



Hochschule Neubrandenburg
University of Applied Sciences

Fachbereich Agrarwirtschaft und
Lebensmittelwissenschaften

Fachgebiet Erneuerbare Energien

**Vergleichende Untersuchungen zur Methanausbeute
verschiedener Arten Sorghumhirse und Mais als
Substrate in Biogasanlagen**

Bachelorarbeit

Vorgelegt von: Franziska Krüger

1. Gutachter: Prof. Dr. agr. Ludwig Popp
2. Gutachter: Dr. Carsten Herbes

URN: urn:nbn:de:gbv:519-thesis2009-0232-7

Schwennenz, im Juni 2009

Inhaltsverzeichnis:

1.	Einleitung und Problemstellung	7
2.	Literaturteil.....	10
2.1.	Biogas	10
2.1.1.	Grundlagen der anaeroben Fermentation	11
2.1.2.	Verwendungsmöglichkeiten und Aufbereitung	13
2.1.3.	Biogasgewinnung NAWARO AG	14
2.2.	Substrate	15
2.2.1.	Nachwachsende Rohstoffe.....	15
2.2.2.	Substratbehandlung	17
2.2.3.	Substratbereitstellungskosten	18
2.3.	Mais	20
2.3.1.	Herkunft, Verbreitung und Produktion	21
2.3.2.	Standortansprüche	21
2.3.3.	Entwicklung	22
2.3.4.	Verwendungsmöglichkeiten.....	23
2.3.5.	Bestandesführung	23
2.4.	Sorghum-Hirse.....	26
2.4.1.	Herkunft, Verbreitung und Produktion	26
2.4.2.	Sorghum - Arten	27
2.4.3.	Standortansprüche	28
2.4.4.	Entwicklung	29
2.4.5.	Verwendungsmöglichkeiten.....	30
2.4.6.	Bestandesführung	30
3.	Material und Methoden	33
3.1.	Standortbeschreibung.....	33
3.2.	Bestandesführung	34
3.3.	Aussaat	35
3.4.	Sorten und Versuchsaufbau	36
3.5.	Methanpotenzial	37
3.5.1.	Methanpotenzial nach Weißbach	37
3.5.2.	Hohenheimer Biogasertragstest.....	38
4.	Ergebnisse	40
4.1.	Wachstum	40

4.1.1.	Bestandesdichte	40
4.1.2.	Bestandeshöhe	41
4.1.3.	BBCH – Stadien	44
	Boniturtermin 2	44
4.2.	Trockensubstanzgehalte.....	46
4.3.	Erträge	49
4.3.1.	Erträge Trockensubstanz	49
4.3.2.	Methanerträge	50
4.4.	Elektrische Leistung	52
5.	Vergleich Ertragspotentiale Mais und Sorghumhirsen	54
5.1.	Methanertrag	54
5.2.	Energieertrag	55
6.	Gegenüberstellung Produktionskosten Mais und Sorghumhirse	56
6.1.	Produktionskosten Sorghumhirse	56
6.2.	Produktionskosten Mais.....	57
7.	Auswertung	58
7.1.	Vergleich mit anderen Versuchsergebnissen	59
7.2.	Fehler bei der Versuchsdurchführung.....	60
8.	Diskussion & Ausblick.....	62
9.	Zusammenfassung.....	63
	Literaturverzeichnis	65
	Anhang	69

Abkürzungsverzeichnis:

Abb.	Abbildung
aw-Wert	active water
BGA	Biogasanlage(n)
BHKW	Blockheizkraftwerk
BSK	Bereitstellungskosten
C	Kohlenstoff
CCM	Corn Crob Mix
CH₄	Methan
Chem.	chemische
DAP	Diammoniumphosphat
EEG	Erneuerbare Energien Gesetz
EU	Europäische Union
FM	Frischmasse
FNR	Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.
FoTS	Fermentierbare organische Trockensubstanz
GRS	Gärreste
HBT	Hohenheimer Biogasertragstest
KH	Kohlenhydrate
LFA	Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei MV
LfL	Landesanstalt für Landwirtschaft
MO	Mikroorganismen
N	Stickstoff
NawaRo	Nachwachsende Rohstoffe
NL	Neue Landwirtschaft
oTS	organische Trockensubstanz
P	Phosphor
Pfl.	Pflanzen
pH	potentia hydrogeni
S	Schwefel
STABW	Standardabweichung
Tab.	Tabelle
TFZ	Technologie- und Förderzentrum
TM	Trockenmasse
TS	Trockensubstanz
UF	Unterfuß
Vgl.	Vergleiche

Abbildungsverzeichnis:

Abbildung 1: Entwicklung der Biogasanlagenzahl	7
Abbildung 2: Ende des Booms	7
Abbildung 3: Mais	9
Abbildung 4: Sorghumhirse	9
Abbildung 5: Methangärung schematisch	11
Abbildung 6: Nutzungsvarianten und Aufbereitungsschritte von Biogas	13
Abbildung 7: NAWARO- Prozess	14
Abbildung 8: Biogaserträge und Methanausbeuten	16
Abbildung 9: Berechnungsbeispiel Substratbereitstellungskosten	20
Abbildung 10: Entwicklungsstadien Mais, Teil 1/2	22
Abbildung 11: Entwicklungsstadien Mais, Teil 2/2	23
Abbildung 12: Sorghumhirsen: Ursprungs- und Anbauggebiete	26
Abbildung 13: Sudangras und Zuckerhirse	29
Abbildung 14: Niederschlagsmenge Gülzow 2008	33
Abbildung 15: Temperaturen Gülzow 2008	34
Abbildung 16: Kolbenprober	39
Abbildung 17: Bestandesdichte Staffelde	40
Abbildung 18: Feldaufgang	41
Abbildung 19: Bestandeshöhe Staffelde 27.08.2008	42
Abbildung 20: Unterschiede Bestandeshöhe graphisch	42
Abbildung 21: Bestandeshöhe Staffelde 15.09.2008	43
Abbildung 22: Bestandeshöhe Staffelde 30.09.2008	43
Abbildung 23: Mittlere BBCH-Stadien 27.08.2008 Staffelde	44
Abbildung 24: Mittlere BBCH-Stadien 15.09.2008 Staffelde	45
Abbildung 25: Mittlere BBCH-Stadien 30.09.2008 Staffelde	45
Abbildung 26: TS-Gehalte 27.08.2008 Staffelde	46
Abbildung 27: Mittlere TS-Gehalte 15.09.2008 Staffelde	47
Abbildung 28: TS-Gehalte 30.09.2008 Staffelde	47
Abbildung 29: Methanertrag in Staffelde nach Hohenheim	51
Abbildung 30: Methanertrag Staffelde nach Weißbach	52
Abbildung 31: Energiegehalt je ha in Staffelde	53
Abbildung 32: Vergleich Methanerträge je ha zwischen Sorghumhirsen und Mais	55
Abbildung 33: Vergleich Energieerträge je ha zwischen Sorghumhirsen und Mais	55
Abbildung 34: Vergleich Erträge Sorghumhirsen zu Mais 2004	59
Abbildung 35: Vergleich der TM-Erträge von Mais, Sorghumhirsen von 2004 bis 2006	60

Tabellenverzeichnis:

Tabelle 1: Zusammensetzung Biogas	12
Tabelle 2: Erträge	19
Tabelle 3: Silomais	24
Tabelle 4: Sorghumarten und -sorten	28
Tabelle 5: chem. Zusammensetzung Sudangras	31
Tabelle 6: chem. Zusammensetzung Zuckerhirse	31
Tabelle 7: Aussaatmenge und -stärke	35
Tabelle 8: Versuchsaufbau	36
Tabelle 9: Probenahmeplan	36
Tabelle 10: Trockensubstanz zur Ernte, 10/2008	48
Tabelle 11: Adjustierte TS-Erträge in dt/ha	49
Tabelle 12: Übersicht Ertragspotentiale Staffelde nach Hohenheim	50
Tabelle 13: Übersicht Ertragspotentiale Staffelde nach Weißbach	51
Tabelle 14: Übersicht Energiegehalte je ha in Staffelde	52
Tabelle 15: Produktionskosten Sorghumhirse Malchow	56
Tabelle 16: Produktionskosten Mais	57

Anlagenverzeichnis:

Bestandesdichte in Pfl./m ² 27.08.2008
Bestandeshöhe in Metern 27.08.2008
Bestandeshöhe in Metern 15.09.2008
Bestandeshöhe in Metern 30.09.2008
Trockensubstanzgehalte
Entwicklungsstadien nach BBCH 27.08.2009
Entwicklungsstadien nach BBCH 15.09.2008
Entwicklungsstadien nach BBCH 30.09.2008
Methanpotential nach Hohenheimer Biogasertragstest
Methanpotential nach Weißbach
Produktionskostendaten Staffelde
Produktionskosten Malchow

1. Einleitung und Problemstellung

Die Bedeutung der Energiegewinnung auf der Grundlage nachwachsender Rohstoffe nimmt durch die Endlichkeit fossiler Energieträger, sowie den hohen Energiepreisen und der anhaltenden Diskussion um den Klimawandel stetig zu. Die Politik hat diesen Trend erkannt und durch die Novelle des Erneuerbare-Energien-Gesetz von 2004 günstige Rahmenbedingungen, wie eine festgelegte Vergütung und Investitionszulagen, geschaffen. Vor diesem Hintergrund stiegen auch die landwirtschaftliche und die industrielle Biogasnutzung rapide an. Die Anzahl der Biogasanlagen bundesweit in 2006 betrug in etwa 2700, was einem Wachstum zum Vorjahr um 70% entspricht. (Fachverband Biogas e.V., 2006) Folgende Tabelle stellt den rasanten Anstieg der Anlagen von 1999 bis 2007 graphisch dar:



Abbildung 1: Entwicklung der Biogasanlagenzahl

(Quellen: Bundesumweltministerium (2007), Fachverband Biogas e.V. (2008); erstellt durch FNR)

Während im Jahr 2006 die Anzahl neu gebauter BGA noch ca. 800 betrug, waren es 2007 nur noch 211 neue Anlagen bundesweit. Das Ende des Biogas-Booms scheint erreicht, wie folgende Grafik verdeutlicht: (Financial Times, 2008)

Ende eines Booms

Neue Biogasanlagen in Deutschland

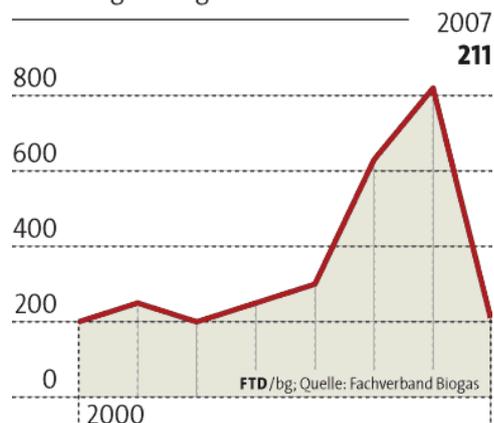


Abbildung 2: Ende des Booms

(Quelle: Financial Times, 2008)

Industriell produziertes Biogas, das zum größten Teil aus Methan und Kohlenstoffdioxid besteht, wird in einem biotechnologischen Prozess, der anaeroben Fermentation, gewonnen. Hierzu werden unter anderem Energiepflanzen benötigt, die als Kohlenstoffquelle für die Mikroorganismen dienen und somit Grundlage für die Gärung und das daraus entstehende Gas sind. Durch die Zunahme der Produktionskapazitäten und die immer noch sehr große Anzahl an BGA (im Jahr 2008 ca. 4000 in Deutschland laut joule-online.de) ist auch der Bedarf an Substraten sehr hoch. Dieser Bedarf wird größtenteils durch Energiepflanzen gedeckt, woraus sich das wachsende Interesse der Landwirtschaft am Energiepflanzenanbau erklärt. Als Spitzenreiter hat sich bei hofeigenen, sowie nicht-hofeigenen Anlagen Mais als Energiepflanze hervorgetan. Dies beruht auf den guten Eigenschaften, wie hohe Trockensubstanzen und Energieerträge, sowie den geringen Standortansprüchen und der grundsätzlichen Selbstverträglichkeit in der Fruchtfolge der Pflanze. [2]

Wegen der erhöhten Anbaukonzentration von Mais und den damit einhergehenden Nachteilen, müssen langfristig aber auch Alternativen bzw. Ergänzungen zum Mais gefunden werden, um z.B. die Fruchtfolge zu erweitern und den Schädlingsdruck zu mindern. Auch Einsparungen bei den Produktionsmitteln stehen für Biogas-Unternehmen im Vordergrund. Eine weitere Energiepflanze könnte hier Abhilfe schaffen: die Sorghumhirse. Durch ein ebenfalls sehr hohes Ertragspotential und fast identische Anbau-, Ernte-, und Konservierungsverfahren erscheint die Sorghumhirse als viel versprechendes Substrat für die Vergärung in BGA. Zusätzlich sind Sorghumhirsen trockentolerant, wassereffizient und spätsaatverträglich. [4] Ob die Erwartungen an Sorghumhirsen erfüllt werden können und welche Sorten sich besonders eignen, wird seit mehreren Jahren in Landessortenversuchen getestet. Auch der weltweit größte Biogasparkbetreiber, die NAWARO AG in Leipzig, beteiligte sich im letzten Jahr an der Suche nach geeigneten Sorghum-Sorten für ihre BGA.

Im Jahr 2008 wurden in Zusammenarbeit mit der Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern 3 Versuchsstandorte bestimmt, auf denen je ein Sorghum-Sortenversuch mit 32 Versuchspartzellen angelegt wurde.

Ziel des Versuches sollte es im Rahmen der vorliegenden Bachelorarbeit sein, sorten- und standortabhängig aussagekräftige Ergebnisse hinsichtlich der Erträge, der Siliereigenschaften und Methanausbeuten aufzuzeigen. So sollten Vor- und Nachteile der Sorghumhirsen zum altbewährten Substrat Maissilage ersichtlich werden. Auch auf die Kosten zur Substratbereitstellung von Sorghumhirse und Mais soll in dieser Bachelorarbeit eingegangen werden. Ziel des Versuches und dieser wissenschaftlichen Arbeit ist es, all diese Aspekte zu beleuchten und die Anbauwürdigkeit von Sorghumhirsen als Biogassubstrate zu beurteilen.



Abbildung 3: Mais
(Quelle: nawaro.ag)



Abbildung 4: Sorghumhirse
(Quelle: wildbolz.at)

2. Literaturteil

2.1. Biogas

Überall dort wo organisches Material anaerob in Anwesenheit von genügend Feuchtigkeit und geeigneten Temperatur- und Lichtverhältnissen abgebaut wird, entsteht das sogenannte Biogas. Wie der Name schon vermuten lässt, liegt diesem Phänomen ein biologischer Prozess zugrunde. Das Biogas lässt sich laut Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. in 4 Kategorien einteilen:

1. Faul- oder Sumpfgas (unkontrollierte Entstehung bei Wiederkäuern, in Gewässern oder aus Mist)
2. Klärgas (aus Kläranlagen)
3. Deponiegas (aus Deponien)
4. „Biogas“ (in speziellen Anlagen aus hauptsächlich pflanzlichem Material)

Wenn es im Folgenden nun um Biogas geht, so ist hiermit industrielles und kontrolliert produziertes, energiereiches Gas nach Punkt 4. gemeint. Neben Wind- und Solarenergie ist Biomasse (aus der u.a. auch Biogas entsteht) schon seit längerem einer der bedeutendsten Energieträger in Deutschland.

Je höher der Lebensstandard eines Landes, desto höher ist auch sein Energiebedarf. Seit dem 19. Jahrhundert wird dieser immer noch stetig steigende Bedarf von den 3 fossilen Energieträgern schlechthin gedeckt: Erdöl, Kohle und Erdgas. Da jedoch die Endlichkeit diese Energien abzusehen ist und die Bedrohung des Klimas und der Umwelt immer stärkere Ausmaße annimmt, müssen letztendlich alternative Energiequellen geschaffen werden. Zu diesen gehört auch die Gewinnung von Strom und Wärme aus Biomasse.

Der deutsche Bundesstag stellte schon 1990 fest, dass „die Bedrohung der Umwelt und des Weltklimas es notwendig machten, die Entwicklung, Erprobung und Anwendung von umweltfreundlichen Energietechnologien (...) voranzutreiben“ und setzte bereits 1991 den ersten Grundstein mit der Einführung des Stromeinspeisungsgesetzes. [14] Es regelt die Vergütung und gesicherte Abnahme von Strom, der aus erneuerbaren Energien stammt. Seit dem hat es immer wieder neue Regelungen gegeben um die Erzeugung von regenerativen Energien attraktiv zu machen. Das wichtigste Instrument bei diesem Vorhaben ist das Erneuerbare-Energien-Gesetz, dass erstmals im April 2000 in Kraft trat und im Juli 2004 novelliert wurde. Mit dieser Novelle wurden u.a. die Bedingungen für den Absatz des Stroms, der aus erneuerbaren Energien (z.B. aus Biogas) gewonnen wird, verbessert, wodurch sich der bereits erwähnte Boom erklärt.

Die Bundesregierung machte somit die Errichtung und den Betrieb einer BGA ökonomisch interessant und verfolgte gleichzeitig ihr Ziel eines nachhaltigeren Energiesektors in Deutschland. Bis 2010 soll der Anteil an regenerativen Energien am Gesamtenergiesektor 12,5 % betragen, bis 2020 sogar mindestens 20 %. Hierzu hat sich die deutsche Bundesregierung bei der Europäischen Union verpflichtet. [20]

Die Energieerzeugung aus Biomasse kann hierbei, neben Wind- und Solarenergie, einen wesentlichen Beitrag leisten.

2.1.1. Grundlagen der anaeroben Fermentation

Die anaerobe Fermentation ist ein biotechnologischer Prozess, der sich aus 4 Teilprozessen zusammensetzt: Hydrolyse, Acidogenese (Versäuerung), Acetogenese (Essigsäurebildung) und Methanogenese (Methanbildung).



Quelle: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Biogas - eine Einführung

Abbildung 5: Methangärung schematisch

(Quelle: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Biogas – eine Einführung)

In der ersten Phase, der Hydrolyse, werden komplexe Polymere wie Kohlenhydrate, Proteine und Lipide in einfache organische Bausteine, wie Zucker, Aminosäuren und Fettsäuren gespalten. Diese Spaltung erfolgt durch die Enzyme der an der Gärung beteiligten Mikroorganismen (im Folgenden MO). Voraussetzungen für diesen, als auch für die anderen Teilprozesse sind Sauerstoffabschluss und freie Wasserverfügbarkeit, sowie eine für die Mikroorganismen optimale Temperatur und ein optimaler pH-Wert.

Die bei der Hydrolyse entstandenen Zwischenprodukte werden dann in der Acidogenese „versäuert“, also zu Essigsäure, anderen niederen Fettsäuren, wie Propion- und Buttersäure, sowie zu Kohlendioxid,

Wasserstoff und Alkohol abgebaut. Dies geschieht durch säurebildende Bakterien, deshalb wird diese Phase umgangssprachlich auch als Versäuerungsphase bezeichnet. In der Acetogenese werden die Produkte der Acidogenese weiter abgebaut, so dass nur noch Essigsäure und Kohlendioxid vorliegen, in geringen Mengen auch Wasserstoff. Diese 3 Produkte kann man als Vorprodukte des Biogases bezeichnen. Die Phase wird auch als Essigsäurebildung beschrieben. In der Methanogenese entsteht dann aus dem Kohlendioxid und dem Wasserstoff Methan und Wasser, die Essigsäure wird in Methan und Kohlendioxid umgewandelt. (Vgl. [1] S. 25)

Das entstandene Biogas besteht aber nicht nur aus Methan, Kohlendioxid und Wasser, sondern weiterhin aus folgenden Komponenten: Stickstoff, Sauerstoff, Wasserstoff, Ammoniak und Schwefelwasserstoff.

Tabelle 1: Zusammensetzung Biogas

Komponente	Schwankungsbreite	Durchschnitt
Methan	45 – 70%	60%
Kohlendioxid	25 – 55%	35%
Wasserdampf	0 – 10%	3,1%
Stickstoff	0,01 – 5%	1%
Sauerstoff	0,01 – 2%	0,3%
Wasserstoff	0 – 1%	< 1%
Ammoniak	0,01 – 2,5 mg/m ³	0,7 mg/m³
Schwefelwasserstoff	10 – 30.000 mg/m³	500 mg/m³

(Quelle: [15])

Eine wichtige Milieubedingung des Prozesses ist der Sauerstoffabschluss, da die Methanbakterien nur ohne Sauerstoff ihren Stoffwechsel optimal betreiben können. Geringe Sauerstoffeinträge (die z.T. unvermeidbar sind, zum Beispiel um Schwefelwasserstoff zu neutralisieren) führen jedoch nicht zwangsläufig zu Schäden, da die Methanbakterien in Symbiose mit anderen fakultativ anaeroben MO des Prozesses leben, die den Sauerstoff verbrauchen, ehe er die Methanbakterien hemmt. Der optimale Temperaturbereich liegt für die meisten Methanbakterien zwischen 32 und 42°C.

Ebenfalls beim pH-Wert gibt es Unterschiede innerhalb des Prozesses. Die Bakterien der Hydrolyse und Acidogenese haben ihr pH-Optimum bei pH 4,5-6,3. Dagegen brauchen die Bakterien der Acetogenese und Methanogenese optimale pH-Werte zwischen 6,8-7,5. Die hydrolysierenden und essigsäurebildenden Bakterien sind allerdings toleranter, und arbeiten auch noch bei neutralen Milieubedingungen. Des-

halb sollte der pH-Wert in einem einstufigen Prozess den Anforderungen der Methanbildenden angepasst werden. Durch saure und alkalische Stoffwechselprodukte stellt sich der pH-Wert jedoch im Laufe des Prozesses selbst ein und ist somit auch ein guter Kontroll-Parameter für die Fermenter-Stabilität.

Bei der Nährstoffversorgung der Mikroorganismen sollte möglichst ein Kohlenstoff/Stickstoff-Verhältnis (im Folgenden C/N – Verhältnis) von 10 bis 30 und ein C:N:P:S – Verhältnis (Verhältnis Kohlenstoff/Stickstoff/Phosphor/Schwefel) von 600:15:5:1 eingehalten werden. Zudem muss im Prozess ausreichend freies Wasser für die MO vorhanden sein, da diese nur in flüssigen Medien überleben können (optimaler aw-Wert: 0,6-1) und es sollten keine Hemmstoffe, wie Schwermetalle, Schwefel oder Ammoniak (ab gewissen Konzentrationen) im Prozess entstehen oder enthalten sein (Vgl. [1] S. 26-28).

