



Hochschule Neubrandenburg  
University of Applied Sciences

Fachbereich Agrarwirtschaft und Lebensmittelwissenschaften  
Fachgebiet: Futtermittelanalytik

**Studienarbeit zur Erlangung des akademischen Grades  
Bachelor of Science**

„Untersuchungen zum Gasbildungsvermögen verschiedener  
Zucker- und Futterrübensorten im Vergleich zu Mais“

von: Stephan Wendt

urn:nbn:de:gbv:519-thesis 2011 - 0293 - 6

1. Gutachter: Professorin Dr. Anke Schuldt

2. Gutachter: Dr. Regina Dinse

29.07.2011

## Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis.....	4
Abbildungsverzeichnis.....	5
Tabellenverzeichnis.....	6
Abstract.....	7
1. Einleitung.....	8
1.1 Problemstellung und Zielsetzung.....	8
2. Literaturteil.....	11
2.1 Biogas.....	11
2.2 Phasen der anaeroben Fermentation.....	12
2.3 Milieubedingungen.....	14
2.4 Verwendungsmöglichkeiten.....	16
2.5 Substrate.....	16
2.6 Zucker- und Futterrüben.....	17
2.7 Sortenbeschreibung.....	17
2.8 Zuckerrüben.....	18
2.9 Futterrüben.....	19
2.10 Silierung von Zucker- und Futterrüben.....	19
2.11 Prozesse während der Silierung.....	19
2.12 Besonderheit bei der Vergärung von Rüben im Silo.....	21
2.13 Methode zur Bewertung von Substraten hinsichtlich Biogas-/ Methanbildungs- potenzial nach WEISSBACH.....	21
2.14 Grundzüge der Methode.....	22
2.15 Ermittlung der fermentierbaren organischen Trockensubstanz von Mais und Zuckerrüben.....	23
2.16 Korrektur des Trockensubstanzgehaltes von Mais- und Zuckerrübensilagen als Substrat zur Energieerzeugung in Biogasanalgen.....	24
2.17 Berechnung des Gasbildungsvermögens von Mais- und Zuckerrübensilagen.....	28
3. Material und Methoden.....	29
3.1 Ertragsschätzung von Zucker- und Futterrüben.....	29
3.2 Laborsilierung von Zucker- und Futterrüben.....	30
3.3 Probenvorbereitung der Silagen.....	31
3.4 Bestimmung der Inhaltsstoffe von Zucker- und Futterübensilagen.....	31

4.	Ergebnisse .....	36
4.1	Gasbildungsvermögen von Zucker- und Futterrübensilagen .....	36
4.1.1	Nährstoffgehalt der Zucker- und Futterrübensilagen .....	36
4.1.1.1	Trockensubstanzgehalt .....	36
4.1.1.2	Fermentierbare organische Trockensubstanz .....	37
4.1.1.3	Rohfasergehalt .....	38
4.1.1.4	Rohaschegehalt .....	39
4.1.1.5	Ethanol .....	40
4.1.1.6	Milchsäure .....	41
4.1.1.7	Essigsäure .....	43
4.1.2	Gasbildungsvermögen von Zucker- und Futterrübensilagen .....	44
4.1.2.1	Gasbildungsvermögen von Zucker- und Futterrübensilagen je kg TS .....	44
4.1.2.2	Gasbildungsvermögen je Tonne FM von Zucker- und Futterrübensilagen .....	45
4.1.2.3	Gasbildungsvermögen je Hektar der Zucker- und Futterrübensilagen .....	46
4.2	Vergleich des Gasbildungsvermögens von Mais-, Zucker- und Futterrübensilagen ....	48
4.2.1	Vergleich des Gasbildungsvermögens je kg TS von Mais-, Zucker- und Futterrübensilagen .....	48
4.2.2	Gasbildungsvermögen je Tonne FM von Maissilagen im Vergleich zu Zucker- und Futterrübensilagen .....	49
4.2.3	Gasbildungsvermögen je Hektar von Maissilagen im Vergleich zu Zucker- und Futterrübensilagen .....	50
5.	Diskussion .....	52
5.1	Korrigierte Trockensubstanz, fermentierbare organische Trockensubstanz, Rohfaser und Rohasche der Zucker- und Futterrübensilagen .....	52
5.2	Gehalte an Ethanol, Milchsäure und Essigsäure in Zucker- und Futterrübensilagen ...	53
5.3	Gas- und Methanbildungsvermögen von Mais, Zucker- und Futterrüben .....	55
6.	Schlussfolgerung und Ausblick .....	58
7.	Zusammenfassung .....	59
	Literaturverzeichnis .....	61
	Anhang .....	63
	Selbstständigkeitserklärung .....	67

## Abkürzungsverzeichnis

BSL	Beschreibende Sortenliste
bzw.	beziehungsweise
C	Konzentration
ca.	circa
C/N	Kohlenstoff/Stickstoff
DLG	Deutsche Landwirtschaftsgesellschaft e.V.
d. h.	das heißt
EEG	Erneuerbare Energien Gesetz
FM	Frischmasse
FoTS	Fermentierbare organische Trockensubstanz
FXC	Fermentierbare Rohkohlenhydrate
g	Gramm
ha	Hektar
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Schwefelsäure
i. d. R.	in der Regel
kg	Kilogramm
l	Liter
m <sup>3</sup>	Kubikmeter
MSB	Milchsäurebakterien
NADP	Nicotinsäureamid-Adenin-Dinukleotid-Phosphat
NaOH	Natronlauge
nm	Nanometer
T/ TS	Trockenmasse-/ substanz
TSk	Trockensubstanz korrigiert
TSn	Trockensubstanz normal
XA	Rohasche
XC	Rohkohlenhydrate
XF	Rohfaser
XL	Rohfett
XP	Rohprotein
XX	Stickstoff-freie Extraktstoffe
z. B.	zum Beispiel
z.T.	zum Teil

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Statistische Reichweiten nicht erneuerbarer Energieträger.....	8
Abbildung 2: Anteil Erneuerbare Energien am Energieverbrauch in Deutschland.....	9
Abbildung 3: Entwicklung der Anzahl Biogasanlagen und der gesamten installierten elektrischen Leistung in Megawatt .....	10
Abbildung 4: Schematische Darstellung des anaeroben Abbaus.....	13
Abbildung 5: Konzentration an potenziell flüchtigen Gärprodukten in Maissilagen.....	25
Abbildung 6: Flüchtigkeitsquote von Gärsäuren aus Maissilagen .....	25
Abbildung 7: Flüchtigkeitsquote von Alkoholen aus Maissilagen .....	25
Abbildung 8: Gehalt an Zucker und flüchtigen Gärprodukten in silierten Zuckerrüben .....	27
Abbildung 9: Rübenschnitzler .....	30
Abbildung 10: zerkleinerte Rüben.....	30
Abbildung 11: Verdichten des Siliergutes .....	30
Abbildung 12: Verschließen und wiegen der Gläser .....	30
Abbildung 13: Filtratur des Extraktes .....	31
Abbildung 14: Trockensubstanzgehalte der Zucker- und Futterrübensilagen.....	37
Abbildung 15: FoTS der Zucker- und Futterrübensilagen .....	38
Abbildung 16: Rohfasergehalte der Zucker- und Futterrübensilagen .....	39
Abbildung 17: Rohaschegehalte der Zucker- und Futterrübensilagen.....	40
Abbildung 18: Ethanolgehalte der Zucker- und Futterrübensilagen .....	41
Abbildung 19: Milchsäuregehalte der Zucker- und Futterrübensilagen .....	42
Abbildung 20: Essigsäuregehalte der Zucker- und Futterrüben .....	43
Abbildung 21: Gasbildungsvermögen von Zucker- und Futterrübensilagen .....	45
Abbildung 22: Gasbildungsvermögen je t FM von Zucker- und Futterrübensilagen .....	46
Abbildung 23: Gasbildungsvermögen je Hektar von Zucker- und Futterrübensilagen .....	47
Abbildung 24: Gasbildungsvermögen je kg TSk von Zucker- und Futterrübensilagen im Vergleich zu Maissilagen .....	49
Abbildung 25: Vergleich des Gasbildungsvermögens je Tonne FM von Mais, Zucker- und Futterrübensilagen .....	50
Abbildung 26: Vergleich des Gasbildungsvermögens je Hektar von Mais, Zucker- und Futterrübensilagen .....	51

**Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Durchschnittliche Zusammensetzung von Biogas .....	13
Tabelle 2: Durchschnittliche Nährstoff-, Biogas- und Methangehalte der Maissilagen .....	48
Tabelle 3: zusätzlicher Gasertrag aus dem Restzucker .....	56

## Abstract

Nowadays in Germany operated approximately 6.800 biogas plants to produce energy. The mainly used substrate is maize. The growing cultivation of maize could be bringing some problems in the future. Therefore we need alternative plants for biogas plants.

The following examination will constitute the different gas production potential of some varieties of sugar- and forage beets silages. The results will be comparing with the results of maize. Furthermore the examination should show, if it is helpful to use the leaf in the biogas plant or not.

For this investigation it was used four varieties of sugar beets and two of forage beets. The beets were harvested, cleaned and ensiled under laboratory conditions, with and without leaf. After approximately six month, the silages were controlled about weight loss and two samples of every varieties and variation were opened and evaluated of dry matter, raw fibre, raw ash, ethanol, lactic acid, acetic acid and residual sugar.

A new method was used to evaluate the results. WEISSBACH (2008) developed a formula, which is the content of "fermentable organic dry matter". Because only the fermentable part of dry matter is able to form biogas. In the past usually it was used only the organic dry matter to calculate the yield of gas production potential of crops.

Furthermore the new method corrected the dry matter, if the substrates were ensiled. During the ensiling process it develops volatiles, which are able to form biogas.

With this new method the yields of gas production potential can be calculate more accurate than before.

A result of this investigation is, that sugar- and forage beets silages has more gas production potential as maize silage, if it is based on the surface of one hectare. But the more important aspect is that maize has the greatest biogas potential, if it based on the ton of silage in a biogas plant.

In the choice of varieties, it should use the sugar beet variety "Lukas" and the forage beet "Kyros". They are the greatest potential of biogas production of the beets.

Finally it can be said, that sugar- and forage beets cannot replace the maize in a biogas plant but they are able to supplement it.

Furthermore leaf shouldn't use in a biogas plant because they reduce the biogas production potential of sugar- and forage beets silages.

## 1. Einleitung

### 1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Das Erdöl- bzw. Erdgaszeitalter scheint zu Ende zu gehen. Setzen wir unseren heutigen Verbrauch bei den zur Zeit möglichen Fördermethoden weiter fort, werden die Erdölreserven voraussichtlich in etwa 40 Jahren und die Erdgasvorräte in etwa 60 Jahren versiegen. Über die zeitlichen Angaben herrscht Uneinigkeit bei den Fachleuten. Unter Einbezug technisch verfügbarer Ressourcen, das heißt bei Erschließung von nicht konventionellen Quellen wie z.B. Ölschiefer oder Ölsanden, läge die Verfügbarkeit von Erdöl bei etwa 140 Jahren. Die Verfügbarkeit von Erdgas wäre sogar noch etwa 580 Jahren sicherzustellen, würden die nicht konventionell geförderten Ressourcen berücksichtigt, die aus großen Tiefen mit spezieller Technik geborgen werden. Die Förderung nicht konventioneller Ressourcen ist bislang jedoch nur unter sehr hohen finanziellen Kosten zu gewährleisten und würde die Nutzbarkeit von z.B. Erdöl und Erdgas unter Umständen um nur wenige Jahrzehnte verlängern. Hinzu kommt, dass bei der Verbrennung fossiler organischer Energieträger das ozonschädliche Treibhausgas Kohlendioxid freigesetzt wird. Die Konsequenz daraus ist ein stetiger Temperaturanstieg und somit eine globale Erwärmung mit nicht absehbaren Folgen für die Menschheit auf dieser Erde. Somit scheint, dass auch der Energieträger Kohle, dem eine theoretische Verfügbarkeit von mehr als 1000 Jahren nachgesagt wird, ebenfalls keine Zukunftsperspektive mehr hat. Unten aufgeführte Abbildung stellt die statischen Reichweiten nicht erneuerbarer Energieträger graphisch dar.

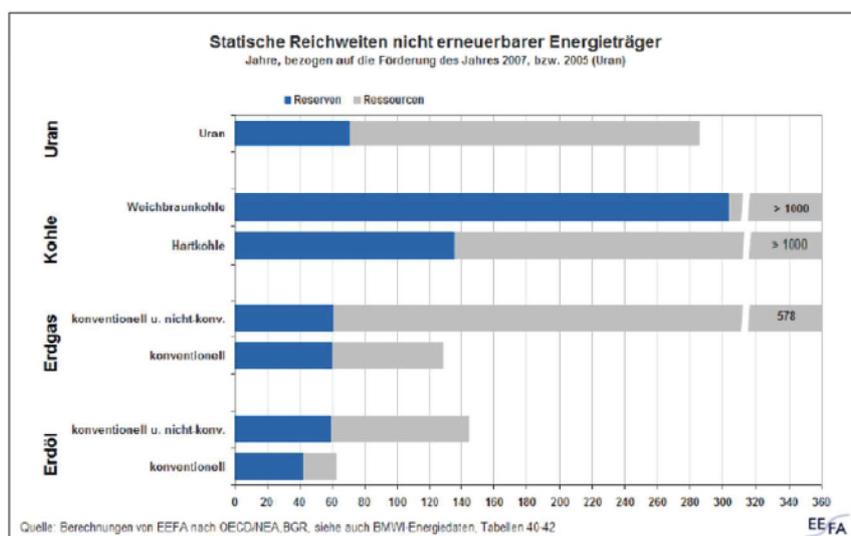


Abbildung 1: Statistische Reichweiten nicht erneuerbarer Energieträger (POPP, 2011)

Somit gewinnt die Energiebereitstellung aus nachwachsenden Rohstoffen, vor dem Hintergrund der knapper werdenden fossilen Reserven sowie den ozonschädigenden Einwirkungen, weiter an Bedeutung. Auf der Grundlage des Erneuerbaren-Energien-Gesetz (EEG) und den daraus resultierenden finanziellen Förderungen, hat die Regierung der Bundesrepublik Deutschland das Ziel definiert, den Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromversorgung bis 2020 von bislang etwa 11 % auf 20 % zu erhöhen. Die Energieerzeugung aus Biomasse trägt bislang hierbei mit etwa 8 % den größten Anteil dazu bei (EEG IN ZAHLEN 2010, 2011). Die folgende Abbildung verdeutlicht die Verteilung der einzelnen Energieträger in Deutschland.

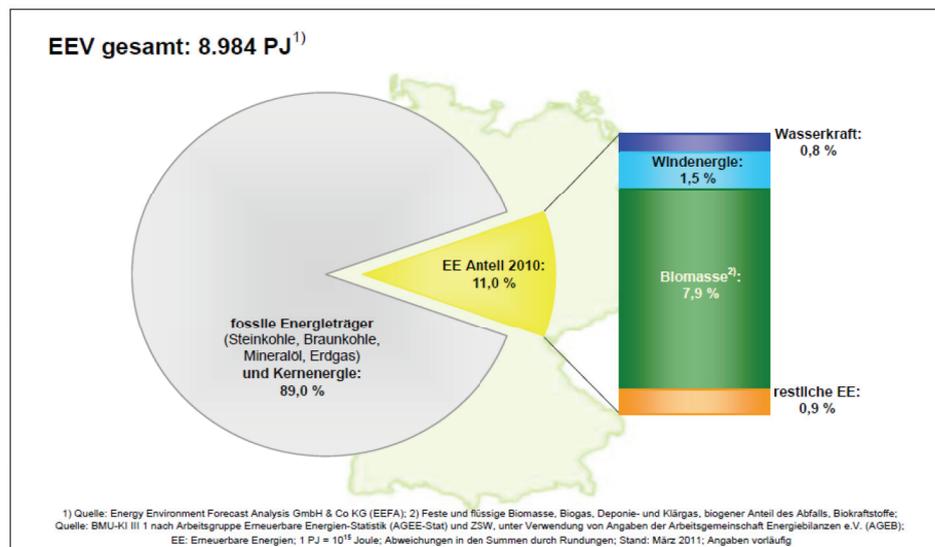


Abbildung 2: Anteil Erneuerbare Energien am Energieverbrauch in Deutschland

(EEG IN ZAHLEN 2010, Stand März 2011)

Vor diesem Hintergrund stieg die Zahl der neu errichteten Biogasanlagen seit der letzten EEG – Novellierung in 2009 von 4.984 auf heute prognostizierte 6.800 Anlagen noch einmal deutlich an. Dies entspricht einer Steigerung von 34 %. Mit einer installierten Leistung von 2559 MW, was einem Anteil am Stromverbrauch in Deutschland von 3 % entspricht, werden derzeit 4.9 Mio. Haushalte mit Biogasstrom versorgt (FACHVERBAND BIOGAS e.V., 2011). Die folgende Abbildung stellt die zeitliche Entwicklung der neu errichteten Biogasanlagen in Deutschland sowie deren installierte Leistung in Megawatt von 1992 bis 2011 graphisch dar.

### Entwicklung der Anzahl Biogasanlagen und der gesamten installierten elektrischen Leistung in Megawatt [MW] (Stand: 11/2010)

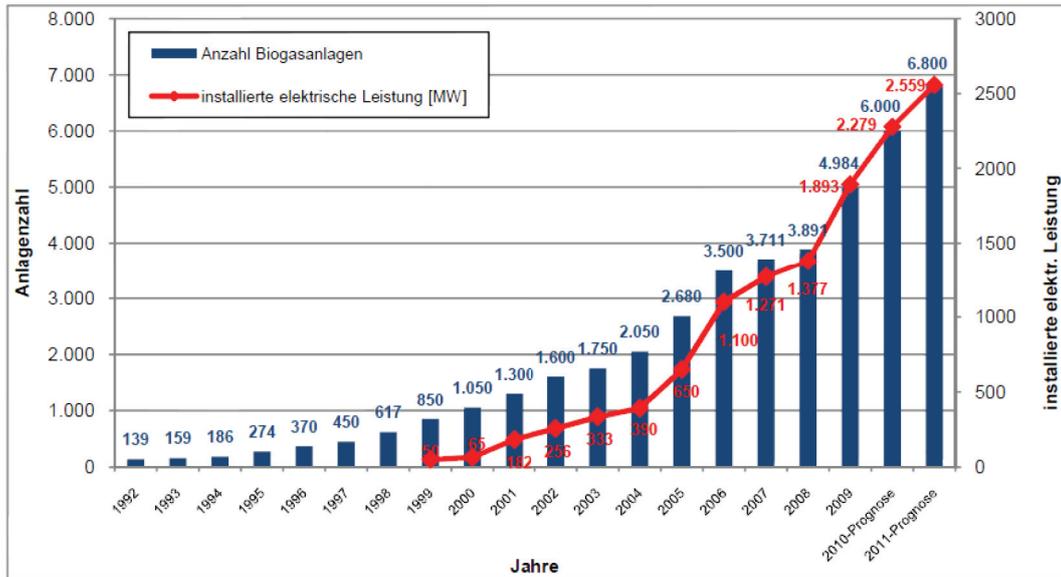


Abbildung 3: Entwicklung der Anzahl Biogasanlagen und der gesamten installierten elektrischen Leistung in Megawatt

(FACHVERBAND BIOGAS e.V., 2011)

Als Substrat kommen überwiegend tierische Exkremente und nachwachsende Rohstoffe zum Einsatz. Hierbei dominiert mit 76 % der Einsatz von Maissilagen (PROPLANTA, 2011). Um diesen relativ hohen Anteil bereitstellen zu können, wird es in 2011 notwendig sein, auf etwa 650.000 Hektar Mais als Ausgangssubstrat für Biogasanlagen anzubauen. Dies entspricht in etwa 27 % der gesamten Maisanbaufläche und 4 % der Landwirtschaftlichen Nutzfläche in Deutschland (DEUTSCHES MAISKOMITEE e.V., 2011). Dieser Anteil scheint nicht sehr hoch zu sein, jedoch birgt der punktuelle Anbau von Mais in einigen Regionen Deutschlands auch Risiken. Das ist insbesondere dann der Fall, wenn die Grundsätze der „guten fachlichen Praxis“ nicht berücksichtigt werden und es zum Anbau von Mais in Monokultur kommt. Die negativen Auswirkungen reichen von der Häufung diverser Maiskrankheiten, über die Etablierung von tierischen Schädlingen, bis hin zum vermehrten Humusabbau im Boden. Weiterhin führt der steigende Maisanbau, der durch die Öffentlichkeit wahrgenommen wird, im zunehmenden Maße zu Akzeptanzproblemen in der Bevölkerung. Auch wenn der Mais über hervorragende Eigenschaften verfügt, wie z.B. hohe Trockenmassegehalte und Energieerträge, ist es aufgrund der angeführten Auswirkungen langfristig zwingend notwendig, alternative Substrate zur Energiegewinnung zu finden. Mögliche Kulturpflanzen, die als Rohstoff für die Biogasanlage dienen könnten, sind die Zucker- oder Futterrüben. Aufgrund der hohen Masseerträge je Hektar und den teilweise

hohen Zuckergehalten scheinen diese als Ausgangssubstrate für die Bioenergiegewinnung geeignet zu sein.

