aufschluss von ligninhaltigen nachwachsenden Rohstoffen. Aus Stroh können erhebliche Gasmengen durch Vergärung erzielt werden, insbesondere bei Feststoffvergärungsverfahren. Zusätzlich steht Stroh günstig zur Verfügung.

Die Erfindung rentiert sich vorzugsweise in großen Anlagen (Biomassekraftwerk) mit beispielsweise 10 oder mehr Fermentern und jeweiliger elektrischer Leistung von über 50.000kW.

Die Erfindung dient vorzugsweise der Vorbehandlung von Stroh mit Sattedampf bei 20 bis 30 bar, 180 bis 250°C, 5 bis 15 min.

Durch die Sattedampfbehandlung werden die Ligninstrukturen verändert, da das Lignin schmilzt/erweicht und bei Abkühlung wieder erstarrt. Es bildet eine aufgelockerte tröpfchenartige Struktur, die den Mikroorganismen die Verdauung der Cellulose/Hemicellulose ermöglicht. Das Lignin verbleibt im wesentlichen in den Halmen. Das Stroh behält seine Struktur und ist so als Ballen im Feststoffvergärungsverfahren einsetzbar.

Eine Weiterbildung der Anlage ist die Verwendung von eingeweichtem Stroh, da durch das schlagartige Verdampfen des im Stroh enthaltenen Wassers die Lignocellulosestruktur aufgebrochen wird. Eine weitere Verbesserung bringt das Zerkleinern des Strohs.

Durch die kurze Behandlungszeiten von 5 bis 15 Minuten wird das Lignin nicht herausgelöst.

#### **6.5.2.2 Bewertung**

Die Behandlung mit Sattedampf erscheint sinnvoll, besonders bei einer schnellen Entspannung mit Verdampfung des im Halm enthaltenen Wassers. Es ist dem Patent nicht zu entnehmen, in wieweit sich der Methanertrag steigern lässt. Die Behandlung ist mit hohem Energieaufwand verbunden, der wahrscheinlich nicht aus der Abwärme eines BHKWs gespeist werden kann.

Für einen landwirtschaftlichen Betrieb erscheint die Methode zu aufwändig, da bei den hohen Drücken die Anlage entsprechend hohe Anforderungen erfüllen muss.

Die Feststoffvergärung erfordert besondere Fermenter und ist so für die meisten landwirtschaftlichen Anlagen nicht sinnvoll.

#### **6.5.3 Forschungsprojekt Stoffliche und energetische Nutzung 2009 am Prüf- und Forschungsinstitut Pirmasens, Abschlussbericht**

### 6.5.3.1 Inhalt des Forschungsprojektes

In dem Projekt sollten die verfahrenstechnischen Grundlagen zu einer stofflichen und energetischen Nutzung des landwirtschaftlichen Koppelprodukts Stroh erarbeitet werden (Pacan 2009). Die energetische Nutzung wird als Nutzung für die Biogasanlagen besprochen. Es erfolgte die technische Ausführung und Dimensionierung einer Großtechnikumsanlage zum hydrothermalen Aufschluss von Stroh. Durch vergleichende dynamische und statische Gärtests von unbehandeltem und hydrothermal aufgeschlossenen Stroh wurde das Biogaspotenzial bestimmt.

Bei Versuchen zur Versäuerung (Hydrolyse) wurde behandeltes und unbehandeltes Stroh über mehrere Tage unter Sauerstoffabschluss inkubiert. Mittels HPLC wurde ein Versäuerungsspektrum und die Summe der gebildeten Säuren bestimmt. Diese Messwerte geben Aufschluss über die Vergärbarkeit des Substrates.

In dem hydrothermalen Ansatz erfolgte die Versäuerung schneller und es entstehen doppelt so viel Säuren, wie bei dem unbehandelten Ansatz.

Die Ermittlung des Biogasertrages erfolgte mittels dynamischer Gärtests mit Pilot-Biogasfermentern (100L; Durchflussfermenter). Das eingesetzte hydrothermal behandelte Stroh wurde eine Stunde bei 140°C behandelt.

Das unbehandelte Stroh ergab im dynamischen Gärtest einen Biogasertrag von 308 NL/kg oTS mit einem Methangehalt von 50%.

Das hydrothermal behandelte Stroh ergab 490 NL/kg oTS, welches einer Steigerung von 60% entspricht. Es wurde auf das Stickstoffdefizit hingewiesen.

Dadurch wird das Ammonium verbraucht und die Pufferkapazität sinkt und es führt zur Versäuerung. Dieses Problem ist praktisch lösbar durch ein Co-Substrat wie z.B. Gülle.

Die Vorteile von hydrothermal behandeltem Stroh sind, dass sich damit die Probleme Förderprobleme, Wickeln um Förderschnecke und Bildung einer Schwimmschicht verhindern lassen.

Hier erfolgte der hydrothermale Aufschluss mit nicht vorbehandeltem Stroh. Die Aufschluss des Strohs erfolgte mit der Abwärme des BHKWs.

Je höher die Temperatur des Aufschlusses war, desto höher war die Ausbeute.

Es wurde ein Mehrertrag von 750 kWh<sub>el</sub> und 900kWh<sub>th</sub> je Tonne Frischmasse erzielt (bei einem Wirkungsgrad von 38% elektrisch und 45% thermisch)

Die Vorteile bestehen darin, dass sich durch die Thermohochdruck-Behandlung die Struktur der Lignocellulose partiell auflöst und das Stroh erhebliche Mengen an Wasser aufnimmt. So lässt sich das behandelte Stroh besser fördern und einrühren.

