

# Schlussbericht

zum Vorhaben

## **Biomasseaufwertung und Silierung lignocellulosereicher Koppelprodukte zur Optimierung der Methanausbeute (BASiliKOM)**

Zuwendungsempfänger:

Fachhochschule Südwestfalen, Fachbereich Agrarwirtschaft, Soest

Förderkennzeichen:

22400715

Thema:

Biomasseaufwertung und Silierung lignocellulosereicher Koppelprodukte zur Optimierung der Methanausbeute (BASiliKOM)

Laufzeit:

01.02.2015 - 31.05.2018

Datum der Veröffentlichung:

30.08.2018

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Ernährung  
und Landwirtschaft

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

## Inhalt

I. Ziele .....	6
1. Aufgabenstellung .....	6
1.1 Voraussetzungen .....	6
1.2 Planung und Ablauf .....	7
2. Stand der Technik.....	9
2.1 Stand der Wissenschaft und Technik .....	9
2.2 Literatur .....	13
3. Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	15
II. Ergebnisse .....	16
1.1 Material und Methoden .....	16
1.1.1 Substrate .....	16
1.1.2 Silierversuche.....	18
1.1.3 Faseranalytik .....	23
1.1.4 Biogasertragstests .....	28
Methoden .....	30
1.1.5 Elektronenmikroskopie .....	34
1.2 Ergebnisse .....	35
1.2.1 Silierbarkeit und Biogasleistungen verschiedener Stroharten .....	35
1.2.2 Möglichkeiten der Aufwertung von Stroh durch Co-Silierung mit Zuckerrüben.....	37
1.2.3 Co-Silierung von Pferdemist mit Zuckerrüben .....	45
1.2.4 Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes von Zwischenfrüchten.....	49
1.2.5 Untersuchung des Lignocellulose-Voraufschlusses durch Silieren .....	52
1.3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.....	55
1.3.1 Einleitung .....	55
1.3.2 Basisdaten Hauptsubstrate.....	56
1.3.3 Greening und Maisdeckel .....	56
1.3.4 Betrachtung Gerstenstroh.....	59
1.3.5 Betrachtung Weizenstroh .....	60
1.3.6 Betrachtung Zwischenfrüchte .....	60
1.3.7 Betrachtung Zuckerrübe und Rübenblätter .....	63
1.3.8 Betrachtung Maisstroh.....	64
1.3.9 Betrachtung Rapsstroh .....	67
1.3.10 Betrachtung Pferdemist .....	68

1.3.11 Betrachtung Pachtkosten.....	70
Literatur.....	70
1.4 Diskussion.....	72
1.4.1 Aufwertung lignocellulosereicher Koppelprodukte durch Silieren.....	72
1.4.2 Silagen aus Stroharten .....	75
1.4.3 Aufwertung von Stroh- und Pferdemistsilagen durch Zuckerrüben .....	78
1.4.4 Zwischenfrüchte .....	80
Literatur.....	81
1.5 Zusammenfassung .....	82
1.6 Schlussfolgerungen .....	84
III Verwertung.....	86
IV Erkenntnisse von Dritten .....	88
V Veröffentlichungen .....	89
VI Anhang .....	90

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energien .....	6
Abbildung 2: Fließdiagramm des Projektverlaufes .....	8
Abbildung 3: Silageverdichter zum Verfestigen von Laborsilagen .....	21
Abbildung 4: Glaskolben- Biogasertragstest.....	28
Abbildung 5: Sensorbiogasanlage „Yield-Master“ .....	29
Abbildung 6: Absolute Biogaserträge im Vergleich mit Mais-GPS.....	36
Abbildung 7: Relative Biogaserträge bezogen auf die Mais-Referenzen.....	37
Abbildung 8: Vereinfachte Darstellung der Methanogese .....	38
Abbildung 9: Prüfung der messbaren Biomasseaufwertung.....	41
Abbildung 10: Gaserträge von Laborsilagen aus Körnermaisstroh und Zuckerrübe.....	43
Abbildung 11: Probennahmestellen aus Fahrsilo.....	44
Abbildung 12: Gaserträge eines Fahrsilos aus Körnermaisstroh und Zuckerrübe.....	44
Abbildung 13: Gesamtgaserträge Wintergerstenstroh und Zwischenfrüchte .....	49
Abbildung 14: relative Gaserträge von Mischsilagen mit Zwischenfrüchten .....	51
Abbildung 15: Weißer Senf am 16. Februar 2016.....	52
Abbildung 16: Gerstenstroh vor und nach der Silierung (REM).....	53
Abbildung 17: Rohfaserbestandteile Gerstenstroh vor und nach der Silierung .....	53
Abbildung 18: Gegenüberstellung der Projektergebnisse zur Effizienz .....	75

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Im Projekt verwendete Substrate .....	17
Tabelle 2: Zuckerrübensimulation.....	39
Tabelle 3: Gerstenstrohsilagen mit Rübe und Rübenblatt.....	42
Tabelle 4: Analysedaten von Mischsilagen aus Pferdemist mit Zucker- oder Futterrübe.....	46
Tabelle 5: Analysedaten von Pferdemist und Mischsilagen mit Zuckerrüben .....	47
Tabelle 6: Analysedaten von Gerstenstroh-Zwischenfruchtmischsilagen.....	50
Tabelle 7: TS-Gehalte und pH-Werte verschiedener Stroh-Monosilagen.....	54
Tabelle 8: Gemittelte Vollkosten der Energiepflanzenerzeugung .....	56
Tabelle 9 (Anhangtabelle A1): Gemittelte Analysewerte aus allen Versuchen .....	90
Tabelle 10 (Anhangtabelle A2): Gemittelte Werte der Sinnenprüfungen .....	91

## Abkürzungsverzeichnis

ADF	Säure-Detergenzien-Faser
ADL	Säure-Detergenzien-Lignin
aqua demin.	Demineralisiertes Wasser
BiomasseV	Biomasseverordnung – Verordnung über die Erzeugung von Strom aus Biomasse, vom 21.6.2001, zuletzt geändert am 21.7.2014
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
$\delta_{\%}$	Delta (Prozent) = prozentuale Änderung eines Messparameters
DLG	Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft e.V.
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EloS	enzymlösliche organische Substanz
EulOS	enzymunlösliche organische Substanz
FM	Frischmasse
FNR	Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.
FOS	flüchtige organische Säuren
FoTS	fermentierbare organische Trockensubstanz
FR	Futterrübe
FRB	Futterrübenblatt
fS	flüchtige Substanzen
fXF	Fraktionen des Faseranteils (Hemicellulose, Cellulose, Lignin)
GKT	Glaskolbentest
GPS	Ganzpflanzensilage
KbE	Koloniebildende Einheiten.
LfL	Landesanstalt für Landwirtschaft
$m_{\text{ges}}$	Masse (gesamt) in g
$m_i$	Masse d. jew. Substrates (einschl. Wassergehalt) in g)
MS	Milchsäure
MW	Mittelwert
NawaRo	Nachwachsender Rohstoff
NDF	Neutral-Detergenzien-Faser
NFC	Nicht-Faser-Kohlenhydrate
NfE	Stickstofffreie Extraktstoffe
Nges	Gesamt-Stickstoff
org. Sr.	organische Säuren
oS	organische Substanz
oTS	organische Trockensubstanz
TAC	totaler anorganischer Kohlenstoff
TM	Trockenmasse
TS	Trockensubstanz
$ts_{\text{ges}}$	Trockensubstanzgehalt (gesamt) in g
$TS_i$	Trockensubstanzgehalt d. jew. Substrates in %
$ts_i$	Trockensubstanzgehalt d. jew. Substrates in g
VDLUFA	Verband deutscher landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten
$w_{\text{ges}}$	Wassergehalt (gesamt) in g
wIK	wasserlösliche Kohlenhydrate
$w_z$	zuzugebende Wassermasse in g
XA	Rohasche
$X_c$	Kristallinitätsgrad (Ausprägung in % der Molmassen)
XF	Rohfaser
XL	Rohfett
XP	Rohprotein
ZR	Zuckerrübe
ZRB	Zuckerrübenblatt

# I. Ziele

## 1. Aufgabenstellung

### 1.1 Voraussetzungen

Im Jahr 2017 betrug der Anteil erneuerbarer Energieträger am Endstromverbrauch 31,5 % (Abb.1). Der Biogas-Anteil am Strom, basierend auf erneuerbaren Energien betrug 14,9 % (Umweltbundesamt, 2018).

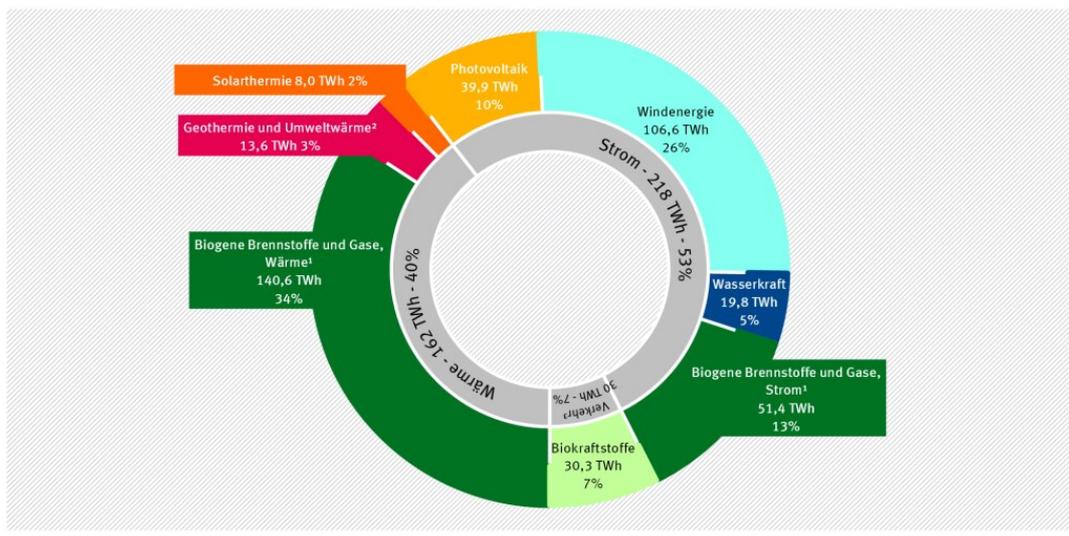
In Deutschland waren 2017 über 9200 Biogasanlagen gelistet, mit etwa 46.000 Arbeitsplätzen (Fachverband Biogas, 2018).

Der Wegfall der garantierten Einspeisevergütung für viele Anlagen und die Einsatzbegrenzung für Getreidekorn und Mais bedeuten neue Herausforderungen. Silomais wird ein zentraler Bestandteil der Substrate bleiben, aber nicht mehr das alleinige Substrat der Zukunft sein.

Weiterhin erfährt der Einsatz essbarer Pflanzenteile zur Energieproduktion eine seit Jahren geführte kontroverse Diskussion, wobei die Konkurrenz der Energie- zur Lebensmittelproduktion als Kritikpunkt angeführt wird.

#### Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energieträgern (2017\*)

Gesamtenergiebereitstellung: 410,4 Terawattstunden [TWh]



<sup>1</sup> mit biogenem Anteil des Abfalls

<sup>2</sup> Stromerzeugung aus Geothermie etwa 0,1 TWh (nicht separat dargestellt)

<sup>3</sup> Verbrauch von EE-Strom im Verkehr etwa 3,8 TWh

\* vorläufige Werte / Abweichungen bedingt durch Rundungen

Quelle: Umweltbundesamt (UBA) auf Basis AGEE-Stat  
Stand 02/2018

Abbildung 1: Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energien (Umweltbundesamt 2018)

Die Tatsache, dass Biogas für viele insbesondere kleinere, dezentrale Anlagenbetreiber ein wichtiges wirtschaftliches Standbein bleiben wird, macht die Lösung der oben genannten Probleme zu einem eminenten Gegenstand agrarwissenschaftlicher Forschung auf

technischem, biologischem und wirtschaftlichem Gebiet. Insbesondere biologische und wirtschaftliche Ansätze wurden im vorliegenden Projekt verfolgt.

Das Forschungs- und Entwicklungsvorhaben hat im Einzelnen zum Ziel, Koppelprodukte aus der Landwirtschaft für die Nutzung in Biogasanlagen zu optimieren. Diese Optimierung soll in mehreren Stufen entlang der gesamten Prozesskette von der Biomasseentstehung über die bestmögliche Haltbarmachung, bis zur Biogasproduktion und der Nutzung der Reststoffe erfolgen. Dabei werden praxisnahe Maßnahmen entwickelt, die mit möglichst geringen Investitionen für den Biogasanlagenbetreiber in den Produktionsablauf bestehender Anlagen auch kurzfristig integriert werden können. Mäßig bis schlecht vergärbare, aber kostengünstige und mengenmäßig relevante Koppelprodukte der Pflanzenproduktion werden für die Methanproduktion aufgewertet, was die Effizienz landwirtschaftlicher Biogasanlagen und die Ausnutzung der limitierten Nutzfläche erheblich erhöht. Im Zentrum der Systemoptimierung steht das gezielte Mischen von trockenen lignocellulose-reichen Koppelprodukten mit energiereicheren, jedoch problematisch nassen Pflanzenmaterialien. Ein anschließendes optimiertes Silierverfahren wird neben der Funktion der Konservierung auch gezielt als biologische Vorstufe zur Biogasproduktion zur chemisch-physikalischen Aufwertung der Mischungen genutzt. Das System soll zu einer deutlich nachhaltigeren Bereitstellung und Nutzung von Biomasse in vorhandenen und zukünftigen Biogasanlagen beitragen. Es sollen kostengünstige und langfristig lagerfähige Substrate entstehen, deren Eigenschaften der Maissilage physikalisch und chemisch nahe kommen. Durch die Verwendung vielfältiger Substratmischungen können auch die Anbaufläche für Silomais zur Biogaserzeugung und damit verbundene Negativeffekte für Landschaft und Umwelt reduziert werden. Durch den höheren Anteil landwirtschaftlicher Recyclingmaterialien im Substratmix soll auch zusätzlich die Akzeptanz der Biogasproduktion seitens der Bevölkerung wieder erhöht werden.

## **1.2 Planung und Ablauf**

Gemäß der Vorhabenbeschreibung zu diesem Projekt erfolgte der Ablauf der Versuche durch:

- gezieltes Mischen von trockenen lignocellulosereichen Koppelprodukten mit energiereicheren, jedoch problematisch nassen Pflanzenmaterialien
- anschließendes optimiertes Silieren zur Konservierung und als biologische Vorstufe zur Biogasproduktion (chemisch-physikalische Aufwertung)
- Prüfung der grundsätzlichen Silierbarkeit von Koppelprodukt-Mischsilagen sowie Bewertung der Silagen anhand einer an die DLG-Empfehlungen zur Bewertung von Raufutter angelehnten Sinnenprüfung sowie den Laborparametern pH-Wert (diese zum Vergleich

mittels Einstich-pH-Meter und nach VDLUFA, um Anlagenbetreibern eine Methode zur schnelleren Ermittlung des Siliererfolges zur Verfügung zu stellen), TS, Asche, oTS

- Analyse der Gehalte an Hemicellulosen, Cellulose und Lignin, sowie Veränderung der Verhältnisse von Lignin (anaerob in der Regel nicht abbaubar) zu potentiell anaerob abbaubaren Gerüstsubstanzen (Hemicellulosen, Cellulose)
- Biogasertragstest (Gesamtgasertrag mittels Glaskolbentest)
- Bei einzelnen ausgewählten Silagen Methanertragstest (erste Stufe der Aufskalierung)
- Bei wiederum einzelnen Silagen Methanertragstest im Technikumsmaßstab an der HS Wolfenbüttel (zweite Stufe der Aufskalierung)
- Ermittlung des relativen Biogasmehrertrages durch Silierung anhand stöchiometrischer Berechnungen des theoretischen Gasertrages definierter Saccharosezugaben. Dadurch Feststellung der Biomasseaufwertung für die Biogaserzeugung.
- Validierung der Laborergebnisse durch Silierung geeigneter Mischsilagen und Verwertung in Praxis-Biogasanlagen

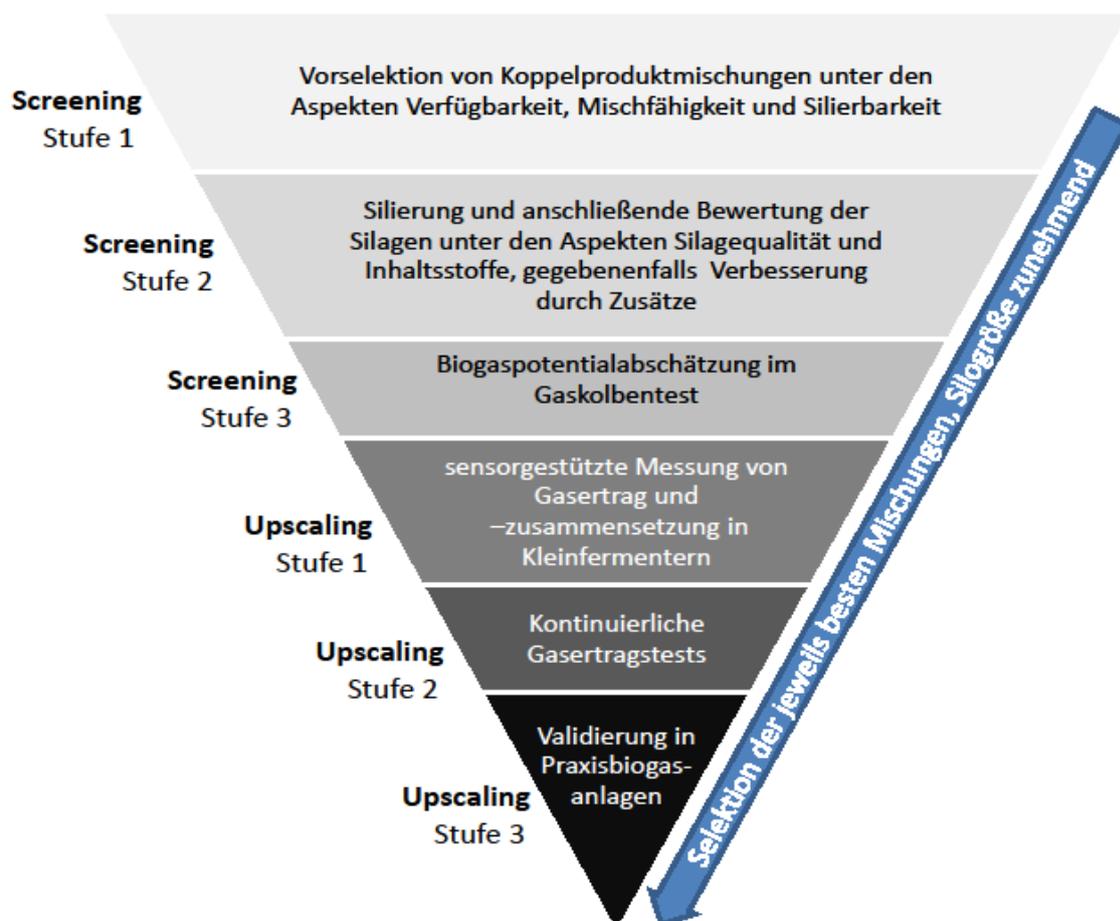


Abbildung 2: Fließdiagramm des Projektverlaufes

## 2. Stand der Technik

### 2.1 Stand der Wissenschaft und Technik

Dass Stroh ein hohes energetisches Potential aufweist, ist in mehreren Studien belegt worden, jedoch ist ein dezentraler Ansatz aufgrund der geringen Transportwürdigkeit diskussionswürdig (Zeller et al. 2011, DBFZ 2009)

Ein großer Teil der Energieträger in den verholzten Pflanzen oder Pflanzenteilen liegt in Form der Gerüstsubstanzen Cellulose, Hemicellulose und Lignin als Biopolymere in komplexartigen Strukturen (Lignocellulose) vor. Je nach dem Grad der Lignifizierung und offenbar auch in Abhängigkeit von der Komplexität der Hemicellulosen sind die Gerüstsubstanzen im Biogasreaktor stark eingeschränkt hydrolysierbar (Lynd et al. 2003) und zur Biogasproduktion nutzbar.

Ein wichtiges Kriterium für die wirtschaftliche Nutzung dieser Pflanzen und Pflanzenteile ist somit ein Voraufschluss der Lignocellulose. Hierzu sind Verfahren möglich, die sich in physikalische, chemische und biologische Methoden einteilen lassen (Mosier et al., 2005).

#### 1. Physikalische Verfahren:

- mechanisch (mahlen, schneiden, quetschen *etc.*)
- thermisch (Mikrowellen, Dampf, Heißwasser)
- akustisch (Ultraschall)

#### 2. Chemische Verfahren:

- oxidativ
- alkalisch
- Dünnsäure
- ionische Flüssigkeiten (organische Salze)
- anorganische Salze

#### 3. Biologische Verfahren

- kommerzielle Enzympräparate
- Pilze
- Silierung

Die **mechanische Zerkleinerung** hat durch Reduzierung der Partikelgröße eine Vergrößerung der Gesamtoberfläche zum Ziel, wodurch gleichzeitig die Kristallinität  $X_c$  (in %) der Cellulose reduziert wird (Taherzadeh und Karimi, 2008).

Die Partikelgröße hat hierbei einen direkten Einfluss auf den Energieaufwand der Zerkleinerung. Der Erfolg der Zerkleinerung hängt jedoch stark von der verwendeten Technik und der Substratmatrix und führt außerdem nicht grundsätzlich zu einem Mehrertrag an Biogas (Brückner und Sawatzki, 2011; Menardo et al., 2012; Ficara und Malpei, 2011).

In einzelnen Fällen konnte bei lignocellulosehaltigem Material kein messbarer Effekt zwischen verschiedenen Zerkleinerungsmethoden festgestellt werden (Dumas et al. 2010).

Für lignocellulosehaltige Matrices wie Weizen- oder Gerstenstroh wurden starke Methanertragssteigerungen festgestellt, wenn die Partikelgröße auf 5 mm bzw. 2 mm reduziert wurde. Bei Maisstängel wurde hingegen kein signifikanter Mehrertrag an Methan festgestellt (Menardo et al. 2012).

Insgesamt deuten die Ergebnisse darauf hin, dass es bei lignocellulosehaltigem Material eine fließende Grenze gibt, ab der eine weitere Zerkleinerung keinen signifikanten Mehrertrag erbringt. Auf Basis der Wirtschaftlichkeit wird diese Grenze in der Praxis bei weitem nicht erreicht werden können.

Bei **thermischen** Prozessen ist die aufzubringende Energie ein stark limitierender Faktor. Es existieren verschiedene Verfahren, mittels Dampfexpansion die pflanzliche Matrix auf zu spleißen (Schumacher, 2008) oder bei Temperaturen zwischen 180 und 250°C bei 30 bar Lignin zu schmelzen und anschließend zu kondensieren, wodurch die Matrix aufgelockert wird (Pacan und Dröge, 2009). Zum Quellen der Matrix und zum Auswaschen von Spuren- und Mengenmineralien kann Warmwasser von 30°C verwendet werden, wenn beim anschließenden Pressen der Presssaft zur Biogasgewinnung und der Presskuchen zu Brennpellets verarbeitet wird (Hensgen et al., 2014).

Nachteil ist in allen Verfahren, dass:

- grundsätzlich Investitionen für die Technik anfallen (im Falle Hensgen et al. ca. 1,5 Mio. Euro), die von Betreibern kleiner dezentral organisierter Anlagen auch langfristig nicht zu leisten sind.
- ein Teil der gewonnenen Energie für die Aufbringung thermischer Energie in der Vorbehandlung aufgebracht werden muss.

Bei **Mikrowellen** stellt die Erzeugung inhibierender Spaltprodukte wie Phenolsäuren neben dem Energieaufwand für große Mengen Substrat ein weiteres Hindernis dar. Das gleiche gilt für **Ultraschall** (Jackowiak et al., 2010). Eine Mikrowellen- oder Ultraschallbehandlung von Gärsubstrat im Tonnenmaßstab benötigt neben dem Energieaufwand Investitionen für die erforderliche Technik. Derzeit sind keine solchen Systeme in der Praxis in Anwendung, d.h. es bedarf zusätzlich einer technischen Entwicklung. Diese müsste zunächst das Energie- als auch das Inhibitorenproblem lösen.

Sämtliche rein **chemische** Verfahren bedeuten die Zugabe einer vergleichsweise großen Menge reaktiver Substanzen; in Labormaßstäben sind dies regelmäßig 10 g Reagens / 100 g TS<sub>Gärsubstrat</sub> (DECHEMA 2014, Sambusiti 2012, Schimpf 2014, Schumacher 2008).

Das ist insofern nicht verwunderlich, als dass chemische Reaktionen dem Massenwirkungsgesetz unterliegen und somit für den Umsatz größerer Massen Substrat auch entsprechende Moläquivalente an Reagens zugesetzt werden müssen. Diese Methoden sind also auch da, wo sie einen Mehrertrag an Biogas aus lignocellulosereichen Substraten erzielen, stets kostenintensiv (Kauf und Lieferungskosten, Lagerung, Durchmischung). Dies wird besonders deutlich, wenn der in kommerziellen Biogasanlagen übliche Substratdurchsatz von etlichen Tonnen pro Tag betrachtet wird. Eine Lösung könnten hier Katalysatoren sein – mit dem damit verbundenen Problem der Rückgewinnung des Reagens. Weiterhin ist seit langem bekannt, dass Hemmnisse durch inhibierende Nebenprodukte des Hemicelluloseabbaus auftreten können, wie Furfural (Larsson et al. 1999); oder H<sub>2</sub>S bei Einsatz von Schwefelsäure, welches korrosive Prozesse in der Anlage fördert und vor der Verbrennung eine stärkere Aufreinigung erforderlich macht (Zehnder und Stumm 1988) und zudem ein hohes Maß an Arbeitssicherheitsmaßnahmen erfordert. Chemischer Aufschluss ist da im Einzelfall sinnvoll, wo **nicht** der Methanertrag, sondern die Gewinnung von Lignin als industriellem Rohstoff betrachtet wird (DECHEMA 2014).

Auch bei biologischen Verfahren werden Präparate zugesetzt, sofern nicht ausschließlich siliert wird. Hier wirken **Enzyme** als Biokatalysatoren. Durch den Einsatz von hydrolytischen Enzymen, speziell Cellulasen sowie Xylanasen und gegebenenfalls oxidativen, lignolytischen Enzymen wie Laccase oder Ligninperoxidase, kann ein Voraufschluss erzielt werden. Mehrere Studien belegen die Wirksamkeit von Enzymen. Allerdings ist das Verfahren auch empfindlich und in besonderem Maße abhängig von den Parametern Substrat, Inkubationszeit, Systemkonfiguration der Anlagen, Umwelt (vornehmlich Temperatur und pH-Wert). Problematisch ist auch die Verweilzeit, da durch mikrobiellen Abbau von Kohlenhydraten methanogene Energieträger verloren gehen. Weiterhin sind **kommerzielle Enzympräparate** mit ca. 1000 € pro kg besonders kostenintensiv (Badshah et al. 2012, Letomaki et al. 2004, Schimpf 2014, Sonakya et al. 2001).

Der Effekt von Enzymzusatz direkt in die Biogasanlage zeigt bei Aufskalierung in Technikum- und Praxisgröße die genannten Empfindlichkeiten. Auch ist ein positiver Effekt auf die Methanausbeute nicht grundsätzlich dem Enzymeinsatz zuordenbar. Vor allem die Kosten machen ihren Einsatz in der bisherigen Praxis nicht rentabel (2015).

Demgegenüber bietet der direkte Einsatz von Mikroorganismen eine Möglichkeit, biotische Prozesse zu nutzen und die Schritte der Anreicherung und Enzymisolierung, aber auch des

Abbaus der Enzyme selbst, zu umgehen. Für den Einsatz in der Biogasanlage liegen bereits Ergebnisse vor.

Ein auf hydrolytischen Bakterien basierendes Präparat ist unter dem Produktnamen „Methanos“ erfolgreich am Markt (Neumann 2013). Dieses wird direkt in den Biogasfermenter gegeben und soll die Methanogenese unterstützen. Bislang liegen noch keine Ergebnisse zur Verwendung dieses Produktes mit lignocellulosereichem Substrat vor.

Es wurde auch bereits der Ligninabbau mittels **lignolytischer Pilze** untersucht. Hier wurden Mehrerträge mit Enzymsuspensionen erzielt (Sambusiti 2012, Schimpf 2014); allerdings erfordert diese Methode sowohl mikrobiologische als auch biotechnologische Kenntnisse und apparative Möglichkeiten. Vor dem Hintergrund der Zielsetzung des Projektes BASiliKOM, die nur geringe Investitionen für Anlagenbetreiber voraussetzt, ist die dezentralisierte Enzymgewinnung nicht als praxisbezogen einzustufen.

Der Einsatz von pilzlichen Enzymen aus der Speisepilzproduktion mit u.a. Austernseitling (*Pleurotus ostreatus*) war in den genannten Studien allerdings erfolgreich. Methanausbeute und Eigenenergieaufwand wurden optimiert. Insbesondere der Einsatz in **Kombination mit Silierung** war erfolgreich (Schimpf 2014). Es werden jedoch weitere Studien empfohlen.

Im Projekt BIO-EKO-LAB an der FH Südwestfalen in Soest wurden mit dem Austernseitling in Silier- und Biogasversuchen bereits erste Ergebnisse erzielt. Allerdings wurde hier auf myceldurchwachsenes Stroh aus der Speisepilzproduktion zurückgegriffen und nicht auf eine daraus erstellte Suspension, was der Idee des Einsatzes von landwirtschaftlichen Koppelprodukten entspricht und den Bezug zu dezentralen Bioenergienutzungskonzepten herstellt.

Die hier erzielten Ergebnisse zeigten jedoch, dass die Nutzung als Pilzsubstrat bereits zum Verlust des größten Teils der energiegebenden Substanzen geführt hat.

Die gemeinsame Silierung von Zuckerrüben und Stroh mit dem Ziel der Vermeidung von Sickersaftverlusten und unter dem Aspekt der Methanausbeute schließlich wurde ebenfalls bereits getestet (Bugdahl 2013). Die Tests wurden sowohl im Labormaßstab als auch in zwei kleineren Fahrsilos durchgeführt (ca. 50 und 100 t).

In den Fahrsilos wurde die Schwierigkeit festgestellt, homogene Mischungen zu erstellen und damit Nesterbildung mit einhergehendem aerobem Abbau zu vermeiden. Die Biogasertragstests bestätigten die Ergebnisse des an der FH Südwestfalen durchgeführten Projektes BIO-EKO-LAB. Allerdings wurde bei Bugdahl noch keine gezielte Optimierung der Silierung mit dem Ziel des Voraufschlusses versucht. Auch werden, wie bei Schimpf, weitere Studien empfohlen. Dabei kann auch aus Erfahrungen zur Optimierung des Silierverlaufs aus der Futterkonservierung zurückgegriffen werden. Der Einsatz von chemischen und

biologischen Silierhilfsmitteln ist in der Praxis verbreitet. Modifizierte Substrate und Additive können leicht in dezentralen, vor allem landwirtschaftlich organisierten Biogasanlagen übernommen werden.

Das hier dargestellte Vorhaben ist also eine Vertiefung dieser vielversprechenden Erkenntnisse, mit dem Ziel der ökonomischen Anwendbarkeit in der landwirtschaftlichen Praxis.