2.1.2. Verwendungsmöglichkeiten und Aufbereitung

Grundsätzlich gibt es zwei Wege mit dem gewonnenen Biogas zu verfahren: die Aufbereitung mit oder ohne CO₂-Abtrennung. Zur Erzeugung von Strom und Wärme ist diese Abtrennung nicht erforderlich, das Gas wird verbrannt oder in einem BHKW oder einer Brennstoffzelle in Strom und Wärme umgewandelt. Zur Erzeugung von Treibstoff und Heizgas ist vorher eine Abtrennung des CO₂ notwendig, um das Gas komprimieren zu können. Folgende Abb. verdeutlicht die grundlegenden theoretischen Zusammenhänge. (Vgl. [11] S. 78)

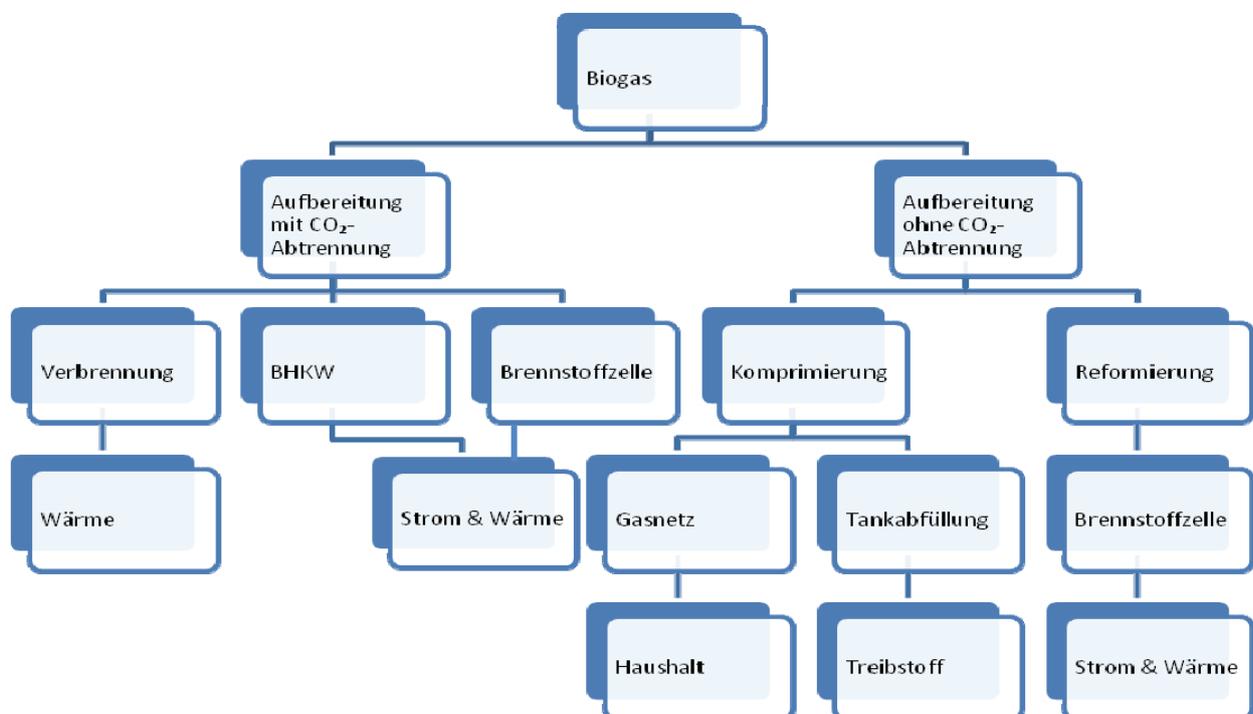


Abbildung 6: Nutzungsvarianten und Aufbereitungsschritte von Biogas

(Quelle: [11], verändert)

2.1.3. Biogasgewinnung NAWARO AG

Bei der Anlagentechnik von Biogasanlagen ist grundsätzlich zwischen Trocken- und Nassfermentation zu unterscheiden. Die Trockenfermentation ist ein Verfahren zur Vergärung bei dem der Fermenterinhalt einen Trockenmassegehalt von 20-40 % aufweist. Das zu vergärende Material ist also von stichfester Konsistenz und weder pump- noch fließfähig (Vgl. [1] S. 26). Bei Nassvergärungsverfahren kommen ausschließlich pumpfähige Substrate zum Einsatz, die meist eine Mischung aus Energiepflanzen, Flüssigdünger, Gärrest oder Prozesswasser sind. Der Trockensubstanzgehalt des Mischsubstrates kann bis zu 15 % betragen. Bei landwirtschaftlichen Biogasanlagen, wie auch bei industriellen BGA kommt meist das Nassvergärungsverfahren mit stehenden, vollaufmischenden Fermentern zum Einsatz, während es sich in der Praxis bei Anlagen zur Trockenvergärung oft noch um Pilotanlagen handelt (Vgl. [1] S. 39). Seit Anfang 2009 hat auch die NAWARO AG ihren ersten BioEnergie Park „Klarsee“ auf Trockenfermentation umgestellt. Es werden nun ausschließlich Maissilage und Getreideganzpflanzensilage in die Fermenter gefüttert. Aus den silierten Rohstoffen entsteht das Biogas, welches im BHKW verbrannt wird, um Strom zu erzeugen. Die anfallende Wärme wird genutzt um im hofeigenen Düngemittelwerk die Gärreste zu trocknen und in Pellets zu pressen. Folgende Abbildung zeigt den Prozess:

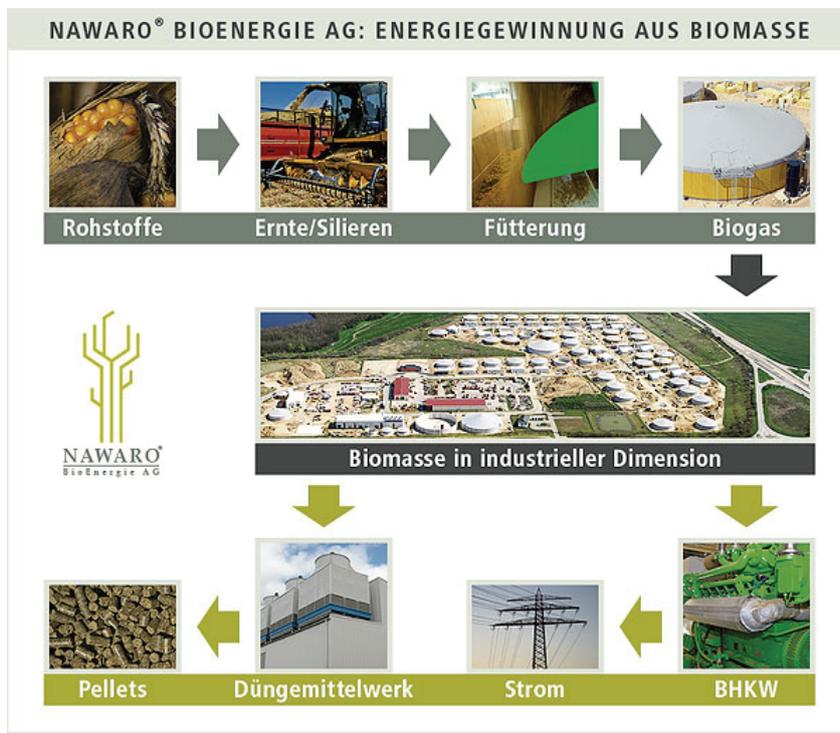


Abbildung 7: NAWARO- Prozess

(Quelle: nawaro.ag)

Im Energiepark Güstrow sollen es ab Inbetriebnahme im Frühjahr 2009 jährlich 380.000 t Maissilage, 1000 t Getreide, 60.000 t Getreide-Ganzpflanzensilage und 8000 t Grassilage sein. Das hier entstehende

Biogas wird, anders als in der Pilotanlage „Klarsee“, auf Erdgasqualität aufbereitet und als Biomethan ins Erdgasnetz eingespeist oder als Kraftstoff eingesetzt.

2.2. Substrate

Grundsätzlich lassen sich zur Biogaserzeugung alle organischen Substrate verwenden, mit dem Unterschied dass Lipide, Proteine und Kohlenhydrate unterschiedliche Energieerträge liefern. Den höchsten Methangehalt im Biogas erzielt die Stoffgruppe der Proteine mit ca. 70-75 %. Ebenfalls Lipide liefern Biogas von hoher Qualität mit einem Methangehalt von ca. 68-73 %. Kohlenhydrate liefern dagegen nur 50-55 % Methan im Gas (Vgl. [1] S. 30). Bei den Stoffgruppen handelt es sich hier allerdings um die verdaulichen Anteile (Rohprotein, Rohfett und Rohfaser) – in hölzernen Materialien enthaltenes Lignin zum Beispiel ist durch die meisten MO nicht oder nur schwer verwertbar. Im Hinblick auf die Eignung von Substraten ist darauf zu achten, dass nur aus der Trockenmasse und dort wiederum nur aus dem organischen Anteil (oTS) Biogas und letztendlich Methan entstehen kann. Deshalb ist der Anteil an oTS bezogen auf die Masse ein erstes Kriterium für die Substratauswahl von BGA.

2.2.1. Nachwachsende Rohstoffe

Laut des Gesetzes zur Neuregelung des Rechts der Erneuerbaren Energien im Strombereich 2008 (EEG) sind nachwachsende Rohstoffe im Sinne des § 27 Absatz 4 Nr. 2 Pflanzen oder Pflanzenbestandteile, die in landwirtschaftlichen, forstwirtschaftlichen oder gartenbaulichen Betrieben oder im Rahmen der Landschaftspflege anfallen und die keiner weiteren als der zur Ernte, Konservierung oder Nutzung in Biomasseanlagen erfolgten Aufbereitung oder Veränderung unterzogen wurden. Als nachwachsende Rohstoffe gelten also u.a. der Auswuchs von Wiesen und Weiden, Ackerfutterpflanzen, Knollen und Rüben, aber auch Kot und Harn einschließlich Einstreu von Nutztieren und Pferden (Vgl. [20], Positivliste). Demzufolge fällt der NawaRo-Bonus für Wirtschaftsdünger ebenso wie für speziell angebaute pflanzliche Rohstoffe an.

2.2.1.1. Wirtschaftsdünger

In landwirtschaftlichen BGA dienen häufig überwiegend tierische Exkrememente als Grundsubstrat. Flüssige Wirtschaftsdünger lassen sich aufgrund ihrer relativ niedrigen TS-Gehalte (Gülle: 7-11 % laut [1] S. 86) gut mit anderen Substraten kombinieren. Gülle gilt oft als „Basis-Substrat“ um eine stabile Fermentation zu gewährleisten, da sie die MO mit Nährstoffen und Spurenelementen versorgt. Zusätzlich wirkt Gülle durch einen pH Wert von 7-8 als Puffer beim Absinken des pH-Wertes (z.B. durch Versäuerung bei zu viel eingesetztem Getreideschrot) im Fermenter. Da fester Wirtschaftsdünger einen relativ hohen TS-Gehalt (20-32 % laut [1] S. 86) aufweist, muss dieser meist mit pumpfähigen Substraten, z.B. Schlempen,

verdünnt werden. Die Biogaserträge pro t Substrat sind bei Festmist deutlich höher als bei Gülle; bezieht man den Ertrag jedoch auf den oTS, so ergeben sich keine großen Abweichungen mehr. Ebenso unterscheidet sich der Methangehalt des Biogases aus verschiedenen Wirtschaftsdüngern nicht wesentlich voneinander und liegt laut [1] bei durchschnittlich 60 Vol.-%.

Während früher fast ausschließlich Gülle und Mist von Rindern, Schweinen oder Hühnern in hofeigenen Anlagen verwendet wurden, werden heutzutage zunehmend andere Biomassen beigemischt, zum Beispiel eigens angebaute Energiepflanzen.

2.2.1.2. Energiepflanzen

Besonders große, industrielle BGA haben, anders als hofeigene BGA, keine Nutztiere, deren Kot und Harn ohne Kosten anfallen. Hier herrscht also ein Bedarf nach anderer Biomasse, die den gewünschten Energieertrag bringt. Die für den energetischen Einsatz angebaute Pflanzen, werden auch Energiepflanzen genannt. Als besonders geeignet hat sich Maissilage als Biogassubstrat hervorgetan. Andere Energiepflanzen, die ebenfalls hohe TS und oTS-Substanzen pro Masse, und somit hochwertiges Biogas liefern, sind z.B.: Grassilage, Getreide-Ganzpflanzensilage, Sudangras, Futterrüben und Zuckerhirse.

Die Biogas- und Methanausbeuten sind substratspezifisch, wie folgende Abbildung verdeutlicht:

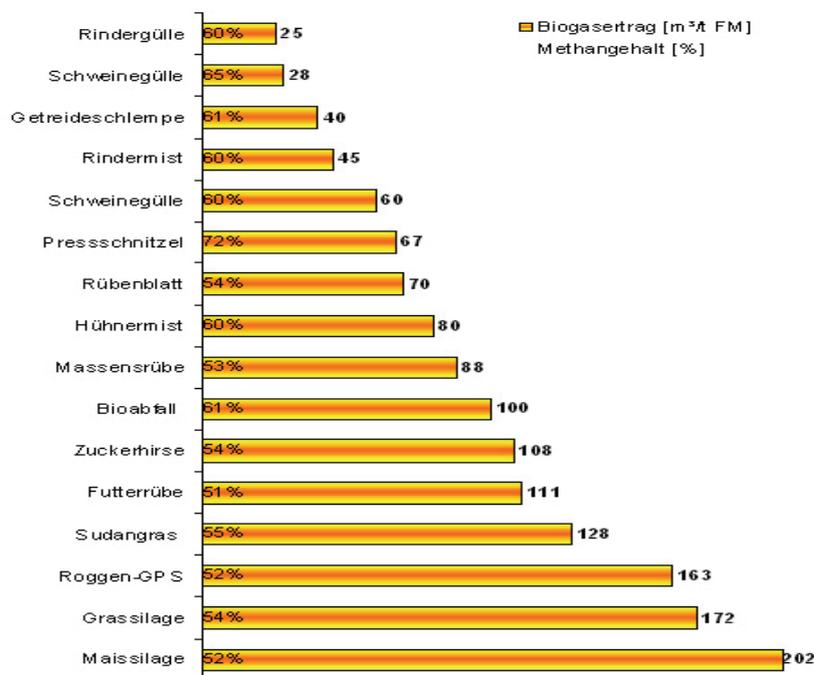


Abbildung 8: Biogaserträge und Methanausbeuten

(Quelle: [16])

Anbauziele aller Energiepflanzen sind vorrangig hohe Biogaserträge und gute Methanausbeuten. Maissilage liefert laut der Grafik durchschnittlich 202 m³ Biogas pro Tonne Frischmasse, während es bei Su-

dangras 128 m³ und bei Zuckerhirse nur noch 102 m³ Biogas sind. Anders verhält es sich in der Theorie bei den Methanausbeuten – Zuckerhirse liefert 54 % und Sudangras sogar 55 % Methan im Gas, während es bei Maissilage 52 % sind. Wie und ob sich diese Werte im praktischen Versuch widerspiegeln, soll später im Versuchsteil ausführlich beschrieben werden. Weitere Ziele, die beim Energiepflanzenanbau angestrebt werden sind eine gute Silierbarkeit und eine schnelle und weitestgehende Vergärung der Pflanzen im Fermenter.

2.2.2. Substratbehandlung

Das Handling von Wirtschaftsdüngern ist relativ unproblematisch, da diese bei kleinen Hofanlagen direkt der BGA zugeführt werden können. Aufwände für Anbau, Ernte, Konservierung und Lagerung entfallen. Eine Hygienisierung ist nur bei Gemeinschaftsanlagen und großen Industrieanlagen, wie der NAWARO AG, notwendig. Bei Energiepflanzen dagegen sind Hygienisierungen nicht erforderlich, jedoch fallen Kosten und Aufwände u.a. für die Lagerung und Konservierung an. Die Lagerung erfolgt relativ unproblematisch in abgedeckten Silos und nach Abschluss der Silierphase kann die Silage direkt in der BGA verwendet werden. Die Silierung von zum Beispiel Mais oder Sorghumhirsen beginnt meist schon bei der Ernte: während die Energiepflanzen gehäckselt werden, wird Siliermittel untergemischt. Es handelt sich meist um Ameisensäure, die den pH-Wert zur Schaffung eines MO-unfreundlichen Klimas absenkt und somit deren unkontrollierte Vermehrung verhindert. Dadurch wird die Silage nicht schon im Silo weitgehend durch MO umgesetzt und die meiste Energie bleibt erhalten.

2.2.2.1. Siliertechnik

Die Anforderungen an die Siliertechnik sind im Laufe der Zeit stark gestiegen. Ziel der Silierung ist es, auf dem Weg vom Feld bis in die BGA möglichst wenig Energie zu verlieren, da dies Einfluss auf die Gesamtwirtschaftlichkeit der Anlage haben kann. Die verfahrenstechnisch unvermeidbaren Verluste liegen bei 6-17 %, wo hingegen die vermeidbaren Verluste durch Fehler beim Siliermanagement bis 37 % betragen können. Die Hauptziele bei der Lagerung und Konservierung sind es, eine möglichst große Oberfläche (durch Häckseln) zu schaffen, um eine hohe Abbaubarkeit zu gewährleisten. Ferner sollte die Biomasse gut verdichtet sein, zum einen um Transportkosten zu sparen, zum anderen um eine Nacherwärmung im Silo zu verhindern. Ein weiteres Ziel der Verdichtung ist es, das Eindringen von Sauerstoff zu verhindern (z.B. beim Anschnitt), da sonst mikrobiologische Prozesse ablaufen würden, die Energie zehren. Der Stoffwechsel von Gärschädlingen (Fäulnisbakterien, Schimmelpilze, Hefen) soll also unterdrückt werden, um so viel Energie wie möglich in der Biomasse zu halten, bis sie im Fermenter kontrolliert vergären kann. Nicht zuletzt will man die Bildung von Hemmstoffen (Stoffwechselprodukte der MO) verhindern, um die empfindliche Biologie im Fermenter nicht negativ zu beeinflussen. Weiterhin kann es bei Silagen minderer Qualität zu Schaumproblemen im Fermenter kommen. Untersuchungen zeigten, dass sich die

Gasausbeuten bei verdorbenen Silagen um 30-50 % verringern können. Ursachen hierfür sind vor allem die schon erwähnten Energieverluste durch vorzeitiges „Veratmen“ der Biomasse und zum anderen die Hemmung des Prozesses durch unerwünscht eingebrachte Mykotoxine. Des Weiteren sind verdorbene Silagen auf Dauer auch ein gesundheitliches Problem für den Anlagenbetreiber. Abschließend lässt sich sagen, dass sich all diese Parameter zur Verbesserung der Siliertechnik und somit der Wirtschaftlichkeit untereinander beeinflussen, so dass Einzelmaßnahmen allein meist nicht ausreichen (Vgl. [12]).

2.2.2.2. Siliermittel

Siliermittel sind Hilfsmittel, um unerwünschte Gärprozesse im Silo zu verhindern. Für Biogaspflanzen gibt es, anders als für Pflanzen zur Nutztierfütterung, erst wenige dieser Mittel auf dem Markt. Unter günstigen Bedingungen reichen eine luftdichte Abdeckung und eine gute Verdichtung aus, um den aeroben Abbau der Biomasse zu verhindern. Durch die dann einsetzende Milchsäuregärung wird der pH-Wert soweit gesenkt, dass Verderbniserreger gehemmt werden. Reicht die natürliche Säure jedoch nicht aus, so ist der Einsatz von Siliermitteln erforderlich, um eine gute Silagequalität zu erzielen. Luzerne zum Beispiel ist relativ schwer silierbar, da sie wenig leicht verdauliche Zucker und zusätzlich noch Proteine als puffernde Substanzen enthält, die die pH-Absenkung erschweren. Grassilage dagegen weist günstige Zucker- und Proteingehalte auf, verfügt aber über wenig Nitrat, was der Fermenterbiologie zuträglich wäre, aber bei der Silierung nicht unbedingt von Vorteil ist, da Nitrat in Kombination mit einem sauren pH-Wert hilft Clostridien (Biogas-Bakterien) zu hemmen. Mais und Sorghumhirsen haben viele leicht vergärbare Zucker und wenig Proteine, wodurch sie ausgezeichnete Voraussetzungen zur Silierung liefern. Nach Anbruch des Silos kann es jedoch zu aeroben Nachvergärungen und zur Nacherwärmung kommen. Bei der Nachvergärung werden genau die Stoffe verbraucht, die für den Biogasprozess benötigt werden, nämlich leicht verfügbare KH und organische Säuren. Deshalb ist der Einsatz eines Siliermittels auch bei Mais und Sorghumhirsen zu empfehlen, besonders wenn die BGA und das Silo nicht an ein und demselben Ort sind (Vgl. [12]).

2.2.3. Substratbereitstellungskosten

In BGA die mit Energiepflanzen betrieben werden, stellen die Substratkosten einen wesentlichen Anteil an den Gesamtkosten dar. Aufgrund des hohen Wassergehaltes vieler Substrate, ist der Bedarf nach eben diesen sehr hoch. Um diesen hohen Bedarf zu decken, aber gleichzeitig noch ökonomisch zu wirtschaften, ist die Betrachtung der Bereitstellungskosten von ausgewählten Substraten von großer Bedeutung [32]. Die Bereitstellungskosten, die maximal aufgewendet werden dürfen, lassen sich auf folgendem Wege errechnen: man zieht von den Erträgen aus der Verwertung eines Substrates in der Biogasanlage die Kosten der Biogaserzeugung, der Verstromung und der Ausbringung des Gärrestes ab und es bleibt der Betrag über, den man für die Bereitstellung des Substrates maximal aufwenden kann. Aus

diesem Betrag müssen sich nun die Kosten der Beschaffung (bzw. Produktion bei eigener Bereitstellung), der Ernte, Lagerung und Konservierung, sowie der Entnahme und des Transportes zur BGA decken lassen. Der Substrateinsatz ist dann sinnvoll, wenn die Erträge aus der Verwertung die Kosten der Verwertung und Bereitstellung übersteigen [33].

Will man nun die Bereitstellungskosten (im Folgenden BSK) eines Substrates berechnen, benötigt man die gesamten Kosten für Anbau, Ernte, Transport, Einlagerung, Lagerung, Auslagerung und Vorlage der Silage an der BGA, sowie die Flächenkosten und Gemeinkosten. Einfach ausgedrückt sind die BSK laut [11] = variable + fixe Kosten in €/ha. Die spezifischen Bereitstellungskosten setzen sich ebenfalls aus variablen und fixen Kosten zusammen, beziehen sich aber auf den Eurobetrag pro Tonne Frischmasse. Für Mais gibt [11] einen Wert von 42 €/t FM und für Hirse einen Wert von 32 €/t FM an. Die Unterschiede lassen sich auf die verschiedenen Erträge zurückführen, wie folgende Tabelle zeigt:

Tabelle 2: Erträge

Substrat in t FM/ ha	Ertrag niedrig	Ertrag mittel	Ertrag hoch
Mais	40	50	60
Zuckerhirse	50	68	86

(Quelle: [11], verändert)

Wie jedoch schon in Kapitel 2.2.1.2. erwähnt, lässt sich aus Zuckerhirse insgesamt weniger Gas gewinnen als aus Mais, die Methanerträge sind aber fast identisch.

Die Substratbereitstellungskosten sind also im Wesentlichen von vielen verschiedenen Faktoren abhängig. Eine theoretische Zusammenstellung dieser Faktoren zeigt folgendes Berechnungsbeispiel der LFA Gülzow:

		Richtwerte - Deckungsbeiträge		Mais				
Stand 08/2008		Mais		Silomais nach Ertragserwartung				
Merkmal	ME	Ertragsgruppe						
		sehr gering	gering	mittel	hoch	sehr hoch		
Ertrag brutto	dt OS/ha	300	340	380	425	465		
Ertrag netto	dt OS/ha	270	306	342	383	419		
Ertrag Trockensubstanz	dt TS/ha	86	98	109	122	134		
Saatgut	€/ha	106	120	120	138	138		
Stickstoff	kg N/ha	100	100	125	125	125		
Phosphor	kg P ₂ O ₅ /ha	48	54	61	68	74		
Kali	kg K ₂ O/ha	135	153	171	191	209		
Magnesium	kg MgO/ha	36	41	46	51	56		
Kalk	dt CaO/ha	3	3	4	4	4		
Düngung	€/ha	228	246	289	312	330		
Herbizide	€/ha	51	51	69	69	69		
Sonstiges	€/ha							
Pflanzenschutz	€/ha	51	51	69	69	69		
Summe Direktkosten	€/ha	387	419	480	522	539		
Ausgewählte Arbeiterledigungskosten								
Zeit-spanne	Arbeitsgang		Anzahl der Arbeitsgänge					
HE	Gülle ausbr. Schleppschlauch	Anzahl						
	Pflügen	Anzahl	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
	Eggen mit Saatbettkombination	Anzahl	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
	Einzelkornsaat von Mais	Anzahl	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
FB	Pflanzenschutz ab Feld	Anzahl	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
	Mineraldüngung	Anzahl	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
SG	Silomais ernten im Lohn	Anzahl	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
	Scheibeneggen, Stoppelpbearb.	Anzahl	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
Rest	Mineraldüngung	Anzahl	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
Arbeitszeitanpruch	AKh/ha	7,0	7,0	7,7	7,7	8,9		
Variable Maschinenkosten	€/ha	157	157	169	169	181		
Variable Kosten	€/ha	544	576	649	691	720		
weitere zuordenbare Kosten	€/ha	285	298	334	336	352		
Lohnansatz	€/ha	91	91	100	100	116		
Zuordenbare Kosten abz. Erlöse	€/ha	920	964	1.083	1.126	1.189		
Futter	€/dt OS	3,41	3,15	3,17	2,94	2,84		
Trockensubstanz	€/dt T	10,65	9,85	9,90	9,20	8,88		
Energie (NEL)	Ct/10 MJ	16	15	15	14	14		
Energie (ME)	Ct/10 MJ	10	9	9	9	8		
Faktorlieferung								
Energie	MJ	56.160	63.648	71.136	79.560	87.048		
	NEL/ha							
	MJ ME/ha	93.227	105.657	118.088	132.072	144.502		

Abbildung 9: Berechnungsbeispiel Substratbereitstellungskosten

(Quelle: [9])

2.3. Mais

Mais (*Zea mays* L.) ist ein einjähriges Getreide der Familie der Gräser (Poaceae/Gramnieae). Mais hat einen markigen, bis 4 cm dicken und 1-4 m hohen Stängel, an dem zweizeilig die über 4 cm breiten langen Blätter sitzen. Die tief in die Erde reichenden Wurzeln bilden zusätzlich Stelzwurzeln aus den ersten oberirdischen Halmknoten. Mais ist eine einhäusige Kulturpflanze mit endständigen männlichen Rispen und weiblichen Kolben an den Blattachsen. Nach der Fremdbefruchtung entwickeln sich in den Kolben sortenabhängig 8-18 Kornreihen mit je 25-50 Körnern (Vgl. [21], S. 16).

2.3.1. Herkunft, Verbreitung und Produktion

Mais zählt zu den ältesten Kulturpflanzen der Erde und wurde schon von den Indios kultiviert. Im 16. Jahrhundert wurde er durch die Spanier nach Europa gebracht und wird heute weltweit angebaut. Er steht weltweit an 3.Stelle aller angebauten Getreidearten, ist in vielen Ländern Grundnahrungsmittel und in Europa und Nordamerika ein wichtiges Viehfutter, da es durch Silierung auf Vorrat haltbar ist. Es gibt ca. 50.000 Sorten der C4-Pflanze. Mais enthält 71 % Stärke im Korn, davon 28 % Amylose und 72 % Amylopektin und allgemein weniger Proteine als die meisten anderen Getreide (Vgl. [21], S. 16). Während in den Entwicklungsländern Mais noch größtenteils als Nahrungsmittel verwendet wird, liegt die Bedeutung in den Industrieländern auf der Verwendung als Nutztierfutter und seit jüngerer Zeit auch als Biomasse für BGA. Laut FAO (Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation) wurden 2007 weltweit 784,8 Mio. t Mais geerntet. Die größten Maisproduzenten sind u.a. die USA, China und Brasilien. Da Mais ein Sommergetreide ist, erfolgt die Aussaat Mitte April bis Anfang Mai, die Keimtemperatur beträgt 7-9°C. Geerntet wird der Mais in Deutschland je nach Art und Verwendungszweck Ende September bis Anfang November. Zu den Maiskrankheiten gehören u.a. Keimlings-, Wurzel-, Stängel-, und Kolbenfäule, sowie Maisbeulenbrand und Maisrost. Als Schädlinge gelten u.a. Ackerschnecken, Maiszünsler und Maiswurzelbohrer (Vgl. [2], S. 99).

Grundsätzlich sollten beim Anbau von Energiemais Sorten gewählt werden, die wenig anfällig sind (z.B. gegen Maisbeulenbrand, Stängelfäule usw.) und eine gute Standfestigkeit haben. Die Sorten sollten weiterhin eher spätere und höher wüchsige sein und eine gute Masseleistung haben, sowie eine TS von 30 % sicher erreichen (Vgl. [11], S. 46).

2.3.2. Standortansprüche

Boden

Mais hat grundsätzlich geringe Bodenansprüche – bevorzugt sind mittlere bis schwere Böden. Die Bodenstruktur ist von größerer Bedeutung als die Bodenart, so sollten die Böden nicht verkrusten und sich im Frühjahr leicht erwärmen (Vgl. [2], S. 95).

Temperatur

Laut KTBL braucht Mais zur Keimung eine Temperatur von 8-10°C. Zum Auflaufen werden temperaturabhängig 6-35 Tage benötigt und eine Wassersättigung des Bodens von 40-80 %. Die Frostverträglichkeit in der Jugendentwicklung beträgt bis zu -4°C. Dagegen ist im Herbst die Frostempfindlichkeit vom TS-Gehalt abhängig – je höher die TS, desto höher ist auch die Toleranz gegen Frost (Vgl. [2], S.95).