Das Ziel der vorliegenden Bachelorarbeit ist es, anhand von Laboruntersuchungen die potentiellen Biogas- und Methanerträge verschiedener Zucker- und Futterrübensorten zu ermitteln, und denen von Maissilagen, die ebenfalls im Labor ermittelt wurden, gegenüber zu stellen. Weiterhin soll festgestellt werden, ob der Einsatz von Futterrüben als Substrat für die Biogasanlage sinnvoll ist und eine Silierung mit oder ohne Blatt erfolgen sollte.

## **2. Literaturteil**

### **2.1 Biogas**

Biogas ist ein brennbares Gas, das sich in der Natur dann bildet, wenn organische Substanzen unter Sauerstoffabschluss vergären oder verfaulen (Abbau unter anaeroben Bedingungen). Verantwortlich dafür sind Bakterien, die ohne Sauerstoff leben können. Diese Prozesse finden z.B. in Mooren und Sümpfen, auf Mülldeponien und vor allem im Pansen der Wiederkäuer statt. Die Entstehung von Biogas unter Zusatz von Sauerstoff erfolgt u.a. bei Verbrennungs- oder Verrottungsvorgängen. Hierbei handelt es sich um Abbauvorgänge unter aeroben Bedingungen.

Auch das in der Biogasanlage hergestellte Biogas ist das Produkt eines Vergärungsprozesses, der unter anaeroben Bedingungen abläuft. Das gebildete Gasgemisch besteht zu ca. zwei Dritteln aus Methan und ca. einem Drittel aus Kohlendioxid. Daneben befinden sich im Biogas noch geringe Mengen an Wasserstoff, Schwefelwasserstoff, Ammoniak und andere Spurengase. Jedoch ist der Anteil an Begleitbestandteilen in der Regel eher gering (FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE e.V., 2009).

Der biotechnologische Prozess der anaeroben Fermentation läuft nach heutigem Kenntnisstand in vier Teilschritten ab und benötigt dafür spezielle Bakterienstämme und Milieubedingungen.

## 2.2 Phasen der anaeroben Fermentation

Die anaerobe Vergärung von organischen Substanzen findet in vier voneinander abhängigen Phasen statt. Hierbei handelt es sich um die Hydrolyse, Acidogenese, Acetogenese und Methanogenese.

In der ersten Phase, der „Hydrolyse“, werden die langkettigen organischen Verbindungen des Ausgangssubstrates wie Kohlenhydrate, Proteine und Lipide durch bakterielle Enzyme in kurzkettige Bestandteile, wie Glucose, Aminosäuren und Fettsäuren gespalten. Die Hydrolysephase bestimmt in der Regel die Geschwindigkeit des Abbaus gärstoffhaltiger Substrate. Die in der Hydrolysephase gelösten Stoffe werden in der Versäuerungsphase, der „Acidogenese“, durch säurebildende Bakterien weiter zu niederen Fettsäuren wie Essig-, Propion- und Buttersäure, niederen Alkoholen, Aldehyden, Wasserstoff, Kohlendioxid, Ammoniak und Schwefelwasserstoff abgebaut. Bei diesem Prozess sinkt der pH-Wert aufgrund der entstehenden Abbauprodukte, sodass der Vorgang nur so lange ablaufen kann, wie die Bakterien nicht durch den niedrigen pH- Wert gehemmt werden. In einer weiteren Phase, der „Acetogenese“ erfolgt die Essigsäurebildung aus den Stoffwechselprodukten der Acidogenese. Diese Phase gilt auch als das Bindeglied zwischen der Versäuerung und der Methanisierung, da hierbei die Abbauprodukte aus der Versäuerungsphase durch acetogene Bakterien in Essigsäure, Wasserstoff und Kohlendioxid, den Vorläufersubstanzen des Biogases, umgewandelt werden. Zu bemerken ist hierbei, dass ein zu hoher Gehalt an Wasserstoff negative Auswirkungen für die Bakterien der Essigsäurebildung haben kann. Daher findet dieser Abbauprozess in enger Symbiose zwischen den Bakterien der Essigsäurebildung und den Bakterien der Methanbildung statt, da diese während der Methanbildung den Wasserstoff verbrauchen und somit für angemessene Lebensbedingungen für die acetogenen Bakterien sorgen. Abschließend erfolgt die Methanbildungsphase „Methanogenese“. Es werden dabei Essigsäure, Wasserstoff und Kohlendioxid von methanogenen Bakterien zu Methan umgesetzt

(KARPENSTEIN-MACHAN, 2005).

Das aufgeführte Schema verdeutlicht den anaeroben Abbauprozess von organischem Ausgangssubstrat.

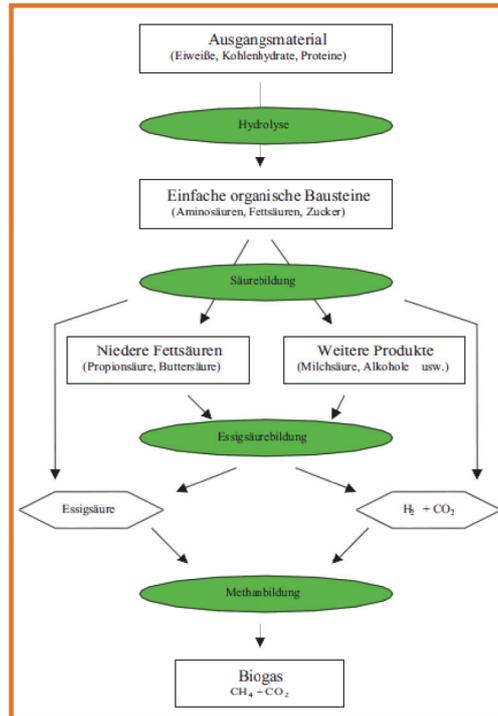


Abbildung 4: Schematische Darstellung des anaeroben Abbaus  
(FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE e.V., 2009)

Das während des Vergärungsprozesses entstandene Gas ist ein Gemisch, das in Tabelle 1 näher bestimmt ist. Diese Konzentrationen, insbesondere die des Methans, sind in gut geführten Biogasanlagen im Durchschnitt zu realisieren. Voraussetzung dafür ist jedoch die Schaffung und Einhaltung optimaler Milieubedingungen in den Fermentern der Biogasanlage (FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE e.V., 2009).

Tabelle 1: Durchschnittliche Zusammensetzung von Biogas  
(FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE e.V., 2009)

Bestandteil	Konzentration
Methan (CH <sub>4</sub> )	50-75 Vol. %
Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> )	25.45 Vol. %
Wasser (H <sub>2</sub> O)	2-7 Vol. % (20-40 °C)
Schwefelwasserstoff (H <sub>2</sub> S)	20-20000 ppm
Stickstoff (N <sub>2</sub> )	< 2 Vol. %
Sauerstoff (O <sub>2</sub> )	< 2 Vol. %
Wasserstoff (H <sub>2</sub> )	< 1 Vol. %

## 2.3 Milieubedingungen

Um die Milieubedingungen in den Fermentern zu beschreiben, ist es erforderlich, zwischen der Trocken- und Nassfermentation zu unterscheiden. Der Unterschied liegt hierbei im Wassergehalt der Ausgangssubstrate als mehr oder weniger homogene Mischung im Gärbehälter der Biogasanlage. Das heißt, entscheidend ist nicht der Trockenmassegehalt der einzelnen Substrate, sondern die Substratmischung. Jedoch ist zu erwähnen, dass beide Arten der Fermentation in Biogasanlagen im wässrigen Milieu ablaufen, sodass sich die Differenzierungen ausschließlich auf die Trockenmassegehalte des Substratgemisches in den Fermentern beziehen und mit dem eigentlichen Prozess der Biogasbildung nicht in Verbindung zu bringen sind. Von einer Nassfermentation wird gesprochen, wenn der Trockenmassegehalt, des zu vergärenden Ausgangsmaterials, zwischen 12-15 % liegt, sodass der Inhalt noch pumpbar ist. Um eine Trockenfermentation handelt es sich, wenn der Trockenmassegehalt auf über 16 % ansteigt und nicht mehr mit einer Pumpe gefördert werden kann. Anlagen, die über eine Nassfermentation verfügen, sind nach Angaben der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. in Deutschland weiter verbreitet als Anlagen mit einer Trockenfermentation. Daher beziehen sich die weiteren Angaben zur Milieubedingungen auf die Verfahren der Nassfermentation.

Eine wichtige Bedingung im Prozess der Methanbildung ist der Ausschluss des Sauerstoffs während der Fermentation. Methanbildungsbakterien sind auf eine Lebensumgebung angewiesen, die weitestgehend sauerstofffrei sein muss. Viele Bakterien dieser Art sind jedoch in der Lage wenige Mengen an Sauerstoff zu tolerieren, ohne sofort in ihrer Aktivität gehemmt zu werden. Ermöglicht wird dieses durch eine Symbiose mit fakultativ anaerob lebenden Bakterien aus weiteren Schritten im Zersetzungsprozess, sodass diese sowohl ohne Sauerstoff als auch unter Sauerstoffeinfluss überleben und diesen verbrauchen, bevor er Bakterien schädigt, die zwingend auf eine sauerstofffreie Umgebung angewiesen sind.

Ein weiterer Parameter ist der Anspruch der Bakterien an die Temperatur. Grundsätzlich ist bekannt, dass chemische Reaktionen umso schneller ablaufen, je höher die Umgebungstemperatur ist. Jedoch ist dies aufgrund der Verschiedenartigkeit der am Abbauprozess beteiligten Bakterien nicht generell übertragbar und es erfolgt entsprechend der jeweiligen Temperaturoptima eine Einteilung in die Gruppen der psychrophilen, mesophilen und thermophilen Bakterien. Psychrophile Bakterien bevorzugen für ihre Aktivitäten Temperaturen bis 25°C, jedoch fällt aufgrund der relativ geringen Temperaturanforderung auch die Abbauleistung und somit auch die Gasproduktion sehr gering aus. Eine Vielzahl der methanbildenden Bakterien hat sein Wachstumsoptimum im

mesophilen Bereich, der zwischen 32 und 42°C liegt. Hierbei werden bei guter Prozessstabilität relativ hohe Gasausbeuten erzielt. Die höchste Gasausbeute kann durch Bakterien erzielt werden, deren Temperaturoptimum im thermophilen Bereich zwischen 50 und 75 °C liegt. Der Einsatz dieser Kulturen empfiehlt sich, wenn das Substrat z.B. einer Hygienisierung unterzogen werden soll und es deshalb mit einer höheren Temperatur dem Prozess zugeführt wird (FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE e.V., 2009).

Die Differenzierung hinsichtlich der individuellen Bedingungen einzelner am Zersetzungsprozess beteiligten Bakterien setzt sich mit dem pH-Wert weiter fort. So liegt der optimale pH-Wert der Hydrolyse- und Säurebildner-Bakterien in einem Bereich von 4,5 bis 6,3 (KARPENSTEIN-MACHAN, 2005). Jedoch vertragen sie, wie auch schon beim Sauerstoffabschluss beschrieben, kurzzeitig höhere pH-Werte, ohne wesentliche Aktivitätseinbußen zu verzeichnen. Die methan- und essigsäurebildenden Bakterien benötigen jedoch zwingend einen pH-Wert, der im neutralen Bereich zwischen 6,8 bis 7,5 liegen soll. Aufgrund der unterschiedlichen Optimalbereiche wäre es demnach sinnvoll, den Gärprozess in zwei verschiedenen Fermentern ablaufen zu lassen. Ist dies nicht möglich, ist der pH-Wert auf die Bedürfnisse der methan- und essigsäurebildenden Bakterien einzustellen. Jedoch stellt sich der pH-Wert, unabhängig davon ob der Prozess ein- oder zweistufig abläuft, aufgrund der alkalischen und sauren Stoffwechselprodukte, die während des Prozesses entstehen, automatisch ein (FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE e.V., 2009).

Eine weitere wesentliche Bedingung, die während der Biogasbildung erfüllt sein muss, ist die ausreichende Versorgung mit Nährstoffen von hoher Qualität. Ähnlich wie bei der Wiederkäuerernährung haben „Fütterungsfehler“ negative Auswirkungen auf die Leistung der Bakterien in der Biogasanlage. Zwar zählen Kohlenhydrate, Fette und Eiweiße zu den Hauptnährstoffträgern, jedoch benötigen die Bakterien auch eine Reihe von Makro- und Mikronährstoffen, wie z.B. Schwefel, Calcium, Eisen und Molybdän, um zu überleben. Um einen optimalen Prozessablauf zu gewährleisten, ist beim eingesetzten Substrat ein Kohlenstoff/Stickstoff-Verhältnis (C/N-Verhältnis) von 10 / 30 einzuhalten, da ein zu hoher Gehalt an Stickstoff zur Bildung von Ammoniak führen würde, das toxisch auf die Bakterien wirkt. Hingegen führt ein Stickstoffmangel zum unvollständigen Kohlenstoffabbau, sodass nicht das gesamte Methanbildungspotenzial ausgeschöpft werden kann. Weiterhin ist ein ausreichendes Kohlenstoff:Stickstoff:Phosphor:Schwefel-Verhältnis von 600:15:5:1 einzuhalten. Dieses Verhältnis gewährleistet eine ausreichende Ernährung für die am Prozess beteiligten Bakterien und dient als Anhaltspunkt bei der Auswahl der Substrate, die zur Energieerzeugung dienen sollen. Weiterhin ist zwingend darauf zu achten, dass

Hemmstoffe nicht den Gasbildungsprozess behindern. Diese können durch das Substrat (Energiepflanze oder Gülle) in den Fermenter gelangen. Es ist aber auch möglich, dass Zwischenprodukte des Prozesses kritische Konzentrationen erreichen, wenn eine unausgewogene Nährstoffverteilung im zugeführten Material vorliegt. Hemmstoffe können z.B. sein: Ammoniak aus einem Stickstoffüberschuss, Herbizidreste an Pflanzen oder Schwefelwasserstoff, der aus einer zu hohen Gabe von schwefelhaltigen Pflanzen, wie z.B. Raps oder Senf, resultiert (KARPENSTEIN-MACHAN, 2005).

## **2.4 Verwendungsmöglichkeiten**

Das direkt gewonnene „Roh-Biogas“ ist aufgrund verschiedener Begleitstoffe, wie z.B. Schwefelwasserstoff, nicht sofort einsetzbar. Daher ist es einer Reinigung zu unterziehen, die das Gas erst nutzbar macht. Nach der Reinigung wird das Biogas hauptsächlich in Verbrennungsmotoren als Antrieb für Generatoren in der Stromerzeugung eingesetzt. Aber auch die Einspeisung in das öffentliche Erdgasnetz ist möglich. Weiterhin ist das gewonnene Biogas als Treibstoff in Kraftfahrzeugen und als Brennstoff in der Wärmeerzeugung einsetzbar.

## **2.5 Substrate**

Als Substrat zur Vergärung in Biogasanlagen sind eine Vielzahl von organischen Rohstoffen geeignet. Dies gilt besonders für Stoffe, die über einen hohen Gehalt an organischer Trockensubstanz verfügen, da nur diese fermentierbar ist und einen Beitrag zur Methanbildung leistet. Innerhalb der einzelnen Nährstofffraktionen verfügen hierbei die Fette mit 71 % Methan im Biogas über ein hohes Gasbildungspotential. Das Biogas aus den Fraktionen der Kohlenhydrate und Proteine enthält hingegen nur etwa 51 % Methan (WEISSBACH, 2009). Als Substrat ungeeignet sind organische Rohstoffe, die über einen hohen Gehalt an Lignin verfügen. Dieser ist von den am Gasbildungsprozess beteiligten Bakterien nicht oder nur sehr unzureichend zu verwerten und würde somit keinen Beitrag zur Methangewinnung leisten.

## 2.6 Zucker- und Futterrüben

Die Zucker- und Futterrüben (*Beta vulgaris* L. ssp. *Vulgaris* var. *Altissima* DÖLL und var. *rabacea* K. Koch) gehören zur Familie der Gänsefußgewächse. Die Herkunft der Früchte ist bislang noch nicht geklärt, was u.a. damit zusammen hängt, dass keine Kreuzungsbarriere zwischen wilden und kultivierten Rüben bestehen. Die erste systematische Einteilung der Gattung geht auf LINNÉ (1753) zurück. Aus morphologischer Sicht werden Rüben im ersten Vegetationsjahr in Kopf (Epikotyl), Hals (Hypokotyl) und Wurzelkörper unterteilt. Die Wurzel dient der Pflanze hierbei als Speicher für gebildete Kohlenhydrate, den Saccharosen.

Zucker- und Futterrüben besitzen mit bis zu 90 t bzw. 150 t Frischmasse je Hektar ein hohes Ertragsniveau. Weiterhin sind sie mit etwa 70-80 % Stickstoff-freien – Extraktstoffen (NfE), die hauptsächlich aus Zucker und wenig N-haltigen Stoffen (Stickstoff-haltigen Stoffen, z.B. Proteinen) bestehen, ein optimales Gärsubstrat, das schnell abgebaut werden kann. Für die Zuckergewinnung sonst relevante Kriterien, wie z.B. der Standardmelasseverlust, sind insbesondere bei der Zuckerrübe, als Substrat zur Energiegewinnung, zu vernachlässigen, sodass bei der Ernte der Rübenkopf lediglich entblättert und nicht, wie generell üblich, entfernt wird. Auf diese Weise kann der gesamte Ertrag geerntet werden, der lediglich durch stark fallende Temperaturen zum Vegetationsende hin limitiert wird. Das bedeutet, dass Rüben spät zu räumende Früchte sind und bei optimalen Bedingungen erst sehr spät im Jahr geerntet werden können, sodass sie in der Lage sind, den Zeitraum der Verfügbarkeit von frischem Erntegut u.U. stark auszudehnen.

Aus pflanzlicher Sicht gibt es keine wesentlichen Unterschiede zwischen dem Anbau und der Bestandspflege von Energierüben und Rüben für die Zucker- oder Futtermittelproduktion (KELLER, HANUS, HEYLAND, 1999).

## 2.7 Sortenbeschreibung

Die Sortenbeschreibungen basieren auf Angaben aus der Beschreibenden Sortenliste des Bundessortenamtes aus dem Jahr 2010, im weiteren Verlauf mit „BSL“ abgekürzt, sowie auf Angaben der Züchter und Vertriebsunternehmen.. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit lagen keine Angaben aus der Beschreibenden Sortenliste für die Futterrübensorte „Jary“ vor. Daher erfolgt eine Beschreibung der Sorte anhand von Händlerangaben. Weiterhin ist zu bemerken, dass keine ausführlichen Beschreibungen anhand der Bundessortenliste erfolgen, da nur die für die Biogasbildung wesentlichen Parameter wichtig erscheinen. Somit erfolgen keine Angaben zum bereinigten Zuckerertrag und den Gehalten an Melassebildnern

(Kalium und Natrium) sowie Aminostickstoff. Die Beschreibungen beziehen sich auf die Frischmasseerträge und Zuckergehalte bei den Zuckerrüben sowie die Frisch- und Trockenmassegehalte bei den Futterrüben. Weiterhin wird auf die Anfälligkeit gegenüber Cercospora-Blattflecken und Mehltau eingegangen, welche Pilzkrankheiten sind, die den Blattapparat schädigen. Die Beschreibungen anhand der Bundessortenliste beziehen sich stets auf die Ergebnisse ohne Rizomaniabefall (Viröse Wurzelbärtigkeit).

## **2.8 Zuckerrüben**

### **Belladonna**

Die Zuckerrübe Belladonna verfügt gemäß BSL über eine geringe Cercospora- sowie durchschnittliche Mehltauanfälligkeit. Der Frischmasseertrag ist durchschnittlich bei einem stärker ausgeprägten Zuckergehalt. Sie ist für alle Rodetermine geeignet, nematoden- und rizomaniatolerant und verfügt über eine gute Blattgesundheit.

### **Lukas**

Die Sorte Lukas ist laut BSL leicht unterdurchschnittlich anfällig für Cercospora und stärker anfällig für Mehltau. Sie verfügt weiterhin über einen leicht über dem Mittel liegenden Frischmasseertrag bei einem überdurchschnittlichen Zuckergehalt. Laut Züchterangaben ist Lukas eine rizomaniatolerante Sorte, die für alle Standorte und Rodetermine geeignet ist.

