

**Universität für Bodenkultur Wien**

University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Vienna



H93 Department für nachhaltige Agrarsysteme

H931 Institut für Landtechnik

**Diplomarbeit**

**Biogasbildungsvermögen von Grünlandbiomasse in  
Abhängigkeit vom Nährstoff- und Energiegehalt**

verfasst von:

**Marion Gerstl**

Matrikelnummer: 9948156

Studienrichtung Landwirtschaft (H890)

Betreuer:

**Ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. agr. Thomas Amon**

**Univ. Doz. Dipl.-Ing. Dr. nat. tech. Erich M. Pötsch**

Wien, Juni 2008

## Danksagung

Diese Diplomarbeit stellt den Abschluss meines Studiums an der Universität für Bodenkultur dar. Ich möchte mich bei all jenen herzlichst bedanken, die mich bei dieser Arbeit erstklassig unterstützt haben, denn ohne deren Hilfe wäre der Weg vom Beginn bis zum Abschluss meiner Diplomarbeit wesentlich schwieriger gewesen.

Ein besonderer Dank gilt:

- Herrn Ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. agr. Thomas Amon und Univ. Doz. Dipl.-Ing. Dr. nat. tech. Erich M. Pötsch, welche durch ihre freundliche und fachlich kompetente Betreuung wesentlich zum Gelingen dieser Diplomarbeit beigetragen haben.
- Allen Kolleginnen und Kollegen des Institutes für Landtechnik die mich bei meinen Untersuchungen und Auswertungen sehr freundschaftlich und kollegial unterstützten.
- Dem Team des Lehr- und Forschungszentrums in Gumpenstein, das mich bei der Ernte der Versuchsflächen hervorragend betreute.

## Kurzfassung

Der weltweite Hunger nach Energie ist unersättlich, daher erlebt auch die anaerobe Vergärung im Zuge der Nutzung erneuerbarer Energiequellen einen starken Zuwachs. Die Grünlandwirtschaft ist in Österreich von sehr großer Bedeutung, denn auf den rund 2,0 Mio. ha Grünlandflächen wachsen jährlich 6-7 Mio. Tonnen Trockenmasse, 30 % werden als Grünfutter, 27 % als Heu und 43 % als Silage verwendet (vgl. RESCH et al., 2006, 2). Das Grünland spielt nicht nur bei den Raufutterverzellern eine große Rolle sondern auch zunehmend bei der Energieproduktion von Biogas.

Da es in Österreich noch sehr wenige Untersuchungsergebnisse zum Thema Biogasbildungsvermögen von Grünlandbiomasse in Abhängigkeit deren Nährstoff- und Energiegehalt gibt, wurde im Rahmen dieser Diplomarbeit dieses Thema genauer untersucht. Sie zeigt auf, welche Grünlandstandorte (extensiv oder intensiv) und welche Konservierungsverfahren (Nasssilage, Anwelksilage oder Gärheu) sich besonders gut zur Erzeugung von Biogas eignen.

Als Beurteilungskriterien werden die Merkmale Biomasseertrag, spezifisches Methanbildungsvermögen sowie der Methanhektarertrag und der Erntezeitpunkt herangezogen, wobei das spezifische Methanbildungsvermögen der Grassilagen anhand der untersuchten Inhaltsstoffe mithilfe des Methanenergiewertmodells berechnet wird.

Aus den Ergebnissen lässt sich im Hinblick auf den optimalen Standort, die optimale Nutzungsintensität und das optimale Ernteverfahren folgendes ableiten:

- die spezifische Methanausbeute des intensiv genutzten Standortes in Gumpenstein mit max. 345 [ $\text{kg}/\text{kg oTS}$ ] liegt über der des extensiv genutzten Standortes in Buchau mit max. 309 [ $\text{kg}/\text{kg oTS}$ ].
- das Konservierungsverfahren der Nasssilage liefert die höchsten Methanausbeuten, mit maximal 345 [ $\text{kg}/\text{kg oTS}$ ] gefolgt von der Anwelksilage und dem Gärheu
- den höchsten Methanhektarertrag mit 2421 [ $\text{Nm}^3 \text{CH}_4/\text{ha}$ ], liefert die intensiv genutzte Vierschnittwiese mit dem Konservierungsverfahren der Nasssilage, dieser Standort liefert auch die höchsten Biomasseerträge mit 81,55 dt/ha

Schlagwörter: Biogas, Methan, Grünlandbiomasse, Beuteltechnik, Gras

## Abstract

Today, the worldwide hunger for energy is insatiable. Therefore, anaerobic fermentation as a source of renewable energy is in great demand. In Austria, the grassland management is of great importance, because 6-7 mio. tons of dry matter are growing on around 2,0 million ha grassland acreage every year; 30 % are used as green forage, 27 % are used as hay and 43 % are used as silage (vgl. RESCH et al., 2006, 2). Grassland plays an important role not only for fodder production for roughage using animals, but also the energy production of biogas is increasing. The theme of this diploma thesis is to give an insight on biogas production out of biomass from grassland depending on nutrient and energy content and to provide appropriate research results which are not available in Austria up to now. This thesis shows which locations of grassland systems (extensive/intensive) and which kind of conservation (wet silage, pre-wilted silage or haylage) is particularly suitable for production of biogas. As an assessment criterion the yield of biomass, the specific methane production as well as the methane yield per hectare and the time of harvest are taken into account, where the specific methane production is calculated with the methane energy value model on basis of the ingredients of the grass silage. Out of these research results, following facts are obtained with respect to the optimum location of the grassland, the optimum intensity of use and the optimum kind of harvest:

- The specific methane yield of the intensively managed valley area in Gumpenstein with max. 345 [l<sub>N</sub>/kg oTS] is higher compared to the low input mountainous site in Buchau with max. 309 [l<sub>N</sub>/kg oTS].
- The kind of harvest of the wet silage shows the highest yield of methane production with maximum 345 [l<sub>N</sub>/kg oTS] followed by the pre-wilted silage and the haylage.
- The highest yield of methane production per hectare is obtained from of intensively used grassland with four cuts conserved as wet silage as the appropriate kind of harvest. This location also gives the highest yield on biomass production with 81,55 dt/ha.

Keywords: biogas, biomass of grassland, methane, grass, method with bags

# Abkürzungsverzeichnis

a	Jahr	EU	Europäische Union
Abb	Abbildung	evt.	eventuell
ADM 1	Anaerobic Digestion Model No. 1	Ext.	extensiv
ADL	Acid Detergenz Lignin	f	folgend
ANOVA	Analysis of Varianz	ff	fortfolgende
AW	Anwelksilage	FF	Fruchtfolge
BE	Bruttoenergie	FM	Frischmasse
BG	Biogas	F	Flour
BGBL	Bundesgesetzblatt	g	Gramm
BHKW	Blockheizkraftwerk	GE	Gross Energy
BMITV	Bundministerium für Verkehr, Innovation und Technologie	GH	Gärheu
	beziehungsweise	GL	Grünland
bzw.	Grad Celsius	ha	Hektar
°C	Chlor	H <sub>2</sub>	Wasserstoff
Cl	Zirka	H <sub>2</sub> O	Wasser, Wasserdampf
ca.	Zellulose	H <sub>2</sub> S	Schwefelwasserstoff
CEL	Methan	H-CEL	Hemizellulose
CH <sub>4</sub>	Zentimeter	Hm	Höhenmeter
cm	Compressed Natural Gas	Int.	intensiv
CNG	Kohlenstoff-Stickstoff	IM	Intensivwiese
C:N	Verhältnis	J	Jahr
	Kohlendioxid	k.A.	keine Angaben
CO <sub>2</sub>	Chrom	kg	Kilogramm
Cr	Kupfer	km	Kilometer
Cu	das heißt	KM	Kleegrasmischung für mittlere Lagen
d.h.	Durchschnitt	KW	Kohlenwasserstoff
∅	Dauerwiese	kW	Kilowatt
DM	Dezitonne	KW <sub>el</sub>	Kilowatt elektrische Energie
dt	Euro	KWh	Kilowattstunde
€	et cetera	KTBL	Kuratorium für Technik und Bauwesen
etc.	und andere		

et al.	Erneuerbare Energie	l	Liter
EG	Normliter Methan je	PEM	Proton Exchange
$l_N CH_4 * kg$	Kilogramm organische		Membrane
$oTS^{-1}$	Trockensubstanz	ppm	parts per million
	Logarithmus	%	Prozent
Log	Meter	§	Paragraph
m	Millimeter	ROE	Rohöleinheiten
mm	Quadratmeter	S	Schwefel
$m^2$	Kubikmeter	s.a.	sine anno (ohne
$m^3$	Normkubikmeter Methan je		Jahreszahl)
$m^3_N CH_4 * ha^{-1}$	Hektar	Schnittn.	Schnittnutzung
	Methanenergiewert	SB	Sonnenblume
MEW	Methanenergiewertmodell	Signif.	Signifikanz
MEWM	Million	s.p.	sine pagina (ohne
Mio.	Megajoule		Seitenzahl)
MJ	Milligramm	STBW	Standardabweichung
mg	Millimol	STK	Stärke
mmol	Millionen Tonnen Öl	Si	Silizium
Mtoe	Äquivalent	t	Tonne
	Milliarde	Tab	Tabelle
Mrd	Mittelwert	Temp.	Temperatur
MW	Anzahl	theor.	theoretisch
n	Wirkungsgrad	THD	Thermodruckhydrolyse
?	Nomen Nescio (kein Name)	TM	Trockenmasse
N.N.	Nachwachsende Rohstoffe	TS	Trockensubstanz
NaWaro	Stickstoff	u.a.	und andere
$N_2, N$	Neutral Detergent Fibre	UNO	United Nations
NDF	Stickstoff- freie Extraktstoffe		Organization
Nfe	Ammoniak	VDI	Verein Deutscher
$NH_3$	Ammonium		Ingenieure
$NH_4$	Nummer	Verb.	Verbindung
Nr.	Niederschlag, Nasssilage	Vol.-%	Volumsprozent
NS	Oberösterreich		(volumetrischer
OÖ	Sauerstoff		Raumanteil)
$O_2$	organische Trockensubstanz	vgl.	Vergleich

oTS	organische Trockemasse	w-%	Gewichtsprozent
oTM	Rohfaser	XA	Rohasche
XF	Rohfett	z.B.	zum Beispiel
XL	Rohprotein	Zn	Zink
XP	Stickstoff- freie Extraktstoffe	ZUC	Zucker
XX		ZAMG	Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>I - III</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>- 1 -</b>
1.1 Gesetzliche Rahmenbedingungen.....	- 2 -
1.1.1 Richtlinie 2001/77/EG des Europäischen Parlamentes Rates .....	- 2 -
1.1.2 Ökostromgesetz.....	- 4 -
1.2 Geschichte der Biogasgewinnung.....	- 5 -
1.3 Potentiale der Biogastechnologie in Österreich.....	- 6 -
1.4 Vorwort .....	- 8 -
<b>2 Stand des Wissens</b> .....	<b>- 9 -</b>
2.1 Biogas – ein Energiesystem der Zukunft?.....	- 9 -
2.2 Ökonomische Bedeutung von Biogasanlagen.....	- 10 -
2.2.1 Flächenbedarf.....	- 12 -
2.3 Biogasverwertung .....	- 12 -
2.3.1 Blockheizkraftwerk .....	- 13 -
2.3.2 Kraftstoff- und Netzeinspeisung .....	- 13 -
2.3.3 Brennstoffzellen.....	- 14 -
2.4 Grundlagen der Methangärung.....	- 15 -
2.4.1 Hydrolyse.....	- 16 -
2.4.2 Acidogenese.....	- 17 -
2.4.3 Acetogenese.....	- 18 -
2.4.4 Methanogenese.....	- 18 -



2.4.5	Generationszeiten der Bakterien.....	- 19 -
2.4.6	Nährstoffversorgung der Bakterien.....	- 21 -
2.4.7	Physikalisch–chemische Einflussgrößen .....	- 22 -
2.5	Faulraumbelastung und Verweilzeit .....	- 27 -
2.5.1	Faulraumbelastung.....	- 27 -
2.5.2	Verweilzeit.....	- 27 -
2.6	Vergärbare Substrate.....	- 29 -
2.6.1	Stoffliche Eigenschaften der Fermentations-Rückstände .....	- 31 -
2.7	Zusammensetzung und Qualität von Biogas .....	- 32 -
2.7.1	Hemmstoffe .....	- 33 -
2.8	Energiepflanzen – Einflussgrößen auf die Methan- und Biogausausbeute .....	- 37 -
2.9	Biogas aus Grünlandbeständen.....	- 39 -
2.9.1	Biomasserträge von Grünlandbeständen .....	- 40 -
2.9.2	Methanbildungspotential von Grünlandbeständen .....	- 41 -
2.9.3	Methanhektarertrag von Grünlandbeständen .....	- 45 -
2.10	Modelle zur Schätzung der Methanbildung aus Gärrohstoffen.....	- 47 -
<b>3</b>	<b>Problem- und Zielstellung.....</b>	<b>- 50 -</b>
<b>4</b>	<b>Material und Methoden .....</b>	<b>- 52 -</b>
4.1	Standortbeschreibung (Klima, Bewirtschaftung) .....	- 52 -
4.1.1	Klima und Bewirtschaftung des intensiv genutzten Standortes .....	- 53 -
4.1.2	Klima und Bewirtschaftung des extensiv genutzten Standortes .....	- 54 -
4.2	Versuchsdurchführung - Arbeitsplan, Ernte & Probengewinnung .....	- 57 -