### **6.5.3.2 Bewertung**

Das Stroh braucht nicht so stark zerkleinert werden und so entfällt ein großer Kostenfaktor für die Vorbehandlung. Für die hydrothermale Behandlung wird Energie benötigt, die durch ein BHKW zur Verfügung gestellt werden kann. Die Steigerung der Ausbeute ist sehr beachtlich.

Dieses Verfahren benötigt bauliche Anlagen ist aber bei gesicherter Wärmequelle durchaus eine Möglichkeit für die Nutzung von Stroh für Biogasanlagen.

Die erzielten Ergebnisse aus den Gärtests liegen mit 308 NL/kg oTS für unbehandeltes Stroh doppelt höher als andere Versuchen mit aufgeschlossenem Stroh. Hier wäre es interessant, die genauen Parameter der Versuche zu kennen.

### **6.5.4 Versuche zur Vergärbarkeit von Weizenstroh, Chandra et al 2012**

#### **6.5.4.1 Inhalt des Artikels**

Es wurden Versuche zur Vergärbarkeit von Weizenstroh mit und ohne hydrothermale Behandlung durchgeführt (Chandra 2012).

Das Stroh wurde für beide Versuchsbedingungen zu einer Größe von 1mm gemahlen. Für die Vorbehandlung wurden 20g gemahlenes Stroh in einen Reaktor gegeben, mit Leitungswasser aufgefüllt (131ml) und auf 200°C im Salzbad für 10 Minuten erhitzt. Es wurde abgekühlt, in den Gärbehälter überführt, mit Leitungswasser auf einen TS-Gehalt von 10% aufgefüllt. Der pH betrug 3,66. Wahrscheinlich ist der Grund für die pH-Absenkung die hydrothermale Oxidation von Schwefel und Phosphor in anorganische Säuren.

Es wurden 5% Natriumhydroxid zugegeben, um einen für die Vergärung geeigneten pH-Wert einzustellen. Das Hydrolyseverhalten wurde anhand der pH-Änderung bestimmt. Die Vergärung erfolgte bei 37°C. Die Angaben über die Gasmessung erfolgt in Normlitern, d.h. die Werte wurden auf 1atm und 0°C umgerechnet. Da ein C/N-Verhältnis von 20 bis 30 als optimal gilt, wurden die Proben durch Zugabe von Harnstoff auf 25 eingestellt. Bei der Hydrolyse sinkt der pH-Wert der unbehandelten Probe von 5,26 auf 4,99 und die hydrothermal behandelte von 9,0 auf 7,61. Das Sinken den pH-Wertes ist ein Indikator für die Entstehung organischer Säuren. Im Vergleich zu der mit NaOH-vorbehandelten Probe, bei der die Ligninstruktur zerstört wurde, ist bei der hydrothermal behandelten mit anschließender Zugabe von 5% NaOH der pH-Wert weniger stark gesunken, wodurch

teilweise die Aktivität der Methanbakterien inhibiert wurde.

Der Biogasertrag liegt bei 195 NL/kg oTS mit 89 L Methan.

Der Mehrertrag zu den unbehandelten Proben ist gering. Eventuell liegt ein Fehler in der Berechnung vor.

#### **6.5.4.2 Bewertung**

Dieses Verfahren ist so nicht anwendbar, da der Mehrertrag von 20% den hohen Einsatz an Energie, selbst bei Nutzung von Abwärme eines BHKWs, nicht rechtfertigt.

Der hohe Einsatz von NaOH (siehe Ergebnisse oben) ist ebenfalls nicht sinnvoll.

### **6.5.5 Masterarbeit von Ilva Borgström**

#### **6.5.5.1 Beschreibung der Versuche**

Diese Methode ist weiterentwickelt und wird auf dem Gebiet der Ethanolgewinnung aus Stroh angewendet (Borgström, 2011). Sie dient ebenfalls zur Fasergewinnung aus verschiedenen Pflanzen.

Dabei wird das Stroh mit einem alkalischen Dampf unter hohem Druck behandelt und anschließend schnell entspannt. Dadurch verdampft das in dem Stroh enthaltene Wasser schlagartig und zerstört so die Ligninstruktur.

Frau Borgström beschreibt, dass sich durch den Dampfdruckaufschluss das Material verändert und für den Einsatz in Biogasanlagen besser geeignet ist. Der Anteil oTS verringert sich.

Dieser Aufschluss führt zu einem schnelleren Abbau und entsprechend zu einer schnelleren Methanbildung. Nach 44 Tagen sind die Werte für das unbehandelte Stroh höher. Bei anderen Substraten gibt es eine Steigerung der Ausbeute. Manche Substrate führen zu einer Verringerung der Ausbeute (Federn, Pferdemit/Stroh).

#### **6.5.5.2 Bewertung**

Die Versuche von Frau Borgström lassen in Hinblick auf die Vorbehandlung von Stroh Zweifel an dem Aufschlussverfahren aufkommen. Es ist nicht gesichert, dass mit dieser Methode immer ein Erfolg erzielt wird. Deutliche wird jedoch, dass die Geschwindigkeit der Vergärung durch den Aufschluss zunimmt.

### **6.5.5.3 Fazit Dampfaufschluss und Hydrothormaler Aufschluss**

Die Versuche sind zum Teil erfolgreich, wie die Studie der Universität Pirmasens zeigt, zum Teil sind die Ergebnisse aber auch gering oder gar nicht vorhanden.