Niederschlag

Das Mindestmaß an Niederschlag zwischen Mai und September liegt bei 250 mm insgesamt. Es kommt jedoch auf die Verteilung an: 50-80 mm sind im Mai/Juni nötig und 100-150 mm vom Rispenschieben bis ca. 2 Wochen nach der Blüte im Juli/August. Herrscht bei der Blüte Trockenheit, so vermindert das die Kornbildung. Nach der Blüte ist der Niederschlag von geringerer Bedeutung und muss nur noch 60-80 mm betragen. Dagegen gewinnen Sonnenscheindauer und relative Luftfeuchte an Bedeutung, da diese Parameter ausschlaggebend für die Assimilation sind (Vgl. [2], S. 95).

2.3.3. Entwicklung

Zur einheitlichen Codierung der phänologischen Entwicklungsstadien von Pflanzen wurde der BBCH-Code eingeführt. Die Abkürzung BBCH steht offiziell für die Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und Chemische Industrie. Die BBCH-Codes lauten wie folgt:

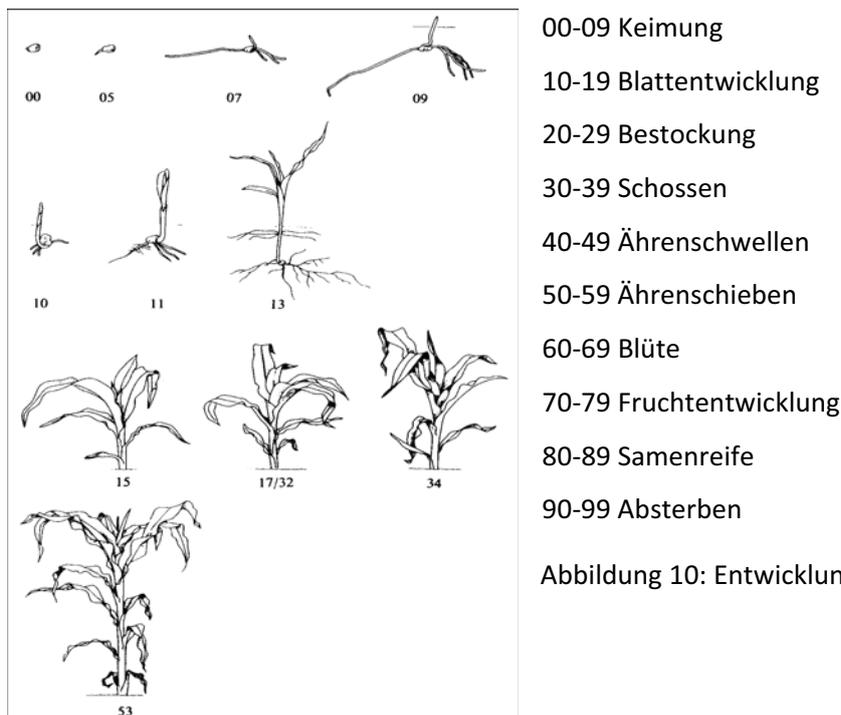


Abbildung 10: Entwicklungsstadien Mais, Teil 1/2

Abbildung 11: Entwicklungsstadien Mais, Teil 2/2

(Quelle: [35])



2.3.4. Verwendungsmöglichkeiten

Es lassen sich 4 Produktionsrichtungen von Mais unterscheiden: Körnermais, CCM, Silomais und Biogasmals. Diese werden zu Lebensmitteln bzw. Lebensmittelzutaten, als Futtermittel, oder als Energiepflanze verwendet. Als Lebensmittelzutat wird aus dem Körnermais unter anderem das wertvolle Maiskeimöl gewonnen. Weiterhin werden aus dem Maismehl Backwaren und Knabber - Produkte (Erdnussflips) und aus den Maiskörner u.a. Cornflakes und andere Cerealien hergestellt. Aus dem Körnermais lässt sich auch die Maisstärke gewinnen, sowie modifizierte Stärke und unzählige Produkte der Stärkeverzuckerung.

Als Futtermittel für die Nutztierhaltung dient der Silomais. Hierbei wird die gesamte Pflanze gehäckselt und eingelagert. Dieser Verwendungszweig nimmt momentan mehr als 2/3 der Weltmaisernte ein [34].

Die Nutzung von Mais als Energiepflanze und nachwachsenden Rohstoffen umfasst die Verwertung in BGA zur Strom- und Wärmeerzeugung aber auch die Verarbeitung zu Biokraftstoffen (Bioethanol). Weiterhin lässt sich aus Maisstärke „essbares Geschirr“ herstellen, welches jedoch hitzeempfindlich ist. Maisspindelgranulat findet Anwendung als Ölbindemittel und Kleintierstreu und die gesamte Maispflanze wird als kompostierbares Füllmaterial verwendet [34].

2.3.5. Bestandesführung

Für die Verwendung von Mais in BGA bieten sich allgemein höher wüchsige, spätere Sorten mit guter Standfestigkeit, hoher Masseleistung und einem sicheren Erreichen der TS von 30 % an (Vgl. [2] S. 96).

Bodenbearbeitung und Aussaat

Eine gleichmäßige und günstige Bodenstruktur ist für Mais von großer Bedeutung. Zum einen für eine gute Durchwurzelbarkeit und zum anderen eine dadurch bedingte gute Wasser- und Nährstoffversorgung. Bei schweren Böden sollte im Herbst gefurcht werden, bei leichten, sandigen Böden ist die Frühjahrsfurche sinnvoll. So werden organische Reste der Vorfrucht besser in den Boden eingearbeitet und die Gehaltsstufe des Bodens wird besser. Wird der Boden konservierend bearbeitet, so sollte eine 6-8 cm tiefe Durchmischung erfolgen, da die verbleibende Mulchschicht Wind- und Wassererosion gut vorbeugt. Ab Bodentemperaturen von 10°C kann die Aussaat erfolgen, der Zeitraum variiert von Standort zu Standort zwischen Mitte April und Mitte Mai. Die optimale Tiefe der Kornablage ist in 4-6 cm unter dem Boden erreicht. Für Silomais sind die maximalen Bestandesdichten 7-11 Pflanzen/m².

Düngung

Der Düngebedarf von Energiepflanzen wie Mais ist grundsätzlich abhängig von der Gehaltsstufe des Bodens (Gehaltsstufen A – E, wobei Böden mit der Gehaltsklasse E die meisten Nährstoffe besitzen). Der Hauptnährstoffbedarf von Mais liegt in dem Zeitraum Ende Juni bis Mitte August. Es müssen bei der Nährstoffbilanz jedoch immer abtransportierte und auf dem Feld verbliebene Nährstoffe miteinbezogen werden. So bleiben bei Silomais 2-2,5 t TS/ha auf dem Feld zurück. Bei Körnermais/CCM sind es sogar 5-7 t TS/ha (Vgl. [2] S. 96). Die durchschnittlichen Nährstoffentzüge für Silomais stellt folgende Tabelle dar:

Tabelle 3: Silomais

	Phosphor	Kalium	Stickstoff
Entzug in kg/t	0,7-1,1	2,9-4,2	3-4

(Quelle: [2] S.97 verändert)

Die Düngung mit organischen Stoffen (Gülle, Gärrest) sollte 2-4 Wochen vor der Saat erfolgen, wobei der Anteil an nicht verrottetem Stroh möglichst gering ausfallen sollte. Es ist wichtig, dass bei unzureichender Gehaltsstufe des Bodens der organischen Düngung eine Grunddüngung mit Kalium, Phosphor und Magnesium vorausgeht. Als Startmenge an Stickstoff benötigen die Mais-Jungpflanzen eine Menge von 30 kg/ha. Zwischenzeitlich sollte der Boden auf seinen N-Gehalt untersucht und bei Unterschreiten der N-Min-Werte nachgedüngt werden. Der Hauptbedarf an Stickstoff wird erforderlich, wenn das Masewachstum beginnt. Deshalb ist eine Splittung der N-Gabe (z.B. zur Aussaat und zu Bestandschluss) sinnvoll. Die Gabe von Phosphor verbessert die Kältetoleranz der Jungpflanzen, während ein Mangel zu dunkelgrünen Blättern mit violetten Spitzen führt. Eine Grunddüngung mit Kalium ist wichtig für die Bildung von Zucker und Stärke im Mais und trägt auch zu einer guten Standfestigkeit bei. Mais hat gene-

rell einen hohen Kalium-Bedarf. Ein Mangel führt zu vergilbten und absterbenden Blättern und zu geringer Standfestigkeit. Die Gabe von Magnesium ist wichtig, da Magnesium Teil des für die Fotosynthese wichtigen Chlorophylls ist. Der Bedarf ist aber nur gering und kann mit Gülle oder Gärresten gedeckt werden. Bei einem akuten Mangel kann zu Bittersalzen (Magnesiumsulfate $MgSO_4$) gegriffen werden, die bei Bedarf auf das Feld gebracht werden (Vgl. [2] S. 96-98).

Pflanzenschutz

Vorzugsweise wird die chemische Unkrautbekämpfung eingesetzt, wobei sich die beste Langzeitwirkung aus einer Kombination von Boden- und Blattherbiziden erreichen lässt. Zur ökologischen Schädlingsbekämpfung eignen sich vorbeugende Maßnahmen z.B. eine weite Fruchtfolge, ausreichende Pflanzabstände und auch Häckseln und Unterpflügen des Strohs.

Ernte und Aufbereitung

Die Ernte erfolgt mit einem Feldhäcksler wenn der Mais eine TS von 28 – 35 % aufweist, sich also in der Teigreife befindet. Eine Unterschreitung der optimalen TS führt zu erhöhter Sickersaftbildung im Silo und somit zu Energieverlusten. Eine Überschreitung der TS dagegen bewirkt, dass Masseverluste auftreten und die Gasausbeute ebenso durch zunehmende Verholzung negativ beeinflusst wird. Die optimale Häcksellänge für eine gute Silierung sind ca. 4-6 mm [2]. Die Erträge von Mais sind abhängig von Witterung, Sorte und Standort und werden stark durch Niederschlag beeinflusst:

Ertragsniveau Silomais (TS 35 %)

Niedrig: 35-45 t FM/ha

Mittel: 45-55 t FM/ha

Hoch: 55-65 t FM/ha

2.4. Sorghum-Hirse

Laut Seibel, Steller, 1993 werden unter dem Sammelnamen Hirse (echte Hirse) verschiedene Getreidearten zusammengefasst, die kleine, runde Karyopsen ohne Längsfurche (Millet) ausbilden.

Die Sorghumhirsen sind C4-Gräser und eine Pflanzengattung der Familie der Süßgräser (Poaceae). Sie ähneln im Pflanzenbau dem Mais und erreichen Wuchshöhen von bis zu 5 m. Ihre mit Mark gefüllten Halme können an den Knoten Seitentriebe bilden. Die Rispen sind 10 bis 60 cm lang und tragen Ästchen mit jeweils 2 Ährchen, wobei das obere eine zwittrige und das untere zwei männliche Blüten bildet. Die Körner der Hirse sind rund, von weißer, gelblicher bis roter Farbe und können 4-5 mm dick sein.

2.4.1. Herkunft, Verbreitung und Produktion

Die kleinkörnige Getreideart hat Ihren Ursprung in tropischen bis subtropischen Gebieten nahe Äquatorial - Afrikas. Dort werden die Sorghumhirsen auch heute noch angebaut, neben großen Anbaugeländern wie Südamerika, Indien und China. In den Entwicklungsländern ist es bis heute das wichtigste Brotgetreide und dient weiterhin als Futtermittel für Nutztiere.

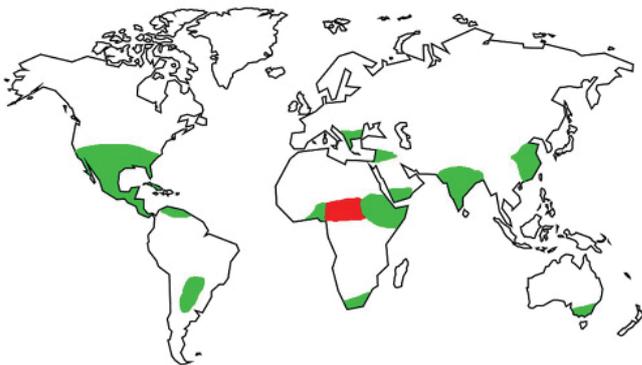


Abbildung 12: Sorghumhirsen: Ursprungs- und Anbaugeländer

(Quelle: [40])

Die Bedeutung der meisten Hirsearten liegt in der anspruchslosigkeit, der Toleranz gegen Trockenheit und der kurzen Vegetationsdauer. Heutzutage nimmt Sorghum hinter Mais den 4. Platz der wichtigsten Körnerfrüchte weltweit ein. Die Getreideart gilt als anspruchslos, da sie selbst bei Dürre noch Körner ausbildet.

2.4.2. Sorghum - Arten

Laut [22] gibt der gemeinsame Sortenkatalog für landwirtschaftliche Pflanzenarten der EU einen Überblick über die Arten- und Sortenvielfalt von Sorghumhirsen. Die zugelassenen Arten wurden in drei Gruppen unterteilt:

- Sorghum bicolor (Zuckerhirse)
- Sorghum sudanese (Sudangras)
- Sorghum bicolor x Sorghum Sudanese Hybride

Insgesamt gibt es 20 – 30 Arten, von denen aber nur die 3 oben genannten landwirtschaftlich interessant erscheinen. Die bekannten Arten lassen sich auch in bestimmte Typen unterteilen:

Zuckerhirse-Typ

Bei der Zuckerhirse (die zur Art Sorghum bicolor gehört) handelt es sich um einen Typ mit hohem Zuckergehalten im Stängel, der jedoch eher verringerte TS-Gehalte aufweist [4]. Zuckerhirse wird vor allem für die Biogas-Produktion angebaut, deshalb sind die Anbauziele wie bei Mais hohe Erträge, ein hoher Energiegehalt in der Biomasse und eine gute Silierbarkeit [2]. Typische Sorten sind *Super Sile 20* und *Sucrosorgho*.

Futterhirse-Typ

Futterhirse kann ein- oder mehrschnittig geerntet und direkt auf der Weide verfüttert, zu Heu getrocknet oder im Silo gelagert werden. Eine typische Futterhirse ist das Sudangras (auch: Sorghum sudanese), das häufig aufgrund der guten Futtermitelegenschaften zur Viehhaltung angebaut wird. Futterhirse kann sich unterschiedlich an die Tageslänge anpassen (Langtag – Kurztag). Weiterhin gibt es Sorten mit reduziertem Lignin - Anteil, was eine gute Voraussetzung zur mikrobiellen Verwertung in z.B. BGA darstellt [4]. Typische bekannte Sorten mit denen schon einige Praxiserfahrungen vorliegen sind *Susu* und *Lussi*.

Faserhirse-Typ

Dieser Hirse-Typ ist hochwüchsig und hat einen hohen Cellulose - Anteil. Eine typische Sorte ist *Goliath*, die eine enorme Wuchshöhe von 3-4 m erreicht [25]. Eine Besonderheit der Faserhirsens ist es, dass sie nach Ende der Totreife noch als Brennmaterial für Holzverbrennungsanlagen dienen kann [24].

Bei der Sortenwahl gibt es einige Kriterien, die für die Verwendung aller Sorghumhirsen in BGA zu beachten sind: es gilt, dass Sorten mit einer hohen Biomassewüchsigkeit, hohen Energie- und Methanerträgen sowie einer schnellen und weitgehenden Vergärung gewählt werden sollten.

Weiterhin sind eine gute Blattgesundheit und eine hohe Standfestigkeit bei der Sortenwahl von Bedeutung (Vgl. [2] S. 141, 131).

Einen Überblick über die in den Versuchen verwendeten Sorghumarten und -sorten gibt folgende Tabelle.

Tabelle 4: Sorghumarten und -sorten

	Zuckerhirse-Typ	Futterhirse-Typ	Faserhirse-Typ
Sorte			
Super Sile 20	x		
Goliath			x
Susu		x	
Sucrosorgho 506	x		
Lussi		x	
Rona	x		

(Quelle: eigene Erhebung)

2.4.3. Standortansprüche

Sorghum stellt keine besonderen Bodenansprüche, Staunässe ist allerdings zu vermeiden. Ebenso sind kalte Böden für den Anbau nicht geeignet und es sollte darauf geachtet werden, Böden zu wählen die gut durchwurzelbar sind, so dass ein gutes Wurzelwachstum gewährleistet ist. Optimal sind tiefgründige Lehm- bzw. sandige Lehmböden in mäßig feuchten Lagen [26, 27].

Sorghum hat seinen Ursprung in Afrika und ist in vielen trockenen, warmen und gemäßigten Klimagebieten als Futter- und Weidepflanzen verbreitet. Demzufolge sind sie als C4-Pflanzen wärmeliebend. Für die Keimung sind Bodentemperaturen von 12-15°C nötig. Laut KTBL beträgt die Mindestwärmesumme zwischen Mai und September 2500 Std und die mittlere benötigte Tagestemperatur 16°C. Sorghumbestände sind während der gesamten Wachstumsphase temperaturabhängig, da erst ab Temperaturen von 15-16°C die Substanzproduktion einsetzt. Extrem hohe Temperaturen von 35°C führen zu einer maximalen Fotosyntheseleistung. Sorghum ist frostempfindlich – Temperaturen knapp über 0°C können junge Sorghumbestände anhaltend schädigen [22].

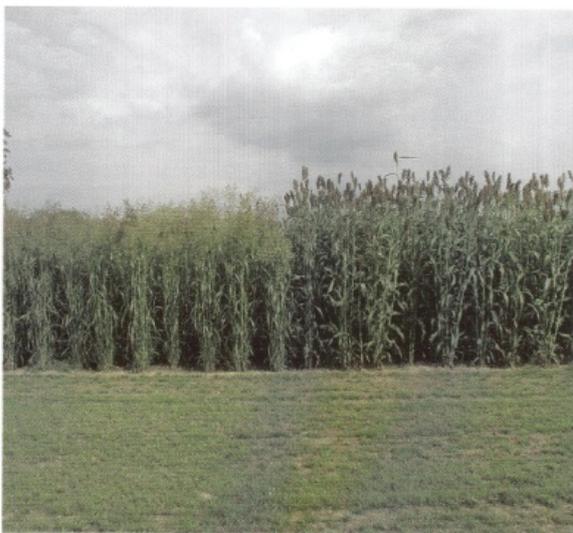
Dagegen sind Sorghumhirsen wesentlich trockenresistenter als Mais. Die Pflanze kann bei Bedarf ihr Wachstum in Trockenzeiten unterbrechen und bei Wasserverfügbarkeit das Wachstum wieder aufnehmen. Ein Anbau in Trockenlagen ist also möglich.

Sowohl Sorghum sudanese, als auch Sorghum bicolor haben ein langsames Jugendwachstum, deshalb sollten immer Standorte mit einer geringen Unkrautbelastung gewählt werden, um die Entwicklung nicht zu gefährden. Beide Arten sind mit sich selbst verträglich und stellen keine besonderen Ansprüche an die Vorfrucht. Allerdings ist durch die schon erwähnte zögerliche Jugendentwicklung der Unkrautdruck höher, so dass eine Vorfrucht gewählt werden sollte, die das Feld möglichst unkrautfrei räumt [2]. Die Vorfruchtwirkung von Sudangras und Zuckerhirse ist ähnlich wie bei Mais – sie eignen sich gut zur Auflockerung von getreidestarken Fruchtfolgen, da keine getreidetypischen Fußkrankheiten bekannt sind [2].

Beim Anbau von Sorghum speziell für die Biogaserzeugung sind die Ziele und Qualitätsansprüche immer die Gewinnung von hohen Biomasseerträgen und hier wiederum gute TS-Erträge mit einem hohen organischen Anteil im Erntegut, sowie eine gute Silierbarkeit des Materials.

2.4.4. Entwicklung

Zur einheitlichen Codierung der phänologischen Entwicklungsstadien von Sorghumhirsen wird z.T. ebenfalls der BBCH-Code verwandt. Zur Orientierung, z.B. bei den Bonituren des Sortenversuchs wurden die BBCH-Stadien von Mais herangezogen (siehe Kap. 2.3.3.). Die genaue Einstufung unterschiedlicher Sorghum-Genotypen in ein Reifeschema wie es das FAO-System bei Mais ermöglicht, scheint jedoch schwierig. Tendenziell bildet Sorghum sudanese weniger Biomasse als Sorghum bicolor, daher auch die höhere Aussaatdichte (Vgl. Kap. 2.4.6. Bodenbearbeitung und Aussaat). Sorghum sudanese neigt eher dazu, Bestockungstriebe auszubilden als Sorghum bicolor [22].



Typischer Habitus von *S. sudanense* (links) und *S. bicolor* (rechts)



Bestockungstriebe bei *Sorghum bicolor*

Abbildung 13: Sudangras und Zuckerhirse

(Quelle: [22])

2.4.5. Verwendungsmöglichkeiten

Die Möglichkeiten zur Nutzung von Sorghumhirsen sind sehr vielfältig. In den Jahren 2007/2008 wurden weltweit rund 66 Mio. t Sorghum angebaut [28]. Etwas weniger als die Hälfte davon zur Verwertung als Futtermittel, da Sorghum ähnlich wie Mais gut als ganze Pflanze verfüttert werden kann. Dazu muss die gehäckselte Pflanze aber siliert oder getrocknet bzw. frisch verfüttert werden [29]. Die weltweit größten Exporteure von Sorghum sind die USA (Produktion von 63,5 Mio. t in 1998 durch Hybridzüchtung und ideale Bewässerung/Düngung) und Argentinien, die Anbauflächen hingegen sind in Afrika und Asien ausgedehnter [28].

Für viele Menschen in den Steppengebieten Afrikas und Asiens ist Sorghum die wichtigste Nahrungsgrundlage. Dafür werden dort hauptsächlich trockenstresstolerante, kleinwüchsige Genotypen angebaut, deren Körner dann zu verschiedenen Nahrungsmitteln verarbeitet werden. Die Körner eignen sich eher weniger zum Backen, dafür aber für Brei, Grütze oder Fladen, oder auch zur traditionellen Bierherstellung. Außerdem können sie zur Herstellung glutenfreier Lebensmittel für Menschen mit Zöliakie genutzt werden.

Aufgrund des zum Teil sehr hohen Cellulose- und Ligningehalts in Sorghumhirsen können einige Arten zur Faserherstellung verwendet werden.

Seit jüngerer Zeit hat sich der Blickwinkel auf die Sorghumhirsen erweitert – besonders die Sorten Sorghum bicolor und Sorghum sudanese gelten als Energiepflanzen und somit als Biomasse für die Erzeugung von Strom in BGA. Aus vielerlei Gründen werden an spezielle Hirsearten hohe Erwartungen gestellt, um bald Mais als Biogassubstrat zu ergänzen. Laut einem Bericht der Fachzeitschrift Nature (06/07) will China bis zum Jahr 2020 rund 15 % des gesamten Treibstoffbedarfs aus nachwachsenden Rohstoffen gewinnen und deshalb verstärkt Sorghum statt Mais anbauen [30]. So wird auch die Ethanol-Herstellung aus Sorghum einen zukünftig bedeutenden Industriezweig darstellen.

2.4.6. Bestandesführung

Bodenbearbeitung und Aussaat

Für Zuckerhirse und Sudangras empfiehlt es sich im Herbst 25-30 cm tief zu pflügen und/oder im Frühjahr 10-15 cm tief zu grubbern. Vor der Aussaat sollte eine flache Bodenbearbeitung erfolgen. Die Aussaat sollte bei Temperaturen von mindestens 12°C erfolgen und kann ab Anfang/Mitte Mai durchgeführt werden. Sudangras ist frostempfindlich. Die Saatstärke sollte für Zuckerhirse bei 25-30 Pflanzen pro m² und für Sudangras bei 30-35 kg/ha liegen. Laut [22] können bei Sorghum Bicolor 25 Körner/m² und bei Sorghum Sudanese in etwa 120-150 Körner/m² ausgesät werden. Der Reihenabstand bei beiden Arten sollte 0,25 – 0,75 m betragen (Vgl. [2] S. 132, 143).

Düngung

Für die Entwicklung von Zuckerhirse und Sudangras besteht kein Grunddüngungsbedarf, wenn der Boden ausreichend mit Phosphor, Kalium und Magnesium versorgt ist (Gehaltsklasse C). Dabei können Nährstoffentzüge im Rahmen der Fruchtfolgedüngung ergänzt werden. Laut [26, 27] belaufen sich die Entzüge durchschnittlich auf:

Tabelle 5: chem. Zusammensetzung Sudangras

	Phosphor	Kalium	Magnesium	Calcium
Entzug in kg/ha	15-20	110-180	15-30	30-35

Tabelle 6: chem. Zusammensetzung Zuckerhirse

	Phosphor	Kalium	Magnesium	Calcium
Entzug in kg/ha	10-20	90-160	20-25	30-50

(Quelle: [26, 27])

Zur Bemessung der mineralischen Stickstoffgabe sollten die N-min-Werte des Bodens mit einbezogen werden. Der N-Sollwert beträgt bei einem Ertragsniveau von 140 dt TS/ha in etwa 170 kg/ha (Sudangras) bzw. 180 kg/ha (Zuckerhirse) [26, 27]. Laut [2] liegt der N-Sollwert sowohl bei Zuckerhirse als auch bei Sudangras bei 200 kg/ha (bei mittlerem Ertragsniveau von 15 t TS/ha). Die Düngung des Bestandes mit Stickstoff fördert stark das vegetative Wachstum und bringt somit hohe Biomasseerträge. Neben Stickstoff ist Kalium der wichtigste Nährstoff für Zuckerhirse und Sudangras – dementsprechend ist auch der Kaliumbedarf entsprechend hoch.

Organische Düngungen vertragen Sudangras und Zuckerhirse grundsätzlich gut und können diese auch verwerten, da die Hauptwachstumsphase in die Sommermonate fällt. Wird aber ausschließlich organisch gedüngt so ist es sinnvoller die Ausbringung der Gülle auf zwei Termine zu verteilen (z.B. zur Aussaat und vor Bestandsschluss), da es sonst zu N-Verlusten kommen kann. Als Orientierung kann allgemein die Düngeempfehlung von Mais herangezogen werden. Laut [22] benötigt Sorghum etwa zwei Drittel der Nährstoffmenge, die Mais erfordert.