4.2.1	Arbeitsplan.....	- 57 -
4.2.2	Ernte & Gewinnung der Proben .....	- 58 -
4.3	Aufbereitung der Grasproben.....	- 59 -
4.4	Versuchsaufbau im Labor.....	- 60 -
4.4.1	Eudiometer Batch Test nach VDI 4630.....	- 61 -
4.4.2	Beuteltechnik .....	- 62 -
4.5	Analyse & Auswertung .....	- 64 -
4.5.1	Nährstoffanalyse nach Weender.....	- 64 -
4.5.2	Elementaranalyse.....	- 66 -
4.5.3	Analyse des Energiewertes mit dem Bombenkalorimeter.....	- 66 -
4.5.4	Analyse der Methankonzentration und des Gasnormvolumens .....	- 66 -
4.5.5	Auswertung des Methanertrages nach Buswell und Boyle .....	- 67 -
4.5.6	Auswertung der gemessenen Methanerträge .....	- 68 -
4.5.7	Auswertung des Methanertrages mit dem MEWM .....	- 70 -
4.6	Statistische Auswertung.....	- 72 -
<b>5</b>	<b>Ergebnisse. und Diskussion.....</b>	<b>- 73 -</b>
5.1	Biomassebildungsvermögen - Einfluss des Standortes und der Nutzungsintensität.....	- 73 -
5.2	Methanbildungsvermögen der Grünlandbiomasse .....	- 77 -
5.2.1	Inhaltsstoffe des Erntematerials .....	- 77 -
5.2.2	Methanausbeute aus der Grünlandbiomasse .....	- 80 -
5.2.3	Energetischer Wirkungsgrad (?)......	- 83 -

5.3	Methanhektarertrag im Grünland .....	- 85 -
<b>6</b>	<b>Schlussfolgerung .....</b>	<b>- 88 -</b>
<b>7</b>	<b>Weiterführende Arbeiten .....</b>	<b>- 89 -</b>
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>- 91 -</b>
<b>9</b>	<b>Literatur- und Quellenverzeichnis .....</b>	<b>- 94 -</b>
<b>10</b>	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>- 100 -</b>
<b>11</b>	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>- 102 -</b>
<b>12</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>- 105 -</b>

# 1 Einleitung

Ein Nachhaltigkeitscheck der österreichischen Energieversorgung zeigt, dass Österreich derzeit zahlreiche Grundsätze für eine nachhaltige Energiezukunft nicht erfüllt. Die Abhängigkeit von Energieimporten beträgt 70 %, der CO<sub>2</sub>-Ausstoß liegt um 24,5 Mio. Tonnen bzw. 31 % über dem Kyotoziel 2010. Die Menschheit verbraucht derzeit etwa 25 % mehr Ressourcen als die Erde im selben Zeitraum wiederherstellen kann. Schreitet der Verbrauch an natürlichen Ressourcen im selben Tempo voran wie bisher, würden wir im Jahr 2050 die Ressourcen von zwei Planeten benötigen, um unsere Bedürfnisse nach Nahrung, Energie und Infrastruktur zu decken (vgl. NIEDERMAIR, 2007, 2-14).

Der ökologische Fußabdruck des globalen Energiekonsums hat seit 1960 um 700 % zugenommen. Berechnet wird der ökologische Fußabdruck, indem ermittelt wird, welche Fläche benötigt wird, um die Rohstoffe zur Verfügung zu stellen, die der Mensch für Ernährung, Konsum, Energiebedarf etc. verbraucht, sowie die Flächen, um Rückstände wie Kohlendioxid aus der Verbrennung von fossiler Energie aufzunehmen und umzuwandeln (vgl. MOIDL et al., 2008, 2).

Der Klimabericht der UNO geht davon aus, dass bei einer globalen Temperaturerhöhung von 2 °C rund 25 %, ab 3 °C sogar ein Drittel der bekannten Arten durch den Verlust ihrer Lebensräume verschwinden könnten. Derzeit zeigt die Fieberkurve der Erdatmosphäre eine um 0,74 °C erhöhte Temperatur auf der Nordhalbkugel. Richtig „gefährlich“ im Sinne der Vereinten Nationen wird die Erderwärmung ab einer Temperaturerhöhung von 2 °C. Ab dieser Schwelle drohen irreversible Effekte.

Österreich hat zusammen mit anderen Staaten die Klimarahmenkonventionen der Vereinten Nationen, das Kyoto-Protokoll und die Konvention zum Schutz der Artenvielfalt unterzeichnet und sich damit gegenüber der internationalen Staatengemeinschaft zu einer nachhaltigeren Energieversorgung verpflichtet. Zahlreiche dieser Verpflichtungen sind bereits geltendes EU-Recht. Laut den Beschlüssen des EU-Ministerrates muss Österreich seinen CO<sub>2</sub>-Ausstoß bis ins Jahr 2020 um 30 % senken (vgl. NIEDERMAIR, 2007, 2-14).

In Österreich werden pro Kopf und Jahr 6,3 t CO<sub>2</sub> freigesetzt. Weltweit sind dies 20 Gigatonnen (= 20 Mrd. t). Wir sind an einer Schwelle angelangt, die ein Umdenken in allen Lebensbereichen erfordert, um eine langfristige und umweltverträgliche wirtschaftliche Entwicklung sicherzustellen. Eine der wichtigsten technologischen Antworten auf die Forderung zur Nachhaltigkeit ist die Nutzung erneuerbarer Energieträger. Denn nachwachsende Rohstoffe sind im Gegensatz zu fossilen Energieträgern CO<sub>2</sub> –neutral. Sie binden gleich viel CO<sub>2</sub> wie sie freisetzen. Dabei kommt dem Landwirt am Sektor Biomasse eine wichtige Schlüsselrolle als Energiewirt zu (vgl. N.N., 2006, 1-7).

## 1.1 Gesetzliche Rahmenbedingungen

Für eine erfolgreiche Markteinführung von Biomassevergasungsanlagen, ist die Einhaltung verschiedenster europäischer Richtlinien sowie nationaler Gesetze, Verordnungen und Normen technischer Richtlinien erforderlich. Für die Beurteilung im Genehmigungsverfahren sind die Betrachtung der Emissionen sowie die sicherheitstechnisch richtige Ausführung der Anlage unter den anlagentechnischen Gegebenheiten entscheidend. Im Genehmigungsverfahren gelangen unterschiedlichste Rechtsmaterien wie Baugesetz, Bauordnung – je nach Bundesland, Wasserrecht, Naturschutzrecht, etc. zur Anwendung (vgl. BMITV, 2005, 11 ff).

### 1.1.1 Richtlinie 2001/77/EG des Europäischen Parlamentes Rates

Die Richtlinie 2001/77/EG des Europäischen Parlamentes und Rates zur Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen im Elektrizitätsbinnenmarkt ist am 27. September 2001 in Kraft getreten. Diese Richtlinie sieht vor, den Anteil an erneuerbaren Energiequellen am Gesamtstromverbrauch der EU von 12 % (1997) auf 22,1 % im Jahr 2010 zu erhöhen. Die Mitgliedsstaaten veröffentlichten erstmalig am 27. Oktober 2003 und danach alle zwei Jahre einen Bericht, in dem analysiert wird, inwieweit die nationalen Richtziele erreicht wurden. Für Österreich bedeutet dies eine Erhöhung der erneuerbaren Energiequellen am Bruttostromverbrauch von 70 % (1997) auf 78,1 % bis zum Jahr 2010. In Österreich hängt die Energieproduktion von der jährlichen Niederschlagsmenge ab.

Ein großer Teil der erneuerbaren Energie stammt in Österreich aus der Wasserkraft (vgl. AMTSBLATT DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFTEN, 2001, 33ff).

Durch die Biogaserzeugung werden treibhausrelevante Emissionen und negative Umweltauswirkungen auf ein Mindestmaß reduziert. Setzt man Biogas aus Rohstoffen der Landwirtschaft im Verkehrssektor ein so könnte man die Treibhausgasemissionen um bis zu 75 %, bezogen auf den derzeitigen Verbrauch reduzieren (vgl. AMON et al., 2006, s.p.).

### 1.1.2 Ökostromgesetz

Die Novelle zum Ökostromgesetz wurde am 23. Mai 2006 vom Nationalrat beschlossen. Das Ökostromgesetz aus dem Jahr 2002 sah einen Anteil von so genannten „neuen erneuerbaren Energieträgern“ von 4 % an der Stromproduktion in Österreich vor. Die am 23. Mai 2006 beschlossene Ökostromgesetz-Novelle peilt einen Anteil von 10 % bis 2010 an. Die Novelle bezieht sich ausschließlich auf neu zu errichtende Anlagen und sieht eine Förderung bis 2011 vor. Das Unterstützungsvolumen von jährlich 17 Mio. Euro wird jeweils zu 30 % für Biogasanlagen, Biomasseanlagen und Windkraftanlagen aufgeteilt. 10 % des Fördervolumens wird in sonstige neue erneuerbare Energieträger (z.B. Photovoltaik) investiert. Falls die direkte Stromproduktion von der Sonne eine installierte Leistung von 20 kW übersteigt, muss das jeweilige Bundesland zumindest 50 % des Förderbetrages mitfinanzieren. Der Ökobilanzverantwortliche bleibt die EControl. Die Einspeisetarife für diese Anlagen sind jährlich neu festzulegen, wobei die Tarife in den Folgejahren jährlich abnehmen. Der im Vertragsabschluss gültige Tarif gilt für zehn Jahre. Im elften Jahr gibt es eine Auszahlung von 75 %, im 12. Jahr von 50 % des Einspeisetarifes. Die Ökostrom-Novelle sieht auch Energieeffizienzkriterien vor. Je nach Energieform sind Mindest-Volllaststunden vorgeschrieben. Für Biomasse-Anlagen ist eine verpflichtende Wärmekopplung bei der Stromproduktion festgelegt (vgl. UMWELTBUNDESAMT, 2007, s.p).

#### Festsetzung der Preise für Ökostrom aus Biogas:

§ 10. Absatz 1: Als Preise für die Abnahme elektrischer Energie aus Stromerzeugungsanlagen, die unter Verwendung des Energieträgers Biogas mit rein landwirtschaftlichen Substrat-Einsatzstoffen betrieben werden, wurden folgende Beiträge festgesetzt. Diese sind in Tab. 1 „Preise für Ökostrom aus Biogasanlagen“ aufgelistet (vgl. BMLFUW, 2006, 1 ff):

Tab. 1 Einspeisetarif für Ökostrom aus Biogasanlagen

<b>Für Anlagen mit einer Engpassleistung von:</b>	<b>Vertragsabschluss 2006 Cent/kWh</b>	<b>Vertragsabschluss 2007 Cent/kWh</b>
100 kW	17,00	16,95
> 100 kW – 250 kW	15,20	15,15
> 250 kW – 500 kW	14,10	14,00
> 500 kW – 1 MW	12,60	12,40
> 1MW	12,60	11,30

(Quelle: BOLTZ, 2006, 4)

## 1.2 Geschichte der Biogasgewinnung

Biogas entsteht in der Natur, wenn von einer Vielzahl von Bakterien, unter Luftabschluss organische Substanz abgebaut wird. Im Gegensatz dazu wird bei der Kompostierung die organische Substanz unter dem Vorhandensein von Luft abgebaut. Die bekanntesten Bereiche in denen es zur Methanbildung kommt sind Sümpfe, Reiskulturen sowie der Verdauungstrakt der Wiederkäuer. Im Jahr 1776 wies der italienische Forscher VOLTA erstmals die Anwesenheit von Methan im Sumpfgas nach. Im Jahr 1888 verbrannte GAYON Gas, welches er bei einer Temperatur von 35 °C aus Mist und Wasser erhielt – die geistige Geburtsstunde unserer heutigen Biogasanlagen!?

Die erstmalige praktische Umsetzung der Kenntnisse erfolgte erst in den 20er Jahren des vorigen Jahrhunderts. IMHOFF schlug ein Gärverfahren vor, bei welchen ein gasdichter Behälter regelmäßig mit vergärbarem Material beschickt wurde. Aufgrund der schlechten Rahmenbedingungen (niedrige Ölpreise) kam die Entwicklung in den sechziger Jahren zum Stillstand.

Erst in den 80er Jahren besann man sich nach den beiden Ölkrisen wiederum dieser Technologie zur Energiegewinnung. Pioniere aus der Landwirtschaft und dem Gewerbe errichteten Anlagen zur hauptsächlichlichen Vergärung der anfallenden Gülle und Bioabfällen (vgl. BRUNNMAYR & KIRCHMEYR, 2005, 2).



### 1.3 Potentiale der Biogastechnologie in Österreich

Anfang 1980 wurden in Österreich die ersten landwirtschaftlichen Biogasanlagen erbaut. Seit dem Jahr 2002 ist ein massiver Anstieg der Anzahl der Biogasanlagen in Österreich zu verzeichnen. Eine Ursache hierfür ist das Inkrafttreten des Ökostromgesetzes (2003) und die damit verbundenen, garantierten Einspeisetarifen. Dadurch wurde ein starker Anreiz für den Ausbau dieser alternativen Form der Energiegewinnung gesetzt. Waren es zunächst vorwiegend landwirtschaftliche Biogasanlagen, in denen neben den hofeigenen Düngern auch unterschiedlichste Co-Substrate und Abfälle aus der Nahrungs-, Genuss- und Futtermittelindustrie fermentiert wurden, so werden in letzter Zeit verstärkt Anlagen zur ausschließlichen Verwertung von nachwachsenden Rohstoffen gebaut (vgl. GRÜNER BERICHT, 2005, 127).

Das Dauergrünland nimmt in Österreich eine Fläche von insgesamt 1,60 Mio. ha ein, dazu kommen noch 170.000 ha Feldfutterbau. Bezogen auf die gesamte landwirtschaftlich genutzte Fläche in Österreich weisen Grünland und Feldfutterbau einen Anteil von rund 56 % auf (vgl. GRÜNER BERICHT, 2007, 34).