Für landwirtschaftliche Betriebe sind diese Aufschlüsse schwer umzusetzen, da hohe Mengen an Substrat behandelt werden müssen und nur selten geschultes Personal vorhanden ist. Auch werden noch weitere Forschungen notwendig sein, um die Umsetzbarkeit in große Anlagen zu ermöglichen.

## **6.6 Mechanischer Aufschluss**

### **6.6.1 Technischer Aufschluss von Substraten, Fachhochschule Münster, Marius Kerkering**

#### **6.6.1.1 Beschreibung der Versuche**

In Versuchen wurden die Effekte verschiedener Zerkleinerungsmethoden untersucht, der Schnitzzerkleinerung und der Prallzerkleinerung (Kerkering, 2009).

Durch die Schnitzzerkleinerung wurde bei einer Schnittgröße von 0,2mm ein Mehrertrag von 15% Methan erzielt. Bei der Prallzerkleinerung ergab sich ein höherer Ertrag schon bei groberer Zerkleinerung von 22%.

Die Vorteile dieses Verfahrens sind Mehrertrag in Höhe von 20€/t FM (für elektrisch und für thermisch), dadurch werden die Zerkleinerungskosten getragen. Es erfolgt ein erhöhter Abbau der organischen Masse. Die Rührbarkeit im Fermenter ist gewährleistet und es erfolgt eine geringere Belastung von Pumpe und Rührwerk.

#### **6.6.1.2 Beurteilung**

Die Zerkleinerung ist den meisten Vorbehandlungen vorausgegangen. Hier wird der Mehrertrag auf unzerkleinertes Stroh bezogen, in anderen Versuchen wurde auf zerkleinertes Stroh bezogen.

Der spezifische Methanertrag liegt mit 160L/kg FM im Bereich der Referenzwerte für unbehandeltes Stroh bei anderen Aufschlussmethoden. Die besseren Eigenschaften sind ein Vorteil und machen das Stroh erst zu einem brauchbaren Substrat.

## **6.6.2 Masterarbeit von Ilva Borgström 2011 Lingköping/ Schweden**

### **6.6.2.1 Beschreibung der Versuche**

Es wurden Versuche zu verschiedenen Methoden der Aufbereitung und verschiedenen Substraten gemacht (Borgström, 2011). Für Stroh ergaben die Versuche, dass bei 80°C extrudiertes Stroh 85% mehr Methan erzeugt als unbehandeltes, bei 100°C extrudiertes Stroh erzeugt 69% mehr Biogas. Diese Ergebnisse beziehen sich auf die ersten zwölf Tage der Vergärung.

Nach 44 Tagen ergab das bei 100°C extrudierte Stroh 22% mehr Biogas, dieser Wert ist nicht statistisch verifiziert.

Bei 100°C extrudiertes Stroh ergab einen Anteil von 57% des theoretischen Ertrages von 436 NL CH<sub>4</sub> /kg oTS (Bauer et al 2010).

### **6.6.2.2 Bewertung**

Die Extrusion ist eine Alternative zu anderen Verfahren wie mahlen. Das Ergebnis für bei 100°C extrudiertes Stroh ist mit 250 L Methan sehr hoch.

Dieses Verfahren erscheint vielversprechend für weitere Versuche.

## **6.6.3 Vortrag Vergärung von Stroh: Stand und Perspektive 2012**

### **6.6.3.1 Vortrag: Vergärung von Stroh: Stand und Perspektiven Dr. Gerhard Reinhold, Dr.Ing. Eberhard Friedrich, Fraunhofer Institut;**

In einem Vortrag auf der Internationalen Fachtagung Strohenergie in Berlin am 29. und 30. März 2012 stellte Dr, Gerhard Reinhold und Dr. Ing. Eberhard Friedrich vom Fraunhofer Institut Stand und Perspektive zur Vergärung von Stroh vor (Reinhold, 2012). In einer Anlage im Pilotmaßstab bestehend aus Extruder, Anmischbehälter, Fermenter1, Fermenter 2, Schwingsieb und Schneckenpresse wurde die kontinuierliche Vergärung von Stroh untersucht.

Als erste Stufe erfolgt das Extrudieren und anschließend das Anmaischen mit ca. 11% TS.

Es entstehen keine Betriebsprobleme durch Schwimmschicht oder verstopfte Rohre und Pumpen. Der mittlere Methanertrag beträgt 270 NL/kg oTS (entspricht 80% von Maissilage). Der Gärrest wurde gut entwässert. Im Pilotbetrieb wurde kein Steady-State erreicht und es erfolgte eine Aufkonzentrierung von anorganischen Rückständen (Asche).

### **6.6.3.2 Bewertung**

Das Forschungsprojekt ist für die gängigen landwirtschaftlichen Betriebe sehr interessant. Noch ist das Projekt in der Testphase.

## **6.6.4 Veröffentlichung von Baltic Compass**

Baltic Compass ist ein EU-finanziertes Projekt, das die Sicherung der landwirtschaftlichen Leistung gewährleisten will.

### **6.6.4.1 Projekt / Veröffentlichung von Baltic Compass**

Das extrudierte Stroh führt zu einer Methanausbeute von 300L /kg oTS nach 90 Tagen, die der von unbehandeltem Stroh entspricht (Baltic Compass 2013). Der Abbau erfolgt bei dem vorbehandeltem Stroh schneller.