Pflanzenschutz

Durch das zögerliche Jugendwachstum beider Arten sind ein Einsatz von Herbiziden und ein gutes Pflanzenschutzmanagement zur Unkrautbekämpfung ratsam. Laut [22] ist der Einsatz verschiedener Mais-Herbizide prinzipiell möglich, muss jedoch beantragt werden. Seit 2007 sind 2 Mittel für Sorghum zugelassen – Gardo Gold und Mais-Banvel WG. Gardo Gold wirkt gegen Schadhirsens, Rispengräser und Un-

kräuter; Mais-Banvel WG hat ein Wirkungsspektrum gegen die Gemeine Zaunwicke, die Acker-Winde, Gänsefußarten und den Winden-Knöterich [22]. Ertragswirksame Schäden könnten weiterhin durch Insekten wie Blattläuse, Halmfliege, Gallmücke und Maiszünsler verursacht werden [26, 27].

Ernte und Aufbereitung

Für Zuckerhirse und Sudangras ist der Zeitpunkt der Ernte abhängig vom TS-Gehalt. Dieser sollte zwischen 28 und 35 % liegen, was einem Reifestadium zwischen Milchreife und Teigreife der Körner entspricht. Dieser Zeitpunkt ist abhängig von Standort, Sorte und Witterung und kann zwischen Mitte September und Ende Oktober liegen. Die Ernte kann mit einem Feldhäcksler durchgeführt werden. Für eine optimale Silierung sollte die Häcksellänge 3-5 cm betragen. Die Zuckerhirse wird primär ein schnittig genutzt, bei bestimmten Sorten, sowie bei Sudangras ist aber auch eine zweischnittige Ernte möglich. Der erste Schnitt erfolgt dann Mitte/Ende Juli, der zweite Ende Oktober/ Anfang November. Die Niederschlagsmenge beeinflusst in starkem Maße die Ertragszuwächse. Im Folgenden sind die Ertragsniveaus von Zuckerhirse und Sudangras dargestellt [2].

Ertragsniveau Zuckerhirse (22 % TS)

Niedrig: 35-55 t FM/ha
Mittel: 55-80 t FM/ha
Hoch: 80-90 t FM/ha

Ertragsniveau Sudangras (27 % TS)

- *Niedrig:* 30-44 t FM/ha
 - *Mittel:* 44-67 t FM/ha
 - *Hoch:* 67-82 t FM/ha

3. Material und Methoden

3.1. Standortbeschreibung

Rachow

In Rachow lag die Ackerzahl des Bodens bei 42. Die Skala möglicher Werte der Ackerzahl (auch Ackerwertzahl, oder Bodenpunkte genannt) reicht von 7 (sehr schlecht) bis 100 (sehr gut). Eine Ackerzahl von 50 bedeutet, dass der Boden in der Lage ist, die Hälfte des Ertrages eines optimalen Bodens zu bringen. Demzufolge ist der Boden in Rachow mittlerer Güte.

Malchow

In Malchow handelte es sich um einen sehr sandigen Standort mit einer Ackerzahl unter 20. Flächen mit einer Ackerzahl unter 20 gelten allgemein als landwirtschaftlich kaum noch nutzbar. Durch die hohe Trockenstresstoleranz von Sorghum entwickelte sich der Bestand jedoch unerwartet gut, im Gegensatz zu Maisbeständen die unter der Trockenheit im Mai und Juni stark litten.

Staffelde

Der Standort Staffelde konnte von der Bodengüte her mit Malchow verglichen werden. Auch hier handelte es sich um einen sehr sandigen Boden mit einer Ackerzahl unter 20.

Klima

Das Klima im Jahr 2008 war an allen Standorten, auch auf Grund der Nähe zueinander, sehr ähnlich. Größere Auffälligkeiten blieben aus. Die Abbildung 14 zeigt die Verteilung der Niederschläge über das Jahr am Standort Gülzow. Für Staffelde muss erwähnt werden, dass die Niederschläge hier meist etwas geringer ausfallen. Auch eine Vorsommertrockenheit Anfang Mai ist besonders in der Region Uecker-Randow nicht ungewöhnlich. Dies beeinflusst vor allem die Aussaat und die Auflaufbedingungen.

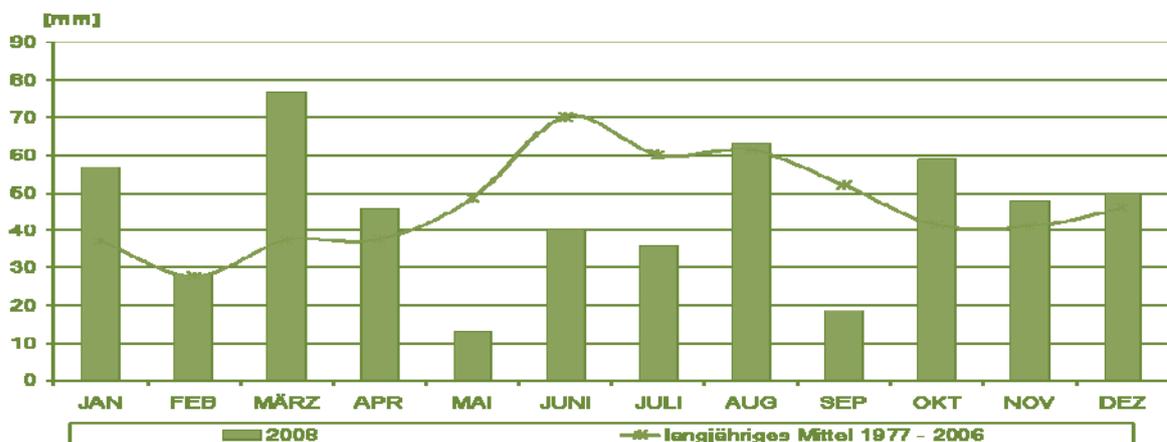


Abbildung 14: Niederschlagsmenge Gülzow 2008

(Quelle: [23])

Der Temperaturverlauf im Jahr 2008 war ebenfalls wenig auffällig. Dies zeigt die Abbildung 15. Besonders den wärmeliebenden Sorghumhirsen waren die hohen Temperaturen sehr zuträglich.

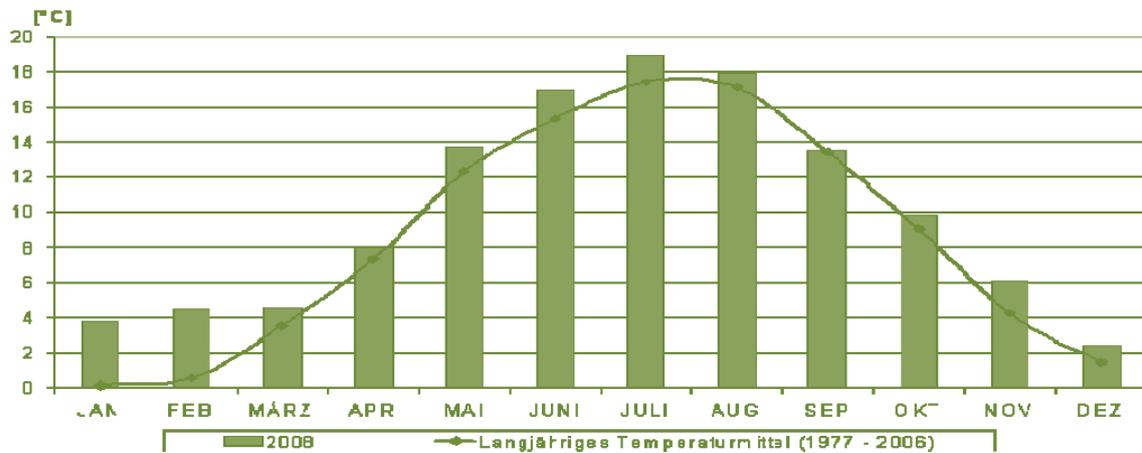


Abbildung 15: Temperaturen Gülzow 2008

(Quelle: [23])

3.2. Bestandesführung

Die Bestandesführung erfolgte standortspezifisch und wurde durch die jeweiligen Betriebe selbst geplant und durchgeführt. Somit müssen theoretisch nicht nur verschiedene Standortfaktoren für die Auswertung berücksichtigt werden, sondern auch noch verschiedene Anbauverfahren.

Da bis zur Fertigstellung der Arbeit keine Informationen aus Rachow geliefert wurden, soll dieser Standort bei der Bestandesführung nicht berücksichtigt werden.

Malchow

In Malchow wurde als Vorfrucht Winterroggen angebaut, der Ende April als Grünroggen gehäckselt wurde. Im Anschluss kam ein Tiefengrubber mit ca. 15 cm Arbeitstiefe zum Einsatz. Kurz vor der Aussaat erfolgte die Saatbettbereitung mit einer Arbeitstiefe von 5 cm.

Die Sorten wurden am 30.05.2008 mit einer Einzelkornsämaschine gelegt. Die Saattiefe wurde auf 7 cm festgelegt, da eine Ausnutzung der Restfeuchte des Bodens unbedingt nötig war um überhaupt einen Aufgang zu erzielen. Aussagen zur Aussaatstärke werden separat beschrieben.

Die Düngung der Bestände erfolgte zum einen vor der Saat mit 100 kg DAP je Hektar. Diese Menge enthält 18 kg reinen Stickstoff in Form von Ammoniumnitrat und 46 kg Phosphor in Form von P_2O_5 .

Am 10.06.2008 erfolgte eine weitere Gabe Stickstoff über 440 kg Kalkammonsalpeter. Dies entspricht ca. 120 kg reinen Stickstoff. Davon lagen ca. 60 kg in Form von Ammonium und 60 kg in Form von Nitrat vor.

Um die Bestände frei von Unkräutern zu halten, wurde vor der Saatbettbereitung 3 l Glyphos- Totalherbizid auf die bis dahin gewachsenen Unkräuter ausgebracht. Weiterhin wurde am 19.06.2008 im 3-Blatt-Stadium der Bestand mit 3 Liter des Herbizids Gardo Gold je ha gespritzt. Vor der Ernte Ende September erfolgten laut Angaben des Betriebes keine weiteren Maßnahmen.

Staffelde

Für den Betrieb in Staffelde liegen keine genauen Zeitangaben vor, daher soll nur die chronologische Abfolge der Bestandesführung wiedergegeben werden. Nach der Ernte der Vorfrucht erfolgten eine Tiefenlockerung der Fahrgassen und die anschließende Bearbeitung mit einer Scheibenegge.

Das aufgelaufene Unkraut wurde untergepflügt. Im Frühjahr erfolgte die Saatbettbereitung.

Nach der Aussaat am 28. Mai 2008 wurden auf dem Feld Steine gesammelt.

Zur mineralischen Düngung wird vom Betrieb nur angegeben, dass eine solche durchgeführt wurde. Mengen und Form bleiben offen. Es wurde ferner angegeben, dass die Fläche mit Gärresten und Entenmist gedüngt wurde. Mengen werden jedoch auch hier nicht genannt.

Laut Angaben des Betriebsleiters erfolgte der Pflanzenschutz im Voraufbau. Dazu wurden 3 l je ha Gardo Gold und 0,8 l je ha Curol B gespritzt.

3.3. Aussaat

Die Aussaaten der einzelnen Sorten erfolgten in unterschiedlicher Menge und Stärke, welche durch die Züchter empfohlen wurden. Die Aussaatmengen waren aber an den 3 Standorten jeweils gleich. Tabelle 7 gibt einen Überblick. Die Aussaattermine lagen wie bereits beschrieben in Staffelde und Malchow Ende Mai. Am Standort Rachow erfolgte aufgrund der späträumenden Vorfrucht die Aussaat erst am 16.06.2008.

Tabelle 7: Aussaatmenge und -stärke

Prüfglied	Aussaatmenge	Errechnete Aussaatstärke in kfk/m ²
Sucrosorgho	6,9	20
Goliath	7,5	18
Lussi	12	41
Rona 1	6	20
Super Sile 20	6	25
Susu	25	99

(Quelle: [23])

3.4. Sorten und Versuchsaufbau

Die Versuche auf den Standorten Rachow, Malchow und Staffelde wurden je als Langparzellenanlage mit Standardausgleich (Sorte Sucrosorgho 506) angelegt. 4 Wiederholungen einer Sorte standen jeweils hintereinander (siehe Tabelle 8) – ein Randomisieren erfolgte nicht. Die 6 verschiedenen Sorten stammten u.a. von den Züchterfirmen Syngenta, Caussade und Saatenunion.

Tabelle 8: Versuchsaufbau

	Sucrosorgho 506	Goliath	Lussi	Sucrosorgho 506	Rona 1	Super Sile 20	Susu	Sucrosorgho 506
Whd. D	1 S	2	3	4S	5	6	7	8S
Whd. C	1 S	2	3	4S	5	6	7	8S
Whd. B	1S	2	3	4S	5	6	7	8S
Whd. A	1S	2	3	4S	5	6	7	8S

(Quelle: NAWARO AG, verändert)

Die Probenahmen und Bonituren erfolgten an 4 Terminen. Der Plan ist aus Tabelle 9 zu entnehmen.

Tabelle 9: Probenahmeplan

Nr.	Zweck	Menge	Versendung	Analyse	Bemerkung
1	Methanpotential Weißbach	500 g pro Parzelle, Mischprobe á 500 g	Verbringung in NAWARO BioEnergie Park	Blgg Deutschland	
2	Methanpotential Hohenheim	3000 g pro Parzelle, Mischprobe á 3000 g	Verbringung in NAWARO BioEnergie Park	500 g trockenes Material an Ho- henheim	Häckseln und Trocknen bei 60°C
3	Silivversuche	60 kg (Sorte Lussi + eine andere)	Firma addcon selbstabholend	addcon	Standort Staffelde an 2 Terminen
4	Pflanzenentwicklung	Bonitieren jeder Parzelle		Monitoringver- antwortliche	Überprüfen & Dokumentation BBCH
5	Ertragsentwicklung	1 m ² pro Parzelle		Monitoringver- antwortliche	Wiegen FM-Ertrag sowie Bestimmung TS

(Quelle: NAWARO AG, verändert)

Vor den ersten Probenahmen wurden die Parzellen etikettiert. Bei der Dokumentation der Pflanzenentwicklung wurden die Bestandeshöhe und die Bestandesdichte bestimmt. Zur Bestandesdichte wurden die Pflanzen pro m² bzw. auf 1,11 laufende Meter gezählt. Hierbei wurde an allen Standorten jeweils ein Parzellenabschnitt ausgewählt der möglichst repräsentativ erschien. Bei den ersten Probenahmen wurde an den 3 Standorten noch keine Ertragsbestimmung durchgeführt – es wurden jeweils nur 3,5 kg Frischmasse pro Sorte, nicht pro Parzelle, geerntet.

3.5. Methanpotenzial

Interessant für BGA-Betreiber ist in erster Linie der Methangehalt des Biogases, da allein aus dem Methan die Energie gewonnen wird. Die erzielbare Ausbeute an Methan hängt im Wesentlichen von der Zusammensetzung der Substrate, also den Anteilen an Lipiden, Proteinen und Kohlenhydraten (KH), ab. Schwer abbaubare Stoffe wie Lignin, Cellulose oder Faserstoffe behindern die Methanproduktion. Es muss im Allgemeinen die Biogasproduktion von der Methanproduktion unterschieden werden. Hohe Biogaserträge müssen nicht unbedingt auch hohe Methanerträge bringen (Vgl. Abb.8: Biogasausbeuten und Methanerträge, Kapitel 2.2.1.2. Energiepflanzen).

Laut [16] korreliert der Energiegehalt von Biogas mit dem in ihm enthaltenen Methan. So liefert 1 m³ Biogas 1,5 – 3 kWh elektrische Leistung, während 1 m³ Methan 9,97 kWh bringt [17]. Der Methanertrag ist also einer der wichtigsten Faktoren für den wirtschaftlichen Betrieb einer BGA. Deshalb muss beim Einsatz, besonders von neuen Substraten, im Vorfeld der theoretische Methanertrag in etwa bekannt sein.

3.5.1. Methanpotenzial nach Weißbach

Das Methanpotenzial von ausgewählten Substraten lässt sich anhand derer Trockensubstanz (im Folgenden TS) bestimmen. Wie Prof. Dr. agr. Habil. Friedrich Weißbach herausfand, gehen bei der üblichen Trocknung bis zur Gewichtskonstanz bei 105°C flüchtige Verbindungen wie Gärsäuren und Alkohol, aus denen Biogas gewonnen werden könnte, bereits verloren. Um dies zu verhindern wird das gehäckselte Probematerial zunächst bei 60°C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und dann vermahlen. Die vermahlene Probe wird dann bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und anschließend erneut ausgewogen. Der Trockenmassegehalt kann dann mit folgender Formel berechnet werden:

$$TS\% = \frac{\text{Masse der lufttrockenen Probe} \times \text{Auswaage der TS} - \text{Probe (105°C)} \times 100}{\text{Frischmasse der Probe} \times \text{Einwaage der TS} - \text{Probe (105°C)}}$$

Von dieser korrigierten TS kann nun wiederum aber nur aus deren organischen Anteil Biogas entstehen. Seit längerem wird versucht den Einfluss von anorganischen Materialien (Rohasche) auszuschalten, in

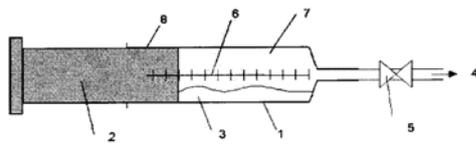
dem man die Rohasche (XA) von der ermittelten TS abzieht und die Gasausbeute dann je kg organischer TS (kg/oTS) angibt. Der anorganische Teil besteht aus Sand, Erde, Steinen, Metallabrieb (z.B. von Maschinen) und ähnlichen Stoffen, die in das Erntegut gelangen konnten. Der organische Teil besteht, wie schon erwähnt, aus Proteinen, Fetten und leicht (Zucker), sowie schwer abbaubaren KH (Fasern). Der Rohfaseranteil (XF) besteht aus unlöslichen Gerüstsubstanzen wie Cellulose, die im Biogasprozess eher unerwünscht sind und nicht zur Gasbildung beitragen. Weitere Parameter sind Rohfett (XL) und Rohprotein (XP), welches sich aus dem Stickstoffgehalt ergibt. Ein weiterer Untersuchungsparameter zur Biogasertragsbestimmung ist der ADF-Wert. ADF bedeutet *acid detergent fibre* und bezeichnet die nach Säureaufschluss verbleibenden Faserbestandteile. Aus diesen Parametern lässt sich nun der NFE-Wert (*N-free extracts*; Stickstofffreie Extraktionsprodukte, zu denen Zucker, Stärke, Pektin und Hemicellulosen zählen) und die oTS berechnen, aus denen sich wiederum Biogasausbeute und Methanausbeute in l/kg oTS ergeben [36].

Diese auf die oTS bezogene Gasausbeute ist aber laut [37] eine sehr variable Größe. Deshalb hat Prof. Dr. Friedrich Weißbach im Jahr 2008 einen neuen Parameter zur Bewertung pflanzlicher Biogassubstrate entwickelt. Da die bislang auf die oTS bezogene Ausbeute auch biologisch nicht verwertbare Komponenten der oTS mit einschloss, wurde nun die zu erwartende Gasausbeute nur auf den biologisch verwertbaren (fermentierbaren) Teil bezogen. Dieser neue Parameter „FoTS“ (= Fermentierbare organische Trockensubstanz) kann durch wenige Laboranalysen schnell ermittelt, und von ihm direkt auf das Biogaspotenzial geschlossen werden. Dr. Weißbach fand ebenfalls heraus, dass bei nahezu allen pflanzlichen Substraten mit dem gleichen Gasbildungspotenzial je kg FoTS zu rechnen ist. Somit lassen sich Qualitätsunterschiede einzelner Substrate schon an ihrem Gehalt an FoTS feststellen. [6]

Die auf diesem Wege ermittelten Gas- und Methanausbeuten werden im Ergebnisteil dargestellt.

3.5.2. Hohenheimer Biogasertragstest

Der Hohenheimer Biogasertragstest (Im Folgenden HBT) ist laut [31] ein Verfahren zur Ermittlung des Methanertrags aus organischer Substanz. Die Entwicklung dieses Tests sollte das herkömmliche Verfahren nach DIN 38 414 Teil 8, das nur für dünnflüssige Substrate mit geringem Gasbildungspotenzial geeignet ist, ablösen und den Versuchsaufbau vereinfachen und verkleinern. Es galt, einen Test zu entwickeln der auch mit handelsüblicher Laboreinrichtung durchführbar war. Laut [31] werden Material und Methode folgendermaßen beschrieben: „Aufbauend auf der Vorgehensweise des Hohenheimer Futterwerttests dienen Glasspritzen (Kolbenprober) mit einem Volumen von 100 ml und einer 1/1 Graduierung sowie einem Kapillaransatz als Fermenter, wie folgendes Bild zeigt:



1) Glasspritze; 2) Stopfen; 3) Gärsubstrat; 4) Öffnung zur Gasanalyse; 5) Schlauchklemme; 6) Graduierung 1/1; 7) Gasraum; 8) Gleit- und Dichtmittel

Abbildung 16: Kolbenprober

(Quelle: [31])

Auf den Kapillaransatz wird ein gasdichtes Schlauchstück aufgesetzt, das mit einer Schlauchklemme verschlossen werden kann. Um den Spalt zwischen Stopfen und Glaskolben abzudichten, wird ein gegenüber dem anaeroben Abbau inertes Gleitfett verwendet. Etwa 60 Kolbenprober werden in einen motorbetriebenen Rotor eingesteckt. Die Rotation der Kolben bewirkt die Durchmischung des Substrats. Die gesamte Einheit wird in einen Brutschrank eingebaut. Dort kann die gewünschte Gärtemperatur gewählt werden. Da die für einen Fermenter benötigte Menge an Testsubstrat weniger als ein Gramm beträgt, kommt der Probenahme und -aufbereitung eine besondere Bedeutung zu. Je nach Trockensubstanzgehalt wird eine repräsentative Probe von etwa einem Kilogramm Frischmasse gezogen. Die Probe wird auf den Gehalt an Trockensubstanz, organischer Substanz und Asche untersucht. Anschließend wird sie 48 Stunden lang in einem Trockenschrank schonend bei 50 bis 60°C getrocknet. Danach wird die Probe auf einen Millimeter Siebdurchgang zerkleinert. Die Aufbereitung der Probe ermöglicht eine repräsentative Einwaage von 500 mg Testsubstrat in den Fermenter. Diese Kombination aus Trocknung und Zerkleinerung entspricht auch der gängigen Aufbereitungsmethode für Futtermitteluntersuchungen. Für den Versuchsansatz werden zuerst etwa 30 ml Impfsubstrat in die vorbereiteten Kolben gegeben und die Einwaage auf 1/100 Gramm genau bestimmt. Anschließend werden 500 mg des Testsubstrates mit Hilfe einer Analysenwaage auf 1/1000 Gramm genau eingewogen. Die Restluft wird mit dem eingefetteten Stopfen aus dem Kolben verdrängt und dieser dicht verschlossen. Mit jedem Testsubstrat werden mindestens drei Wiederholungen angesetzt und mindestens drei Kolben mit reinem Impfsubstrat als Nullvariante betrieben.“

Um die Übertragbarkeit des Tests auf herkömmliche Verfahren zu prüfen, wurden 2002/2003 Vergleichsversuche durchgeführt. Das Ergebnis war, dass nicht nur die Wiederholungen geringe Abweichungen, sondern auch der Vergleich der Methoden untereinander eine gute Übereinstimmung zeigten. Der HBT stellte 2003 einen Fortschritt im Bereich der Gärversuche dar und gilt heute als gute, angewandte Praxis zur Bestimmung des Biogasertragswertes verschiedenster Substrate.

Die auf diesem Wege ermittelten Gas- und Methanausbeuten werden im Ergebnisteil dargestellt.

4. Ergebnisse

4.1. Wachstum

In diesem Kapitel sollen die Ergebnisse der Bonituren, Bestandesdichte, Bestandeshöhe und Entwicklung dargestellt werden. Vordergründig wird auf den Standort Staffelde Bezug genommen, welcher mit einer Gesamtauswertung aller Standorte verglichen wird. Dabei soll die Sorte mit dem höchsten Wachstumspotential herausgefiltert werden.

4.1.1. Bestandesdichte

Die Bestandesdichte soll einen Überblick über den Feldaufgang der verschiedenen Sorten geben. Diese Bonitur ist wichtig, um die Ergebnisse des Ertrages und mögliche Gründe für starke Abweichungen zu erhalten. Diese werden in den Auswertungen analysiert.

Die Bestandesdichte wurde zum ersten Boniturtermin am 27.08.2008 ausgezählt. Die Angaben erfolgten in Pflanzen je m². Aus Abbildung 18 ist deutlich zu erkennen, dass es signifikante Unterschiede im Auf-
lauf der einzelnen Sorten gab. Die Sudangräser Susu und Lussi fielen mit den höchsten Feldaufgängen auf. Alle anderen Sorten zeigten sehr viel geringere Bestandesdichten. Die Unterschiede zwischen den restlichen Sorten waren jedoch sehr gering. Bei der Vergleichssorte Sucrosorgho 506 (Prüfglied 4) und der Sorte Susu fiel eine hohe Standardabweichung auf, was auf große Unterschiede in den Bestandesdichten innerhalb der Sorten schließen lässt.