## 2.2 Literatur

Badshah, M.; Lam, D.M.; Liu, J.; Mattiasson, B.; 2012: Use of an Automatic Methane Potential Test System for evaluating the biomethane potential of sugarcane bagasse after different treatments. *Bioresource Technology* 114, 262-269

Brückner, C.; Sawatzki, T.; 2011: Effizienzsteigerung in Biogasanlagen. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Freistaat Sachsen (Hrsg.), Schriftenreihe, Heft 35/2011, 34- 42

Budde, J.; Cordes, A.; Dröge, S.; Eschenbacher, S.; Heiermann, M., Kausmann, R.; Kretschmar, J.; Müller, L.; Nacke, O.; Rottmann, N.; Suárez Quiñones, T.; Theobald, A.; Wawra, M.; 2015: Untersuchungen und Bewertung zum Einsatz von Enzymen in Biogasanlagen auf deren Wirksamkeit und deren Wirkungsweise sowie zur Veränderung des Verfahrensablaufs im Labor-, Technikum und Praxisanlagen - Maßstab; Kurztitel: BiogasEnzyme; Teilvorhaben 1-6. Schlussbericht, FNR-FKZ 22027707, 22006510, 22027608, 22028008, 22027808, 22027908. <http://www.fnr-server.de/ftp/pdf/berichte/22027707.pdf> ; Download 14.04.2015

Bugdahl, B.; 2013: Zuckerrüben und Stroh gemeinsam silieren? *Bauernblatt*, 8. Juni 2013, 52- 54

DBFZ (Hrsg.); 2009: Regionale und globale räumliche Verteilung von Biomassepotenzialen - Status Quo und Möglichkeit der Präzisierung. Deutsches BiomasseForschungszentrum, Abschlussbericht FKZ: SF – 10.08.36.2

DECHEMA e.V. (Hrsg.); 2014: "Lignocellulose-Bioraffinerie" Aufschluss lignocellulosehaltiger Rohstoffe und vollständige stoffliche Nutzung der Komponenten (Phase 2). Abschlussbericht zu den wissenschaftlich-technischen Ergebnissen

Dumas, C.; Ghizzi Damasceno da Silva, G.; Rouau, X.; Carrère, H.; Steyer, J.P; 2010: Wheat straw milling effect on biogas production. In: *Proceeding of 12th World Congress on Anaerobic Digestion*, Guadalajara, Jalisco- Mexico

Fachverband Biogas e.V.; 2018: Aktuelles vom Fachverband Biogas e.V., Beitrag zum 8. Triesdorfer Biogastag am 16.01.2018  
[http://www.triesdorf.de/fileadmin/user\\_upload/doku/Vortraege/Biogastag2018/18-01-16\\_Zukunft-Biogas\\_Ausschreibung\\_Politische\\_Diskussionen\\_EEG-Vorschlaege\\_mb.pdf](http://www.triesdorf.de/fileadmin/user_upload/doku/Vortraege/Biogastag2018/18-01-16_Zukunft-Biogas_Ausschreibung_Politische_Diskussionen_EEG-Vorschlaege_mb.pdf); Download 22.05.2018

Feldmann, M.; 2008: Biogasanlage zur Erzeugung von Biogas aus ligninhaltigen nachwachsenden Rohstoffen. Deutsches Patent DE 202007019537 U1

Ficara, E.; Malpei, F.; 2011: Maizemono-digestion efficiency: Results from laboratory tests. *Water Science and Technology*, 64(10), 2029- 2037

Hensgen, F.; Bühle, L.; Donnison, I.; Heinsco, K.; Wachendorf, M.; 2014: Energetic conversion of European semi-natural grassland silages through the integrated generation of solid fuel and biogas from biomass: Energy yields and the fate of organic compounds. *Bioresourc Technology* 154, 192-200

Jackowiak, D.; Bassard, D.; Pauss,; Ribeiro, T.; 2011: Optimisation of a microwave pretreatment of wheat straw for methane production. *Bioresource Technology*, 102(12), 6750-6756

Kindl, H.; 1991: *Biochemie der Pflanzen*. Springer Verlag Berlin Heidelberg, New York, 325- 332

Laser, H.; 2013: Bioenergie aus Koppelprodukten und Reststoffen aus der Landwirtschaft durch systematische Biomasseaufwertung (BIO-EKO-LAB). Vortrag auf der Biokraftstofftagung auf Haus

Larsson, S.; Palmqvist, E.; Hahn-Hagerdal, B.; Tengbord, C.; Stenberg, K., Zacchi, G.; Nilvebrant, N.-O.; 1999: The generation of fermentation inhibitors during dilute acid hydrolysis of softwood. *Enzyme and Microbial Technology*, 24(3-4), 151-159

Lehtomaki, A.; Viinikainen, T.; Ronkainen, O.; Alen, R.; Rintala, J.; 2004: Effects of pre-treatments on methane production potential of energy crops and crop residues. 10th IWA World Congress on Anaerobic Digestion, Montreal, Canada

Lütke-Entrup, N.; Gröblichhoff, F.-F.; 2007: Entwicklung von Anbaufolgen zur Erzeugung von Biomasse für die Biogaserzeugung Materialbereitstellung und Anbauversuche einschließlich einer ökonomischen Bewertung. Abschlussbericht zum Verbundvorhaben, Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.)

Lütke-Entrup, N.; Gröblichhoff, F.-F.; Hötte, S.; 2010: Materialbereitstellung und Anbauversuche einschließlich einer ökonomischen Bewertung. In: Bewertung nachwachsender Rohstoffe zur Biogaserzeugung für die Pflanzenzüchtung. Abschlussbericht zum Verbundvorhaben, Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz; Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hrsg.)

Lynd L. R., P. Wimer, W. H. van Zyl, I. S. Pretorius 2002: Microbial Cellulose Utilization: Fundamentals and Biotechnology. *Microbiology and Molecular Biology Reviews* 66 (3), S. 506 – 577.

Menardo, S., Airoidi, G.; Balsari, P.; 2012: The effect of particle size and thermal pre-treatment on the methane yield of four agricultural by-products. *Bioresource Technology*, 104, 708- 714.

Mosier, N.; Wyman, C.; Dale, B.; Elander, R.; Lee, Y. Y.; Holtzapfle, M.; Ladisch, M.; 2005: Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, 96(6), 673- 686

Neumann, H.; 2013: Verstärkung für Fermenter. *Energie- Magazin* 3/2013, 12- 17

Pacan, B.; Dröge, S.; 2009: Abschlussbericht zum Forschungsprojekt: Soffliche und energetische Nutzung von Stroh. Prüf- und Forschungsinstitut Pirmasens e.V. (Hrsg.), 5- 11, 16- 20, 40- 43

Sambusiti, C.; 2012: Physical, chemical and biological pretreatments to enhance biogas production from lignocellulosic substrates. Dissertation Universität Mailand (Politecnico di Milano), Department of Civil and Environmental Engineering, 39- 46, 67- 68, 157- 173

Schimpf, U.; 2014: Enzymatischer Abbau des Lignocellulosekomplexes in Energiepflanzen unter besonderer Berücksichtigung der Silierung und der Biogasproduktion. Dissertation Humboldt-Universität zu Berlin, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, 38- 52, 143- 155

Schumacher, B.; 2008: Untersuchungen zur Aufbereitung und Umwandlung von Energiepflanzen in Biogas und Bioethanol. Dissertation Universität Hohenheim, Fachbereich Agrarwissenschaften, 38- 52, 143- 155

Sonakya, V.; Raizada, N.; Kalia V.C.; 2001: Microbial and enzymatic improvement of anaerobic digestion of waste biomass. *Biotechnology Letters* 23, 1463-1466

Taherzadeh, M.J.; Karimi, K.; 2008: Pretreatment of lignocellulosic wastes to improve ethanol and biogas production: A review. *International Journal of Molecular Sciences*. 9(9), 1621- 1651

Umweltbundesamt (Hrsg.); 2018: Energiebereitstellung und Verbrauch. <http://www.umweltbundesamt.de/daten/energiebereitstellung-verbrauch>; Download 22.05.2018

Wiegand, S.; 2013: „Qualitätsbestimmende Merkmale von perennierenden Gräser-Leguminosen-Mischungen und Zwischenfrüchten für optimierte Biogaserträge“, Dissertation an der Justus-Liebig-Universität Gießen, p 61, p 85, p97 pp 166 – 169

Zehnder, A.; Stumm, W.; 1988: Geochemistry and biogeochemistry of anaerobic habitats. *Biology of anaerobic microorganisms*, A. Zehnder (Hrsg.), John Wiley and Sons, New York, 1-38

Zeller, V.; Weiser, C.; Hennenberg, K.; Reinicke, F.; Schaubach, K.; Thrän, D.; Vetter, A.; Wagner, B.; 2011: Basisinformationen für eine nachhaltige Nutzung landwirtschaftlicher Reststoffe zur Bioenergiebereitstellung. Schriftenreihe des BMU-Förderprogramms „Energetische Biomassenutzung“ Band 2

### 3. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

#### - Biogasertragstests im Technikumsmaßstab:

Ostfalia – Hochschule für angewandte Wissenschaften, Wolfenbüttel

Institut für Biotechnologie und Umweltforschung – Labor für Bioverfahrenstechnik

#### - Aufskalierung einzelner Silagen in den Praxismaßstab:

1. Firma Abel ReTec GmbH

2. Biogasanlage Mammendorf, Landkreis Fürstentumbrück Validierung  
Pferdemist/Zuckerrübensilage)

3. Biogasanlage 2 (Gut Brockhof in Erwitte- Stirpe, Validierung  
Maisstroh/Zuckerrübensilage)

## II. Ergebnisse

### 1.1 Material und Methoden

#### 1.1.1 Substrate

Als Substrate für den Einsatz in Biogasanlagen auf den verschiedenen Upscalingebenen diente Silagen aus verschiedenen Stroharten und weiteren Koppelprodukten wie Zwischenfrüchte und Rübenblatt. Einige der Koppelprodukt-Silagen wurden mit verschiedenen Anteilen Zuckerrüben (in ersten Screenings im Versuch simuliert durch Zusatz exakt bemessener Saccharose-Mengen) hergestellt. Zuckerrüben fallen in Betrieben nur in Einzelfällen als Koppelprodukt an (z.B. Ausschussrüben) wurden hier aber auch als Möglichkeit gesehen, die Koppelproduktsilagen aufzuwerten, den Silierprozess zu verbessern und gegebenenfalls den Voraufschluss der Lignocellulosebestandteile der Koppelprodukte zu verbessern. Die Koppelprodukte wurden von Versuchseinrichtungen der FH Südwestfalen (Versuchsgut Merklingsen, Grünlandforschungsstation Remblinghausen) sowie weiteren Betrieben aus der landwirtschaftlichen Praxis bereitgestellt und in verschiedenen Mischungsrezepturen siliert. Die Rezepturen für die Koppelproduktmischungen entsprachen jeweils folgenden Kriterien:

- Die einzelnen Komponenten können in Praxisbetrieben in ausreichenden Mengen zum gemeinsamen Siliertermin zur Verfügung stehen.
- Die Koppelprodukte sind ohne größere Investitionen in Spezialtechnik und verschmutzungsarm zu bergen.
- Die Gesamtmischung aus trockenen, lignocellulosereichen Komponenten und nassen, leichtvergärbaren Substraten erreicht insgesamt TS-Gehalte zwischen 30 und 35 %, um eine gute Verdichtbarkeit und geringe Gärtsaftverluste sicherzustellen.
- Die Komponenten sind unter Praxisbedingungen mit vorhandener Technik und mit vertretbarem Arbeitsaufwand mischbar.
- Der Vergärbarkeitskoeffizient der Mischung erreicht mindestens 40, besser 45, um Fehlgärungen und Qualitätsverluste während des Siliervorganges zu vermeiden.
- Bei geringen Gehalten an wasserlöslichen Kohlehydraten ist der Zusatz zuckerhaltiger Komponenten, wie Zuckerrüben, möglich.

Insgesamt wurden 378 Silagen mit unterschiedlicher Zusammensetzung hergestellt und bewertet. Erläuterungen zu den Koppelprodukten und den Mischsilagen finden sich in Tab.1.

Tabelle 1: Im Projekt verwendete Substrate

<b>Koppelprodukt/Mischung</b>	<b>Erläuterungen</b>
Rapsstroh	Winterraps, Sorte Visby, Versuchsgut der FH Südwestfalen
Rapsstroh + Saccharose (Zuckerrübensimulation)	WR mit definierter Menge Saccharose (Reinsaccharose für Nährmedien)
Maisstroh	Mais, Sorte Messago, Versuchsgut der FH Südwestfalen
Maisstroh + Saccharose (Zuckerrübensimulation)	Mais mit definierter Menge Saccharose (Reinsaccharose für Nährmedien)
Gerstenstroh	Wintergerste, Sorte Quadriga, Versuchsgut der FH Südwestfalen
Gerstenstroh + Saccharose (Zuckerrübensimulation)	WG mit definierter Menge Saccharose (Reinsaccharose für Nährmedien)
Weizenstroh	Winterweizen, Sorte Winnetou, Versuchsgut der FH
Weizenstroh + Saccharose (Zuckerrübensimulation)	WW mit definierter Menge Saccharose (Reinsaccharose für Nährmedien)
Körnermaisstroh, Zuckerrübe	ZR, Sorte Hannibal, Versuchs- und Lehrgarten der FH Südwestfalen
Zuckerrübenblatt, Zuckerrübe, Gerstenstroh	Mischung mit Gerstenstroh vom Versuchsgut
Futtrübenblatt, Futtrübe, Gerstenstroh	Sorte Eckdorot
Pferdemist, Zuckerrübe, verschiedene Inokuli	Mist verschiedener pferdehaltender Betriebe und Zuckerrübe, zur Verfügung gestellt von Fa. Abel ReTec
Pferdemist, Rapsstroh, Zuckerrübe	Mischung mit Rapsstroh Sorte Visby, Versuchsgut der FH
Körnermaisstroh, Zuckerrübenschnitzel (Fahrsilo)	Mais, Sorte Messago, ZR, Sorte KWS Riccardinio, Hof Brockhausen
Zwischenfrüchte	Gelbsenf, Ölrettich, Klee gras, Phacelia, Sommerwicke einem Praxisbetrieb nahe Soest Aussaat: 17.08.2017, Ernte: 16.10.2017.
Gerstenstroh + Zwischenfrüchte	Mischung mit Gerstenstroh, Sorte Quadriga vom Versuchsgut der FH Südwestfalen

Aufgrund der möglichst breit angelegten Substratauswahl war es nicht möglich, bei der Produktion der Koppelprodukte und der Rüben weitergehende pflanzenbauliche Variationen, wie Standorteinfluss, Sortenwahl, Düngung, Fruchtfolge oder Nutzungszeitpunkt einzugehen. Diese produktionstechnischen Fragen werden im Fachbereich Agrarwirtschaft der Fachhochschule Südwestfalen in einem noch laufenden FNR-Projekt am Beispiel verschiedener Körnerleguminosenstrohartarten näher beleuchtet.

Die Maisreferenz war jeweils Mais-GPS der landwirtschaftlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Haus Düsse (verschiedene Ernten und Sorten) und wurde für jeden Biogasversuch frisch geholt.

Der Impfschlamm stammte aus einer mit Mais-GPS betriebenen Biogasanlage aus der Nähe von Soest (Biogasanlage, Betrieb Roehl).

### **1.1.2 Silierversuche**

Mit der Silierung sollten drei Probleme bei der Bereitstellung von Biogassubstrat aus Stroh mit TS-armen Co-Substraten gelöst werden:

- Vermeidung von Sickersaftverlust energiereicher, TS-arter Substrate und deren Haltbarmachung
- Durchtränkung von Stroh zur Vermeidung von Schwimmschichten im Fermenter
- Voraufschluss von Lignocellulosekomplexen

Für Stroh gilt, dass ein großer Teil der Energieträger in den verholzten Pflanzen oder Pflanzenteilen in Form der Gerüstsubstanzen Cellulose, Hemicellulose und Lignin als Biopolymere in komplexartigen Strukturen (Lignocellulose) vorliegt.

Je nach dem Grad der Lignifizierung und offenbar auch in Abhängigkeit von der Komplexität der Hemicellulosen sind die Gerüstsubstanzen im Biogasreaktor stark eingeschränkt hydrolysierbar (Lynd et al. 2003) und somit nur eingeschränkt zur Biogasproduktion nutzbar. Zudem neigt das Stroh zur Bildung von Schwimmschichten im Fermenter, was zu einer längeren und somit unwirtschaftlichen Verweildauer führt.

### **Siliergefäße**

- WECK-Sturzgläser  $\frac{3}{4}$  Liter
- WECK-Glasdeckel 100 mm
- Einkochringe 100 mm
- Einkochklammern
- Kunststoffwanne, 50 l
- Aquarium 250 Liter
- Aluminiumfolie
- Anaerocultbeutel und Anaerobierteststreifen Fa. Merck

## Silageverdichter

Silageverdichter mit Hebel (Eigenkonstruktion der FH Südwestfalen) (Abb. 3)

## Sonstige Materialien

- Kunststoffwanne, 50 l
- Fleischkutter DMK 30 30L, Fa. DMS
- Aquarium 250 Liter
- Aluminiumfolie
- Anaerocultbeutel und Anaerobierteststreifen Fa. Merck
- Exsikkatorfett
- Einstich-pH-Meter mit Temperatursonde PCE 228, Fa. PCE
- Bechergläser
- pH-Meter Seven Excellence, Fa. Mettler Toledo

## Siliermethoden

Unabhängig von der Anzahl der Kosubstrate wurde der TS-Gehalt stets auf ca. 35% eingestellt. Dies wurde erzielt durch

- eine vorherige TS-Bestimmung der einzelnen Substrate nach LUFA (VDLUFA 2007 a)
- Berechnung der Substratmengen. Hierbei war zu unterscheiden in:
  - a) Vorab festgelegte Mengenanteile. Die Berechnung der Masse des zuzusetzenden Wassers ( $w_z$ ) ergab sich aus

$$w_z = 1,857 * ts_{ges} - \sum_{i=1}^n (m_i - ts_i) \quad [1]$$

- b) Mischungen von Stroh mit frischem Pflanzenmaterial; die jeweiligen Anteile ergaben sich zwingend aus den gemessenen TS-Gehalten. Die Berechnung ergab sich aus

$$w_{ges} = \sum_{i=1}^n m_i (1 - TS_i) \quad [2]$$

Und somit als Beispiel für Mischsilage aus Stroh mit zwei Kosubstraten;  $TS_{gesamt} = 35\%$

$$w_{ges} = 0,65m_{ges} = m_1(1 - TS_1) + m_2(1 - TS_2) + m_3(1 - TS_3) \quad [3]$$

$m_{ges}$  = Masse (gesamt) in g

$m_i$  = Masse d. jew. Substrates (einschl. Wassergehalt) in g

$ts_{ges}$  = Trockensubstanzgehalt (gesamt) in g

$TS_i$  = Trockensubstanzgehalt d. jew. Substrates in %

$ts_i$  = Trockensubstanzgehalt d. jew. Substrates in g

$W_{ges}$  = Wassergehalt (gesamt) in %

$w_{ges}$  = Wassergehalt (gesamt) in g

$w_z$  = zuzugebende Wassermasse in g

Die Silagen wurden in einer zuvor gründlich ausgewaschenen Kunststoffwanne gemischt und anschließend schichtweise mit dem Silageverdichter in den Sturzgläsern verfestigt. Bei Zugabe von feinpulveriger Saccharose in Puderform (bei den Gradienten-Versuchen) wurden diese zuvor in der entsprechenden Wassermenge gelöst, um eine ausreichende Homogenität zu gewährleisten.

Die Verdichtung erfolgte mit einem Stampfer mit Hebel (Abb. 3)



Abbildung 3: Silageverdichter zum Verfestigen von Laborsilagen

Die Gläser wurden sodann mit Weckgummis abgedichtet und mit den Deckeln und jeweils vier Klemmen verschlossen. Um in jedem Falle ein anaerobes Milieu zu erhalten, wurden die Gläser in ein 250 Liter umfassendes Aquarium gestellt. In diesem wurde der Luftsauerstoff vermittels dreier angefeuchteter Anaerocult-Beutel gebunden. Der Erfolg dieser Maßnahme wurde durch einen Anaerobier-Teststreifen kontrolliert.

### **Sinnenprüfung**

Bei der Öffnung wurde nach den DLG-Empfehlungen zur Grobfutterbewertungsverfahren (Deutsche Landwirtschaftliche Gesellschaft e.V., 2004). Dabei wurde die Methode schrittweise an die Bedürfnisse der Bewertung von Biogassubstraten angepasst. Insbesondere die Parameter Verbräunung und Vergilbung mussten abhängig von der Eigenfarbe der Kosubstrate betrachtet werden.

Die Grobfutterbewertung gibt Hinweise auf den Konservierungserfolg im Hinblick auf die Tierfütterung. Dementsprechend erfolgen nach einem empirisch ermittelten Schlüssel Punktabzüge bei der Silagebeurteilung. Zum Teil ist dieser Schlüssel auch für die Silagebeurteilung für die Methanproduktion sinnvoll. Jedoch sind einzelne Parameter nicht gleich zu bewerten, andere hingegen doch (LFL, 2010):

- Buttersäure wirkt inhibierend auf die Acetogenese und sollte nicht wahrnehmbar sein (entspricht DLG-Schlüssel).
- Essigsäure ist eine direkte Vorstufe der Methanogenese. Der erwünschte Säuregehalt ist 1500 mg/l. Zu hohe Konzentrationen können eine Hemmung der Methanogenese entweder

hervorrufen (zu niedriger pH-Wert der Silage) oder anzeigen (Überfütterung, Spurenelementemangel im Schlamm). Essigsäure ist nicht grundsätzlich negativ zu bewerten.

- Erwärmung ist ein Zeichen für aerobe Fehlgärung (Rotte) und bedeutet Energieverlust (entspricht DLG-Schlüssel).
- Hefen erzeugen Alkohole, sie treten in der hydrolytischen Phase der Biogasentstehung auf. Alkohole sind eine direkte Vorstufe der Acetogenese und daher erwünscht, solange ihre Konzentration nicht biozid auf die beteiligten Bakterien wirkt.
- Schimmel ist ein Anzeichen für aeroben Stoffwechsel und bedeutet Energieverlust (entspricht DLG-Schlüssel).
- Bräunung und Vergilbung können durch die unterschiedlichen, z.T. stark färbenden Kosubstrate (Algen, Rübenblatt, dunkel gefärbtes Stroh aus der Pilzproduktion) nicht als relevante Parameter herangezogen werden.
- angegriffenes Gefüge kann ein Hinweis auf Voraufschluss von Stroh sein und ist in diesem Versuch erwünscht, solange keine (aerobe) Rotte oder Fehlgärung eingetreten ist. Leicht angegriffene Schnittstellen sind daher nicht negativ zu bewerten.
- der TM-Gehalt kann bei der Erstellung der Silagen im Labormaßstab zuverlässig mit Abweichungen von ca. 3% eingestellt werden. Dieser Parameter diene daher lediglich als zusätzliche Überprüfung der handwerklichen Genauigkeit.

Die Vergleichbarkeit wird dadurch erschwert, dass die Parameter gemäß den Anforderungen an eine Futtersilage nichtlinear gewichtet sind. Die nicht direkte Vergleichbarkeit führte zu dazu, dass anhand des DLG-Schlüssels zwar der Siliererfolg an sich überprüft werden konnte, jedoch noch ein Bezug zur Biogaserzeugung gefunden werden sollte. Hierzu sind weitere Daten von empirischer Relevanz nötig.

Zusätzlich dazu wurden repräsentativ an mindestens drei Stellen in der geöffneten, aber noch nicht entleerten Silage pH-Messungen mit dem Einstich-pH-Meter vorgenommen. Die pH-Werte wurden gemittelt, indem die Einzelwerte in  $[H_3O^+]$  umgerechnet und gemittelt wurden. Die daraus resultierenden Durchschnittskonzentrationen wurden wieder in den pH-Wert umgerechnet. Zur Vereinfachung wurde hierfür ein Makroprogramm auf Excel erstellt.

Von den Silagen wurden nach der DLG-Grobfutterbewertung Teile für weitere Untersuchungen entnommen. Diese waren:

- FoTS
- Asche (VDLUFA, 2007 a)

- pH-Messung nach (VDLUFA, 2007 c)
- Rohfaseranalytik (**Kap. 2.3** u. **3.2**)

### 1.1.3 Faseranalytik

Es wurden die erweiterte Rohfaseranalyse nach *van Soest* sowie in einem Teilversuch die Weender Rohfaseranalyse mit dem halbautomatisierten Fibrebag-System verwendet (gem. VDLUFA, Methodenbuch III, Kap. 6.5.1 Punkt 8.3). Untersucht wurden aNDF, ADF und ADL. Diesen wurde grundsätzlich der in der Analyse gemessene Aschegehalt abgezogen. Die Darstellung erfolgte über ein VBA-Programm auf Excel.

## Reagenzien

### aNDF

- Titriplex III (Ethylendinitrilotetraessigsäure Dinatriumsalz-Dihydrat)
- di-Natriumtetraborat
- Dodecylhydrogensulfat Natriumsalz
- Triethylenglykol
- di-Natriumhydrogenphosphat
- 1-Octanol
- hitzestabile Amylase
- NaOH
- Neutrale Detergenzienlösung mit Amylase (aNDF): 18,61 g

aNDF-Lösung: 93 g EDTA Ethylendiamintetraessigsäure-Dinatriumsalz und 34 g di-Natriumtetraborat-decahydrat wurden in einem Becherglas in 2 l Wasser unter Erwärmen gelöst. Nach dem Abkühlen wurden 150 g Dodecylsulfat-Natriumsalz in 50 ml Triethylenglykol aufgelöst und zum ersten Ansatz gegeben. In einem zweiten Becherglas wurden 22,8 g Natriumdihydrogenphosphat in 2 l Wasser unter Erwärmen gelöst und nach dem Abkühlen zu dem ersten Ansatz gegeben. Die Lösung wurde auf annähernd 5 l mit destilliertem Wasser aufgefüllt, der pH-Wert wurde durch Zugabe von Natronlauge auf 6.9 eingestellt. Unmittelbar vor der Verwendung wurden 2 ml hitzestabile Amylase zum Abbau von Stärke und von weiteren Polysacchariden dazu gegeben.

### ADF

- Schwefelsäure (0,5 molar)

- N-Cetyl-N,N,N-trimethylammoniumbromid
- Saure Detergenzienlösung: 20 g N-Cetyl-N,N,N-trimethylammoniumbromid in Schwefelsäure gelöst und bis 1000 ml mit aqua demin. aufgefüllt
- 1-Octanol

### **ADL**

- Schwefelsäure (72%ig)

### **XF**

- Schwefelsäure, 1,3%ig
- Kalilauge, 1,3%ig
- 1-Octanol

### **Geräte**

- Fibrebag- System, Fa. Gerhardt
  - Heizplatte mit Halterung
  - Rücklaufkühler
  - Rondelle (je sechs Bohrungen)
  - Rondellhalter
  - Spreizfinger
  - „Fibrebags (Zellstoffbeutel in versch. Wandstärke für aNDF/ADF und ADL)
- Durchflusskühler FE 1100, Fa. Gerhardt
- Wärmeschrank Function Line, Fa. Heraeus Instruments
- Muffelofen, Fa. Heraeus Instruments
- Feinwaage, Fa. Möbius
- Heißwasserkocher
- Schneidmühle SM 200, Fa. Retsch

### **Sonstiges Material**

- Bechergläser 1000 ml
- Keramiktiegel
- Exsikkatoren
- Siedesteine
- Wägeschiffchen
- Spatel

## **Analysemethoden**

### **aNDF**

Der Anteil der Substanzen, die mit einer neutralen Detergenzienlösung nach dem Kochen mit aNDF-Lösung nicht herausgelöst werden, wird als NDF (neutral detergent fibre) bezeichnet. Bei pflanzlichen Futtermitteln und Silagen ist der NDF-Anteil ein Maß für den Anteil an den Zellwandgerüstsubstanzen Lignin, Cellulose und Hemicellulose und Lignin-N-Verbindungen. Der ungelöste Rückstand wird getrocknet, gewogen und anschließend verascht. Der beim Veraschen auftretende Massenverlust entspricht dem aschekorrigierten NDF-Gehalt der Probe.

#### 1) Vorbereitung der Proben

Die Fibrebags wurden zunächst bei 105°C mindestens eine Stunde im Trockenschrank getrocknet und im Exsikkator aufbewahrt. Die Prüfsubstrate wurden bei 55°C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und anschließend auf 1 mm Siebgröße vermahlen. Danach wurde von der vermahlenden Probe 1000 mg auf 10 mg genau in den Fibrebag eingewogen. Die Spreizfinger mit den FibreBags und den Proben wurden in das Karussell eingesetzt und in die aNDF-Lösung eingetaucht.

#### 2) Waschen in aNDF-Lösung

In das Becherglas wurden 360 ml aNDF-Lösung gefüllt. Es wurden Siedesteine und als Antischaummittel Decahydronaphtalin hinzugefügt. Dann wurde mit Hilfe des Halterungsstabes das Karussell in die aNDF-Lösung eingetaucht. Das Becherglas mit dem Karussell wurde auf eine Heizplatte gestellt, dann 5 Minuten lang zum Sieden gebracht und anschließend 1 Stunde lang am Sieden gehalten. Nach dem Kochen wurden das Karussell und die Proben mit heißem Wasser detergenzienfrei gewaschen (3 bis 4 Mal).

#### 3) Trocknung der FibreBags

Die Glasspacer mit den Fibrebags wurden aus dem Karussell entnommen und unter Nachspülen mit Wasser aus den FibreBags entfernt. In einem zuvor bei 550°C ausgeglühten und gewogenen Veraschungstiegel wurden die FibreBags im Trockenschrank bei 105°C mindestens 4 Stunden lang oder über Nacht getrocknet, dann für 30 Minuten in den Exsikkator überführt und danach zurückgewogen.

### **ADF**

Der Anteil der Substanzen abzüglich der Asche, der mit einer sauren Detergenzienlösung bei dem nachfolgend beschriebenen Verfahren nicht herausgelöst wird, wird als ADF (acid

detergent fibre) bezeichnet. Bei pflanzlichen Futtermitteln und Silagen ist der ADF-Anteil ein Maß für die Gerüstsubstanzen Cellulose, Lignin und Lignin-N-Verbindungen.

Die Durchführung entspricht der von aNDF mit den unter 2.3.1.2 aufgeführten Reagenzien.

### **ADL**

Bei der Bestimmung des ADL (acid detergent lignin) dient das ADF-Verfahren als Vorbehandlung. Die Komponenten Cellulose und Lignin werden von der ADF-Lösung nicht herausgelöst. Die Cellulose wird daher anschließend mit 72%iger Schwefelsäure gelöst, um das Rohlignin (ADL) zu erhalten.

Die Proben wurden in 360 ml 72%iger Schwefelsäure für 3 Stunden gelöst. Jeweils zu vollen Stunde wurde das Rondell mit Hilfe des Rondellhalters in der Lösung mehrmals kräftig bewegt und abgetropft. Danach erfolgte wie bei der aNDF-Bestimmung der Schritt 3.

### **XF**

Unter Rohfaser ist der aschefreie Anteil eines Futtermittels zu verstehen, der nach Behandlung mit verdünnter Säure und Lauge zurückbleibt. Die Probe wird in zwei Schritten jeweils 30 Minuten mit 1,25 % H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> und 1,25 % NaOH (oder KOH) gekocht. Danach wird die Probe mit Aceton entfettet und getrocknet sowie verascht

Die Analyse erfolgte analog zu den unter aNDF aufgeführten Schritten, allerdings mit jeweils 30 Minuten Kochzeit in 1,3%iger Schwefelsäure, einem Waschschrift und anschließendem Kochen in 1,3%iger Kalilauge. Im Anschluss daran erfolgte der zweite Waschschrift. Danach wurde getrocknet und zurückgewogen. Die Proben wurden danach verascht und der Aschegehalt abgezogen.

### **Veraschung**

Die Veraschung des Probenrückstandes erfolgte nach dem Zurückwiegen der ADL-Proben, zusammen mit dem Fibrebag im Tiegel bei 550°C für mindestens 4 Stunden oder über Nacht. Nach der Veraschung wurde der Tiegel ca. 30 Minuten im Trockenschrank bei 105°C abgekühlt und anschließend zur Abkühlung auf Raumtemperatur noch 30 Minuten in den Exsikkator gestellt. Anschließend wurde zurückgewogen.

### **Berechnung**

Es gelte

$m_1$  = Masse des Spreizfingers

$m_2$  = Masse des Fibrebags

$m_3$  = Probeneinwaage

- $m_4$  = Rückwaage nach aNDF
- $m_5$  = Rückwaage nach ADF
- $m_6$  = Rückwaage nach ADL
- $m_7$  = Masse des Tiegels
- $m_8$  = Rückwaage nach Veraschung

(Alle Massenangaben in mg)

Aus dem absoluten Aschegehalt  $A_{abs} = m_8 - m_7 - m_1$  wird der prozentuale Ascheanteil  $A_{\%} = \left(\frac{A_{abs}}{m_3}\right) 100$  berechnet.

Die Fermentierbare organische Trockensubstanz ergibt sich aus  $FoTS = (100 - A_{\%})$ .

Für die prozentualen Gehalte an aNDF, ADF, ADL sowie XF gilt:

$$aNDF; ADF; ADL; XF = \frac{(m_{4;5;6} - m_2 - m_1 - A_{abs})}{m_3} 100 \quad [4]$$

Die Anteile der Rohfaserfraktionen werden dann über die oben beschriebenen Zusammenhänge berechnet:

$$Hemicellulose = aNDF - ADF$$

$$Cellulose = ADF - ADL$$

$$Rohlignin = ADL$$

## 1.1.4 Biogasertragstests

### Geräte

#### GKT

Der Glaskolbentest erfolgt in Anlehnung an den Hohenheimer Futterwerttests. Das System setzt sich aus verschiedenen Geräten zusammen (Abb. 4):

- Trockenschrank (Fa. Heraeus), Typ 8 6060 E; ID 7300102
- Ventilator (Hersteller unbekannt), in Trockenschrank verbaut
- Gestell aus Stahlschienen 55 x 60 cm<sup>2</sup>, mit aufgeschraubtem E-Motor (Hersteller unbekannt), aufgesetztem Flansch, mit Antriebswelle verbunden sowie passive Welle
- Doppelscheibe aus Sperrholz mit 56 Löchern zur Aufnahme der Gärbehälter
- Kolbenprober (Glas) 100 ml
- Glasstempel
- Schlauchklemmen
- Silikonschlauch ( $\varnothing_{\text{innen}}$  5 mm)

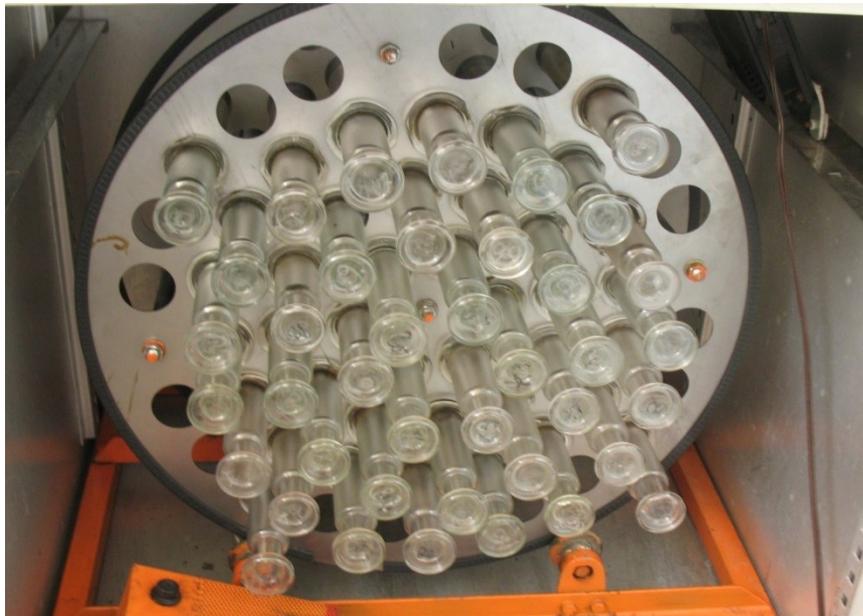


Abbildung 4: Glaskolben-Biogasertragstest

(Anm.: Die ursprünglich vorhandenen Holzscheiben wurden wegen zu starken Abriebs zwischenzeitlich durch gelaserte Edstahlscheiben ersetzt, die jedoch einen zu hohen Druck auf die Wellen ausübten und die Gummierung beschädigten. Daher wurden neue Sperrholzscheiben angefertigt. Die Abbildung zeigt das System mit Stahlscheiben.)