### **Mars**

Die Zuckerrübe Mars wird in der BSL als leicht unterdurchschnittlich anfällig gegen Cercospora und durchschnittlich anfällig gegen Mehltau beschrieben. Weiterhin verfügt die Sorte über einen hohen Frischmasseertrag bei einem durchschnittlichen Zuckergehalt. Gemäß Züchter hebt sich die rizomaniatolerante Sorte durch einen frühen, gleichmäßigen Feldaufgang, eine zügige Jugendentwicklung und wenig Erdanhang hervor. Die Zuckerrübe Mars wird als rodefreundlich bezeichnet.

### **Philippa**

Die Sorte Philippa verfügt gemäß der BSL über eine durchschnittliche Cercospora- und Mehltauanfälligkeit. Sie erzielt hohe Frischmasseerträge bei durchschnittlichen Zuckergehalten. Der Züchter beschreibt die Sorte Philippa als eine Zuckerrübe, die zu mittleren bis späten Terminen gerodet werden kann. Weiterhin bildet sie bei gutem Feldaufgang zügig einen gleichmäßigen Bestand.

## 2.9 Futterrüben

### Kyros

Die Futterrübe wird in der BSL als Sorte beschrieben, die leicht unterdurchschnittlich anfällig gegen *Cercospora* und mittelmäßig anfällig gegen Mehltau ist. Sie verfügt weiterhin über mittelmäßige Frischmasseerträge bei leicht über dem Durchschnitt liegenden Trockenmassen. Das Vertriebsunternehmen Saaten Union GmbH beschreibt die Sorte Kyros als eine Rübe, die über ein gutes Durchhaltevermögen bei Trockenheit verfügt und durch eine ausgeprägte Wurzelrinne geringe Schmutzanteile aufweist.

### Jary

Wie bereits erwähnt, liegen für die Futterrübe Jary keine Angaben aus der BSL vor. Das Vertriebsunternehmen Saaten Union GmbH beschreibt die Sorte als glattschaligen, monogerm triploiden Hybriden mit einer Trockensubstanz von 16 %, die besonders für rizomaniagefährdete Standorte geeignet ist.

## 2.10 Silierung von Zucker- und Futterrüben

Grundsätzlich ist es möglich und zum Teil auch üblich, dass Rüben als frisches oder nur kurzfristig gelagertes Erntegut für die Energiegewinnung in der Biogasanlage verwendet werden. Dieses Verfahren bietet jedoch wenig Spielraum bei der Substratverfügbarkeit über das gesamte Jahr, sodass es notwendig ist, die Rüben über einen längeren Zeitraum haltbar zu machen, ohne dass dabei größere Verluste hinsichtlich der Nährstoffgehalte auftreten. Bislang gibt es verschiedene Verfahren der Rübensilierung, die jedoch an dieser Stelle nicht dargestellt werden sollen. Im weiteren Verlauf wird auf die gärungsbiologischen Grundlagen und biochemischen Prozesse während des Silierprozesses näher eingegangen.

## 2.11 Prozesse während der Silierung

Die Silierung von Futterpflanzen vollzieht sich in vier Phasen. Nachdem das Pflanzenmaterial luftdicht abgedeckt ist, wird zunächst in der aeroben Phase der im Silostock vorhandene Sauerstoff durch eine Vielzahl an Bakterien und Pilzen abgebaut. Dieser ist in den ersten Stunden der Silierung in noch ausreichender Menge vorhanden, sodass ein Atmungsstoffwechsel möglich ist. Wird kein Sauerstoff von außen in das Silo nachgeliefert,

führt der Sauerstoffverbrauch dazu, dass zunächst die unerwünschten Bakterien und Pilze absterben und nur noch die Milchsäurebildner sowie die Bakterien am Leben bleiben, die ohne Sauerstoff bestehen können (PAHLOW, 2006).

Der zweite Schritt, die Hauptgärphase, ist geprägt von der Milchsäuregärung unter anaeroben Verhältnissen. Die ausreichende Bildung von Milchsäure ist der entscheidende Faktor beim Gelingen von Silagen. Hierbei werden zunächst heterofermentative Milchsäurebakterien gebildet, die als Endprodukt neben der Milchsäure auch Ethanol und Kohlendioxid bilden, wenn es sich um den Abbau von Hexosen handelt, sowie Essigsäure, wenn Pentosen abgebaut werden. Insbesondere die Umwandlung des Disaccharids Saccharose aus den Zuckerrüben stellt sich hierbei als sehr vorteilhaft heraus, da dieses u.a. aus einer Hexose, der Glucose, besteht. Das daraus entstandene Ethanol trägt maßgeblich zum Methanertrag bei. Weiterhin werden in der Hauptgärphase homofermentative Milchsäurebakterien aus den Kohlenhydraten gebildet. Diese bilden ausschließlich Milchsäure und unterdrücken somit, durch eine pH-Wert-Absenkung, unerwünschte Gärschädlinge, wie z.B. Enterobakterien, Clostridien, Listerien, bestimmte Bacillusarten und Hefepilze (PAHLOW, 2006). Dieser Prozess findet solange statt, bis die Milchsäurebakterien selbst, aufgrund des niedrigen pH-Wertes von etwa 4 – 4,5, absterben. Zu diesem Zeitpunkt ist die Silage stabil (BRIEMLE et al., 1996).

Der größte Teil der Milchsäurebakterien stirbt während der dritten Phase, der Lagerphase, ab. Während dieser Zeit sinkt die Zahl der Bakterien auf etwa 0,1 % der Maximalpopulation von einer Billion MSB/ g Silage, die sich während der ersten Tage der Hauptgärphase entwickelt hatte. Zu diesem Zeitpunkt befinden sich außer den wenigen verbleibenden Milchsäurebakterien nur noch besonders säuretolerante Enzyme in der Silage, die dafür sorgen, dass weiterhin leicht vergärbare Kohlenhydrate als Nachschub für die unvermeidbaren Zuckerverluste abgebaut werden (PAHLOW, 2006).

An die Phase der Lagerung der Silage schließt sich die Entnahme an. Zu diesem Zeitpunkt gerät das Siliergut wieder unter Sauerstoffeinfluss. Nach PAHLOW (2006) kann dieser, begrenzt durch das Porenvolumen der Silage, bis zu einem Meter in den Futterstock eindringen und somit die Aktivitäten der ruhenden Mikroorganismen anregen. Dies betrifft insbesondere Hefen aber auch Schimmelpilze, die die Qualität des Siliergutes negativ beeinflussen.

## **2.12 Besonderheit bei der Vergärung von Rüben im Silo**

Wie bereits zuvor beschrieben, werden die in Zucker- und Futterrüben enthaltenen Kohlenhydrate durch Bakterien und Mikroorganismen zu Ethanol vergoren. Dieser Vorgang wird durch ein starkes Auftreten von Sickersaft begleitet, welche aus dem Absterben von Zellgewebe resultiert. Demnach treten etwa 150 Liter Saft aus 1 Tonne Zuckerrüben aus. Dieser Sickersaft besitzt aufgrund der Vergärung zu Ethanol ein hohes Gasbildungspotenzial. So enthält eine Tonne Sickersaft so viel Energie wie eine Tonne Maissilage (BENSMANN, 2010). Das heißt, es ist zwingend notwendig, die austretenden Sickersäfte aufzufangen, und der Biogasanlage zuzuführen. Verluste durch Sickersaft treten hauptsächlich bei der Langzeitlagerung in Fahr- oder Erdsilos auf und insbesondere dann, wenn das Substrat stark zerkleinert wird. Dagegen sind bei der Lagunen- und Hochsilolagerung keine Sickersaftverluste zu verzeichnen, da diese nach unten hin abgeschlossen sind. Auch die Lagerung in Schläuchen ist mit weniger Verlusten aufgrund austretender Säfte verbunden, da die Rüben hierbei i.d.R. nicht zerkleinert werden und demnach weniger Zellflüssigkeit austritt.

## **2.13 Methode zur Bewertung von Substraten hinsichtlich Biogas-/ Methanbildungspotenzial nach WEISSBACH (2008-11)**

Der quantitative Einsatz von Substraten in Biogasanlagen zur Energiegewinnung wird längst nicht mehr dem Zufall oder dem Gefühl überlassen. Um die Anlage effizient zu betreiben, ist es daher notwendig zu wissen, wie viel Gasbildungspotenzial die jeweiligen Rohstoffe besitzen. Darüber hinaus können verschiedene Feldfrüchte untersucht werden, die als künftige Energiepflanze in Betracht kommen. Auch kann aufgrund des Gasbildungspotenzials der Substratbedarf einer neu geplanten oder bereits bestehenden Anlage ermittelt werden. Im Falle einer Arbeitsteilung kann anhand des Gasbildungsvermögens eines Substrates ein System etabliert werden, dass es dem Abnehmer von Biomasse ermöglicht, den Erzeuger für die Bereitstellung von Biomasse zu entlohnen.

Im weiteren Verlauf wird auf die Methode zur Bewertung von Substraten für die Biogasgewinnung näher eingegangen. Professor Dr. agr. habil. Friedrich Weißbach hat hierzu in den letzten Jahren umfangreiche Forschungsarbeit geleistet und bereits bestehende Bewertungssysteme verbessert, sodass anhand dieser Methode wesentlich genauere Aussagen hinsichtlich des möglichen Gasbildungspotenzials

verschiedener Kulturen möglich sind. Neben allgemeinen Aspekten werden im Schwerpunkt die Parameter für die Bewertung von Mais und Rüben als Rohstoff für die Energiegewinnung erläutert.

#### **2.14 Grundzüge der Methode**

Die Grundlage der Methode besteht zunächst darin, dass nicht die Gasausbeute in einem Fermenter sondern das theoretisch mögliche Gasbildungspotenzial eines Rohstoffes ermittelt wird. Diese Werte können durchaus voneinander abweichen. Besagt das Gasbildungspotenzial, wie viel Gas aus einem Substrat bei einer bestmöglichen Verwertung gewonnen werden kann, ist die Gasausbeute hingegen das Produkt aus dem Gasbildungspotenzial und dem Ausnutzungsgrad im Fermenter. Somit kann die Substratbewertung hinsichtlich des Gasbildungspotenzials nur unabhängig von der Verfahrenstechnik betrachtet werden. Bisher waren zwei Möglichkeiten zur Substratbewertung üblich. Die eine Möglichkeit ist der Labor-Gärtest in kleinen Fermentern, dem s.g. Batchtest. Hierbei werden unter Laborbedingungen Substrate in „Mini-Fermentern“ vergoren und das gebildete Gas durch einzelne Gaszähler gemessen. Der Aufbau einer solchen Anlage ist in der Dissertation von KAISER (2007) ausführlich beschrieben. Der Vorteil dieses Verfahren liegt darin, dass zur Bestimmung des Gasbildungspotenzials keine industrielle Biogasanlage notwendig ist und eine genaue Dosierung der zugeführten Substrate erfolgen kann. Jedoch liegt der Nachteil dieser Methode darin, dass dieses Verfahren sehr zeitaufwendig, teuer und zu ungenau ist (WEISSBACH, 2011).

Eine weitere Methode zur Substratbewertung ist die chemische Laboruntersuchung der Substrate nach der kompletten Weender Futtermittelanalyse. Hierbei werden die einzelnen verdaulichen Nährstoffe bestimmt und mit Verdauungsquotienten aus den DLG Futterwerttabellen für Wiederkäuer verrechnet. Anschließend erfolgt die Multiplikation mit Gasbildungswerten, die auf der Arbeit von BASERGA (1998) basieren. Jedoch zeigt sich hier, dass die Werte bezüglich des Gasbildungspotenzials zu niedrig sind und eine ungenügende Differenzierung nach tatsächlichen Substratqualitäten erfolgt (WEISSBACH, 2011). Der Grund für diese Ungenauigkeit liegt darin, dass fälschlich die scheinbare Verdaulichkeit mit der biologischen Verdaulichkeit gleichgesetzt wird. Jedoch enthalten die Ausscheidungen der Tiere, die als Versuchsgrundlage dienen, nicht nur unverdauliche Nährstoffe, sondern ebenfalls metabolische Ausscheidungen, die noch über Energie verfügen. Somit lässt sich der tatsächlich nicht nutzbare Anteil der Nährstoffe errechnen,

wenn man die metabolischen Nährstoffausscheidungen der Tiere kennt und diese von der insgesamt ausgeschiedenen Nährstoffmenge abzieht (WEISSBACH, 2008).

In diesem Zusammenhang ist ein neuer Parameter eingeführt worden, nämlich der Gehalt an Fermentierbarer organischer Trockensubstanz (FoTS). Bislang war es üblich, den Einfluss der variierenden Größe Rohasche (XA) auf den Gasertrag dadurch auszuschalten, dass dieser Wert von der Trockensubstanz abgezogen wurde. Auf diese Weise erhielt man die Gasausbeute, die auf die organische Trockensubstanz (oTS) bezogen wurde. Um den möglichen Gasertrag jedoch mit einer größeren Genauigkeit zu schätzen, ist es notwendig, neben dem Gehalt an Rohasche zusätzlich den Anteil an nicht nutzbarer organischer Trockensubstanz von der Trockensubstanz (TS) zu subtrahieren. Demnach ist die FoTS als diejenige Menge definiert, die unter anaeroben Bedingungen potenziell durch Mikroorganismen abgebaut werden kann und die sich deshalb unter optimalen Prozessbedingungen und bei ausreichend langer Prozessdauer in Biogasanlagen biologisch nutzen lässt. Die FoTS ist identisch mit dem Gehalt an wahr verdaulicher organischer Substanz (WEISSBACH, 2008).

### **2.15 Ermittlung der Fermentierbaren organischen Trockensubstanz von Mais und Zuckerrüben (FoTS)**

Ausgehend von der Weender Futtermittelanalyse wird die organische Substanz in die Fraktionen der Rohfette (XL), Rohproteine (XP), Rohfaser (XF) und N-freie Extraktstoffe (XX) unterteilt. Nach WEISSBACH (2009) ist es nicht sinnvoll zwischen Kohlenhydraten, die in der Rohfaser (bestimmte Zellwandsubstanzen) und denen die in den N-freien Extraktstoffen (überwiegend Zellinhaltsstoffe) erfasst werden, zu unterscheiden. Sie können deshalb in der Fraktion der Rohkohlehydrate (XC) zusammengefasst werden. Demnach ist die organische Trockensubstanz die Summe aus:

$$oTS = XP + XL + XC$$

Bezieht man diese Aussage auf den fermentierbaren Anteil, ist die Fermentierbare Trockensubstanz die Summe aus:

$$FoTS = FXP + FXL + FXC$$

Anhand von Verdauungsversuchen, die an Schafen durchgeführt wurden, konnte festgestellt werden, dass die Gehalte an biologisch nicht nutzbarem Rohprotein und Rohfett bei den jeweiligen Futterarten praktisch konstante Größen sind. Somit ist es möglich, für diese beiden Nährstoffe mit Mittelwerten der tierischen Ausscheidung bei der jeweiligen Futterart zu rechnen. Der Gehalt an nutzbaren Kohlenhydraten hingegen steht in enger Beziehung zum Gehalt an Rohfaser. Hierbei kann der Gehalt an nicht nutzbaren Kohlenhydraten über eine Regressionsgleichung anhand der Rohfaser geschätzt werden.

Demnach ergibt sich für die Schätzung der FoTS für Mais als frisches Erntegut oder als Siliergut folgende Schätzformel nach WEISSBACH (2009):

$$\text{FoTS [g je kg TS]} = 984 - (\text{XA}) - 0,47 (\text{XF}) - 0,00104 (\text{XF})^2$$

Für Rüben und Rübensilagen ergibt sich folgende Schätzformel:

$$\text{FoTS [g je kg TS]} = 991 - (\text{XA}) - 0,70 (\text{XF})$$

Voraussetzung für die Anwendung der o.g. Schätzformel bei Silagen ist jedoch die Korrektur der TS – Gehalte auf flüchtige Stoffe.

## **2.16 Korrektur des Trockensubstanzgehaltes von Mais- und Zuckerrübensilagen als Substrat zur Energieerzeugung in Biogasanlagen**

Um den Nährstoffgehalt und die substratspezifische Gasausbeute zu ermitteln, ist es notwendig, die Trockensubstanz der Silagen auf flüchtige organische Substanzen zu korrigieren. Die bei der Silierung entstehenden Gärsäuren und Alkohole können, insbesondere bei Zuckerrüben, etwa die Hälfte der organischen Trockensubstanz ausmachen. Da diese Stoffe über ein hohes Methanbildungspotenzial verfügen, sind sie zwingend zu analysieren und in der Berechnung des Gasbildungspotenzials zu berücksichtigen.

Die im folgenden Verlauf aufgeführten Schätzformeln resultieren aus einer Vielzahl von Versuchen verschiedener Mais- und Zuckerrübensilagen. Anhand von Laboruntersuchungen wurden durch WEISSBACH (2008) bei Maissilagen die Konzentrationen an potenziell flüchtigen Gärsäuren und Alkoholen festgestellt, sowie entsprechende Flüchtigkeitsquoten abgeleitet. Die Abbildungen 5 - 7 stellen die Untersuchungsergebnisse tabellarisch dar. Hierbei wird deutlich, dass die Gärprodukte Essigsäure, Propionsäure und Milchsäure sowie Ethanol, Propanol, 1,2-Propianol und 2,3-Butandiol aufgrund ihres relativ hohen Gehaltes, im Gegensatz zu anderen Gärprodukten, besonderer Beachtung bedürfen.

	Konzentration in g kg <sup>-1</sup> FM		Standard- abweichung	Häufigkeit des Vorkommens* %
	Mittelwert	Spannweite		
<i>Säuren</i>				
Essigsäure	9,98	2,62 ... 19,16	3,40	100
Propionsäure	0,28	0,05 ... 1,74	0,33	100
Isobuttersäure	0,01	0 ... 0,15	0,03	16
Buttersäure	0,09	0 ... 1,24	0,15	62
Isovaleriansäure	0,06	0 ... 0,16	0,04	78
Valeriansäure	0,01	0 ... 0,07	0,02	9
Capronsäure	0,01	0 ... 0,13	0,03	21
Milchsäure	15,20	3,76 ... 26,01	3,75	100
<i>Alkohole</i>				
Ethanol	5,80	0,10 ... 13,16	3,21	100
Propanol	0,25	0 ... 3,24	0,52	50
Butanol	0	0 ... 0,08		1
1,2-Propandiol	0,70	0 ... 6,83	1,07	92
2,3-Butandiol	0,08	0 ... 0,49	0,10	52

\* Proben mit  $\geq 0,05$  g kg<sup>-1</sup>FM

Abbildung 5: Konzentration an potenziell flüchtigen Gärprodukten in Maissilagen (n = 117)

(WEISSBACH, 2008)

	Essig- säure	Propion- säure	Butter- säure**	Milch- säure
<i>Gehalte in der Silage (g kg<sup>-1</sup> FM)</i>				
Mittelwert	13,7	0,4	0,1	12,9
Spannweite	8,2...19,2	0,1...1,0	0...0,5	9,5...20,5
Standardabweichung	2,8	0,3	0,1	2,6
<i>Gehalte im Trocknungsrückstand (g kg<sup>-1</sup> FM)</i>				
Mittelwert	0,63	0,02	n. n. *	11,9
Spannweite	0,36...0,92	0...0,05		8,7...17,3
Standardabweichung	0,16	0,02		2,3
<i>Flüchtigkeitsquote (%)</i>				
Mittelwert	95	97	100	8
Spannweite	95...96	91...100		3...16
Standardabweichung	0,4	3,3		3,8

\* nicht nachweisbar; \*\* Buttersäure und höhere Homologe

Abbildung 6: Flüchtigkeitsquote von Gärsäuren aus Maissilagen (n = 20)

(WEISSBACH, 2008)

	Konzentration in g kg <sup>-1</sup> FM		Standard- abweichung	Häufigkeit des Vorkommens* %
	Mittelwert	Spannweite		
<i>Säuren</i>				
Essigsäure	9,98	2,62 ... 19,16	3,40	100
Propionsäure	0,28	0,05 ... 1,74	0,33	100
Isobuttersäure	0,01	0 ... 0,15	0,03	16
Buttersäure	0,09	0 ... 1,24	0,15	62
Isovaleriansäure	0,06	0 ... 0,16	0,04	78
Valeriansäure	0,01	0 ... 0,07	0,02	9
Capronsäure	0,01	0 ... 0,13	0,03	21
Milchsäure	15,20	3,76 ... 26,01	3,75	100
<i>Alkohole</i>				
Ethanol	5,80	0,10 ... 13,16	3,21	100
Propanol	0,25	0 ... 3,24	0,52	50
Butanol	0	0 ... 0,08		1
1,2-Propandiol	0,70	0 ... 6,83	1,07	92
2,3-Butandiol	0,08	0 ... 0,49	0,10	52

\* Proben mit  $\geq 0,05$  g kg<sup>-1</sup>FM

Abbildung 7: Flüchtigkeitsquote von Alkoholen aus Maissilagen (n = 20)

(WEISSBACH, 2008)

Die Anwendung der Korrekturformel macht es unerlässlich, dass definierte Bedingungen bei der Trocknung der Silagen eingehalten werden. Nach einer Vortrocknung bei 60 bis 65 °C und einer anschließenden Endtrocknung bei 105°C über genau drei Stunden, ist folgende Schätzformel für die Korrektur des Trockensubstanzgehaltes bei Maissilagen nach WEISSBACH (2008) anzuwenden.

$$TS_K \text{ [g je kg FM]} = TS_N + 0,95 \text{ NFS} + 0,08 \text{ MS} + 0,77 \text{ PD} + 1,00 \text{ AA}$$

$TS_K$  Trockensubstanz korrigiert

$TS_N$  Trockensubstanz normal

NFS Summe der Gehalte an niederen Fettsäuren ( $C_2$  bis  $C_6$ )

MS Gehalt an Milchsäure

PD Gehalt an 1,2- Propandiol

AA Summe der Gehalte an anderen Alkoholen ( $C_2$  bis  $C_4$ , inklusive 2,3-Butanol)

Die Bestimmung der einzelnen Komponenten zur Korrektur des Trockensubstanzgehaltes von Maissilagen setzt eine exakte Analyse der flüchtigen Bestandteile voraus. Erst nach der Korrektur ist eine Aussage zur potenziellen Ausbeute an Biogas möglich, die über eine hohe Genauigkeit verfügt. Ist eine ausführliche Analyse der flüchtigen Gärprodukte nicht möglich, kann auf eine weitere Schätzformel zurückgegriffen werden, die deutlich vereinfacht ist. Sie liefert jedoch nur grobe Näherungswerte (WEISSBACH, 2008).