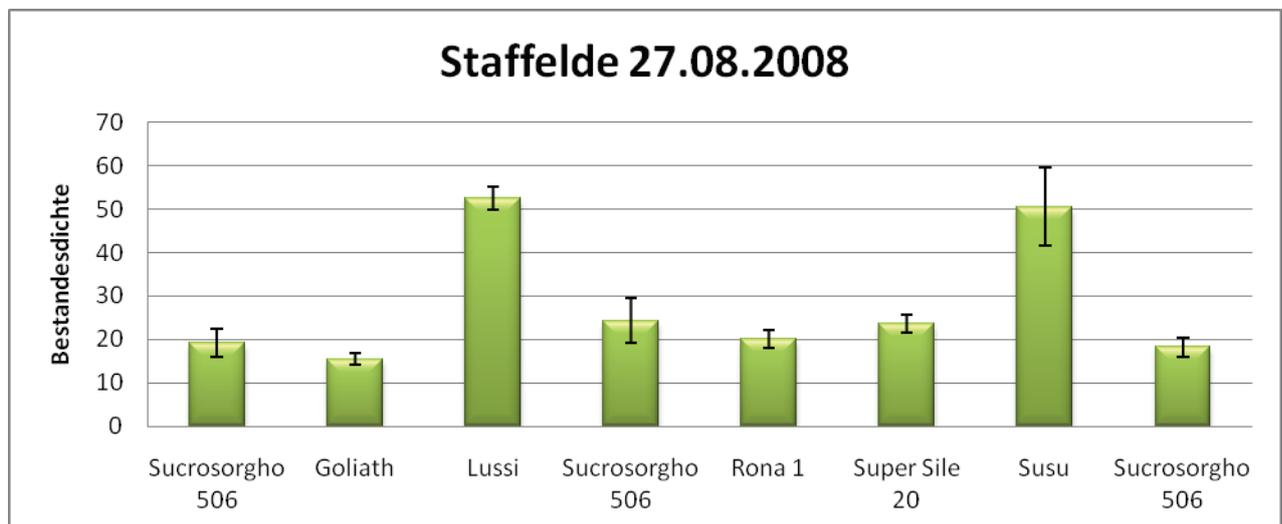


Abbildung 17: Bestandesdichte Staffelde

(Quelle: eigene Erhebungen)

Betrachtete man alle 3 Standorte zusammen, ergab sich jedoch ein Bild wie in Abb. 19. Zu beachten ist in der Abbildung, dass die Werte für die Vergleichssorte Sucrosorgho 506, welche 3 Prüfglieder besetzte, als ein Wert zusammengezogen wurden. Über die Signifikanz kann in diesem Fall keine Auskunft gege-

ben werden, da die Mittelwerte von der LFA Gülzow berechnet wurden und dort keine etwaigen Angaben gemacht wurden. Im Gegensatz zum Standort Staffelde fiel die Sorte Susu im Gesamtdurchschnitt sehr stark zurück. Ein ähnliches Bild fand man bei der Sorte Lussi. Man kann festhalten, dass die Ergebnisse des Standorts Staffelde im Gesamtdurchschnitt nicht wiedergegeben werden können.

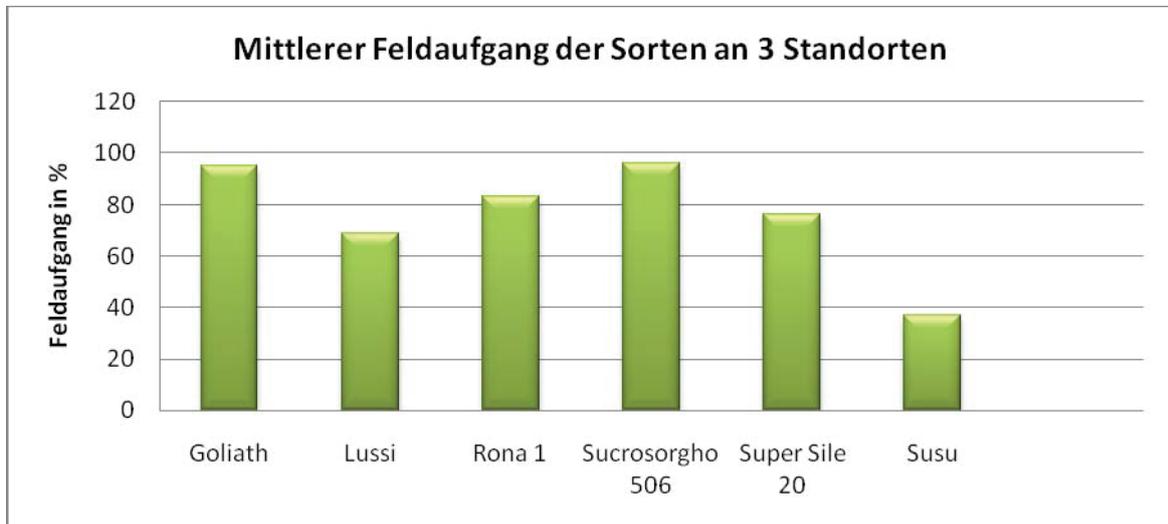


Abbildung 18: Feldaufgang

(Quelle: [23])

4.1.2. Bestandeshöhe

Die Bestandeshöhe wurde an 4 Terminen festgehalten, diese erfolgte an den 3 Standorten relativ zeitnah, so dass es keine Differenzen von mehr als 7 Tagen gab. Im Folgenden sind die mittleren Bestandeshöhen der ersten 3 Termine am Standort Staffelde dargestellt.

Boniturtermin 1

Am 27.08.2008 hatte die Vergleichssorte an Prüfstelle 4 und 8 die größte Bestandeshöhe (siehe Abb. 20). An Prüfstelle 1 zeigte sie jedoch die geringste Höhe. Ebenfalls sehr kurz war die Sorte Goliath. Alle weiteren Sorten lagen im Mittelfeld und wiesen nur wenige Unterschiede zueinander auf. Deutlich zu sehen waren auch die großen Standardabweichungen innerhalb der Sorten. Dies stellt Abbildung 21 graphisch dar.

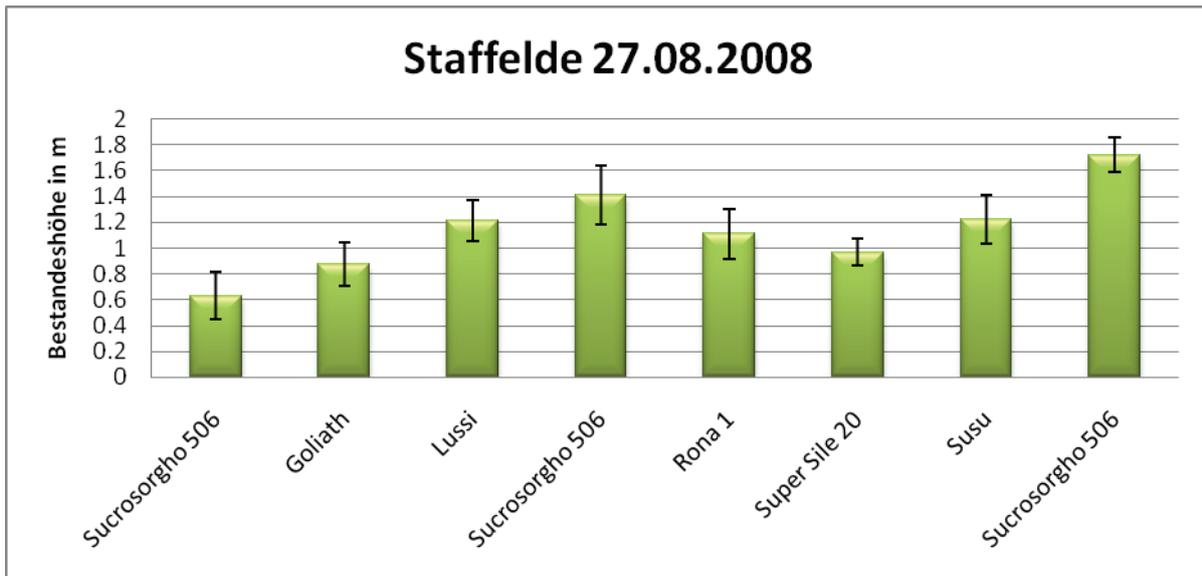


Abbildung 19: Bestandeshöhe Staffelde 27.08.2008

(Quelle: eigene Erhebungen)

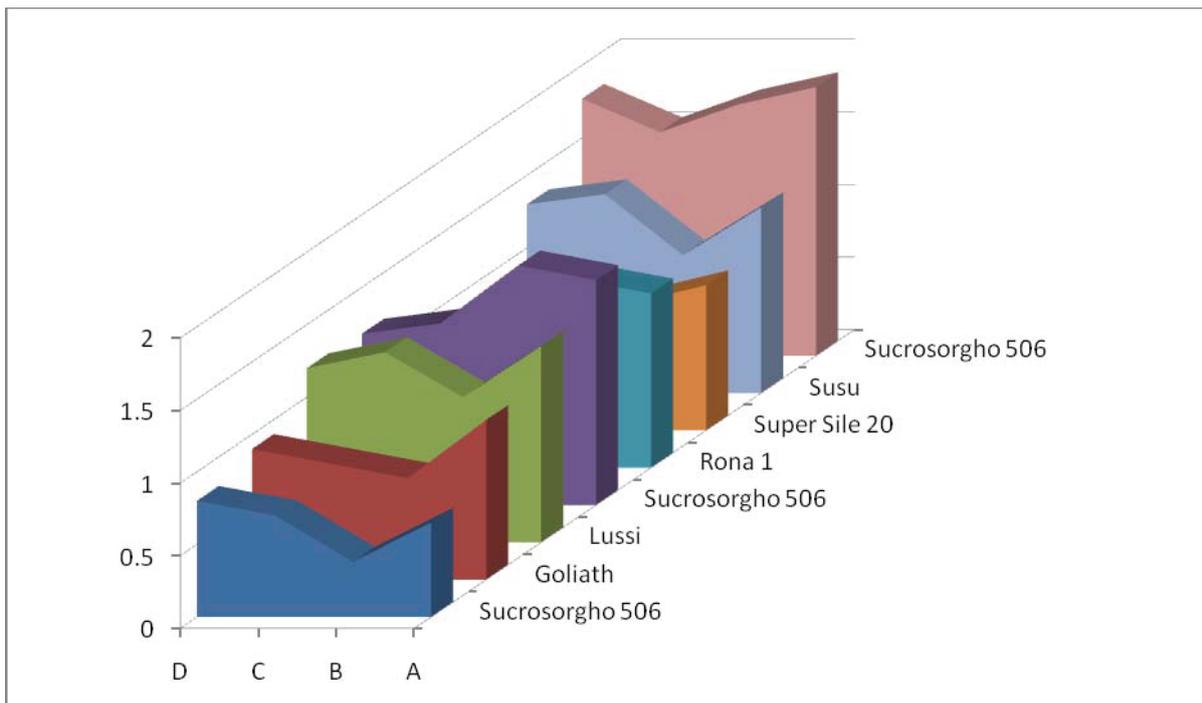


Abbildung 20: Unterschiede Bestandeshöhe graphisch

Quelle: eigene Erhebung

Boniturtermin 2

Am zweiten Termin Mitte September sahen die mittleren Bestandshöhen für den Standort wie folgt aus (siehe Abb. 22). Die Messung ergab dasselbe Bild wie schon bei der Anfangsmessung der Höhen. Wieder war die Vergleichssorte Sucrosorgho 506 an Stelle 4 und 8 am größten, am kleinsten war wiederum das

Prüfglied 1. Zu beachten ist jedoch, dass die Sorte Goliath, welche bei der ersten Messung hinter Rona 1, Super Sile 20 und Susu zurück blieb, diese am zweiten Termin in der Bestandeshöhe überholt hatte. Die Unterschiede können als signifikant angesehen werden. Gründe für den Rückgang bei der Höhe mancher Sorten sollen erst im Kapitel Versuchsfehler dargestellt werden.

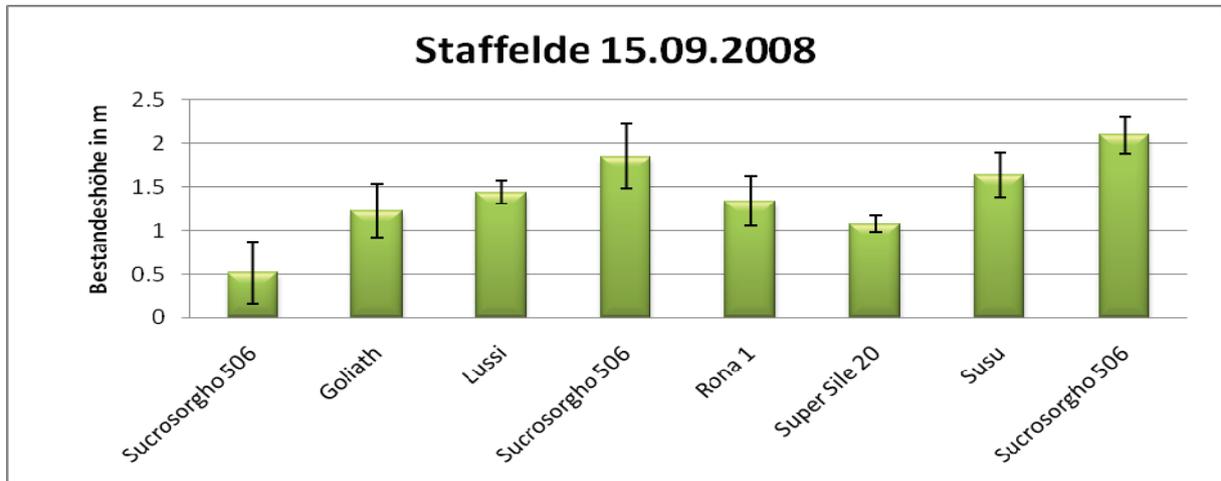


Abbildung 21: Bestandeshöhe Staffelde 15.09.2008

(Quelle: eigene Erhebungen)

Boniturtermin 3

Ein ähnliches Bild zeigte sich auch zum 30.09.2008. Wieder waren die Vergleichsorten an Stelle 4 und 8 am größten. Die Sorte Goliath überwuchs jedoch die Sorten Lussi, Rona 1 und Super Sile 20 bis zum letzten Termin. Die Sorte Super Sile 20 war mit der Vergleichssorte Sucrosorgho 506 an Stelle 1 am kleinsten. Auch an Termin 3 kam es zu signifikanten Unterschieden, trotz sehr hoher Unterschiede innerhalb der einzelnen Sorten.

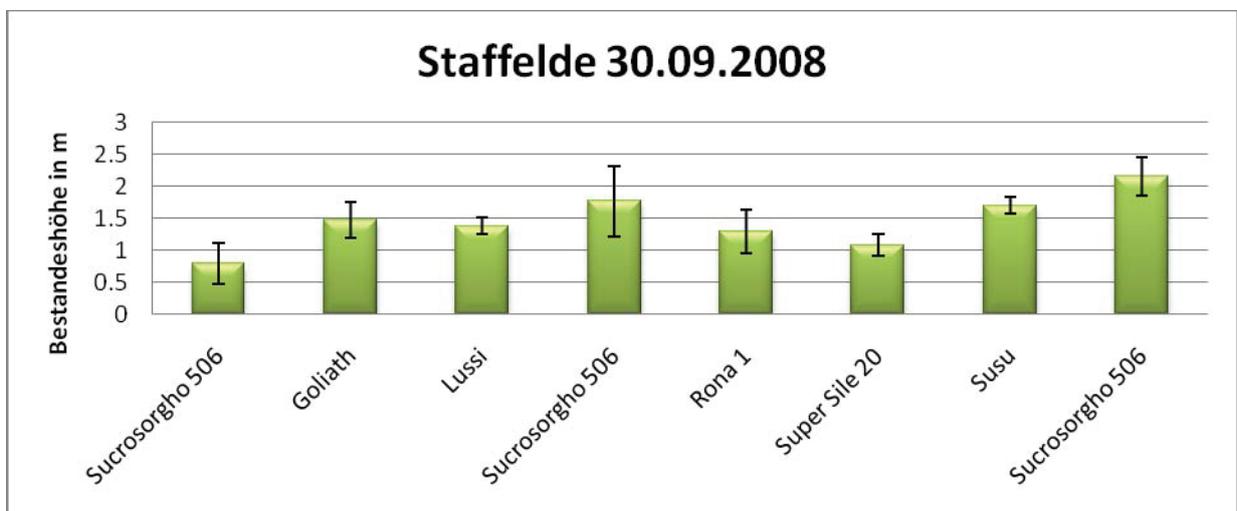


Abbildung 22: Bestandeshöhe Staffelde 30.09.2008

(Quelle: eigene Erhebungen)

4.1.3. BBCH – Stadien

Die Bestimmungen der BBCH-Stadien wurden anhand der einheitlichen Codierungs-Skala von Mais durchgeführt und ergaben für den Standort Staffelde folgende Ergebnisse:

Boniturtermin 1

Zum 1. Termin am 27.08.2008 waren die Sorte Lussi und Susu in ihrer physiologischen Entwicklung am weitesten voran geschritten (siehe Abb. 24). Sie zeigten signifikante Unterschiede zu den anderen Sorten. Die Vergleichssorte an Position 4 und 8 war hinsichtlich der Entwicklung von den Sorten Rona 1 und Super Sile 20 nahezu identisch zu unterscheiden.

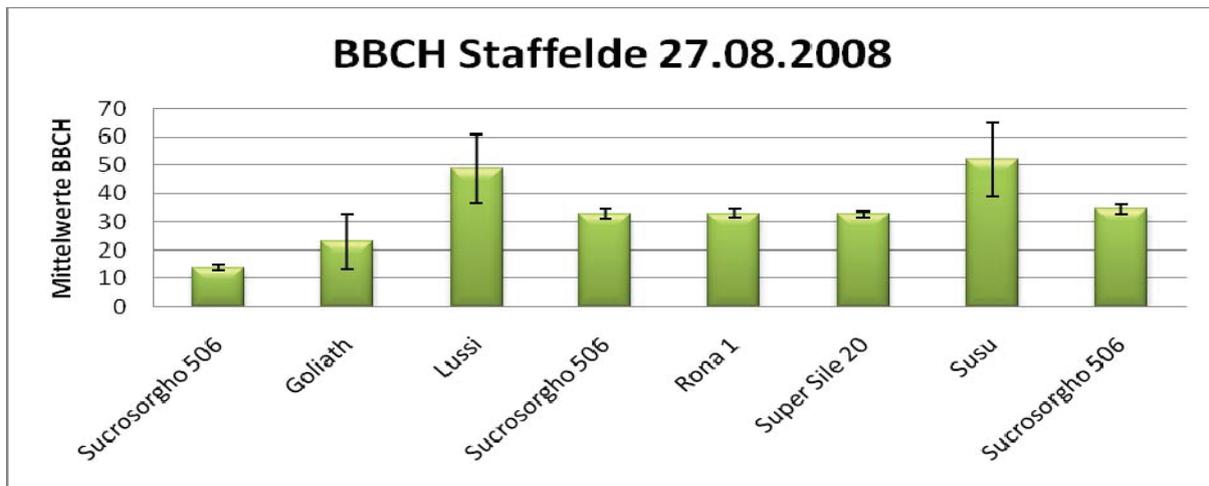


Abbildung 23: Mittlere BBCH-Stadien 27.08.2008 Staffelde

(Quelle: eigene Erhebungen)

Die Vergleichssorte an Position 1 zeigte jedoch deutliche Rückstände zu allen Sorten. Ebenfalls Goliath lag in der Entwicklung zurück. Zu beachten sind wieder die erheblichen Standardabweichungen, besonders bei der Sorte Lussi, Susu und Goliath. So zeigte zum Beispiel die Sorte Lussi in der Wiederholung D eine Entwicklung von BBCH 32 und in Wiederholung A ein BBCH von 61.

Boniturtermin 2

Zu diesem Zeitpunkt gab es kaum Veränderungen in den Unterschieden der einzelnen Sorten (siehe Abbildung 25). Die Sorte Sucrosorgho 506 an Position 4 fiel jedoch in der Entwicklung den anderen Sorten gegenüber zurück. Weiterhin kam es zu einer Verschiebung der Standardabweichungen. Diese fielen beim 2. Termin am größten für die Sorten Sucrosorgho 506 (Position 1 und 4) und die Sorte Goliath aus. Lussi, Rona 1, Super Sile 20 und Lussi sind in Ihre Entwicklung einheitlicher. Diese hatten bereits das Makrostadium 5 (Rispenschieben) erreicht. Die Entwicklung der Vergleichssorte an Position 1 schien hingegen still zu stehen. Auch zu diesem Termin waren die Unterschiede zwischen den Sorten wieder signifikant.

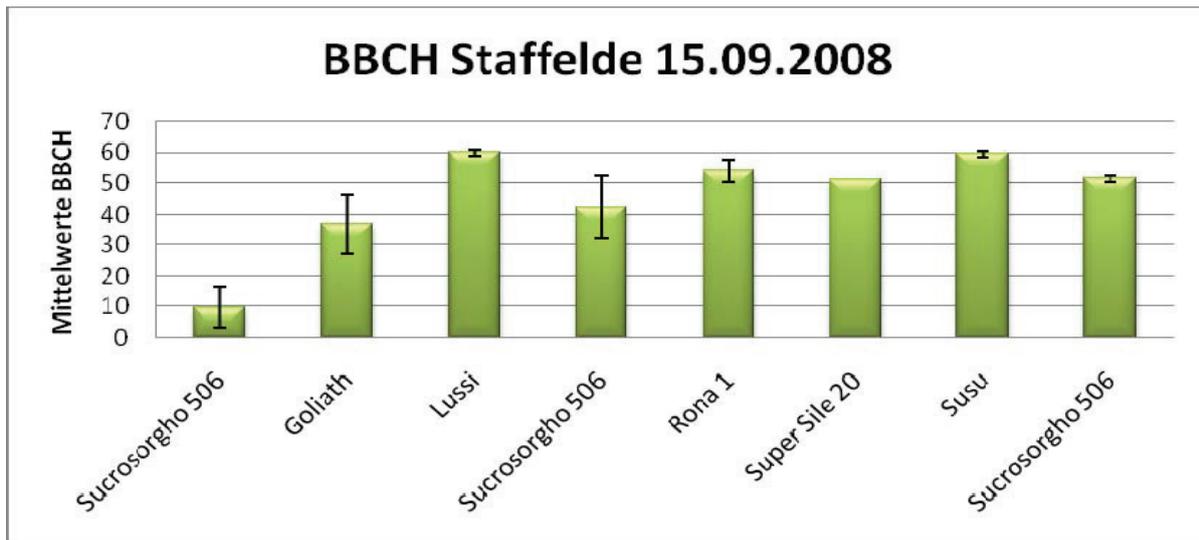


Abbildung 24: Mittlere BBCH-Stadien 15.09.2008 Staffelde

(Quelle: eigene Erhebungen)

Boniturtermin 3

Zum dritten Termin Ende September befanden sich die beiden Sudangräser Susu und Lussi schon in der Blüte (Makrostadium 6). Alle anderen Sorten (außer Sucrosorgho 1 und 4) hatten aber aufgeschlossen, also ebenfalls im Mittel das 5. Makrostadium erreicht und befanden sich somit in der Entwicklung der Blütenanlagen bzw. im Rispschieben. Beim Vergleich der Mittelwerte fielen die großen Standardabweichungen von Sucrosorgho 1 und 4 erneut ins Auge, während Goliath nun sehr gleichmäßig entwickelt war (STABW 0). Ebenso Lussi und Super Sile 20 zeigten eine sehr gleichmäßige Entwicklung. Einen Überblick gibt Abbildung 26.

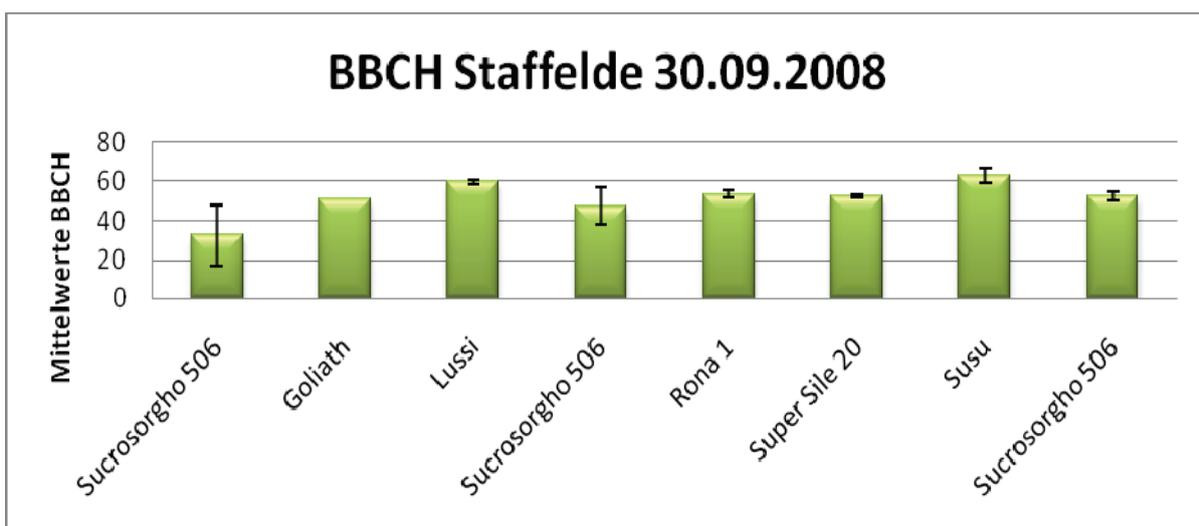


Abbildung 25: Mittlere BBCH-Stadien 30.09.2008 Staffelde

(Quelle: eigene Erhebungen)

4.2. Trockensubstanzgehalte

Die folgenden Abbildungen sollen die Entwicklung der Trockensubstanz des Bestandes in Staffelde vom 27.08. 2008 bis zur Ernte zeigen.

TS-Gehalte 27.08.2008

Für die erste Bestimmung der TS am 27.08.2008 (Abb. 27) konnte noch kein Mittelwert und keine Standardabweichung angegeben werden, da aufgrund der fehlenden Masse der Bestände nur eine Probe je Sorte gezogen werden konnte. Aufgrund der geringen Aussagekraft der Zahlen, soll nicht weiter darauf eingegangen werden. Ende August lagen die Trockensubstanzen zwischen 17 % und fast 23 %. Die Sorten Susu und Rona 1 lieferten die höchsten Ergebnisse, während Sucrosorgho und Super Sile am wenigsten TS aufwiesen.