## Sensorbiogasanlage

Zur physikalisch-sensorischen Messung von CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> und Gesamtgas bei ausgewählten Silagen wurde die Anlage „Yield-Master“, ein neuartiges System der Fa. BlueSens, verwendet (Abb. 5).



Abbildung 5: Sensorbiogasanlage „Yield-Master“

- Gassensoren BCP-CO<sub>2</sub>, Fa. BlueSens
- Gassensoren BCP-CH<sub>4</sub>, Fa. BlueSens
- Einhängethermostat Lauda Eco Silver Lauda, Fa. Dr. R. Wobser
- Steuergerät für Magnetrührer MIX Control, Fa. 2mag AG
- Magnetrührer MIX Drive 6, 2mag Fa. AG
- Magnetrührfische, prismenförmig
- BACCOM Modell 3.05, Fa. BlueSens
- BACCOM CB Modell 2.01, Fa. BlueSens
- Gärbehälter mit je zwei Anschlüssen für die Gassensoren (CO<sub>2</sub>/ CH<sub>4</sub>) in der Gewindegröße GL 45 sowie zwei Anschlüsse GL 14, Fa. Duran
- Milligascounter, Fa. Ritter
- Wärmebad mit Deckplatte

## **Sonstiges Material**

Für den GKT wird gebraucht:

- Doppelscheibe aus Holz, Kunststoff oder Stahl mit 56 Löchern zur Aufnahme der Gärbehälter, diese musste aufgrund zu starker Gebrauchsspuren im laufenden Versuch ersetzt werden
- Vakuumierfett (Silikon)

Für die Sensorbiogasanlage wird gebraucht:

- Gummiringe zum Abdichten der Sensoranschlüsse
  - Schläuche für die Milligascounter (Hartgummi, transparent)
  - Schraubverschlüsse 14 mm mit Dichtungseinlagen
  - Wasserwaagen zur Justierung der Milligascounter
  - Zange zur Entnahme der Austrittsstutzen der Milligascounter
  - Injektionsspritzen 10 ml sowie Kanülen zur Feinjustierung des ölhaltigen Polymers in den Milligascountern
- ölhaltiges Polymer in Flaschen

## **Methoden**

### **GKT**

Der „Glaskolbentest“ (GKT) ist ein Schnelltest zur Bestimmung des Biogasertrages von Substraten in Anlehnung an den Hohenheimer Futterwerttest. Die Durchführung wurde von Wiegand (2013) entlehnt.

Für die Befüllung eines Kolbenprobers wurden 0,5 g der bei 55°C getrockneten und auf 1 mm vermahlene Probe verwendet, die zusammen mit Impfschlamm inkubiert wurden. Der Impfschlamm stammte aus dem Fermenter einer Biogasanlage, die mit Maissilage betrieben wurde. Das Fermentermaterial wurde zuvor durch Siebung und Dekantierung von Feststoffen befreit. Vom Inkubationsmaterial wurden 30 ml jeweils zusammen mit der Probe in 100 ml großen Glaskolben gefüllt wurden. An den Kolbenprobern befand sich zur Abdichtung ein ca. 8 cm langer Plastikschauch, der für den Versuch mit einer Klemme verschlossen wurde. Der gefettete Stempel schloss den Kolbenprober gasdicht ab.

Die Kolbenanordnung befand sich in einem beheizten Schrank in der langsam rotierenden Doppelscheibe, durch die eine gleichmäßige Durchmischung des Kolbeninhalts gewährleistet wurde.

Die Inkubationstemperatur betrug konstant 37°C und wurde regelmäßig kontrolliert. Zur Bestimmung der Gasmenge wurde die Volumenausdehnung auf der Skala abgelesen. Wenn mehr Biogas gebildet wurde als ein Kolbenprober fassen kann, so wurde nach Notierung der Biogasmenge der Glasstempel zurückgestellt und das Biogas aus dem Kolbenprober

entfernt. In den Versuchsdurchlauf wurden auch Kolben, welche ausschließlich mit der gleichen Menge Inokulum gefüllt waren, als Nullansatz integriert.

Um die Ausdehnung durch Erwärmung als Störfaktor auszuschließen, wurde vor dem Ablesen der Schrank geöffnet und ein Temperatenausgleich mit der Umgebung gestattet. Durch  **$T_{innen} = T_{außen}$**  wurden auch Veränderungen des Volumens während des Ablesens vermieden.

Zur Berechnung wurde zunächst gem. VDI 4630 (2006) das entstandene Gasvolumen auf Normalgas umgerechnet:

$$V_0^{tr} = V \frac{(p-p_w)T_0}{p_0T} \quad [5]$$

Dabei ist:

- $V_0^{tr}$  = Volumen des trockenen Gases im Normzustand in ml<sub>N</sub>
- $V$  = abgelesenes Volumen in ml
- $p$  = Druck der Gasphase
- $p_w$  = Dampfdruck des Wassers in Abh. der Umgebungs-T in hPa
- $T_0$  = Normtemperatur (273 K)
- $p_0$  = Normdruck (1013 hPa)
- $T$  = Temperatur des Gases oder der Umgebung

Daraus wurde für jeden Messwert  $x_i$  der Korrekturfaktor  $k_i$  für die Berechnung abgeleitet.

$$k_i = V_0^{tr} / V \quad [6]$$

Durch  **$T_{innen} = T_{außen}$**  ergibt sich aus  **$pV = nRT$**  bei konstantem Volumen  **$p_{innen} = p_{außen}$** .

Somit kann für  **$p$**  der Umgebungsdruck verwendet werden.

Für die grafische Darstellung der diskontinuierlichen Messfolgen wurde für die Kumulierung der Messwerte folgende Formel entwickelt:

$$f(x_i) = f(x_{i-1}) + [(x_i - z)k_i - g(r_i)] \cdot m_{EW} \quad [7]$$

Wobei  $m_{EW}$  = Einwaage (an oTS) der Probe in Gramm. Der Ausdruck  $g(r_i)$  entspricht dem abziehenden Eigenertag des Impfschlammes, für welchen gilt:

$$g(r_i) = (r_i - z)k_i \quad [8]$$

Zum Vergleich kann die Verlaufskurve der Impfschlammreferenz mitbeobachtet werden:

$$f(r_i) = g(r_{i-1}) + (r_i - z)k_i \quad [9]$$

Mit

- $x_i$  = Messwert der Probe zum Zeitpunkt  $i$
- $z$  = Füllvolumen des Kolbenprobers
- $k_i$  = Korrekturfaktor mit dem Luftdruck zum Zeitpunkt  $i$
- $r_i$  = Messwert der Impfschlammreferenz

Die Darstellung erfolgte über ein VBA-Programm auf Excel. Die statistische Auswertung erfolgte mit dem Programm SPSS Statistics 21.

### Sensorbiogasanlage

Die Software der Sensorbiogasanlage rechnet ihre Eigenmessungen automatisch in Normalvolumen um. Allerdings werden kumulierte Werte nur für den Gesamtgasertrag ausgegeben. [CH<sub>4</sub>] und [CO<sub>2</sub>] werden nur als Volumen-% pro Messzeitpunkt angegeben. Auch hat das System ein im Verhältnis zum neu entstehenden Gasvolumen ein hohes Totvolumen (Kopfraum + Schlauch). Dies erforderte eine Nachberechnung, um die kumulierten Gaserträge berechnen zu können.

Ausgehend vom Methanertrag zum Messzeitpunkt  $t_0$

$$M_{t_0} = \frac{(V_k k_0) : 100}{m_{EW}} \quad [10]$$

wurde für alle nachfolgenden Messzeitpunkte  $t_n$  der kumulierte Methan- und Kohlenstoffdioxidtrag folgende Formel entwickelt:

$$M_{t_n} = M_{t_{n-1}} + \frac{((V_k + V_n - V_{n-1})k_n - (V_k k_{n-1})) \cdot 100}{m_{EW}} \quad [11]$$

Wobei

$M_{t_0}$  = Gehalt an CH<sub>4</sub> bzw. CO<sub>2</sub> zum Zeitpunkt  $t_0$  in ml<sub>N</sub>

$t_n$  = Messzeitpunkt, mit  $n \neq 0$

$V_k$  = Volumen des Kopfraumes in ml

$k_0$  = [CH<sub>4</sub>] bzw. [CO<sub>2</sub>] zum Zeitpunkt  $t_0$

$m_{EW}$  = Masse der eingewogenen oTS in g

$M_{t_n}$  = zu errechnender kumulierter Methanertrag zum Zeitpunkt  $t_n$  in ml<sub>N</sub>

$V_n$  = gemessenes Gesamtgas, kumuliert zum Zeitpunkt  $t_n$  in ml<sub>N</sub>, so dass

$$V_n = V_0 + (V_1 - V_0) + \dots + (V_n - V_{n-1}) = V_0 + \sum \Delta V_i$$

$k_n$  = [CH<sub>4</sub>] bzw. [CO<sub>2</sub>] zum Zeitpunkt  $t_n$

Die Darstellung erfolgte über ein VBA-Programm auf Excel.

### Behandlung des Impfschlammes

Eine Vorversuchsreihe zeigte, dass die Methanerträge in der hier verwendeten Gäranlage, bei dem Vorgehen nach den Vorschriften DIN EN ISO 11734 und VDI 4630, einer empirischen Standardabweichung von bis über 30 % unterworfen sein können.

Dies traf auch zu, wenn der Impfschlamm vor dem Einsatz einer mehrtägigen Hungerphase unterzogen, die Befüllung der Gärbehälter unter N<sub>2</sub>-Atmosphäre durchgeführt und eine mess- und wiederholbare Homogenisierung des Impfschlammes erzielt wurden.

Abweichungen dieser Größenordnung müssen oftmals hingenommen werden, wobei sie die Deutung von Messergebnissen erschweren (Wiegand 2013).

Daher wurde der Impfschlamm vor dem Einsatz gesiebt und anschließend einer Hungerphase unterzogen. Die Filtrierung und Verdünnung des Impfschlammes und des Hungerns vor Aliquotierung in die Batch-Gefäße führte zu einem weitgehenden Gleichlauf der Behälter mit lediglich 11 % Abweichung.

Der Eigenertag des Impfsubstrates am Gesamtmethanertrag wurde mit durchschnittlich 0,56 % so gering, dass auf eine mitlaufende Referenz verzichtet werden konnte.

### **1.1.5 Elektronenmikroskopie**

#### **Material**

- Sputter Coater Modell S 150 B, Fa. Edwards
- Rasterelektronenmikroskop für SEM, Modell VEGA SBH, Fa. Tescan
- Silikonpaste

#### **Methoden**

Die zu untersuchenden Proben wurden mit Silikonpaste auf einem Objektträger fixiert und im Sputter mit Gold bedampft, um eine gleichmäßig leitende Oberfläche zu erzeugen.

Die Proben wurden dann in die Vakuumkammer des Mikroskops gegeben und diese evakuiert. Es wurde jeweils zunächst eine Übersichtaufnahme in 100-facher Vergrößerung gemacht. Unter Veränderung der Variablen Abstand, Bestrahlungswinkel und elektrische Spannung wurde die jeweils höchstmögliche Auflösung ermittelt.

## **1.2 Ergebnisse**

### **1.2.1 Silierbarkeit und Biogasleistungen verschiedener Stroharten**

Getreide-, Körnermais- und Rapsstroh ist bei geeigneten Feldtrocknungsbedingungen nach dem Pressen in einem trockenen Strohlager bereits für mehrere Monate verlustarm lagerfähig und muss normalerweise nicht siliert werden. Das Silieren der Stroharten soll jedoch einerseits dazu dienen, die Lignocellulose durch das Einwirken von Gärsäuren und der Hydrolyse durch anaerobe Mikroorganismen voraufzuschließen, andererseits bietet das trockene Stroh die Möglichkeit, durch gemeinsames Silieren mit nassen Substraten in der Mischung optimale TS-Gehalte für den Silierprozess einzustellen. Zudem soll das Silieren im Vergleich zum trockenen Stroh eine verbesserte physikalische Eignung für den Einsatz in Biogasanlagen erhalten (keine wasserabweisenden Schichten an der Oberfläche, weniger Schwimmschichtbildung, größere Oberfläche für den Besatz mit Mikroorganismen). Da es zum Verhalten verschiedener Stroharten im Silierprozess praktisch keine wissenschaftlichen Erkenntnisse gibt, und aufgrund niedriger Gehalte an wasserlöslichen Kohlenhydraten (wLK) eine eher schlechte Silierbarkeit zu erwarten ist, sind unterschiedliche Stroharten mit Leitungswasser angefeuchtet worden, bis ideale TS-Gehalte von ca. 35% erreicht wurden. Mit wenigen Ausnahmen, bei denen in einzelnen Wiederholungen in den Probesilagen durch Undichtigkeiten am Silobehälter Schimmelbildung eingesetzt hat, kann die Mehrzahl der Strohsilagen als gelungen bewertet werden. Dies zeigt sowohl die sensorische Bewertung (Anhangtab. A1) als auch die Messung der pH-Werte, die trotz wLK-Konzentrationen von deutlich unter 0,5 % (DLG-Futterwerttabelle 1997) eine Absenkung zwischen pH 3,5 und pH 5,5 ergeben hat.

Abb. 6 zeigt die Gesamtgaserträge verschiedener Stroharten im Glaskolbentest im Vergleich zur Silomaissstandardsilage (Referenz Mais-GPS). Erwartungsgemäß sind die Ergebnisse deutlich niedriger, als bei der Silomaissilage, die aufgrund der Stärke im Maiskolben das höchste Gasbildungspotential aufweist. Bezogen auf die Trockensubstanz erreichen die Maisstrohvarianten maximal 68 % der Maissilage mit Kolbenanteil (Abb. 7). Es zeigt sich, dass die Silierbedingungen dabei einen Einfluss haben. Das mit 25 % TS zu nass einsilierte Maisstroh erzielt später im Biogastest deutlich geringere Gaserträge. Gersten- und Weizenstroh schneiden etwas schlechter als Maisstroh ab, wobei deutliche Vorteile des Weizenstrohs festzustellen sind. Obwohl Rapsstroh aerob leichter abbaubar ist als die Getreidestroharten, zeigt Rapsstroh nach der Silierung den niedrigsten Gasertrag. Im Vergleich zur Mais-Ganzpflanzensilage ergibt sich mit der Rapsstrohsilage ein um fast zwei Drittel geringerer Ertrag.

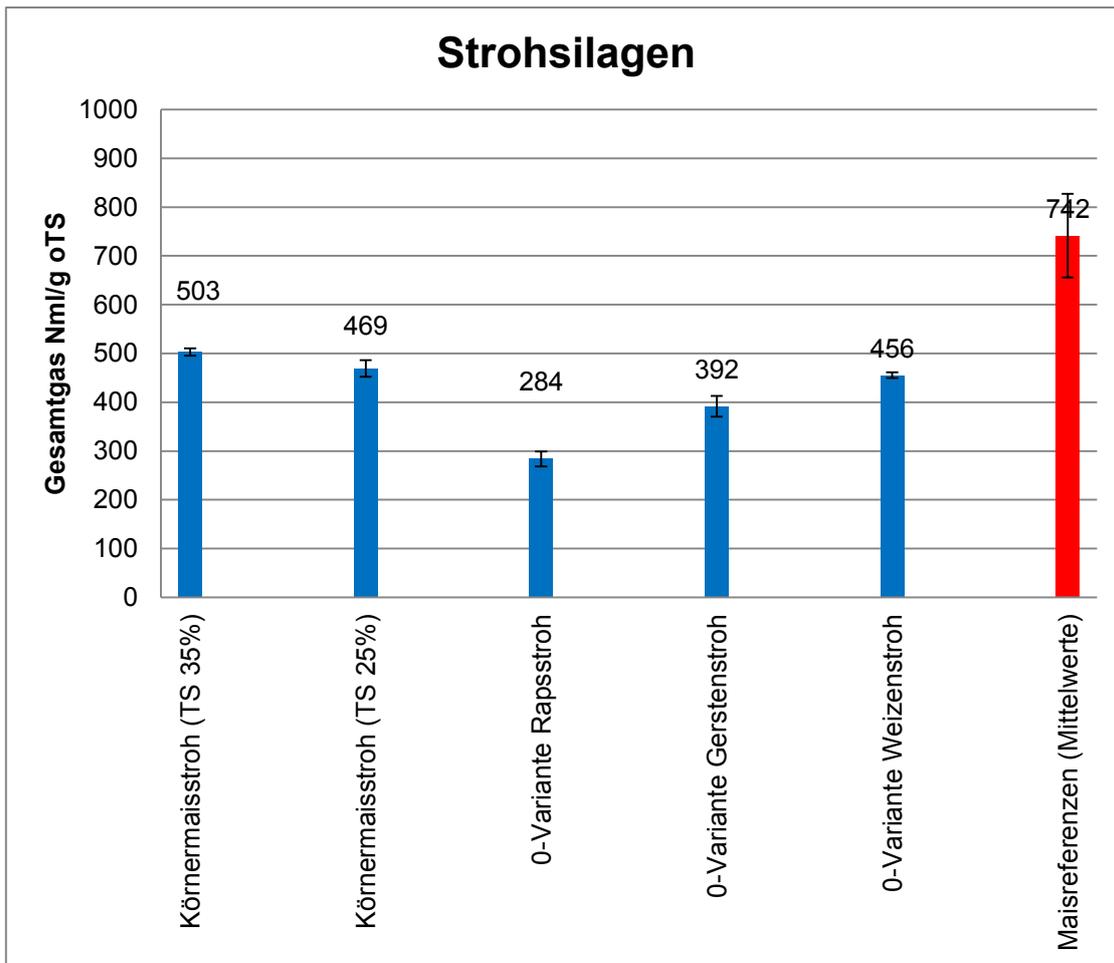


Abbildung 6: Absolute Biogaserträge reiner Strohsilagen aus allen Versuchen im Vergleich mit Mais-GPS

(empirische Standardabweichungen angegeben; die Maisreferenz zeigt die Mittelwerte sämtlicher gemessenen Mais-GPS aus allen Versuchen)

Neben dem angestrebten Lignocelluloseaufschluss durch den Silierprozess soll Stroh dazu dienen, den Flüssigkeitsüberschuss leicht vergärbarer aber nasser Substrate, wie z.B. Zuckerrüben, auszugleichen. Zuckerrüben sind von einer vergleichsweise kurzen Haltbarkeit gekennzeichnet, lassen sich aber aufgrund der geringen TS ohne eine Co-Silierung mit trockeneren Substraten nur schwer silieren. Die hohen Zuckergehalte bieten während des Silierens angesichts wenig puffernder Substanzen wie Rohprotein sehr viel Substrat für anaerobe Säurebildner. Um zu testen, in welchem Umfang sich der in Zuckerrüben enthaltene Zucker auf die Silierbarkeit und die Gaserträge von Stroharten in Biogasanlagen auswirkt, wurden den Stroharten vor dem Silieren abgestufte Mengen reiner Saccharose (0, 60, 120 g Zucker kg<sup>-1</sup> TS) zugesetzt, um unterschiedliche Mischungsverhältnisse mit Rüben zu simulieren. Diese Vorgehensweise (Zuckerrübensimulation) sollte besser kontrollierbare

Mischverhältnisse und konstante TS-Gehalte der Mischungen garantieren, was mit echten Zuckerrüben kaum möglich ist.

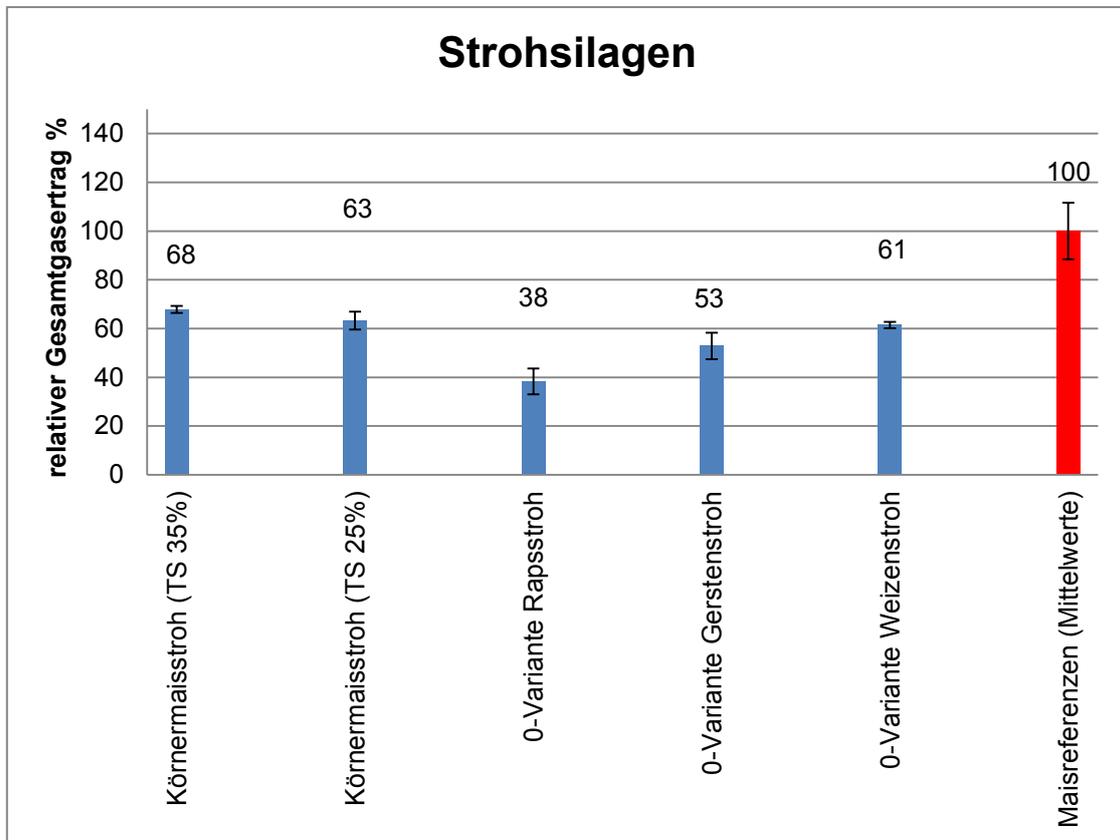


Abbildung 7: Relative Biogaserträge bezogen auf die Mais-Referenzen

### 1.2.2 Möglichkeiten der Aufwertung von Stroh durch Co-Silierung mit Zuckerrüben

Die Schwierigkeit besteht bei Mischsilagen darin, die Anteile der Kosubstrate am Gesamtgasertrag zu bestimmen. Im Fall von Saccharose als Simulation des Zuckergehaltes in Zuckerrüben könnte der theoretische Gasertrag des Zuckers bei vollständiger Umsetzung herangezogen werden, da hier definierte Massen vorliegen. Überdies ist das nach Silierung vorliegende mikrobielle Metabolit aus der Saccharose, die Milchsäure, gegenüber wenig chemisch aufgeschlossenen komplexen Bestandteilen (wie Cellulose), in der Methanogenese eher vom Abbau betroffen, wird also früher und vollständiger umgesetzt.

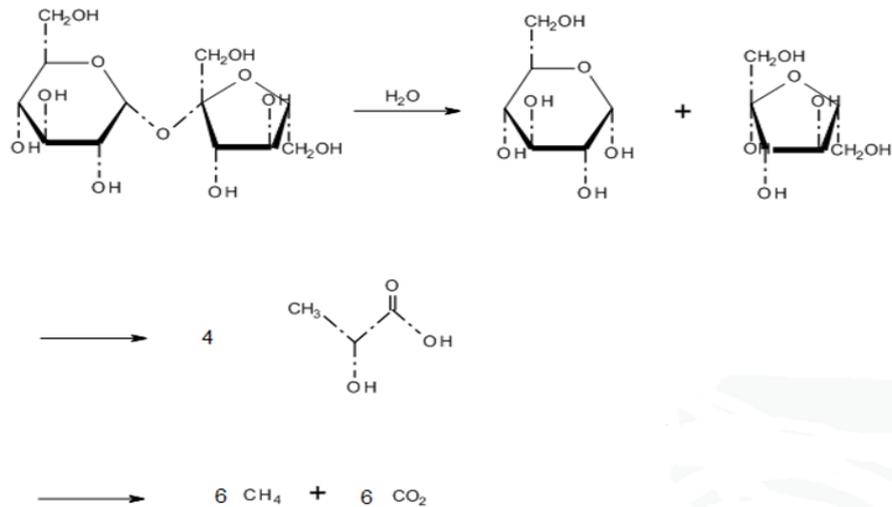
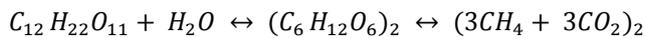


Abbildung 8: Vereinfachte Darstellung der Methanogenese aus Saccharose über die Milchsäurevergärung

Unter der Annahme, dass die Saccharose zunächst durch Hydrolyse in Glucose und Fructose gespalten und beides vollständig umgesetzt wird (Abb. 8), ergibt sich nach der Grundgleichung



und Anwendung der allgemeinen Gasgleichung pro Mol Saccharose jew. 6 mol CH<sub>4</sub> und 6 mol CO<sub>2</sub>.

Der theoretische Biogasertrag aus der Saccharose wurde demnach vom Gesamtgasertrag der jeweiligen Mischsilage abgezogen. Zwingend übrig blieb so der Reinertrag aus dem Stroh, welcher auf ml<sub>N</sub>/g<sub>oTS</sub> umgerechnet wurde. Der auf diese Weise gewonnen reine Biogasertrag des Strohs aus den Mischsilagen konnte so mit dem Gasertrag der Stroh-Monosilage verglichen und auf einen Mehrertrag und somit einem Voraufschluss hin untersucht werden.

Tabelle 2: Steigerung der Gaserträge verschiedener Stroharten durch Zusatz unterschiedlicher Mengen von Zucker (Zuckerrübensimulation)

Probe	Umrechnung in kg <sub>ZR</sub> / t <sub>Stroh</sub>	Mittelwert Gesamtgasertrag	StAbw Gesamtgasertrag	Variations- koeffizient Gesamtgasertrag	Bezogen auf Mais-GPS
0-Variante Rapsstroh	nur Rapsstroh	283,77	15,17	5,34	40,10
Rapsstroh 60g/kg oTS	272 kg <sub>ZR</sub> / t <sub>Stroh</sub>	305,32	23,16	7,58	43,15
Rapsstroh 120g/kg oTS	581 kg <sub>ZR</sub> / t <sub>Stroh</sub>	371,97	34,87	9,37	52,57
Mais-GPS		707,60	18,65	2,64	100,00
0-Variante Maisstroh	nur Maisstroh	489,97	8,77	1,79	56,67
Maisstroh 60g/kg oTS	281 kg <sub>ZR</sub> / t <sub>Stroh</sub>	525,65	9,60	1,83	60,79
Maisstroh 120g/kg oTS	600 kg <sub>ZR</sub> / t <sub>Stroh</sub>	521,54	14,05	2,69	60,32
Mais-GPS		864,67	13,04	1,51	100,00
0-Variante Gerstenstroh	nur Gerstenstroh	391,72	21,34	5,45	53,71
Gerstensstroh 60g/kg oTS	281 kg <sub>ZR</sub> / t <sub>Stroh</sub>	405,53	8,95	2,21	55,60
Gerstenstroh 120g/kg oTS	600 kg <sub>ZR</sub> / t <sub>Stroh</sub>	427,36	44,12	10,32	58,59
Mais-GPS		729,38	37,41	5,13	100,00
0-Variante Weizenstroh	nur Weizenstroh	455,73	5,90	1,30	62,69
Weizensstroh 60g/kg oTS	275 kg <sub>ZR</sub> / t <sub>Stroh</sub>	445,17	25,21	5,66	61,23
Weizenstroh 120g/kg oTS	587 kg <sub>ZR</sub> / t <sub>Stroh</sub>	470,72	28,76	6,11	64,75
Mais-GPS		727,00	48,50	6,67	100,00

In allen anderen Versuchen des Projektes wurden echte Zuckerrüben eingesetzt (vgl. Anhangtab. A2). Tab. 2 zeigt, dass die Silagen mit simulierten Zuckerrübenzusätzen erwartungsgemäß zu höheren Gaserträgen führen als die reinen Strohsilagen. Bei der Umrechnung der Zuckerzugaben in die dafür benötigten Mengen frischer Rüben sind die stark unterschiedlichen TS-Gehalte im Vergleich zu den Strohartarten zu berücksichtigen. Bezogen auf die Gesamt-TS der Mischsilagen ist der Beitrag der Rüben zum Gasertrag in den hier angegebenen Mengen trotz der im Vergleich zu allen Strohartarten deutlich höheren Gaserträgen pro kg oTS relativ gering. Interessanter als der absolute Gas-Mehrertrag durch den Zusatz von Zucker (bzw. Zuckerrüben) ist die Frage, ob der Zucker durch das gemeinsame Silieren mit dem Stroh auch das Gasbildungspotential der Strohartarten beeinflusst. Hierzu wurde unterstellt, dass der Zucker sowie die daraus im Silo gebildeten organischen Säuren zu 100% abgebaut werden und die C-Atome des Zuckers vollständig in Molekülen der Gasphase sind. Zieht man diese theoretische Menge CO<sub>2</sub> und Methan anteilig ab, so kann errechnet werden, wie hoch der Beitrag des Mischungspartners Stroh an der Gasbildung mindestens sein muss. Auf dieser Basis lässt sich berechnen, dass die Strohartarten aus der Mischsilage nach Abzug der Leistung des Zuckers zum Teil ein höheres Gasbildungspotential haben, als sie bei Silierung nur mit Wasser und ohne Zuckerzusatz haben. Der Zuckerzusatz führt im Vergleich zu reinen Strohsilage zu einer verbesserten Gasbildung des Strohanteiles bei Raps- (bis 19,9 % mehr), Mais- (bis 3,9 % mehr) und Gerstenstroh (bis 11,2%) mehr (Abb. 9). Bei Gerstenstroh ergibt sich die Erhöhung jedoch erst bei umgerechnet 900 kg Zuckerrüben je Tonne Stroh. Bei Weizenstroh verschlechtert sich die Gasausbeute aus dem Strohanteil um bis zu 7,1%. Allerdings erreicht Rapsstroh selbst bei einem rechnerischen Aufwand von 587 kg frischer Rüben auf eine Tonne in der Summe nur 52,6% der Gasmenge als die gleiche Menge oTS Mais-GPS (Tab. 3).

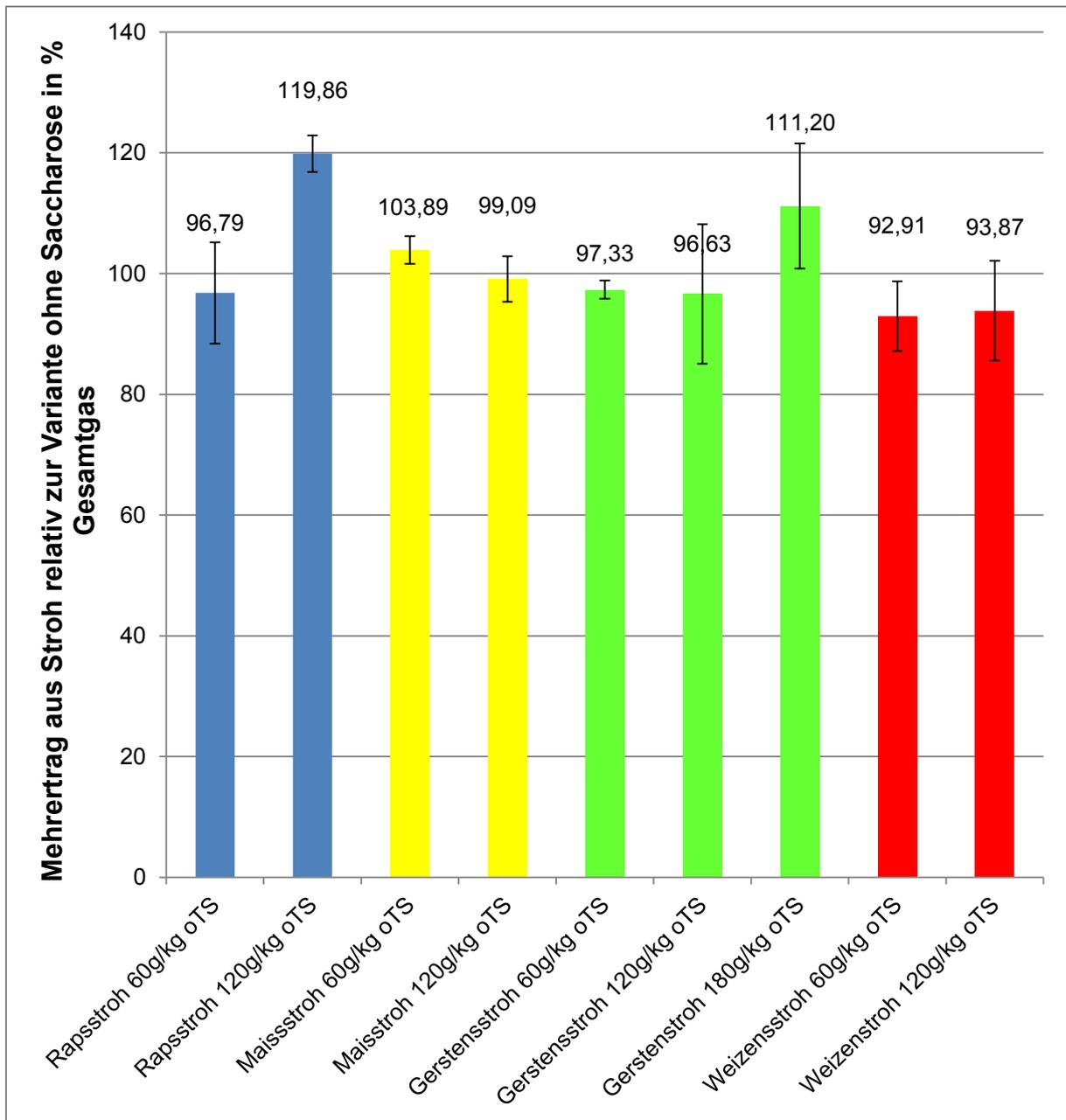


Abbildung 9: Prüfung der messbaren Biomasseaufwertung durch Zusatz von Zucker (g Saccharose pro kg oTS)

Rechnerischer Gasertrag aus dem Strohannteil von Stroh-Zucker-Mischsilagen, nachdem der theoretische maximale Gasertrag des Zuckers stöchiometrisch abgezogen wurde

Auch für die anderen Stroharten hat sich gezeigt, dass die Mengen an eingesetzten Rüben deutlich erhöht werden müssen, um mit Koppelproduktsilagen an das Niveau der Gasausbeuten von GPS-Maissilagen heran zu kommen. Dabei stellt sich auch die Frage, ob die zusätzliche Verwendung des Rübenblatts sinnvoll ist. Hierzu wurden mehrere Gerstenstrohsilagen mit variierten Rüben- und Rübenblattanteilen hergestellt. Hierbei kamen sowohl Zucker- als auch Futterrübensorten zum Einsatz. Tab. 3 zeigt die Gaserträge

verschiedener Gerstenstrohsilagen mit unterschiedlichen Anteilen von Rübe und Blatt der Zucker- bzw. Futterrübe.