Aufgrund der sinkenden Anzahl an Rindern, (in den letzten 10 Jahren ging die Zahl um 500.000 zurück), wuchsen viele Grünlandflächen aufgrund der fehlenden Bewirtschaftung zu. In den letzten 50 Jahren waren dies rund 700.000 ha Grünland. In den nächsten 10 Jahren könnten 250.000 ha von dieser Fläche freigesetzt werden. Außerdem werden bis zu 1 Mio. t Trockenmasse pro Jahr nicht von den Tieren aufgenommen. Diese Potentiale könnten in Österreich für eine energetische Nutzung verwendet werden (vgl. BUCHGRABER, 2004, 15 ff).

In integrierten Fruchtfolgesystemen (FF) werden die nutzbaren Stoffströme zur Biogaserzeugung eingesetzt und damit insgesamt 3.500 m<sup>3</sup> Biogas pro ha Fläche erzeugt. Das spezialisierte FF-System, ist ein System, welches vorwiegend der Produktion von Biomasse zur Biogaserzeugung dient. In Österreich können ca. 20 % der landwirtschaftlichen Fläche für die Energiepflanzenenerzeugung genutzt werden. Ein durchschnittlicher Methanhektarertrag von 6.500 m<sup>3</sup> / ha ist erreichbar. In Tab. 2 sind die „Energiekennzahlen der Biogaserzeugung in spezialisierten und integrierten Systemen“ aufgezeigt:

Tab. 2 Energiekennzahlen der Biogaserzeugung in spezialisierten und integrierten Systemen

	Einheit	Spezialisiert	Integriert
Ackerfläche	ha	1.375.822	1.375.822
davon 20 %	ha	275.164	integriert 1.267.822
Methanhektarertrag	m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> / ha	6.500	3.500
<b>Energie Äcker</b>	<b>t ROE*</b>	<b>1.537.892</b>	<b>4.140.478</b>
Wirtschaftsgrünland	ha		909.407
davon 20 %	ha		181.881
Extensives GL	ha		900.980
davon 40 %	ha		540.588
Methanhektarertrag	m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> / ha		3000
<b>Energie GL</b>	<b>t ROE</b>		<b>469.169</b>
<b>Tierhaltung</b>			
Rinder	Stück		2.050.991
Schweine	Stück		3.125.361
<b>Energie Tierhaltung</b>	<b>t ROE</b>		<b>173.276</b>
<b>? Energie</b>	<b>t ROE</b>	<b>1.537.892</b>	<b>4.782.924</b>

(Quelle: AMON et al., 2006, s.p.)

Wie die oben angeführte Tabelle zeigt, könnte die österreichische Landwirtschaft mit „spezialisierten“ Erzeugersystemen eine jährliche Energiemenge von 1,5 Mio. t ROE (Rohöleinheiten) aus Ackerland und 4,69 Mio. t ROE aus Grünland erzeugen. Rechnet man den Wirtschaftsdünger der Rinder- und Schweinehaltung dazu, käme man auf 4,8 Mio. t ROE. Diese Energiemenge entspricht 66 % vom Energieverbrauch des Verkehrssektors (7,3 Mio. t ROE) (vgl. AMON et al., 2006, s.p.).

Nach Angaben der E-Control (2008) waren am 31.12.2007 294 Anlagen mit einer Gesamtleistung von 74,9 MW im Vertrag mit der Ökostromabwicklungsstelle genehmigt. Anerkannt waren zu diesem Stichtag 340 Biogasanlagen mit einer Gesamtleistung von 90,1 MW (HILFRICH, 2008, s.p.).

## 1.4 Vorwort

Mein Interesse für dieses Thema wurde im Wintersemester 2006 im Rahmen der Lehrveranstaltung „Technik der Biomasse und Wirtschaftsdüngernutzung“, welche Herr Professor Amon hielt geweckt. Im Zuge dieser Vorlesung waren wir einige Stunden im Labor und auch auf Exkursion. Die Arbeit im Labor hat mir sehr gut gefallen. Besonders faszinierend fand ich die „Mini-Biogasanlagen“, wie darin die Bakterien arbeiten und Methan produzieren. Im Rahmen der Lehrveranstaltung besichtigten wir Biogasanlagen in Bruck an der Leitha und in Güssing. Ich war sehr beeindruckt von diesen Anlagen und bin nach wie vor davon fasziniert, wie Mikroorganismen aus Biomasse Energie herstellen. Für mich war klar, dass ich, falls es irgendwie möglich ist, zu diesem Thema meine Diplomarbeit schreiben werde. Zufällig sah ich dann beim Aushang am Institut für Landtechnik eine ausgeschriebene Diplomarbeit zum Thema „Biogasbildungsvermögen“. Nach Rücksprache mit Herrn Professor Amon und Herrn Professor Pötsch durfte ich dann zu diesem Thema, „Biogasbildungsvermögen von Grünlandbiomasse in Abhängigkeit vom Nährstoff- und Energiegehalt“ meine Diplomarbeit schreiben.

## 2 Stand des Wissens

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Stand des Wissens anhand einer umfangreichen Literaturliteraturarbeit erhoben um den aktuellen Entwicklungsstand im europäischen Raum zum Thema Biogasproduktion in der Landwirtschaft zu erfassen. Ein besonderes Augenmerk wurde auf die Biogasproduktion von Grünland gelegt.

### 2.1 Biogas – ein Energiesystem der Zukunft?

Die Biogaserzeugung aus Energiepflanzen ist ein Verfahren, das sich gut für eine nachhaltige und wirtschaftliche Energieerzeugung eignet. Gegenüber anderen erneuerbaren Energieträgern besitzt Biogas eine sehr wesentliche positive Eigenschaft die Energie liegt in speicherbarer Form vor, d.h. Energieerzeugung und –verbrauch müssen zeitlich nicht parallel laufen. Eine Spitzenstromerzeugung aus Biogas ist daher möglich. Die Erzeugung und Bereitstellung der verschiedenen Energieträger aus der Biogaserzeugung ist kostengünstig und zuverlässig, sie gewährleistet eine hohe Versorgungssicherheit mit Energie.

Zudem stärkt die Erzeugung von Biogas ländlichen Regionen, da die Energie dezentral und regional erzeugt wird. Es besteht ein Potential, dass pro Jahr 200 bis 300 Millionen Euro in den Bau von Biogasanlagen investiert wird. Diese Investitionen stärken die regionale Wirtschaftlichkeit. Hinsichtlich der Technologie gibt es hier ein Höchstmaß an Flexibilität. Zukünftig werden für Biogasanlagen 6000 bis 10.000 neue Arbeitsplätze benötigt. Die Wertschöpfung bleibt überwiegend in der Region (vgl. AMON et al, 2006, 21 ff).

Die Erzeugung von Strom und Wärme mit einer Biogasanlage leistet in diesem Zusammenhang einen Beitrag zum Klimaschutz. Denn das CO<sub>2</sub> das bei der Erzeugung von Biogas frei wird, ist kein zusätzliches CO<sub>2</sub>, sondern CO<sub>2</sub>, das beispielsweise beim Wachstum von Mais - einem möglichen Inputstoff für Biogasanlagen, in der Vergangenheit von der Pflanze aus der Umgebungsluft entnommen wurde (vgl. GÖRISCH, 2006, 9).

## 2.2 Ökonomische Bedeutung von Biogasanlagen

Ob sich Biogasanlagen rechnen hängt vor allem von den ökonomischen Randbedingungen ab. Die Kosten werden stark von der Anlagengröße, den Schnittstellen, den durchgesetzten Abfällen, der Anlagenqualität und Synergien beeinflusst. Um wirtschaftlich arbeiten zu können ist eine gewisse Größe anzustreben. Dies ist bei Anlagen der Agroindustrie und landwirtschaftlichen Gemeinschaftsanlagen möglich. Bei der Wirtschaftlichkeit spielen auch die Abschreibung, Verzinsung, Personal- und Reparaturkosten, Steuern, Versicherungen, Betriebs- und Betriebshilfestoffe, Entsorgung, Mieten und sonstige Kosten eine Rolle. Den Kosten sind die Erlöse, wie Inputerlöse für verwertende Abfälle, Outputerlöse für produzierten Strom und Wärme gegenüberzustellen (vgl. GÖRISCH, 2006, 86 ff).

Biogasanlagen erfordern erhebliche investive Aufwendungen, die im Landwirtschaftsbetrieb amortisiert werden müssen. Daraus resultiert oftmals, den Betrieb ganz oder in wesentlichen Teilen auf den Betrieb der Biogasanlage auszurichten, z.B. Anbau von Nachwachsenden Rohstoffen (NawaRo). Im Grunde können alle auf dem Acker und dem Grünland produzierte Biomassen in Biogasanlagen verwertet werden, daher können ökonomische Risiken aus Ertragsschwankungen und ungünstigen Fruchtfolgen durch den parallelen Anbau mehrerer Kulturarten ausgeglichen werden.

Bei landwirtschaftlichen Biogasanlagen findet Gülle als Basissubstrat ihre Verwendung. Dazu müssen aber entsprechende Tierbestände welche die Gülle erzeugen und zusätzliche Silierkapazitäten vorhanden sein. Weiteres muss berücksichtigt werden, dass bei der Silierung mit Nährstoffverluste zu rechnen ist, welche die theoretische Methanbildungskapazität erheblich verringert. Auch die Verwertung des Gärrestes hat als Nährstofflieferant eine immense Bedeutung. Der klassischer Kreislauf Boden – Pflanze – Tier – Boden wird zu Boden – Pflanze – Tier - Biogasanlage – Boden.

Neue Aspekte ergeben sich aus der Produktion von NawaRos für Biogasanlagen. Diese können sowohl auf stillgelegten als auch auf nicht stillgelegten Flächen angebaut werden. Die Substratkosten der NawaRos machen 30 bis 50 % der Gesamtkosten des Betriebes einer Biogasanlage aus. Laut EU-Verordnung mit der Nummer 1782/03 bekommt der Landwirt für

den Anbau von NawaRos 45 €/ha/J. für den Anbau von Energiepflanzen auf nicht stillgelegten Flächen.

In folgender Tab. 3 sind die „Produktionskosten von Substraten für Biogasanlagen bezogen auf die Methanausbeute“ aufgelistet:

Tab. 3 Produktionskosten unterschiedlicher Substrate bezogen auf die Methanausbeute

	Roggen	Triticale	Weizen	Raps	Mais	SB	Phacelia	Ölrettich	Gras	Getreide korn
<b>Ertrag in</b>										
t Substrat/ha	50	50	46,7	46,2	50	46,9	25	37,5	32,4	9
% TS	30	30	30	26	32	32	18	16	37	86,5
t TM/ha	15	15	14	12	16	15	4,5	6	12	7,8
% oTS	93,2	93,2	93,6	86	96	91,5	89,8	82	90	90
t oTM/ha	14	14	13,1	10,3	15,4	13,7	4	4,9	10,8	7
<b>m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/toT</b>										
M	342	342	342	331	360	331	349	349	342	360
<b>m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/ha</b>	4781	4781	4482	3418	5530	4546	1411	1718	3695	2522
<b>Kosten in</b>										
€/ha	1015	1040	1037	1019	1149	1081	477	688	985	923
€/t Substrat	20,31	20,79	22,22	22,08	22,98	23,06	19,08	18,36	30,37	102,5
€/t TM	67,69	69,31	74,07	84,92	71,81	72,07	105,98	114,73	82,07	118,5
€/t oTM	72,62	74,37	79,14	98,75	74,8	78,76	118,01	139,91	91,42	131,66
<b>€/m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub></b>	0,212	0,218	0,231	0,298	0,208	0,238	0,338	0,4	0,267	0,366

(Quelle: KARG, 2007,65 ff)

Bezüglich Gasausbeute pro t Originalsubstanz ist der Einsatz von Maissilage und Getreidekorn am effektivsten. Bei der Kalkulation der Herstellungskosten für NawaRo ist mit Vollkosten zu rechnen. Weiteres sind auch die Kosten für bauliche Anlagen, z.B. für die Silierung zu berücksichtigen. In der Planung zu hoch angesetzte Biogaserträge können nachhaltig über Gewinn oder Verlust einer Biogasanlage entscheiden (vgl. KARG, 2007,65 ff).

Eine Biogasanlage ist entsprechend dem ersten Ökostromgesetz wirtschaftlich, wenn sie ihrer Amortisationszeit innerhalb von 13 Jahren erreicht und die Erzeugungskosten für den elektrischen Strom den im Ökostromgesetz geregelten Strompreis nicht überschreiten. Laut Untersuchungen von WALLA & SCHNEEBERGER (2006) ist eine Stromerzeugung aus Biogas auf Basis von Energiepflanzen ohne Förderung nicht wirtschaftlich (vgl. HOPFNER – SIXT, 2007, 85 ff).

### 2.2.1 Flächenbedarf

Der Flächenbedarf von Biogasanlagen, die verstärkt Energiepflanzen vergären, ist beträchtlich. Werden zusätzlich Wirtschaftsdünger oder organische Abfälle vergoren, reduziert sich der Flächenbedarf. Folgende Tab. 4 zeigt die „Anbaufläche in Hektar in Abhängigkeit von der elektrischen Leistung des BHKW und der Zusammensetzung des Substratinputs“:

Tab. 4 Anbaufläche in ha in Abhängigkeit von der elektrischen Leistung des BHKW und der Zusammensetzung des Substratinputs

Hauptkomponente Input	durchschnittliche Anbaufläche in ha			
	< 100 kW <sub>el.</sub>	101-250 kW <sub>el.</sub>	251-500 kW <sub>el.</sub>	> 501 kW <sub>el.</sub>
100% Energiepflanzen	50	76	k.A.	262
> 50% Energiepflanzen	48	80	163	200
> 50% Wirtschaftsdünger	43	39	133	k.A.
> 50% organische Abfälle	k.A.	k.A.	k.A.	18
Substratgemisch	39	23	k.A.	k.A.