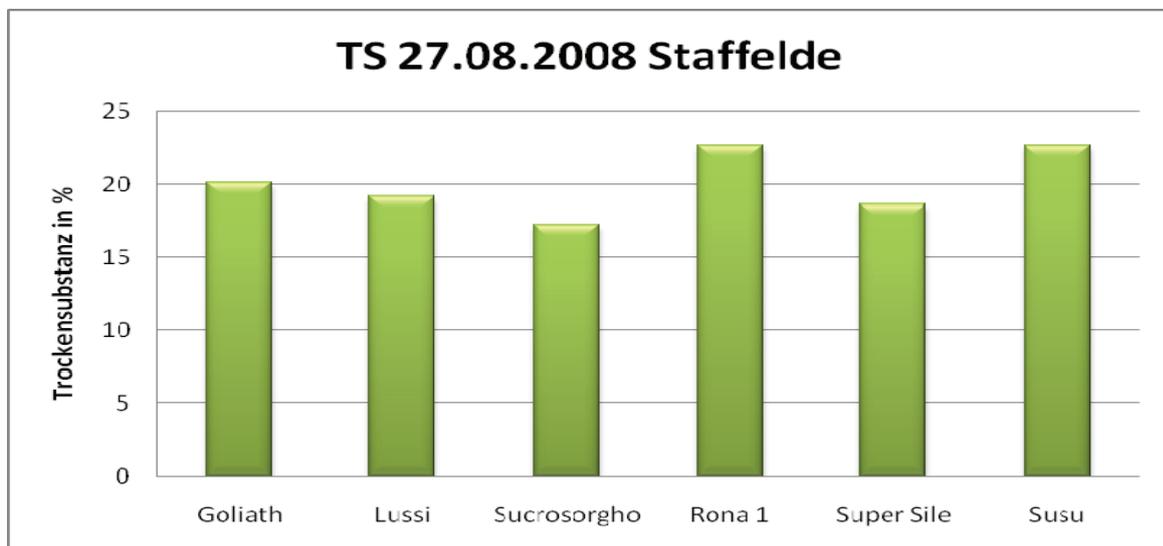


Abbildung 26: TS-Gehalte 27.08.2008 Staffelde

(Quelle: eigene Erhebungen)

TS-Gehalte 15.09.2008

Mitte September wurden von jeder Parzelle erneut Proben genommen, die dann zu Mischproben je Sorte vereinigt und von denen dann je 2 Proben zur TS-Bestimmung verwendet wurden. Betrachtet man die errechneten mittleren TS-Gehalte, so hatten die Sorten Goliath, Lussi, Rona und Susu die höchsten Trockensubstanzgehalte. Die Sorten Sucrosorgho (4 und 8) und Super Sile lagen mit rund 24-27 % TS im Mittelfeld. Große Standardabweichungen der TS-Werte innerhalb einer Sorte fielen bei Goliath, Rona und Susu auf. Signifikante Unterschiede zwischen den Sorten blieben jedoch aus (siehe Abb. 28).

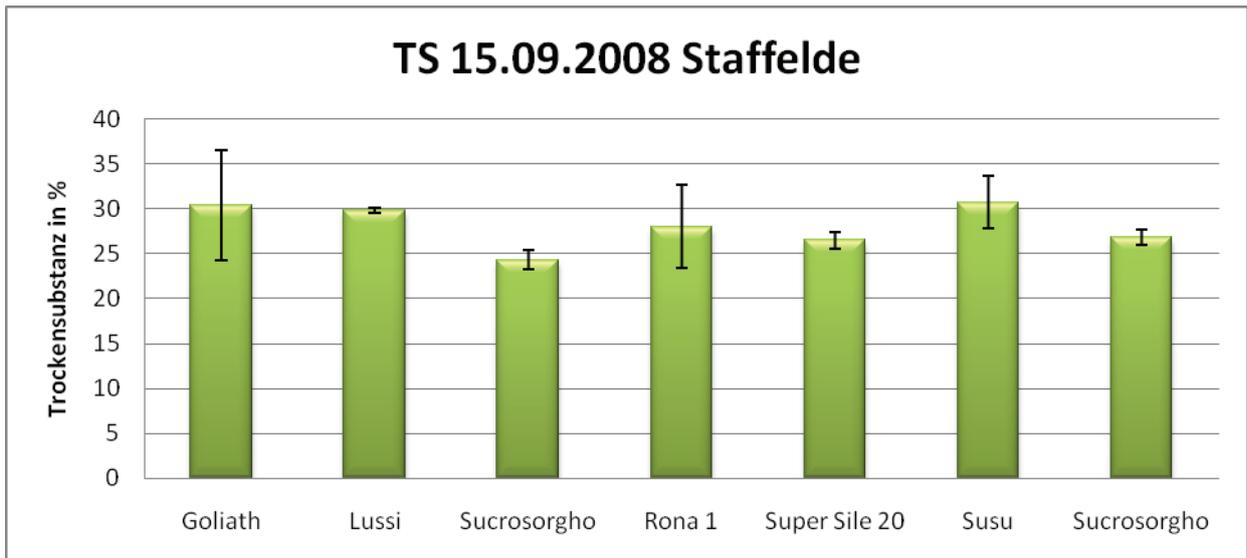


Abbildung 27: Mittlere TS-Gehalte 15.09.2008 Staffelde

(Quelle: eigene Erhebungen)

TS-Gehalt 30.09.2008

Beim letzten Termin vor der Ernte (siehe Abb. 29) standen wiederum die Sorten Lussi, Susu und Rona mit hohen Trockensubstanzgehalten von 27- 37 % dar. Super Sile lag mit einer TS von 25-27 % im Mittelfeld, während Sucrosorgho (1, 4 und 8) mit TS-Werten von ca. 20-22 % die niedrigsten Werte erzielte. Auch Goliath zeigte zum Ende des Versuchs nur noch eine TS von 22 %. Geringe Unterschiede in den TS Gehalten innerhalb einer Sorte gab es hauptsächlich bei Goliath und Lussi. Große Standardabweichungen hingegen zeigten sich bei Sucrosorgho 1 und Susu.

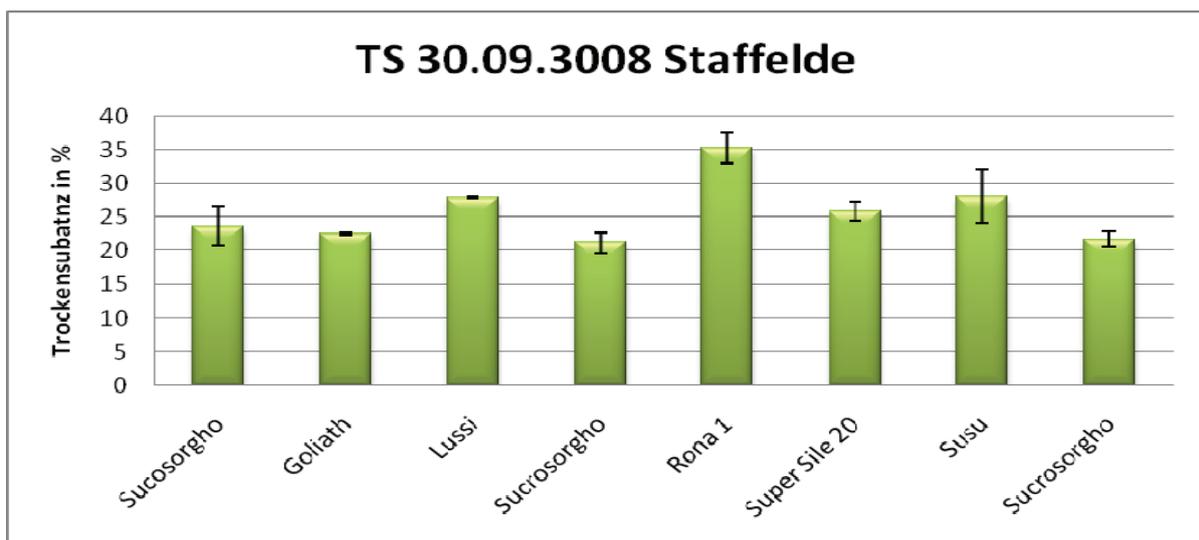


Abbildung 28: TS-Gehalte 30.09.2008 Staffelde

(Quelle: eigene Erhebungen)

TS- Gehalt Ernte (Anfang Oktober 2008)

In Tabelle 12 sind noch einmal die Trockensubstanzgehalte der Sorten bei der Ernte bestimmt worden, was durch die LFA Gülzow geschah. Diese dienen auch zur Berechnung der Trockensubstanzerträge je ha. In der Tabelle wurden nicht nur die Unterschiede zwischen den Sorten verglichen, sondern auch die Unterschiede der Sorten an den verschiedenen Standorten. Dabei kann es wie z. B. bei der Sorte Rona 1 massive Abweichungen geben. Am Standort Staffelde hatte die Sorte Rona 1, gefolgt von Super Sile und Susu die höchsten Trockensubstanzgehalte. Die Vergleichssorte Sucrosorgho 506 hatte den geringsten TS- Gehalt. Für die anderen Standorte treffen diese Aussagen nicht zu.

Im Mittel aller Standorte zeigten die Sorten Susu und Lussi die höchsten Trockensubstanzgehalte, wobei Goliath und Super Sile 20 eher zurück fielen. Es ist jedoch zu bemerken, dass durch den veränderten Aussaatzeitpunkt in Rachow die Ergebnisse im Durchschnitt der Standorte verzerrt wurden.

Tabelle 10: Trockensubstanz zur Ernte, 10/2008

Ort	Sorte							Mittelwert
	Goliath	Lussi	Rona 1	Sucrosorgho 506	Super Sile 20	Susu		
Malchow	17,5	28,9	21,9	19,5	21,6	25,3	21,7	
Rachow	14,2	22,8	16,5	17,5	16,2		17,4	
Staffelde	23,4	23,4	27,0	22,2	26,9	26,1	24,2	
Mittelwert	17,9	25,0	21,8	19,7	20,5	25,6	21,2	

(Quelle: [23])

4.3. Erträge

4.3.1. Erträge Trockensubstanz

Die geernteten TS-Erträge der 3 Standorte wurden in der LFA Gülzow statistisch ausgewertet und entsprechend der Anlagemethode „Langparzellenanlage“ bereinigt. Somit konnten bei den Auswertungen die Bodenunterschiede in Rachow und Malchow teilweise und in Staffelde sogar sehr gut berücksichtigt und in die Bewertung miteinbezogen werden. Tabelle 11 zeigt die nach [23] adjustierten Trockenmasseerträge der Sorten in dt/ha.

Tabelle 11: Adjustierte TS-Erträge in dt/ha

Sorte	Malchow	Rachow	Staffelde
Sucrosorgho 506	84,61	50,14	86,23
Goliath	73,86	70,56	141,35
Lussi	110,63	58,77	116,1
Rona 1	97,66	44,92	81,53
Super Sile 20	96,44	48,9	36,45
Susu	80,91		
adjustiertes Versuchsmittel	90,69	54,66	92,33
Grenzdifferenz für Vergleich Sorte/Sorte	39,14	33,51	78,93
Grenzdifferenz für Vergleich Sor- te/Standard Sucrosorgho 506	32,27	26,87	51,94

(Quelle: [23])

Auch in diesem Fall sind nicht nur die Unterschiede zwischen den einzelnen Sorten sehr gut sichtbar, sondern auch die Unterschiede innerhalb der Sorten an den verschiedenen Standorten. In Bezug auf den Standort Staffelde zeigte die Sorte Goliath gefolgt von Lussi die höchsten TS-Erträge. Die Sorte Super Sile 20 hatte hier mit Abstand die geringsten Trockensubstanzerträge. Zieht man jedoch einen anderen Standort zur Beurteilung heran, verschiebt sich dieses Bild. Eine Auswertung ist über den Mittelwert der Standorte nicht sinnvoll, da die Ergebnisse am Standort Rachow durch den verspäteten Saatzeitpunkt verzerrt wurden. Für die Sorte Susu gab es in Rachow und Staffelde keine Werte.

4.3.2. Methanerträge

4.3.2.1. Hohenheimer Biogasertragstest

Für die Ermittlung der Methanerträge wurden die Proben der einzelnen Sorten in diesem Fall an die Universität Hohenheim geschickt, wo das Biogas- und Methanpotential bestimmt wurden. Die Beschreibung dazu gibt Kapitel 3.5.2.

Als Ausgangsgröße ist jedoch nicht die Trockensubstanz zu sehen, sondern die organische Trockensubstanz. Die Unterschiede der Sorten in der Menge oTS je kg Trockensubstanz können Tabelle 12 entnommen werden. Es war zu sehen, dass die Sorten Susu, Sucrosorgho und Rona den höchsten oTS-Gehalt an der Trockensubstanz hatten. Betrachtet man jedoch die Menge oTS je ha (oTS je ha = kg TS je ha/100*oTS je TS/100*mittlerer spezifischer Methanertrag je kg TS), so verschiebt sich das Bild, da die TS-Erträge von Goliath am höchsten waren. Die größten oTS-Erträge je Hektar hatten somit die Sorten Goliath und Lussi. Die Sorte Super Sile 20 hatte dabei den geringsten oTS-Ertrag je ha.

Tabelle 12: Übersicht Ertragspotentiale Staffelde nach Hohenheim

Sorte	dt TS je ha	kg TS je ha	Mittelwert oTS [% TS]	kg/ha oTS	mittl. Spezifischer Gasertrag (m ³ /kg oTS)	m ³ /ha Gas	mittl. Spezifischer Methanertrag (m ³ CH ₄ /kg oTS)	m ³ /ha CH ₄
Sucrosorgho 506	86,2	8623	96	8278,1	0,664	5496,6	0,321	2657,3
Goliath	141,4	14135	92	13004,2	0,655	8517,8	0,312	4057,3
Lussi	116,1	11610	91	10565,1	0,626	6613,8	0,311	3285,7
Rona 1	81,5	8153	96	7826,9	0,647	5064,0	0,319	2496,8
Super Sile 20	36,5	3645	93	3389,9	0,668	2264,4	0,330	1118,7
Susu	80,9*	8091	97	7848,3	0,555	4352,5	0,266	2087,6

Quelle: Auswertung Uni Hohenheim (modifiziert)

*Ertrag TS des Versuchs Malchow, da für Staffelde keine Werte vorlagen

Der von der Uni Hohenheim ermittelte Gasertrag je kg oTS variiert je Sorte, genau wie der spezifische Methanertrag. Der spezifische Gasertrag je kg oTS kann ebenso wie der daraus resultierende Gasertrag je ha der Tabelle 12 entnommen werden. Da der Methanertrag für die Energieausbeute von entscheidender Bedeutung ist, soll dieser noch einmal näher dargestellt werden. Abbildung 29 gibt eine Übersicht über die Methanerträge der einzelnen Sorten am Standort Staffelde. Da für die Berechnung der Methanerträge nur ein Wert für die TS-Erträge je ha zur Verfügung stand, ist eine Angabe der Standardabweichung nicht möglich. Auch die Aussage über die Signifikanz kann nicht getroffen werden. Die Sorte Goliath, gefolgt von der Sorte Lussi, hatte den höchsten Methanertrag je Hektar. Die Sorte Super Sile 20 lag an letzter Position.

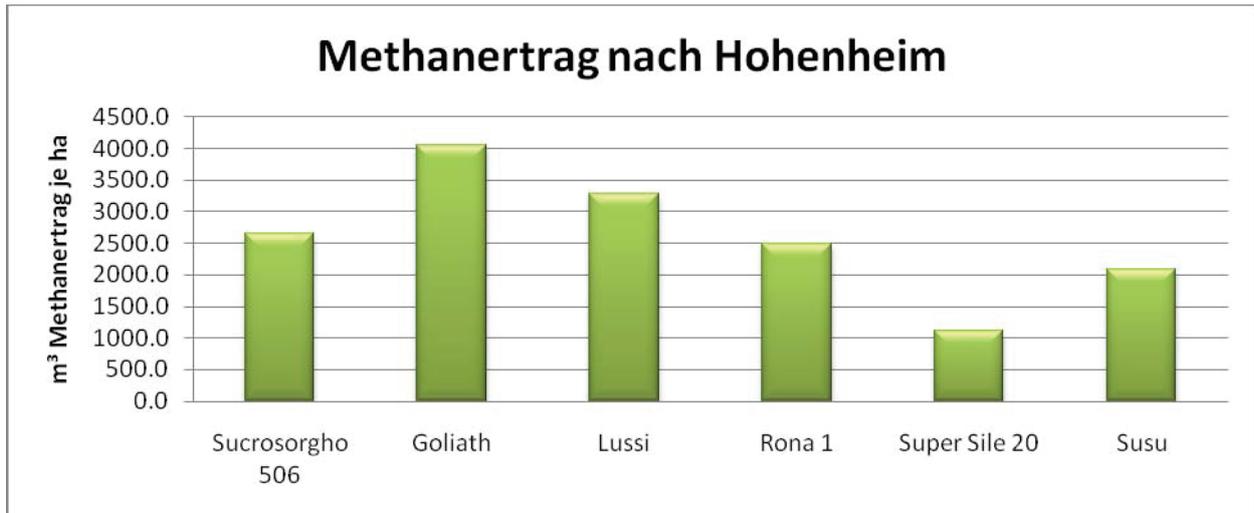


Abbildung 29: Methanertrag in Staffelde nach Hohenheim

(Quelle: Eigene Erhebung)

4.3.2.2. Biogasertragstest nach Weißbach / Blgg

Da die Bestimmung des Methanpotentials nach Weißbach auf einer anderen Grundlage als der Test der Uni Hohenheim beruht, sollen die Ergebnisse hier ebenfalls aufgezeigt werden. Die beiden Untersuchungen der Methanerträge wiesen jedoch nahezu identische Ergebnisse auf, deshalb wird auf einen näheren Vergleich verzichtet. In der graphischen Darstellung (Abbildung 30) ist ersichtlich, dass die Sorte Susu nach dem Berechnungsmodell von Weißbach einen geringfügig höheren Methanertrag hatte als Rona 1. Dies ist beim HBT umgekehrt. Die Ergebnisse nach Weißbach sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 13: Übersicht Ertragspotentiale Staffelde nach Weißbach

Sorte	dt TS je ha	kg TS je ha	FoTS**	nach Maisgleichung		Biogas m³/ha	Methan m³/ha
				Biogas**	Methan**		
				Liter/kg TS	Liter/kg TS		
Sucrosorgho 506	86,2	8623	702,3	561,8	295,0	4844,5	2543,4
Goliath	141,4	14135	675,1	540,1	283,6	7634,3	4008,0
Lussi	116,1	11610	665,5	532,4	279,5	6181,3	3245,2
Rona 1	81,5	8153	720,9	576,7	302,8	4702,0	2468,5
Super Sile 20	36,5	3645	708,1	566,4	297,4	2064,7	1084,0
Susu	80,9*	8091	729,5	583,6	306,4	4722,0	2479,1

(Quelle: Auswertung Weißbach, verändert)

*Ertrag TS des Versuchs Malchow, da für Staffelde keine Werte vorlagen

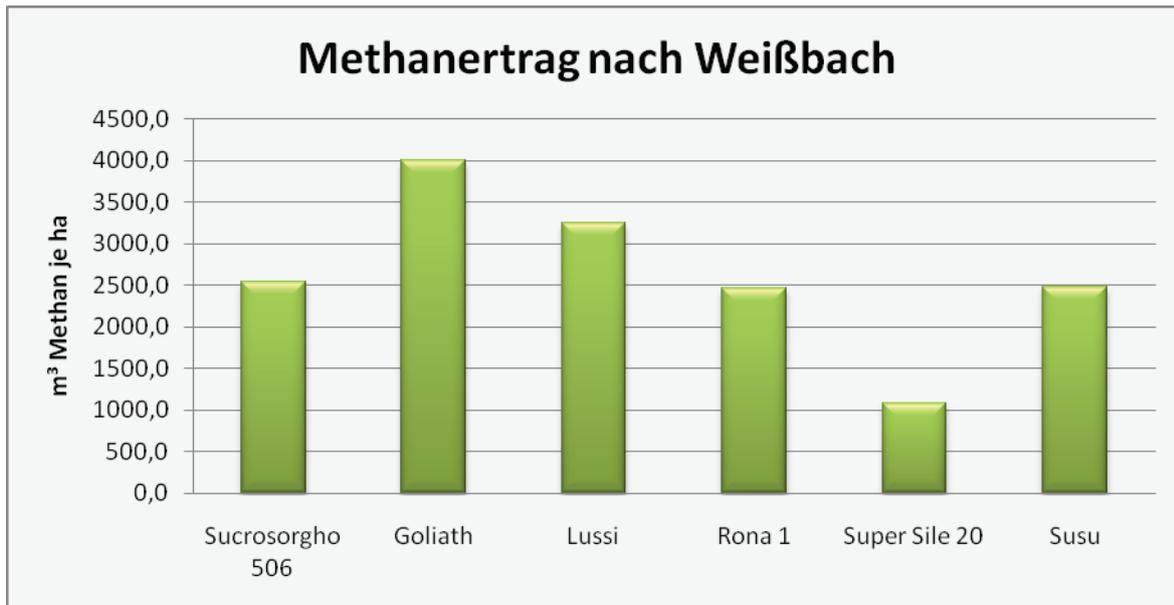


Abbildung 30: Methanertrag Staffelde nach Weißbach

(Quelle: eigene Erhebung)

4.4. Elektrische Leistung

Der Energiegehalt korreliert mit dem Methananteil im Biogas. Der Anteil Methan im Biogas ist abhängig vom Substrat und vom Prozessverlauf und kann zwischen 50 und 75 % liegen [16]. Da bekannt ist, dass ein Kubikmeter Methan einen Energiegehalt von 9,97 Kilowattstunden hat, soll im Folgenden nicht mehr mit dem Biogasgehalt sondern mit dem Methangehalt weiter gerechnet werden.

Ziel dieses Kapitels soll es sein, die elektrische Leistung zu errechnen, welche von einem ha Ackerland Sorghumhirse gewonnen werden kann.

Dazu wurden die Methanerträge je Hektar der verschiedenen Sorten mit 9,97 multipliziert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 14 zusammengestellt. Gegenübergestellt sind die Energiegehalte, welche aus dem Methanertrag einerseits nach HBT und andererseits nach Weißbach resultierten.

Graphisch werden die Ergebnisse in Abbildung 31 gezeigt.

Tabelle 14: Übersicht Energiegehalte je ha in Staffelde

Sorte	Hohenheim		Weißbach	
	m³ CH ₄ /ha	kWh _{el} /ha	m³ Ch ₄ /ha	kWh _{el} /ha
Sucrosorgho 506	2657,3	26492,9	2543,4	25357,3
Goliath	4057,3	40451,4	4008,0	39959,6
Lussi	3285,7	32758,9	3245,2	32354,4
Rona 1	2496,8	24892,8	2468,5	24611,4
Super Sile 20	1118,7	11152,9	1084,0	10807,0
Susu	2087,6	20813,8	2479,1	24716,3

(Quelle: eigene Berechnungen)

Es ist in der folgenden Abbildung deutlich zu sehen, dass aus der Sorte Goliath die meiste elektrische Energie gewonnen werden konnte. Dabei spielt es keine Rolle ob man das Modell der Uni Hohenheim oder das Modell von Prof. Dr. Weißbach zu Grunde legt. Den zweithöchsten Energiegehalt zeigte die Sorte Lussi, wobei die Sorten Lussi, Sucrosorgho 506 und Susu in etwa auf einer Höhe lagen. Zu beachten ist jedoch, dass Susu nach dem HBT etwas schlechter da stand. Den geringsten Energieertrag erzielte nach beiden Testverfahren die Sorte Super Sile 20.

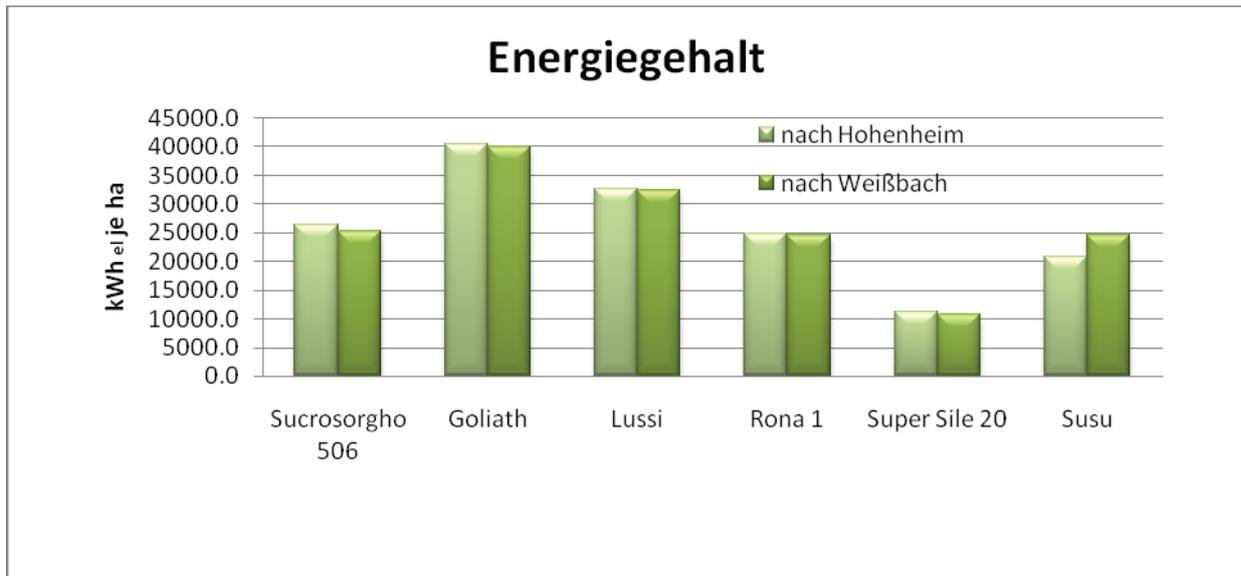


Abbildung 31: Energiegehalt je ha in Staffelde

(Quelle: eigene Erhebung)

5. Vergleich Ertragspotentiale Mais und Sorghumhirsen

Im folgenden Kapitel soll heraus gestellt werden, ob und in welchem Maße Sorghumhirsen eine ebenbürtige Alternative zu Mais darstellen können. Dabei finden produktionstechnische, lagerspezifische, prozesstechnische und kostentechnische Vor- und Nachteile keine Berücksichtigung.

Es wurden Durchschnittswerte der Ertragspotentiale für Mais aus dem KTBL herangezogen und mit den Ergebnissen des Sorghumversuchs vom Standort Staffelde verglichen. Da die Sortenunterschiede besonders zwischen der Sorte Goliath und Super Sile 20 zu groß sind, soll auf die Bildung eines Durchschnittswertes verzichtet und jede Sorte einzeln mit Mais verglichen werden. Für Mais werden Ertragsdaten herangezogen, die auf den Standort Staffelde mit seinen klimatischen Verhältnissen zutreffen sollten. Das mittlere Ertragsniveau ist mit 50 t und das Niedrige mit 40 t Frischmasseertrag angegeben. In beide Varianten beträgt die enthaltene Trockensubstanz ca. 35 %. Die Werte für den Methan- und Energieertrag von Mais je ha wurden [11] entnommen. Auf eine Weiterführung bis hin zum Ertrag an elektrischem Strom soll verzichtet werden, da die Ausbeuten zu sehr vom Ausnutzungsgrad der Biogasanlage abhängig sind. Die Erträge an Energie und Methan der Sorghumhirse wurden aus den Werten des Testverfahrens der Universität Hohenheim herangezogen.