Sie lautet:

$$TS_K \text{ [g je kg FM]} = 24,5 + 0,980 \text{ TS}_N$$

Beim Einsatz der Schätzformel zur Bildung von Biogas, sind aufgrund der Korrektur der Trockensubstanz im weiteren Verlauf alle gemessenen Parameter wie z.B. XA und XF, die auf die „normale“ Trockenmasse bezogen wurden, zu korrigieren. Dieses erfolgt durch die Multiplikation mit dem Quotienten aus  $TS_K/TS_N$  (WEISSBACH, 2008). Dieser ist in der Regel größer 1 und berücksichtigt damit die Trockensubstanzgehalte der entwichenen Gärprodukte.

Die Ermittlung der Korrekturformel für Zuckerrübensilagen verlief analog der für Maissilagen. Hierbei standen ebenfalls eine Reihe von Silageproben mit unterschiedlichen Lagerzeiten und Gärverläufen zur Verfügung, bei denen nach definierten Trocknungsbedingungen (Vortrocknung bei 60 – 65°C und Endtrocknung bei 105°C über drei Stunden) der Trockensubstanzgehalt bestimmt wurde. Die chemische Analyse der flüchtigen Gärprodukte

in der Frischmasse, wie Alkohole und niedere Fettsäuren, war unerlässlich. Abbildung 8 verdeutlicht, dass insbesondere dem Ethanol, aus der Vergärung von Zucker, eine besondere Bedeutung zukommt.

	Konzentration in der Silage		
	Mittelwert	Spannweite	Standardabweichung
Zucker (g kg <sup>-1</sup> FM)	59	2 ... 147	46
pH-Wert	3,9	3,5 ... 4,5	0,3
<b>Säuren</b> (g kg <sup>-1</sup> FM)			
Essigsäure	7,74	1,70 ... 17,90	4,18
Propionsäure*	0,04	0 ... 0,05	0,01
Isobuttersäure*	0,52	0 ... 0,60	0,10
Buttersäure*	0	0	0
Isovaleriansäure *	0,08	0 ... 0,14	0,03
Valeriansäure*	0	0	0
Capronsäure*	0	0	0
Milchsäure	11,95	5,90 ... 28,50	6,30
<b>Alkohole</b> (g kg <sup>-1</sup> FM)			
Methanol*	1,25	0,02 ... 2,79	1,03
Ethanol	37,18	3,80 ... 77,30	24,34
Propanol*	0,09	0 ... 0,14	0,04
Butanol*	0	0	0
1,2-Propandiol*	0,26	0 ... 0,50	0,13
2,3-Butandiol*	0,49	0 ... 0,59	0,06
<b>Trockensubstanz</b> (g kg <sup>-1</sup> FM)			
nicht korrigiert** (TS <sub>n</sub> )	154	88 ... 207	44
korrigiert** (TS <sub>k</sub> )	208	169 ... 254	77
Quotient** TS <sub>k</sub> /TS <sub>n</sub>	1,352	1,075 ... 1,939	0,281

\*Mittelwert und Standardabweichung aus n = 9 Proben,  
\*\* aus n = 35 Proben

Abbildung 8: Gehalt an Zucker und flüchtigen Gärprodukten in silierten Zuckerrüben (n = 35)

(WEISSBACH, 2008)

Aufgrund der aus den Versuchsauswertungen gewonnen Erkenntnissen, konnte WEISSBACH (2008) folgende Schätzformel für die Korrektur des Trockensubstanzgehaltes für Zuckerrübensilagen definieren:

$$TS_K \text{ [g je kg FM]} = TS_N + 0,95 \text{ NFS} + 0,08 \text{ MS} + 1,00 \text{ AL}$$

TS<sub>K</sub> Trockensubstanz korrigiert

TS<sub>N</sub> Trockensubstanz normal

NFS Summe der Gehalte an niederen Fettsäuren (C<sub>2</sub> bis C<sub>6</sub>)

MS Gehalt an Milchsäure

AL Summe der Gehalte aller Alkoholen (C<sub>1</sub> bis C<sub>4</sub>, inklusive der Diole)

Wie bereits beschrieben, entsteht bei der Vergärung von Zucker aus Rüben Alkohol. Dieser besteht zum größten Anteil aus Ethanol (Abb. 8), sodass der Gesamtgehalt an Alkoholen bei

der Korrektur der Trockensubstanz und der Berechnung des Gasbildungspotenzials auf den Ethanolgehalt beschränkt werden kann.

Auch hierbei ist im Anschluss eine Korrektur aller Parameter, die auf TS bezogenen sind, durch Multiplikation mit dem Quotienten aus  $TS_K/TS_N$  durchzuführen (WEISSBACH, 2008).

### 2.17 Berechnung des Gasbildungsvermögen von Mais- und Zuckerrübensilagen

Der potenzielle Biogas- bzw. Methanertrag wird beim Einsatz von Silagen auf die korrigierte Trockensubstanz bezogen. Nach WEISSBACH (2009) ergeben sich für Maissilagen die Gleichungen:

$$\text{Biogas [Normliter/kg } TS_K] = 0,800 \text{ FoTS [g/kg } TS_K]$$

$$\text{Methan [Normliter/kg } TS_K] = 0,420 \text{ FoTS [g/kg } TS_K]$$

Beim Einsatz von Zuckerrübensilagen ist, im Gegensatz zu Maissilagen, der Alkoholgehalt besonders bei der Berechnung des Gasbildungspotenzials zu berücksichtigen. Dieser verfügt über ein hohes Methanbildungsvermögen, sodass ein Zuschlag auf die FoTS erfolgen muss. Somit lauten die Gleichungen nach WEISSBACH (2009) zur Berechnung des Gasbildungspotenzials bei Zuckerrüben:

$$\text{Biogas [Normliter/kg } TS_K] = 0,750 \text{ FoTS} + 0,18 \text{ AL [g/kg } TS_K]$$

$$\text{Methan [Normliter/kg } TS_K] = 0,375 \text{ FoTS} + 0,32 \text{ AL [g/kg } TS_K]$$

(AL = Summe der Alkohole in g/kg  $TS_K$ )

Zur Überprüfung der Schätzungsmethode zur potentiellen Gasbildung an Halm- und Körnerfrüchten sind in der Praxis Versuche an industriellen Anlagen durchgeführt worden. Hierbei wurden drei Fermenter mit einer identischen Substratration betrieben und anschließend einem dreimonatigen Monitoring unterzogen. Durch den Versuch konnten die Werte der Schätzmethode bestätigt werden. Somit können diese als gesichert betrachtet werden (WEISSBACH, 2009).

Die Schätzformel zur Berechnung des Gasbildungspotenzials von Rüben beruht auf den Gasbildungswerten für die fermentierbaren Rohkohlenhydrate (FXC). Eine Überprüfung der ermittelten Werte anhand von Praxisversuchen wurde bislang nicht veröffentlicht.

### 3. Material und Methoden

Für die Untersuchungen zum Gasbildungsvermögen standen vier Zucker- und zwei Futterrübensorten zur Verfügung. Diese wurden jeweils mit und ohne Blatt siliert.

1. Zuckerrüben
  - a. Philippa
  - b. Belladonna
  - c. Lukas
  - d. Mars
2. Futterrüben
  - a. Kyros
  - b. Jary

Weiterhin konnten zur Ermittlung des Gasbildungsvermögens von Maissilagen Ergebnisse herangezogen werden, die aus Untersuchungen der Jahre 2006-10 hervorgehen. Hierbei wurden an 53 Silageproben verschiedener Maissorten u.a. die Inhaltsstoffe ermittelt. Anhand der gewonnenen Daten (siehe Anhang) konnte das Gasbildungsvermögen der Maissilagen errechnet werden.

#### 3.1 Ertragsschätzung von Zucker- und Futterrüben

Das Verfahren zur Schätzung des Ertrages von Zucker- und Futterrüben beruht auf der Ermittlung von Durchschnittswerten pro Fläche. In diesem Fall wurde die Schätzung an Futterrüben vorgenommen. Die Methode ist ebenso bei Zuckerrüben anwendbar.

Dazu wurden die Rüben auf einer Länge von zwei Metern per Hand geerntet. Dies erfolgte pro Sorte an drei verschiedenen Standpunkten im Bestand. Die Anzahl der Rüben, die auf zwei Metern geerntet werden konnten, schwankten zwischen sieben und zwölf Pflanzen. Anschließend wurden die ganzen Pflanzen und die Rüben nach Entfernung des Rübenkopfes mit Blatt gewogen. Die Differenz der Masse zwischen den Rüben mit und ohne Blatt ergab das Gewicht des Blattapparates. Anhand dieser Ergebnisse konnten Durchschnittswerte pro Fläche errechnet werden. In diesem Fall waren die ermittelten Masseerträge auf eine Fläche von  $0,9 \text{ m}^2$  zu beziehen, da der Abstand zwischen den Reihen 45 cm betrug. Zur Ermittlung des durchschnittlichen Rübenertrages ist der geschätzte Ertrag dann auf einen Hektar hochgerechnet worden.

### 3.2 Laborsilierung von Zucker- und Futterrüben

Um das mögliche Gasbildungspotenzial zu ermitteln, sind die Rüben unter Laborbedingungen siliert worden. Dazu wurden pro Sorte und Variante, d.h. mit und ohne Blatt, jeweils vier Wiederholungen angelegt. Je 3-4 Zucker- und Futterrüben pro Sorte sind zu Beginn der Erntekampagne am 11.10.2010 mit der Hand geerntet worden. Im Anschluss wurden sie gründlich geputzt und mit Hilfe eines Rübenschnitzlers zu einer relativ homogenen Mischung grober Schnitzel mit und ohne Blatt verarbeitet.



Abbildung 9: Rübenschnitzler



Abbildung 10: zerkleinerte Rüben

Zur Silierung sind die Rübenschnitzel dann in Gläser mit einem Fassungsvermögen von einem Liter verbracht worden, die üblicherweise zum Einwecken genutzt werden. Zuvor wurde das Leergewicht der Gläser mit Deckel, Deckelgummi und Spannern ermittelt.



Abbildung 11: Verdichten des Siliergutes



Abbildung 12: Verschließen und wiegen der Gläser

Der Inhalt ist nach der Befüllung, unter Zuhilfenahme einer Hebelvorrichtung, verdichtet worden, sodass die Luft in den Zwischenräumen möglichst entweichen konnte. Die Gläser wurden nur halb voll gefüllt, um bei der anschließenden Vergärung ein Entweichen des Siliergutes aus dem Glas durch überschäumen zu vermeiden. Abschließend wurden die befüllten Gläser luftdicht mit einem Deckelgummi und Spannern verschlossen und zur

Ermittlung des Bruttogewichtes gewogen. Durch Berechnung der Differenz von Brutto- und Leergewicht erhält man das Nettogewicht der Einwaage.

Während des Prozesses der Silierung und Lagerung, der ca. 170 Tage dauerte und bei 24°C im abgedunkelten Raum stattfand, erfolgte eine regelmäßige Kontrolle der Gläser. Hierbei konnten keine Unregelmäßigkeiten festgestellt werden

### 3.3 Probenvorbereitung der Silagen

Vor der Öffnung wurden die Gläser gewogen, um mögliche Gärverluste zu ermitteln. Geöffnet wurden dann jeweils zwei Gläser aus den jeweiligen Sorten und Varianten mit den geringsten Gärverlusten. Nach einer sensorischen Prüfung des Siliergutes wurde 100 g Probenmaterial in einen Maßkolben gegeben, der dann auf 1000 ml mit destilliertem Wasser aufgefüllt wurde. Nach ca. 12 Stunden Standzeit erfolgte die pH-Wert-Messung in dem wässrigen Extrakt. Anschließend wurde die Probe gefiltert, abgefüllt und bis zur Analyse der Inhaltsstoffe tiefgefroren gelagert. Weiterhin erfolgte die Vorbereitung des frischen Materials zur Bestimmung der Trockensubstanz, Rohasche und Rohfaser durch Gefriertrocknung.



Abbildung 13: Filtratur des Extraktes

### 3.4 Bestimmung der Inhaltsstoffe von Zucker- und Futterrübensilagen

Zur Ermittlung der Inhaltsstoffe in den Zucker- und Futterrüben wurden stets Parallelbestimmungen zur Kontrolle der Ergebnisse durchgeführt.

#### Trockensubstanz (TS)

Die exakte Bestimmung der Trockenmasse ist von elementarer Bedeutung, da die gesamte Berechnung des Biogasbildungspotenzials darauf aufbaut.

Dazu waren etwa 50 g frisches Probenmaterial in vorher gewogene Schalen auf 0,001 g einzuwiegen und zunächst im Trockenschrank bei 60°C bis zur Gewichtskonstante vorzutrocknen und anschließend bei 105°C über etwa drei Stunden der Endtrocknung zu unterziehen. Nach Beendigung des Vorganges kühlten die Schalen ab. Durch eine Differenzwägung konnte der prozentuale Trockensubstanzanteil nach unten aufgeführter Gleichung ermittelt werden.

$$T \text{ in } \% = \frac{(m_3 - m_1) \times 100}{m_2}$$

Dabei ist:  $m_1$  = Leermasse des Porzellantiegel in g  
 $m_2$  = Probeweinwaage in g  
 $m_3$  = Masse von Porzellantiegel und Probe nach der Trocknung in g

### **Rohasche (XA)**

Hierbei wurden ca. 3 g der bereits feingemahlten Probe in Porzellantiegel auf 0,001 g eingewogen, deren Leermasse im Vorfeld festgestellt wurde. Anschließend erfolgte die Veraschung bei 600 °C über 3 Stunden im Muffelofen. Nach einer Abkühlphase im Exsikkator konnte, durch eine Differenzwägung des Rückstandes, der Rohascheanteil ermittelt werden.

Dieser errechnet sich nach folgender Gleichung:

$$XA \text{ in } \% = \frac{(m_3 - m_1) \times 100}{E}$$

$$XA \text{ in } \% \text{ der } T = \frac{(m_3 - m_1) \times 100}{E \times T}$$

Dabei ist:  $m_1$  = Leermasse des Porzellantiegel in g  
 $m_2$  = Masse von Porzellantiegel und Probe nach der Veraschung in g  
 $E$  = Probeweinwaage in g  
 $T$  = Trockensubstanzgehalt der Probe in % (analytische Trockensubstanz)

## Rohfaser (XF)

Zunächst war die Leermasse der Fritten festzustellen und ca. 1 g des gemahlene Probenmaterials auf 0,001 g einzuwiegen. Anschließend wurden die Proben durch Zugabe von Schwefelsäure (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) und Natronlauge (NaOH) im Fibertec-Analysegerät hydrolytisch aufgeschlossen. Nach einer Entfettung und anschließenden Trocknung über zwei Stunden bei 130 °C, war das Probenmaterial über drei Stunden bei 525 °C im Muffelofen zu veraschen. Nach einer Abkühlphase im Exsikkator konnte der Rohfaseranteil über eine Differenzwägung der getrockneten und der veraschten Probe nach folgender Gleichung ermittelt werden:

$$\text{XF in \% der T} = \frac{(W_2 - W_3) \times 100 \times 100}{W_1 \times T}$$

Dabei ist: T = Trockensubstanzgehalt der Probe in % (analytische Trockensubstanz)  
 W<sub>1</sub> = Einwaage in g  
 W<sub>2</sub> = getrocknete Probe in g (Masse von Fritte und Probe nach dem Probenaufschluss)  
 W<sub>3</sub> = veraschte Probe in g (Masse von Fritte und Probe nach der Veraschung)

## Ethanol, Milchsäure und Essigsäure

Das Prinzip der Methode beruht auf der Messung der Konzentration von Metaboliten in einer wässrigen Lösung.

Dazu wird der im Vorfeld aus den jeweiligen Silagen hergestellte wässrige Extrakt, mithilfe von Testsets von r-biopharm (10 176 0290 035 für Ethanol, 10 139 084 035 für Milchsäure, 10 148 261 035 für Essigsäure), durch Zugabe von spezifischen Enzymen und Coenzymen umgesetzt. Die umgesetzte Menge der zu bestimmenden Stoffe ist hierbei proportional der Menge des reduzierten Coenzym. Das reduzierte Coenzym kann nun direkt in einem Photometer bei 365 nm gemessen und im Anschluss auf die zu bestimmenden Stoffe umgerechnet werden.

Zu beachten ist, dass die Probelösungen u.U. mit destilliertem Wasser zu verdünnen sind, um eine ausreichend hohe Extinktionsdifferenz zu erhalten. Daher wurden alle Lösungen aus den Extrakten der Zuckerrübensilagen im Verhältnis 1:100 und die Lösungen der

Futterrübensilagen im Verhältnis 1:10 verdünnt. Die Formel zur Berechnung der jeweiligen Konzentration ist prinzipiell bei allen zu bestimmenden Stoffen gleich.

$$C = \frac{V \times MG}{\epsilon \times d \times v \times 1000} \times \Delta E \text{ [g/l]}$$

Das Ergebnis ist mit dem jeweiligen Faktor der Verdünnung zu multiplizieren.

Dabei ist:	V =	Testvolumen in ml
	v =	Probenvolumen in ml
	MG =	Molekulargewicht der zu bestimmenden Substanz (g/mol)
		MG <sub>Ethanol</sub> – MG H <sub>2</sub> O = 46,07
		MG <sub>Milchsäure</sub> – MG H <sub>2</sub> O = 90,1
		MG <sub>Essigsäure</sub> – MG H <sub>2</sub> O = 60,05
	ε =	Extinktionskoeffizient von NADPH bei
		340 nm = 6,3 (l x mmol <sup>-1</sup> x cm <sup>-1</sup> )
		Hg 365 nm = 3,4 (l x mmol <sup>-1</sup> x cm <sup>-1</sup> )
		Hg 334 nm = 6,18 (l x mmol <sup>-1</sup> x cm <sup>-1</sup> )

Demnach ergibt sich für die einzelnen zu bestimmenden Stoffe folgende Berechnungsgrundlage:

Für Ethanol:

$$C = \frac{3,150 \times 46,07}{\epsilon \times 1,00 \times 0,1 \times 2 \times 1000} \times \Delta E = \frac{145,1205}{\epsilon \times 200} \times \Delta E \text{ [g Ethanol/ l Probelösung]}$$

$$C = 0,115175 \times \Delta E \text{ g Ethanol/ l Probelösung} \rightarrow 100 \text{ g Frischmasse}$$

Für Milchsäure:

$$C = \frac{2,240 \times 90,1}{\epsilon \times 1,00 \times 0,1 \times 2 \times 1000} \times \Delta E = \frac{2,018}{\epsilon} \times \Delta E \text{ [g Milchsäure/ l Probelösung]}$$

Für Essigsäure:

$$C = \frac{3,230 \times 60,05}{6,3 \times 1,00 \times 0,0 \times 1000} \times \Delta E = \frac{1,940}{6,3 * 10} \times \Delta E \text{ [g Essigsäure/ l Probelösung]}$$

### Restzucker

Die Bestimmung des Gehaltes an Zucker (Saccharose, D-Glucose und D-Fructose), aus den im Vorfeld gewonnenen Extrakten der Zucker- und Futterrübensilagen, erfolgte enzymatisch mit einem Testset von r-biopharm (10 716 260 035). Hierbei wurde die Konzentration der Saccharose aus der Differenz des Gehaltes an D-Glucose vor und nach dem enzymatischen Aufschluss des Extraktes berechnet. Die Ermittlung der D-Fructose erfolgte direkt im Anschluss an die Bestimmung der D-Glucose. Ähnlich wie bei der Bestimmung von Ethanol, Milchsäure und Essigsäure, wurden nicht die einzelnen Saccharide bestimmt, sondern die bei der Umsetzung freigesetzten Coenzyme, wie z.B. Nicotinsäureamid-Adenin-Dinukleotid-Phosphat (NADP). Die photometrische Messung erfolgte bei einer Wellenlänge von 340 nm.