(Quelle: HOPFNER – SIXT, 2007, 48)

Die Bewirtschaftung dieser großen Flächen, die bei Biogasanlagen mit 500 kW<sub>el.</sub> einen Transportradius von 5 bis 10 km bedeuten, stellen hohe Anforderungen an die Logistik. Auf Grund des hohen Wassergehaltes der Rohstoffe müssen pro erzeugte kWh große Massen an- und abtransportiert werden. Die Logistikkosten betragen 66 % der variablen Kosten für die Rohstoffaufbringung (vgl. HOPFNER – SIXT, 2007, 48).

## 2.3 Biogasverwertung

Biogas lässt sich in einem Blockheizkraftwerk verstromen, die Wärme welche bei der Stromproduktion entsteht, kann auch in Haushalten verwendet werden. Biogas lässt sich auch über das Gasnetz direkt verkaufen. Die Nutzung von Biogas in Brennstoffzellen, Mikrogasturbinen und Stirlingmotoren befindet sich derzeit noch im Forschungs- und Entwicklungsstadium, zeigt aber für die Zukunft sicher Potential.

### 2.3.1 Blockheizkraftwerk

Das im Biogas-Gemisch enthaltene Methangas besitzt einen Heizwert von 10 kWh pro m<sup>3</sup> (bezogen auf reines Methan) und ist dasselbe Gas, aus dem auch Erdgas besteht. Wird das Gasmisch in einem Blockheizkraftwerk verstromt, so entstehen bei einem elektrischen Wirkungsgrad des Blockheizkraftwerkes von z.B. 35 % aus 10 kWh brutto, 3,5 kWh Strom, der direkt ins Stromnetz eingespeist werden kann (vgl. EDER & SCHULZ, 2006, 9).

Das Temperaturniveau der Abgase beträgt 460 bis 550 °C, diese Abwärme kann direkt zur Bereitstellung von Heiz- und Prozessenergie verwendet werden, ca. 25 bis 40 % der gesamten anfallenden Wärmemenge wird als Prozesswärme für die Fermenterheizung benötigt. Der Rest der überschüssigen Wärme wird auch weiterverwertet z.B. durch den Anschluss der Anlage an das Fernwärmenetz (vgl. KARG, 2007, 60 f).

Um das Rohbiogas weiterverwenden zu können muss es veredelt werden. Dies erfolgt einerseits durch Entwässerung und andererseits durch Entschwefelung. Nach der Gasreinigung bzw. Gasaufbereitung kann das Biogas rein thermisch in einem Heizkessel verwendet werden. Die rein thermische Nutzung des Biogases erfordert den geringsten Grad der Biogastrocknung und Entschwefelung. Heute erfolgt die Energiegewinnung aus Biogas fast ausschließlich als Kraft-Wärmekopplung in einem Blockheizkraftwerk mit Verbrennungsmotor. Somit erfolgt eine kombinierte Erzeugung von Strom und Wärme. Als Verbrennungsmotoren werden Gas-Ottomotoren, Gas-Dieselmotoren und Zündstrahlmotoren eingesetzt (vgl. AMON et al., 2006, 165 – 189).

### 2.3.2 Kraftstoff- und Netzeinspeisung

Eine weitere Form der Nutzung des Biogases wäre die Verwendung als Kraftstoff oder die Netzeinspeisung in das Erdgasnetz. Hier ist aber eine wesentlich intensivere Gastrocknung und Entschwefelung notwendig (vgl. AMON et al., 2006, 165 ff). Beispielsweise kann mit dem Jahresertrag an Biogas aus einem Hektar landwirtschaftlicher Fläche ein durchschnittliches Erdgasauto mehr als 70.000 km fahren (vgl. NN., 2007, 17).

Außerdem muss das Biogas entsprechend den Erfordernissen verdichtet oder entspannt und die Gasqualität gemessen werden um es in das Erdgasnetz einspeisen zu können. Um Biogas als



„Bio-CNG“ (80 % Erdgas + 20 % Biogas = Bio – CNG) einspeisen zu können muss es bis zu einem Methangehalt von 97 % aufkonzentriert werden.

In Österreich wurden bereits erste Anlagen in Pucking, OÖ realisiert (vgl. HOPFNER – SIXT, 2007, 40). Das zu Treibstoff oder auf Erdgasqualität aufbereitete Biogas wird häufig als „Bio-Erdgas“ oder „Greengas“ bezeichnet (vgl. AMON et al., 2006, 165 ff).

Ein Vorteil der Netzeinspeisung liegt darin, dass sich die Kosten für den Energiepflanzenanbau und die Biogasproduktion sich nicht mehr an der Stromeinspeisevergütung orientieren müssen. Es ist kein BHKW mehr notwendig, d.h. es fallen auch keine Verbrennungsgase mehr an. Neue Wertschöpfungen lassen sich auch über das abgetrennte CO<sub>2</sub> erzielen. Je nach Ausstattung der Gastrennanlage kann CO<sub>2</sub> in unterschiedlicher Reinheit gewonnen, verflüssigt und abgefüllt werden. Dieses CO<sub>2</sub> kann in der Lagerhaltung zur Konservierung von Obst, Getreide, usw. oder in Treibhäusern als Dünger verwendet werden (vgl. TENSCHER W. 2002, 108 f).

### 2.3.3 Brennstoffzellen

Vor allem die Nutzung des Gases in Brennstoffzellen stellt besonders hohe Ansprüche an die Qualität des Gases, dazu müssen alle Schadstoffe entfernt werden. Brennstoffzellen sind elektrochemische Geräte, die in der Lage sind, die in einem Brenngas enthaltene chemische Energie durch kontrollierte elektrochemische Reaktionen in elektrische Energie umzuwandeln (vgl. AMON et al., 2006, 165 ff). Laut BRENN ist die Nutzung von Biogas für Brennstoffzellen noch nicht ausgereift, das Ammoniak die Membran in den PEM-Brennstoffzellen angreift und somit die Lebensdauer der Zelle stark beeinträchtigt (BRENN et al., 2006, 5 ff).

## 2.4 Grundlagen der Methangärung

Der in einer Biogasanlage ablaufende Prozess orientiert sich am Beispiel der Natur. So findet man in Sümpfen das Sumpfgas, in Gruben das Grubengas, in Faultürmen das Faulgas, etc. Der dabei stattfindende biologische Prozess läuft in mehreren aufeinander folgenden Schritten ab. In einer Biogasanlage finden die einzelnen Prozesse gleichzeitig nebeneinander statt (vgl. BRUNNMAYR & KIRCHMEYR, 2005, 7).

Anaerobe Fermentation bedeutet, dass unter Ausschluss von  $O_2$  organische Stoffe durch mikrobiologische Aktivität abgebaut werden. Das Endprodukt dieses Prozesses ist ein brennbares Gas, welches im Wesentlichen aus  $CH_4$  und  $CO_2$  besteht. Im Gegensatz zu aeroben Zersetzungsprozessen, wie z.B. der Kompostierung, wird beim anaeroben Abbau kaum Wärme erzeugt. Die Energie bleibt in Form von  $CH_4$  im Gas erhalten. Dieses Gas wird in der Regel zur Strom- und Wärmeerzeugung genutzt (vgl. GRONAUER et al., 2004, 7).

Bei der Methangärung werden je nach Substratzusammensetzung etwa 7 % des Energiegehaltes der abgebauten Rohstoffe in der Bakterienbiomasse fixiert. Beim Abbau wird kaum Abwärme frei. Das bedeutet, dass rund 90 % der Energie des abgebauten Materials im Methan verbleiben (vgl. HARTMANN & KALTSCHMITT, 2001, 647).

In Abb. 1 sind die „Phasen der Biogasentstehung bei einstufigen und zweistufigen Verfahren“ graphisch aufgezeigt und des Weiteren auch beschrieben.

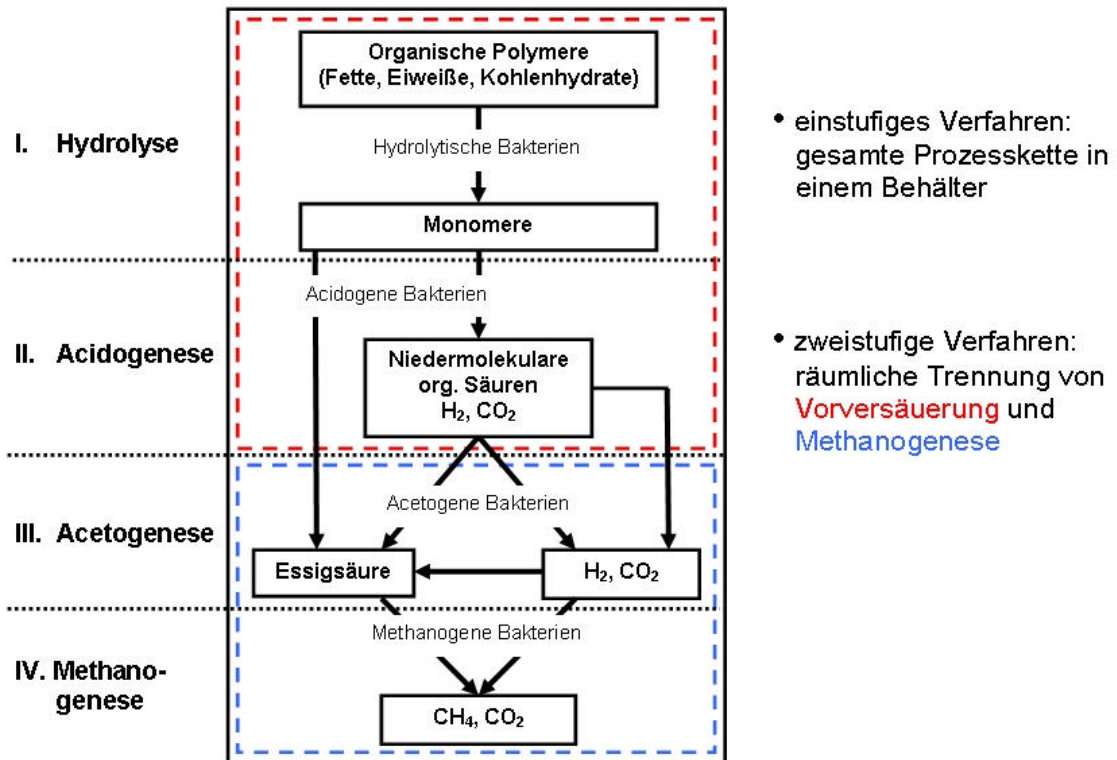


Abbildung 1: Phasen der Biogasentstehung (Quelle: GRONAUER et al., 2004, 7)

### 2.4.1 Hydrolyse

In dieser Phase, welche auch Verflüssigungsphase genannt wird, werden ungelöste biogene Polymere biochemisch in niedermolekulare Verbindungen gespalten. Dieser Vorgang läuft in einem Fermenter räumlich und zeitlich parallel ab. Er wird auch als Verflüssigungsphase bezeichnet, da sich der Abbauvorgang unter Abspaltung von Wasser vollzieht. Die Hydrolyse erfolgt mittels von Bakterien abgesonderten Exoenzymen, welche das ungelöste, partikuläre Material angreifen können. Somit entstehen die Hydrolyseprodukte, die von den im Biogasprozess nachfolgenden Organismen aufgenommen und im eigenen Stoffwechsel abgebaut werden können. Nach EDER & SCHULZ (2006) wird dieser Vorgang durch den pH-Wert (4,5 – 6) und die Verweilzeit beeinflusst. Tab. 5 gibt die wesentlichen „Stoffumsetzungen in der hydrolytischen Phase und Beispiele beteiligter Mikroorganismen“ wieder:

Tab. 5 Stoffumsetzungen in der hydrolytischen Phase und Beispiele beteiligter Mikroorganismen

Substrate	Mikroorganismen	Produkte
Kohlenhydrate Proteine Fette	Clostridium spp. Bacillus spp. Pseudomonas spp.	Monosacharide Aminosäuren Kurzkettinge Peptide Langkettige Fettsäuren Glyzerin

(Quelle: GRONAUER et al., 2004, 7)

## 2.4.2 Acidogenese

In dieser Phase, welche auch Versäuerungsphase genannt wird, da der pH-Wert sinkt (vgl. HOPFNER-SIXT, 2007, 16), entstehen aus den Produkten der Hydrolyse niedermolekulare organische Säuren und Alkohole. Außerdem entstehen mit Acetat, H<sub>2</sub> und CO<sub>2</sub> bereits Ausgangsprodukte für die Methanbildung. Das Verhältnis der in dieser Phase entstehenden Produkte zueinander ist vom Wasserstoffpartialdruck, d.h. der Konzentration an elementarem H<sub>2</sub>, abhängig. Je niedriger dieser ist, desto höher ist der Anteil an entstehendem Acetat (vgl. EDER & SCHULZ, 2006). Tab. 6 gibt die wesentlichen „Stoffumsetzungen der Acidogenese und Beispiele beteiligter Mikroorganismen“ wieder:

Tab. 6 Stoffumsetzungen in der acidogenesen Phase und Beispiele beteiligter Mikroorganismen

Substrate	Mikroorganismen	Produkte
Monosacharide Aminosäuren Kurzkettinge Peptide Langkettige Fettsäuren Glyzerin	Clostridium spp. Bacteroides spp. Butyrivibrio spp.	Flüchtige Fettsäuren(Acetat, Propionat, Butyrat) Aldehyde, Alkohole, Ketone, Ammoniak, Kohlendioxid, Wasserstoff