5.1. Methanertrag

Abbildung 32 zeigt die unterschiedlichen Methanerträge. Bei einem niedrigen Ertragsniveau des Mais war die Sorte Goliath in der Lage, verhältnismäßig hohe Methanerträge pro ha entgegen zu setzen. Weiterhin gelangte nur die Sorte Lussi annähernd an die Werte des Methanertrags von Mais heran; alle anderen Sorten fielen in der Bewertung hinsichtlich des Methanertrags weit zurück. Besonders die Sorte Super Sile 20 war mit rund 2000 m³ weniger Methanertrag als Mais weit abgeschlagen. Erreicht der Mais jedoch ein mittleres Ertragsniveau, so wäre keine einzige der Sorghumhirsen in der Lage gleich viel oder gar mehr Methan pro ha zu erzeugen. Am dichtesten an das Ertragsniveau reichte auch hier noch die Sorte Goliath heran.

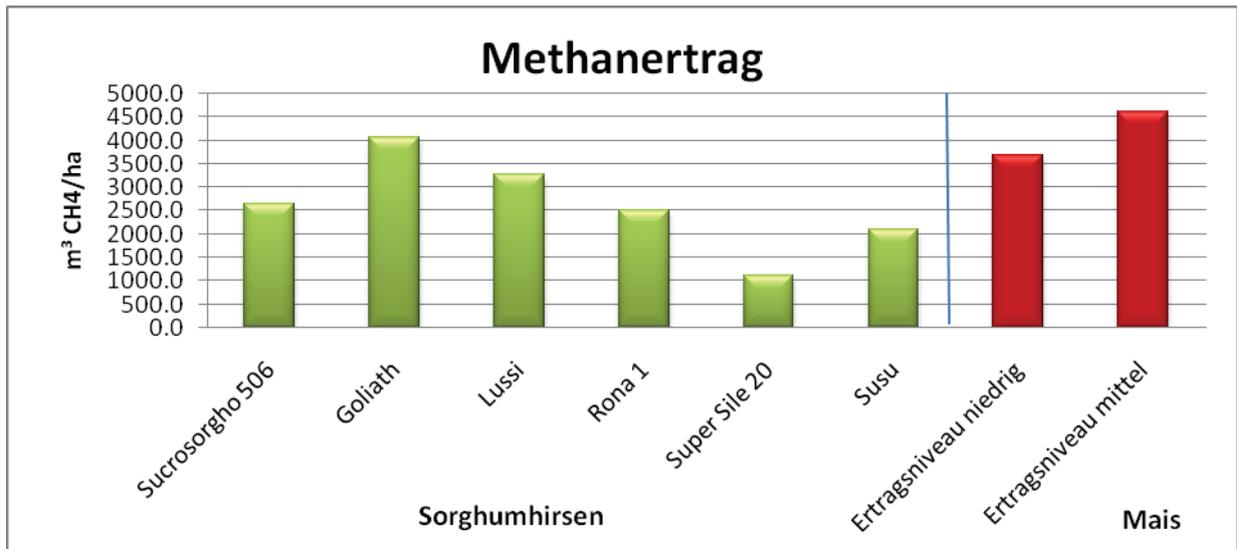


Abbildung 32: Vergleich Methanerträge je ha zwischen Sorghumhirsen und Mais
(Quelle: eigene Erhebung)

5.2. Energieertrag

Die Berechnung des Energieertrags erfolgte mit $10 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{m}^3$ Methan bei den Sorghumhirsen und beim Mais. Somit ist der gleiche Sachverhalt wie beim Methanertrag festzuhalten: nur bei niedrigem Ertragsniveau des Mais war die Sorte Goliath in der Lage, mehr Energie je Hektar zu liefern. Die Sorte Super Sile 20 lieferte wiederum den geringsten Energieertrag.

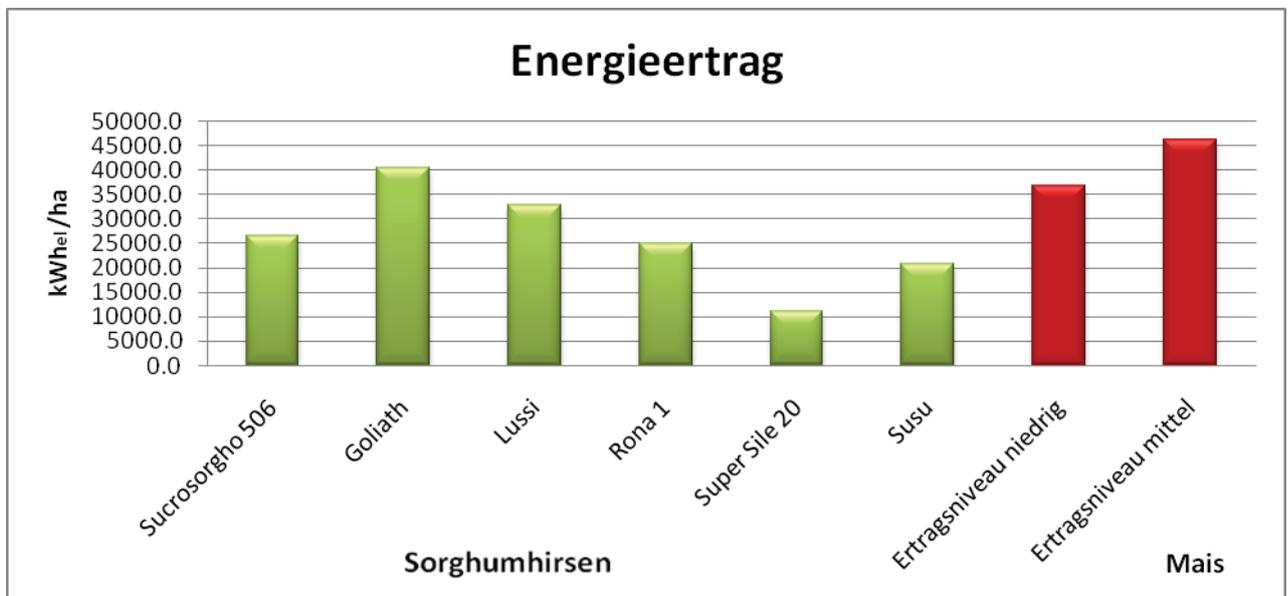


Abbildung 33: Vergleich Energieerträge je ha zwischen Sorghumhirsen und Mais
(Quelle: eigene Erhebungen)

Es kann somit festgehalten werden, dass in diesem Versuch Mais selbst bei niedrigem Ertragsniveau in fast allen Fällen in der Lage ist, mehr Energie je Hektar zu liefern als Sorghumhirsen.

6. Gegenüberstellung Produktionskosten Mais und Sorghumhirse

In diesem Kapitel soll eine Gegenüberstellung der Produktionskosten für Mais und Sorghumhirsen erfolgen. Ein Vergleich der Produktionskosten der Sorghumhirse je ha zwischen den verschiedenen Versuchsbetrieben ist nicht möglich, da nur für den Betrieb in Malchow genaue Kostendaten vorlagen. Die Kosten der anderen Betriebe waren entweder unvollständig bzw. wurden nicht herausgegeben.

Im Fall der Kostendaten für Mais wird auf den Deckungsbeitragsrechner der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft und das KTBL zurück gegriffen. Es werden hierbei nur die Arbeitsschritte einbezogen, die aus Malchow bekannt waren. So fallen z.B. der Abtransport, die Silierung und Lagerkosten aus der Berechnung heraus.

6.1. Produktionskosten Sorghumhirse

Eine Aufschlüsselung der Produktionskosten für Hirse am Standort Malchow kann der Tabelle 15 entnommen werden. Die Kosten für das Saatgut wurden nur für die Sorte Goliath gemacht - laut Saatenunion kosten 400.000 Körner der Sorte Goliath 170-180 €, was einer Menge für 2 ha entspricht. Im Versuch wurden pro ha jeweils 180.000 Körner gedreht. So galten pro ha Kosten von ca. 79 €. Diese Kostengabe konnte auf die anderen Sorten in etwa übertragen werden. Alle weiteren Preise wurden nach Angaben des Betriebes übernommen. Mengen für Pflanzenschutz und Düngung können dem Kapitel 2.4.6. Bestandesführung entnommen werden.

Die Produktionskosten beliefen sich pro ha in diesem Fall auf 650,68 €. Bezieht man dies auf den durchschnittlichen Trockenmasseertrag von 90,69 dt/ha, so kostete die Dezitonne Trockensubstanz am Beispiel des Betriebes in Malchow 7,17 €.

Tabelle 15: Produktionskosten Sorghumhirse Malchow

Arbeitsgang	Zusatz	Kosten je ha
Saatgut		79,00 €
Pflanzenschutz	Glyphos	11,10 €
	Gardo Gold	36,48 €
Düngung	DAP	35,90 €
	KAS	78,20 €
Bodenbearbeitung	Pflug	45,00 €
	Saatbettkombination	30,00 €
Drillen		45,00 €
Düngung		20,00 €
Pflanzenschutz		20,00 €
Ernte		250,00 €
Summe		650,68 €

(Quelle: Herr v. Mandelstow, Landwirtschaftlicher Betrieb Malchow)

6.2. Produktionskosten Mais

Die Kosten zur Bereitstellung von Silomais entstammen dem LFL Bayern, welche einen speziellen Kalkulator zur Kostenberechnung auf Ihren Internetseiten zur Verfügung stellen. Die Pflanzenschutzstrategie wurde als „Mittel eingestuft“ und die Mechanisierung bei einer mittleren Schlaggröße ausgewählt. Die Kosten für die Ernte wurden dem KTBL entnommen und beziehen sich auf einen 6-reihigen Häcksler mit einer Leistung von 300 KW.

Werden die Gärreste der Biogasanlagen wieder auf die eigenen Flächen ausgebracht und somit dem Nährstoffentzug gutgeschrieben, so belaufen sich die Kosten auf 730 €/ha. Umgerechnet auf einen mittleren Trockenmasseertrag von 175 dt (entspricht 50 dt/ha Frischmasse bei 35 % TS) fallen 4,17 €/dt TS an. Geht man nun davon aus, dass die Gärreste der Fermentation nicht genutzt werden, fallen aufgrund des höheren Nährstoffbedarfs Produktionskosten von 1196 €/ha an. Dies entspricht Kosten von 6,83 €/dt TS.

Tabelle 16: Produktionskosten Mais

Arbeitsgang	Zusatz	Kosten je ha
Saatgut		197,00 €
Pflanzenschutz		67,00 €
Düngung	mit Gärrestausbringung	155,00 €
	ohne Gärrestausbringung	621,00 €
Bodenbearbeitung	Pflug	48,60 €
	Saatbettbereitung	25,00 €
Drillen		28,00 €
Düngung		10,00 €
Pflanzenschutz		5,00 €
Ernte		195,00 €
Summe	mit Gärrestausnutzung	730,00 €
	ohne Gärrestausnutzung	1.196,00 €

(Quelle: [39])

Somit kann festgehalten werden, dass die Produktion einer Dezitonne Trockenmasse Mais nach Angaben des KTBL in jedem Fall günstiger ist als die Produktion der Sorghumhirse in Malchow. Um jedoch eine eindeutige Aussage treffen zu können, müsste man die betriebsinternen Kosten für die Maisproduktion mit den betriebsinternen Daten der Hirseproduktion vergleichen bzw. die jeweiligen Arbeitsgänge mit den Daten aus dem KTBL abgleichen.

7. Auswertung

Im Folgenden soll die Auswertung nun die gelieferten Ergebnisse beurteilen und mit anderen Untersuchungen zu diesem Thema vergleichen. Im Unterpunkt Versuchsfehler sollen die Ergebnisse kritisch hinterfragt werden, um die Validität der durchgeführten Versuche beurteilen zu können.

Der mittlere Feldaufgang über alle 3 Standorte hinweg zeigte die Schwächen der Sorten Susu und Lussi. Die Bestandeshöhen zu den einzelnen Bonitur - Terminen zeigten jeweils die Überlegenheit der Sorte Sucrosorgho 506, wobei eine große Standardabweichung innerhalb der Sorte zu beachten war. Der wichtigste Punkt war jedoch der Trockensubstanzertrag, da dieser den entscheidenden Faktor für die Ausbeute an Methan und somit für die Wirtschaftlichkeit der Substratnutzung darstellte. Weiterhin kann nur durch eine intensive Betrachtung der Trockensubstanz- bzw. Methanerträge eine Sortenempfehlung bzw. eine Abschätzung zur Vergleichbarkeit der Sorghumhirsen mit Mais erfolgen. Betrachtet man in diesem Fall die unterschiedlichen Erträge der Sorten auf den einzelnen Standorten, kann festgehalten werden, dass die Ertragsstabilität der Sorten stark schwankt. Für den Standort Rachow ist anzunehmen, dass der verspätete Aussaattermin zu den Mindererträgen beitrug. Um das Ertragspotential der Sorten abschätzen zu können, wäre die Bildung des Mittelwertes über die Standorte hinweg eventuell sinnvoll gewesen, jedoch hätte es das Bild im Vergleich zu Mais erheblich verzerrt. Geht man vom Standort Staffelde aus, an dem die klimatischen Verhältnisse in Bezug auf Bodenqualität und Wasserversorgung am schlechtesten sein dürften, so muss man die Ertragsstärke der Sorten Goliath und Lussi hervorheben. Auf besseren Standorten, wie es in Malchow der Fall ist, war Lussi sogar in der Lage, die Sorte Goliath zu überholen und die höchsten Erträge zu erzielen.

Für die abschließende Beurteilung der Methanausbeute war jedoch nicht nur der Trockenmasseertrag heranzuziehen, sondern auch der spezifische Methanertrag pro kg/TS. Bis auf die Sorte Susu, welche stark zurückfiel, lagen hier alle in etwa auf gleichem Niveau. Zu hinterfragen bleibt, ob die Methanausbeute aufgrund des am weitesten fortgeschrittenen Entwicklungsstadiums von Susu zur Ernte verändert war. Wäre eine sortenspezifische Ernte zum optimalen bzw. einheitlichem Entwicklungsstadium der Sorghumhirsen erfolgt, kann davon ausgegangen werden, dass die Ergebnisse stark von den jetzigen abgewichen wären. Es kann nun aber festgehalten werden, dass die Methanausbeute je kg TS nicht den entscheidenden Effekt bringt, sondern der TS-Ertrag der Sorten höher ins Gewicht fällt.

Dieser war am Standort Staffelde bei der Sorte Goliath so überlegen, dass diese auch den höchsten Methanertrag pro ha erzielte. Der Unterschied zwischen den beiden Ermittlungsmethoden für das Methanpotential einer Sorte spielte dabei nur eine geringe Rolle. Die absolute Unterlegenheit der Sorte Super Sile 20 bezüglich des Methanertrags war dabei auf den starken Minderertrag am Standort Staffelde zurück zu führen. Weiterführend hatte die Sorte Goliath den höchsten Energiegehalt je Hektar Ackerland. Eine Veränderung des Bildes zum Methanertrag ergab sich nicht, da der Verrechnungsfaktor 10 kWhel pro m³ Methan für alle Sorten galt.

Somit steht fest, dass nur die Sorte Goliath, mit großem Abstand gefolgt von Lussi, ein ausreichendes Ertragsniveau besaß, um auch nur in die Nähe des Ertrags von Mais zu kommen. Dies wäre allerdings nur der Fall, wenn das Ertragsniveau des Mais gering ist. Bei einem mittleren Ertragspotential des Mais stellte keine der Sorghumhirsen ertraglich eine Alternative dar.

Auch im Falle der Bereitstellungskosten pro Dezitonne/TS fielen die Sorghumhirsen weit zurück. Kostete die Produktion einer Dezitonne TS aus Mais zwischen 4 € und 6,80 €, so bedarf es ca. 7 € für die Herstellung einer Dezitonne TS aus Sorghumhirse am Standort Malchow.

7.1. Vergleich mit anderen Versuchsergebnissen

Um die Ergebnisse dieser Versuche besser beurteilen zu können, sollen auch andere Versuchsergebnisse kurz vorgestellt werden. So führte im Jahr 2004 laut [38] das Sudangras Susu in Süddeutschland zu Erträgen zwischen 10 und 12 Tonnen TS je ha. Die Zuckerhirse kam in den gleichen Versuchen auf Erträge zwischen 7,8 und 14 t Trockensubstanz je Hektar. Verschiedene Maissorten in Abhängigkeit von der Reifezeit erzielten Erträge um 20 t TS /ha (siehe Abb. 34).

Versuchstitel:		PTV Biogas - Energiepflanzen (Gras, Mais, Hirse)						2004 - 06		
Biogas-Energiepflanzen 2004 - Einjährige Ergebnisse										
	Mahlberg-Orschweier			Kupferzell-Füßbach			Aulendorf			
Kulturart	Zuckerhirse (<i>Sorghum bicolor</i>)									
Sorte	<i>SUPER SILE 20</i>									
Saatstärke	Körner/ m²	Ertrag (dt TM/ha)	%TS	Körner/ m²	Ertrag (dt TM/ha)	%TS	Körner/ m²	Ertrag (dt TM/ha)	%TS	
	<i>Datum</i>	<i>09.09.04</i>		<i>Datum</i>	<i>20.10.04</i>		<i>Datum</i>	<i>05.10.04</i>		
Abschlag	15	88	18,8	15	73	25,5	15	121	19,1	
Empfehlung	25	112	19,4	25	78	25,0	25	139	19,9	
Zuschlag	35	120	20,0	35	100	25,7	35	140	19,9	
Kulturart	Sudangras (<i>Sorghum sudanense</i>, Hybrid)									
Sorte	<i>SUSU</i>									
Saatstärke (25 kg/ha)	Datum	Ertrag (dt TM/ha)	%TS	Datum	Ertrag (dt TM/ha)	%TS	Datum	Ertrag (dt TM/ha)	%TS	
1. Schnitt	<i>29.07.04</i>	54	14,7	<i>02.08.04</i>	36	16,4	<i>05.08.04</i>	54	14,8	
2. Schnitt	<i>27.09.04</i>	53	14,4	<i>20.10.04</i>	82	24,0	<i>14.10.04</i>	50	16,3	
Summe		107			118			104		
Kulturart	Energiemais									
Sorte	<i>PROVENDER ca. S 360</i>			<i>VIC S 400</i>			<i>GAVOTT S 250</i>			
Siloreifezahl										
Saatstärke	Körner/ m²	Ertrag (dt TM/ha)	%TS	Körner/ m²	Ertrag (dt TM/ha)	%TS	Körner/ m²	Ertrag (dt TM/ha)	%TS	
	<i>Datum</i>	<i>09.09.04</i>		<i>Datum</i>	<i>28.09.04</i>		<i>Datum</i>	<i>23.09.04</i>		
Abschlag	6	199	29,0	7	203	33,5	8	185	29,4	
Empfehlung	7	201	29,0	8	204	32,7	9	196	29,5	
Zuschlag	8	219	30,1	9	208	33,7	10	201	29,1	

Abbildung 34: Vergleich Erträge Sorghumhirsen zu Mais 2004 (Quelle: [38])

Bei Anbauversuchen der Firma Saatbau Linz konnten im Jahr 2006 auf den Standorten Kalsdorf, Reichersberg und Straubing Trockensubstanzerträge von 20- 25 Tonnen je Hektar mit der Sorte Goliath erzielt werden [25].

Ferner konnten bei Auswertungen der Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft Sachsen über die Jahre 2004 bis 2006 folgende Ergebnisse erzielt werden (siehe Abb. 35). Außer im Jahr 2006 war auch in diesem Fall der Mais den Sorghumhirsen überlegen. So ist ersichtlich, dass im Jahre 2006 Zuckerhirse und Sudangras bereits in der Lage waren, die TM-Erträge von Mais zu erreichen. In den vorherigen Jahren 2004 und 2005 konnten noch keine optimalen Ergebnisse erzielt werden, was jedoch im Laufe der Zeit (und wohl auch mit wachsender Erfahrungen im Umgang mit dem Anbau von Sorghumhirsen) immer besser gelang.

TM Ertrag: 2004: Mais (100%) > Zuckerhirse (64 %) > Sudangras (53 %)
 2005: Mais (100%) > Zuckerhirse (79 %) > Sudangras (72 %)
 2006: Mais (79 %) < Zuckerhirse (100 %) = Sudangras (100 %)

Abbildung 35: Vergleich der TM-Erträge von Mais, Sorghumhirsen von 2004 bis 2006
 (Quelle: [8])

Es kann also festgehalten werden, dass die Erträge im aktuell durchgeführten Versuch unter den Erträgen aus anderen Versuchsjahren bleiben, was mit den unterschiedlichen Standorten und Klimabedingungen begründet werden kann. Allerdings ist der Trend, dass die Sorghumhirsen im Trockenmasseertrag meist hinter dem Mais zurückblieben, auch in anderen Untersuchungen bestätigt worden.

7.2. Fehler bei der Versuchsdurchführung

Schon zu Beginn des Versuchs zeigten alle Standorte (besonders aber Staffelde) unterschiedliche Feldaufgänge und konnten die gewünschten Bestandesdichten nicht in jedem Fall erreichen. Es war jedoch insbesondere bei den Sorten Lussi und Susu darauf zu achten, dass diese nicht mit doppeltem Feldaufgang erschienen sind, sondern schon die Saatstärke wesentlich höher war. Bei der Sorte Lussi ist weiterhin davon auszugehen, dass ein Fehler in der Aussaattechnik vorgefallen ist oder die Bonitur eines nicht repräsentativen Parzellenstücks vorgenommen wurde, da die Bestandesdichte hier höher als die eigentliche Aussaatmenge war. Weitere Ursachen können unterschiedliche Bodenbeschaffenheiten innerhalb des Versuchs wie z.B. mögliche Bodenverdichtungen sein, die zu unterschiedliche Ablagetiefen des Saatgutes geführt und somit einen ungleichmäßigen Auflauf hervorgerufen haben könnten.

Dies könnte auch zu den „Rückgängen“ bei den Bestandeshöhen bzw. BBCH-Stadien an fortgeschrittenen Boniturterminen innerhalb einer Sorte geführt haben. Allerdings ist es auch möglich, dass diese

Unterschiede aufgrund der Probenahme durch verschiedene Probanden an den Terminen aufgetreten sind. Auch die Messung an unterschiedlichen Pflanzen zu den einzelnen Terminen kann diese Verzerrungen verursacht haben.

Der Standort Rachow war, was die Vergleichbarkeit der Ernteergebnisse angeht, nicht zu berücksichtigen, da die Pflanzen dort auf Grund der stark verspäteten Aussaat nicht die Möglichkeit hatten, ihr volles Ertragspotential auszuschöpfen. Für die abnehmenden TS- Gehalte zur Ernte kann der ab September einsetzende Niederschlag angesehen werden, welcher ein erneutes Ausgrünen der Bestände förderte.

Auch bei der Ernte können Fehler aufgetreten sein. Da die Ernten durch Technik des jeweiligen landwirtschaftlichen Betriebes vorgenommen wurden und eine Ertragsmessung über das Wiegen der Anhänger erfolgte, können z.B. verbliebene Restmengen auf den Anhängern bzw. im Häcksler diese Messungen beeinflusst haben.

Für die zukünftige Verbesserung solche Versuche, ist auf jeden Fall eine randomisierte Anordnung der Prüfglieder zu empfehlen, um den Faktor Boden als Fehlerquelle zu minimieren. Weiterhin sollte man, wenn schon unterschiedliche Saatstärken nach den Sortenempfehlungen gedreht werden, auch andere produktionstechnische Maßnahmen an die Bedürfnisse der Sorten anpassen, um die Vergleichbarkeit insbesondere mit Mais zu gewährleisten. Dies spielt besonders bei der Ernte eine entscheidende Rolle, da später reifende Sorten zu einem verfrühten Zeitpunkt geerntet wurden und somit ihr eigentliches Ertragspotential nicht ausschöpfen, und den benötigten TS- Gehalt nicht erreichen konnten. Dies beeinflusst weiterhin die Methanausbeuten und somit auch den Energieertrag und die Wirtschaftlichkeit des Anbaus.

Es ist ebenfalls von großem Interesse, die Versuche nicht nur an verschiedenen Standorten, sondern auch über mehrere Jahre hinweg durchzuführen, damit Empfehlungen für oder gegen Sorghumhirsen detaillierter und mit höherer Sicherheit getroffen werden können. Auch die Aufnahme einiger Maissorten in den Versuch wäre sinnvoll, um diese bei gleichen Bedingungen mit der Sorghumhirse vergleichen zu können.

Um die Kulturen wirtschaftlich vergleichbar zu machen, ist es von Bedeutung die Betriebsmittelkosten und Arbeitserledigungskosten eines Betriebes detailliert nutzen zu können. Der Vergleich zwischen groben Betriebsdaten für die Sorghumhirsen und Daten aus einschlägiger Literatur für Mais ist nicht empfehlenswert.

Sollten die Versuchsfehler in Zukunft vermieden und die Verbesserungsvorschläge umgesetzt werden, ist eine Validität der Versuchsergebnisse mit hoher Wahrscheinlichkeit gewährleistet. Unter den gegebenen Bedingungen ist die Sicherheit der Ergebnisse als mangelhaft zu betrachten.

8. Diskussion & Ausblick

Hintergrund dieser Arbeit war es, in Versuchen mit verschiedener Sorghumhirse deren Anbau als effektive und effiziente Alternative zum Mais für die Verwendung in Biogasanlagen zu beurteilen. Unter Berücksichtigung aller im Vorfeld dargestellten Ergebnisse und der Auswertung des zu Grunde liegenden Versuchs, muss man zu dem Schluss gelangen, dass dies nicht der Fall ist.

Auch wenn die Sorte Goliath bei einem niedrigen Ertragsniveau des Mais diesen übertreffen kann, bleibt fraglich ob sich dieser Sachverhalt über mehrere Jahre bestätigen würde. Die Sorghumhirschen haben ihren Vorteil in sehr warmen und trockenen Jahren, was jedoch nicht vorher gesagt werden kann. Auch bei den Kosten für die Produktion lassen sich bei den Sorghumhirschen keine großen Einsparpotentiale zum Mais feststellen. Ob die einzelnen Kostenpunkte auf Dauer dieses Niveau halten, ist abzuwarten und kann die Wirtschaftlichkeit des einen oder des anderen Substrates verbessern. Bei stärkerer Nachfrage auf dem Markt wird es in der Züchtung der Sorghumhirschen mit Sicherheit weitere Fortschritte geben, was die Nachteile zum Mais verringern könnte.