Nach der allgemeinen Berechnungsformel für die Bestimmung der Konzentration (s. Kapitel Ethanol, Milchsäure, Essigsäure) zur Berechnung der Zuckergehalte ergeben sich folgende Formeln:

Saccharose:

$$C = \frac{3,020 \times 342,3}{\varepsilon \times 1,00 \times 0,1 \times 1000} \times \Delta E = \frac{10,34}{\varepsilon} \times \Delta E \text{ [g Saccharose/ l Probelösung]}$$

D-Glucose:

$$C = \frac{3,020 \times 180,16}{\varepsilon \times 1,00 \times 0,1 \times 1000} \times \Delta E = \frac{5,441}{\varepsilon} \times \Delta E \text{ [g D-Glucose/ l Probelösung]}$$

D-Fructose:

$$C = \frac{3,040 \times 180,16}{\varepsilon \times 1,00 \times 0,1 \times 1000} \times \Delta E = \frac{5,477}{\varepsilon} \times \Delta E \text{ [g D-Fructose/ l Probelösung]}$$

Da vor der Analyse eine Verdünnung des Extraktes im Verhältnis 1:10 vorgenommen wurde, musste das Ergebnis im Anschluss mit dem Faktor 10 multipliziert werden.

## 4. Ergebnisse

Bei den Laboruntersuchungen zur Bestimmung der einzelnen Inhaltsstoffe bei den Zucker- und Futterrübensilagen sind stets Doppelbestimmungen durchgeführt worden. Für die Ergebnisdarstellungen wurden daraus jeweils die Mittelwerte gebildet. Die Gärverluste der einsilierten Rübensorten waren mit Ausnahme von zwei Gläsern relativ gleich. Im Mittel betrugen sie 0,88 %. Das gilt ebenso für den pH-Wert der Silagen, der im Durchschnitt 3,6 betrug und somit auf einen optimalen Silierablauf schließen lässt.

Die Grundlage zur Ermittlung der Werte für den Mais resultieren aus Untersuchungen in vorangegangenen Jahren im gleichen Labor.

### 4.1 Gasbildungsvermögen von Zucker- und Futterrübensilagen

#### 4.1.1 Nährstoffgehalt der Zucker- und Futterrübensilagen

##### 4.1.1.1 Trockensubstanzgehalt

Abbildung 14 stellt die ermittelte Trockensubstanz der untersuchten Rübensilagen dar. Hierbei handelt es sich um die nach WEISSBACH (2008) korrigierte Trockensubstanz, die sich nach folgender Schätzformel berechnet wurde:

$$TS_K \text{ [g je kg FM]} = TS_N + 0,95 \text{ NFS} + 0,08 \text{ MS} + 1,00 \text{ AL}$$

Deutlich wird, dass sich die Trockenmassen der Zuckerrüben ohne Blatt, mit Werten zwischen 230 und 250 g/kg FM, relativ einheitlich darstellen. Die Trockensubstanzgehalte der Zuckerrüben ohne Blatt liegen ca. 20-30 g/kg TS unter denen der Zuckerrüben ohne Blatt.

Die Zuckerrübe Lukas verfügt mit 256 g/kg FM bei der Variante ohne Blatt und 214 g/kg FM bei der Variante mit Blatt über die höchsten Trockensubstanzgehalte.

Auch die Trockensubstanzen der Futterrübensilagen unterscheiden sich mit 160 und 170 g/kg FM bei der Probe ohne Blatt nicht wesentlich voneinander. Die Trockenmassen der Silagen mit Blatt liegen etwa 10 g/kg FM unter der Trockenmasse ohne Blatt.

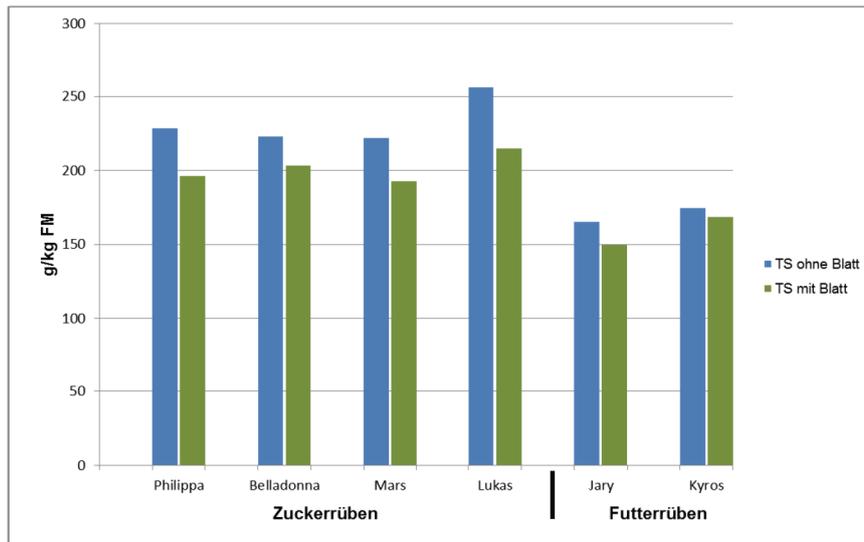


Abbildung 14: Trockensubstanzgehalte der Zucker- und Futtrübensilagen

Probe	TS ohne Blatt in g/kg FM	TS mit Blatt in g/kg FM
<b>Zuckerrüben</b>		
Philippa	228,24	196,14
Belladonna	222,85	203,31
Mars	222,07	192,71
Lukas	256,10	214,76
<b>Futtrüben</b>		
Jary	164,86	149,61
Kyros	174,86	168,38

#### 4.1.1.2. Fermentierbare organische Trockensubstanz (FoTS)

Abbildung 20 zeigt die fermentierbare organische Trockensubstanz der Zucker- und Futtrübensilagen. Die Ermittlung der Werte basiert auf der Schätzformel nach WEISSBACH (2009).

$$\text{FoTS [g je kg TS]} = 991 - (\text{XA}) - 0,70 (\text{XF})$$

Es wird deutlich, dass die Werte der Zuckerrübensilagen sich relativ einheitlich darstellen. Sie liegen in den Varianten ohne Blatt zwischen 860 und 880 g/kg TS, in den Varianten mit Blatt zwischen 830 und 850 g/kg TS. Die Zuckerrübensorte Mars weicht mit 811 g/kg TS etwas von den übrigen Zuckerrübenvarianten mit Blatt ab.

Die Futterrübensilagen ohne Blatt weisen Gehalte zwischen 810 und 830 g FoTS/kg TS auf. In der Variante mit Blatt liegen die Werte um etwa 20 g/kg TS niedriger als in der Variante ohne Blatt. Die Sorte Kyros verfügt hierbei über den höchsten Gehalt an FoTS.

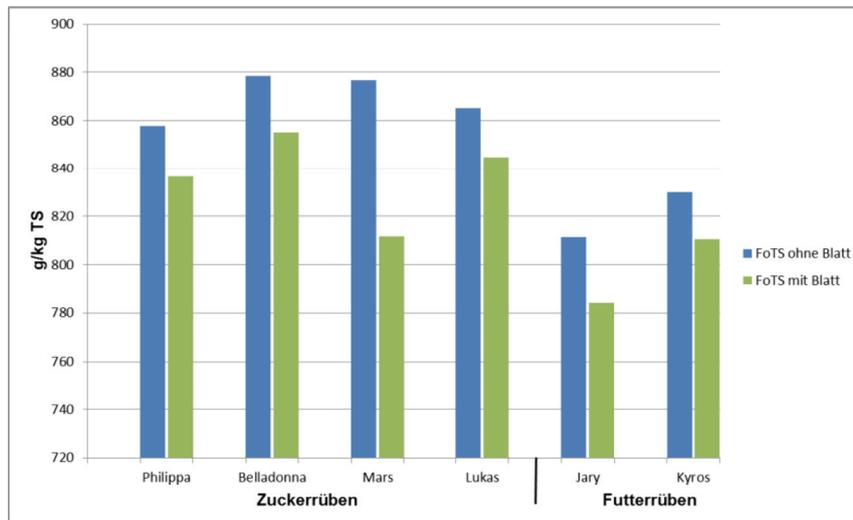


Abbildung 15: FoTS der Zucker- und Futterrübensilagen

Probe	FoTS ohne Blatt	FoTS mit Blatt
<b>Zuckerrüben</b>		
Philippa	857,7	836,6
Belladonna	878,5	855,2
Mars	876,6	811,7
Lukas	865,2	844,7
<b>Futterrüben</b>		
Jary	811,5	784,3
Kyros	830,1	810,4

#### 4.1.1.3 Rohfasergehalt

In Abbildung 15 ist der Gehalt an korrigierter Rohfaser dargestellt. Die Gehalte der Zuckerrübensilagen ohne Blatt sind mit 53 bis 56 g/kg TS nahezu identisch. Ähnlich verhält es sich bei den Varianten mit Blatt. Die Rohfasergehalte sind mit etwa 75 g/kg TS bei den Sorten Philippa, Mars und Lukas gleich hoch, nur die Sorte Belladonna liegt mit 64 g/kg TS leicht darunter.

Dieser Trend setzt sich bei den Futterrübensilagen fort. Die Sorte Jary liegt in der Variante ohne Blatt, mit einer korrigierten Rohfaser von 87 g/kg TS, etwas über dem Wert der Sorte Kyros, die eine korrigierte Rohfaser von 76 g/kg TS aufweist. Auch sind die korrigierten

Rohfasergehalte der Proben mit Blatt höher als die der Varianten ohne Blatt. Sie betragen bei der Futterrübe Jary 106 und bei Kyros 95 g/kg TS.

Die Werte der korrigierten Rohfaser der Futterrüben liegen über denen der Zuckerrüben.

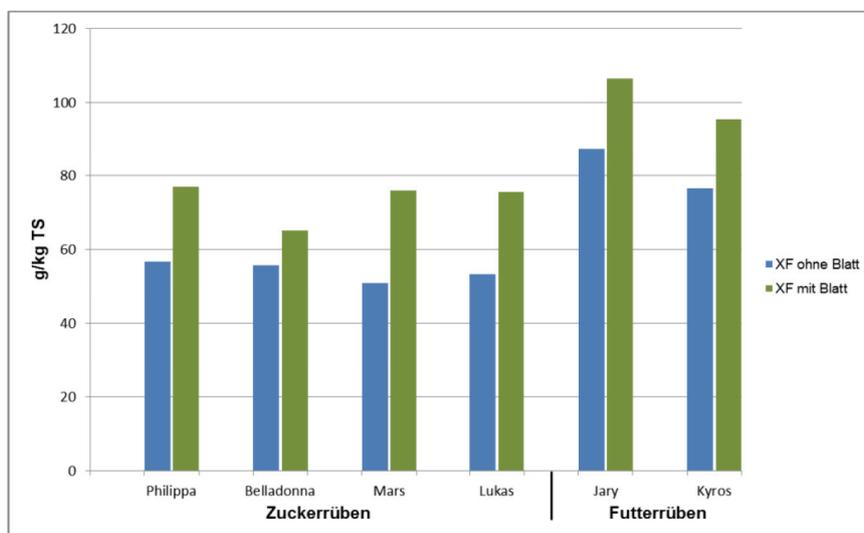


Abbildung 16: Rohfasergehalte der Zucker- und Futterrübensilagen

Probe	XF ohne Blatt in g/kg TS	XF mit Blatt in g/kg TS
<b>Zuckerrüben</b>		
Philippa	56,70	76,8
Belladonna	55,67	64,95
Mars	50,89	75,82
Lukas	53,26	75,5
<b>Futterrüben</b>		
Jary	87,36	106,52
Kyros	76,41	95,51

#### 4.1.1.4 Rohaschegehalt

Die Gehalte an Rohasche stellt die Abbildung 16 dar. Hierbei treten unter den einzelnen Zuckerrübensorten ohne Blatt leichte Schwankungen auf, die zwischen 80 und 110 g/kg T liegen.

Bei der Variante mit Blatt sind die Rohaschegehalte der Sorten Philippa, Belladonna und Lukas mit 100 und 110 g/kg T relativ identisch. Nur bei der Sorte Mars wurde mit 147 g/kg T ein erhöhter Wert ermittelt.

Die korrigierten Rohaschegehalte der Futterrübensilagen ohne Blatt liegen bei 130 g/kg TS (Jary) und 120 g/kg T (Kyros), die der Varianten mit Blatt, bei etwa 140 g/kg TS (Jary) und 120 g/kg T (Kyros).

Die korrigierten Rohaschegehalte der Futterrübensilagen sind im Mittel höher als die der Zuckerrübensilagen.

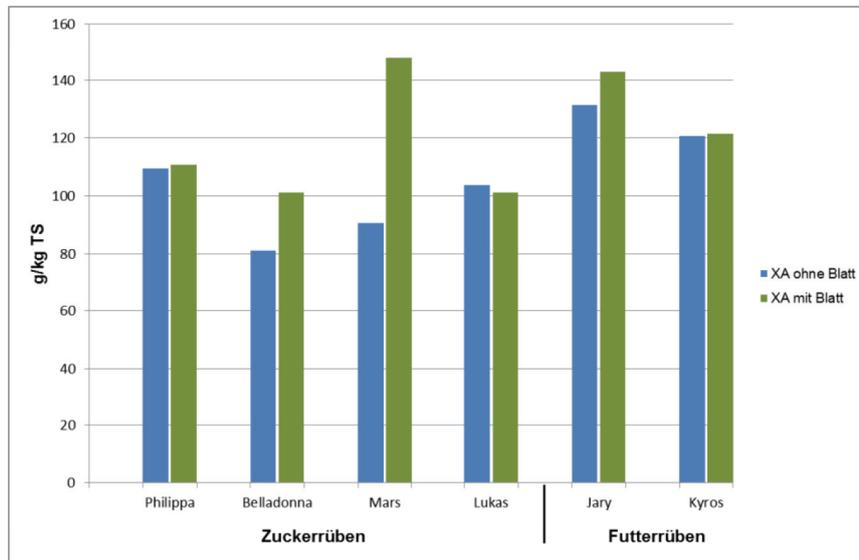


Abbildung 17: Rohaschegehalte der Zucker- und Futterrübensilagen

Probe	XA ohne Blatt in g/kg TS	XA mit Blatt in g/kg TS
<b>Zuckerrüben</b>		
Philippa	109,39	110,87
Belladonna	81,14	101,16
Mars	90,73	147,76
Lukas	103,59	101,18
<b>Futterrüben</b>		
Jary	131,59	143,08
Kyros	120,7	121,57

#### 4.1.1.5 Ethanol

Die folgende Abbildung 17 zeigt den Ethanolgehalt der Zucker- und Futterrübensilagen. Hierbei schneiden die Zuckerrübensorten Philippa und Belladonna in der Variante ohne Blatt mit etwa 20 g/kg FM am besten ab. Die Sorten Mars und Lukas liegen mit 13 g/kg FM zwar gleich auf, jedoch um 7 g/kg FM hinter den beiden anderen Sorten. Im Vergleich dazu, verfügen die Zuckerrübensilagen mit Blatt über eine geringere Menge an Ethanol. Die Sorten

Philippa und Lukas sind mit etwa 16 und 17 g/kg FM gleich auf, die Sorten Belladonna und Mars liegen mit etwa 14 g/kg FM geringfügig dahinter.

Ein Unterschied ist auch bei den Futterrübensilagen zu erkennen. Sind die Ethanolgehalte der Rüben ohne Blatt mit etwa 11 g/kg FM gleich, befindet sich die Futterrübe Jary in der Variante ohne Blatt, mit einem Ethanolgehalt von 16 g/kg FM, im mittleren Bereich der Zuckerrüben. Die Futterrübe Kyros platziert sich mit 11 g/kg FM als Schlusslicht in der Variante mit Blatt.

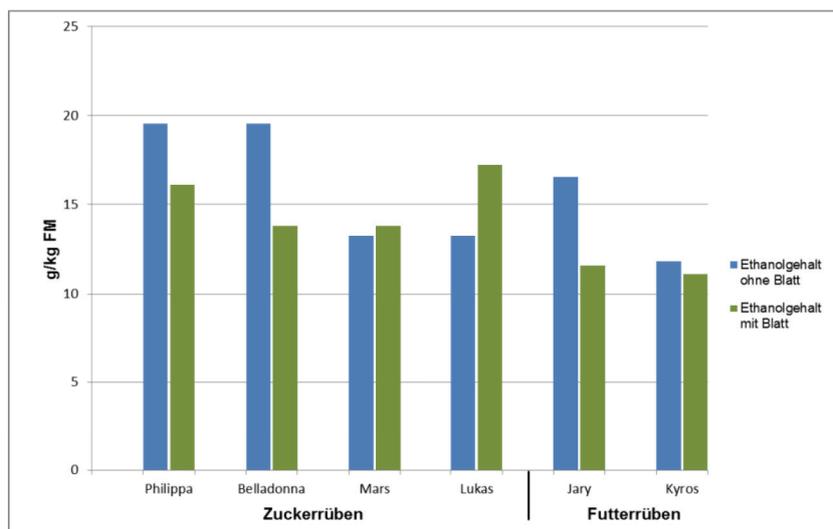


Abbildung 18: Ethanolgehalte der Zucker- und Futterrübensilagen

Probe	Ethanolgehalt ohne Blatt in g/kg FM	Ethanolgehalt mit Blatt in g/kg FM
<b>Zuckerrüben</b>		
Philippa	19,58	16,12
Belladonna	19,58	13,82
Mars	13,25	13,82
Lukas	13,25	17,28
<b>Futterrüben</b>		
Jary	16,53	11,60
Kyros	11,81	11,11

#### 4.1.1.6 Milchsäure

Die ermittelten Milchsäuregehalte der Zucker- und Futterrübensilagen sind in der Abbildung 18 dargestellt. Hierbei wird deutlich, dass die Zuckerrübe Philippa jeweils mit und ohne Blatt mit etwa 7,5 g/kg FM über die geringsten Milchsäuregehalte verfügt. Gefolgt von der Sorte

Mars, die mit etwa 9 g/kg FM in beiden Varianten einen ähnlichen Gehalt an Milchsäure zeigt, schließt sich die Zuckerrübe Belladonna an. Hierbei liegt der Milchsäuregehalt, der in der Variante mit Blatt 12 g/kg FM beträgt, etwa 3 g/kg FM über dem der Variante ohne Blatt. Eine größere Differenz innerhalb der Varianten tritt bei der Sorte Lukas auf. Enthält die Probe ohne Blatt etwa 16 g Milchsäure je kg FM, verfügt die Variante mit Blatt lediglich über 8 g Milchsäure je kg FM.

Die Futterrübe Jary verfügt in den Varianten mit und ohne Blatt mit 11 g/kg FM über einen einheitlichen Milchsäuregehalt. Hingegen tritt bei der Futterrübe Kyros eine Differenz von ca. 4 g Milchsäure je kg FM auf. Hierbei liegt der Milchsäuregehalt der Variante mit Blatt mit etwa 14 g/kg FM oberhalb des Gehaltes der Variante ohne Blatt.