(Quelle: GRONAUER et al., 2004, 8)

### 2.4.3 Acetogenese

In der Acetogenese werden aus den niedermolekularen organischen Säuren und Alkoholen der Acidogenese Essigsäure, H<sub>2</sub> und CO<sub>2</sub> produziert. Die Produktion von H<sub>2</sub> lässt den Wasserstoffpartialdruck ansteigen. Dieser hemmt als „Abfallprodukt“ der Acetogenese den Stoffwechsel der acetogenen Bakterien. In der Methanogenese wird der H<sub>2</sub> zur Methanbildung verbraucht, so dass diese beiden Prozesse voneinander abhängig sind und meist nebeneinander in einer Art Symbiose der beiden Organismengruppen parallel ablaufen. Tab. 7 zeigt die „Stoffumsetzungen in der acetogenen Phase sowie Beispiele beteiligter Mikroorganismen“:

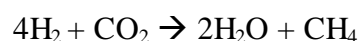
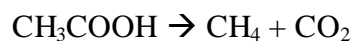
Tab. 7 Stoffumsetzungen in der acetogenen Phase und Beispiele beteiligter Mikroorganismen

Substrate	Mikroorganismen	Produkte
flüchtige Fettsäuren (Propionat, Butyrat) Alkohole Ketone Aldehyde	Clostridium spp. Eubacterium spp.	Acetat Kohlendioxid Wasserstoff

(Quelle : GRONAUER et al., 2004, 8)

### 2.4.4 Methanogenese

In der letzten Phase des anaeroben Abbaus erzeugen methanogene Bakterien das CH<sub>4</sub>. Die Methanbildung basiert zu 70 % auf der Verwertung von Acetat durch Decarboxillierung der acetogenotrophe Methanbakterien. Etwa 30 % des erzeugten Methans entstammt aus der Methanisierung von CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>, und zwar durch hydrogenotrophe Organismen z.B. Methanobacterium bryanti. Laut EDER & SCHULZ (2006) sind die Methanbakterien streng anaerob. Der optimale pH-Wert liegt bei 7, mit einem tolerierbaren Schwankungsbereich zwischen 6,6 und 8. Nach HOPFNER – SIXT (2007) erfolgt die Methanbildung nach folgenden Formeln:



Tab. 8 zeigt die „Stoffumsetzungen der methanogenen Phase und Beispiele beteiligter Mikroorganismen“:

Tab. 8 Stoffumsetzungen in der methanogenen Phase und Beispiele beteiligter Mikroorganismen

Substrate	Mikroorganismen	Produkte
Acetat	Methanosarcin spp.	Methan
Kohlendioxid	Methanosaeta spp.	
Wasserstoff	Methanobacterium spp	

(Quelle : GRONAUER et al., 2004, 9)

### 2.4.5 Generationszeiten der Bakterien

Bakterien können sich unter optimalen Bedingungen sehr schnell vermehren. Die Vermehrung der Bakterien erfolgt durch Zellteilung. Die Vermehrungsrate und damit das Generationsintervall, sind direkt abhängig vom zur Verfügung stehenden Nährstoffangebot und den externen Wachstumsbedingungen. Abb. 2 zeigt die „Vermehrungskurve von Bakterien, bei begrenztem Nährstoffangebot“:

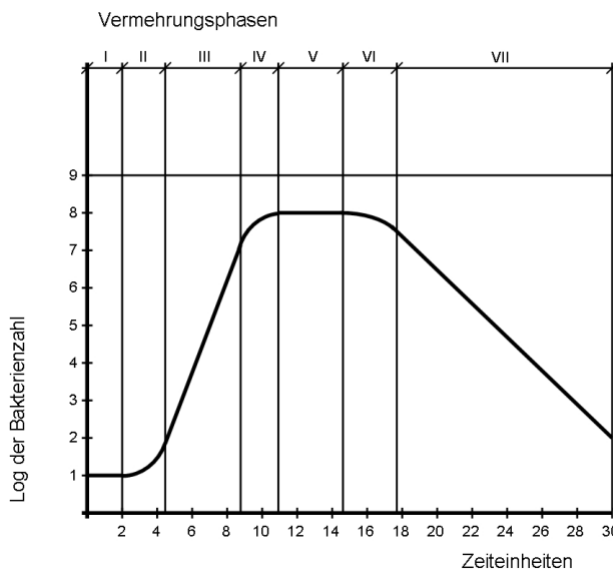


Abbildung 2: Vermehrungskurve von Bakterien bei begrenztem Nährstoffangebot (Quelle: JONKASKI, 1985, zitiert in BUGA, 2004, 24)

Die Anzahl der Bakterien in der Anlaufphase ist gering. Um sich teilen zu können müssen die Bakterien erst eine gewisse Zeit lang wachsen und eine bestimmte Größe erreichen. Diese Phase I wird als „Anlaufphase“ bezeichnet. Der „Anlaufphase“ folgt die Phase II, die so genannte „Beschleunigungsphase“, bei der die Bakterien mit dem ersten erhöhten Wachstum beginnen. Die gestartete „Beschleunigungsphase“ führt in die Phase III des Wachstums, der „logarithmischen Phase“, bei der die Bakterien ihre höchste Wachstumsrate aufweisen. In der Phase IV wird einerseits durch das begrenzte Nährstoffangebot und andererseits durch die steigenden toxischen Stoffwechselprodukten im Medium das Wachstum der Bakterien gehemmt. Die Phase V bildet das Absterben der Bakterien und wird als die „Absterbphase“ bezeichnet. Aus der Wachstumskurve ist zu entnehmen, dass ein Knappwerden des Nährstoffangebotes zu einem Aussterben der Bakterien führt. Daher ist für ein optimales Wachstum der Bakterien eine Versorgung der Biogasanlage mit kontinuierlich konstantem Nährstoffangebot von Bedeutung (vgl. JONKASKI, 1985, zitiert in BUGA, 2004, 24 f).

Bekannt sind heute etwa zehn verschiedene Arten von *methanococcus* und *methanobacterium*. Ihre Größe liegt im Mikrometerbereich und sie haben unterschiedliche Ansprüche. Die jeweiligen Bakteriengruppen arbeiten in den einzelnen Phasen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten (vgl. EDER & SCHULZ, 2006, 20). In Abb. 3 sind die „Generationszeiten der Bakterien aufgezeigt“:

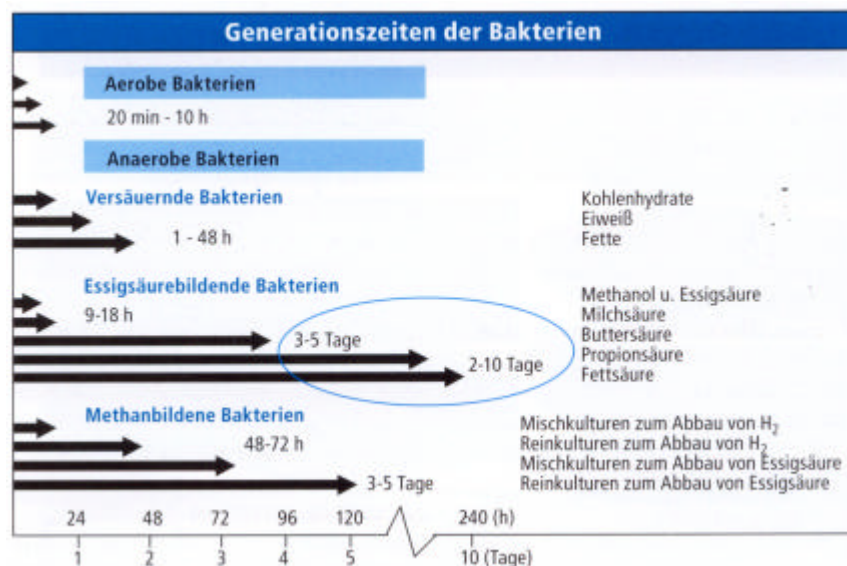


Abbildung 3: Generationszeiten der Bakterien (Quelle: Eder & Schulz, 2006, 20)

Die anaeroben Bakterien, insbesondere die methanbildenden, wachsen in der Regel nur sehr langsam. Das Generationsintervall beträgt mehrere Tage, die Vermehrungsrate ist gering. Im

Gegensatz dazu wachsen die Säurebildner schnell, was beim Anfahren einer Biogasanlage zu Problemen durch Übersäuerung des Substrates führen kann (vgl. BUGA, 2004, 24 ff).

#### 2.4.6 Nährstoffversorgung der Bakterien

Bezüglich Nährstoffversorgung benötigen Bakterien für den Aufbau ihrer Zellsubstanz selbst auch Nährstoffe, Vitamine, lösliche Stickstoffverbindungen, Mineralstoffe und Spurenelemente. Für eine gute Substratzusammenstellung gelten folgende Nährstoffverhältnisse als Anhaltswerte:

- C : N : P = 75 : 5 : 1 bis 125 : 5 : 1
- C : N = 10 : 1 bis 30 : 1
- N : P = 5 : 1

Anaerobe Bakterien bevorzugen hohe Substratkonzentrationen, in denen sie sich mit relativ wenig energetischem Aufwand mit Nahrung versorgen können. Daher sollten die CSB - Konzentrationen nicht unter zwei Gramm pro Liter liegen (vgl. HARTMANN & KALTSCHMITT, 2001, 645).

Geeignete Substrate für eine Vergärung in Biogasanlagen sind Wirtschaftsdünger, Nachwachsende Rohstoffe, Substrate aus der Weiterverarbeitung und organische Reststoffe (vgl. KTBL, 2005, 11 -115).

Die „Physikalisch-chemischen Mindestanforderungen für die Methanogenese“ sind in Tab. 9 zusammengefasst aufgelistet:



Tab. 9 Physikalisch – chemische Mindestanforderungen für die Methanogenese

<b>Physikalisch - chemische Mindestanforderungen für die Methanogenese</b>	
<b>Milieufaktoren</b>	
ph-Wert	6,5 bis 8,0
Salzgehalt (Leitfähigkeit)	2,5 bis 25 mS/cm
Temperatur	8 bis 55°C
<b>Elemente</b>	<b>Konzentration</b>
Sauerstoff	< 1 ppm
Wasserstoff	6 Pa
Gesamtkohlenstoff	0,2 bis 50 g/l CSB
Natrium	45 bis 200 ppm
Kalium	75 bis 250 ppm
Magnesium	10 bis 40 ppm
Schwefel	50 bis 100 ppm
Eisen	10 bis 200 ppm
Nickel	0,5 bis 30 ppm
Kobalt	0,5 bis 20 ppm
Molybdän, Wolfram, Selen	0,1 bis 0,35 ppm
Zink	0 bis 3 ppm
<b>Chemische Verbindungen</b>	
Phosphat	50 bis 150 ppm
<b>Mengenverhältnis</b>	
C:N:P:S	2000:15:5:3 (Gesamtprozess)

(Quelle : EDER & SCHULZ, 2006, 25 ff)

## 2.4.7 Physikalisch–chemische Einflussgrößen

### 2.4.7.1 Temperatur

Unter den methanbildenden Mikroorganismen gibt es mesophile und thermophile Bakterien. In der Regel wird der Biogasprozess mesophil zwischen 32 °C und 42 °C betrieben, da der Prozess in diesem Bereich am stabilsten ist. Grund dafür ist die große Artenvielfalt bei den Bakterien im mesophilen Bereich. Bei thermophiler Betriebsweise (ca. 55 °C) können höhere Abbauraten erreicht werden, zudem hat die höhere Temperatur eine hygienisierende Auswirkung. Die höhere Fermentationstemperatur bewirkt aber auch eine höhere Temperatur im Endlager, was zu erhöhter Ammoniakausgasung führen kann (vgl. THEIBING, 2006, 60).

Laut WEILAND (2001) führt die thermophile Betriebsweise zu einer besseren mikrobiellen Verfügbarkeit von fetthaltigen Stoffen und somit auch zu einer höheren Gasausbeute (vgl. WEILAND, 2001, 23).

Bei einer Biogasanlage unterscheidet man drei unterschiedliche Temperaturbereiche, mit welchen die Anlage gefahren werden kann. Siehe Tab. 10 „Temperaturbereiche der anaeroben Vergärung“:

Tab. 10 Temperaturbereiche der anaeroben Vergärung

<b>psychrophil</b> unter 20 °C	<b>mesophil</b> 20 – 45 °C Optimum ca. 37 °C	<b>thermophil</b> > 45 °C Optimum ca. 55 °C
geringer Prozessenergiebedarf langsamer Abbau und geringe Gasproduktion lange Verweilzeit der Gülle im Fermenter (über 100 Tage)	hohe Prozessstabilität, Verweilzeit 20 bis 30 Tage	hoher Prozessenergiebedarf und geringe Prozessstabilität schneller Abbau, aber hoher Gehalt an CO2 im Biogas Hygienisierung möglich, Verweilzeit 10 bis 15 Tage

(Quelle: HOPFNER – SIXT, 2007, 16; HARTMANN & KALTSCHMITT, 2001, 648)

In Abb.4 ist der Einfluss der Temperatur in Bezug zur Aktivität der Bakterien graphisch aufgezeichnet und in weiterer Folge auch beschrieben.