Tabelle 3: Gaserträge von Gerstenstrohsilagen mit unterschiedlichen Zusätzen von Rübe und Rübenblatt

Probe	kgZR / tStroh	Mittelwert Gesamtgasertrag	StAbw Gesamtgasertrag	Variations- koeffizient Gesamtgasertrag	Bezogen auf Mais- GPS
Gerstenstroh	0	337,02	54,26	16,10	46,90
Gerstenstroh + Zuckerrübe	1 4449	640,21	44,27	6,92	89,10
Gerstenstroh + Zuckerrübe + Zuckerrübenblatt	1 2025 1215	604,60	3,76	0,62	84,14
Gerstenstroh + Zuckerrübenblatt	1 2225	409,82	23,42	5,72	57,03
Gerstenstroh + Futterrübe	1 2125	451,29	33,29	7,38	62,80
Gerstenstroh + Futterrübe + Futterrübenblatt	1 1774 355	367,77	82,00	22,30	51,18
Gerstenstroh + Futterrübenblatt	1 2125	413,32	27,50	6,65	57,52
Refer. Mais-GPS		718,57	42,35	5,89	100,00

Es wird deutlich, dass mit 4,45 t Zuckerrüben auf 1 t Gerstenstroh die Gaserträge fast 90 % der GPS-Maissilage erreichen. Durch den Einsatz von 1,2 t lässt sich mehr als die Hälfte der Zuckerrübenmenge einsparen, ohne dass sich das Niveau der Gasproduktion wesentlich verändert. Diese Kombination erweist sich als die Variante mit der geringsten Standardabweichung aller im Projekt getesteten Silagen. Der Verzicht auf Rüben und Mischung des Strohs mit Rübenblatt allein führt gegenüber der reinen Strohsilage zwar zu keiner sehr großen Verbesserung der Gasausbeuten aber in keinem Fall zu einer Verschlechterung. Zwischen Zuckerrüben- und Futterrübenblatt besteht dabei kein wesentlicher Unterschied, der Einsatz von Futterrüben bringt im Vergleich zu Zuckerrüben aber nur geringe Vorteile im Vergleich zu reinen Gerstenstrohsilagen.

Da sich die Wirkung der Zuckerrüben auf Gerstenstrohsilagen in ähnlicher Weise bei Körnermaisstroh gezeigt hat, vgl. Tab 2 (Zuckerrübensimulation), wurde bei folgenden

Upscalingstufen ein Focus auf Kombinationen von Zuckerrüben mit Körnermaisstroh gelegt. Für Körnermais existiert anders als für Gersten-, Weizen- oder Haferstroh kein Markt, weil die Nutzung z.B. als Einstreu hier keine Bedeutung hat. Maisstroh hat zudem im Unterschied zu anderen Stroharten den Vorteil, dass es in Betrieben zeitnah zur Zuckerrübenernte anfällt und eine Lagerung des Strohs sich meist erübrigt. Mit einer Innovation der Firma Gehringhoff wurde im Verlauf des Projektes zudem eine Erntetechnik verfügbar, die eine verschmutzungsarme Bergung des Strohs während der Körnermaisernte wesentlich vereinfacht hat.

Für eine spätere Phase im Praxismaßstab sollte zunächst im Labormaßstab geklärt werden, in welcher Form sich das Vermengen des Strohs mit den Zuckerrüben anbietet, d.h. ob die Zuckerrüben gemust (fein) oder grob zerkleinert (4 bis 12 cm Querschnitt) werden sollten. Die Ergebnisse hierzu stellt Abb. 10 dar. In diesem Versuch ist auch die Zuckerrübenmenge variiert worden, die in der Abb. 10 an den verschiedenen TS-gehalten zu erkennen ist. Bei der Variante 25% ist den Zuckerrüben nur eine geringe Menge Stroh zugesetzt worden, um eine Erhöhung auf um 6 Prozentpunkte zu erreichen. In der Variante 35 % ist entsprechend der notwendigen TS-Erhöhung mehr Maisstroh eingesetzt worden. Der Zerkleinerungsgrad der Zuckerrüben ist dabei offenbar bedeutungslos, da sich die Gasausbeuten der gemusterten Rüben nicht von den grob zerkleinerten unterscheiden. Es stellt sich heraus, dass das Mischungsverhältnis von feldtrockenem Maisstroh und frischen Zuckerrüben so gewählt werden kann, das das Siliergutgemisch in der Summe einen TS-Gehalt einer Maissilage von 35 % TS entspricht. Mit dieser Mischung werden nahezu identische Gaserträge erzielt wie mit Mais-GPS. In allen Silierbehältern dieser Mischung kann ein einheitlicher pH Wert um 4 festgestellt werden (vgl. Anhangtab. A2) und auch innerhalb der Laborsilagen ist sowohl der pH-Wert als auch der TS-Gehalt der Mischungen konstant.



Abbildung 10: Absolute (links) und relative (rechts) Gaserträge von Laborsilagen aus Körnermaisstroh und Zuckerrübe

Zur Validierung der Laboruntersuchungen sind basierend auf deren Ergebnissen in Zusammenarbeit mit einem Praxisbetrieb im Kreis Soest ein Fahrsilo mit einer Körnermaisstroh-/Rübenmischung befüllt worden. Die parallele Erfassung des Maisstrohs während der Körnermaisernte ist mit der Technik der Firma Geringhoff (Mais Star MS Collect®) erfolgt. Die Rüben sind dafür ohne Blatt durch den Verdichter zerkleinert und mit einer Schlepper- Frontladergabel mit dem Mais vermengt worden.

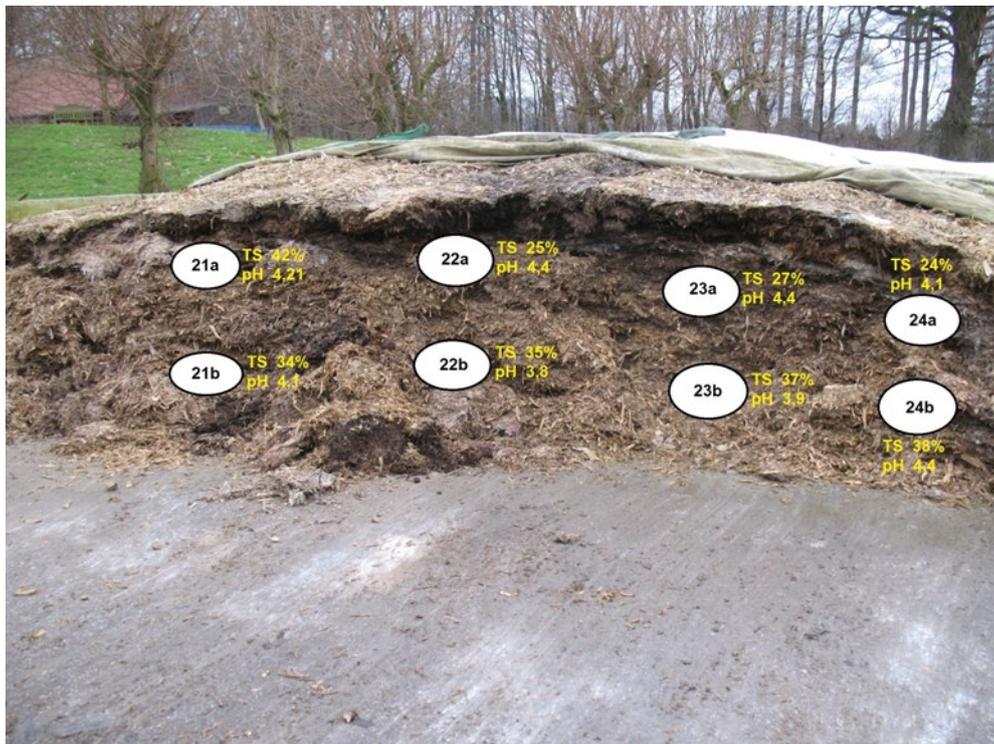


Abbildung 11: Probennahmestellen aus Fahrsilo, ca. 1 Meter hinter der Anschnittfläche mittels Bohrstock entnommen

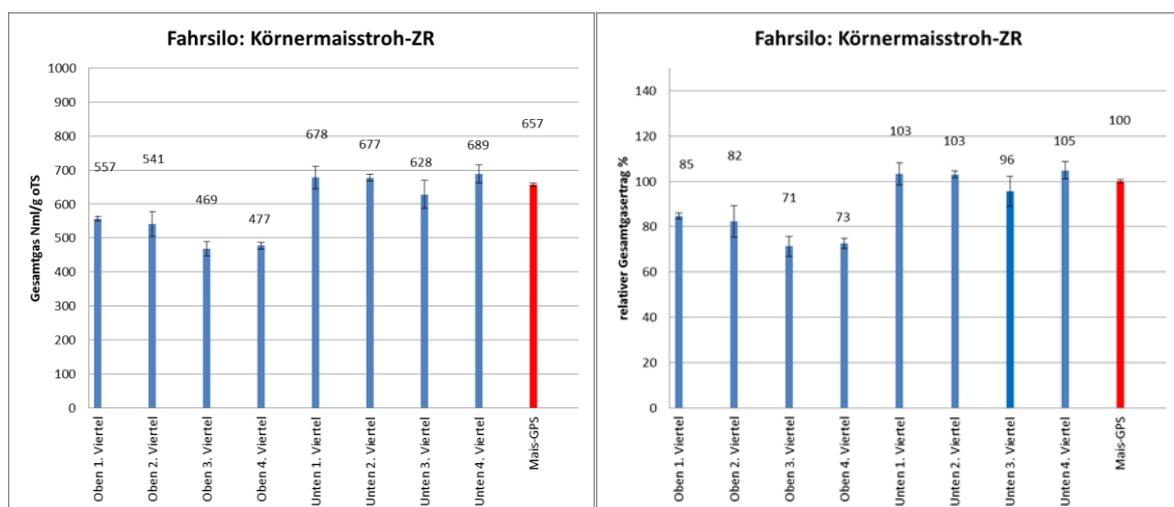


Abbildung 12: Absolute (links) und relative (rechts) Gaserträge eines Fahrsilos aus Körnermaisstroh und Zuckerrübe (Probeentnahmestellen gem. Abb. 11 gekennzeichnet)

Hierbei ist im Praxismaßstab geprüft worden, ob der Einbau mit geringem technischem Aufwand in ausreichender Homogenität der Mischung im Silokörper möglich ist. Abb. 11 zeigt die verschiedenen Beprobungszonen im Fahrsilo mit den jeweils gemessenen TS-Gehalten und pH-Werten. Die tiefer gelegenen Bereiche weisen geringere TS-Gehalte auf als im oberen Bereich, was auf eine Verlagerung von Gärsäften hindeutet. Mit 34 bis 38% TS liegen aber auch die TS-gehalte in der räumlichen Nähe zur Siloplatte noch im Optimalbereich für Maissilagen. Erst bei TS-Gehalten von unter 30% wären Gärstoffaustritte wahrscheinlich. Die niedrigen pH-Werte zwischen pH 3,8 und pH 4,4 sind über den Silokörper gesehen relativ homogen, auch in den Randbereichen, in denen eine Verbräunung sichtbar gewesen ist, die auf eine suboptimale Verdichtung im Bereich der Silowände während des Befüllens hinweist. Die pH-Werte des Fahrsilos liegen damit im selben Bereich, wie vergleichbare Laborsilagen. Auch die Biogaserträge von Laborsilagen und Praxisilage sind auf vergleichbarem Niveau. Im Praxismaßstab sind jedoch Unterschiede der Gasbildungspotentiale in verschiedenen Lagerungstiefen feststellbar. Auch dies deutet wie die TS-Unterschiede auf eine geringe Verlagerung der leicht abbaubaren Zuckerrübeninhaltsstoffe hin.

In der Biogasanlage im Praxismaßstab war bei Zufütterung der Mischsilage (ca. 10% der Tagesfütterung) keine Zu- oder Abnahme der Gasproduktion feststellbar.

### **1.2.3 Co-Silierung von Pferdemist mit Zuckerrüben**

Da durch den Verkauf von Gersten-, Weizen- und Haferstroh- besonders in Veredelungsregionen mitunter hohe Erlöse erzielt werden, steht die Biogasproduktion aus Getreidestroh in Konkurrenz mit der direkten Vermarktung des Stroh. Neben der Verwendung von Raps- oder Körnermaisstroh bietet auch der Einsatz von Pferdemist eine Möglichkeit, Koppelprodukte ohne existierenden Markt zu verwenden. Aufgrund der relativ geringen Nährstoffgehalte im Vergleich zu Mist aus der Haltung anderer Tierarten liegt der überwiegende Wert des Pferdemistes lediglich in der möglichen Verbesserung der Humusgehalte. Die Verwertung von frischem Pferdemist in Biogasanlagen ermöglicht den Verzicht auf eine Strohrotte und stellt eine Kaskadennutzung für das im Mist enthaltene Getreidestroh dar. Oft kann Pferdemist kostenfrei von Gestüten oder aus Pensionspferdehaltung übernommen werden. Die Ergebnisse der Silierung von Gemengen von Rübenarten mit Pferdemist und anschließende Vergärung der Silagen in Biogasanlagen im Labormaßstab sind in Tab. 4 dargestellt. Aufgrund der geringeren TS-Gehalte des Pferdemistes im Vergleich zum Stroh, ist der Rübenanteil wesentlich reduziert worden. Auf eine Vortrocknung des Mistes ist aufgrund im Großmaßstab mangelnder Praktikabilität verzichtet worden. Die Mischsilagen bleiben damit unter dem Ziel von 30 bis 35% TS. Zu

beachten ist auch hohe Rohascheanteil zwischen 16 und 21%, der sich in den Mischsilagen trotz Reinigung der Rüben feststellen lässt. Ein Großteil der Asche stammt offenbar aus Bodenmaterial im Pferdemist. Eine übermäßig starke Pufferwirkung während der Silierung lässt sich angesichts der pH-Werte zwischen 3,5 und 4,9 nicht belegen. Wie auch bei den Mischungen mit Gerstenstroh zeigt sich die Aufwertung der Mischsilagen mit Pferdemist durch Futterrüben als weniger erfolgreich als das Mischen mit Zuckerrüben, auch wenn der Futterrübenanteil in den Mischsilagen 37% höher liegt als der Zuckerrübenanteil. Zudem ergaben sich trotz standardisierter Bedingungen im Labor große Varianzen in den Gasausbeuten der Pferdemist-Futterrüben-Mischsilagen. Aufgrund klarer Vorteile der Zuckerrübe sind in den folgenden Umschling-Stufen nur noch Zuckerrübenmischungen weiterverfolgt worden, die im Labormaßstab mit nur 350 kg Rüben auf 1 t Pferdemist Gaserträge bis annähernd 80% der Referenz-Mais-GPS erzielen. Von der Screeningstufe 3 (Potenzialabschätzung der Gaserträge im Kolbentest, vgl. Abb. 9) bis zur Upscalingstufe 3 (Validierung in Praxisbiogasanlagen) ergaben sich zum Teil stark unterschiedliche Ergebnisse. Die Gaserträge vergleichbarer Pferdemist-Zuckerrüben-Silagen aus dem Praxisbetrieb (Fahrsilo) erbrachten im Labortest höhere Gaserträge als die Laborsilagen. Ebenfalls streuen die Messergebnisse im Vergleich verschiedener Versuchsläufe und Messmethoden. Besonders die Messung der Methanerträge im kontinuierlichen Biogastest im Labor für Bioverfahrenstechnik an der Ostfalia – Hochschule für angewandte Wissenschaften in Wolfenbüttel hat sich als unerwartet problematisch erwiesen. Der Gärprozess führt hier zu einer unkontrollierten Schaumentwicklung, so dass der Versuch mit der reinen Pferdemist-Zuckerrübensilage vorzeitig eingestellt werden musste. Erst mit einer Beimischung von 70% Mais-GPS konnte die vorgegebene Versuchsdauer mit quasi-kontinuierlicher Beschickung durchgeführt werden.

Tabelle 4: Inhaltsstoffe, pH sowie Gaserträge von Mischsilagen aus Pferdemist mit Zucker- oder Futterrübe

<b>Pferdemist-ZR/-FR-Silagen</b>							
<b>Probe</b>	<b>kg Rüben pro t<sub>Mist</sub></b>	<b>TS %</b>	<b>Asche % (Anteil TS)</b>	<b>pH (Einstich)</b>	<b>Gesamtgas GKT (mlN/goTS)</b>	<b>Mittelwert Gesamtgas- ertrag</b>	<b>StAbw Gesamtgas- ertrag</b>
Pferdemist-ZR-Silage	350	24,9	16,8	4,6	537,0	569,1	32,3
		22,2	16,0	3,7	601,5		
		24,1	15,8	4,0	568,6		
Pferdemist-FR-Silage	480	21,9	21,1	3,5	419,2	506,4	76,2
		23,8	15,9	4,2	539,5		
		27,2	15,6	4,9	560,4		
Mais-GPS		39,9	3,3		780,7	780,7	

Ein Teil der Varianz im Vergleich der verschiedenen Upscaling-Stufen lässt sich mit den verschiedenen eingesetzten Beimpfungspräparaten erklären. Dies wird ersichtlich aus Tab. 5. Danach hat nicht nur die Herstellungsmethode der Mischsilagen einen Einfluss (Laborsilage vs. Fahrsilo), sondern auch die mikrobielle Zusammensetzung bzw. Aktivität der vorhandenen Organismen einen Einfluss.

Tabelle 5: Inhaltsstoffe, pH sowie Gaserträge von Silagen aus Pferdemist und Mischsilagen mit Zuckerrüben in Abhängigkeit verschiedener Beimpfungspräparate im Vergleich Laborsilage/Praxissilage

<b>Pferdemist-ZR-Silagen (Praxismaßstab/Labormaßstab) mit verschiedenen Inokuli</b>							
<b>Probe + verwendetes Inokulum</b>	<b>kg<sub>ZR</sub> pro t<sub>Mist</sub></b>	<b>TS %</b>	<b>Asche % (Anteil TS)</b>	<b>pH</b>	<b>Gesamtgas GKT (mIN/goTS)</b>	<b>Mittelwert Gesamtgas-ertrag</b>	<b>StAbw Gesamtgas-ertrag</b>
Separatormaterial + Pferdemist-Silage (Laborsilage)	0	30,2 27,1	20,0 20,1	4,2 4,2	386,3 422,9 301,7	370,3	62,1
Separatormaterial + ZR-Pferdemist-Silage (Praxisbetrieb)	350	30,5 33,7	15,0 15,4	3,6 3,4	551,1 564,1 565,3	560,2	7,9
Separatormaterial + ZR-Pferdemistsilage (Laborsilage)	350	32,5 30,2	16,0 16,3	3,7 3,3	468,3 488,3 476,4	477,7	10,1
Separatormaterial + Maissilage		36,0 34,4	3,7 3,7	3,0 3,6	753,5 679,5 705,8	712,9	37,5
Nachgärermaterial + Pferdemist-Silage (Laborsilage)	0	30,2 27,1	20,0 20,1	4,2 4,2	423,3 392,0 416,8	410,7	16,5
Nachgärermaterial + ZR-Pferdemist-Silage (Praxisbetrieb)	350	30,5 33,7	15,0 15,4	3,6 3,4	577,2 586,2 658,8	607,4	44,7
Nachgärermaterial + ZR-Pferdemistsilage (Laborsilage)	350	32,5 30,2	16,0 16,3	3,7 3,3	452,1 486,8 519,0	485,9	33,5
Nachgärermaterial + Maissilage		36,0 34,4	3,7 3,7	3,0 3,6	760,9 735,0 767,2	754,4	17,0
Impf Schlamm + Pferdemist-Silage (Laborsilage)	0	30,2 27,1	20,0 20,1	4,2 4,2	238,2 345,6 318,9	300,9	55,9
Impf Schlamm + ZR-Pferdemist-Silage (Praxisbetrieb)	350	30,5 33,7	15,0 15,4	3,6 3,4	597,4 579,4	588,4	12,7
Impf Schlamm + ZR-Pferdemistsilage (Laborsilage)	350	32,5 30,2	16,0 16,3	3,7 3,3	424,9 414,8 413,6	417,7	6,2
Impf Schlamm + Maissilage		36,0 34,4	3,7 3,7	3,0 3,6	658,4 652,3 660,0	656,9	4,1

Gemessen an der Leistung der Referenz-Mais-GPS (= 100%) erzielt die schlechteste Variante (Laborsilage, Inokulum aus Soest) 63% der Biogasleistung, die beste (Praxissilage, Nachgärermaterial) 87%. Die Aufwertung des Pferdemistes durch Zusatz von 350 kg Zuckerrüben je Tonne Pferdemist erweist sich damit in jedem Fall als wirkungsvoll. Silagen aus Pferdemist ohne Zuckerrüben zwischen 36,3 und 56,1% der jeweiligen Mais-GPS-Referenz.

Mit dem **Upscaling der Versuche** (Upscalingstufe 3, Praxisbiogasanlage) wurde die Firma Abel ReTec beauftragt. Als Versuchsbetrieb ist die Biogasanlage Mammendorf im Landkreis Fürstfeldbruck ausgewählt worden. Die NAWARO-Anlage mit Bioerdgaseinspeisung in das Erdgasnetz wurde 2012 in Betrieb genommen. Die installierte Leistung beträgt 450 Nm<sup>3</sup>/h Biomethan und 400 kW elektrisch über ein installiertes Blockheizkraftwerk. Die Substratzusammensetzung ist von Beginn an heterogen zusammengesetzt (Gras-, Mais-, Grünroggen-GPS, Zwischenfrüchte & Wirtschaftsdünger), weshalb sich diese Anlage für die Erprobung neuer Substratkomponenten besonders eignet. Wie sich im quasi-kontinuierlichen Laborversuch an der Ostfalia Hochschule in Wolfenbüttel gezeigt hat (Upscaling Stufe 2), sollten die Pferdemistsilagen nicht mehr als 30% der Gesamtration ausmachen. Für die Silagen im Praxismaßstab ist Pferdemist zusammen mit Zuckerrüben in einem Fahrsilo konserviert und im folgenden Frühjahr in der der Biogasanlage neben Silomais, Grassilage und Getreide-GPS mit einem Anteil von 20% am Substratmix eingesetzt worden und hat gegenüber dem Substratmix vor Versuchsbeginn zuvor hauptsächlich Mais, etwas Getreide-GPS und vorgerotteten Pferdemist substituiert. Während der mehrwöchigen Phase des Pferdemistsilageneinsatzes traten keine Veränderungen hinsichtlich Menge und Qualität bei der Gasgestehung auf. Auch hinsichtlich der physiologischen Prozessstabilität konnten weder positive noch negative Veränderungen registriert werden.

Ein Unterschied gegenüber der bisherigen Verfütterung von angerottetem Pferdemist ergibt sich aber daraus, dass zuvor teils nicht aufgelöste Strohfasern, welche immer wieder zu mechanischen Problemen bei der Futterzuführung geführt haben, hierdurch verringert werden. Diesem positiven Einfluss steht aber der Fremdbesatz mit Steinen infolge der eingebrachten Rüben entgegen.

#### 1.2.4 Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes von Zwischenfrüchten

Der Anbau von Zwischenfrüchten für die Biogasnutzung ist bereits in der Praxis weit verbreitet. Vor allem Getreide-GPS, Futtergräser oder Leguminosen-Grasgemenge als Winterzwischenfrucht können gegebenenfalls nach kurzen Vorwelkezeiten auch über Silierung haltbar gemacht werden. Ziel dieses Teilprojektes war es, die Nachteile niedriger TS-Gehalte von Zwischenfrüchten durch Co-Silierung mit Stroharten aufzuheben, da eine Vortrocknung auf dem Acker zu den Erntebedingungen im Herbst zu Verschmutzungen und Atmungsverlusten führen kann. Zudem wären im Falle eines Bedarfes mehrmaligen Wendens Bröckelverluste sowie eine stärkere Verdichtung des Bodens durch die häufigen Überfahrten wahrscheinlich. Zur Biogaseignung von Sommerzwischenfrüchten wurden in der Vergangenheit zahlreiche Anbauversuche durchgeführt. Das gemeinsame Silieren von Sommerzwischenfrüchten mit Stroh führt teilweise zu leicht erhöhten, teilweise zu niedrigeren Biogasmengen im Vergleich zur reinen Zwischenfruchtsilage. Die in Abb. 13 und Tab. 6 dargestellten Ergebnisse der Zwischenfruchtsilagen und Zwischenfrucht-/Weizenstrohsilagen erreichen relativ zur Mais-GPS zwischen 57,4 und 73,1 % der Gasmenge.

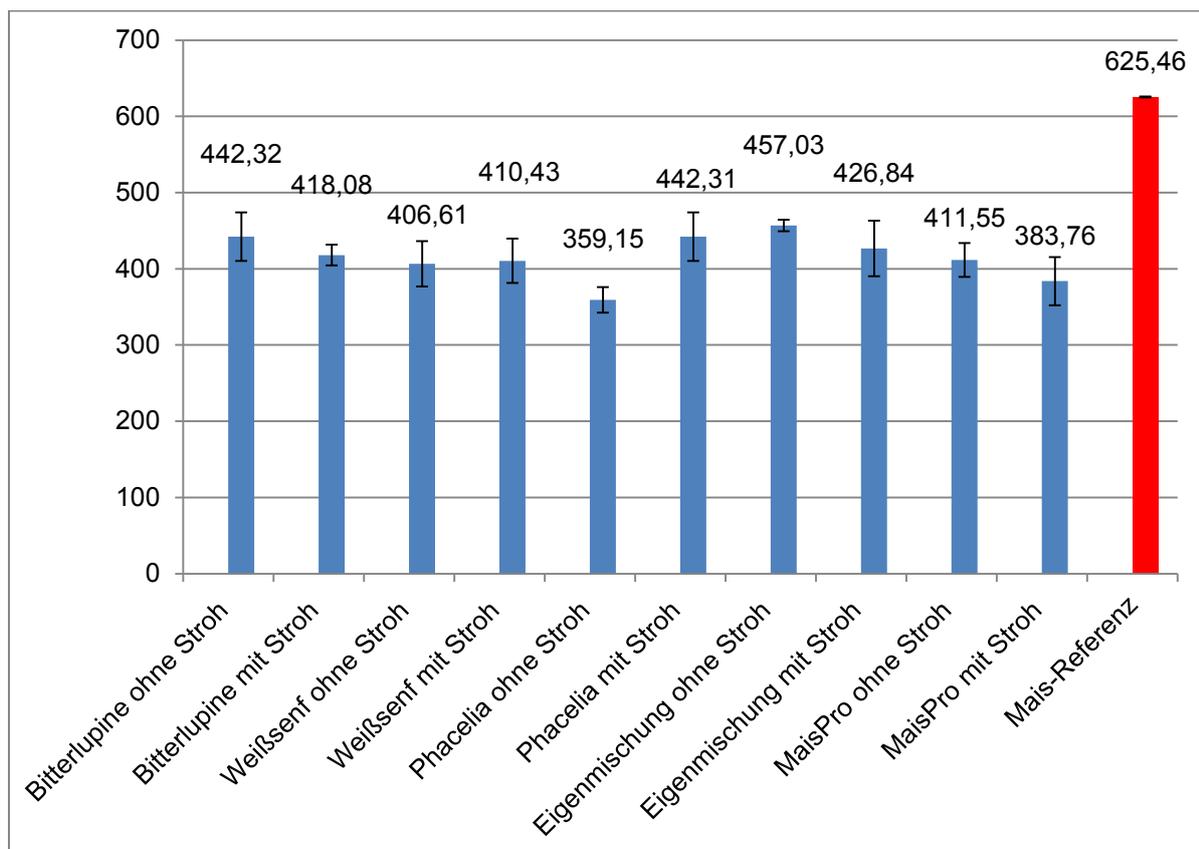


Abbildung 13: Gesamtgaserträge im Vorversuch Wintergerstenstroh und Zwischenfrüchte

Mischung MaisPro: Felderbse, Winterroggen, Sorghum, Phacelia, Inkarnatklee, Öllein, Perserklee, Schwedenklee, Leindotter, Rammtilkkraut, Sonnenblume; Eigenmischung: Ackerbohne, Sommerwicke, Hafer- je 33,3%)

Von diesen Vorversuchen ermutigt, wurden 2017 erneute Versuche mit Zwischenfrucht-/Strohsilagen durchgeführt. Es wurden zusätzliche feldfeuchte Sommerzwischenfrüchte mit Weizenstroh vermischt. Wie zuvor wurde das jeweilige Mischungsverhältnis so gewählt, dass das Siliergut in der Mischung einen für die Silierung optimalen TS-Gehalt von 33-35% TS aufwies (vgl. Tab. 7). Die im Labor gemessenen Gaserträge liegen hier zwar mit Werten zwischen 485 und 588 mlN/goTS sogar etwas höher als im Vorversuch mit Gerstenstroh, allerdings sind die relativen Gaserträge im Vergleich zur Mais-GPS auf vergleichbarem Niveau (vgl. Abb. 7). Dabei ist jedoch zu beachten, dass sich die Gasmengen auf die oTS beziehen, die bei den Zwischenfrüchten aufgrund von Aschegehalten zwischen 9,4 und 12% TS (Tab. 6) zusätzlich deutlich niedriger liegen als bei Silomais (Referenzsilage 4 % Asche). Dies ist offenbar der Verschmutzung geschuldet die, trotz Sorgfalt bei der Ernte (Freischneider), durch den Kontakt mit Bodenmaterial aufgetreten ist.