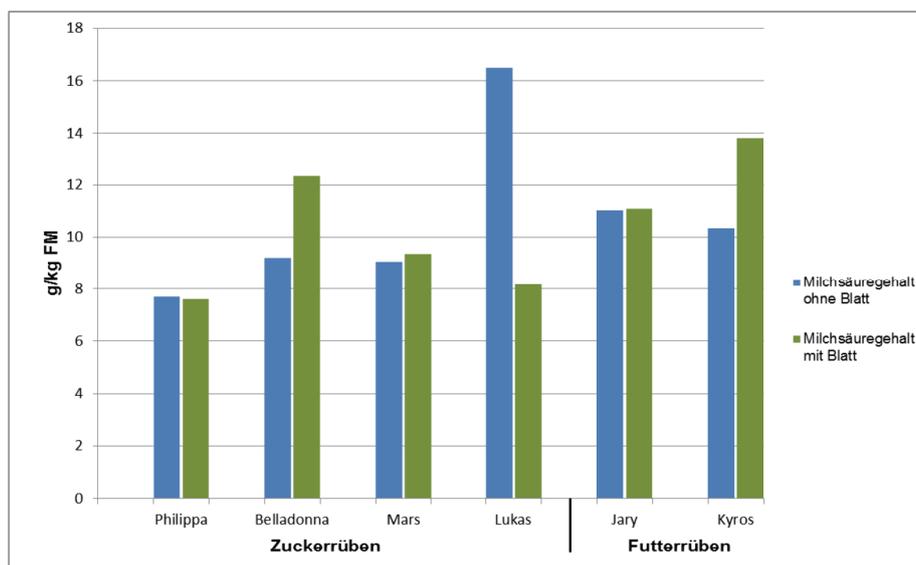


Abbildung 19: Milchsäuregehalte der Zucker- und Futterrübensilagen

Probe	Milchsäuregehalt ohne Blatt in g/kg FM	Milchsäuregehalt mit Blatt in g/kg FM
<b>Zuckerrüben</b>		
Philippa	7,69	7,61
Belladonna	9,21	12,33
Mars	9,05	9,37
Lukas	16,50	8,17
<b>Futterrüben</b>		
Jary	11,02	11,08
Kyros	10,35	13,83

#### 4.1.1.7 Essigsäure

Abbildung 19 stellt die Essigsäuregehalte der untersuchten Zucker- und Futterrübensilagen dar. Mit 6 und etwa 7 g/kg FM verfügt die Sorte Philippa im Vergleich zu den anderen Sorten über einen relativ hohen Essigsäuregehalt. Die übrigen Sorten, einschließlich die der Futterrüben, bewegen sich in Bereichen von maximal 5 g bis minimal 1,5 g Essigsäure je kg FM. Den geringsten Essigsäuregehalt weist die Sorte Belladonna, in der Variante ohne Blatt, mit 1,5 g/kg FM auf. Mit Ausnahme der Futterrübe Jary befinden sich die Gehalte an Essigsäure in den Varianten mit Blatt oberhalb derer ohne Blatt.

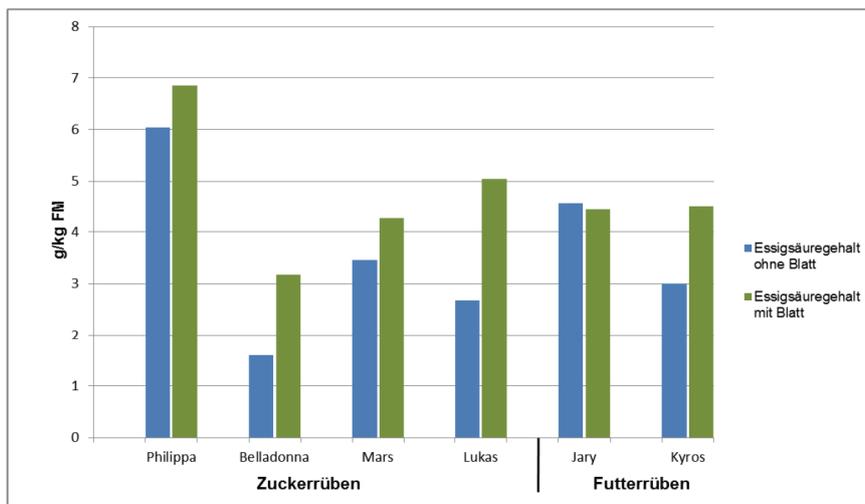


Abbildung 20: Essigsäuregehalte der Zucker- und Futterrüben

Probe	Essigsäuregehalt ohne Blatt in g/kg FM	Essigsäuregehalt mit Blatt in g/kg FM
<b>Zuckerrüben</b>		
Philippa	6,04	6,85
Belladonna	1,60	3,17
Mars	3,46	4,26
Lukas	2,67	5,05
<b>Futterrüben</b>		
Jary	4,58	4,44
Kyros	3,00	4,49

## 4.1.2 Gasbildungsvermögen von Zucker- und Futterrübensilagen

### 4.1.2.1 Gasbildungsvermögen von Zucker- und Futterrübensilagen je kg

#### Trockensubstanz

Die folgende Abbildung 20 zeigt das Gasbildungsvermögen in l/kg TSk der Zucker- und Futterrübensilagen, das anhand der Schätzformel nach WEISSBACH (2009) errechnet wurde.

- Biogas [Normliter/kg TSk] =  $0,750 \text{ FoTS} + 0,18 \text{ AL}$  [g/kg TSk]
- Methan [Normliter/kg TSk] =  $0,375 \text{ FoTS} + 0,32 \text{ AL}$  [g/kg TSk]

Hierbei wird zunächst deutlich, dass bei den Zucker- und Futterrübensilagen die mögliche Gasausbeute je kg/TSk der Varianten mit Blatt unterhalb derer ohne Blatt liegt. Die Ergebnisse aus den Proben aller Zuckerrübensorten ohne Blatt liegen zwischen 650 und 660 l Biogas je kg TSk und damit dicht zusammen. Die Zuckerrübensilagen mit Blatt weisen ein Gasbildungspotenzial zwischen 610 und 643 l/kg TSk auf.

Beide Sorten der Futterrübensilagen weisen in der Variante ohne Blatt, mit 610 und 624 l/kg TSk, ein geringeres Gasbildungspotenzial auf als die Zuckerrüben, die ebenfalls ohne Blatt siliert wurden. Nochmal darunter folgen die Futterrübensilagen mit Blatt. Sie sind mit 590 l/kg TSk (Jary) und 610 l/kg TSk (Kyros) im hinteren Drittel zu platzieren, wenn es um das Gasbildungsvermögen, bezogen auf die korrigierte Trockensubstanz, geht.

Die Abbildung verdeutlicht weiterhin, dass das Methanbildungspotenzial abhängig vom Gasbildungspotenzial ist. Etwa 50 % des gebildeten Gases besteht aus Methan. Somit erfolgt eine Interpretation, hinsichtlich der Sortenunterschiede, analog des Gasbildungspotenzials.

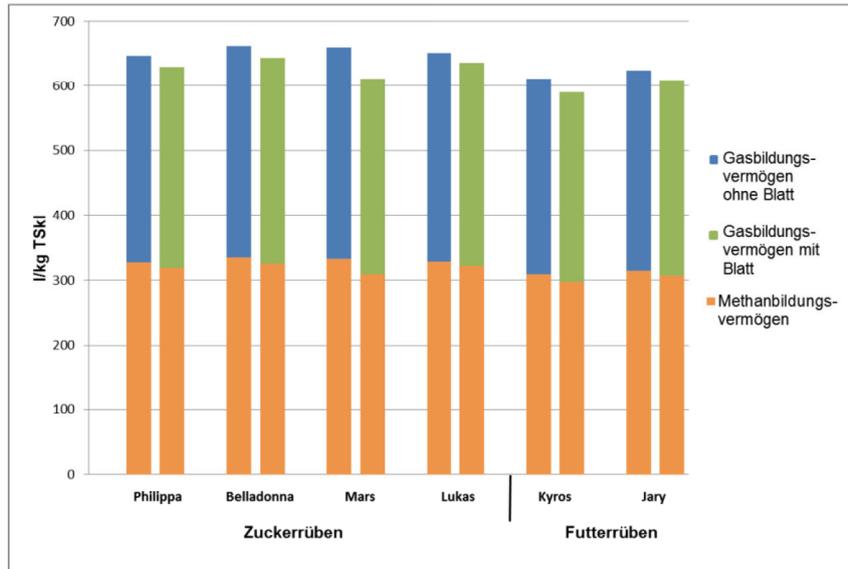


Abbildung 21: Gasbildungsvermögen von Zucker- und Futterrübensilagen

Probe	Gasbildungsvermögen ohne Blatt in l/kg TSk	Gasbildungsvermögen mit Blatt in l/kg TSk	Methanbildungsvermögen ohne Blatt in l/kg TSk	Methanbildungsvermögen mit Blatt in l/kg TSk
<b>Zuckerrüben</b>				
Philippa	647	630	328	319
Belladonna	662	644	336	325
Mars	660	611	333	309
Lukas	651	637	329	322
<b>Futterrüben</b>				
Jary	612	590	310	298
Kyros	625	610	315	307

#### 4.1.2.2 Gasbildungsvermögen je Tonne Frischmasse von Zucker- und Futterrübensilagen

Abbildung 22 stellt das Gasbildungsvermögen der Zucker- und Futterrübensilagen in  $\text{m}^3/\text{t FM}$  dar. Die Silagen der Zuckerrüben ohne Blatt befinden sich mit Ausnahme der Sorte Lukas, die über ein Gasbildungspotenzial von  $167 \text{ m}^3/\text{t FM}$  verfügt, auf einem ähnlichen Niveau von etwa  $150 \text{ m}^3 \text{ Biogas} / \text{t FM}$ . Die Zuckerrübensilagen mit Blatt liegen zwischen 20 und  $30 \text{ m}^3 \text{ Biogas} / \text{t FM}$  unter den Silagen ohne Blatt.

Das Gasbildungsvermögen der Futterrübensilagen liegt bei beiden Sorten und Varianten im Bereich von 90 bis  $110 \text{ m}^3/\text{t FM}$  und damit deutlich unter den Werten der

Zuckerrübensilagen. Die Sorte Jary schneidet bei den Futterrübensilagen geringfügig besser ab als die Sorte Kyros.

Die Darstellung des Methanbildungsvermögens resultiert entsprechend aus dem Gasbildungsvermögen der Silagen aus den Zucker- und Futterrüben.

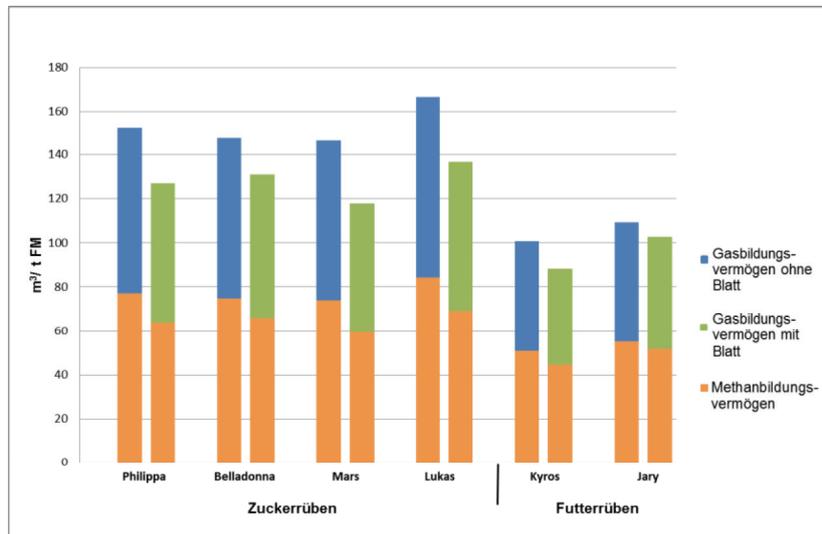


Abbildung 22: Gasbildungsvermögen je t FM von Zucker- und Futterrübensilagen

Probe	Gasbildungsvermögen ohne Blatt in m <sup>3</sup> /t FM	Gasbildungsvermögen mit Blatt in m <sup>3</sup> /t FM	Methanbildungsvermögen ohne Blatt in m <sup>3</sup> /t FM	Methanbildungsvermögen mit Blatt in m <sup>3</sup> /t FM
<b>Zuckerrüben</b>				
Philippa	152	127	77	64
Belladonna	148	131	75	66
Mars	147	118	74	60
Lukas	167	137	84	69
<b>Futterrüben</b>				
Jary	101	88	51	45
Kyros	109	103	55	52

#### 4.1.2.3 Gasbildungsvermögen je Hektar der Zucker- und Futterrübensilagen

In der folgenden Abbildung 23 ist das Gasbildungsvermögen der Zucker- und Futterrübensilagen in m<sup>3</sup>/ Hektar dargestellt. Es wird deutlich, dass beide Sorten der Futterrübensilagen mit Blatt, mit jeweils etwa 11.000 und 13.000 m<sup>3</sup> Biogas/ha, allen weiteren Sorten und Varianten überlegen sind. Auch in der Variante ohne Blatt verfügen sie über das höchste Gasbildungspotenzial je Hektar.

Das Gasbildungspotenzial der Zuckerrübensilagen ohne Blatt befindet sich auf einem einheitlichen Niveau von 8.800 m<sup>3</sup> Biogas/ha. Eine Ausnahme bildet die Sorte Lukas, deren Gasbildungsvermögen mit 10.000 m<sup>3</sup>/ha über den Werten der anderen Silagen liegt. Die Varianten mit Blatt liegen in ihrem Gasbildungspotenzial etwa 1.000 m<sup>3</sup>/ha höher als die Varianten ohne Blatt.

Die Einstufung der verschiedenen Rübensorten hinsichtlich ihres Methanbildungsvermögens erfolgt sinngemäß des Gasbildungspotenzials.

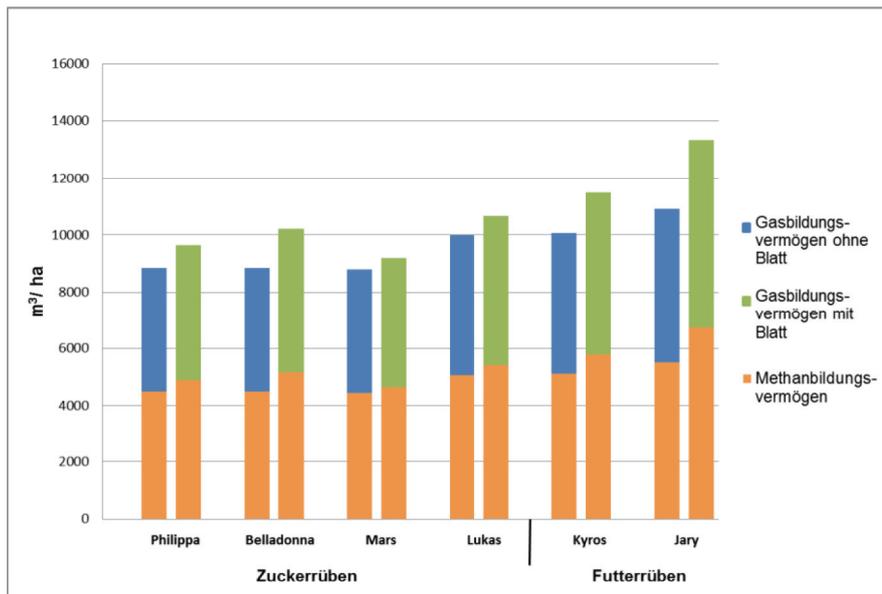


Abbildung 23: Gasbildungsvermögen je Hektar von Zucker- und Futterrübensilagen

Probe	Gasbildungsvermögen ohne Blatt in m <sup>3</sup> /ha	Gasbildungsvermögen mit Blatt in m <sup>3</sup> /ha	Methanbildungsvermögen ohne Blatt in m <sup>3</sup> /ha	Methanbildungsvermögen mit Blatt in m <sup>3</sup> /ha
<b>Zuckerrüben</b>				
Philippa	8858	9644	4491	4879
Belladonna	8857	10211	4489	5156
Mars	8792	9189	4436	4642
Lukas	10008	10664	5051	5399
<b>Futterrüben</b>				
Jary	10083	11484	5104	5794
Kyros	10923	13348	5509	6730

## 4.2 Vergleich des Gasbildungsvermögen von Mais-, Zucker- und Futterrübensilagen

### 4.2.1 Vergleich des Gasbildungsvermögen je kg Trockensubstanz von Mais-, Zucker- und Futterrübensilagen

Die Sorten der Zucker- und Futterrüben stellen sich relativ einheitlich dar, daher erfolgt im weiteren Verlauf ein Vergleich der Silagen aus den Kulturen Mais, Zucker- und Futterrüben anhand von Durchschnittswerten.

Die Berechnung der FoTS, des Gasbildungspotenzials sowie der Korrektur der Trockensubstanz von Maissilagen erfolgte hierbei nach den Schätzformeln von WEISSBACH (2008-09).

- $\text{FoTS [g je kg TS]} = 984 - (\text{XA}) - 0,47 (\text{XF}) - 0,00104 (\text{XF})^2$
- $\text{Biogas [Normliter/kg TS}_K] = 0,800 \text{ FoTS [g/kg TS}_K]$
- $\text{Methan [Normliter/kg TS}_K] = 0,420 \text{ FoTS [g/kg TS}_K]$
- $\text{TS}_K \text{ [g je kg FM]} = 24,5 + 0,980 \text{ TS}_N$

Die Angaben zu den Nährstoffen der Maissilagen in Tabelle 2 sind Durchschnittswerte von 53 Proben aus Untersuchungen der Jahre 2006 bis 2010.

Tabelle 2: Durchschnittliche Nährstoff-, Biogas- und Methangehalte der Maissilagen

Maissilagen	TS <sub>N</sub> in g/kg FM	TS <sub>K</sub> in g/kg FM	XA in g/kg TS	XF in g/kg TS	FoTS in g/kg TS	Biogas in l/kg TS <sub>K</sub>	Methan in l/kg TS <sub>K</sub>
(n= 53)	339,6	356,1	38,6	200,3	797,3	638	335

Abbildung 23 verdeutlicht, dass die Zuckerrübensilagen in der Variante ohne Blatt über ein Gasbildungsvermögen verfügen, dass bei 655 l/kg TS<sub>K</sub> liegt. Darauf folgen die Maissilagen mit 638 l/kg TS<sub>K</sub>. Die Zuckerrübensilagen mit Blatt, sowie die Silagen der Futterrübe ohne Blatt, liegen mit 630 l/kg TS<sub>K</sub> nur geringfügig dahinter. Über das geringste Gasbildungsvermögen verfügen die Futterrübensilagen in der Variante mit Blatt, dass bei 600 l/kg TS<sub>K</sub> liegt.

Die Darstellung des Methanbildungsvermögens erfolgt analog des Gasbildungsvermögens.

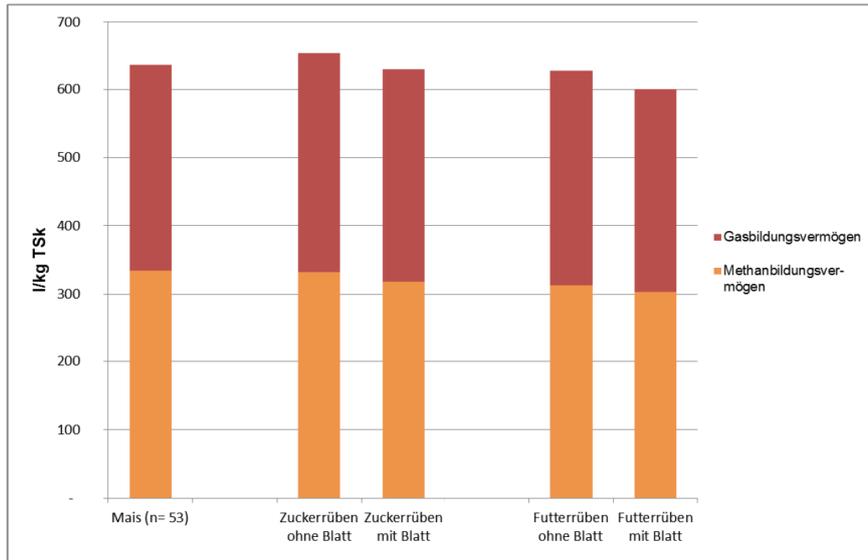


Abbildung 24: Gasbildungsvermögen je kg TSK von Zucker- und Futterrübensilagen im Vergleich zu Maissilagen

Proben	Gasbildungsvermögen in l/kg TSk	Methanbildungsvermögen in l/kg TSk
Mais	638	335
Zuckerrüben ohne Blatt	655	332
Zuckerrüben mit Blatt	631	319
Futterrüben ohne Blatt	629	313
Futterrüben mit Blatt	600	303

#### 4.2.2 Gasbildungsvermögen je Tonne Frischmasse von Maissilagen im Vergleich zu Zucker- und Futterrübensilagen

In der folgenden Abbildung 21 ist das Gasbildungsvermögen der Kulturen Mais, Zucker- und Futterrüben bezogen auf eine Tonne Frischmasse, d.h. eine Tonne Silage, dargestellt. Angegeben ist das Gasbildungsvermögen in  $\text{m}^3/\text{t FM}$ . Zunächst verdeutlicht die Darstellung, dass Maissilagen als eingesetztes Substrat, mit  $233 \text{ m}^3$  Biogas je Tonne Silage über das höchste Potenzial verfügen. Die verschiedenen Zuckerrübensilagen befinden sich in der Variante ohne Blatt mit durchschnittlichen Gaserträgen von  $150 \text{ m}^3/\text{t FM}$  deutlich hinter den Maissilagen. Die Zuckerrübensilagen mit Blatt liegen mit  $125 \text{ m}^3$  Biogas je eingesetzte Tonne FM hinter dem Gasbildungsvermögen der Silagen ohne Blatt.