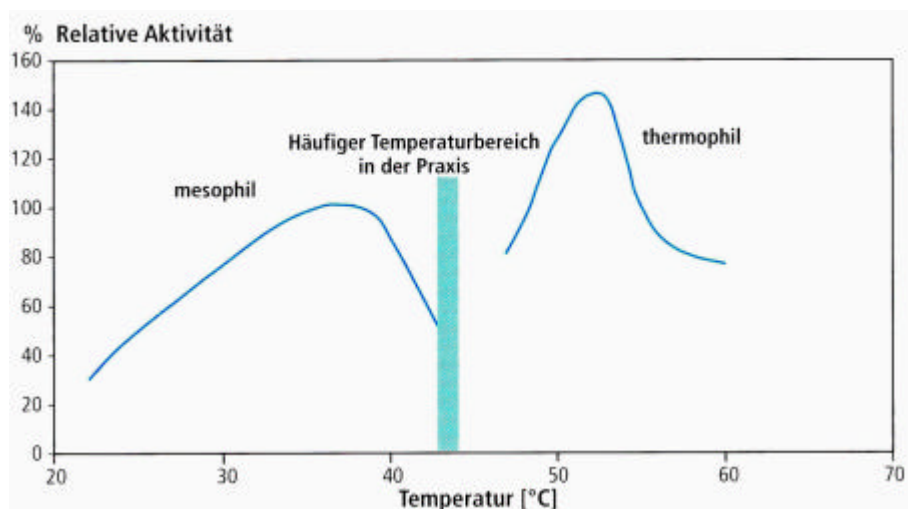


Abbildung 4: Einfluss der Temperatur auf die Bakterienaktivität (Quelle: EDER & SCHULZ)

Laut EDER & SCHULZ (2006) sinkt der Methangehalt im Biogas mit steigender Temperatur. Das hängt damit zusammen, das jenes im Substrat gelöste CO<sub>2</sub> verstärkt in die gasförmige Phase (in Biogas) übergeht, so dass der relative Anteil des Methans abnimmt. Die erzielbaren Gasausbeuten sind bei ausreichender Verweilzeit aber gleich hoch (EDER & SCHULZ, 2006, 24).

Methanbildende Bakterien reagieren rasch und empfindlich auf Temperaturänderungen, daher sollte die Temperatur innerhalb eines Tages nicht über 0,5 °C schwanken (vgl. THEIBING, 2006, 60). Nach EDER & SCHULZ (2006) gewöhnen sich die Bakterien über längere Zeiträume (etwa ab 1 Monat) individuell an neue Temperaturbereiche, so dass letztendlich jeder Betrieb individuell seine eigene Betriebstemperatur entwickeln kann. WEILAND (2001) sagt, dass in der Praxis sowohl die Kombination von mesophil/thermophiler Vergärung als auch thermophil/mesophiler Vergärung Anwendung findet (vgl. WEILAND, 2001, 30).

#### 2.4.7.2 pH-Wert

Der optimale pH-Bereich für die Methanbildung liegt zwischen 7 und 7,5. Bei den einstufigen Verfahren stellt sich dieser in der Regel automatisch im optimalen Bereich ein, da die Bakteriengruppe ein selbst regulierendes System bildet. Beim zweistufigen Prozess ist der pH-Wert in der Hydrolysestufe normalerweise zwischen 5 und 6,5, da die säurebildenden Bakterien hier ihr Optimum aufweisen. Bei einem Wert von 4,5 wird das Wachstum der Bakterien durch ihre eigenen Ausscheidungsprodukte gehemmt (vgl. HARMANN & KALTSCHMITT, 2001, 648)

Die ersten drei Stufen der Vergärung stellen einen Versäuerungsprozess mit einer pH-Wertabsenkung dar. Für Säurebildner, die sich im sauren Milieu wohl fühlen, bedeutet dies eine Aktivitätssteigerung. Für die Methanbildner, welche sich nur langsam vermehren, bedeutet dies nicht nur ein Überangebot an Futter, sondern vor allem eine Leistungshemmung durch die Absenkung des pH-Wertes. Im Extremfall stellt dies die Einstellung der Aktivität der Bakterien und somit der Methanbildung dar. Es kommt zu einem „Kippen“ der Fermentation.

Maßnahmen bei pH-Werten unter 7:

- Rücknahme der Beschickung
- Verdünnung mit vergorenem Substrat
- Bei pH Werten unter 6 sind die Methanbakterien für längere Zeit „beleidigt“. Abhilfe stellt nur die Zugabe von gut vergorenem Substrat dar.

Die pH-Wertmessung zeigt den zu schnellen Abbau des Ausgangsmaterials allerdings nur sehr spät dar. Für eine Früherkennung wäre die Messung der freien Fettsäuren vorteilhafter (vgl. BRUNNMAYR & KIRCHMEYR, 2005, 9 - 12).

HELM (2006) gibt als Indikatoren für die Kontrolle des Prozessverlaufes die CO<sub>2</sub> und CH<sub>4</sub> Konzentration zu messen an (HELM, 2006, 30).

EDER & SCHULZ (2006) geben die Messung der Pufferkapazität zur Steuerung und Kontrolle des biologischen Prozesses an. Für die Pufferwirkung verantwortlich sind hauptsächlich der Carbonat- und der Ammoniumpuffer. Während der Carbonatpuffer im leicht sauren Bereich aktiv wird, kommt der Ammoniumpuffer bei höheren pH-Werten zum Tragen. Bei stabilen Faulprozessen stellt sich jedoch der pH-Wert von selbst ein. (vgl. EDER & SCHULZ, 2006, 24ff)

Bei den untersuchten österreichischer Biogasanlagen beträgt der pH-Wert im Fermenter 7,7 bei einer Spanne von 6,7 bis 8,4. In den Nachfermentern liegt der mittlere pH-Wert bei 7,9 bei einer Spanne von 7,3 bis 8,6 (vgl. HOPFNER – SIXT, 2007, 18).

#### 2.4.7.3 Flüchtige Fettsäuren

Beim anaeroben Abbau entstehen niedermolekulare Fettsäuren, insbesondere Essig-, Propion-, Butter- und Valeriansäure. Die Bildung von Propionsäure hängt im Wesentlichen von höheren Säuren und vom Wasserstoffpartialdruck ab. Ein Ansteigen des Propionsäuregehaltes ist meist ein sicheres Zeichen für einen nicht optimal laufenden Biogasprozess (vgl. HARTMANN & KALTSCHMITT, 2001, 653).

In Fermentern mit stabilen Faulprozessen liegt das Verhältnis von Essig- zur Propionsäure über 2:1 und die Gesamtkonzentration der Säuren unter 3500 ppm. Weitere relevante Säuren für eine

stabile Fermentation sind die iso-Buttersäure, die n-Buttersäure und die iso-Valeriansäure (vgl. LEMMER & PREIBLER, 2007, 14 – 15).

EDER & SCHULZ (2006) gibt jedoch ein Essigsäure-Propionsäure-Verhältnis von 3:1 an, dies ist dasselbe Verhältnis, wie für die Pansenverdaulichkeit bei der Rinderfütterung. Jedoch kann es auch zur Adaption der Bakterien an hohe Säurekonzentrationen kommen, da die Bakterien sehr anpassungsfähig sind (vgl. EDER & SCHULZ, 2006, 28 ff).

#### 2.4.7.4 Feuchtes Milieu

Methanbakterien können im Gegensatz zu aeroben Bakterien, Hefen und Pilzen in fester Phase nicht existieren. Sie können nur arbeiten wenn das Substrat einen mindest Wasseranteil von 50 % aufweist. Daher ist auch bei den so genannten Feststoffverfahren eine ausreichende Befeuchtung des Materials notwendig (vgl. EDER & SCHULZ, 2006, 22).

#### 2.4.7.5 Wasserstoffpartialdruck

Die Bildung von  $\text{CH}_4$  aus Essigsäure kann in Abhängigkeit vom Wasserstoffpartialdruck, nur in einem sehr begrenzten energetischen Bereich, d.h. wenn die Reaktionsenthalpie negativ wird stattfinden. Bei zu geringem Wasserstoffpartialdruck fehlt den Mikroorganismen der Wasserstoff zur Methansynthese. Bei zu hohem Wasserstoffpartialdruck hingegen wird die Oxidation zu  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}_2$  und Acetat gehemmt (vgl. HELM, 2006, 27). Bei niedrigen Wasserstoffkonzentrationen wird viel Essigsäure gebildet, während ein höherer Partialdruck die Bildung von Propion-, Butter- und Milchsäure sowie Ethanol bewirkt (vgl. HARTMANN & KALTSCHMITT, 2006, 645).

#### 2.4.7.6 Redoxpotential

Das Redoxpotential ist ein Maß für die Bereitschaft der Ionen, die Elektronen aufzunehmen. Das muss, damit die anaeroben Bakterien wachsen können sehr niedrig sein (-0,1 Volt). Da Sauerstoff ein hohes Redoxpotential (+1,78 Volt) hat, stört es zunächst die anaeroben Bakterien. Sind aber genügend reduzierende Stoffe mit niedrigem Redoxpotential vorhanden, kann auch bei Anwesenheit von Sauerstoff der anaerobe Prozess vonstatten gehen (vgl. EDER & SCHULZ, 2006, 22). Um niedrige Redoxpotentiale zu gewährleisten, ist es sinnvoll dem Prozess wenig Oxidationsmittel wie Sauerstoff, Nitrate und Nitrite zuzuführen (vgl. HARTMANN & KALTSCHMITT, 2001, 648).

## 2.5 Faulraumbelastung und Verweilzeit

### 2.5.1 Faulraumbelastung

Mit Hilfe der Faulraumbelastung wird festgelegt, welche Menge organischer Trockensubstanz maximal „zugefüttert“ werden kann, ohne dass die Bakterien überfüttert werden und der Prozess durch Versauerung „kippt“. Die Faulraumbelastung lässt sich aus der täglichen zugeführten Masse an organischer Trockensubstanz (oTS) und dem nutzbaren Gärbehältervolumen berechnen (vgl. BUGA, 2004, 27 ff).

$$\text{Faulraumbelastung} \left[ \text{kg oTS} * \text{d}^{-1} \right] = \frac{\text{tägl. org. Trockensubstanz} \left[ \text{kg oTS} * \text{d}^{-1} \right]}{\text{nutzb. Gärbehältervolumen} \left[ \text{m}^3 \right]}$$

Welche Raumbelastung toleriert werden kann, muss in Abhängigkeit der Inputstoffe, deren Zerkleinerungs- bzw. Aufschlussgrad und der Fermenterbauart entschieden werden. Aber auch das Beschickungsintervall beeinflusst die mögliche Raumbelastung. Je kleiner und häufiger die einzelnen Portionen sind und je gleichmäßiger sie zugegeben werden umso höher ist die mögliche Raumbelastung (vgl. HELM, 2006, 31 f). Die durchschnittliche Reaktorbelastung liegt zwischen 0,5 und 10 kg oTS/m<sup>3</sup> \*d. Mit zunehmender Belastung sinken Gasausbeute und Prozessstabilität.

### 2.5.2 Verweilzeit

Ein weiterer Parameter bei der Dimensionierung der Behältergröße ist die hydraulische Verweilzeit. Sie gibt an, wie viele Tage sich das Substrat durchschnittlich im Gärbehälter befindet. Berechnet wird die Verweilzeit aus dem nutzbaren Gärbehältervolumen und der täglich zugeführten Substratmenge. In Abhängigkeit von der täglich zugeführten Substratmenge und deren Abbaubarkeit ist der Fermenter zu dimensionieren. Die theoretische Verweilzeit ist das Verhältnis von Fermentervolumen zu täglich zugeführter Substratmenge.

$$\text{Verweilzeit } t \left[ \text{d} \right] = \frac{\text{nutzbares Gärbehältervolumen} \left[ \text{m}^3 \right]}{\text{tägl. zugeführte Substratmenge} \left[ \text{m}^3 * \text{d}^{-1} \right]}$$

Mit steigender Verweilzeit (sinkender Raumbelastung) nimmt die kumulative Gasproduktion pro kg oTM zu. Die Gasausbeute pro m<sup>3</sup> Fermentervolumen wird kleiner (vgl. BUGA, 2004, 27 ff).

Substratparameter wie Art, Wert, Menge, Konzentration und Abbaugeschwindigkeit sind bei der Festlegung der Verweilzeit und der Reaktorbelastung zu beachten. Die durchschnittlichen Verweilzeiten liegen bei 10 bis 100 Tagen. Sowohl die Prozessstabilität als auch die Gasausbeute steigen mit längerer Verweilzeit, bis zur maximalen Gasausbeute. Mit steigender Temperatur sind kürzere Verweilzeiten anwendbar, jedoch führen Verweilzeiten unter 20 Tagen zu einer sehr geringen Ausfäulung und Substratausnutzung sowie zu sinkendem Gasertrag und Geruchsproblemen. Die kritische Verweilzeit von 20 Tagen sollte nicht unterschritten werden (vgl. KTBL, 2005, 18). Tab. 11 zeigt die „Verweilzeit und die max. Reaktorbelastung bestimmter Substrate“:

Tab. 11 Verweilzeit und Reaktorbelastung bei unterschiedlichen Substraten

Substrat	Verweilzeit	max. Reaktorbelastung
Rindergülle + NAWARO	= 50 Tage	3 bis 4 kg/m <sup>3</sup> *d
Schweinegülle + NAWARO	= 80 Tage	3 bis 4 kg/m <sup>3</sup> *d
NAWARO Monovergärung	= 80 Tage	bis 3 kg/m <sup>3</sup> *d

(Quelle: KTBL, 2005, 18)

Laut Untersuchungen von AMON et al. (2006) beträgt die optimale hydraulische Verweilzeit und zwar unter der Annahme, dass die Gärtemperatur bei 40 °C liegt und keine Vorbehandlung durchgeführt wurde bei:

- Getreideganzpflanzensilage: 20 Tage
- Wiesengras frisch: 27 Tage
- Wiesengrassilage: 27 bis 40 Tage
- Sonnenblumensilage: 23 bis 42 Tage
- Maissilage: 27 Tage

Es ist zu beachten, dass die optimale hydraulische Verweilzeit nicht nur von der Art der Energiepflanze sondern auch von der Faulraumbelastung abhängig ist (vgl. AMON et al., 2006, 10 ff).