### **6.6.4.2 Bewertung**

Die Extrusion erfordert 10 bis 100 kWh Strom pro Tonne. Bei Nichtbehandlung ist das Stroh nicht als Substrat für Biogasanlagen einsetzbar. Die Kosten für die Extrusion müssen also auf die gesamte Ausbeute bei extrudiertem Stroh berechnet werden. Der Wert beträgt nach 90 Tagen diesen hohen Wert. Nach 40 Tagen sind etwa 270ml abzulesen. Das ist noch um 70ml höher als bei Frau Borgström. Ein Vergleich der Untersuchungen ist nicht möglich, da keine Angaben über die Vergärungsparameter gemacht wurden.



## **6.7 System der Firma Snowleopard**

### **6.7.1 Beschreibung des Projektes**

Von der Firma Snowleopard aus Reisbach wird ein System zur effektiven Vergärung von Stroh angeboten. Die Methode beruht auf Erfahrungswerten. Die Vergärung erfolgt zweistufig (Snow Leopard 2013).

Die Vergärung erfolgt von Stroh als Anteil in Mist. Es wird vorher aufbereitet durch Enzyme, Bakterien, Extrudieren, Häckseln (oder/und).

Als einfachste und wirtschaftlichste Art der Aufbereitung hat sich das Silieren erwiesen. Dabei sollte schnell verfügbare Energie in Form von Zucker, Eiweiß oder Fett zugegeben werden. Gute Erfahrungen wurden mit Futtermelasse erzielt. So werden schnell organische Säuren gebildet, die das Futter konservieren (pH 4,0 bis 5,5). Die organischen Säuren lösen Zellwände der Zellulose und der Hemizellulose auf.

Die Hydrolyse erfolgt in einem gesonderten Fermenter bei Temperaturen über 50°C. Durch die hohe Temperatur wird die Ligninstruktur erweicht.

### **6.7.2 Bewertung**

Da im Gärrest Teile der Lignozellulose verbleiben, kann es nicht zu einem vollständigem Aufschluss kommen. Es wurden keine Angaben über die Ausbeute gemacht, so lässt es sich nicht mit anderen Methoden vergleichen. Durch die besondere bauliche Struktur kann keine bestehende Biogasanlage günstig umgerüstet werden. Das Konzept ist interessant, jedoch für die Nutzung bei bestehenden landwirtschaftlichen Anlagen nicht geeignet.

## **6.8 System der Firma Maxbiogas**

### **6.8.1 Beschreibung der Anlage**

Die Firma Maxbiogas forscht an einer Containeranlage zur Aufbereitung von ligninhaltigen Substraten für den Einsatz in der Biogasanlage. Das Verfahren ist in Anlehnung an den Holzaufschluss in der Papierindustrie konzipiert (Patent Streffer, 2010). Die Cellulose wird gelöst und anschließend wieder ausgefällt. Es soll ohne hohe Temperaturen und Druck

funktionieren. Weitere Informationen sind nicht bekannt.

### **6.8.2 Bewertung**

Es liegen zu wenig Informationen vor. Eine Anfrage nach den eingesetzten Chemikalien blieb erfolglos. Eine Bilanzierung der eingesetzten Chemikalien könnte die Effektivität dieser Methode bestätigen oder widerlegen. Die Behauptung, dass die Anwesenheit von Lignin die Vergärung störe, ist richtig. Die Ausmaße dieser Störung könnte jedoch im Bereich von 10% liegen. Die Biogasausbeute soll um bis zu 100% gesteigert werden. Eine Wertung dieses Verfahrens ist aufgrund mangelnder Fakten, welches wahrscheinlich dem Patentverfahren geschuldet ist, nicht möglich.

## **6.9 Aufschluss mit Harnstoff und Ammoniak**

### **6.9.1 Patent von L. Marienburg von 1985**

#### **6.9.2 Inhalt des Patent**

In einem Patent von Dr. Joachim Marienburg und Prof. Dr. Bergner von der Humboldt-Universität in Berlin aus dem Jahr 1985 wird ein Verfahren zur Herstellung eines Futtermittels aus Stroh beschrieben bei dem Harnstoff und Melasse eingesetzt wurden (Marienburg 1985).

Es wurden zum gehäckselten oder gemahlene Stroh 2 bis 15% Kohlenhydrate und 1 bis 15% Harnstoff zugegeben. Der Aufschluss mit Harnstoff erfolgt nasschemisch. Das Verfahren ist gut praktikabel, da die Zumischung der Stoffe direkt beim Häckseln erfolgen kann und die Mischung silierbar, d.h. lange lagerfähig ist.

#### **6.9.3 Bewertung**

Der Ansatz erscheint sehr interessant, doch auch hier werden große Mengen Harnstoff benötigt. Im Ausführungsbeispiel 1 wird das Stroh mit 6% Harnstoff versetzt. Damit liegt es in der gleichen Größenordnung wie der Aufschluss mit Natriumhydroxid. Der Energieverbrauch für die Herstellung eines kg Harnstoff ist um 70% höher als die

Erzeugung von 1kg Natriumhydroxid. Damit ist eine genauere Betrachtung dieses Aufschlusses nicht sinnvoll.

Zu untersuchen wäre, ob bei den geringen Konzentrationen an Harnstoff und Ammonium in Gülle ein Aufschluss von Stroh eintritt.

#### **6.9.4 Schlussfolgerungen**

Ein möglicher Ansatz für weitere Forschungen ist die Optimierung der Vergärung von Stroh in Kombination mit Schweine- oder Rindergülle, eventuell auch mit Geflügelmist. Eine Zerkleinerung ist erscheint dabei immer vorteilhaft zu sein.