Das Gasbildungspotenzial je Tonne FM ist mit etwa  $100 \text{ m}^3$  bei den Futterrüben mit und ohne Blatt, im Vergleich zu den anderen Substraten, vergleichsweise gering.

Die Rangfolge nach den Methangehalten ergibt sich entsprechend des Gasbildungspotenzials der untersuchten Kulturen.

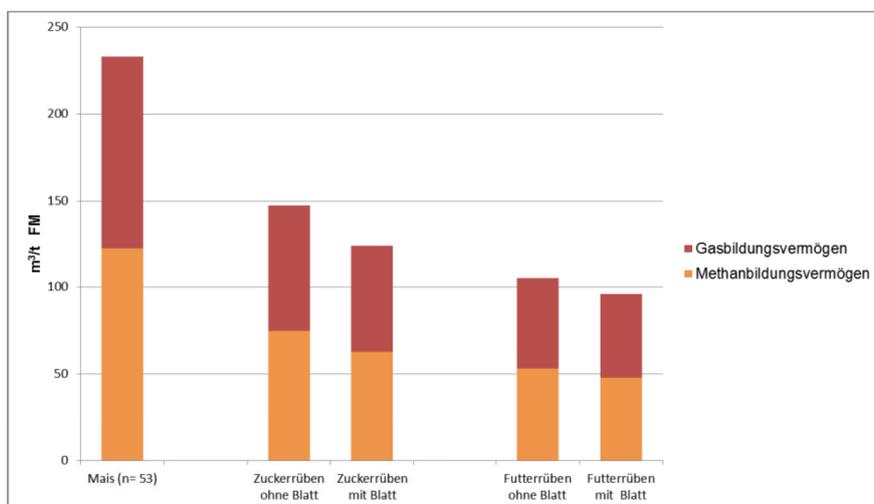


Abbildung 25: Vergleich des Gasbildungs- und Methanbildungsvermögens je Tonne FM von Mais, Zucker- und Futterrübensilagen

Proben	Gasbildungsvermögen in m <sup>3</sup> /t FM	Methanbildungsvermögen in m <sup>3</sup> /t FM
Mais	233	122
Zuckerrüben ohne Blatt	148	75
Zuckerrüben mit Blatt	124	63
Futterrüben ohne Blatt	105	53
Futterrüben mit Blatt	96	48

#### 4.2.3 Gasbildungspotenzial je Hektar von Maissilagen im Vergleich zu Zucker- und Futterrübensilagen

Die Abbildung 22 zeigt das Gasbildungsvermögen in m<sup>3</sup> je Hektar von Mais-, Zucker- und Futterrübensilagen. Als Grundlage zur Bestimmung der Frischmasseerträge je Hektar dienen für die Kultur Mais Ergebnisse aus vorangegangenen Untersuchungen, bei denen u.a. die Erträge an Frischmasse je Hektar geschätzt wurden. Als Mittelwert wurde hierbei 34 Tonnen Frischmasse je Hektar ermittelt. Die Werte für die Frischmasseerträge der Zucker- und Futterrüben beruhen auf mittleren Erträgen, die in durchschnittlichen Jahren erzielt werden können. Für die Zuckerrüben wurden hierbei 60 Tonnen und für die Futterrüben 100 Tonnen je Hektar angenommen (KELLER, HANUS, HEYLAND, 1999).

Diese Werte beziehen sich auf den Ertrag ohne Blatt und Rübenkopf. Zur Ermittlung des Frischmasseertrags, einschließlich der Blätter und Rübenköpfe, sind zu dem entblätterten

Ertrag 30 % hinzuzufügen. Dieser Wert konnte mithilfe des Schätzverfahrens von Rübenenerträgen ermittelt werden (Kap. 3.1).

Die Abbildung verdeutlicht, dass die Futterrübensilagen in den Varianten mit Blatt, mit etwa 12.000 m<sup>3</sup> Biogas je Hektar, über das größte Gasbildungspotenzial verfügen. Alle weiteren untersuchten Kulturen liegen darunter. Weiterhin ist festzustellen, dass die Zucker- und Futterrübensilagen mit Blatt besser abschneiden als die Varianten ohne Blatt. Verfügen die Zuckerrübensilagen mit Blatt über ein Gasbildungsvermögen von etwa 10.000 m<sup>3</sup>/ha, sind bei den Varianten ohne Blatt ca. 1.000 m<sup>3</sup> Biogas je Hektar weniger möglich. Das Gasbildungspotenzial der Futterrübensilagen ohne Blatt liegt mit 10.000 m<sup>3</sup>/ha im Bereich der Silagen aus Zuckerrüben mit Blatt. Lediglich die Maissilagen weisen im Vergleich zu den Zucker- und Futterrübensilagen, mit 8.000 m<sup>3</sup> Biogas je Hektar, einen relativ geringen Wert auf.

Wie bereits bei vorangegangenen Abbildungen erläutert, entsprechen die Methangehalte der Silagen in etwa der Hälfte des Gasbildungsvermögens.

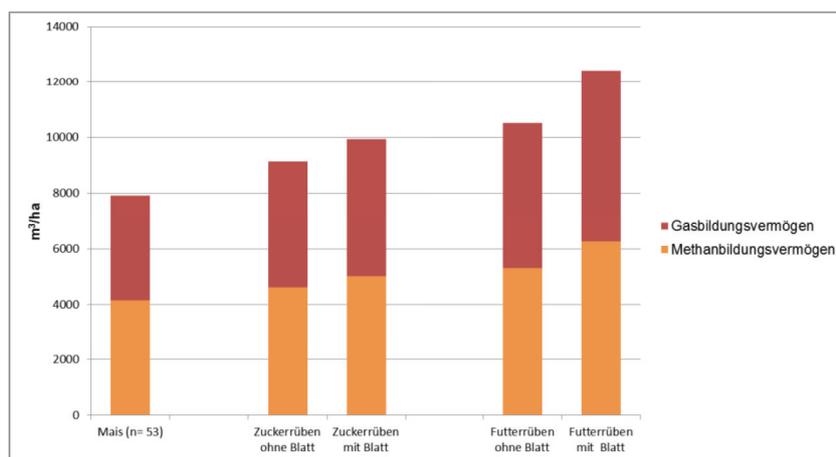


Abbildung 26: Vergleich des Gasbildungsvermögens je Hektar von Mais, Zucker- und Futterrübensilagen

Proben	Gasbildungsvermögen in m <sup>3</sup> /ha	Methanbildungsvermögen in m <sup>3</sup> /ha
Mais	7920	4158
Zuckerrüben ohne Blatt	9129	4617
Zuckerrüben mit Blatt	9927	5019
Futterrüben ohne Blatt	10503	5307
Futterrüben mit Blatt	12416	6262

## 5. Diskussion

### 5.1 Korrigierte Trockensubstanz, fermentierbare organische Trockensubstanz, Rohfaser und Rohasche der Zucker- und Futterrübensilagen

Der **Korrekturfaktor** aller untersuchten Rübensilagen beträgt im Mittel 1,18, wobei er bei den Zuckerrübensilagen mit durchschnittlich 1,16 etwas niedriger ist als bei den Futterrübensilagen. Hier beträgt der Faktor 1,20. Dieses ist auf die niedrigeren Trockensubstanzgehalte in der Frischmasse der Futterrübensilagen zurückzuführen. Die Abweichung resultiert aus dem physiologischen Aufbau der Futterrübe. Im Gegensatz zur Zuckerrübe, verfügt die Futterrübe über weniger Gefäßbündelringe im Rübenkörper. Im parenchymatischen Gewebe um diese Ringe lagert die Futterrübe wenig Zucker ein, während dies bei der Zuckerrübe der Ort mit der höchsten Zuckerkonzentration ist. Außerdem liegen die Gefäßbündelringe bei Futterrüben nicht so dicht beieinander, wie dies bei Zuckerrüben der Fall ist. Somit ist neben dem Zuckergehalt auch der Trockensubstanzgehalt geringer. Die generelle Trockensubstanzbildung ist umwelt- und genetisch bedingt

(KELLER, HANUS, HEYLAND, 1999).

Demnach unterliegen die **korrigierten Trockensubstanzgehalte** der Zucker- und Futterrüben Schwankungen. Unter Nichtbeachtung des Korrekturfaktors weisen die Werte für die Zuckerrübensilagen ohne Blatt im Mittel 201,7 g/kg FM auf, und sind damit typisch für diese Fruchtart. Das gilt auch für die Futterrübensilagen, deren mittlerer unkorrigierter Trockensubstanzgehalt von 141 g/kg FM sortentypisch ist.

Die geringeren Werte bei allen Blattvarianten resultieren aus den niedrigeren Trockensubstanzgehalten des Blattes, wodurch es zu einer Verdünnung kommt.

Im Vergleich zu allen untersuchten Rüben verfügt die Silage der Zuckerrübe Lukas, sowohl in der blattlosen als auch in der Variante mit Blatt, über den höchsten Trockensubstanzgehalt.

Einen Einfluss auf die **fermentierbare organische Trockensubstanz** nehmen die Gehalte an Rohfaser und Rohasche. Daraus ergibt sich die Abweichung bei der Sorte Mars. Während die Gehalte an Rohfaser bei allen Silagen der Zuckerrüben auf einem ähnlichen Niveau liegen, verfügt die Sorte Mars in der Variante mit Blatt über einen relativ hohen Rohaschegehalt von 148 g/kg TSk, im Vergleich zu den weiteren Zuckerrübensilagen mit

Blatt. Da es sich bei der Schätzformel nach WEISSBACH (2009) u.a. um ein Subtraktionsverfahren handelt, verringert sich der Gehalt an FoTS bei steigenden Rohfaser- und Rohaschegehalten.

Die korrigierten **Rohfasergehalte** der Futterrübensilagen liegen über den Werten der Silagen aus Zuckerrüben, da diese generell über einen höheren Rohfasergehalt in der Frischmasse verfügen. Unkorrigiert beträgt dieser jeweils 70 g (Jary ohne Blatt) und 65 g (Kyros ohne Blatt) je kg FM. Die Rohfasergehalte der Zuckerrübensilagen ohne Blatt liegen zwischen 50 und 56 g/ kg FM und sind, unter Beachtung der Korrektur, typisch für diese Frucht.

Die Werte der Varianten mit Blatt liegen aufgrund höherer Rohfasergehalte im Blatt über den Proben ohne Blatt, sowie auf einem relativ einheitlichen Niveau.

Analog zur ermittelten Rohfaser ist die **Rohasche** zu interpretieren. Auch hier verfügen die Futterrübensilagen über höhere Rohaschegehalte als Zuckerrübensilagen. Weiterhin enthält das Blatt i.d.R. mehr Rohasche, da darin mehr Mineralstoffe eingelagert sind als im Rübenkörper. Somit kommt es zur Erhöhung der Gehalte in den Silagen mit Blatt.

In der vorliegenden Untersuchung stellt sich der korrigierte Rohaschegehalt der Zuckerrübe Mars mit Blatt als „Ausreißer“ dar. Der Grund dafür könnte in einem erhöhten Sandanteil in der Probe liegen. Zwar wurden alle Rüben vor der Einsilierung gründlich geputzt, es ist jedoch nicht auszuschließen, dass sich noch Schmutzanteile an Blatt und Rübe befanden.

## 5.2 Gehalte an Ethanol, Milchsäure und Essigsäure in Zucker- und Futterrübensilagen

Die **Ethanolgehalte** der verschiedenen Rübensilagen variieren. So weisen z.B. die Zuckerrübensilagen der Sorten Philippa und Belladonna, in der Variante ohne Blatt, mit annähernd 20 g/kg FM die höchsten Ethanolgehalte auf. Die blattlosen Silagen der Sorten Mars und Lukas befinden sich mit jeweils 13 g/kg FM etwa 35 % unter den Werten der anderen Zuckerrübensorten.

Weiterhin ist zu bemerken, dass die Ethanolgehalte der blattlosen Futterrübensilagen voneinander abweichen. Demnach verfügt die Silage der Sorte Jary mit 16 g Ethanol/kg FM über einen Gehalt, der auch bei den Zuckerrüben wiederzufinden ist. Die Probe der Futterrübe Kyros verfügt mit etwa 12 g Ethanol/kg FM über einen Gehalt, der z.T. noch unter den Werten der Proben mit Blatt liegt.

Die Ethanolgehalte der Silagen mit Blatt liegen i.d.R. unter denen ohne Blatt. Das ist, wie auch schon bei der korrigierten Trockensubstanz erwähnt, auf den Verdünnungseffekt der einsilierten Blattmasse zurückzuführen.

Ethanol ist ein Abbauprodukt, das beim Vorgang der Vergärung aus Zuckern entsteht.

Während der Phase des betonten Rübenwachstums lagern die Pflanzen ca. 60-70 % der im Blattapparat gebildeten Assimilate als Zucker in den Rübenkörper ein (KELLER, HANUS, HEYLAND, 1999). Somit ist der Zucker- und daraus resultierende Ethanolgehalt im Blatt und Rübenkopf vergleichsweise gering.

Auch wenn die Ethanolgehalte der Zucker- und Futterrübensilagen erhöhte Differenzen untereinander aufweisen, liegen die ermittelten Werte in einem üblichen Bereich. Untersuchungen von WEISSBACH (2008) bestätigen dies.

Die Gehalte an **Milchsäure** stellen sich bei allen Silageproben unterschiedlich dar. Milchsäure ist ein Produkt aus der Vergärung von Kohlenhydraten, das neben Essigsäure und Ethanol entsteht. Da die Vergärung von Zucker aufgrund der geringen Pufferkapazität sehr rasch zu Milchsäurebildung führt, wird auch dementsprechend schnell eine Ansäuerung unter pH 4 erreicht, sodass die Milchsäuregärung ausklingt (WEISSBACH, 2008). Die z.T. niedrigeren Werte der Proben ohne Blatt, im Gegensatz zu den Proben mit Blatt, können dies bestätigen, da überwiegend schnell vergärbare Kohlenhydrate zur Verfügung standen.

Die Milchsäuregehalte der Futterrübensilagen liegen aufgrund der geringeren Zuckergehalte dementsprechend geringfügig höher.

Die Werte aller Proben liegen in einem akzeptablen Bereich, auch wenn sich die Silage der Zuckerrübe Lukas ohne Blatt als stark differierend zu den anderen Werten darstellt. Untersuchungen von WEISSBACH (2008) bestätigen diese Aussage.

Somit ist die Milchsäurebildung nicht sortenspezifisch, sondern eher vom Silierverlauf abhängig.

Der **Essigsäuregehalt** aller Proben unterliegt ähnlichen Schwankungen wie der Milchsäuregehalt. Die Bildung von Essigsäure ist zu Beginn der Silierung zwingend erforderlich, da der im Silostock verbleibende Restsauerstoff aufgebraucht wird und somit günstige Bedingungen für die Milchsäurebakterien entstehen.

In der vorliegenden Untersuchung verfügt die silierte Zuckerrübe Philippa in der Variante mit und ohne Blatt über die höchsten Essigsäuregehalte. Bei der Silierung der Zuckerrübe Belladonna sind hingegen in beiden Varianten die geringsten Essigsäuregehalte gemessen worden.

Beide silierten Futterrübensorten reihen sich mit ihren Essigsäuregehalten zwischen den Zuckerrüben ein. Somit lässt dieses Ergebnis die Aussage zu, dass auch der Essigsäuregehalt nach einer Silierung nicht sortenspezifisch ist, zumal die Silierung unter Laborbedingungen durchgeführt wurde.

### 5.3 Gas- und Methanbildungsvermögen von Mais, Zucker- und Futterrüben

Bei der Betrachtung der Ergebnisse zum **Gas- und Methanbildungsvermögen** fällt auf, dass alle untersuchten Zuckerrübensorten, unabhängig davon, ob sie mit oder ohne Blatt einsiliert wurden, mit etwa 650 Liter über ein relativ einheitliches Gasbildungsvermögen verfügen, wenn man dieses auf ein Kilogramm korrigierte Trockensubstanz bezieht. Lediglich die Zuckerrübe Mars, in der Variante mit Blatt, liegt mit 611 l Biogas/kg TSk etwa 4 % hinter den Werten der anderen Zuckerrübensilagen mit Blatt.

Bei den Futterrübensilagen werden nun die Auswirkungen des geringeren Ethanol- und Trockensubstanzgehaltes deutlich. Das Gasbildungspotenzial je kg/TSk ist jedoch in beiden Varianten nur um etwa 5 % geringer als bei den Sorten der Zuckerrüben.

Vergleicht man die zur Untersuchung herangezogenen Zucker- und Futterrübensorten mit der Energiepflanze Mais, ist festzustellen, dass es, bezogen auf die korrigierte Trockensubstanz, keine gravierenden Unterschiede beim Gasbildungspotenzial gibt. Bei den Sorten Belladonna und Mars konnten mit etwa 660 l Biogas/kg TSk geringfügig höhere Werte als bei Maissilagen ermittelt werden.

Unter Berücksichtigung des restlichen Zuckers, der in allen Proben ermittelt wurde, ergäben sich noch höhere Werte. Im Mittel enthielten die Zuckerrübensilagen mit und ohne Blatt ein Restzuckergehalt von 50 g/kg FM sowie die Futterrübensilagen 36 g/kg FM.

Tabelle 3 stellt den zusätzlichen Biogasertrag aus dem Restzucker dar, der vom stöchiometrischen Gasbildungspotenzial N-freier organischer Verbindungen, ermittelt von WEISSBACH (2009), abgeleitet wurde.

Tabelle 3: zusätzlicher Gasertrag aus dem Restzucker

	Biogas in l/kg TSk (ohne Blatt)	Biogas in l/kg TSk (mit Blatt)	Methan in l/kg TSk (ohne Blatt)	Methan in l/kg TSk (mit Blatt)
<b>Zuckerrüben</b>				
Philippa	6,6	7,6	3,3	3,8
Belladonna	21,7	10,6	10,8	5,3
Mars	12,9	7,9	6,5	3,9
Lukas	10,5	6,2	5,3	3,1
<b>Futterrüben</b>				
Jary	6,9	2,3	3,5	1,2
Kyros	20,3	4,1	10,1	2,1

Demnach ergäbe sich ein zusätzliches Gasbildungsvermögen von durchschnittlich 13 Liter Biogas je kg TSk bei den Zuckerrübensilagen ohne Blatt, etwa 8 Liter bei den Zuckerrübensilagen mit Blatt, fast 14 Liter bei den Futterrübensilagen ohne Blatt und 3 Liter bei den Futterrübensilagen mit Blatt.

Zwar ist der Zuwachs an Biogas, und damit auch an Methan, sehr gering, jedoch soll der theoretisch mögliche Mehrertrag nicht unerwähnt bleiben. Auch wenn WEISSBACH (2009) den Zuckergehalt der Rübensilagen in der Berechnung der FoTS berücksichtigt, schien es für diese Untersuchungen wichtig zu sein, die tatsächlichen Gehalte an Restzucker zu ermitteln.

Das relative Gleichgewicht des Gasbildungsvermögens je kg korrigierte TSk kann bei der Betrachtung des **Gas- und Methanbildungsvermögens je Tonne Frischmasse** (Silage) nicht aufrechterhalten werden. Hier liegen die Maissilagen mit 233 m<sup>3</sup> Biogas je Tonne FM deutlich vor allen anderen untersuchten Kulturen. Der hohe Trockensubstanzgehalt von durchschnittlich 340 g/kg FM mit der energiereichen Stärke macht dies möglich.

Die Zuckerrübensilagen, in den Varianten mit und ohne Blatt, liegen in diesem Vergleich mit etwa 125 und 150 m<sup>3</sup> Biogas/ t Silage (Frischmasse) deutlich hinter den Maissilagen.

Im Vergleich zwischen den einzelnen Zuckerrübensorten kann Lukas in beiden Varianten mit 166 und 136 m<sup>3</sup> das höchste Gasbildungsvermögen aufweisen. Wie schon beim Mais erwähnt, wirkt sich ein hoher Trockensubstanzgehalt positiv auf die Gasbildung aus. Im Vergleich zu allen anderen beprobten Rübensilagen, verfügt die Zuckerrübe Lukas mit 256 und 214 g/kg FM über die höchsten Trockenmassegehalte. Auch wenn sie sich sonst in allen weiteren Untersuchungskriterien durchschnittlich darstellt.

Das geringste Gasbildungsvermögen je Tonne eingesetzter Silage (FM) haben die Futterrübensilagen. Hier wird der Einfluss der Trockensubstanz besonders deutlich. Mit etwa

100 m<sup>3</sup> Biogas/t Silage liegen sie etwa 58 % unter dem Gasbildungspotenzial von Maissilagen und 33 % hinter den Zuckerrübensilagen.