Tabelle 6: pH, Inhaltsstoffe und Gasmenge verschiedener Gerstenstroh-Zwischenfruchtmischsilagen

Probe	TS %	Asche % (Anteil TS)	pH	Cellulose (Masse-%)	Hemi- cellulosen (Masse- %)	ADL (Masse- %)	Gesamtgas GKT (mlN/goTS)	Mittelwert Gesamtgas- ertrag	StAbw Gesamtgas- ertrag
Kleegras frisch + Gerstenstroh	33,8	9,6	5,2	38,2	23,9	6,0	588,9	553,9	49,5
			5,2	40,6	25,5	6,2	518,8		
			5,2	43,1	23,9	6,3			
Gelbsenf + Gerstenstroh	33,4	9,4	5,0	42,5	24,3	7,1	484,8	485,8	1,4
			5,0	43,4	24,1	7,3	486,8		
			5,0	42,9	20,9	6,4			
ZWH 4021 Vitalis Plus + Gerstenstroh	32,6	10,2	5,0	39,9	23,8	6,0	540,0	542,3	3,3
			5,0	39,1	22,9	5,7	544,6		
			5,0	38,4	20,0	5,1			
Sommerwicke frisch + Gerstenstroh	33,3	9,6	6,0	41,9	24,6	7,2	551,1	523,3	39,4
			6,0	41,3	24,4	7,2	495,4		
			6,0	38,8	22,5	11,3			
Progreen GM2 + Gerstenstroh	33,8	10,2	4,8	40,0	24,1	6,2	527,3	526,6	0,9
			4,8	39,2	19,8	5,6	526,0		
Kleegras angewelkt + Gerstenstroh	31,3	12,0	5,3	40,6	21,8	4,3	573,7	560,9	18,1
			5,3	38,9	21,6	5,1	548,1		
Sommerwicke angewelkt + Gerstenstroh	31,5	9,9	6,2	36,1	19,4	5,8	540,4	539,3	1,6
			6,2	37,2	21,3	5,7	538,2		
Mais-GPS							858,2	909,8	62,0
							978,6		
							892,6		

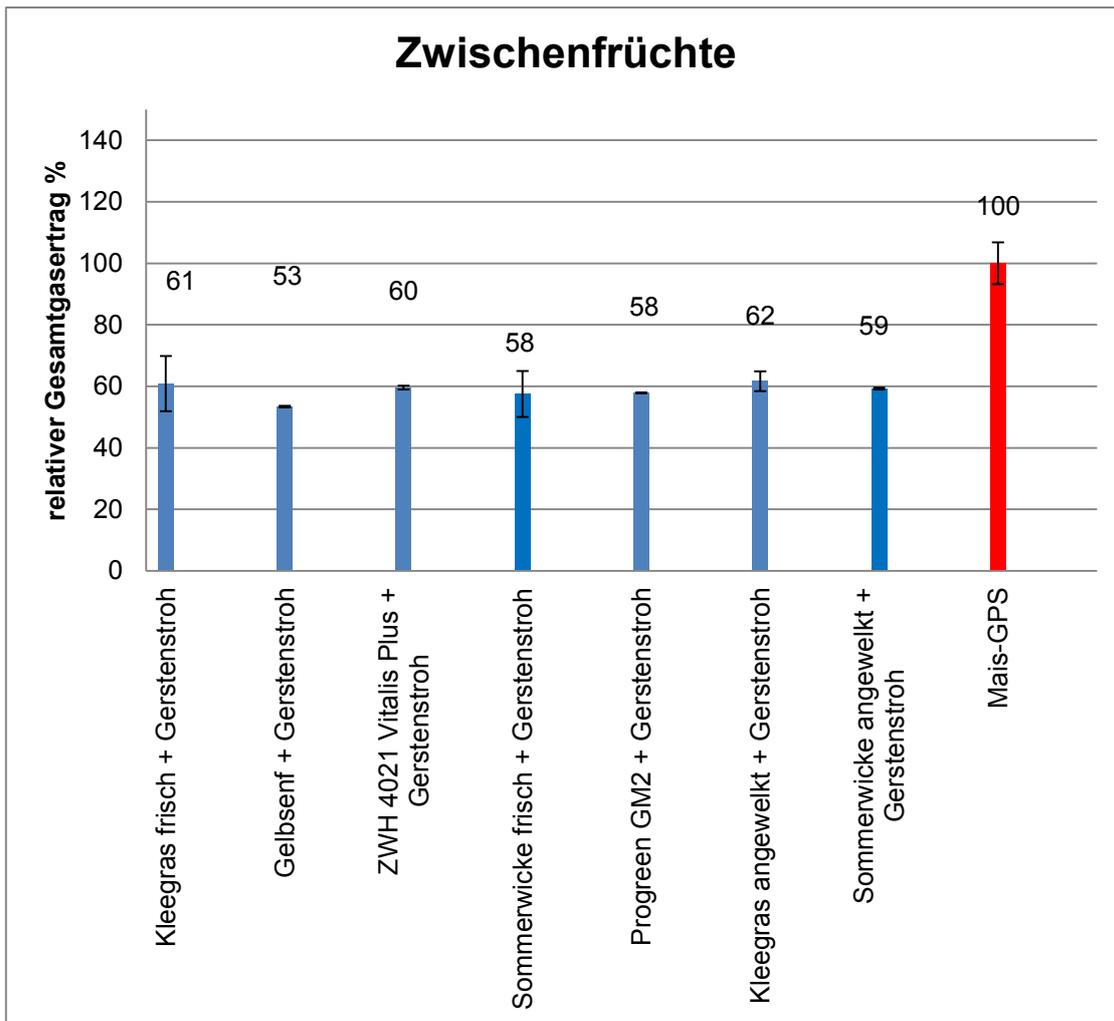


Abbildung 14: Gaserträge (auf Basis der oTS) von Mischsilagen aus Gerstenstroh mit verschiedenen Zwischenfrüchten relativ zur Mais-GPS (=100%)

Da Sommerzwischenfrüchte, die definitionsgemäß vor Winter geerntet werden, nicht als Greeningmaßnahme geltend gemacht werden können, da zu diesem Zweck angemeldete Bestände nicht vor dem 16. Februar geerntet werden dürfen, sollten in einem weiteren Versuch nicht abgefrorene und zuvor nicht gemulchte Sommerzwischenfrüchte nach dem 15. Februar geerntet und siliert werden. Aufgrund in der Soester Börde ausbleibender Fröste in den Wintern 2014/2015 und 2015/2016 waren im Februar mehrere Sommerzwischenfruchtbestände noch mit nennenswerter Biomasse ausgestattet. Nach dem 15. Februar sind verschiedene Zwischenfruchtarten, wie Ramtilkraut und Ölrettich nur noch mit geringer abgestorbener Biomasse vertreten, Weißer Senf zeigte sich 2016 jedoch als standfest (vgl. Abb. 15). Die Ernte und die Silierung sind offenbar jedoch schwierig. Die Silagen dieser Bestände waren stark verschmutzt, und der pH-Wert lag nach dem Öffnen der Silagen zum Teil über 6. Alle der geprüften Silagen wurden nach den DLG-Bewertungsschlüssel für Grobfutter (Sinnenprüfung) mit mangelhaft bewertet und nicht als Gärsubstrat für die Biogasanlage infrage kamen. Im Februar 2017 und 2018 konnte der

Versuch nicht wiederholt werden, da mehrere Frostereignisse die Zwischenfruchtbestände abfrieren lassen haben.



Abbildung 15: Weißer Senf am 16. Februar 2016 (Bild: Dennis Gilhaus)

### **1.2.5 Untersuchung des Lignocellulose-Voraufschlusses durch Silieren**

Das gemeinsame Silieren von relativ leicht abbaubaren nassen Substraten und verschiedener Stroharten soll nicht nur die Herstellung idealer TS-Gehalte für die Silierung der Mischungen ermöglichen, sondern auch zu einem Voraufschluss der Lignocellulose und zu verbesserten physikalischen Eigenschaften des silierten Strohs im Vergleich zu trockenen Stroharten führen.

Tatsächlich kann die Veränderung der Zusammensetzung und Struktur der Rohfaserbestandteile festgestellt werden. Abb. 16 zeigt eine Elektronenmikroskopaufnahme von den Zellen von Gerstenstrohproben die ohne den Zusatz eines weiteren Substrates (lediglich mit Leitungswasser auf die Ziel-TS 30 bis 35 % eingestellt) jeweils vor und nach dem Silieren. Vor dem Silieren (linkes Foto) sind die vom Häckseln durchtrennten Stellen an den äußeren Bereichen mechanisch ausgefranst, die Zellwände im Inneren sind aber noch sehr kompakt und gleichmäßig. Nach dem Silieren werden bei gleicher Vergrößerung und optischer Auflösung im Inneren der Zellwerde aufgelockerte und zum Teil aufgelöste Strukturen erkennbar. Im oberen Bildbereich sind parallel angeordnete Cellulosefibrillen mit deutlichen Abständen zwischen einzelnen Strängen erkennbar. Insgesamt wirken die Zellwände weniger kompakt und sind stärker transparent.

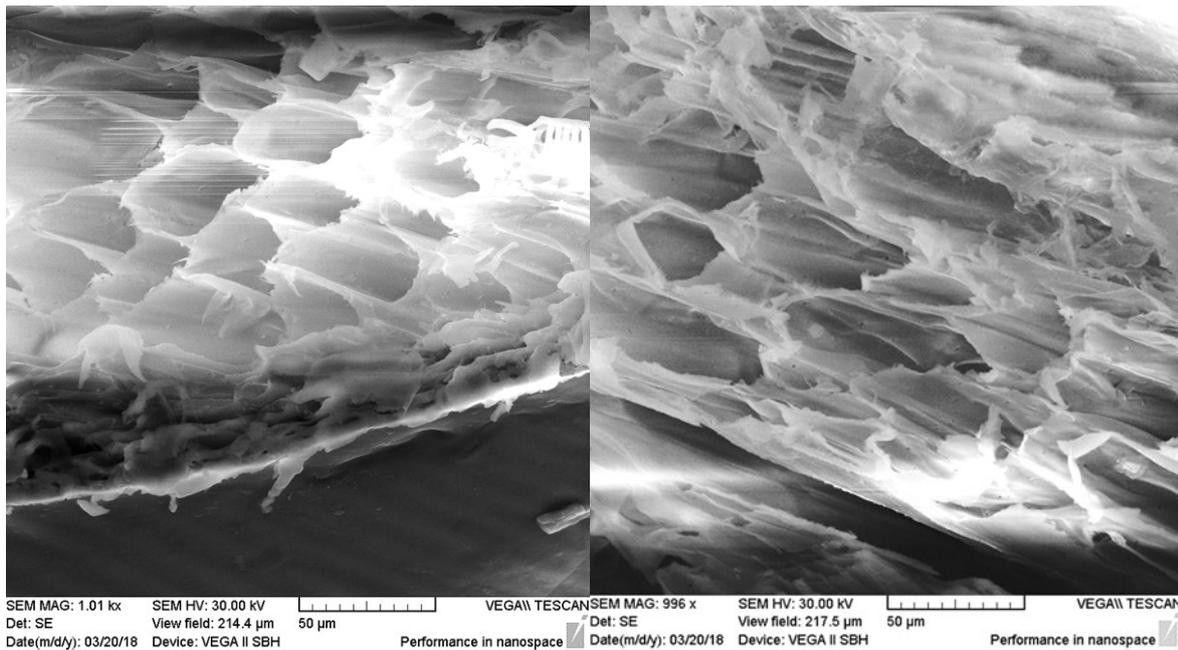
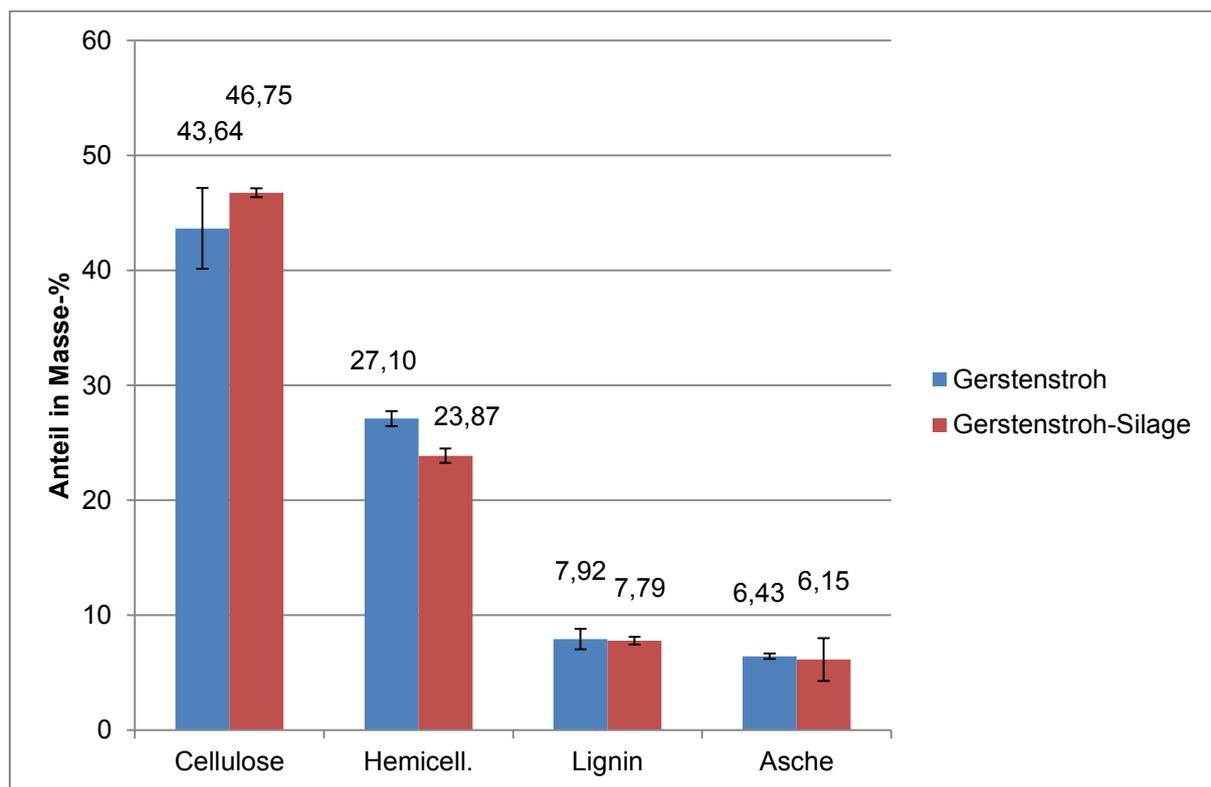


Abbildung 16: Gerstenstroh vor (links) und nach der Silierung (rechts), Vergrößerung x1000



Verhältnis	Lignin : Hemicellulose	Lignin : Cellulose	Hemicellulose : Rohasche
Vor Silieren	1 : 3,4	1 : 5,5	4,2 : 1
Nach Silieren	1 : 3,0	1 : 6,0	3,9 : 1

Abbildung 17: Rohfaserbestandteile Gerstenstroh vor (blau) und nach der Silierung (rot)

Anhand der Veränderungen der Gerüstsubstanzbestandteile und deren Verhältnis zueinander lässt sich zusätzlich auf einen gewissen Voraufschluss der Rohfaser schließen. Als Maßstab kann dabei Lignin dienen, das unter anaeroben Bedingungen als praktisch nicht abbaubar gilt oder Rohasche, die generell nicht biologisch abbaubar ist. Die in Abb. 17 dargestellte Ligninkonzentration wie auch der Rohaschegehalt hat sich durch das Silieren des Gerstenstrohs erwartungsgemäß nicht verändert, während die Hemicellulosegehalte nach Silieren nur noch 88% des Ausgangswertes betragen.

Ein Teil der Hemicellulosen werden wahrscheinlich während der Silierung hydrolytisch in wasserlösliche Kohlenhydrate und schließlich in organische Säuren überführt. Dadurch erreichen die pH-Werte der Strohsilagen auch von anderen Stroharten, trotz geringer Gehalte an wasserlöslichen Kohlenhydraten im Ausgangsmaterial pH-Werte im sauren Bereich. Dies ist bei Silagen von Gerstenstroh, das vor dem Silieren lediglich mit Leitungswasser befeuchtet wurde, zu beobachten und wird noch deutlicher bei Weizen- und Körnermaisstroh (vgl. Tab 7).

Tabelle 7: TS-Gehalte und pH-Werte verschiedener Stroharten nach Befeuchten mit Leitungswasser und anschließendem Silieren

Probe	TS %	pH
Körnermaisstroh (TS 35%)	33,0	4,8
	31,3	4,4
	27,7	4,5
Körnermaisstroh (TS 25%)	28,8	4,0
	23,7	3,7
	22,1	4,2
0-Variante Rapsstroh	36,7	5,2
	34,5	5,3
	36,9	5,4
0-Variante Gerstenstroh	25,3	5,4
	35,5	5,5
	34,2	5,4
0-Variante Weizenstroh	33,5	3,8
	33,2	3,5
	33,6	3,7

Die sensorische Prüfung aller im Projekt hergestellter Stroh- und Strohmis-Silagen ergibt (DLG-Grobfutterbewertung, vgl. Anhangtabelle A1), dass die Oberflächen zwar keine

übermäßige Veränderung der Oberflächenstruktur aufweisen (Ausnahme kompostartige Struktur und starker Schimmelbefall bei den im Februar geernteten Greening-Zwischenfrüchten), jedoch deutet die elektronenmikroskopische Betrachtung eindeutig auf eine Auflockerung der ehemals kompakten Zellwandstruktur an. Wasserabweisende Substanzen (Wachs, Cutin, etc.), wie sie beim unsilierten Getreide makroskopisch und sensorisch leicht zu erkennen sind, haben sich in der Silage nahezu völlig aufgelöst. Die Pflanzenpartikel sind augenscheinlich vollständig von Gärssaft durchtränkt. Konsistenz und Feuchtgewicht der Partikel aller Stroharten, insbesondere der Maisstrohvarianten ähneln optisch und haptisch denen von Mais-GPS-Bestandteilen.

### **1.3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung**

#### **1.3.1 Einleitung**

Die in diesem Projekt betrachteten Substrate und Substratgemische wurden unter Laborbedingungen untersucht. Das für die meisten Versuchsreihen verwendete Laborreaktorvolumen von 100ml erfordert eine feine Vermahlung und gute Vermischung der Substrate, was eine wesentliche Abweichung zur Verwendung der Substrate unter Produktionsbedingungen darstellt. Auch wenn die Streuung der Messwerte innerhalb der Messreihen erfreulich niedrig ist, illustrieren die Unterschiede der Gaserträge der als Kontrolle gemessenen Maisganzpflanzensilagen zwischen den Versuchsreihen mit einer Spannbreite von 630,08 bis 909,8  $\text{ml}_\text{N}/\text{g}_{\text{OTS}}$ , dass die Gaserträge nicht unwesentlich von zahlreichen Betriebsfaktoren abhängen, unter anderem auch von den Startpopulationen der eingesetzten Impfschlämme. Aus diesen Messergebnissen belastbare ökonomische Aussagen zu treffen ist bei einer Skalierung vom Grammaßstab auf Hektarerträge denkbar schwierig. Aus diesem Grund sind die errechneten Werte bestenfalls als Orientierungswerte und als Anhaltspunkte für weitergehende Untersuchungen zu verstehen.

Die durch zahlreiche Betriebsparameter bestimmten Variationen in Ertrag und Wirtschaftlichkeit von Anbausystemen sind weithin bekannt. Für die Betrachtungen wurde, soweit in Literaturdaten vorhanden, mit einer Schlaggröße von 5 ha bei einer Feld-Hofentfernung von 2 km gerechnet. Standen bei Literaturwerten Daten zu unterschiedliche Ertragslagen zur Verfügung, so wurden Werte zu mittlerem Ertrag verwendet. Bei der Ermittlung der Verfahrenskosten aus dem KTBL-Feldarbeitsrechner wurde ein mittlerer Bodenbearbeitungswiderstand parametrisiert. Maschinierungsvarianten wurden im sinnvollen Rahmen gemittelt.

Zur Orientierung wurden spezifische Substratkosten von gängigen Hauptsubstraten auf Basis der Daten aus der KTBL-Publikation „Faustzahlen Biogas“ von 2013 errechnet. Diese

Daten liegen für Schlaggrößen von 2 ha und 20 ha bei Feldentfernungen von 2 km respektive 5 km vor. Der in diesen Daten eingerechnete Pachtansatz liegt in einer Höhe von 261 €/ha. Dies liegt deutlich unter den heute üblichen Pachten, die sich im Bereich von 350 – 400 €/ah bewegen (Pachtspiegel NRW). Mit dem Ziel, eine Vergleichbarkeit zu den genannten Literaturdaten herzustellen, wurde in den Deckungsbeitragsrechnungen mit einem Pachtansatz von ebenfalls 261 €/ha gerechnet.

Die skizzierten Variationsbreiten der Messwerte und Betriebsparameter zeigen, dass belastbare Aussagen zur Wirtschaftlichkeit nur eine einzelbetriebliche Berechnung leisten kann, bei der Parameter wie Schlaggrößen, Feld-Hof Entfernungen sowie Feld-BGA- bzw. Hof-BGA-Entfernungen, Bodenwertzahlen, Eigenmechanisierung und andere Betriebsparameter genauer bekannt sind.

### 1.3.2 Basisdaten Hauptsubstrate

Die Kennzahlen für die Basisdaten in dieser ökonomischen Betrachtung wurden dem vom KTBL herausgegebenen „Faustzahlen Biogas“ entnommen (Döhler et al., 2013).

Tabelle 8: Gemittelte Vollkosten der Energiepflanzenerzeugung (n jew. = 6). Es wurde von einer Schlaggröße von 2 ha ausgegangen, das Ertragsniveau errechnete sich aus jeweils 3 Varianten mit mittlerem und 3 Varianten mit niedrigem Ertrag

<b>Vollkosten Energiepflanzenerzeugung für Biogasanlagen mit gängigen Hauptsubstraten</b>			
nach: KTBL Faustzahlen Biogas 3. Auflage 2013 S. 111 ff.			
<b>Annahme:</b> el. Wirkungsgrad 38 %			
Energiepflanze	Ertragsniveau	Vollkosten ha	Vollkosten FM
	tFM/ha	€/ha	€/tFM
Ackergräser und Leguminosengrasgemenge	40,00	1672	55,73
CCM	14,05	1276	106,33
Silomais	50,00	1553	38,83
Zuckerrüben	65,00	1745	31,73
Wintertriticale GPS	40,00	1200	40
Dauergrünland	31,57	1155	50,88

### 1.3.3 Greening und Maisdeckel

Mit der Novelle 2014 der Direktzahlungen-Durchführungsverordnung (DirektZahlDurchfV) haben sich die Anforderungen bezüglich Anbaudiversifizierung und ökologischen Vorrangflächen verändert. Für die Anbaudiversifizierung sind die Regelungen je nach bewirtschafteter Fläche differenziert, für kleinere Betriebe (10 – 30 ha) werden mindestens zwei Fruchtfolgeglieder gefordert, von größeren Betrieben (> 30 ha) mindestens drei

Fruchtfolgeglieder. Es gibt Ausnahmen für Klein- und Ökobetriebe. Der Anteil der dominanten Hauptfrucht darf 75% in beiden Varianten nicht überschreiten. Möchte ein Betrieb den sogenannten „Greeningbonus“ in der Höhe von derzeit 87€/ha wahrnehmen, so müssen Betriebe mit einer Fläche von über 15 ha mindestens 5% ökologische Vorrangflächen nachweisen. Diese Flächen können auf unterschiedliche Art und Weise gestaltet werden, von Pufferstreifen über Brachen bis hin zum Anbau von Zwischenfrüchten. Letztere können für die Produktion von Biogassubstrat potentiell interessant sein, werden aber nur mit einem Faktor von 0.3 angerechnet. Zum Nachweis von einem Hektar öVF müssen also drei Hektar Zwischenfrucht nach bestimmten Regeln angebaut werden. Die Regeln beziehen sich auf sog. „Greening-fähige“ Mischungen von zugelassenen Zwischenfrüchten sowie auf den Aussaatzeitpunkt und der frühesten Nutzung des Aufwuchses.

Eine weitere Veränderung der gesetzgeberischen Regularien findet sich in der 2017 in Kraft getretenen Novelle des Erneuerbare-Energie-Gesetzes (EEG 2017). Der bereits seit 2014 wirksame sogenannte „Maisdeckel“ wird in den kommenden Jahren schrittweise verschärft werden. Der seit EEG 2014 definierte Maisdeckel beschränkt die Einsatzmengen von Mais und Getreidekorn in Biogasanlagen auf maximal 60%. Ausgenommen von dieser Regelung sind Maisstroh und Getreideganzpflanzensilagen (Getreide-GPS). Mit der EEG Novelle von 2017 wird die maximale Substratmenge, die unter diese Definition fällt, bis 2023 in zwei Schritten von 50% auf 44% abgesenkt.

Erkennbar wird es von gesetzgeberischer Seite Druck auf die Biogasanlagenbetreiber ausgeübt, nicht ausschließlich den wirtschaftlich attraktiven Silomais anzubauen. Zur Erfüllung der Anbaudiversifizierung ist zu erwarten, dass die Landwirte zusätzlich zum Silomais auf inzwischen als wirtschaftlich tragfähig anerkannte Fruchtfolgekombinationen mit Getreide-GPS zurückgreifen (Niehoff 2017, LWK Niedersachsen, Webcode: 01032763), hier zeigt sich insbesondere die Fruchtfolge Silomais-Grünroggen als interessant. Weiterhin sind zur Substitution des Silomais als Hauptfrucht andere, wirtschaftlich wenig benachteiligte Hauptsubstrate zu nennen, wie zum Beispiel das Riesenweizengras (Szarvazi) oder die Durchwachsene Silphie. Mit der Nutzung dieser Feldfrüchte als Ergänzung oder Substitution sind aber die Anforderungen bzgl. der ökologischen Vorrangflächen (ÖVF) nicht erfüllt. Zur Erfüllung dieser kann der Zwischenfruchtanbau beitragen. Dieser wird regelkonform wegen der Erntezeitpunkte mit dem spät räumenden Silomais schwierig zu realisieren sein. Mit den früh räumenden Getreiden ist es allerdings zu schaffen, so dass in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung Getreide als Hauptfrucht (Weizen, Gerste oder unabhängig davon auch Raps) mit Strohbergung und Kosilierung mit der Zwischenfrucht im folgenden Frühjahr eine wirtschaftlich interessante Variante sein kann. Damit können alle drei genannten rechtlichen Rahmenbedingungen erfüllt werden.

Mit Maisstroh, welches nicht dem sogenannten Maisdeckel unterliegt, Rapsstroh und Rübenblättern, existieren bisher nicht oder wenig genutzte Biomasseströme, die zur Einhaltung des verschärften Maisdeckels genutzt werden können. Auch Zucker- oder Futterrüben können zu diesem Zwecke eingesetzt werden. Als weiterer Reststoffström wurde im Projekt Pferdemit untersucht und bewertet.

#### Anbauszenarien

1. Substitution von Silomais durch Weizen oder Gerste. Einzelbetrachtung.
2. Substitution Silomais durch Weizen oder Gerste und zusätzlich Zwischenfruchtanbau. Zusatzkosten sind Aufnahme und Lagerung des Strohs. Zwischenfruchtanbau nach Greeningverordnung und Mahd zwischen 15. Feb. bis zur Aussaat der Folgekultur Silomais. Ko-Silierung des Strohs mit den feuchten Zwischenfrüchten.
3. Einzelsilierung von Maisstroh.
4. Ko-Silierung von Körnermaisstroh mit Zuckerrüben bzw. Zuckerrübenblättern. Tatsächlich dieses beides statt Silomais anzubauen ist effektiv nicht sinnvoll. Die Qualitätsanforderungen an den Boden sind recht hoch. Der Anbau erfordert zudem nicht immer vorhandene Erntetechnik und die Erntezeitpunkte liegen so weit hinten, dass die Fruchtfolge unklar wird. Eine Möglichkeit könnte hier der Einkauf von Körnermaisstroh und Zuckerrüben(blättern) sein. Um überhaupt eine (wenn auch nicht vergleichende) Aussage treffen zu können, erfolgte die Betrachtung ohne Markt.
5. Einzelsilierung von Rapsstroh ist eine Zusatzeinnahmequelle für den Rapsproduzenten. Es besteht jedoch möglicherweise Produktkonkurrenz zu Einstreu in Pferdehaltung.
6. Ko-Silierung von Rapsstroh mit Zuckerrübe. Zuckerrübe wurde dabei als Kostenposition betrachtet (d.h. Zukauf statt Anbau, siehe Pkt. 4). Die Kostendaten stammen aus Richtwerte-Deckungsbeitrag 2017.
7. Pferdemit als Substratersatz. Keine Substratkosten, nur Abholung, aber effektive Verfügbarkeit ist fraglich.

Im Folgenden werden die einzelnen Substrate und Substratmischungen detaillierter diskutiert und bewertet.

### 1.3.4 Betrachtung Gerstenstroh

Im Projekt wurden zu unterschiedlichen Zeitpunkten Monosilagen aus Gerstenstroh gemessen. Das Stroh wurde zur Vorbehandlung zerkleinert und unter Zugabe von Wasser, zur Justierung der Trockenmassegehalts, silierfähig gemacht. Die gemessenen Gesamtgaserträge streuten stark (373,02; 571,11; 410,27; 396,5; 368,39 Nm<sup>3</sup>/kg oTS), liegen aber insgesamt deutlich über den in der Literatur angegebenen 200 – 250 Nm<sup>3</sup>/kg oTS (Reinhold 2018). Zu den Messwerten ist zu bemerken, dass in den Silomaiskontrollen in allen Versuchsreihen ein durchschnittlicher Wert von ca. 741,8 Nm<sup>3</sup>/kg oTS gemessen wurde. Die Strohsilage ist hier somit im Bereich von ca. 57% des Silomaises angesiedelt.

Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurden die Gasertragswerte 373,02 Nm<sup>3</sup>/kg oTS und 571,11 Nm<sup>3</sup>/kg oTS verwendet. Zur Berechnung wurden die Boden- und Saatbettbereitungskosten dem Hauptprodukt, dem Kornertrag, zugeschlagen, so dass auf der Kostenseite für das Stroh Bergungs- und Ballierungskosten, Transport, Zerkleinerung und Silage berücksichtigt wurden. Für den Kornertrag wurde bei einem angenommenen Ertrag von 80 dt/ha angelehnt an die Richtwerte Deckungsbeiträge 2017 (Schindler 2017) ein Deckungsbeitrag inkl. Lohnansatz von 387,45 €/ha ermittelt.

Der spezifische Substratpreis errechnete sich zu 6,4 ct/kWh el. bzw. 3,8 ct/kWh el. (86% TS, 93% oTS, 50% Methangehalt, 38% el. Wirkungsgrad, 10% Strombedarf für Zerkleinerung). Der höhere Substratkostenwert deckt sich mit Literaturangaben für Stroh als Substrat (5-6ct/kWh Reinhold 2018). Positiv zu bewerten sind die niedrigen spezifischen Substratkosten unterhalb von vier Cent.

Die Methangesamtmenge pro Hektar errechnet sich zu 972 Nm<sup>3</sup>/ha bzw. 1656 Nm<sup>3</sup>/ha, was im Vergleich zum Silomais (Annahme 5000 Nm<sup>3</sup>/ha) ein Substitutionspotential von 5:1 bis 3:1 ergibt. Dies liegt deutlich höher als das Substitutionspotential für Stroh ohne Silierung, das Graf et al. (Graf 2014) mit ca. 1:6 errechnen. In Nordrhein-Westfalen wurden 2017 138,4 kha Wintergerste angebaut und bei einem mittleren Ertrag von 7,41 t/ha eine Gesamtmenge Gerstenkorn von 1,025 mio t produziert (Destastis 2017). Im selben Jahr wurden in NRW auf 182,8 ha Silo- und Grünmais angebaut. Es ergibt sich zumindest rechnerisch ein erhebliches Substitutionspotential. Die Realisierung dessen wird aber je nach Erntelage und genereller Strohnachfrage von Jahr zu Jahr unterschiedlich ausfallen.

Dem früh räumenden Getreide kann eine Zwischenfrucht folgen, dessen Aufwuchs gegebenenfalls ebenfalls für die Biogasanlage verwendet werden kann. Diese Fruchtfolge kann unter Berücksichtigung der Anforderungen aus Anbaudiversifizierung und Greeningregularien Anreiz für eine tatsächliche, und nicht nur rechnerische, Substitution durch den Landwirt bieten.

### **1.3.5 Betrachtung Weizenstroh**

Das Vorgehen Winterweizenstroh entsprach dem für Wintergerste. Die gemessenen Gesamtgaserträge betragen im Mittel  $455,73 \text{ Nm}^3/\text{kg oTS}$  mit einer geringen Standardabweichung von 5.6. Auch sie liegen deutlich über den in der Literatur angegebenen Werten zu unsiliertem Weizenstroh mit  $387 - 441 \text{ Nm}^3/\text{kg oTS}$  (LFL Bayern, 2018; Torben Bonde, persönliche Mitteilung). Die Strohsilage ist hier somit im Bereich von ca. 61% des Silomaises angesiedelt.

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung entsprach derjenigen von Gerstenstroh, angenommenen wurde Weizen nach Getreidevorfrucht mit einem Ertrag von 80 dt/ha angelehnt an die Richtwerte Deckungsbeiträge 2017 (Schindler 2017) ein Deckungsbeitrag inkl. Lohnansatz von 405,41 €/ha ermittelt.

Der spezifische Substratpreis errechnete sich zu 6,25 ct/kWh el. (86% TS, 95% oTS, 50% Methangehalt, 38% el. Wirkungsgrad, 10% Strombedarf für Zerkleinerung). Der höhere Substratkostenwert deckt sich mit Literaturangaben für Stroh als Substrat (5-6ct/kWh Reinhold 2018).

Die Methangesamtmenge pro Hektar errechnet sich zu  $1338 \text{ Nm}^3/\text{ha}$ , im Vergleich zum Silomais (Annahme  $5000 \text{ Nm}^3/\text{ha}$ ) somit ein Substitutionspotential von 3,7:1.

### **1.3.6 Betrachtung Zwischenfrüchte**

Die in den Versuchen gemessenen Gaserträge der Zwischenfrüchte Weißsenf, Phacelia, Bitterlupine, Klee gras, Gelb senf, Sommerwicke sowie die einer Eigenmischung und die von drei kommerziell erhältlichen Zwischenfruchtmischungen (MaisPro, ZWH 4021 Vitalis Plus sowie Pregreen GM2) liegen bei Monovergärung im Vergleich zur Referenz, dem Silomais, mit 406, 360, 442, 553, 485, 523 sowie 460 (für die Eigenmischung), des weiteren 411, 542 und  $526 \text{ Nm}^3/\text{t oTS}$  insgesamt auf einem niedrigen Niveau (ca. 50-60% des Mais). Der Siliererfolg bei Monosilage war wegen zu geringer Trockensubstanzanteile von hohen Sickersaftverlusten mit deutlicher Gefahr von Fehlgärung geprägt. Durch Ko-Silierung mit Stroh wurde nur bei Phacelia der Gasertrag deutlich erhöht, von ca. 360 auf  $440 \text{ Nm}^3/\text{t oTS}$ , bei allen anderen Substraten blieb der Gasertrag gleich oder verschlechterte sich leicht. Durch die Ko-Silierung können allerdings die niedrigen Trockensubstanzgehalte, die zwischen 9,85% und 17,3% liegen, erhöht, und auf ein Niveau gebracht werden, dass einen Silageerfolg verspricht und Sickersaftverluste vermindert.

Der Methangehalt konnte aufgrund technischer Schwierigkeiten im Projekt nur für wenige Probengemische bestimmt werden, nicht jedoch für die Zwischenfrüchte, so dass bei für die

Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen von einem geschätzten Methangehalt von 55% ausgegangen wurde.