Die Untersuchungen mit 2% igem Ammonium führten zu dem Ergebnis, dass 17,5% mehr Biogas gebildet wurden. Auch Behandlungen mit Harnstoff, in Versuchen 1 bis 15% (Marienburg, 1985) führten zu einer Verbesserung der Verdaubarkeit von Stroh als Tierfutter.

Es ist zu erwarten, dass eine Behandlung von Stroh mit Gülle einen positiven Effekt auf die Vergärbarkeit des Strohs hat.

Der Gehalt an Stickstoff beträgt bei Gülle etwa  $4\text{kg/m}^3$  davon sind ca. 50% Ammoniumstickstoff.

Damit liegt der Ammoniumgehalt bei ca. 0,2%. Der Harnstoffgehalt liegt auch höchstens in diesem Bereich. Die bekannten Untersuchungen wurden mit deutlich höheren Konzentrationen durchgeführt. Dennoch sind Versuche sinnvoll, um den Effekt von Gülle auf die Vergärbarkeit von Stroh zu untersuchen.

Die Wirkung einer vorhergehenden Zerkleinerung, wie häckseln oder Extrudieren sollte ebenfalls untersucht werden. So wird das Gemisch eventuell pumpfähig.

Es könnte geklärt werden, ob es durch das Mischen von Stroh und Gülle mit anschließender Lagerung zu einem Synergieeffekt kommt. In den gefundenen Studien wurde immer nur eine Komponente betrachtet und auf diese die Steigerung berechnet. Bei der Lagerung würde die Gülle zum Teil entgasen, so dass ein Auffangen der Gase notwendig ist.

## 6.10 Aufschluss durch Silieren

Vielversprechend ist der Ansatz, Stroh zu silieren. Die Firma Snow Leopard empfiehlt diese Methode. Durch die Zumischung von hochenergetischem Substrat wie Futtermelasse werde ein gutes Ergebnis erzielt.

Es scheinen aber keine wissenschaftliche Arbeiten über das Silieren von Stroh zum Einsatz in der Biogasanlage vorzuliegen.

Nach Aussage von Herrn Fischer, der Deutschen Melasse Handelsgesellschaft vom 08.03.2013, telefonisch, werden weltweit 4 Mio Tonnen Futtermelasse gehandelt. Es ist also auch in größeren Mengen verfügbar. Der Preis beträgt ungefähr 140€ pro Tonne. Das Problem ist dabei die Lagerung und Verarbeitung der Melasse, da sie flüssig und je nach Gehalt nur bei Temperaturen oberhalb 20°C pumpfähig ist. Sie wird zum Teil verdünnt verkauft, um die Pumpfähigkeit zu gewährleisten.

Als Bestandteil von Futtermitteln wird es meistens von den futtermittelverarbeitenden Betrieben eingemischt.

Melasse kann direkt beim Häckseln untergemischt werden.

Dieser Ansatz ist für weitere Forschungen sehr erfolgsversprechend. So wäre eine Vergärung von Gülle mit Stroh/Melassesilage eventuell günstiger als die Verwendung von Maissilage als Substrat.

Da nicht bekannt ist, zu welchen Anteilen Stroh und Melasse vergoren werden, ist keine Berechnung möglich.

Für Maissilage werden etwa 30€ pro Tonne gezahlt. Die Werte sind stark schwankend und regional sehr unterschiedlich.

Melasse mit einem Zuckergehalt von 40% führt zu einem Biogasertrag von 316 m<sup>3</sup>/T, wodurch sich der Einsatz allein nicht lohnt. Gemäß der oben ausgeführten Berechnung wären es etwa 40-50 €. Für die restlichen 100€ des Einkaufspreises müssten grob geschätzt etwa zwei Tonnen Stroh vergoren werden, bei einer Ausbeute von 150 m<sup>3</sup> je Tonne Stroh (entsprechend zerkleinertem Stroh). Ab einem Mischungsverhältnis von einem Teil Melasse und zwei Teilen Stroh kann dieses Verfahren lohnenswert sein.

Das Mischungsverhältnis muss experimentel ermittelt werden.

Durch Synergieeffekte könnte es für die Vergärung von Stroh sinnvoll sein.

In Verbindung mit Gülle, die zu einer geeigneten C/N-Verhältnis führt, lässt sich eine Ausbeute erwarten, die der Vergärung von Gülle und Maissilage gleich kommt.

Durch das Silieren kann das Häckseln als Zerkleinerung ausreichend sein. Damit wäre eine günstige Methode einsetzbar, die verfahrenstechnisch ausgereift ist. Je stärker die Zerkleinerung, desto höher ist der technische Aufwand und die Anfälligkeit des Systems.

Sinnvoll sind weitere Forschungen zur Vergärung von Stroh durch Silierung mit Melasse und Co-Vergärung mit Gülle bei mesophilen Bedingungen im einstufigen Prozess. Besonders die Reaktionskinetik ist von Interesse. Wenn durch den Einsatz von Strohsilage eine deutliche Verringerung der Maissilage erreicht wird, ist es gerade für hiesige Landwirtschaftliche Betriebe (in M-V) eine interessante Alternative. Als Alternative für die Melasse könnten auch Versuche mit Zuckerrübenschnitzeln durchgeführt werden.