Nach EDER & SCHULZ (2006) hat auch die Oberfläche der Struktur einen Einfluss auf die Verweilzeit. Je kleiner das Material, desto kürzer ist auch die Verweildauer. Bei den durchschnittlich üblichen Verweilzeiten wird mit einem Abbaugrad der organischen Substanz von 60 % gerechnet, nachwachsende Rohstoffe erreichen einen Abbaugrad von 80 % der oTM (vgl. EDER & SCHULZ, 2006, 26).

## 2.6 Vergärbare Substrate

Die für die Vergärung in Biogasanlagen geeigneten Materialien werden in drei Stoffgruppen nach der Nachvollziehbarkeit ihrer Herkunft und ihrem Belastungspotential mit Schadstoffen eingeteilt.

### Gruppe 1

Die Ausgangsmaterialien sind Reststoffe aus landwirtschaftlichen Betrieben, wie Treber, Trester, Kerne, Schalen, Schrote, ungebeizte Saatgutreste oder Pressrückstände, und nachwachsende Rohstoffe, wie z.B. Gras, Silomais, Grassilage, Zuckerhirse, Feldfutter, etc. Diese werden, bevor sie in die Biogasanlage kommen zerkleinert. Die Vergärung von Flüssig- und Festmist sowie von anderen Ausgangsmaterialien aus der landwirtschaftlichen Urproduktion, die gezielt für eine derartige Verwertung angebaut werden, führen zum Endprodukt Biogasgülle.

### Gruppe 2

Abfälle aus der Nahrungs-, Genuss- und Futtermittelindustrie, dies sind Ernte und Verarbeitungsrückstände aus der gewerblichen, landwirtschaftlichen und industriellen Erzeugung. Sowie der Verarbeitung und dem Vertrieb von land- und forstwirtschaftlichen Produkten. z.B. Getreidebruch, Spelzen, Reben, Rübenschnitzel, Melasserückstände, verdorbene Futtermittel und Futtermittelreste pflanzlicher Herkunft. Pflanzliche Lebens- und Genussmittel wie Kaffeesud, Tee, Getreide, Teig, Hefe, ehemalige pflanzliche Lebensmittel ohne Verpackung. Rein pflanzliche Press- und Filterrückstände der Nahrungs-, Genuss- und Futtermittelproduktion.



Ungebeiztes verdorbenes Saatgut, Bleicherde, Rohglyzerin aus der Pflanzenölveresterung, Obst- und Gemüseabfälle, Blumen, Panseninhalt, Genusstaugliche Frischmilch, Molkerei- und Käseerückstände. Die Fermentationsendprodukte aus den Stoffen der Gruppe zwei führen zu den Gärrückständen.

### Gruppe 3:

Rohglyzerin aus der Altspeseölveresterung, Gras- und Rasenschnitt (Mähgut) und Laub, Biotonne (aus getrennter Sammlung), Tiermaterialien aus dem Abwasserstrom von nicht Wiederkäuer – Schlachthöfen und Zerlegebetrieben, Schlachtkörperteile von schlagtauglichen Tieren, Schlachtnebenprodukte wie Hautreste, Hufe, Hörner, Schweineborsten, Blut von anderen Tieren als Wiederkäuer und Wiederkäuerblut, ehemalige Lebensmittel tierischer Herkunft, Speiseöl und -fette, Fettabscheiderrückstände, tierisch oder tierische Anteile enthalten, gebrauchtes Speiseöl sowie Küchen- und Speiseabfälle aus Großküchen und Gastronomie in untergeordneten Mengen

Anlagen, welche Stoffe der Gruppe drei vergären, verlangen unter Umständen eine Hygienisierungseinrichtung. Je nach Art des Ausgangssubstrates erfolgt eine Vorbehandlung durch Dampfdrucksterilisation oder Pasteurisation. Art, Dauer, Temperatur und Druck der Vorbehandlung sind gesetzlich vorgegeben. Die Fermentationsrückstände werden wie in Gruppe 2 als Gärrückstände bezeichnet (vgl. PÖTSCH, 2007, 76 - 81).

Bezüglich der Menge und Qualität des erzeugten Biogases sollte eine wichtige Grundregel beachtet werden. Es sollen nur jene Substrate in eine Biogasanlage eingebracht werden, welche gut für die Viehfütterung geeignet sind. Damit können anfallende Probleme möglicherweise vermieden werden (vgl. KARG, 2007, 39).

### 2.6.1 Stoffliche Eigenschaften der Fermentations-Rückstände

Die im Biogasprozess entstehenden Fermentationsrückstände stellen für den Betrieb einen wertvollen organischen Dünger dar und helfen den Einsatz von Mineraldünger zu senken. Die Fermentationsrückstände aus Biogasanlagen sind sehr gut wirksame Mehrnährstoffdünger. Aufgrund eines engeren C/N-Verhältnisses und einem höheren Anteil an leicht löslichem, pflanzenverfügbarem Stickstoff weisen die Fermentationsrückstände eine verbesserte direkte Pflanzenverfügbarkeit und damit einen höheren Düngerwert als unfermentierte Wirtschaftsdünger auf. Durch die Düngung der Fermentationsrückstände gelangen die Nährstoffe wieder auf die Anbauflächen zurück (Kreislaufwirtschaft der Stoffe). Eine Düngeempfehlung kann auf Basis der Abfuhr an Nährstoffen durch das Erntegut abgeleitet werden. Anzustreben ist eine ausgeglichene Nährstoffbilanz (vgl. AMON et al, 2006, 12).

Durch den Fermentationsprozess und die Zugabe von Cosubstraten verändern sich wesentliche Substrateigenschaften, und somit auch die Eigenschaft der Anwendung des vergorenen Wirtschaftsdüngers. Durch die Fermentation wird die oTS von Gülle oder verflüssigtem Festmist in Abhängigkeit der Verweildauer im Fermenter von 30 % bis zu 60 % abgebaut. Die Reduktion des Trockenmassegehaltes kommt dadurch zustande, dass ein Teil der Kohlenstoffverbindungen der organischen Trockenmasse in CH<sub>4</sub> und CO<sub>2</sub> abgebaut wird.

Biogasgüllen und Gärrückstände sind flüssige, stickstoffhaltige Stoffe, die auf landwirtschaftlichen Nutzflächen zur Nährstoffversorgung von Kulturpflanzen eingesetzt werden. Daher unterliegen diese Stoffe auch den einschlägigen Gesetzen, Verordnungen und Richtlinien für die Düngung (vgl. PFUNDTNER, 2007, 24 ff).

Laut Untersuchungen stoppt die Vergärung die Keimfähigkeit von Unkrautsamen (SCHRADER, 2003, 76 f). Beispielsweise zeigen Samen von Rumex obtusifolius im Biogasfermenter bereits nach einem Tag Verweildauer nur mehr eine Keimfähigkeit von 22 % und ab dem dritten Tag ist die Keimfähigkeit bei null (vgl. SONNLEITNER, 2004, 20).

Bei der Applikation der Gärrückstände muss aufgrund des erhöhten pH-Wertes und des erhöhten Abgasungsrisikos von  $\text{NH}_3$  ein besonderes Augenmerk auf die Ausbringungsbedingungen gelegt werden. Die bodennahe, großtropfige Ausbringung bei kühler, windstiller Witterung (idealerweise bedecktes und leicht regnerisches Wetter) kann die  $\text{NH}_3$ -Abgasungsverluste deutlich reduzieren (vgl. PÖTSCH et al, 2004, 37 ff).

## 2.7 Zusammensetzung und Qualität von Biogas

Biogas entsteht bei der Vergärung von organischen Stoffen unter Luftabschluss und besteht aus den Hauptbestandteilen  $\text{CH}_4$  und  $\text{CO}_2$ . Die genaue Zusammensetzung des Biogases aber auch die mögliche Gasausbeute hängen sehr stark von der Beschaffenheit des Gärgutes, der Prozessführung und der Substrattemperatur ab.

Die wesentlichen Einflussfaktoren bezüglich des Gärguts sind:

- Gehalt an organischer Trockensubstanz (% oTS bezogen auf den TS-Gehalt)
- Wassergehalt
- Nährstoffverhältnis (C:N:P-Gehalt)
- Schad- und Störstoffgehalt
- Tierart: Rind, Schwein, Geflügel
- Tierhaltungsziel: Zucht, Fleisch-, Milch- oder Eiproduktion
- Aufstallungssysteme, mit oder ohne Einstreu, Batterie, bzw. Bodenhaltung, Wasserzufuhr
- Fütterung (vgl. BRENN et al, 2006, 5 ff).

Biogas- und Faulgaszusammensetzung

In Tab. 12 ist die „Zusammensetzung von Biogas und auch Faulgas“, da dieses dem Biogas sehr ähnlich ist, nach KABASCI & HILLER (2005) aufgelistet:

Tab. 12 Biogas und Faulgaszusammensetzung

		<b>Biogas</b>	<b>Faulgas</b>
Hauptkomponenten	CH <sub>4</sub>	50 – 65 Vol. %	50 – 65 Vol. %
	CO <sub>2</sub>	30 – 40 Vol. %	30 – 40 Vol. %
Feuchte: mesophil	H <sub>2</sub> O	4 – 6 Vol. %	4 – 6 Vol. %
thermophil	H <sub>2</sub> O	10 – 15 Vol. %	10 – 15 Vol. %
Spurengase	H <sub>2</sub> S	50 – 10000 mg/m <sup>3</sup>	< 100 mg/m <sup>3</sup>
	NH <sub>3</sub>		wenige mg/m <sup>3</sup>
	Cl, F	< 10 – 100 mg/m <sup>3</sup>	wenige mg/m <sup>3</sup>
	KW- Verb	< 0,2 mg/m <sup>3</sup> < 10 mg/m <sup>3</sup>	bis 500 mg/m <sup>3</sup> allg. ca. 1- 150 mg/m <sup>3</sup> max. bis 700 mg/m <sup>3</sup>
	Si -Verb.	allg. Spuren	

(Quelle: KABASCI & HILLER, 2005, 103 ff)

Faulgas entsteht bei der Schlammfäulung in Kläranlagen. Es hat einen wesentlich geringeren Anteil an Schwefelwasserstoff, da in den meisten Kläranlagen Eisensalze zur Phosphatfällung oder Schlammverdickung eingesetzt werden. Der hohe Anteil an Siliziumverbindungen im Faulgas ist auf die siliziumorganischen Verbindungen welche in Kosmetika und synthetischen Hydraulikölen vorkommen zurückzuführen (vgl. KABASCI & HILLER, 2005, 103 ff).

### 2.7.1 Hemmstoffe

Durch eine Reihe von Substanzen kann die Stoffwechsellätigkeit und das Wachstum der Mikroorganismen gehemmt oder völlig unterdrückt werden. Einige Stoffe schädigen die Zellgrenzschicht oder die Zellstruktur der Bakterien (Detergentien u.a.) andere schädigen die Enzyme des Zellstoffwechsels (Schwermetalle u.a.). Die schädigende Wirkung der Stoffe ist konzentrationsabhängig (vgl. EDER & SCHULZ, 2006, 27). In weiterer Folge sind die wesentlichen Hemmstoffe aufgelistet und beschrieben:

### 2.7.1.1 Lufteintrag

Die Lufteindüsung in den Gasraum wird großteils zur Entschwefelung des gebildeten Biogases eingesetzt. Methanbakterien sind allerdings gänzlich anaerob, das heißt durch Lufteintrag in die flüssige Phase werden vor allem die Methanbakterien geschädigt. Der größte Lufteintrag erfolgt meistens bei der Feststoffbeschickung. Sehr gut aufgelockertes Material sollte daher nicht direkt eingetragen werden (vgl. BRUNNMAYR & KIRCHMEYR, 2005, 12 ff).

### 2.7.1.2 Desinfektionsmittel und Antibiotika

Aufgrund der Verdünnung von in geringen Mengen eingesetzten Mitteln haben diese kaum Auswirkung auf die Fermentation. Werden allerdings Stallabteile gereinigt, so sollte hier von der Zugabe des Abfallwassers aus der Reinigung in den Fermenter abgesehen werden (vgl. BRUNNMAYR & KIRCHMEYR, 2005, 12 ff).

Nach EDER & SCHULZ (2006) gibt es Desinfektionsmittel und Antibiotika die in höherer Konzentration nicht schaden, während andere schon bei schwacher Konzentration stark negative Auswirkungen haben. Werden ganze Tierbestände und Ställe behandelt, kann man das Problem in Form einer Bypassleitung direkt in den Lagerbehälter umgehen (vgl. EDER & SCHULZ, 2006, 27).

### 2.7.1.3 Schwefelwasserstoff

Die Sulfatreduzierung findet insbesondere bei Zugabe von schwefelhaltigem Ausgangsmaterial (z.B. proteinhaltige Substrate) statt. Der in der Aminosäure enthaltene Schwefel wird von sulfatreduzierenden Mikroorganismen zu Schwefelwasserstoff abgebaut, welches zwei Nachteile mit sich bringt. Einerseits verbraucht diese Reaktion  $H_2$ . Somit stehen die sulfatreduzierenden Mikroorganismen in direkter Konkurrenz zu den methanogenen Organismen, welche Wasserstoff und Kohlendioxid zu Methan verarbeiten. Andererseits ist Schwefelwasserstoff ein Schadgas, das sowohl für den Menschen gesundheitsschädlich ist als auch in den Einrichtungen der Biogasanlage zu Korrosionsschäden führt (vgl. GRONAUER et al, 2004, 7 ff).