Selbst wenn der Ertrag und die Wirtschaftlichkeit des Anbaus der Sorghumhirschen an das Maisniveau herankämen, bleibt zu hinterfragen, ob es möglicherweise zu Problemen bei der Lagerung in Form von Verlusten, bei der Vergärung in Biogasanlagen selbst oder bei der Ausnutzung der Gärreste kommen kann. Diese Faktoren können einen wirtschaftlichen Anbau ebenso belasten, wie eine nicht geklärte Stabilität der Erträge von Sorghumhirschen.

Abzuwarten bleibt auch, wie sich verändernde Anbaubedingungen, zum Beispiel zunehmender Schädlingsbefall im Mais auf die Anbauwürdigkeit der Sorghumhirschen auswirken.

Ebenfalls der in den Medien prognostizierte Klimawandel, eine damit verbundene Erhöhung der Temperaturen und die Veränderung der Niederschlagsmenge und -verteilung, könnten der Hirse Vorzüge gegenüber dem Mais einbringen. Durch die realistisch nur gering vorhersehbaren Entwicklungen auf den beschriebenen Gebieten, ist es nahezu unmöglich Prognosen für die Zukunft zu geben.

Festzuhalten ist, dass es in den Anbauregionen mit geringem Ertragsniveau und Ertragsstabilität des Mais für jeden Betrieb sinnvoll ist, den Anbau von Sorghumhirschen in Betracht zu ziehen und eigene Versuche unter den gegebenen Praxisbedingungen durchzuführen.

Mit dieser Arbeit wurde festgestellt, dass unter den Bedingungen im Jahr 2008 an den beschriebenen Standorten und den vorhandenen Anbauverfahren der Betriebe, Sorghumhirschen nicht als wirtschaftliche Alternative zu Mais produziert werden können.

9. Zusammenfassung

Mit steigender Bedeutung der Energiegewinnung aus nachwachsenden Rohstoffen stieg auch der Bedarf an Substraten erheblich. Mais nahm hier von Anfang an, aufgrund seiner besonders günstigen Eigenschaften, wie hohe TS- und Energieerträge, eine Sonderstellung ein. Auf der Suche nach Alternativen bzw. Ergänzungen zur Vermeidung der Nachteile einseitiger Flächenbestellung erschienen besonders die Sorghumhirsen aufgrund ähnlicher Eigenschaften vielversprechend. Sorghumhirsen sind ähnlich anspruchslos und selbstverträglich wie Mais und zeigen sogar eine höhere Trockenheitsresistenz. Beide Pflanzen gelten beim speziellen Anbau für die Fermentation in BGA als Energiepflanzen. In industriellen oder hofeigenen BGA wird das pflanzliche Material dann (u.U. zusammen mit Wirtschaftsdünger und/oder Getreide) fermentiert, wodurch das sogenannte Biogas entsteht. Biogas ist ein energiereiches, industriell produziertes Gas, das im Wesentlichen aus Methan und Kohlenstoffdioxid besteht. Aus dem Biogas kann letztendlich Strom und Wärme gewonnen und somit ein wichtiger Anteil zur Energieversorgung aus alternativen Quellen geleistet werden. Um diesen Sachverhalt ökonomisch attraktiver zu machen, wurde im April 2000 das Erneuerbare Energien Gesetz eingeführt, welches den Absatz des Stroms aus Erneuerbaren Energien verbessert, indem es eine geregelte Vergütung vorschreibt. Das produzierte Biogas ist nunmehr umso wertvoller und ökonomischer je mehr Methan es enthält. Die Biogas- und Methanausbeuten sind aber substratspezifisch - so ist in der Fachliteratur häufig Mais mit einer deutlich höheren Biogausbeute als Sorghumhirsen angegeben - jedoch übersteigen diese den Mais bei der Methanausbeute um 2-3- Prozent. Das Anbauziel aller Energiepflanzen müssen also vorrangig hohe Biogaserträge und gute Methanausbeuten sein.

Beide Pflanzen liefern durch hohe Kohlenhydrat- und niedrige Proteingehalte hervorragende Siliereigenschaften, so dass der Einsatz von Siliermitteln nur unter bestimmten Umständen erforderlich ist. In der zögerlichen Jugendentwicklung sind sowohl Mais als auch Sorghumhirsen frostempfindlich. Weiterhin sollte auch ein hoher Unkrautdruck durch Fruchtfolgeerweiterung vermieden werden. Beide Energiepflanzen haben eine kurze Vegetationsdauer und sollten zur Ernte eine TS von 28-35 % aufweisen, um genug Energie zu liefern. Bei den Sorghumhirsen unterscheidet man 3 Arten und 3 Typen: es gibt die Art der Zuckerhirse, die Sudangräser, Hybride und des Weiteren Zuckerhirsetypen, Futterhirsetypen und Faserhirsetypen. Im Versuch verwendet wurden als Zuckerhirsen die Sorten Super Sile 20, Sucrosorgho 506 und Rona, als Futterhirsen die Sudangräser Susu und Lussi und als einzige Faserhirse die Sorte Goliath. Angebaut wurden die Sorten an den 3 Versuchsstandorten Rachow, Malchow und Staffelde. Pflanzenbaulich ergeben sich beim Anbau von Mais und Sorghumhirsen nur einige wenige Unterschiede. Beide Pflanzen haben geringe Bodenansprüche, jedoch sollte der Boden gleichmäßig und gut durchwurzelbar sein, da weiterhin eine hohe Standfestigkeit beider Pflanzen von großer Bedeutung ist. Sorghumhirsen sind wärmeliebender und temperaturabhängiger, sowie wesentlich trockenresistenter als Mais. Für beide Pflanzen gilt: je höher die TS, desto weniger frostempfindlich ist die Pflanze.

Die Zielfrage des Versuches und dieser Arbeit war es letztendlich die Anbauwürdigkeit von Sorghumhirsen zur Verwendung als Substrat in Biogasanlagen zu beurteilen. Grundlegend ist zu sagen, dass Mais mit seinen hervorragenden Eigenschaften als Substrat für BGA wohl nie vollkommen abgelöst werden kann. Vielmehr sollen Ergänzungen zu ihm gefunden werden, um den Nachteilen des übermäßigen Anbaus nachhaltig entgegen wirken zu können. Ob und in wie weit die Sorghumhirsen effektive und effiziente Ergänzungen sein können, wurde in dieser Arbeit hinsichtlich verschiedener Aspekte untersucht. An oberste Stelle stand das Herauskristallisieren einer geeigneten Sorte um diese dann mit dem Mais als Substrat vergleichen zu können.

Hinsichtlich der Bestandeshöhe und –dichte, sowie der Entwicklung grenzten sich auf dem Standort Staffelde schon früh die beiden Sudangräser Susu und Lussi ab, welche über den gesamten Versuch betrachtet positiv hervorstachen. Bezieht man nun aber die Erträge an Trockensubstanz der einzelnen Sorten mit ein, so ergibt sich ein anderes Bild. Die Sorte Goliath lieferte hier bei weitem die besten Ergebnisse an der Trockensubstanz. Ebenfalls beim Vergleich der Methanausbeuten zeigte Goliath die besten Werte.

Im Versuch stellte sich heraus, dass im Jahr 2008 an den geprüften Standorten, bis auf die Sorte Goliath, keine Hirsesorte an ein niedriges Ertragsniveau und somit an den Methanertrag des Mais heran kam.

Die Bereitstellungskosten der Energiepflanzen spielen ebenfalls eine wichtige Rolle zur Beurteilung der Gesamtanbauwürdigkeit. Bei der Bereitstellung von Mais und Sorghumhirsen lässt sich zusammenfassend sagen, dass die Produktion von einer Dezitonne Trockensubstanz Mais für die Verwendung in BGA günstiger war, als die Produktion der Trockensubstanz von Sorghumhirsen. Allerdings muss beachtet werden, dass die Berechnung der Kosten für die Sorghumhirsen an den Zahlen des Versuches in Staffelde, die Berechnung der Kosten für Mais jedoch aus dem KTBL gemacht wurde.

Alle Aussagen treffen jedoch nur unter den gegebenen Bedingungen zu. Um sichere Aussagen treffen zu können, sollten diese Versuche nicht nur an verschiedenen Standorten und mehreren Jahren erfolgen, sondern auch im direkten Vergleich mit Mais durchgeführt werden.

So könnten die Sorghumhirsen unter Umständen schon bald helfen, den gestiegenen Bedarf an Substraten für Biogasanlagen nachhaltig zu decken und eine effektive und effiziente Alternative zur wichtigsten Energiepflanze Mais darzustellen. Damit wäre ein weiterer, wichtiger Beitrag zur notwendigen Steigerung der Energiegewinnung aus nachwachsenden Rohstoffen geleistet.

Literaturverzeichnis

- [1] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hrsg.) mit Förderung des Bundesministeriums für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft und mit Publikationen durch das Institut für Energetik und Umwelt GmbH, der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft und dem Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.: Handreichung Biogasgewinnung und –Nutzung. 3. Überarbeitete Auflage. Gülzow: 2006.
- [2] Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (Hrsg.), Leibniz-Institut für Agrartechnik in Potsdam (Hrsg.), Bearbeiter: Döhler, Eckel, Frisch, Fröba, Funk Grube u.a., unter Mitwirkung von LWF, FAL, BDP, HeRo, LAP, LFA TLL u.a.: Energiepflanzen – Daten für die Planung des Energiepflanzenanbaus. Darmstadt: 2006.
- [3] Prof. Dr. Klaus Böhme, Dr. Barbara Hentschel, Dr. Thomas Tanneberger, Anke Serfling, Catrin Hahn, Sabine Leopold, Jörg Möbius: Neue Landwirtschaft – Das Fachmagazin für Agrarmanager. 11/2008, Seiten 87-103. Berlin: Deutscher Landwirtschaftsverlag GmbH, 2008.
- [4] Dr. Albrecht Roller, Stickse, Petersen des Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für nachwachsende Rohstoffe: Sorghumhirse – Sorten- und Herkunftsvergleich, Symposium Energiepflanzen 24.10.2007. Straubing: 2007.
- [5] Hans Oechsner, Hohenheim, Andreas Lemmer, Stuttgart, und Claude Neuberg, Ettelbruck/Luxemburg in Landtechnik (58) 3/2003, S. 146, 147: Feldfrüchte als Gärsubstrat in Biogasanlagen.
- [6] Pressemitteilung NAWARO AG. Leipzig: Oktober, 2008.
- [7] Barbara Eder, Dr. Joachim Eder, Dr. Andreas Gronauer, Felipe Kaiser, Christine Papst (LfL Freising) in BLW 11/2004, S. 45,46: Mehr Gas aus der Gülle.
- [8] Thomas Lehmann: Sudangras – Die Energiepflanze von morgen? Pflanzenschutzmanagement und Bestandesanalytik. Neubrandenburg: 2008.
- [9] Datenbanken der LFA Gülzow: <http://lfa.info-agrarportal.de/index.php?/content/view/full/1659> (Stand: 20.12.2008)
- [10] Hirschl, Hoffmann, Zapfel u.a.: Markt- und Kostenentwicklung erneuerbarer Energien – 2 Jahre EEG – Bilanz und Ausblick. Berlin: Erich Schmidt Verlag, 2002.
- [11] Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (Hrsg.), Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hrsg.), Autoren: Becker, Döhler, Eckel, Fröba, Grube, Hartmann u.a.: Faustzahlen Biogas. Darmstadt/Gülzow: 2007.
- [12] Prof. Dr. Klaus Böhme, Dr. Barbara Hentschel, Dr. Thomas Tanneberger, Anke Serfling, Catrin Hahn, Sabine Leopold, Jörg Möbius: Neue Landwirtschaft – Das Fachmagazin für Agrarmanager. Neue Landwirtschaft 8/2008, Seiten 74-85. Berlin: Deutscher Landwirtschaftsverlag GmbH, 2008.

- [13] Prof. Dr. Klaus Böhme, Dr. Barbara Hentschel, Dr. Thomas Tanneberger, Anke Serfling, Catrin Hahn, Sabine Leopold, Jörg Möbius: Neue Landwirtschaft – Das Fachmagazin für Agrarmanager. Neue Landwirtschaft 7/2008, Seiten 72-75. Berlin: Deutscher Landwirtschaftsverlag GmbH, 2008.
- [14] Sven Teske u.a.: Erneuerbare Energien – Warum wir sie dringend brauchen aber kaum nutzen. Berichte, Analysen, Argumente. Düsseldorf: VDI Verlag, 1996.
- [15] Barbara Eder, Dr. Heinz Schulz, Walter Graf, Andreas Krieg, Hans Mitterleitner, Karl Heinz Stocker, Arthur Wellinger: Biogas – Praxis. Grundlagen, Planung, Anlagenbau, Beispiele, Wirtschaftlichkeit. 3. vollständig überarbeitete und erweiterte Neuauflage. Staufen bei Freiburg: ökobuch Verlag, 2006.
- [16] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hrsg.) in Zusammenarbeit mit dem BMELV, BMU, BBE, vTI, ATB, KTBL, DBFZ und dem Fachverband Biogas e.V.: Biogas – Basisdaten Deutschland Stand Oktober 2008. Gülzow: 2008
- [17] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hrsg.) in Zusammenarbeit mit dem BMELV: Biogas – eine Einführung. 5. überarbeitete Auflage. Gülzow: Januar 2008.
- [18] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hrsg.), Autoren: Dr. Ralf Pude, Barbara Wenig: Pflanzen für die Industrie. Pflanzen, Rohstoffe, Produkte. 4. Überarbeitete Auflage. Gülzow: 2005.
- [19] Dr. Marianne Karpenstein-Machan: Energiepflanzenanbau für Biogasanlagenbetreiber. Frankfurt am Main: DLG Verlag, 2005.
- [20] Gesetz zur Neuregelung des Rechts der Erneuerbaren Energien im Strombereich 2008 (EEG)
- [21] P. Grundmann, M Plöchl, M. Heiermann: Wirtschaftlichkeitsuntersuchung zum Einsatz landwirtschaftlicher Kosubstrate in Biogasanlagen. Potsdam: 2002
- [22] Deutsches Maiskomitee e.V. (Hrsg.), Autoren: Konstanze Böhmel, Friedrich Jäger: Mais – Fachzeitschrift für Maisanbauer 4/07. Sorghum eine Ergänzung zu Mais? Anbauhinweise und Möglichkeiten zur Fruchtfolgegestaltung (Sonderdruck). Bonn: Verlag Th. Mann GmbH & Co. KG, Oktober 2007.
- [23] Dr. Andreas Gurgel: Versuchsbericht Anbau von Sorghum zum Einsatz in Biogasanlagen. Landesforschungsanstalt Gülzow: Oktober 2008 – Januar 2009.
- [24] http://www.ehlbeck-energie.de/alternative_energiepflanzen.htm
- [25] http://www.ehlbeck-energie.de/pdf/goliath_riesenhirse.pdf; Saatbau Linz: Biomassehirse Goliath: der Riese unter den Hirsen. Linz: Juni 2007.
- [26] Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (Hrsg.), Autoren: M. Conrad, A. Biertümpfel, A-INFO Datenbanken: Anbautelegramm Futter-/Zuckerhirse (Sorghum bicolor). Jena: 2008.

- [27] Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (Hrsg.), Autoren: M. Conrad, A. Biertümpfel, A-INFO Datenbanken: Anbautelegramm Sudangras (Sorghum sudanese). Jena: 2008.
- [28] Land & Forst 15/2008, Autorin Andrea Meyer: Hirse - ein neues Futtermittel, S. 59. DLV Verlag 2008.
- [29] René T. J. Chappers: Roman Footprints at Berenike. Los Angeles: 2006.
- [30] Nature International weekly journal of science, Band 447, S. 897: china looks for alternative biofuel options. Philadelphia: 2007.
- [31] Dominik Helffrich, Hans Oechsner in Landtechnik (58) 3/2003, Seiten 148 f.: Hohenheimer Biogasertragstest. Hohenheim: 2003.
- [32] Bernhard Stürmer, Michael Eder: Modell zur Optimierung der Substratbereitstellungskosten bei Biogasanlagen. ÖGA Tagungsband 2008.
- [33] Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft: Wie viel dürfen Substrate frei Fermenter kosten? München: November 2006.
- [34] <http://www.transgen.de/datenbank/pflanzen/52.mais.html>
- [35] Uwe Meier, Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft: Entwicklungsstadien mono- und dikotyle Pflanzen, BBCH Monografie. 2. Auflage. Braunschweig/Berlin: 2001.
- [36] Analytiklabor für Landwirtschaft und Umwelt Bllg Deutschland GmbH: Prüfberichte. Parchim: 2008.
- [37] Prof. Dr. agr. habil. Friedrich Weißbach in Landtechnik (63) 6/2008: Zur Bewertung des Gasbildungspotenzials von nachwachsenden Rohstoffen. Elmenhorst: 2008.
- [38] IfUL Müllheim, H. Nussbaumer: PTV Biogas - Energiepflanzen (Gras, Mais, Hirse), Biogas-Energiepflanzen 2004 - Einjährige Ergebnisse. Müllheim: Juni 2004.
- [39] http://www.lfl.bayern.de/ilb/db/14249/db_berechnung.php?was=bg_mais (01.05.2009)
- [40] http://www.energiepflanzen.net/gfx/energiepflanzen/sorghum1_clip_image002.jpg

Eidesstattliche Erklärung

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

Datum, Ort

Unterschrift Franziska Krüger

Anhang

Bestandesdichte in Pfl./m² 27.08.2008

	Sucrosorgho 506	Goliath	Lussi	Sucrosorgho 506	Rona 1	Super Sile 20	Susu	Sucrosorgho 506
D	17	14	54	19	17	23	56	19
C	16	16	55	21	21	24	45	19
B	22	15	52	27	21	21	41	20
A	22	17	49	30	21	26	60	15

(Quelle: eigene Erhebung)

Bestandeshöhe in Metern 27.08.2008

	Sucrosorgho 506	Goliath	Lussi	Sucrosorgho 506	Rona 1	Super Sile 20	Susu	Sucrosorgho 506
D	0,8	0,9	1,2	1,18	0,85	0,9	1,3	1,77
C	0,7	0,8	1,31	1,25	1,1	1,1	1,37	1,54
B	0,38	0,7	1	1,65	1,3	0,87	0,95	1,73
A	0,65	1,1	1,35	1,55	1,2	1	1,28	1,85

(Quelle: eigene Erhebung)

Bestandeshöhe in Metern 15.09.2008

	Sucrosorgho 506	Goliath	Lussi	Sucrosorgho 506	Rona 1	Super Sile 20	Susu	Sucrosorgho 506
D	0,65	1,6	1,55	2,2	1,5	1	1,8	2,2
C	0	0,95	1,3	2,1	1,6	1	1,75	1,8
B	0,6	1	1,35	1,7	1,3	1,1	1,25	2,1
A	0,8	1,35	1,55	1,4	0,95	1,2	1,75	2,3

(Quelle: eigene Erhebung)

Bestandeshöhe in Metern 30.09.2008

	Sucrosorgho 506	Goliath	Lussi	Sucrosorgho 506	Rona 1	Super Sile 20	Susu	Sucrosorgho 506
D	0,4	1,85	1,52	2,3	1,45	1	1,77	2,45
C	0,67	1,37	1,24	2,1	1,63	1,3	1,76	2,1
B	0,97	1,47	1,44	1,6	1,25	0,9	1,5	1,75
A	1,13	1,2	1,32	1,06	0,85	1,1	1,78	2,3

(Quelle: eigene Erhebung)

Entwicklungsstadien nach BBCH 27.08.2009

	Sucrosorgho 506	Goliath	Lussi	Sucrosorgho 506	Rona 1	Super Sile 20	Susu	Sucrosorgho 506
D	13	31	32	31	32	32	61	34
C	13	15	51	32	32	33	59	33
B	14	14	51	34	35	32	33	37
A	15	32	61	34	33	34	55	34

(Quelle: eigene Erhebung)

Entwicklungsstadien nach BBCH 15.09.2008

	Sucrosorgho 506	Goliath	Lussi	Sucrosorgho 506	Rona 1	Super Sile 20	Susu	Sucrosorgho 506
D	13	51	59	51	53	51	59	53
C	0	31	59	51	59	51	59	51
B	13	32	61	34	53	51	59	51
A	13	33	61	33	51	51	61	51

(Quelle: eigene Erhebung)

Entwicklungsstadien nach BBCH 30.09.2008

	Sucrosorgho 506	Goliath	Lussi	Sucrosorgho 506	Rona 1	Super Sile 20	Susu	Sucrosorgho 506
D	13	51	61	53	55	53	61	51
C	33	51	61	53	55	53	61	53
B	33	51	59	51	53	51	61	51
A	51	51	59	33	51	53	69	55

(Quelle: eigene Erhebung)

Trockensubstanzgehalte

Sorte	27.08.2008	15.09.2008	30.09.2008
Sucrosorgho			23,64
Goliath	20,13	30,39	25,01
Lussi	19,20	29,84	27,89
Sucrosorgho	17,21	24,34	21,21
Rona 1	22,66	28,02	35,38
Super Sile	18,60	26,50	25,94
Susu	22,70	30,75	28,11
Sucrosorgho		26,81	21,65

(Quelle: eigene Erhebung)

Methanpotential nach dem Hohenheimer Biogasertragstest

Sorte (zur Ernte)	mittl. Gasmenge Korrigiert (N mL)	mittl. Methanmenge Korrigiert (N mL)	mittl. Methan-gehalt Korrigiert (% Volumen)	mittl. Spezifischer Gasertrag (Nm ³ /kg oTS)	mittl. Spezifischer Methan-ertrag (Nm ³ CH ₄ /kg oTS)	mittl. STD (%)	Mittelwert TS [% FM]	Mittelwert oTS [% TS]
Goliath	187	89	48	0,655	0,312	2,7	91	92
Lussi	176	87	50	0,626	0,311	3,1	91	91
Sucrosorgho	195	94	48	0,665	0,321	2,1	91	96
Rona	190	94	49	0,648	0,319	3,1	90	96
Super Sile	190	94	49	0,668	0,330	1,9	91	93
Susu	166	79	48	0,555	0,266	3,4	91	97

(Quelle: Universität Hohenheim)

Methanpotential nach Prof. Dr. Friedrich Weißbach

Datum	Sorte	TM		FoTS** g/kg TS	nach Maisgleichung		HBT Messwerte (TS)		HBT Messwerte (oTS)		Relativwerte Methan** /kg TS (HBT = 100)	Sortenvergleich Methan /kg TS nach FoTS (Mittel der Sorten = 100)
		g/kg FM	g/kg TS		Biogas** Liter/kg TS	Methan** Liter/kg TS	Biogas Liter/kg TS	Methan Liter/kg TS	Biogas m3/kg oTS	Methan m3/kg oTS		
26.8.08	Sucro- sorgho	151	685	548	288	629	316	0,682	0,342	91,1	100,3	
12.9.08		155	672	537	282	704	341	0,756	0,366	82,7		
6.10.08		180	725	580	305	635	310	0,672	0,328	98,4		
9.10.08		202	727	581	305	636	307	0,665	0,321	99,3		
26.8.08	Rona	165	702	562	295	651	318	0,643	0,314	92,9	103,0	
12.9.08		212	699	559	293	608	297	0,651	0,321	98,8		
6.10.08		231	694	555	291	619	305	0,648	0,321	95,7		
9.10.08		218	745	596	313	613	304	0,648	0,319	102,9		
26.8.08	Goliath	115	721	577	303	615	303	0,653	0,318	99,9	96,4	
12.9.08		155	671	537	282	592	289	0,623	0,311	97,5		
6.10.08		176	643	515	270	579	289	0,677	0,325	93,6		
9.10.08		175	678	543	285	637	306	0,655	0,312	93,1		
26.8.08	Susu	202	675	540	284	607	295	0,551	0,266	96,2	104,2	
12.9.08		237	724	579	304	527	255	0,661	0,333	119,3		
6.10.08		272	706	565	297	636	320	0,582	0,279	92,6		
9.10.08		254	748	599	314	562	269	0,555	0,266	115,6		
26.8.08	Lussi	254	730	584	306	565	275	0,645	0,328	112,5	95,0	
12.9.08		306	663	530	278	614	312	0,635	0,321	89,2		
6.10.08		293	657	525	276	606	307	0,655	0,322	89,8		
9.10.08		283	671	537	282	624	307	0,626	0,311	91,9		
26.8.08	SuperSile	168	666	532	280	611	306	0,644	0,310	91,4	101,1	
12.9.08		204	703	562	295	602	289	0,668	0,322	101,9		
6.10.08		204	681	545	286	632	305	0,652	0,317	93,9		
9.10.08		215	724	579	304	622	303	0,668	0,330	100,5		
			708	566	297	624	303			98,2		

(Quelle: Analytiklabor für Landwirtschaft und Umwelt Blgg Deutschland GmbH; F. Weißbach, C. Strubelt)

Produktionskostendaten Staffelde

ha	2009	Ernte	RoundUp	Fahrgassen lockern	Scheiben-egge	Pflug	Saatbett-bearbeitung	Steine sammeln	GRS Frühjahr	Düngung	Scheiben-egge	Aussaat Mais mit UF	Herbizid Mais
35,00	Mais	35,00	0,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	0,00	35,00	35,00	35,00
32,00	Mais	32,00	32,00	32,00	32,00	32,00	32,00	32,00	32,00	32,00	32,00	32,00	32,00
62,00	Hirse	62,00	0,00	62,00	62,00	62,00	62,00	62,00	62,00	62,00	0,00	62,00	62,00
129,00		129,00	32,00	129,00	129,00	129,00	129,00	129,00	129,00	94,00	67,00	129,00	129,00
129,00		129,00	32,00	129,00	129,00	129,00	129,00	129,00	129,00	94,00	67,00	129,00	129,00
	Einheit /€	0,00	12,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,60	50,00
	Einheiten/ha	0,00	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	60,00	1,00
	Preis/ ha in €:	0,00	25,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	96,00	50,00
		0,00	800,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	12.384,00	6.450,00

(Quelle: Claas Wilfarth, Betriebsleiter Staffelde)

Produktionskostendaten Malchow

Kostenübersicht Hirse Mandelslow		
Arbeitsgang	Betriebsmittel	Kosten in €/ ha
Grubbern		45,00 €
Saatbett		30,00 €
Aussaat		45,00 €
	Saatgut	??
PS-Ausbringen		10,00 €
PS-Ausbringen		10,00 €
N-Düngung		10,00 €
P-Düngung		10,00 €
	Glyphos	11,10 €
	Gardo Gold	36,48 €
	KAS	78,20 €
	DAP	35,90 €
Erntekosten		250,00 €
Silierkosten		12,00 €
Summe		583,68 €

(Quelle: Herr. v. Mandelslow; Betriebsleiter Malchow)