Interessant ist bei den Mischsilagen von Sommerwicke, dass durch das vorherige Anwelken der Zwischenfrucht der Gasertrag um 3 % von 523 auf 539 Nm<sup>3</sup>/t oTS erhöht werden konnte.

Die Flächenerträge für Zwischenfrüchte liegen je nach Anbausorte und Datenquelle zwischen 25 und 50 dt/ha TM, also deutlich unterhalb der erzielbaren Trockenmasseerträge für Mais-GPS (140-200dt/h TM bei 35%TS). Dementsprechend ist mit einer alleinigen Wirtschaftlichkeit von Zwischenfrüchten durch eine Verwertung in der BGA nicht zu rechnen. Hauptfunktionen des Zwischenfruchtanbaus sind Bodenverbesserung, Erosionsschutz, Vermeidung von Verunkrautung sowie die Zwischenspeicherung von Nährstoffen zur Vermeidung von Auswaschungen zwischen den Hauptkulturen. Der Anbau einer Zwischenfrucht kann zudem aus Pflanzenschutzgründen erfolgen, wie zum Beispiel bei der Bekämpfung der Rübenzystennematode *Heterodera schachtii* im Zuckerrüben- und Futterrübenanbau.

Eine weitere Funktion des Zwischenfruchtanbaus kann die Erfüllung der Greeningverpflichtung sein, die nach der aktuellen Fassung der Düngeverordnung (DüV) für Betriebe über 10 ha Ackerfläche besteht. Die Rahmenbedingungen des Greenings durch Zwischenfruchtanbau sind allerdings klar erkennbar so gestaltet, dass die stoffliche Nutzung des Aufwuchses ungewollt ist. Kivelitz (2017a) berichtet, dass einem Positionspapier des Bundesamtes für Naturschutz (BfN) sowie des Umweltbundesamtes und der Kommission Landwirtschaft am Umweltbundesamt (KLU und UBA) von 2014 zufolge die Auffassung vertreten wurde, dass der Zwischenfruchtanbau bereits unter die Aufrechterhaltung des guten landwirtschaftlichen und ökologischen Zustands fällt, Cross-Compliancerelevant, und somit durch die Basisprämie bereits abgegolten sei. Auf Nachfrage äußert die Landwirtschaftskammer NRW (persönliche Kommunikation mit Herrn Bracht am 06.06.2018), dass eine Novelle der Greeningregularien innerhalb der kommenden Jahre wahrscheinlich sei. Die Einbeziehung des Greeningbonus in die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung spiegelt deshalb eine Momentaufnahme wieder, deren Aussagekraft in den kommenden Jahren nach den jeweils geltenden Regularien bestimmt sein wird.

Die Aussaat einer Zwischenfruchtmischung, die gewisse Anforderungen bzgl. Ihrer Zusammensetzung erfüllen muss, muss vor dem 5. September erfolgen. Dieser Zeitpunkt kann auf Antrag auf den 1. Oktober verlagert werden. Der Aufwuchs darf nicht vor dem 15. Februar des Folgejahres geerntet werden. Ein Folgeanbau nach der Getreideernte und Ernte

der Zwischenfrucht im Spätherbst desselben Jahres erfüllt nicht die Voraussetzungen der Regularien und bedeutet einen Verlust der Greeningprämie (derzeit 87 €/ha), sofern nicht regelgerecht eine zweite Zwischenfrucht folgt. Die Vordüngung der Zwischenfrucht mit Gärrest ist nach geltenden Regeln erlaubt, so dass der durch Entnahme der Biomasse entstehende Nährstoffverlust kompensiert werden kann. Erlaubte Ausbringungszeiten sind jedoch zu berücksichtigen. Von einer Gärrestausrückführung im Herbst wird allerdings zur Vermeidung von Düngekraftverlust abgeraten (Möller et.al 2009).

Durch die Überwinterung wird je nach Witterungsbedingungen ein Großteil der Biomasse nicht sinnvoll zu bergen sein. Es ist ja gerade ein Vorteil von vielen zur Gründüngung verwendeten Pflanzenarten, dass diese über den Winter sicher abfrieren und ohne weitere Bearbeitung desintegrieren und zum Humusbildungsprozess beitragen. Es bleibt abzuwarten, ob sich im Laufe der Zeit Greeningmischungen herauskristallisieren, die einen im Frühjahr sinnvoll zu verwertenden Biomasseertrag versprechen.

Für die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit wurden Ertragsdaten aus der Literatur verwendet. Die tatsächlichen Flächenerträge werden mit hoher Wahrscheinlichkeit unterhalb der Literaturwerte liegen. In der Praxis wird ein Landwirt also individuell nach Witterung, Stärke des Winters und Bestandsabschätzung im Februar entscheiden, ob sich eine Ernte des Aufwuchses lohnt.

Die Anbaukosten der Zwischenfrucht werden bei dieser Betrachtung der Hauptfunktion des Zwischenfruchtanbaus zugeschlagen. Lediglich die zusätzlichen Ernte- und Lagerungskosten, die Ausbringung von Gärrest zur Kompensation der entfallenen Düngewirkung durch Entnahme der Biomasse, sowie die Silagekosten werden den spezifischen Substratkosten zugeordnet, jeweils inklusive der Arbeitserledigungskosten. Bedingt durch die niedrigen Flächenerträge und die geringen Gaserträge ergibt sich für Weißsenf ein spezifischer Substratkostenpreis vor BGA in der Größenordnung von ca. 14,5 bis 15,2 ct/kWh el. Und für Phacelia ein Substratkostenpreis von ca. 16,5-17,4 ct/kWh. Diese Substrate sind nicht wirtschaftlich zu nutzen. Für Bitterlupine errechnen sich die spezifischen Substratkosten bei leicht höheren Flächenerträgen und etwas besserem Gasertrag zu 11,4 bis 12,0 ct/kWh el.. Auch mit diesen Substratkosten wird ein wirtschaftlicher Betrieb kaum möglich sein.

Bezieht man den Greeningbonus von 87€/ha ausschließlich zur rechnerischen Verringerung der spezifischen Substratkosten ein, so ergeben sich durchaus interessante Werte: 6,4 – 7,2 ct/kWh el. Für Weißsenf, 7,3 bis 8,2 ct/kWh el. für Phacelia und 5,0 bis 5,6 ct/kWh el. für Bitterlupine. Wegen der geringen Erntemengen und Gaserträge bleibt das

Substitutionspotential für Silomais durch Zwischenfrüchte dennoch deutlich begrenzt. Es fehlt dem Biogaslandwirt auch bei diesen optimistisch gerechneten Substratkosten einfach an Substratsubstanz.

Durch Zumischung von Stroh können die Siliereigenschaften verbessert und so die durch den geringen Trockensubstanzgehalt der Zwischenfrüchte verursachten Sickersaftverlust eliminiert werden. Die für die Einstellung einer guten Silage benötigte Menge an Stroh, für 25t Frischmasse Zwischenfrucht wären ca. 5t Stroh benötigt, passt in der Größenordnung gut zu der mit der Wintergerste erzeugten Menge Stroh (Bohlmann Schäfer 2015). Mit der Strohzugabe ging aber gleichzeitig eine Verringerung der Gaserträge einher, so dass auch von solchen Mischungen eine Wirtschaftlichkeit nicht zu erwarten ist.

Eine Verwendung von Zwischenfrüchten zur Biogaserzeugung wird also lediglich in seltenen Ausnahmefällen, zum Beispiel zur Erfüllung der Maisdeckelaufgaben unter leichten wirtschaftlichen Verlusten, für den Landwirt interessant sein. Fraglich ist, ob dafür eine mehrmonatige Lagerung des im Sommer des Vorjahres produzierten Strohs sowie die aufwändige Kosilierung Sinn machen, oder ob es für den Landwirt weniger aufwändig ist, gegebenenfalls den Aufwuchs der Zwischenfruchtflächen unmittelbar der Biogasanlage zuzuführen.

### **1.3.7 Betrachtung Zuckerrübe und Rübenblätter**

Zuckerrüben und Futterrüben sind aufgrund ihres hohen Massewachstums und wegen des sehr gut vergärbaren Zuckergehalts attraktive Biogassubstrate. Dies gilt für die Rübe sowie mit leichten Abschlägen auch für deren Köpfe und Blätter als landwirtschaftliche Nebenprodukte. Grundsätzliche Schwierigkeiten stellen bei der Nutzung als Biogassubstrat die Erdanhaftungen sowie die begrenzte Lagerfähigkeit des Materials dar (FNR 2013). Die Erdanhaftungen werden durch Waschung am Feldrand direkt nach der Ernte entfernt, was zusätzliche Kosten erzeugt. Eine generelle Wirtschaftlichkeit ist dennoch gegeben (Schindler 2017). Mit zunehmender Nutzung der Rüben für die Biogasproduktion hat sich ein kompletter Technikzweig zur Verarbeitung dieses Rohstoffs entwickelt (Schaffner 2011). Die Ernte der Rübenblätter ist zwar technisch ausgereift, wegen der zusätzlichen Arbeitsaufwände, der verringerten Schlagkraft für die Rübenernte und der Investitionen in Blattbergebander nur für größere Schläge sinnvoll. Erntekosten werden dann mit ca. 80€/ha angegeben. Der hohe Wassergehalt von ca. 85% schränkt die Transportwürdigkeit allerdings deutlich ein (ebd.).

Die Lagerung der Rüben ist, egal in welcher Form, als ganze Rüben in Miete, als Hackschnitzel oder als Brei in Lagunen von deutlichen Lagerverlusten geprägt. „Über einen längeren Zeitraum lassen sich die Rüben nur in Form einer Silage sicher lagern. Zudem

bietet die silierte Rübe ein deutlich höheres Methanertragspotenzial als die frische Rübe" (Weißbach 2009).

Im Projekt wurden die getesteten Substrate mit Zuckerrüben und Futterrüben sowie deren Blättern kosiliert und die Gaserträge der Mischungen gemessen. Durch die Kosilage wird die Lagerproblematik der Rüben verbessert, und deren Lagerverluste bzw. Silageverluste reduziert oder eliminiert.

In mehreren Versuchen war der Gasertrag der Mischungen höher als die Summe der Gaserträge der Monosilagen. Diese Mischungen sind wirtschaftlich natürlich besonders interessant. Es ist dabei eine Frage der Perspektive, ob die Situation aus Sicht eines Silomaislandwirts mit Biogasanlage betrachtet wird, der den Anteil an Mais in seinem Substrat reduzieren und mit anderen Materialien substituieren möchte, oder ob sie aus Sicht eines Energierübenlandwirts betrachtet wird, der die Lagerfähigkeit seines Substrats verbessern möchte, und nebenbei durch den beschriebenen Effekt den Gasertrag erhöht.

In der Praxis wird ein Landwirt, der als Hauptfrucht Silomais anbaut, nicht anfangen, auf Teilflächen selbst Rüben anzubauen. Dazu fehlt in der Regel die Erntetechnik und Anbauerfahrung. Zur Vereinfachung der Rechnung wurden daher die Substratkosten für Energierüben aus der Deckungsbeitragsrechnung der Richtwert-Deckungsbeiträge 2017 inklusive Lohnansatz errechnet und als Kostenpunkt berücksichtigt.

### **1.3.8 Betrachtung Maisstroh**

Maisstroh fällt bei der Ernte von Körnermais- und Corn-Cob-Mix (CCM) zur Produktion für Fütterungszwecke an (Kaltschmitt 2016). Dieses Stroh verbleibt bisher beim Drusch gehäckselt verteilt auf dem Feld, wo es Humus bildet und Nährstoffe zurückführt. Da das Stroh nicht unter den sogenannten „Maisdeckel“ fällt (§39h EEG 2017), wird es auch als Substrat für Biogasanlagen interessant. Erste Untersuchungen des Gasbildungspotentials des Maisstrohs haben bereits positive Ergebnisse gezeigt (Thurner 2017) weitere Ergebnisse werden in naher Zukunft aus einem laufenden Projekt der LfL Bayern erwartet (Burger 2017).

Bei einem Korn-Stroh-Verhältnis von 1:1,3 (Kaltschmitt 2016) und einem mittleren Kornertrag von 10,3 t/ha/a (Mittelwert Gesamtdeutschland; Destatis 2017) ergibt sich eine theoretische Maisstrohmenge 13,39 t/ha/a. Da das Maisstroh in anderen Ländern, z.B. Polen und Russland, bereits seit längerer Zeit als Einstreu oder als Zuschlagstoff in der Braunkohleverbrennung attraktiv ist, wurde von den Landgeräteherstellern in den letzten Jahren entsprechende Erntetechnik entwickelt. Fa. Geringhoff hat bisher ca. 50 Zusatzgeräte zur Ernte des Maisstrohs für die von ihnen vertriebenen Maispflücker in diese Länder

vertrieben (Interview Fa. Geringhoff 7.6.2018). Derzeit sind insgesamt vier unterschiedliche Verfahren zur Maisstrohernte bekannt. Die Verfahren können in einstufige, zweistufige und dreistufige Verfahren unterschieden werden, bei denen die mehrstufigen mehrere Überfahrten erfordern. Dennoch ist nicht automatisch das einstufige Verfahren am attraktivsten, denn durch die Bergung des Strohs wird die Schlagkraft der Erntetechnik stark verringert, die Erntedauer deutlich erhöht, so dass die in der Regel vom Lohnunternehmer eingesetzte Maschinerie länger auf dem Feld bleiben muss. Untersuchungen des LfL Bayern zu den Ernteverfahren zeigten, dass ca. 50% des Strohs (4,6 t – 6,3 t) sinnvoll geborgen werden können (Böhrnsen 2017). Im Rahmen einer Bachelorarbeit an der FH Südwestfalen in Soest wurden geringere Bergungsverluste gemessen, was auf Optimierungspotential hinweist.

In Messungen von Maisstroh in Monosilage bei Trockensubstanzgehalten der Silage von 35% und 25% wurden Gesamtgaserträge 503,0 und 469,1 ml<sub>N</sub>/g<sub>OTS</sub> gemessen. Zu erkennen ist, dass die Silage mit höherem Wassergehalt einen niedrigeren Gesamtgasertrag liefert. Die Silage mit einem TS-Gehalt von 35% siliert also besser und liefert bessere Erträge. Aus diesen Werten errechnen sich auf die potentielle elektrische Energie bezogene spezifische Substratkosten von 8,4 bzw. 5,7 ct/kWh el..

Mit dem erzeugbaren Methanertrag pro Hektar von 835 Nm<sup>3</sup>/ha/a ergibt sich ein Substitutionsverhältnis von 6:1, das heißt unter der Annahme eines mittleren Methanertrags für Silomais von 5000 Nm<sup>3</sup>/ha/a kann das Stroh von sechs Hektar Körnermais oder CCM-Produktion einen Hektar Silomais ersetzen.

In DESTATIS 2017 ist die Anbaufläche von Körnermais und CCM nicht explizit ausgewiesen. Mit diesen Werten kann das theoretische Substitutionspotential für NRW abgeschätzt werden.

Bei der Mischung mit Zuckerrübe, muss die schlechte Silierbarkeit von Maisstroh (und Stroh allgemein) wegen der geringen Verpressbarkeit betrachtet werden. Diese wird durch Häckselung zwar verbessert, jedoch mit Kosilage mit Zuckerrüben noch weiter optimiert. Die schlechten Silageeigenschaften der Einzelsubstrate heben sich nicht nur gegeneinander auf, sondern der Gasertrag liefert auch noch mehr als die Summe seiner Teile.

Grundsätzliche Aussagen in Stichworten

- Potenzial: beim Körnermaisdrusch fallen jährlich rund 3,8 Mio.t TM Maisstroh an. Im Vergleich dazu 14 Mio.t TM Silomais. (FNR 2017)

- Laut Literatur (Burger 2018, Thurner 2017) ist die Bergung von Maisstroh eine Herausforderung in der Prozesskette. Bei Fahrsiloversuch in Soest geringere Bergungsverluste gemessen von Fa. Gehringhoff neue Erntetechnik (niedriger Schnitt und Ablage im Schwad) zur Bergung von Maisstroh beim Drusch. Fazit: Durch Verringerung der Bergungsverluste kann die Effizienz der Maisstrohnutzung deutlich erhöht werden.
- „Über drei Jahre ergab sich kein signifikanter Unterschied bei der Schwadleistung der drei untersuchten Verfahren. So konnten vom vorhandenen Körnermaisstrohpotential (im Mittel der drei Jahre 107 dt TM/ha) durchschnittlich 57 % oder 61 dt TM/ha auf Schwad gelegt werden. Bei der Bergung mittels Pick-up ergaben sich weitere Verluste in Höhe von im Mittel 8 dt TM/ha, so dass am Ende durchschnittlich rund 51 % des vorhandenen Körnermaisstrohs mit den getesteten Verfahren geerntet werden konnten.“  
Ackerbau – technische Lösungen für die Zukunft, Landtechnische Jahrestagung 2017, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL),
- "Methanausbeuten LfL Labor bei ca. 300-330 L/kg oTM. Das ist ca. 80%-90% der Methanausbeute von Silomais
- Methanertrag Maisstroh liegt über den Methanertrag anderer Energiepflanzen. Methanhektarertrag Maisstroh liegt bei ca. 1.500 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/ha. Das sind ca. 21% vom Silomais.
- Ergo: Durch Maisstrohnutzung von einen ha Körnermais können 0,2 – 0,25 ha Silomais ersetzt werden.

Fazit: Verbesserung der Bergungssituation erhöht diesen Wert.

Die Kombination Körnermais/Maisstroh mit Zuckerrüben/Zuckerrübenblättern macht Sinn.

- Ergebnisse aus dem Fahrsilo unterstützen die Laborergebnisse
- Zerkleinerung (Häckseln) kann bei der Verdichtung helfen.

Aspekte aus Düngeverordnung (DüV, 2017): Ausbringung von Gärresten bereits ab Oktober begrenzt. Daher bei Körnermaisernte keine organische Düngergabe, die helfen würde, das Maisstroh auf dem Acker zu zersetzen. Durch Abfuhr des Maisstrohs wird der sog. Strohteppich vermieden (Thurner, 2018)

- Annahme: Landwirt hat bisher Silomais angebaut, muss aber nun wg. Maisdeckel die Menge verringern. Substitution voraussichtlich mit alternativen Hauptsubstraten, die ähnliche Vorzüglichkeit haben, durchwachsende Silphie, Sawazi1 (Riesenweizengras), statt durch Körnermais oder Zuckerrüben. Letztere erfordern eine komplett andere, viel teurere Erntetechnik.

### 1.3.9 Betrachtung Rapsstroh

Zur Erntezeit ist der Halm des Rapses in der Regel noch nicht vollständig abgestorben, so dass der Ernteschnitt beim Drusch durch die hohe Restfeuchte des Halms gefährdet wird. Je tiefer der Drusch erfolgt, umso langsamer muss gedroschen werden. Aus diesem Grund wird Raps relativ hoch gedroschen, so dass vergleichsweise viel Halm stehen bleibt. Oftmals folgt dem Drusch eine Mulchung, um diese Biomasse der Stoppel dem Acker zurückzuführen. Statt der Mulchung das stehende Rapsstroh klassisch mit dem Feldhäcksler zu beernten, macht wegen der geringen Mengen aber dennoch keinen Sinn. Es fallen zur Ernte von Rapsstroh also grundsätzlich zwei potentielle Ströme an, zum einen das beim Drusch entstehende Stroh, das auf Schwad gelegt und nachfolgend geborgen werden kann, zum anderen das nach dem Drusch stehende Stroh, das klassisch mit dem Feldhäcksler geborgen werden könnte. Für die Nutzung des ersteren Stroms wird das Stroh beim Drusch nicht gehäckselt und auf dem Feld verteilt, sondern vom Mähdröschler auf Schwad gelegt. Durch die relativ hochstehenden Stoppeln hat der Schwad keinen Bodenschluß und wird somit gut unterlüftet, was der Trocknung des Strohs zuträglich ist. Bei diesem Strohmaterial handelt es sich aber zum Teil um feine Fruchtstängel und abgedroschene Schoten, die aufgrund ihrer Feinheit oft unerreichbar für einen Pick-up zwischen den Stoppeln auf den Boden fallen. Dadurch liegt die Bergungsquote nur bei etwa 50 – 80% (Kaltschmidt 2016, S. 295).

Die theoretisch anfallende Erntemenge wurde bei einem angenommenen Kornertrag von 40 dt/ha und einem Korn-Stroh-Verhältnis von 2,9 auf 11,8 t/ha errechnet. Bei einer angenommenen Bergungsquote von 50% ergibt sich eine sinnvoll zu bergende Feuchtmasse von 5,8 t/ha. Das Stroh zur weiteren Trocknung auf dem Feld mit Kreiselzettwender zu verteilen und mit Zweikreiselzettwender zu schwaden würde auf der Verfahrenskostenseite 19€/ha Mehrkosten verursachen. Dabei ist jedoch wegen der Bröckeligkeit des Materials mit deutlichen zusätzlichen Bergungsverlusten zu rechnen, bei nur geringen Einsparungen beim Transport, so dass dieser Verfahrensschritt sowohl verfahrenstechnisch als auch ökonomisch keinen Sinn macht.

Die zusätzliche Nährstoffentnahme wurde rechnerisch mit zusätzlichen 15m<sup>3</sup> Gärrest bei der Düngung der Folgefrucht berücksichtigt, so dass der Ernte von 5,8 t Rapsstroh Kosten von 165,90€ inklusive Arbeitserledigungskosten gegenüberstehen (191,90 € wenn auf dem Feld getrocknet wird). Das Rapsstroh erzeugte bei Monosilage einen niedrigen Gasertrag von 284 Nm<sup>3</sup>/g oTS bei einer Spannweite von 269 – 299 Nm<sup>3</sup>/g oTS. Aufgrund der hohen Feuchte und des eher niedrigen oTS-Gehaltes von 84% - 86% (ARCHAEA) errechnen sich daraus spezifische Substratkosten von 13 ct/kWh (15 ct/kWh mit Feldtrocknung). Das Substrat ist somit nicht wirtschaftlich einsetzbar.

Aus dem gemessenen Gasertrag errechnet sich ein theoretisches Substitutionspotential von ca. 15:1. Mit dem Stroh von 15 Hektar Raps kann ein Hektar Silomais substituiert werden. Bei einer Anbaufläche in Nordrhein-Westfalen von 57,9 tausend Hektar und einem Kornertrag von 225,9 mio t errechnet sich ein theoretisches Substitutionspotential von knapp 4000 ha Silomais, bei einer Silomaisanbaufläche von 182,8 tausend Hektar (Destatis 2017).

Das theoretische Substitutionspotential wird aufgrund der geringen Erntemengen, der hohen Bergungsverluste und des durch den schlechten Gasertrag zu hohen spezifischen Substratpreises mit hoher Wahrscheinlichkeit in der Praxis nicht gehoben werden. Mit diesen Substratpreisen wird der BGA-Betreiber nicht kostendeckend arbeiten können, so dass das Rapsstroh, sofern es überhaupt geborgen wird, eher als Einstreu in der Pferdewirtschaft Verwendung finden wird.

Die Kosilage von Raps mit Zuckerrüben und Futterrüben resultierte erwartungsgemäß in höheren Gaserträgen, jedoch nicht wie bei der Kosilage von Maisstroh und Zuckerrüben in Gaserträgen, die über die rechnerische Summe der beiden Einzelsubstrate hinausgehen. Aus diesem Grund, und wegen der bereits beschriebenen negativen Faktoren bezüglich der Rapsstrohernte, wurde auf eine tiefergehende ökonomische Analyse der Kosilagen verzichtet.

### **1.3.10 Betrachtung Pferdemist**

Im Projekt wurde Pferdemist mit Zuckerrüben und Futterrüben kosiliert. Die gemessenen Gesamtgaserträge liegen mit 537,0 bis 601,6 Nm<sup>3</sup>/t oTS und einem Mittel von 569,1 Nm<sup>3</sup>/t oTS für Kosilage mit Zuckerrüben und 419,2 bis 560,4 Nm<sup>3</sup> mit einem Mittel von 506,4 Nm<sup>3</sup>/t oTS bei Kosilage mit Futterrüben bei ca. 73% bzw. 65% der parallel gemessenen Kontrolle mit Silomais. Diese Werte liegen nur unwesentlich über der 0-Variante Weizenstroh, die mit 455,7 Nm<sup>3</sup>/t oTS 62,7% der Kontrolle Silomais (727,0 Nm<sup>3</sup>/t oTS) erzielte.

Pferdemist fällt in der Pferdehaltung in stark unterschiedlichen Qualitäten und Mengen an. Die Qualität hängt nicht unwesentlich von der Art der Stallung ab. In klassischer Boxenhaltung wird Stroh als Einstreu genutzt, welches erfahrungsgemäß von den

Pferdehaltern vergleichsweise gemistet wird. Der so gewonnene Mist zeichnet sich also durch einen hohen Strohgehalt bei niedrigem Kot und Uringehalt aus. Werden als Einstreu Sägespäne verwendet, ist der erzeugte Mist wegen des hohen Ligningehalts für die Biogasanlage nicht zu verwenden. Ähnliches gilt abgeleitet aus den Messergebnissen für Rapsstroh voraussichtlich, wenn dieses als Einstreu verwendet wird. In der offenen Stallhaltung wird sehr wenig Einstreu eingesetzt, so dass der entstehende Mist fast vollständig aus Kot besteht. Inwiefern dieser Mist für die Ksilage mit Zuckerrüben oder Futterrüben geeignet ist, wurde im Projekt nicht untersucht. Literaturwerte für Pferdekot ohne Stroh weisen bei 28% TS-Gehalt und 75% oTS-Gehalt einen spezifischen Gasertrag von 300 Nm<sup>3</sup>/t oTS aus, was bei einem Methananteil von 55% einen Methangasertrag von 63 Nm<sup>3</sup> pro Tonne Input bedeutet (Döhler 2009).

In der Pferdehaltung ist derzeit ein Trend weg von der klassischen Haltung in der Box, hin zur offenen Stallhaltung zu beobachten (Heers 2018), so dass die Zahl der Stallungen mit potentiell für die BGA nutzbarem Pferdemist abnehmen wird. Zumindest im Bereich der Leistungspferdehaltung ist gegebenenfalls damit zu rechnen, dass die Pferde in Krankheitsfällen mit Antibiotika behandelt werden. Der dann entstehende Mist wäre gegebenenfalls für die Mikrobiologie der BGA abträglich, so dass auf einen Einsatz verzichtet werden sollte. Eine Trennung seitens der Stallung in unbehandelten Mist und Mist der potentiell mit Antibiotika belastet ist, ist aus organisatorischen Gründen als schwierig zu betrachten.

Die Entsorgung des Mists findet in der Regel auf eigenen landwirtschaftlichen Flächen statt, oder über die dem Hof umliegenden Landwirte, die den Mist in Absprache untereinander für den Stall kostenfrei abholen und ebenfalls auf die umliegenden Flächen aufbringen. Die Zahl der Pferdehaltungen, die gezwungen sind, den anfallenden Mist über Entsorger kostenpflichtig zu entsorgen, konnte im Projekt nicht ermittelt werden, wird aber sehr begrenzt sein. Diese Stallungen sind für eine Kooperation mit einem Biogasanlagenbetreiber sehr interessant, da bzgl. Der Entsorgungskosten eine Win-Win Situation entsteht. Generell aber wird der Pferdemist für den Biogasanlagenbetreiber „kostenlos ab Pferdehof“ zur Verfügung stehen, so dass die tatsächlich anfallenden Transportkosten von der Hof-Hof bzw. Hof-BGA Entfernung bestimmt sind. Wegen der stark unterschiedlichen Qualitäten und der damit verbundenen Unterschiede in den Gasbildungspotentialen sowie wegen der individuellen Hof-Hof Entfernungen wurde auf eine weitergehende ökonomische Untersuchung verzichtet. Belastbare ökonomische Aussagen kann für dieses Substrat nur eine Einzelfallbetrachtung liefern.

Der Mist wird in der Regel offen im Außenbereich gelagert, so dass bezüglich seines Gasbildungspotentials mit deutlichen Lagerverlusten gerechnet werden muss. Wegen der

nur geringen Mehrerträge im Gasbildungspotential bei Kossilage mit Rüben ist der Pferdemist an sich also nicht sonderlich attraktiv. Er kann aber je nach individueller Lage der Höfe zueinander als attraktive Silierhilfe für die Kossilage mit Rüben interpretiert werden, da es mittels des Pferdemist mit hohem TS-Gehalt gelingt, den niedrigen TS-Gehalt der Rüben auszugleichen und für gute Silier- und damit Lagerungsbedingungen zu sorgen. Die Lagerung von Rüben für die Verwendung in Biogasanlagen ist unabhängig von Lagerform, sei es als ganze Rübe am Feldrand oder gehäckselt oder gemust in Lagunen von deutlichen Lagerverlusten geprägt. Wenn mit einem naheliegenden Pferdehof die organisatorische Absprache getroffen werden kann, zur Rübenernte im Herbst des Jahres eine maximale Menge Pferdemist zur Verfügung zu stellen, kann dies der Lösung der Lagerproblematik für Zucker- und Futterrüben für die Energiegewinnung zuträglich sein.

### **1.3.11 Betrachtung Pachtkosten**

- Die Referenzkosten für die Hauptsubstrate aus KTBL Faustzahlen Biogas (Döhler 2013) sind mit einem Pachtansatz von 261€/ha/a gerechnet.
- Die tatsächlichen Pachtkosten liegen heute deutlich darüber. Der Pachtspiegel NRW gibt 350€/ha/a an.
- Aus Gründen der Vergleichbarkeit der Ko-Substrate mit den Literaturwerten der Hauptsubstrate wurde mit dem KTBL-Literaturwert von 261€/ha/a gerechnet.
- Gleiches gilt für die Gemeinkosten. Die wurden in (Döhler 2013) mit 100€/ha/a angesetzt.

### **Literatur**

Bonde, T.; 2017. Verpressen von Stroh zu Strohriketts, Biofuel Technology A/S, Vortrag auf Biogasfachtagung in Heiden, 30.08.2017

Böhrnsen, A., 2017. S.86, Neuer Erntevorsatz für den Maishäcksler. Profi Energie.Burger, T., Thurner, S., 2017 Biogas aus Körnermaisstroh - LfL [WWW Document]. Biogas aus Körnermaisstroh. URL <https://www.lfl.bayern.de/ilt/pflanzenbau/gruenland/169783/index.php> (accessed 7.13.18).

Destatis 2017 - Land- und Forstwirtschaft, Fischerei Wachstum und Ernte - Feldfrüchte - (No. 2030321172094), 2017. . Statistisches Bundesamt (Destatis).

Döhler, H. et al., Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (Eds.), 2013. Faustzahlen Biogas, 3. Ausg. ed. KTBL, Darmstadt.

Döhler, H. et al., Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (Eds.), 2009. Faustzahlen für die Landwirtschaft, 14. Auflage. ed. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. KTBL, Darmstadt.

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (Ed.), 2013. Leitfaden Biogas: von der Gewinnung zur Nutzung ; Bioenergie, 6., überarb. Aufl. ed, biogas.fnr.de. Gülzow-Prüzen.

Fleischhut, M., Thurner, S., Ostertag, J., Dr., Bauer, Alexander, Dr., Strobl, M., Schwarz, F., 2016. Körnermaisstroh als Biogassubstrat (Tagungsband), LfL-Information. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Bayern.

Graf, T., Reinhold, G., Hering, T., 2014. Thüringer Bioenergieprogramm 2014. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Erfurt.

Heers, Pia, wiss. Mit. FH-SWF, Pferdetrainerin und Reitlehrerin, Interview 13. Juni 2018

Kaltschmitt, M., Hartmann, H., Hofbauer, H. (Eds.), 2016. Energie aus Biomasse. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. doi:10.1007/978-3-662-47438-9

Kero, R., 2017. Zur Varianz der TS- und FoTS-Gehalte, Rohfaserzusammensetzung, pH-Werte, Gasausbeute und Temperatur in unterschiedlichen Entnahmeregionen bei Praxissilagen aus Zuckerrüben-Maisstroh-Gemengen als Biogassubstrat, Fachhochschule Südwestfalen - FB Agrarwirtschaft

Möller, K., Schulz, R., Müller, T., 2009. Mit Gärresten richtig Düngen - Aktuelle Informationen für Berater. Institut für Pflanzenernährung, Universität Hohenheim, Hohenheim.

Reinhold, G., 2018. Nutzung von Stroh in der BGA - Ein Gewinn für die Bodenfruchtbarkeit?

Schaffner, S., Wolf, G.D., Kawasch, M., n.d. Rüben als Biogassubstrat Überblick über Verfahrenswege zu Transport, Aufbereitung und Lagerung (No. Nr. II – 17/2011). Biogas Forum Bayern“.

Schindler, M.D., Richtwert-Deckungsbeiträge 2017, Richtwert-Deckungsbeiträge. Landwirtschaftskammer Niedersachsen, Oldenburg.

Schmidt, W., Küpper, K., Rexroth, E., Wallbaum, C., 2000. Sommerzwischenfrüchte Ölrettich, Senf, Phacelia (Managementunterlage). Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, August-Böckstiegel-Straße 1, 01326 Dresden.