### **6.11 Aufschluss mit Pilzen**

Der Ligninabbau kann durch Weißfäule-Pilze erfolgen. Es ist ein langsamer und energieintensiver Prozess. Problematisch ist die Zugabe von Pilzmyzel zum Fermenter. Eine Inaktivierung ist mit thermischer Energie möglich. In wie weit aus diesem Ansatz ein Verfahren für Biogasanlagen werden kann, ist ungewiss.

### **6.12 Geeignete Bakterienstämme**

Eine weitere Möglichkeit, die Vergärbarkeit von Stroh zu erhöhen, ist die Untersuchung von Bakterienstämmen. Durch den Einsatz einer speziell an die Vergärung von Stroh adaptierten Bakterienkolonie könnte die Vergärung von Stroh verbessert werden.

### **6.13 Schwefelgehalt im Fermenter**

Des Weiteren sind Untersuchungen in Hinblick auf den Schwefelgehalt von Stroh und die Auswirkungen auf die Vergärung sinnvoll. Eine Hemmung der Gärung erfolgt ab 50 bis 160mg/L abhängig von der Bindungsart des Schwefels.

Bei der Vergärung mit einem oTS-Gehalt von 10% und einem Schwefelgehalt von 0,04 bis

0,19% können pro Liter Gärflüssigkeit bis zu 19 mg Schwefel enthalten sein. Je nach Art der Bindung könnte es zu einer Beeinträchtigung der Gärung kommen. Auch die Funktion der Entschwefelung müsste betrachtet werden. Eine gesonderte Betrachtung des Einflusses von Schwefel auf den Gärprozess erscheint sinnvoll.

## **7 Vergleich der Ergebnisse von Chandra mit anderen Aufschlussmethoden**

Die Ausbeute von Chandra liegt mit 75 NL Methan pro kg oTS und 150 NL für behandeltes Stroh weit unter den in Europa gemessenen Werten von 160 NL/kg oTS bis 250 NL/kg oTS für zerkleinertes und hydrothermal behandeltes Stroh.

In dem Aufsatz fällt auf, dass im Text von 10% oTS bei der Vergärung gesprochen wird, im Abstract und einer Tabelle 4,45% oTS aufgeführt sind. Die entnommenen Werte sind pro Kilogramm oTS angegeben. Es besteht der Verdacht, dass die Werte fälschlicherweise auf 10% oTS berechnet wurden aber tatsächlich mit 4,45% oTS ermittelt wurden.

Durch eine Umrechnung werden dann Werte erzielt, die denen in Europa entsprechen, aus einem Kilogramm unbehandeltem (nur gemahlenen) Stroh wurden etwa 170 NL Methan erzeugt. Der Wert liegt in dem Bereich der Prall/Schnitzzerkleinerung mit 160 NL/kg Frischmasse, d.h. etwa 185 NL pro Tonne oTS.

Der Ertrag aus dem mit Natriumhydroxid behandeltem Stroh ist mit 345NL sehr hoch und entspricht etwa 80% der maximalen Ausbeute nach Bauer mit 436 NL CH<sub>4</sub> /kg oTS (Bauer et al 2010).

Durch die mechanischen Aufschlussmethoden werden etwa 35% und durch die Kombination hydrotherman/mechanisch (Extrusion bei 80°C) 57% erreicht.

So lässt sich auch nachvollziehen, warum Chandra von einer erfolgversprechenden Methode spricht.

Die Berechnung der Effizienz erfolgte mit den Werten von Chandra.

Werden die neu berechneten Werte eingesetzt, so wird nur die Hälfte des aufbereiteten Strohs und damit auch des Natriumhydroxids für die Produktion von 300m<sup>3</sup> Biogas benötigt. Pro Stunde ist ein Mehrertrag von 23€ bei Mehrkosten in Höhe von 3,60€ zu erwarten.

Energetisch betrachtet werden "nur" 30% der Mehrenergie für die Herstellung von

Natriumhydroxid benötigt.

Alle anderen bereits aufgeführten negativen Punkte bleiben bestehen, sodass die Anwendung dieser Methode als "grober Unfug" zu bewerten ist.

Durch die hydrothermische Behandlung kann eine Ausbeute von bis zu 250 NL/kg oTS erzielt werden. Das Verfahren mit dem beheizten Extruder ist gut durchführbar,

## **8 Vergleich von Biogaserzeugung und thermische Verwertung**

Der Heizwert von Stroh beträgt 4000kWh/T. Bei Berücksichtigung des Wirkungsgrades von etwa 30% elektrisch ergibt sich Strom von 1300kWh auf 1T Stroh (agrarplus 2013).

Das im Bau befindliche Strohkraftwerk BEKW Emlichheim, das mit moderner Feuerungstechnik gebaut wird, plant mit folgenden Parametern:

Jahresstrohverbrauch:75.000 T /a

Jahresstromerzeugung:56.000 MWh/a

Daraus folgt, dass pro Tonne Stroh 746 kWh Strom erzeugt werden. Das sind 57% des theoretischen Wertes.

Aus einer Tonne Stroh können durch mechanische Behandlung etwa 150 m<sup>3</sup> Methan, d.h. etwa 300m<sup>3</sup> Biogas entstehen, die pro Stunde 550 kWh erzeugen. Die Vergärung von Stroh erzielt also theoretisch eine Gasmenge, aus der elektrische Energie gewonnen werden kann, die 70% der Energie entspricht, die durch Verbrennung erreicht wird (bioenergie-emsland, 2013).

Die Vergärung von Stroh ist also sinnvoll auch bei Vergleich mit der Verbrennung von Stroh.