Das geringe Gasbildungsvermögen je Tonne Silage gleichen die Futterrüben bei der Betrachtung des **Gas- und Methanbildungsvermögen je Hektar** wieder aus.

Die hohen Frischmasseerträge sorgen dafür, dass sich die Futterrübensilagen, in den Varianten mit Blatt, deutlich von den anderen Kulturen abgrenzen. Die theoretisch möglichen Erträge liegen bei der Futterrübe Jary mit Blatt bei 11.484 m<sup>3</sup> und bei der Sorte Kyros mit Blatt bei

13.348 m<sup>3</sup> Biogas/ha. Generell stellen sich die Futterrüben bei dieser Betrachtungsweise besser als die übrigen Kulturen da. Im Gegensatz zur Maissilage verfügen sie, in der Variante ohne Blatt, über ein 30 % höheres Gasbildungsvermögen. Bleibt das Blatt an der Pflanze, können die Futterrüben theoretisch etwa 48 % mehr Biogas je Hektar erzeugen als die Maissilagen. Im Vergleich zu den Zuckerrübenvarianten, verfügen die Futterrübensilagen mit und ohne Blatt, über ein durchschnittlich 20 bzw. 10 % höheres Gasbildungspotenzial je Hektar.

Bei den Zuckerrüben ist es die Sorte Lukas, deren Silagen das höchste Gasbildungsvermögen/ha erreichen, was aus dem höheren Gasertrag je Tonne Frischmasse (Silage) bzw. aus dem Ertrag je kg TSk resultiert. Mit 10.008 m<sup>3</sup> in der Variante ohne Blatt und 10.664 m<sup>3</sup> in der Variante mit Blatt, liegt sie etwa 13 % über den theoretisch möglichen Erträgen der anderen Zuckerrübensorten.

Das Schlusslicht bilden die Maissilagen mit etwa 8.000 m<sup>3</sup> Biogas je Hektar. Zwar verfügt der Mais über das höchste Gasbildungspotenzial je kg TSk, der im Vergleich zu den Rüben relativ niedrige Frischmasseertrag je Hektar lässt jedoch, auf die Fläche bezogen, ein höheres Gasbildungspotenzial nicht zu.

## 6. Schlussfolgerung und Ausblick

Um aus den vorliegenden Untersuchungsergebnissen ein Fazit ziehen zu können, sind zwei Betrachtungsweisen notwendig. Zum einen, das Gasbildungspotenzial der Substrate, bezogen auf die Anbaufläche, und zum anderen, der Einsatz von einer Tonne Substrat (Frischmasse), das in der Anlage zur Produktion von Biogas dient.

Bei der Bewertung der Substrate hinsichtlich des Gasbildungsvermögens je Hektar, schneiden die Futterrübensilagen mit Blatt, mit einem deutlichen Mehrertrag gegenüber den Zuckerrüben- und Maissilagen, am besten ab. Auch ohne Blatt sind sie den anderen untersuchten Kulturen überlegen. Die Sorte Kyros stellt sich hierbei als besonders ertragreich dar.

Bei den Zuckerrüben ist es die Sorte Lukas, die mit und ohne Blatt das höchste Gasbildungsvermögen/ha aufweist.

Als Kultur mit dem geringsten Gasbildungspotenzial je Hektar erweist sich der Mais.

Festzuhalten bleibt, dass bei den Rüben, die Varianten mit Blatt stets über ein höheres Potenzial an Gasbildung je Hektar verfügen, als dies bei den blattlosen Varianten der Fall ist.

Die weitere Betrachtungsweise ist für die Auswahl der Substrate zur Gasgewinnung in der Biogasanlage maßgeblich.

Das Fassungsvermögen der Fermenter ist begrenzt. Um die Anlage effektiv zu betreiben, ist es notwendig, Substrate zuzuführen, die über ein möglichst hohes Gasbildungsvermögen je Tonne eingesetzte Silage verfügen.

Die Maissilagen positionieren sich hierbei deutlich vor den Zuckerrübensilagen, bei denen die Sorte Lukas, in der Variante ohne Blatt, mit einem Mehrertrag von 50 m<sup>3</sup> Biogas/t Silage gegenüber den anderen Zuckerrübensorten, das höchste Gasbildungsvermögen aufweist.

Die Futterrübensilagen liegen mit ihrem Gasbildungsvermögen deutlich hinter den Zuckerrüben- sowie den Maissilagen. Um die gleiche Menge an Biogas zu erzeugen, die aus einer Tonne Maissilage entsteht, sind etwa 2,3 t Futterrübensilage notwendig. Beim Vergleich der Futterrübensorten schneidet die Sorte Kyros besser ab als die Sorte Jary.

Weiterhin kann gesagt werden, dass auf den Einsatz der Rübensilagen mit Blatt verzichtet werden sollte, da das Gasbildungspotenzial je eingesetzte Tonne Rübensilage niedriger ausfällt als bei den blattlosen Varianten.

Abschließend bleibt festzustellen, dass weder die Silagen der Zucker- noch die der Futterrüben die Maissilagen als Substrat für die Biogasgewinnung ersetzen können. Jedoch

stellen sie ein hervorragendes Substrat da, das den Einsatz von Maissilagen in Biogasanlagen ergänzt.

Um die, hinsichtlich der Sortenwahl, getroffenen Aussagen zu stützen, wird es in Zukunft notwendig sein, weitere Untersuchungen durchzuführen. Weiterhin ist die Lagerung der Rüben näher zu analysieren. Insbesondere eine ökonomische Bewertung der verschiedenen Lagerungsmöglichkeiten und der daraus entstehenden Verluste, scheint notwendig zu sein.

## **7. Zusammenfassung**

In Deutschland werden derzeit etwa 6.800 Biogasanlagen zur Energiegewinnung betrieben. Dabei erfolgt zu 76 % der Einsatz von Mais als Substrat zur Gasgewinnung. Um den wachsenden Anbau von Mais und die daraus resultierenden Folgen zu mindern, ist es notwendig nach Alternativkulturen zu suchen.

In der vorliegenden Arbeit soll herausgefunden werden, über welches Gasbildungsvermögen die Silagen verschiedener Zucker- und Futterrübensorten verfügen, um die Ergebnisse dann mit dem Potenzial der Maissilagen zu vergleichen. Weiterhin gilt es herauszufinden, ob der Einsatz der Rübensilagen in der Biogasanlage mit oder ohne Blatt erfolgen sollte.

Die Untersuchungen zu dieser Arbeit dienten gleichzeitig als Vorversuch für weitere Betrachtungen in Bezug auf die Sortenwahl verschiedener Rüben zur Biogasgewinnung.

Hierzu wurden vier Zuckerrüben- und zwei Futterrübensorten per Hand zum tatsächlichen Erntezeitpunkt geerntet, vorbereitet und unter Laborbedingungen einsiliert. Die Silierung erfolgte jeweils mit und ohne Blatt. Von jeder Sorte und Variante wurden vier Wiederholungen angelegt. Nach einer Lagerdauer von etwa sechs Monaten und einer anschließenden Überprüfung auf Silierverluste, wurden jeweils zwei Proben je Sorte und Variante geöffnet und auf ihre Gehalte an Trockensubstanz, Rohfaser, Rohasche, Ethanol, Milchsäure und Essigsäure untersucht. Weiterhin erfolgte eine Erfassung des restlichen Zuckers in den Silagen.

Mit der neuen Regressionsgleichung zur Bestimmung des Gasbildungspotenzials von Substraten für die Energiegewinnung in Biogasanlagen nach WEISSBACH (2009) ist es möglich, das Gas- und Methanbildungsvermögen der Zucker- und Futterrüben zu bestimmen.

Die Methode nach WEISSBACH (2008, 2009) beruht darauf, dass nicht die organische Trockensubstanz, sondern die tatsächlich fermentierbare organische Trockensubstanz (FoTS) zur Ermittlung des Gasbildungsvermögens herangezogen wird. Weiterhin werden bei

der Methode die Substrate, sofern sie siliert werden, auf flüchtige Inhaltsstoffe korrigiert, da diese ebenfalls über ein Gasbildungspotenzial verfügen. Somit lassen sich genauere Angaben zum Gasbildungspotenzial der eingesetzten Substrate machen.

Unter Anwendung der Formel zur Bestimmung des Gasbildungspotenzials nach WEISSBACH (2008, 2009) konnte das Vermögen der Zucker- und Futterrüben bestimmt und mit den Werten der Maissilage verglichen werden. Die Datengrundlage zur Bestimmung des Gasbildungspotenzials der Maissilagen stammte aus Untersuchungen der Jahre 2006 bis 2010.

Die Untersuchungen ergaben zunächst, dass es Unterschiede zwischen dem Gasbildungspotenzial der Zucker- und Futterrüben gibt, die nicht unerheblich sind. Die Futterrübensilagen verfügen über das höchste Gasbildungsvermögen, wenn dieses auf einen Hektar Anbaufläche bezogen wird. Das Gasbildungspotenzial der Zuckerrübensilagen reiht sich bei dieser Bezugsgröße hinter dem der Futterrüben ein, es liegt jedoch noch vor dem Potenzial der Maissilagen.

Bezieht man das Gasbildungsvermögen jedoch auf den Einsatz von einer Tonne Silage (Frischmasse) in der Biogasanlage, stellt sich der Mais als Spitzenreiter da. Die Futterrüben weisen dabei das geringste Gasbildungspotenzial auf.

Auch auf das Blatt an der Rübe sollte beim Einsatz in der Biogasanlage verzichtet werden, da sich das Gasbildungsvermögen dadurch weiter verringert.

Beim Vergleich der Sorten kann der Sorte Lukas, bei den Zuckerrüben, und der Sorte Kyros, bei den Futterrüben, eine relative Überlegenheit bescheinigt werden.

## Literaturverzeichnis

- POPP, MANFRED (2011): Wann gehen die Öl- und Gasvorräte der Erde zu Ende? Letztes Update: 27.04.2011, <http://www.energie-fakten.de/stiftung/2010-11-peak-oil/2011-02-peak-oil-popp.pdf>
- FACHVERBAND BIOGAS e.V. (2011): Branchenzahlen 2010
- PROPLANTA (2011): Erneuter Zuwachs von Biogasausbau in Deutschland, Letztes Update: 27.04.2011, [http://www.proplanta.de/Agrar-Nachrichten/Energie/Erneuter-Zuwachs-von-Biogasausbau-in-Deutschland-2010\\_article1302259276.html](http://www.proplanta.de/Agrar-Nachrichten/Energie/Erneuter-Zuwachs-von-Biogasausbau-in-Deutschland-2010_article1302259276.html)
- ERNEUERBARE ENERGIEN IN ZAHLEN (2011): Stand 2010, Letztes Update: 03.05.2011 [http://www.erneuerbareenergien.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/ee\\_in\\_deutschland\\_graf\\_tab.pdf](http://www.erneuerbareenergien.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/ee_in_deutschland_graf_tab.pdf)
- DEUTSCHES MAISKOMITEE e.V. (2011): Maisanbaufläche steigt, News 04/2011; Letztes Update: 03.05.2011 <http://www.maiskomitee.de/web/intranet/news.aspx?news=20ba5224-c7c6-4d4e-a11f-15e4a06f53dd>
- FACHAGENTUR NACHWACHSENE ROHSTOFFE e.V., Handreichung Biogasegewinnung- und Nutzung, 4. Auflage, Gülzow 2009
- KARPENSTEIN-MACHAN, MARIANNE (2005): Energiepflanzenbau für Biogasanlagenbetreiber, DLG Verlag, 2005: 25-30
- PAHLOW, G. (2006): Gärungsbiologische Grundlagen und biochemische Prozesse der Silagebereitung, Praxishandbuch Futterkonservierung, DLG-Verlag Frankfurt/Main. 7: 11-20
- BRIEMLE, G., M. ELSÄSSER, T. JILG, W. MÜLLER & H. NUSSBAUM (1996): Nachhaltige Grünlandbewirtschaftung in Baden-Württemberg. in: Nachhaltige Land- und Forstwirtschaft; Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York (1996): S. 125–256
- KELLER, HANUS, HEYLAND (1999): Knollen und Wurzelfrüchte, Körner- und Futterleguminosen, Handbuch des Pflanzenbaues 3, Ulmer-Verlag: 311-332 und 451-457
- BENSMANN, M (2010): Zuckerstückchen als Biogas-Booster, Biogas Journal/ Sonderheft Energiepflanzen, Nov. 2011: 48-49
- KAISER, F.L. (2007) Einfluss der stofflichen Zusammensetzung auf die Verdaulichkeit nachwachsender Rohstoffe beim anaeroben Abbau in Biogasreaktoren: 38-40 [http://deposit.dnb.de/cgi-bin/dokserv?idn=993067956&dok\\_var=d1&dok\\_ext=pdf&filename=993067956.pdf](http://deposit.dnb.de/cgi-bin/dokserv?idn=993067956&dok_var=d1&dok_ext=pdf&filename=993067956.pdf)

- WEISSBACH, F. (2009): Die Bewertung von nachwachsenden Rohstoffen für die Biogasgewinnung. Teil I: Das Gasbildungspotenzial der fermentierbaren Nährstoffe, Pflanzenbauwissenschaften 2/2009: 72-85
- WEISSBACH, F. (2008): Die Korrektur des Trockensubstanzgehaltes von Zuckerrübensilagen als Substrat für Biogasanlagen, LANDTECHNIK 6/2008: 354-355
- WEISSBACH, F. (2008): Die Korrektur des Trockensubstanzgehaltes von Maissilagen als Substrat für Biogasanlagen, LANDTECHNIK 2/2008: 2-3
- WEISSBACH, F. (2011): Bewertung von pflanzlicher Biomasse als Substrat für die Biogasgewinnung; Kolloquium Biogaserzeugung, Landesforschungsanstalt-MV Gülzow, 31.01.2011
- WEISSBACH, F. (2010): Das Gasbildungspotenzial von pflanzlicher Biomasse bei der Biogasgewinnung 122. VDLUFA Kongress: 29-31
- BUNDESSORTENAMT, Beschreibende Sortenliste 2010: 222-246

## Anhang

### pH-Wert nach Öffnung der Gläser und Silierverluste der Zucker- und Futterrübensilagen

Proben	Ø pH-Wert	Ø Silierverluste in %
<b>Zuckerrüben ohne Blatt</b>		
Philippa	3,5	0,9
Belladonna	3,5	0,4
Mars	3,6	0,6
Lukas	3,4	0,7
<b>Zuckerrüben mit Blatt</b>		
Philippa	3,7	0,9
Belladonna	3,6	0,9
Mars	3,7	0,7
Lukas	3,4	0,8
<b>Futterrüben ohne Blatt</b>		
Jary	3,6	0,6
Kyros	3,6	0,4
<b>Futterrüben mit Blatt</b>		
Jary	3,7	1
Kyros	3,6	0,6

### TSn, TSk und Korrekturquotienten der Zucker- und Futterrübensilagen

Proben	TSn in g/kg FM	TSk in g/kg FM	Quotient aus TSk/TSn
<b>Zuckerrüben ohne Blatt</b>			
Philippa	195,00	228,24	1,17
Belladonna	192,26	222,85	1,16
Mars	196,22	222,07	1,13
Lukas	223,32	256,10	1,15
<b>Zuckerrüben mit Blatt</b>			
Philippa	165,67	196,14	1,18
Belladonna	173,77	203,31	1,17
Mars	165,19	192,71	1,17
Lukas	184,27	214,76	1,17
<b>Futterrüben ohne Blatt</b>			
Jary	132,63	164,86	1,24
Kyros	149,55	174,86	1,17
<b>Futterrüben mit Blatt</b>			
Jary	122,40	149,64	1,22
Kyros	138,75	168,38	1,21

Ethanol-, Milchsäure- und Essigsäuregehalte der Zucker- und Futterrübensilagen

Proben	Ethanol in g/kg FM	Milchsäure in g/kg FM	Essigsäure in g/kg FM
<b>Zuckerrüben ohne Blatt</b>			
Philippa	19,58	7,69	6,04
Belladonna	19,58	9,21	1,60
Mars	13,25	9,05	3,46
Lukas	13,25	16,50	2,67
<b>Zuckerrüben mit Blatt</b>			
Philippa	16,12	7,61	6,85
Belladonna	13,82	12,33	3,17
Mars	13,82	9,37	4,26
Lukas	17,28	8,17	5,05
<b>Futterrüben ohne Blatt</b>			
Jary	16,53	11,02	4,58
Kyros	11,81	10,35	3,00
<b>Futterrüben mit Blatt</b>			
Jary	11,60	11,08	4,44
Kyros	11,11	13,83	4,49

FoTS, Biogas- und Methanbildungsvermögen der Zucker- und Futterrübensilagen

Proben	FoTS in g/kg TS	Biogas in l/kg TSk	Methan in l/kg TSk
<b>Zuckerrüben ohne Blatt</b>			
Philippa	857,73	647	328
Belladonna	878,53	662	336
Mars	876,6	660	333
Lukas	865,22	651	329
<b>Zuckerrüben mit Blatt</b>			
Philippa	836,59	630	319
Belladonna	855,24	644	325
Mars	811,5	611	309
Lukas	844,68	637	322
<b>Futterrüben ohne Blatt</b>			
Jary	811,52	612	310
Kyros	830,1	625	
<b>Futterrüben mit Blatt</b>			
Jary	784,33	590	298
Kyros	810,39	610	308

---

Untersuchungen zum Gasbildungsvermögen verschiedener Zucker- und Futterrübensorten im Vergleich zu Mais

Restzucker und das daraus resultierende Gas- und Methanbildungsvermögen

Proben	Gluc + Fruc in g/kg TS	Sacch in g/kg TS	Zucker in g/kg TS	Biogas in l/kg	Methan in l/kg
<b>Zuckerrüben ohne Blatt</b>					
Philippa	28,6	8,9	37,5	6,6	3,3
Belladonna	62,2	29,1	91,3	21,7	10,8
Mars	31,7	17,3	49	12,9	6,5
Lukas	38,3	14,1	52,4	10,5	5,3
<b>Zuckerrüben mit Blatt</b>					
Philippa	21,6	10,3	13,9	7,6	3,8
Belladonna	40,3	14,3	54,6	10,6	5,3
Mars	32	10,5	42,6	7,9	3,9
Lukas	24,9	8,4	33,3	6,2	3,1
<b>Futterrüben ohne Blatt</b>					
Jary	29,4	9,3	38,7	6,9	3,5
Kyros	8,8	27,2	35,9	20,3	10,1
<b>Futterrüben mit Blatt</b>					
Jary	46	3,1	49,1	2,3	1,2
Kyros	16	5,5	21,5	4,1	2,1

TSn, TSk, XA, XF, FoTS, Biogas- und Methanbildungsvermögen der Maissilagen

Maissilagen (n= 53)	TSn in g/kg FM	TSk in g/kg FM	XA korr. in g/kg TS	XF korr. in g/kg TS	FoTS in g/kg TS	Biogas in l/kg TSk	Methan in l/kg TSk
2010	379,8	379,8	26,8	150,3	863,2	691	363
2009	350,8	368,3	37	192	817,4	654	343
2008	341,7	359,4	38,8	216,1	794,7	636	334
2007	316,8	334,9	43,1	231,3	775,3	620	326
2006	332,6	350,4	50,4	227	772,9	618	325

Gas- und Methanbildungsvermögen von Mais-, Zucker- und Futterrübensilagen

Proben	auf FM bezogen		Ertrag FM t /ha	Biogas /ha m <sup>3</sup> /ha	Methan /ha m <sup>3</sup> /ha
	Biogas m <sup>3</sup> /t Silage	Methan m <sup>3</sup> /t Silage			
Maissilagen	233	122	34	7920	4158
Zuckerrübensilagen ohne Blatt:					
Philippa	148	75	60	8858	4491
Bella	148	75	60	8857	4489
Mars	147	74	60	8792	4436
Lukas	167	84	60	10008	5051
∅	<b>152</b>	<b>77</b>	<b>60</b>	<b>9129</b>	<b>4617</b>
Zuckerrübensilagen mit Blatt:					
Philippa	124	63	78	9644	4879
Belladonna	131	66	78	10211	5156
Mars	118	60	78	9189	4642
Lukas	137	69	78	10664	5399
∅	<b>127</b>	<b>64</b>	<b>78</b>	<b>9927</b>	<b>5019</b>
Futterrübensilagen ohne Blatt:					
Jary	101	51	100	10083	5104
Kyros	109	55	100	10923	5509
∅	<b>105</b>	<b>53</b>	<b>100</b>	<b>10503</b>	<b>5307</b>
Futterrübensilagen mit Blatt:					
Jary	88	45	130	11484	5794
Kyros	103	52	130	13348	6730
∅	<b>96</b>	<b>48</b>	<b>130</b>	<b>12416</b>	<b>6262</b>

**Selbstständigkeitserklärung**

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel verfasst habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

---

Ort, Datum

---

Unterschrift