Thurner, S., Fleischhut, M., Eder, J., 2017. Verfahrenstechnik zum Einsatz von Körnermaisstroh in der Biogaserzeugung. Ackerbau-technische Lösungen für die Zukunft 51, Landtechnische Jahrestagung 2017

Weißbach, F., 2009. Das Gasbildungspotenzial von frischen und silierten Zuckerrüben bei der Biogasgewinnung. Landtechnik - Agricultural Engineering 64, 4. doi:10.15150/lt.2009.701

Gaserträge und Nährstoffgehalte - NawaRo, ARACHEA Service GmbH, URL: [https://www.archea-biogas.de/\\_mediafiles/10-substrate.pdf](https://www.archea-biogas.de/_mediafiles/10-substrate.pdf), abgerufen: 03.08.2018

## 1.4 Diskussion

### 1.4.1 Aufwertung lignocellulosereicher Koppelprodukte durch Silieren

Koppelprodukte aus der pflanzenbaulichen Produktion können bezüglich ihrer Inhaltsstoffe, Wassergehalte, Konservierungseignung und ihrer Verwendbarkeit als Biogassubstrat, Nutztierfutter oder organischer Dünger sowie ihrer Eignung als Einstreumaterial sowie ihren Eigenschaften für die Humusbildung und Nahrung für Bodenlebewesen äußerst unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. Es handelt sich um Pflanzen bzw. Pflanzenteile, deren Eigenschaften in der Geschichte des Ackerbaus und der Grünlandnutzung nicht gezielt durch Züchtung und pflanzenbauliches Management für mögliche Nutzungen optimiert wurden. Um Koppelprodukte in Deutschland flächendeckend als Substrat für Biogasbetriebe attraktiv zu machen, müssen technische, biologische und ökonomische Nachteile minimiert werden. Zudem müssen die Substrate in relevanten Mengen in modernen Fruchtfolgen verfügbar und logistisch erfassbar sein. Stroh von Getreidearten kann durch vorhandene Technik auf fast allen ackerbaulichen Betrieben erfasst werden und stellt nach dem DBFZ das flächenmäßig und mengenmäßig größte Substratpotential unter allen pflanzenbaulichen Koppelprodukten dar (DBFZ 2009). Getreidestroh besteht zu hohen Anteilen aus Zellen des Halmes, deren Verbund der Pflanze während der Entwicklung und Reife der Karyopsen Standfestigkeit und Schutz vor äußeren physikalischen und biologischen Einflüssen bieten. Dazu gehören mechanische Festigkeit, wasserabweisende Oberflächen, chemisch stabile Komponenten, die einem enzymatischen Abbau erschweren, sowie eine möglichst kompakte Bauweise der Zellwände, die wiederum eine möglichst geringe mikrobiell enzymatische Angriffsfläche bieten. Diese Eigenschaften machen Stroh nach der Ernte des Getreides zusammen mit TS-Gehalten nach Trocknung, die einen pilzlichen und bakteriellen Abbau weitgehend verhindern, über lange Zeit auch aerob haltbar (Summerell & Burgess 1989). Unter anaeroben Bedingungen kann der Abbau auch bei ausreichendem Wasserangebot für Mikroorganismen verzögert sein, weil Oxidationsprozesse generell erschwert werden und weil Lignin und lignifizierte Cellulose, Hemicellulose und Pektin anaerob praktisch nicht abbaubar sind. Hinzu kommt, dass Cellulose wie auch Hemicellulosen zwar aus prinzipiell aerob leicht abbaubaren Zuckermonomeren besteht, dass die  $\beta$ -1 $\rightarrow$ 4-glycosidische Bindung der D-Glucose der Cellulose jedoch schon für jedes einzelne Molekül gesehen enzymatisch schwer zu lösen ist. Der Hauptgrund für verminderte Abbaubarkeit bzw. für lange Verweilzeiten in anaeroben Lebensgemeinschaften, ist jedoch der Umstand, dass sich die Molekülketten zu parallel eng aneinandergereihten Mikrofibrillen zusammenlegen, die sich ihrerseits eng zu Fibrillen zusammenfügen. Diese quasi-kristalline Struktur der Cellulose verringert die Zugänglichkeit bzw. die reaktive Oberfläche für einen enzymatischen Angriff auf die Bindungen enorm (Kerley 1988). Die Ergebnisse zeigen, dass sich das Silieren als chemisch biologisches

Voraufschlussverfahren für lignocellulosereiche Substrate wie Stroh durchaus anbietet. Sowohl in der elektronenmikroskopischen Betrachtung als auch in der Analyse der Rohfaserbestandteile vor und nach der Silierung wird deutlich, dass sich die Struktur und Zusammensetzung verändert. Dabei werden offenbar Hemicellulosemoleküle hydrolytisch aufgespalten und die entstehenden Zucker im Folgenden durch Bakterien zu organischen Säuren vergoren. So lassen sich auch die niedrigen pH-Werte aller untersuchten Strohharten von Poaceae erklären. Obwohl des Getreidestroh, welchem lediglich Leitungswasser zur Erreichung der idealen TS-Gehalte zwischen 30 und 35% TS zugesetzt wurde, arm an wasserlöslichen Kohlenhydraten ist, die nach bisherigen Erkenntnissen und weitläufiger Lehrmeinung aber zwingende Voraussetzung für die Säurebildung sind, können reine Strohsilagen Werte bis unter pH 4 erreichen. Dafür sind jedoch nicht unerhebliche Mengen an wasserlöslichen Kohlenhydraten nötig, insbesondere, da die Rohaschegehalte des Strohs zwischen 7 und über 9 % Rohasche aufweisen, was auf das Vorhandensein puffernder Bodenbestandteile schließen lässt. Der Prozess der Vergärung von Zuckern aus der Hydrolyse von Hemicellulosen in der Silierphase und die sich daraus ergebenden positiven Wirkungen für die Nutzung in der Wiederkäuerfütterung bzw. in Biogasanlagen wird auch in der älteren (Dewar et al. 1963) als auch in der aktuellen Literatur (Teixeira Franco et al. 2018) beschrieben. Lignin und Cellulose werden demnach, wie auch in den eigenen Untersuchungen belegt, nicht umgesetzt und liegen vor und nach der Silierung in denselben Mengen vor, bzw. können bei meist nicht völlig vermeidbaren geringen Substanzverlusten während des Silierprozesses relativ in der Trockenmasse ansteigen. Für den Abbau von Cellulose in der Biogasanlage hat die Silierung des Strohs aber weitere Vorteile gegenüber dem Einsatz als trockenes Stroh. Die Silage verfügt im Gegensatz zum trockenen Stroh nicht mehr über wasserabweisende Substanzen, die die wachsende Pflanze zum Schutz vor Umwelteinflüssen und mikrobiellem Abbau gebildet hat. Die Zellwandstruktur ist voraufgeschlossen (Hydrolyse von in der Zellwand eingebetteten Hemicellulosen) und durch Silageflüssigkeit vollständig aufgequollen. Dadurch kann das vorvergorene Stroh, anders als das getrocknete schneller von hydrolytischen Bakterien auf einer größeren inneren Oberfläche besiedelt werden. Für die hydrolytische Spaltung der Cellulosekomplexe haben bestimmte *Clostridien*-Stämme, offenbar eine hohe Bedeutung, die besonders effizient unter thermophilen Bedingungen in der Biogasanlage Stoffwechsel betreiben (Köllmeier 2013). Technische Vorteile in Biogasanlagen dürfte die Silierung von Stroh auch über die Erhöhung des spezifischen Gewichtes im Vergleich zum trockenen Stroh haben. Die Wassergehalte, Haptik und Frischmasse der Strohsilagen kommen bei geeigneten Häcksellängen den Eigenschaften von Silomais- bzw. Getreide-GPS sehr nahe und die darauf in den meisten Biogasanlagen abgestimmte Technik kann die physikalisch ähnlichen Strohsilagen besser aufnehmen und verrühren als trockenes Stroh. Das Problem der Bildung von

Schwimmschichten bei der Verwertung von Stroh in Biogasanlagen dürfte damit gelöst sein. Leider konnte weder vor Projektstart, noch während der Projektphase ein Betrieb gefunden werden, der für eine Validierung durch Silierung von Stroh und Biogasnutzung reiner Strohsilage im Praxismaßstab zur Verfügung stand. Strohsilagen erbringen bezogen auf die oTS nur zwischen 38% (Rapsstroh) und 68% (Maisstroh) der Biogasleitung der Mais-GPS. Da für die meisten Betriebsleiter und Betriebsleiterinnen die Maximierung der Gaserträge ein wichtigeres Ziel ist als beispielsweise die Einsparung ackerbaulicher Produktionsfläche für Biogassubstrate, ist derzeit eine Aufwertung der Strohsilagen mit Zuckerrüben zur Erreichung vergleichbar hoher Gaserträge die attraktivere Option.

Als Voraufschlussverfahren von Getreidestroh hat sich das konventionelle Silieren im Vergleich zu anderen in der Literatur beschriebenen Verfahren als effizientes Low-Tech-Verfahren erwiesen. Andere Methoden sind in der Regel mit einer im Vergleich deutlich aufwändigeren zusätzlichen technischen Ausstattung und/oder mit der Beschaffung kostenintensiver Reagenzien (Säuren, Enzyme, etc.) verbunden. In Abb. 18 werden die im Projekt gemessenen Biogas- und Methanausbeuten nach Silierung von Gersten- und Weizenstroh den Größenordnungen der Werte aus anderen Aufschlussverfahren gegenübergestellt. Obwohl bei der Gegenüberstellung beachtet werden muss, dass die Fremddaten aus der LfL-Biogasausbeuten-Datenbank (LfL 2018) nicht mit identischen Labormethoden und auch nicht mit identischen Strohherkünften wie im Projekt erhoben wurden, deutet sich an, dass die Silierung gleichwertige, und im Falle von Weizenstroh möglicherweise eine stärker ertragssteigernde Wirkung hat als der chemische Voraufschluss. Um diese Aussage abzusichern müssten jedoch Methodenvergleiche im Ceteris paribus-Modell durchgeführt werden.

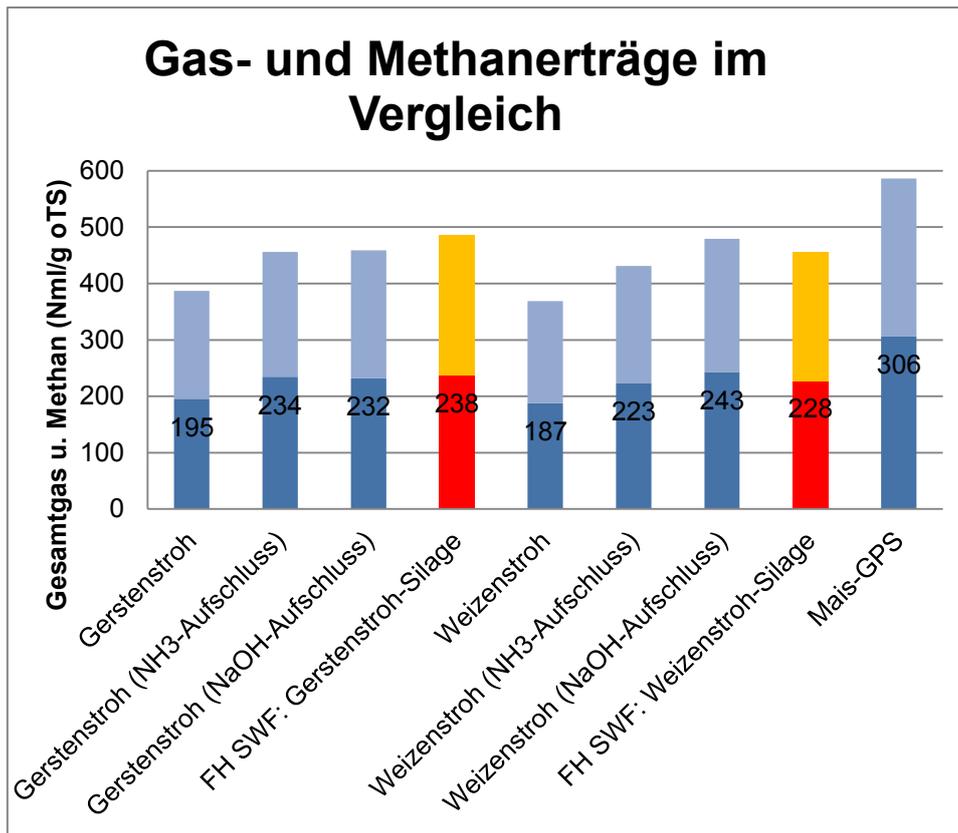


Abbildung 18: Gegenüberstellung der Projektergebnisse zur Effizienz des Silierens von Gersten- und Weizenstroh mit Werten aus der Literatur (Datenbank LfL 2018)

#### 1.4.2 Silagen aus Stroharten

Welche Arten von Stroh in der Fruchtfolge genutzt werden können, hängt in der Praxis davon ab, ob im Betrieb eine Technik für eine verschmutzungsarme und Kostengünstige Bergung verfügbar und ob eine praktikable Logistik für die Prozesskette Ernte – Lagerung – Mischung mit anderen Zutaten – Einsatz in der Biogasanlage – Rückführung der Gärreste auf das Feld gewährleistet ist. In jedem Fall ist ein Mehraufwand im Vergleich zum Verbleib der Koppelprodukte auf dem Feld ein Mehraufwand verbunden, daher ist die Kenntnis der Biogaspotentiale der einzelnen Koppelprodukte und von Koppelproduktmischsilagen eine wichtige Entscheidungshilfe. Die Projektergebnisse zeigen, dass sich mit allen untersuchten Stroharten (Gerste, Weizen, Körnermais, Raps) allein mit Zusatz von Leitungswasser zur Erreichung von Ziel-TS-Gehalten zwischen 30 und 35% TS potentiell Silagen erzeugen lassen, die anzustrebende pH-Werte erreichen und bei sorgfältiger Verdichtung und Silierung auch nur geringe Abzüge in der Grobfutterbewertung erhalten. Mit der Silierung von Maisstroh oder Weizenstroh sinken die pH-Werte stärker als bei Gerste oder Raps.

**Rapsstroh** ist nach dem Probenscreening auf weitere Untersuchungen verzichtet worden, da die Biogasausbeute im Vergleich zu Weizen-, Gersten- oder Körnermaisstroh nicht

mithalten kann. Hinzu kommt die Tatsache, dass eine geeignete Technik für die verschmutzungsarme Bergung von Rapsstroh nicht verfügbar ist. Obwohl das Rapsstroh für die Laboruntersuchung nach der Rapsernte sorgfältig und unter Vermeidung übermäßiger Verschmutzungen per Hand gesammelt wurde, liegen die Rohaschegehalte der Rapsstrohsilagen mit knapp 10% bis 11,5 % bereits deutlich über denen der anderen Stroharten, in der Praxis dürften diese Werte bei Raps jedoch höher ausfallen. Niedrige oTS-Gehalte schränken dann die ohnehin geringe Biogasleistung des Rapsstrohs zusätzlich ein. Die Gaserträge von siliertem Rapsstroh liegen unter den Werten von unbehandeltem und extrudiertem Stroh in Versuchen des Fraunhofer Institutes IKTS (Friedrich & Wufka 2013).

**Gerstenstroh** weist im Vergleich mehrerer Versuche größere Schwankungen der Biogasleistung auf (min. 337 Nml / g oTS im Screening Test, max. 571 Nml / g oTS im Sensortest) auf. Die Gesamtgasmenge im Sensortest (BluSens) der reinen Gerstenstrohsilage liegt zwischen den in vergleichbarer Versuchsdauer von 30 Tagen von Friedrich und Wufka (2013) gemessenen Werten für unbehandeltes und extrudiertes Gerstenstroh. Die im Projekt gemessene reine Methanmenge kann annähernd 300 Nml / g oTS Gerstenstrohsilage betragen (vgl. Abb. 18). Im direkten Vergleich ist die Gasbildung aus Gerstenstroh derer des **Weizenstrohs** jedoch leicht unterlegen. Zu diesem Befund kommen auch andere Untersuchungen mit unsiliertem Weizen- und Gerstenstroh (LfL 2018). Das Silieren des Getreidestrohs direkt nach der Ernte des Getreides hätte zum Vorteil, dass das Stroh nicht zwingend gepresst und später Trocken gelagert werden müsste. Das Wickeln und spätere zeitintensive Aufwickeln der HD-Ballen würde entfallen. Probleme mit Wickelschnüren in der Anlagentechnik würden entfallen. Um die Transportwürdigkeit des Strohs für den Transport zum anlagennahen Fahrsilo zu verbessern, könnten Transportwagen mit kombinierter Häckseltechnik und/oder beweglicher Ladewagenwand zur Verdichtung des Strohs (z.B. Ladewagenteknik von S-A-S, Spezielle-Agrartechnik-Systeme Wolfhagen) verwendet werden. Soll das Stroh zusammen mit Zuckerrüben siliert werden (Kap. 1.3.3), hat Getreidestroh mit den deutlich früheren Ernteterminen im Vergleich Zuckerrüben den Nachteil, dass dieses dann doch den Nachteil der trockenen Bergung und damit eine höhere Witterungsabhängigkeit hat als wenn es direkt ab Feld siliert werden kann. Denn wenn die gemeinsame Silierung mit Zuckerrüben erfolgen soll, muss das Stroh zum Zeitpunkt des Vermischens trocken sein, um die überschüssige Flüssigkeit der Rüben ausgleichen zu können. Das Pressen, Wickeln, trockene Lagern bis zur Rübenernte wird wieder notwendig und verursacht höhere Kosten.

Dieser Nachteil besteht im günstigen Fall bei **Körnermaisstroh** nicht, weil dessen Ernte erfolgen kann, wenn die Zuckerrüben bereits auf Feldmieten liegen. Aber auch ohne Zuckerrüben erreichen Körnermaissilagen bis 502 Nml / g oTS Gesamtgas und damit bis

annähernd 68 % (im Projekt gemessener Spitzenwert, niedrigster Wert 63 %) der Referenz Mais-GPS. Bezogen auf die Methanerträge pro g oTS sollen nach Fleischhut und Strobl (2017) sogar 85% einer Mais-GPS erreicht werden können. Werte dieser Größenordnung werden im Projekt nur durch Zusatz von erheblichen Mengen an Zuckerrüben erreicht. Je nach verwendeter Maissorte und Erntetermin der Körner dürften die Gasausbeuten des reinen Strohs deutlich niedriger liegen. Wie bei anderen Grasarten nimmt die Lignifizierung des Sprosses auch beim Mais mit zunehmender Reife stark zu und das Ausmaß und die Geschwindigkeit des mikrobiellen Abbaus nehmen entsprechend ab. Bei Silomais werden diese negativen Entwicklungen an der Restpflanze zwar durch zunehmende Stärkegehalte im Kolben kompensiert, bei einer Nutzung der Restpflanze ohne Körner kommt das selbstverständlich nicht mehr zum Tragen. Die Restpflanzenverdaulichkeit nimmt sogar gegenüber derselben bei in der Regel deutlich früher geernteten weiter stark ab. Fehlende Stärke und fortgeschrittene Lignifizierung der Restpflanze müssen in der überwiegenden Zahl der Fälle in der Praxis zwangsläufig gegenüber der GPS-Nutzung des Maises in der Biogasanlage zu gravierend geringeren Gesamtgas- und Methanertrag führen. Die im Projekt festgestellten Mindererträge des Körnermaisstrohs gegenüber der Referenz Mais-GPS zwischen 32 und 37% erscheinen plausibel.

Die Erträge des Körnermaisstrohs werden aufgrund der hohen Wuchshöhe und des großen Volumens der Pflanze oft stark überschätzt. Für eine Potenzialabschätzung ist davon auszugehen, dass pro ha nur ca. 30 % der entsprechenden Biomasse eines Silomaisbestandes abgefahren werden kann. Zu einer ähnlichen Einschätzung kommen auch Fleischhut und Strobl (2017). Kalkuliert man mit der im Projekt festgestellten um ein Drittel geringeren Biogasproduktion pro Tonne, so werden Stroherträge einer Fläche von geschätzt 5 ha Körnermais nötig, um den Biogasflächenertrag von 1 ha Silomais zu ersetzen. Dennoch kann die Nutzung von Körnermaisstroh gegenüber der Nutzung von Weizen, Gersten oder Haferstroh deutliche Vorteile bieten. Neben den späten Ernteterminen von Körnermais, die für die gemeinsame Silierung mit Zuckerrüben sehr günstig liegen, spricht für das Körnermaisstroh, dass für dessen Nutzung in der Biogasanlage keine konkurrierende Vermarktungsmöglichkeit für Körnermaisstroh gegeben ist. Dagegen muss sich der zu erzielende Biogasertrag anderer Stroharten mit den potentiellen Verkaufserlösen messen können, die gerade in Veredelungsregionen sehr hoch liegen können. Der bisherige Nachteil, unzureichender Bergungstechnik besteht zudem offenbar nicht mehr, da diese bereits von mindestens zwei Herstellern angeboten wird, wobei eine davon auch im Projektzusammenhang erfolgreich getestet wurde. In jedem Betrieb, in dem Körnermaisstroh in Biogasanlagen eingesetzt werden soll, muss jedoch geprüft werden, ob und in welcher Weise nachteilige Wirkungen auf die Humusgehalte durch die Abfuhr des Maisstrohs verhindert werden können. Gerade in maisdominierten Fruchtfolgen besteht damit auch bei

Rückführung organischer Masse über die Gärreste ein potentielles Problem. Mögliche Lösungen könnten Direktsaat Verfahren oder Minimalbodenbearbeitung, Untersaaten sowie mehr humusmehrende Hauptkulturarten in der erweiterten Fruchtfolge sein.

Für alle Stroharten gilt, dass die Silierung die Eigenschaften für den Einsatz in Biogasanlagen zwar verbessert, dass aber im Vergleich von Mais-GPS in keinem Fall annähernd hohe Biogasleistungen messbar werden. Zwar ist mit der Strohnutzung eine bessere Ausnutzung der Ackerfläche für die Produktion nutzbarer Biomasse verbunden, Die Energieproduktion konkurriert damit weniger mit der Futter- und Lebensmittelproduktion und die Akzeptanz für die energetische Nutzung von Reststoffen ist hoch. Das kann potentiell auch das Image der Biogaserzeugung verbessern, was von der Branche gewünscht wird. Für Biogasanlagenbetreiber, die jedoch auf eine maximale Auslastung Ihrer Anlage setzen, sind Strohsilagen bestenfalls in kleinen Mengen eine Option. Wenn jedoch mit durch Zuckerrüben aufgewertete Koppelproduktsilagen mit Mais-GPS oder Getreide-GPS vergleichbare Eigenschaften einstellen lassen, könnte das aktuell die Attraktivität der Koppelproduktnutzung erhöhen.

#### **1.4.3 Aufwertung von Stroh- und Pferdemistsilagen durch Zuckerrüben**

Zuckerrüben werden in der Praxis in Biogasanlagen bereits erfolgreich eingesetzt. Unter bestimmten Voraussetzungen kann Biogas aus Zuckerrüben mit der Produktion aus Silomais wirtschaftlich konkurrenzfähig oder sogar wirtschaftlicher sein (Hermus 2014). Die Wirtschaftlichkeit, kann aber u. A. durch unterschiedlich hohe Reinigungs- und Konservierungskosten (Rheinischer Rübenbauerverbund e.V. 2014) stark variieren. Am wirtschaftlichsten in der Einsatz frischer Rüben, was aber den Zeitraum für die Nutzung in der Biogasanlage stark begrenzen würde.

Die Gaserträge pro kg oTS liegen in der Regel aufgrund des leicht vergärbaren Zuckers über denen von Silomais. Aufgrund der geringeren TS-Erträge der Rübe sind dennoch die Gaserträge pro ha im Vergleich zum Silomais meist niedriger. Wie frühere Untersuchungen der FH Südwestfalen zeigen, können die Erträge pro ha höher ausfallen, wenn die Rüben nicht geköpft sondern nur entblattet werden (Wollenweber et al. 2010). Das gemeinsame Silieren mit einem anderen Substrat, wie zum Beispiel Silomais ist , wie eine Masterarbeit an der FH Südwestfalen ergibt (Schattschneider 2010), zwar etwas teurer als die Alternativen Miete oder Lagune, jedoch sind mit der Co-Silierung mit Stroh deutlich längere und witterungsunabhängige Lagerungszeiträume möglich. Bei der Lagunenlagerung und insbesondere bei der Silierung von ganzen Rüben sind mitunter hohe Verluste zu erwarten (Rheinischer Rübenbauerverbund e.V. 2014). Die Verluste, u. a. wegen Gärstoffaustritten

können bei Silagen aus ganzen Rüben über 40% liegen. Bei TS-Gehalten ab 30 % TS sind substratunabhängig Gärtaustritte nicht mehr wahrscheinlich. Diese Mindest-TS, besser 35% TS, sollten bei der Herstellung von Stroh-Zuckerrübenmischungen der Zielwert sein. Im Falle von Maisstroh lässt sich im Projekt die Optimal-TS in der Mischung mit einem Verhältnis von 1,2t frischer Rüben zu 1 t Maisstroh (ebenfalls frisch ab Feld) einstellen. Die TS-Gehalte der Mischungskomponenten zur Findung des idealen TS-Gehaltes sind idealerweise für jede individuelle Situation neu zu bestimmen. Bei trockenem Gerstenstroh werden deutlich mehr Rüben benötigt, um 35 % TS in der Mischung zu erreichen. Die aus der Projektsilage hergestellte Körnermaisstroh-/Zuckerrübenmischung erzielt mit 35% TS nahezu denselben Gasertrag wie die Referenz Mais-GPS.

Die Verwendung von Rübenblatt als alleiniger Zusatz zu Strohsilagen hat sich als relativ wenig effektiv gezeigt im Vergleich zur Variante, die nur mit Leitungswasser auf die Ziel-TS gebracht wurde. Als interessant hat sich dagegen eine Variante mit einem Frischmasse-Verhältnis Gerstenstroh : Zuckerrübenblatt : Zuckerrübe von 1 : 1,2 ; 2 erwiesen, die mit 84,4% der Referenz Mais-GPS nur wenig schlechter abschneidet als in der Gerstenstrohvariante ohne Rübenblatt und mit doppelter Zuckerrübenmenge. Hier könnten in der Praxis Kostenvorteile durch die Einsparung von 50 % Rüben entstehen.

Die Wirtschaftlichkeit der Nutzung von Getreidestroh kann erhöht werden, wenn, im Sinne einer anzustrebenden Kaskadennutzung, der Biogasnutzung eine Nutzung als Einstreu vorausgeht. Die Nutzung von Mist aus der Haltung unterschiedlicher Tierarten findet in bestehenden Biogasanlagen bereits in großem Umfang statt. Neu ist dagegen der Ansatz, Mist zu Silieren, um die Lagerstabilität von Zuckerrüben zu verbessern und den Strohanteil aus dem Mist anaerob voraufzuschließen. Ein aerober Voraufschluss durch lange Rottezeiten ist nicht empfehlenswert, da die Atmungsprodukte keine nutzbare Energie enthalten und vor Einsatz in der Biogasanlage entweichen. Aufgrund der geringen Stickstoffgehalte und der zu erwartenden geringen Pufferwirkung im Vergleich zu Mist aus der Haltung anderer Tierarten, bei dem sich eine direkte Nutzung ohne Silieren eher anbietet, wurde ausschließlich Pferdemist verwendet. Dieser fällt in großen Pferdepensionsbetrieben oder Gestüten in großen Mengen an und zur Biogasnutzung bestehen nur wenige Nutzungsalternativen. Aufgrund des geringen Düngewertes, steht Pferdemist oft als Substrat kostenlos zur Verfügung oder die Abnahme wird sogar honoriert. Die Laborergebnisse zur Gasbildung aus Silagen aus Pferdemist mit oder ohne Zuckerrüben fallen in Abhängigkeit von der Art und Herkunft variabel aus, die besseren Varianten reichen aber in ihrem Gasbildungspotential an die Leistungen der getreidestroharten heran. Die Ursachen für die starke Schaumbildung, die bei der Verfütterung der Zuckerrüben im quasi-kontinuierlichen Test aufgetreten sind, können nicht zweifelsfrei geklärt werden. Die

Gegenüberstellung aller Impfmaterien aus den Screeningtests und den beiden Aufskalierungsstufen lassen den Schluss zu, dass sich Silagen aus Pferdemist mit Zuckerrüben am erfolgreichsten einsetzen lassen, wenn die Mikrobiologie der Biogasanlage bereits auf unterschiedliche Substrate eingestellt ist. Bei der Herstellung von Pferdemistsilagen sollte darauf geachtet werden, dass der Mist nicht bereits zu intensiv vorgerottet ist. Je weniger das darin befindliche Stroh einem aeroben Abbau unterlegen ist, umso ähnlicher kann die Qualität der Pferdemistsilagen des vergleichbaren Strohsilagen sein. Um jedoch noch näher an die Gaserträge des Silomais zu kommen, müssten die Zuckerrübenzusätze gegenüber den im Projekt gewählten deutlich höher gewählt werden.

Insgesamt ist in den Upscaling-Stufen des Projektes belegt worden, dass das Mischen von Zuckerrüben mit Stroh oder Pferdemist auch mit geringerem technischen Aufwand (grobe Zerkleinerung der Rüben, Mischen mit Frontladergabel) sicher zu gewährleisten ist. Wie auch durch Bugdahl (2013) beschrieben, ist bei der Herstellung der Silagen jedoch auf höchste Sorgfalt zu achten. Durch die hohen Zuckergehalte können bei zu trockenen und wenig verdichteten Regionen im Silokörper und schlechter Verteilung der Rübenbestandteile nach dem Öffnen zusammenhängende Luftkanäle ein rasches Eindringen und Verteilen der Umgebungsluft und damit eine mangelnde Aerostabilität verursachen. Zur Vorbeugung der Nacherwärmung sollte zusätzlich über den Einsatz heterofermentativer Milchsäurebakterien oder Silierhilfsmittel auf Basis organischer Säuren nachgedacht werden. Eine perfekte Abdichtung durch Folien ist absolut unverzichtbar. Es sollte sich keineswegs darauf verlassen werden, dass zum Beispiel Krusten aus gemusterten Zuckerrüben einen gewissen Luftabschluss bewirken können, wie dies in einer gut präparierten Lagune erwartet werden kann.

Die im Projekt parallel zu den Zuckerrüben eingesetzten Futterrüben können in keiner der untersuchten Silagen überzeugen. Ihre Wirkung auf die Gaserträge von Stroh-Silagen ist gering. Da die Futterrübe anbautechnisch nur geringe Vorteile (z.B. geringere Standortansprüche) gegenüber der Zuckerrübe hat, erscheint die Substitution von Zuckerrüben durch Futterrüben nicht sinnvoll.

#### **1.4.4 Zwischenfrüchte**

Ob Zwischenfrüchte eindeutig zu den Koppelprodukten gehören, kann als strittig gelten. Im Fokus dieses Projektes standen ursprünglich Zwischenfrüchte, für die derzeit eine unmittelbare Nutzung der Biomasse z.B. als Futter kein Ziel darstellt. Hierfür eignen sich Greening-Mischungen, bei denen jedoch zu beachten ist, dass sie nicht vor dem 16. Februar des Folgejahres geerntet werden dürfen. Zusätzlich bietet jedoch das gemeinsame Silieren

von Stroh und Zwischenfrüchten auch für andere Zwischenfrüchte eine Möglichkeit, das Problem niedriger TS-Gehalte, insbesondere bei früher Nutzung zu lösen, und die Risiken durch Verschmutzung und Bröckelverlusten bei Vortrocknung auf dem Acker zu reduzieren. Überschüssige Feuchtigkeit kann, wie bereits für die Zuckerrübe beschrieben, von trockenen Stroharten ausgeglichen werden. Zu den Ertragspotentialen bezogen auf den ha Zwischenfruchtanbaufläche können auf Basis der Projektergebnisse keine konkreten Aussagen gemacht werden, da diese von sehr unterschiedlichen Faktoren, wie Fruchtfolge, Saatzeitpunkt, Standort, Witterung und Wasserverfügbarkeit im Spätsommer und Herbst, bzw.zeitigem Frühjahr, Nährstoffangebot (ggf. Düngung) sowie botanische Zusammensetzung des Aufwuchses bestimmt werden. Zum Silierverhalten (Ausnahme Ackergras und Kleegrasmischungen) lagen zu Projektbeginn, insbesondere in Verbindung mit Stroh, jedoch wenig Erkenntnisse vor. Insgesamt bleiben die Gasausbeuten von Zwischenfrucht-/Strohsilagen hinter den Erwartungen zurück. Während in Vorversuchen mit Zwischenfruchtsilagen noch bis zu 73,1% der Biogasmenge im Vergleich zur Referenz Mais-GPS erzielt worden ist (Zwischenfrucht-Eigenmischung aus Erbsen, Roggen, Hafer) und auch die Mischungen von einzelnen Zwischenfrüchten mit Stroh (Weißer Senf + Stroh, Bitterlupine + Stroh, Phacelia +Stroh) zwischen 65 und 70,7% der Mais GPS erzielt haben, können diese relativ hohen Garerträge in weiteren Versuchen nicht wiederholt werden. Unter Verwendung von weitverbreiteten Zwischenfruchtmischungen und Stroh konnten die Gaserträge von reinen Strohsilagen nicht wesentlich übertroffen werden. Von einer Aufwertung der Strohsilagen durch Zwischenfrüchte kann daher in der Regel nicht die Rede sein. Andererseits besteht in der Mischung mit Zwischenfrüchten grundsätzlich eine Möglichkeit, die betriebliche Flächenleistung für die Biomassebereitstellung für Biogasanlagen zu erhöhen. Bei hohen Strohpreisen kann die Nutzung von Zwischenfrüchten auch den Strohverbrauch reduzieren und gleichzeitig sind die Positivwirkungen der Zwischenfrüchte (Erosionsschutz, Schutz vor Nährstoffauswaschung, Positivwirkung auf des Bodenleben, Blühpflanzenangebot, etc.) weiterhin nutzbar. Durch das Co-Silieren ist die Lagerung von Zwischenfrüchten zudem verlustärmer gestaltbar.