Auch wenn die Stromerzeugung aus Verbrennung das größere Potential bietet, ist diese Methode mit großem technischen Aufwand verbunden. Bei der Verbrennung von Stroh entstehende Salzsäure, Schwefelverbindungen und eine hohe Aschemenge fordern säurebeständige Materialien, Filtertechnik und technische Anpassungen.

Unter diesem Aspekt ist die Vergärung von Stroh eine weitere Möglichkeit Energie aus einem Koppelprodukt der Lebensmittelherstellung zu erzeugen.

## 9 Schlussfolgerung

Biogasanlagen sollten nachhaltig betrieben werden und nicht in Konkurrenz zur Nahrungsmittelherstellung stehen. Besonders sinnvoll ist der Einsatz von Abfallstoffen und Koppelprodukten. Stroh ist als Substrat in dieser Hinsicht sehr erstrebenswert. Die vorhandenen Forschungsergebnisse sind vielversprechend.

Dabei ist der Aufschluss von Stroh mit Natriumhydroxid aus Kosten- und Umweltgründen keine Option.

Die Verwendung von Abfallstoffen wie Gülle und Mist ist sinnvoll, da neben dem Biogasertrag auch der Gärrest besser auf den Acker auszubringen ist (bessere Nährstoffverhältnisse, weniger Geruchsbelästigung, weniger Belastung der Gewässer). Eine Vergärung von Stroh mit Gülle ist aufgrund des Kohlenstoff/Stickstoffverhältnisses eine gute Lösung. In der Praxis erfolgt die Vergärung von Gülle mit hohen Anteilen Maissilage, die nur für die Biogaserzeugung produziert oder angekauft wird.

Die landwirtschaftlichen Betriebe können unabhängiger von den Preisen für Maissilage werden oder auf den Flächen andere Pflanzen anbauen.

Für Betriebe, in denen viel Stroh anfällt, ist es sehr interessant, da keine Transportkosten anfallen und der Zukauf entfällt. So werden die Betriebe unabhängiger von Preissteigerungen bei zugekauftem Substrat. Auch die in der Öffentlichkeit kritisierte Maiswüste in Deutschland könnte so verringert werden.

Doch sind energie- und kostenintensive Vorbehandlungen von Stroh nicht angezeigt. Am sinnvollsten erscheint das Silieren von Stroh, welches weiter erforscht werden muss. Eine Zerkleinerung von Stroh ist ebenfalls sehr effektiv und führt zur besseren Handhabung von Stroh in der Anlage und zu einem schnelleren Aufschluss.



## 10 Literaturverzeichnis

### 10.1 Bücher, Broschüren, Arbeiten

- Beckmann, E.: Verfahren zur Herstellung eines Futtermittels aus Stroh durch Aufschließung desselben mit Alkalilauge. Reichspatentamt Deutsches Reich, DE 305641A, 1917
- Bensmann, M.: Stroh vergolden. In: Neue Energie, 2006, 3, 54-56
- Bergner, H., Marienburg, J.: Futtermittel für Wiederkäuer. Amt für Erfindungs- und Patentwesen der Deutschen Demokratischen Republik, DD 122922 A1, 1976
- Bergner, H., Marienburg, J. et al: Verfahren zur Herstellung eines neuen Schweinefuttermittels. Amt für Erfindungs- und Patentwesen der Deutschen Demokratischen Republik, DD 236873 A1, 1985
- Chandra, R., et al: Improving biodegradability and biogas production of wheat straw substrates using sodium hydroxide and hydrothermal pretreatments. In: Energy, 2012, 43, 273-282
- Feldmann, M.: Biogasanlage und Verfahren zur Erzeugung von Biogas aus ligninhaltigen nachwachsenden Rohstoffen, Weltorganisation für geistiges Eigentum, WO 2009000305A1, 2008
- Flachowsky, G.: Physikalische, chemische und biologische Methoden der Strohaufbereitung und Möglichkeiten der praktischen Nutzung. In: Wiss. Z. Karl-Marx-Univ Leipzig Math.-Naturwiss. R., 1987, 36, 232-247
- He, Y., Pang, Y., et al: Physicochemical Characterization of Rice Straw Pretreatment with Sodium Hydroxide in the Solid State for Enhancing Biogas Production. In: Energy & Fuels, 2008, 22, 2775-2781
- Kaltschmitt, M. (Hrsg.): Energie aus Biomasse. Berlin: Springer-Verlag, 2001
- Lehmann, F.: Verfahren zur Gewinnung hochverdaulicher Futtermittel aus Stroh, Rauhfutter aller Art, Reisig, Holz und Holzabfällen. Kaiserlich Königliches Patentamt Österreich, AT 8795 B, 1901
- Lüttge, U., Kluge, M.: Botanik. 6. Auflage. Augsburg: Himmer AG, 2012

- Marienburg, J. et al: Verfahren zum Naßaufschluß von Stroh. Amt für Erfindungs- und Patentwesen der Deutschen Demokratischen Republik, DD 237471 A1, 1985
- Maxbiogas GmbH: Energieeffiziente Vorrichtung zum Aufschluss von Cellulose. Deutsches Patent- und Markenamt, DE 102010006609A1, 2010
- Op den Camp, H., et al: Effects of lignin on the anaerobic degradation of (ligno) cellulosic waste by rumen microorganisms. In: Applied Microbiology and Biotechnology, 1988, 29, 408-412
- Pächtner, J.: Verfahren zur Herstellung eines Futtermittels aus Stroh. Reichspatentamt Deutsches Reich, DE 338920 A, 1918
- Piatkowski: Aufschluss von Getreidestroh mit Natronlauge. In: Archiv für Tierernährung, 1977, 7, 460
- Strasburger, E., et al: Lehrbuch der Botanik. 35.Auflage. Heidelberg: Spektrum, Akademischer Verlag, 2002
- Schilling, G.: Pflanzenernährung und Düngung. Stuttgart: Verlag Eugen, 2000
- Veredlungsgesellschaft für Nahrungs- und Futtermittel GmbH Bremen (VNF): Verfahren zur Herstellung eines Futtermittels aus Stroh oder sonstigen ähnlich zusammengesetzten Stoffen. Reichspatentamt Deutsches Reich, DE 336484 A, 1918 (a)
- Veredlungsgesellschaft für Nahrungs- und Futtermittel GmbH Bremen (VNF): Verfahren zum Aufschließen von Stroh (z.B. von Getreide, Hülsenfrüchten, Ölfrüchten) oder ähnlichen, durch ihren Rohfasergehalt charakterisierten Stoffe. Reichspatentamt Deutsches Reich, DE 324893 A, 1918 (b)
- Veredlungsgesellschaft für Nahrungs- und Futtermittel GmbH Bremen (VNF): Verfahren zur Herstellung eines Futtermittels aus Stroh (z.B. von Getreide oder Hülsenfrüchten) durch Aufschließung desselben in zerkleinertem Zustande. Reichspatentamt Deutsches Reich, DE 335155 A, 1918 (c)
- [http://ec.europa.eu/food/fs/sc/scan/cv/cv\\_flachowski\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/food/fs/sc/scan/cv/cv_flachowski_en.pdf)

## 10.2 Internet

- Grubertabelle zur Fütterung der Milchkühe 26.Auflage 2005  
[http://www.lfl.bayern.de/publikationen/daten/informationen\\_url\\_1\\_2.pdf](http://www.lfl.bayern.de/publikationen/daten/informationen_url_1_2.pdf) 14.02.2013  
 9:30 Uhr
- <http://www.probas.umweltbundesamt.de> 24.02.2013 14:30 Uhr
- Borgström, Y.: Pretreatment technologies to increase the methane yields by anaerobic digestion in relation to cost efficiency of substrate transportation, Master Thesis [http://www.promeco.it/pdf/biogas\\_extrusion\\_tesi.pdf](http://www.promeco.it/pdf/biogas_extrusion_tesi.pdf) 10.01.2013 14:20 Uhr
- [http://de.wikibooks.org/wiki/Tabellensammlung\\_Chemie/\\_Enthalpie\\_und\\_Bindungsenergie](http://de.wikibooks.org/wiki/Tabellensammlung_Chemie/_Enthalpie_und_Bindungsenergie) 10.01.2013 15:00 Uhr
- <http://www.iwr.de/bio/biogas/Checkliste-Biogas-Anlage.html> 09.01.2013 9:30Uhr
- <http://www.agrarplus.at/heizwerte-aequivalente.html> 12.02.2013 19:30 Uhr
- <http://www.maxbiogas.com> 10.01.2013 12:40 Uhr
- <http://www.baliccompass.com> 05.03.2013 13:20 Uhr
- <http://www.snow-leopard-projects.com> 14.02.2013 8:45 Uhr
- <http://www.bioenergie-emsland.de> 05.03.2013 11:15 Uhr
- Schumacher, B.: Untersuchungen zur Aufbereitung und Umwandlung von Energiepflanzen in Biogas und Bioethanol [http://opus.ub.uni-hohenheim.de/volltexte/2008/316/pdf/SchumacherB\\_Dissertation2008\\_Druckversion.pdf](http://opus.ub.uni-hohenheim.de/volltexte/2008/316/pdf/SchumacherB_Dissertation2008_Druckversion.pdf) 20.01.2013 10:20Uhr
- Pacan, B., Dröge, S.: Stoffliche und energetische Nutzung von Stroh, [http://pfi-biotechnology.de/uploads/media/Stoffliche\\_und\\_energetische\\_Nutzung\\_von\\_Stroh\\_01.pdf](http://pfi-biotechnology.de/uploads/media/Stoffliche_und_energetische_Nutzung_von_Stroh_01.pdf)
- Reinhold, G., Friedrich, E.: Vergärung von Stroh Stand und Perspektiven [http://www.fnr-server.de/cms35/fileadmin/allgemein/pdf/veranstaltungen/Strohenergie2012/Tag2\\_08\\_Reinhold-freigegeben.pdf](http://www.fnr-server.de/cms35/fileadmin/allgemein/pdf/veranstaltungen/Strohenergie2012/Tag2_08_Reinhold-freigegeben.pdf) 04.03.2013 13:10Uhr
- <http://vethis.de/index.php?zwischenstopp> 04.03.2013 16:50 Uhr (vethis, 2013)

## 11 Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen

### 11.1 Abbildungen

Abb.	Seite	Name	Quelle und Datum
1	9	Entstehung von Biogas	<a href="http://www.schaumann-bioenergy.eu/images/contentpics/biogasproduktion/entstehung_biogas.gif">http://www.schaumann-bioenergy.eu/images/contentpics/biogasproduktion/entstehung_biogas.gif</a> 04.03.2013 17:20Uhr

### 11.2 Tabellen

Tab.	Seite	Name	Quelle und Datum
1	25	Aufstellung der Vergleichswerte	eigene Tabelle

## Erklärung über die selbstständige Anfertigung der Arbeit

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

Prillwitz, 11.03.2013

---