## **Literatur**

Bugdahl, B.; 2013: Zuckerrüben und Stroh gemeinsam silieren? Bauernblatt, 8. Juni 2013, 52- 54

DBFZ (Hrsg.); 2009: Regionale und globale räumliche Verteilung von Biomassepotenzialen - Status Quo und Möglichkeit der Präzisierung. Deutsches Biomasseforschungszentrum, Abschlussbericht FKZ: SF – 10.08.36.2

Dewar, W. A., P. McDonald & R. Whittenbury; 1963: The hydrolysis of grass hemicelluloses during ensilage. J. Sci Food Agric, Volume14, Issue6, June 1963, pp. 411-41.7

Fleischhut, M. & M. Strobl, 2017: Körnermaisstroh – ein Substrat, das Hoffnungen weckt. Biogas Journal 2/2017. 27-33.

Friedrich, E. & A. Wufka; 2013: Breitenwirksame, wirtschaftliche Biogasgewinnung aus hoch lignozellulosehaltigen biogenen Reststoffen. Abschlussbericht, BMU, FKZ-Nr. 03KB050. 107 Seiten.

Hermus, H.; 2014: Zuckerrübe schlägt Mais. topagrar Ausgabe Energiemagazin 3/2014. S. 16-22.

Kerley, M. S., G. C. Fahey Jr., J. M. Gould & E. L. Iannotti; 1988: Effects of lignification, cellulose crystallinity and end enzyme accessible space of plant cell wall carbohydrates on the digestibility of plant cell carbohydrates by the ruminant. FOOD MICROSTRUCTURE, Vol. 7 (1988), pp. 59-65

Köllmeier, T.; 2013: Analyse spezialisierter Bakteriengemeinschaften und deren cellulolytische Hauptvertreter für die Hydrolyse in thermophilen Biogasanlagen. Diss. TU München. 149 S.

LfL; 2018: Biogasausbeuten verschiedener Substrate - Biogasausbeuten-Datenbank. URL: <http://www.lfl.bayern.de/iba/energie/049711/>. Abrufdatum 20.08.2018.

Rheinischer Rübenbauerverbund e.V.; 2014: Schlussbericht zum Projekt: Einsatz von Rüben in Biogasanlagen. URL: <https://www.rrvbonn.de/sites/default/files/media/doc/biogasprojekt-schlussbericht.pdf>

Summerell, B.A. & L.W. Burgess; 1989: Decomposition and chemical composition of cereal straw Soil Biology and Biochemistry Volume 21, Issue 4, pp. 551-559.

Teixeira Franco R., R. Bayard, P. Buffière; 2018: Mathematical modelling of the ensiling process before biogas production: Strengthening the links between biomass storage and anaerobic digestion. Chemical Engineering Journal, Volume 350, pp. 872-882.

Wollenweber, D., Töppe, D., Schäfer, B.C. (2010): Rüben entblättern statt köpfen?, Top Agrar 3/2010, S. 86-90

## **1.5 Zusammenfassung**

Ziel des Projektes war, Koppelprodukte durch Mischung mit anderen Substraten und anschließender Silierung aufzuwerten und für eine Nutzung in Biogasanlagen zu optimieren. Durch den Verfahrensschritt Silierung sollte auch ein low-tech Verfahren für den Voraufschluss von Lignocellulose in Stroh getestet werden. Dazu wurden praktikable Koppelprodukte und Mischungen nach vorgegebenen Kriterien ausgewählt und siliert und die Silagequalität untersucht. Die Eignung von fast 400 Silagen wurde für den Einsatz in Biogasanlagen in einem Kolbentest anhand kleiner Probenmengen als erstes Screening untersucht. Es folgten mehrere Aufskalierungsschritte unter Einbeziehung eines Gassensortests und quasi-kontinuierlicher Biogastest bis zur letzten Upscalingstufe in zwei Praxisbioanlagen, die der Validierung der Laborergebnisse und der Überprüfung der praktischen Machbarkeit dienten. Zusätzlich wurden erste Aussagen zur Wirtschaftlichkeit des Verfahrens und der ausgewählten Substrate untersucht. Aufgrund hoher Anbaubedeutung der entsprechenden Kulturarten und des mengenmäßig großen Potentials lag ein besonderer Focus auf Weizen-, Gersten-, Mais- und Rapsstroh. Zusätzlich wurden

Rübenblatt und verschiedene Zwischenfrüchte und Zwischenfruchtmischungen als Mischungsbestandteil für Strohsilagen geprüft. Um die Gaserträge zu erhöhen, wurden zudem verschiedene Mengen an Zuckerrüben als Mischungskomponente eingesetzt.

Grundsätzlich lassen sich aus allen Stroharten Silagen mit geeigneten pH-Werten herstellen, selbst wenn lediglich Leitungswasser zur Einstellung optimaler TS-Gehalte zwischen 30 und 35% als zusätzliche Komponente eingesetzt wird. Offenbar werden Teile der Hemicellulosen hydrolytisch aufgespalten und stellen wasserlösliche Kohlenhydrate zur Vergärung durch Säurebildner in dem sonst zuckerarmen Substrat zur Verfügung. Dieser Befund lässt sich durch Untersuchungen der Rohfaserzusammensetzung vor und nach der Silierung sowie durch die Auswertung von Elektronenmikroskopbildern stützen. Der Voraufschluss bewirkt zudem eine Auflösung wasserabweisender Schichten, erhöht das spezifische Gewicht und schafft im Vergleich zur Verwendung trockenen Stroh in der Biogasanlage schneller eine vergrößerte Substratoberfläche für die Besiedlung mit Mikroorganismen. Rapsstrohsilagen erwiesen sich als schlechtestes Biogassubstrat, die größten Gasmengen wurden aus Weizenstroh- und Körnermaisstrohsilagen erzeugt. Die Strohsilagen konnten aber maximal zwei Drittel der Gasmenge der Referenz Mais-GPS bereitstellen. Um annähernd gleiche Gaserträge je kg oTS wie Silomais zu erzeugen, bietet sich der Zusatz von Zuckerrüben an. Als praktikable Mischungen können Stroh-/Zuckerrübenmischungen hergestellt werden, deren Mischungsverhältnis zu einer Gesamt-TS von 35% TS führt. Das bietet zusätzlich die Möglichkeit, die Rüben verlustarm ohne Gärstoffaustritt zu Silieren. Der gleichmäßige Einbau in ein Fahrsilo und weitgehend homogene pH-Werte konnten im Praxisbetrieb mit geringem technischem Aufwand gewährleistet werden. Der Zusatz von Rübenblatt alleine konnte nicht zu einer wesentlichen Aufwertung der Strohsilagen beitragen, in der Kombination Stroh + Zuckerrübe + Rübenblatt konnten jedoch mit nur leicht geringerer Biogasausbeute etwa die Hälfte der Zuckerrüben eingespart werden. Der Zusatz von Blatt und Rübe von Futterrüben zu Stroh empfiehlt sich dagegen nicht. Besonders die Kombination Körnermaisstroh/Zuckerrüben hat sich als günstig erwiesen, da diese Mischung aufgrund der späten Ernte des Körnermaises logistische Vorteile bietet und die Körnermaisstrohnutzung in der Biogasanlage nicht in Konkurrenz zum Strohverkauf steht wie bei Weizen-, Gersten- oder Haferstroh. Auch in der ökonomischen Betrachtung sticht diese Variante gegenüber allen anderen heraus. Im Sinne der Kaskadennutzung ist die Silierung von Stroh nach der Nutzung als Einstreu eine weitere interessante Alternative. Aufgrund des niedrigen Düngewertes und hoher Strohanteile bietet sich dabei Pferdemist an, denn Pferdemist aus der Pensionspferdehaltung oder Gestüten steht oft kostenlos zur Verfügung. Zusammen mit Zuckerrüben siliert kann dieses Substrat in Grenzen Mais-GPS ersetzen. Gegebenenfalls sollte der Zuckerrübenanteil in der Mischung gegenüber dem im Projekt gewählten etwas

höher sein. Wichtig ist, dass der Strohanteil im Pferdemist noch nicht zu stark aerob abgebaut ist.

Die in Vorversuchen festgestellten relativ hohen Gaserträge von Zwischenfrucht- und Zwischenfrucht-/strohmischsilagen, die bis 75% der Gasbildung der Referenz Mais-GPS lagen, konnten in weiteren Versuchen mit Zwischenfruchtmischungen nicht erreicht werden. Die Mischsilagen erzielten Gasmengen, die in vergleichbarer Höhe der Gasmengen aus reinen Strohsilagen lag. Das Ziel einer Verbesserung der Gasbildungspotentiale wurde nicht erreicht. Dennoch können Zwischenfrüchte dazu beitragen, die Biomassepotentiale je Ackerfläche zu erhöhen und dabei zusätzlich die bekannten Vorteile bezogen auf Bodenfruchtbarkeit und Umweltschutz einbringen.

Insgesamt hat sich die Silierung als Maßnahme zur Aufwertung von lignocellulosereichen Koppelprodukten für die Nutzung als Biogas als wirksam erwiesen. Im Vergleich mit Literaturwerten zu technisch und finanziell aufwändigeren chemischen und physikalischen Voraufschlussmethoden ist der Gasmehrertrag gegenüber dem des trockenen Stroh als mindestens Gleichwertig zu betrachten.

## **1.6 Schlussfolgerungen**

Pflanzenbauliche Koppelprodukte fallen in allen Ackerbaubetrieben an und in vielen Betrieben wird diese Biomasse aktuell noch nicht verwertet. Welche Koppelprodukte in einem Betrieb für eine Nutzung zur Verfügung stehen und tatsächlich wirtschaftlich erfassbar und in der Biogasanlage nutzbar sind hängt von vielen betriebsspezifischen Variablen ab. Hinzu kommt, dass die Zielsetzung von Biogasanlagenbetreibern unterschiedlich sein kann. Für Betriebe, in denen die Anlagenkapazität möglichst vollständig ausgenutzt werden soll, um eine möglichst hohe Menge an Methan, Strom und/oder Wärme verkaufen zu können, müssen Alternativen im Vergleich zum weit verbreiteten Substrat Mais-GPS möglichst gleichwertige Gasbildungspotentiale aufweisen und die Substratkosten sollten nicht höher sein. Für diese Betriebe, die derzeit wohl noch die Mehrzahl darstellen, besteht die Möglichkeit, lignocellulosereiche Koppelprodukte, wie Getreide oder Maisstroh mit energiereichen aber nassen Substraten (z.B. Zuckerrüben) zu vermengen und diese durch gemeinsames Silieren voraufzuschließen und die nassen Substrate besser haltbar zu machen. Die Projektergebnisse zeigen, dass dies biologisch und technisch gut möglich ist.

In Zukunft könnten sich die Zielsetzungen vieler Biogasanlagenbetreiber jedoch ändern. Gemäß den Regeln des EEG werden die 20 Jahre gewährten Preisgarantien für aus Biogaserzeugten Stroms für eine zunehmende Zahl von Betrieben wegfallen und die Erlöse aus der Verstromung werden zwangsläufig drastisch sinken. Für viele Entscheider im

Pflanzenbau wird der Anbau von Energiepflanzen wie Mais- und Getreide-GPS auf den Prüfstand kommen, da sich deren Deckungsbeiträge an denen Anbaualternativen, z.B. den Anbau von Marktfrüchten messen müssen. Investitionen in Anlagentechnik sind in diesen Betrieben oft abgeschrieben und dennoch kann die vorhandene Technik vielfach weitergenutzt werden. Unter diesen Bedingungen wird die Option der Vermarktung von Körnern und Nutzung von Strohsilagen als GPS-Ersatz an Vorzüglichkeit gewinnen. Auch für diese Betriebe liefert das Projekt entscheidende Erkenntnisse. Während für den Einsatz von trockenem Stroh in ehemals mit GPS beschickten Anlagen oft technische Veränderungen vorgenommen werden müssen, um z.B. Schwimmschichten zu vermeiden, führt das Silieren dazu, dass die physikalischen Eigenschaften von Stroharten denen der entsprechenden GPS stark ähneln. Durch den Voraufschluss entsteht eine Verbesserung der Potentiale, die keiner Investition einer chemischen, physikalischen oder Vorstufe oder den Erwerb kostspieliger Reagenzien (Enzyme, starke Säuren, etc.) bedarf. Es kann die Vorhandene Technik und das Know-how aus der Herstellung von GPS verwendet werden. Investitionen in eine andere Aufschlusstechnik und hohe Zusatzkosten für Betriebsmittel würden im Grundsatz einem Low-cost-Ansatz widersprechen, der für den Weiterbetrieb von Altanlagen, trotz geringer Stromerlöse, notwendigerweise verfolgt werden muss.

### III Verwertung

Pflanzenbauliche Koppelprodukte werden sehr wahrscheinlich in Zukunft für die Energieproduktion in Biogasanlagen stark an Bedeutung gewinnen. Dabei bestehen zahlreiche Kombinationsmöglichkeiten unter denen sich gut und weniger gut geeignete Varianten befinden. Die Projektergebnisse liefern einen guten Querschnitt über verschiedenste Koppelprodukte und Mischungen und liefern einen Überblick über deren Gasbildungspotentiale. Damit ist für Betriebe, die Koppelprodukte in Biogasanlagen verstärkt einsetzen wollen, eine wertvolle Entscheidungshilfe gegeben. Da Landwirte in der Regel nicht die Möglichkeit nutzen können, verschiedene Optionen im Labor zu prüfen, und Fehler bei der Substratauswahl und Silierung im Praxismaßstab potentiell große wirtschaftliche Schäden verursachen, können die Versuchsergebnisse aus dem Projekt unmittelbar in die Praxis einfließen und im erheblichen Maße dazu beitragen, Risiken und Hemmnisse im Zusammenhang mit der Nutzung und Aufwertung von Koppelprodukten für Entscheider in den Betrieben zu minimieren. Für die landwirtschaftliche Beratung werden alle Daten zur Verfügung gestellt, um diese für den Beratungssuchenden betriebsspezifisch aufbereiten zu können und individuelle Koppelproduktnutzungen zu entwickeln. Die Breite der untersuchten Silagen bietet dabei für viele Betriebe Optionen im eigenen Betrieb. Die Produktion von Koppelprodukten und deren überbetriebliche Verfügbarkeit kann zudem in nahezu jedem Betrieb zukünftig deutlich gesteigert werden. Als Optionen stehen der verminderte Einsatz von Wachstumsregulatoren, die Verwendung langstrohiger, dennoch standfester Getreidesorten, überbetriebliche Nutzung neuer Ernterestebergungstechniken sowie ein über die Greeningverpflichtung hinausgehender Ausbau des Zwischenfruchtanbaus. Wünschenswert wäre ein Angebot einer online-Plattform mit deren Hilfe ein Transfer von Koppelprodukten von Betrieben ohne Biogasanlage zu den Biogasanlagebetrieben erleichtert wird (Biomasse-Börsen). Die Koppelprodukthanbieter könnten beispielsweise als Gegenleistung eine kostenlose Düngung durch Ausbringung der Gärreste erhalten, so dass auch keine Negativwirkungen auf die Nährstoffbilanzen der Biogasbetriebe entstehen müssten.

Wirtschaftlich interessant ist die Koppelproduktnutzung in Biogasanlagen immer dann, wenn diese kostenlos zu beschaffen sind. Daher ist der Ansatz der Nutzung und Verbesserung der Substrateigenschaften (Co-Silierung mit Zuckerrüben o.ä.) von Pferdemit interessant. Hier sind Dienstleistungsangebote vorstellbar, die zusammen mit der Lieferung von Einstreu an Pferdebetriebe gegen marktübliche Preise, eine kostenlose Abholung von frischem Pferdemit, Hygienisierung in der Biogasanlage sowie Düngung der Pferdeweiden mit Gärrest beinhalten.

Zunehmende Anteile von pflanzlichen Reststoffen aus der landwirtschaftlichen Produktion liegen auch im Interesse der Gesellschaft, da deren Nutzung keinem Nutzungskonflikt mit der Nahrungsmittelproduktion unterliegt und die „Tank/Teller“-Diskussion damit entschärft werden kann. Letztlich kann die Neuausrichtung von Biogasanlagen mit einer stärkeren Nutzung der Koppelprodukte auch zu einer verbesserten Akzeptanz der Biogaserzeugung beitragen, die in den letzten Jahren in der Öffentlichkeit, auch aufgrund der zugenommenen Maisanbaufläche, stark abgenommen hat.

Innerhalb des Projektes wurden mehrere Projekt- und Bachelorarbeiten an der FH Südwestfalen angefertigt, die Erkenntnisse aus dem Projekt wurden in verschiedene Lehrmodule, insbesondere in das Mastermodul „Nachwachsende Rohstoffe und Energiepflanzen“ integriert. Damit lieferte und liefert das Projekt einen wesentlichen Beitrag zur Weiterqualifikation des wissenschaftlichen und praxisorientierten Nachwuchses, wodurch wiederum für die Zukunft ein weiterer Multiplikatoreffekt entsteht. Der Wissenstransfer findet darüber hinaus über die in V. angegebenen Publikationen und Tagungsbeiträge statt. Bereits jetzt wurden in diesem Zusammenhang telefonisch und via Email zahlreiche Anfragen von interessierten Landwirten beantwortet. Derzeit werden die Daten für eine Präsentation auf der Homepage der FH Südwestfalen aufbereitet.

## IV Erkenntnisse von Dritten

Im Rahmen der Literatursichtung und des Austausches mit anderen Hochschulen und Instituten wurden folgende Erkenntnisse Dritter für besonders relevant in Bezug auf das vorliegende Projekt erachtet:

1)

*L. Leible, S. Kälber, G. Kappler, H. Öechsner und M. Mönch-Tegeder (2015): „Biogas aus Landschaftspflegegras. Möglichkeiten und Grenzen.“ ITAS Institut für Technikfolgen abschätzung; Universität Hohenheim*

Die Produktion von Biogas aus Landschaftspflegegras ist sehr teuren Verwertungsweg für dieses Substrat. Die Erträge lassen sich auch durch Querzerspannung nicht wesentlich steigern.

Die Autoren postulieren, dass vor allem der oTS-Abbau und hier besonders derjenige der Lignocellulose zentrale Ansätze zur Aufwertung seien.

2)

*B. Schwarz, M. Fleischhut, D. Baye; (2017): Einsatz von strohartigen Biomassen in Biogasanlagen – Stand und Perspektiven. KTBL-Schrift 512, pp 167 ff.*

Die Autoren bewerten mechanische Zerkleinerung, thermischen Aufschluss (150°C) und chemischen Aufschluss mit NaOH als besonders effektiv.

Weiterhin wurde eine Pressung zu Strohpellets getestet. Es sind Methanmehrerträge von bis zu 40% gegenüber unbehandeltem Stroh möglich.

Allerdings sind für eine flächendeckende Versorgung der Biogasanlagen mit Strohpellets dezentrale Pressanlagen notwendig.

Insgesamt wird auch mit dieser Technologie der Biogasbranche ohne weitere preisliche Anpassung der Vergütung über das EEG keine Zukunft bescheinigt.

3)

*C. Terboven, C. Herrmann, M. Lehmann, J. Weckemann; (2017): Biogasgewinnung aus Herbstlaub – Methanpotenziale und verfahrenstechnische Ansätze zur Prozessoptimierung. KTBL-Schrift 512, pp 176 ff.*

Insbesondere der hohe Ligningehalt einiger Laubarten wie Kastanie oder Eiche machen die Vergärung schwierig. Eine Vorhydrolyse im Wasserbad brachte keine messbaren Erfolge.

Hoher Methanertrag ergab sich dort, wo bei der Laub mit hohen Beimengungen an Gras (80%) eingesetzt wurden.

Der Einsatz von Laub aus Parkanlagen wurde höher als der aus städtischen Grünabfällen vermutet, weil dort der Ligningehalt höher eingeschätzt wurde.

Insgesamt besteht weiteres Optimierungspotential.

## V Veröffentlichungen

- Laser, H., Boelhave, M. & Garmeister, R., 2016: Verbesserung der Nutzungsmöglichkeiten von Koppelprodukten aus dem Ackerbau für die Biomethanproduktion. Vortrag auf der NRW-Biokraftstofftagung am 24.11.2016 auf dem Versuchs- und Bildungszentrum Landwirtschaft Haus Düsse.
- Garmeister, R., Boelhave, M. & Laser, H., 2018: Biomasseaufwertung von lignocellulosereichen Koppelprodukten. Vortrag und Beitrag zum Tagungsband auf dem Biogas-Innovationskongress der DBU am 29.05.2018 in Osnabrück.
- Garmeister, R., Boelhave, M. & Laser, H., 2018: Biomasseaufwertung von lignocellulosereichen Koppelprodukten zur optimierten Methanausbeute. Vortrag und Beitrag zum Tagungsband auf der Biogasfachtagung am 30.08.2018 in Heiden.
- Garmeister, R., Boelhave, M. & Laser, H., 2018: Mischsilagen: Alternative zum Mais. topagrar 9/2018, S. 114-117.
-

# VI Anhang

Tabelle 9 (Anhangtabelle A1): Gemittelte Analysewerte aus allen Versuchen (nicht enthalten Vorversuche mit Zwischenfrüchten)

Übersicht über alle Versuche										
Versuch	Probenbezeichnung	Cellulose (%)	Hemicellulose (%)	Lignin (%)	Rohasche	pH-Werte	Gesamt-Gas	ADF		
1	Körnermaisstroh (TS 35%)	26,47	17,26	6,30	6,30	6,30	4,11	630,88	32,76	
	Körnermaisstroh (TS 25%)	31,11	23,97	8,76	8,76	8,76	5,00	502,99	39,87	
	Körnermaisstroh Zuckerrübenmü (TS 35%)	26,47	17,26	6,30	6,30	6,30	4,11	630,88	32,76	
	Körnermaisstroh Zuckerrübenmü (TS 25%)	29,57	19,84	13,52	13,52	13,52	3,76	758,01	0,00	
2	Körnermaisstroh Zuckerrübe grob (TS 35%)	43,50	28,07	9,27	9,27	9,27	3,84	736,11	0,00	
	Körnermaisstroh Zuckerrübe grob (TS 25%)	26,59	19,19	4,64	4,64	4,64	337,02	52,77		
	Gerstenstroh + Zuckerrübe	28,81	21,18	5,78	5,78	5,78	604,21	31,22		
	Gerstenstroh + Zuckerrübe + Zuckerrübenblatt	33,85	26,93	6,96	6,96	6,96	409,82	40,81		
	Gerstenstroh + Futtermü	37,19	26,05	6,47	6,47	6,47	451,29	43,66		
	Gerstenstroh + Futtermü + Futtermübenblatt	37,81	27,30	7,80	7,80	7,80	367,77	45,61		
3	Gerstenstroh + Futtermübenblatt	38,46	28,55	6,89	6,89	6,89	413,32	45,36		
	Pferdemist	31,19	15,27	11,62	11,62	11,62	42,81	42,81		
	Separatormaterial + Pferdemist-Silage (Abel ReTec)	28,17	15,77	13,35	13,35	13,35	370,31	29,12		
	Separatormaterial + ZR-Pferdemist-Silage (Abel ReTec)	17,38	13,11	3,41	3,41	3,41	560,15	20,79		
	Separatormaterial + ZR-Pferdemist-Silage (FH-SWF)	25,66	15,28	9,21	9,21	9,21	477,70	34,87		
	Pferdemist	31,19	15,27	11,62	11,62	11,62	42,81	42,81		
	Nachgärermaterial + Pferdemist-Silage (Abel ReTec)	28,17	15,77	13,35	13,35	13,35	421	410,73	41,52	
	Nachgärermaterial + ZR-Pferdemist-Silage (Abel ReTec)	17,38	13,11	3,41	3,41	3,41	607,39	20,79		
	Nachgärermaterial + ZR-Pferdemist-Silage (FH-SWF)	25,66	15,28	9,21	9,21	9,21	485,94	34,87		
	Pferdemist	31,19	15,27	11,62	11,62	11,62	42,81	42,81		
4	Impfischlamm + Pferdemist-Silage (Abel ReTec)	28,17	15,77	13,35	13,35	13,35	421	300,92	41,52	
	Impfischlamm + ZR-Pferdemist-Silage (Abel ReTec)	17,38	13,11	3,41	3,41	3,41	588,38	20,79		
	Impfischlamm + ZR-Pferdemist-Silage (FH-SWF)	25,66	15,28	9,21	9,21	9,21	417,74	34,87		
	Maistroh-ZR Fahrсило Oben 1. Viertel	23,30	25,73	3,66	3,66	3,66	4,21	556,65	26,97	
	Maistroh-ZR Fahrсило Oben 2. Viertel	23,35	25,05	5,32	5,32	5,32	4,42	540,97	28,67	
	Maistroh-ZR Fahrсило Oben 3. Viertel	16,85	25,95	8,57	8,57	8,57	4,38	468,85	25,42	
	Maistroh-ZR Fahrсило Oben 4. Viertel	21,99	29,65	7,30	7,30	7,30	4,12	477,32	29,28	
	Maistroh-ZR Fahrсило Unten 1. Viertel	27,15	33,90	3,80	3,80	3,80	4,09	678,39	30,95	
	Maistroh-ZR Fahrсило Unten 2. Viertel	21,49	27,89	2,76	2,76	2,76	3,80	676,80	24,25	
	Maistroh-ZR Fahrсило Unten 3. Viertel	25,45	32,63	3,45	3,45	3,45	3,92	627,75	28,89	
5	Maistroh-ZR Fahrсило Unten 4. Viertel	22,11	28,11	3,01	3,01	3,01	4,38	688,63	25,12	
	Rapsstroh-ZR-Silage	28,03	16,23	7,64	7,64	7,64	3,39	565,98	35,67	
	Rapsstroh-FR-Silage	33,71	18,66	8,42	8,42	8,42	3,87	479,50	43,44	
	Pferdemist-ZR-Silage	23,93	15,86	9,70	9,70	9,70	16,22	4,01	569,05	
	Pferdemist-FR-Silage	27,64	17,24	10,59	10,59	10,59	17,53	3,91	506,37	
	0-Variante Rapsstroh	40,69	15,16	14,05	14,05	14,05	11,45	5,28	283,77	
	Rapsstroh 60g/kg oTS	39,30	15,76	11,32	11,32	11,32	5,62	305,32	50,81	
	Rapsstroh 120g/kg oTS	36,77	14,69	10,40	10,40	10,40	10,99	5,49	371,97	
	0-Variante Maisstroh	29,95	23,60	3,48	3,48	3,48	4,60	3,77	489,97	
	Maisstroh 60g/kg oTS	28,75	23,21	4,06	4,06	4,06	6,81	3,90	525,65	
6	Maisstroh 120g/kg oTS	26,91	22,61	3,87	3,87	3,87	4,09	521,54	30,78	
	0-Variante Gerstenstroh	46,75	23,87	7,79	7,79	7,79	6,15	5,39	391,72	
	Gerstenstroh 60g/kg oTS	44,74	25,37	6,90	6,90	6,90	4,40	405,53	52,03	
	Gerstenstroh 120g/kg oTS	42,65	22,97	6,21	6,21	6,21	4,64	427,36	49,56	
	0-Variante Weizenstroh	43,62	27,88	7,30	7,30	7,30	7,96	3,60	455,73	
	Weizenstroh 60g/kg oTS	41,91	28,53	7,40	7,40	7,40	9,79	3,69	445,17	
7	Weizenstroh 120g/kg oTS	42,06	29,23	7,06	7,06	7,06	3,70	470,72	49,12	
	Klee gras frisch + Gerstenstroh	40,64	24,43	6,15	6,15	6,15	9,56	5,19	553,86	
	Gelbsenf + Gerstenstroh	42,90	23,10	6,90	6,90	6,90	9,40	4,98	485,82	
	ZWH 4021 Vitalis Plus + Gerstenstroh	39,11	22,23	5,59	5,59	5,59	10,17	5,03	542,28	
	Sommerwicke frisch + Gerstenstroh	40,67	23,86	8,55	8,55	8,55	9,57	5,99	523,25	
	Proteingrass GM2 + Gerstenstroh	39,62	21,96	5,86	5,86	5,86	10,20	4,75	526,62	
8	Klee gras angewelkt + Gerstenstroh	39,72	21,68	11,99	11,99	11,99	5,31	560,90	44,44	
	Sommerwicke angewelkt + Gerstenstroh	36,64	20,37	5,76	5,76	5,76	9,85	6,15	539,30	
	Gerstenstroh	22,21	37,42	8,46	8,46	8,46	#DIV/0!	#DIV/0!	30,67	
	Gerstenstroh-Silage	45,04	21,36	9,75	9,75	9,75	6,78	571,11	54,79	

Tabelle 10 (Anhangtabelle A2): Gemittelte Werte der Sinnenprüfungen aus allen Versuchen (nicht enthalten Vorversuche mit Zwischenfrüchten)

Übersicht über alle Versuche									
Versuch	Probenbezeichnung	Buttersäure	Essigsäure	Erwärmung	Hefen	Schimmel	Gefüge	TS	
1	Körnermaisstroh (TS 35%)	0	2	1	2	1	1	35	
	Körnermaisstroh (TS 25%)	0	3	1	2	0	1	25	
	Körnermaisstroh Zuckerrübenmü (TS 35%)	0	3	0	0	0	1	35	
	Körnermaisstroh Zuckerrübenmü (TS 25%)	0	2	2	2	1	2	25	
	Körnermaisstroh Zuckerrübe grob (TS 35%)	0	2	0	1	0	0	35	
	Körnermaisstroh Zuckerrübe grob (TS 25%)	0	3	0	0	1	0	25	
	Gerstenstroh	0	2	0	0	1	0	0	30
	Gerstenstroh + Zuckerrübe	0	2	0	0	2	0	0	30
	Gerstenstroh + Zuckerrübe + Zuckerrübenblatt	0	2	0	0	1	0	0	35
	Gerstenstroh + Zuckerrübenblatt	0	2	0	0	1	0	0	30
2	Gerstenstroh + Futterrübe	0	2	0	1	0	0	30	
	Gerstenstroh + Futterrübe + Futterrübenblatt	0	2	0	1	0	0	35	
	Gerstenstroh + Futterrübenblatt	0	2	0	1	0	0	35	
	Pferdemist	2	2	1	1	1	2	35	
	Separatormaterial + Pferdemist-Silage (Abel ReTec)	1	2	1	1	0	2	35	
	Separatormaterial + ZR-Pferdemist-Silage (Abel ReTec)	1	2	1	1	0	2	35	
	Separatormaterial + ZR-Pferdemist-Silage (FH-SWF)	1	2	1	1	0	2	35	
	Pferdemist	2	2	1	1	1	2	35	
	Nachgärermaterial + Pferdemist-Silage (Abel ReTec)	1	2	1	1	0	2	35	
	Nachgärermaterial + ZR-Pferdemist-Silage (Abel ReTec)	1	2	1	1	0	2	35	
3	Nachgärermaterial + ZR-Pferdemist-Silage (FH-SWF)	1	2	1	1	0	2	35	
	Pferdemist	2	2	1	1	1	2	35	
	Impfischlamm + Pferdemist-Silage (Abel ReTec)	1	2	1	1	0	2	35	
	Impfischlamm + ZR-Pferdemist-Silage (Abel ReTec)	1	2	1	1	0	2	35	
	Impfischlamm + ZR-Pferdemist-Silage (FH-SWF)	1	2	1	1	0	2	35	
	Maisstroh-ZR Fahrсило Oben 1. Viertel	0	0	3	2	5	2	40	
	Maisstroh-ZR Fahrсило Oben 2. Viertel	0	0	3	3	2	4	25	
	Maisstroh-ZR Fahrсило Oben 3. Viertel	0	0	4	3	4	4	30	
	Maisstroh-ZR Fahrсило Oben 4. Viertel	0	0	4	3	4	4	25	
	Maisstroh-ZR Fahrсило Unten 1. Viertel	0	3	0	0	0	1	35	
4	Maisstroh-ZR Fahrсило Unten 2. Viertel	0	3	0	0	0	1	35	
	Maisstroh-ZR Fahrсило Unten 3. Viertel	0	2	0	2	5	2	35	
	Maisstroh-ZR Fahrсило Unten 4. Viertel	0	3	0	1	2	2	40	
	Rapsstroh-ZR-Silage	0	1	0	1	0	0	35	
	Rapsstroh-FR-Silage	1	1	0	1	0	0	35	
	Pferdemist-ZR-Silage	0	1	1	1	0	1	35	
	Pferdemist-FR-Silage	1	1	1	1	1	1	35	
	O-Variante Rapsstroh	1	0	1	0	1	0	35	
	Rapsstroh 60g/kg oTS	1	0	1	0	1	0	35	
	Rapsstroh 120g/kg oTS	1	0	1	0	1	0	35	
5	O-Variante Maisstroh	1	0	1	0	1	0	35	
	Maisstroh 60g/kg oTS	1	0	1	0	1	0	35	
	Maisstroh 120g/kg oTS	0	0	1	1	0	0	35	
	O-Variante Gerstenstroh	0	1	0	0	0	0	35	
	Gerstenstroh 60g/kg oTS	0	2	0	2	0	0	35	
	Gerstenstroh 120g/kg oTS	0	3	0	0	0	0	35	
	O-Variante Weizenstroh	0	2	0	0	0	0	35	
	Weizenstroh 60g/kg oTS	0	2	0	0	2	0	35	
	Weizenstroh 120g/kg oTS	0	2	0	0	2	0	35	
	Kleegras frisch + Gerstenstroh	1	1	0	0	1	0	0	35
6	Gelbsenf + Gerstenstroh	1	1	0	1	0	0	40	
	ZWH 4021 Vitalis Plus + Gerstenstroh	0	1	0	1	0	0	35	
	Sommerwicke frisch + Gerstenstroh	0	1	0	0	0	0	35	
	Progreen GM2 + Gerstenstroh	1	1	0	1	0	0	35	
	Kleegras angewelkt + Gerstenstroh	3	1	0	1	0	0	30	
	Sommerwicke angewelkt + Gerstenstroh	3	1	0	1	0	0	30	
	Gerstenstroh	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
	Gerstenstroh-Silage	1	2	0	0	1	0	0	45