AMON et al. (2004) sprechen von kritischen  $H_2S$ -Gehalten bei mehr als 3 mmol/l, bzw. 100 mg Sulfid/l Substrat, was in etwa einem  $H_2S$ -Anteil im Gas von 1 Vol.-% entspricht (vgl. AMON et al, 2004, 65).

Nach EDER & SCHULZ (2006) muss bei mehr als 2000 ppm H<sub>2</sub>S im Gas oder 50 mg H<sub>2</sub>S in der Lösung mit einer einsetzenden Bakterienhemmung gerechnet werden (vgl. EDER & SCHULZ, 2006, 29).

Weitere Faktoren, welche die Biogasentstehung nachteilig beeinflussen, sind z.B. Schwimmdecken, Sinkschichten, Abweichungen von der vorgegebenen Solltemperatur im Fermenter sowie erhöhte Ammonium- oder Fettsäurekonzentrationen. Diesen Störeffekten kann mit technischen Maßnahmen wie Rührwerken, Beheizungseinrichtungen, Mess- und Steuerungs- und Regeltechnik und einer angepassten Substratzufuhr entgegengewirkt werden (vgl. GRONAUER et al, 2004, 7 ff).

EDER & SCHULZ (2006) geben als Hemmstoffe auch schlechte Substratqualität und verschimmelter Material an. Die durch die Schimmelpilze ausgestoßenen Toxine können die Bakterien direkt hemmen. Sekundäre Inhaltsstoffe wie Schwefelverbindungen in Lauch-, Kohl- und Zwiebelgewächsen, ätherische Öle von Zitrusfrüchten und Knoblauch sowie Oxalsäure von verschiedenen Kleearten und Cyanide und Tannine wirken hemmend auf die Bakterien (vgl. EDER & SCHULZ, 2006, 31).

Die einzelnen Bestandteile des Biogases haben sehr unterschiedliche Einflüsse. Je nachdem für welchen Zweck das Biogas verwendet wird, müssen die einzelnen Bestandteile je nach Anwendungsfall gar nicht, oder besonders gründlich aus dem Gas entfernt werden. Des Weiteren können noch Siloxane, Staub und weitere Spurengase im Biogas enthalten sein (vgl. BRENN et al, 2006, 5 ff).

In Tab. 13 sind einige „Hemmstoffe und deren Konzentration, bei der eine Hemmwirkung bei anaeroben Abbauprozessen“ eintritt aufgezeigt:

Tab. 13 Hemmstoffe bei anaeroben Abbauprozessen

Hemmstoff	Konzentration, bei der Hemmwirkung eintritt	Anmerkungen
Sauerstoff	> 0,1 mg/l O <sub>2</sub>	hemmt die obligat anaeroben Bakterien
Schwefelwasserstoff	> 50 mg/l H <sub>2</sub> S	mit sinkendem pH-Wert steigt die Hemmwirkung
Ammoniumstickstoff	> 3500 mg/l NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	mit steigendem pH-Wert (ab 7) und steigender Temperatur nimmt die Hemmwirkung zu
Flüchtige Fettsäuren	> 2000 mg/l Hac	mit sinkendem pH steigt die Hemmwirkung
Schwermetalle	Cu > 50, Zn > 150, Cr > 100 mg/l	inhibierend wirken nur gelöste Schwermetalle
Antibiotika	k.A.	Hemmwirkung ist produktspezifisch auf bestimmte Bakterien

(Quelle: THEISSING, 2006, 62)

Weiteres findet man in der Literatur unterschiedliche kritische Werte bezüglich der Hemmstoffkonzentration. Diese können auf verschiedenen Ursachen wie die des Fermentertypes, die Betriebsweise und Wechselwirkung mit anderen Inhaltsstoffen der Substrate zurückgeführt werden (vgl. HARTMANN & KALTSCHMITT, 2001, 649 f).

Nach AMON et al. (2004) hemmt Ammoniak die Gärung ab einer Konzentration von 3000 mg/l, jedoch sind mindestens 20 mg/l als Nährstoff notwendig (vgl. AMON et al., 2004, 64 f).

## 2.8 Energiepflanzen – Einflussgrößen auf die Methan- und Biogasausbeute

Laut EU-Verordnung Nr. 1251 vom 17. Mai 1999 ist der Anbau von nachwachsenden Rohstoffen auf Stilllegungsflächen zur Verwendung in Biogasanlagen möglich (vgl. HOPFNER – SIXT, 2007, 45).

Das Biogas- und Methanbildungsvermögen von Energiepflanzen wird hauptsächlich vom Gehalt an Substanzen geprägt, aus denen Methan gebildet werden kann wie z.B. Rohprotein, Rohfett, Rohfaser, Stärke und Zucker. Die mikrobielle Verfügbarkeit dieser Nährstoffe ist dabei entscheidend. Wichtige Qualitätsmerkmale von Energiepflanzen zur Biogaserzeugung werden vom Nährstoffgehalt der Gärrohstoffe definiert. Einflüsse auf die Qualität von Energiepflanzen wirken in verschiedenen Phasen entlang der Erzeugungs- und Nutzungskette, siehe auch folgende Abb.5:

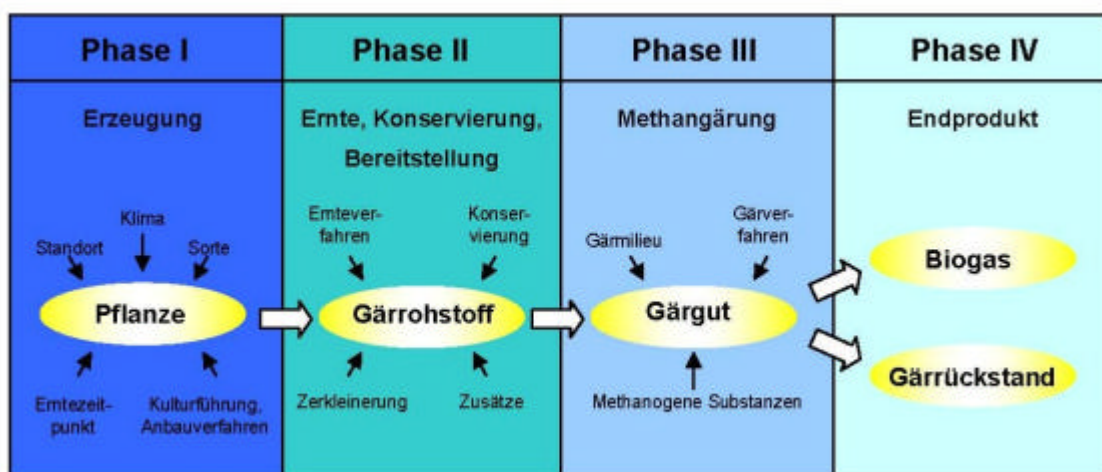


Abbildung 5: Einflüsse auf die Qualität der Pflanzenbiomasse, den Gärrohstoff und das Gärgut bei Nutzung von Energiepflanzen in der Biogaserzeugungskette

(Quelle: AMON et al, 2006, 20)

Die Qualität von Energiepflanzen zur Biogasnutzung wird bereits auf dem Feld (Phase I) wesentlich geprägt. Neben Standortfaktoren bestimmen vor allem pflanzenbauliche Maßnahmen, die Sortenwahl, Kulturführung, Anbauverfahren und die Reifeentwicklung der Pflanzen zum Zeitpunkt der Ernte den Gehalt und die Verfügbarkeit der Nährstoffe in den Pflanzen, aus denen Methan gebildet werden kann.



Im Bereich der Ernte, Konservierung und Biomassebereitstellung (Phase II) beeinflussen das eingesetzte Ernte- und Konservierungsverfahren, die Gärgutaufbereitung und evtl. verwendete Zusätze die Gärrohstoffqualität und die Menge an Biomasse, die pro Flächeneinheit geerntet werden kann. Während der Methangärung (Phase III) findet die Transformation von der Energie im Gärgut in die Methanenergie des Biogases statt. Auf den Verlauf der Gärung wirken hier eine Reihe von Faktoren wie z.B. die Milieubedingungen der Gärung: Temperatur, pH-Wert, der Gehalt methanbildender Stoffe im Gärgut oder möglicherweise auftretende Hemmstoffe. Aus allen Einflussgruppen der Phasen I bis III resultieren Menge und Qualität des Biogases, sowie der Gehalt an Pflanzennährstoffen im Gärrückstand (Phase IV) (vgl. AMON et al, 2006, 20).

Das Biogaspotential von Energiepflanzen wird durch ihre Zusammensetzung insbesondere durch die Anteile der Pflanzenbaustoffe, Kohlenhydrate, Fettstoffe und Proteine bestimmt. In Tab. 14 wird der „Ertrag und Methangehalt von Pflanzenbaustoffen“ aufgezeigt:

Tab. 14 Ertrag und Methangehalt von Pflanzeninhaltsstoffen

<b>Pflanzenbaustoff</b>	<b>Biogasertrag (l/kg oTS)</b>	<b>Methangehalt (Vol%)</b>	<b>Methanertrag (l/kg oTS)</b>
Kohlenhydrate	700-800	50-55	350-440
Proteine	600-700	70-76	420-525
Fette	1.000-1.250	68-73	680-913

(Quelle: HOPFNER – SIXT, 2007, 44)

Proteine liefern einen geringeren Biogasertrag, weisen jedoch einen hohen Methangehalt auf (vgl. HOPFNER – SIXT, 2007, 44).

Die Gasausbeute hängt primär von der Substratzusammensetzung, der Gärtemperatur und der Aufenthaltszeit des Substrates im Fermenter ab. Die Substratzusammensetzung beeinflusst einerseits den maximal erreichbaren Abbaugrad und andererseits die Abbaugeschwindigkeit (vgl. HARTMANN & KALTSCHMITT, 2001, 657).

## 2.9 Biogas aus Grünlandbeständen

In Österreich, aber auch in den übrigen Alpenländern, gewinnt die Bewirtschaftung des Grünlandes an ökologischer und langfristig betrachtet an wirtschaftlicher Bedeutung. Die alternative Nutzung der Grünlandbiomasse für die stoffliche und energetische Verwertung wird zunehmend interessanter. Die Nutzung der oberirdischen Teile von Gräsern, Leguminosen und diversen Kräutern als Grünfutter, Heu oder Silage hat selbst unter den oft schwierigen Standort- und Wetterverhältnissen Tradition. Das Grünland unterscheidet sich in seiner botanischen Zusammensetzung, in der Art der Nutzung und in der Zielsetzung der Bewirtschaftungsfunktion. Je nach Nutzung unterscheidet man Dauergrünland, Wechselgrünland und Ackergrünland. Grünland ist hauptsächlich dort verbreitet, wo Ackerbau nicht oder nur mit Vorbehalt möglich ist, sei es wegen der ungünstigen Bodenverhältnisse (Flächengründigkeit, hoher Steingehalt etc.), zu hoher Niederschläge oder Grundwasserstände, steiler Hanglage oder zu kurzer Vegetationszeit wie z.B. in den Höhenlagen (vgl. BUCHGRABER & GINDL, 2004, 9 ff).

Durch die steigende Milchleistungen unserer Kühe, nimmt die Zahl der Rinder und Milchkühe jährlich ab, viele Grünlandbetriebe haben daher zu viel Gras. Für diese kann die Grasvergärung ein interessanter Punkt sein. Auch die EU lässt die Vergärung nachwachsender Rohstoffe von Stilllegungsflächen zu, auf diese könnten mehrjährige Gräser zur Biogasproduktion angebaut werden. Darüber hinaus können Grünabfälle aus der Pflege von Sportplätzen, Parkflächen oder Naturschutzgebieten vergoren werden (vgl. OECHSNER & LEMMER, 2002, 92 ff).

Für Grasschnitt oder Grassilagen ergeben sich beim Einsatz in Biogasanlagen folgende Anforderungen: Hohe Rohprotein- und Rohfettgehalte, niedrige Rohfasergehalte, besonders von ligninifizierter Zellulose, und hohe Energiegehalte. Diese Anforderungen entsprechen weitgehend den Anforderungen an die Futterqualität für Milchvieh (vgl. RÖSCH et al, 2005, 63f).

### 2.9.1 Biomasseerträge von Grünlandbeständen

Die Artenvielfalt der österreichischen Wiesen und Feldfutterbestände liefert bei den differenzierten Standort- und Bewirtschaftungsverhältnissen äußerst unterschiedliche Futterpartien. In Österreich wachsen auf den rund 2,0 Mio. ha jährlich 6 bis 7 Mio. Tonnen Trockenmasse, 30 % werden als Grünfutter, 27 % als Trockenfutter und 43 % als Silage verwendet (vgl. RESCH et al, 2006, 2).

In Tab. 15 sind die durchschnittlichen Trockenmassejahreserträge aus dem österreichischen Grünland aufgezeigt. Sie liegen zwischen 30 [dt/TM/ha] bei den Einschnittflächen und 115 [dt/TM/ha] bei den Sechsschnittflächen:

Tab. 15 Trockenmassejahreserträge im österreichischen Grünland

Nutzungsform am Grünland	Æ TM- Jahresertrag [dt/ha]	Nutzungsform am Grünland	Æ TM- Jahresertrag [dt/ha]
<b>Einschnittflächen</b>		<b>Dreisschnittflächen</b>	
mit Nachweide	30	Landesübliche Wirtschaftsweise	75
Magerwiesen	30	Gehobene Wirtschaftsweise	90
Feuchtwiesen	35	<b>Mehrschnittflächen</b>	
Streuwiesen	50	Vierschnittfläche	95
<b>Zweisschnittflächen</b>		Fünfschnittfläche	105
Zweisschnittfläche	50	Sechsschnittfläche	115
Zweisschnittfläche mit Nachweide	65		

(Quelle: BUCHGRABER, 2006, 23)

Der optimale Erntetermin von Grünlandbeständen für die Biogasproduktion liegt bei jenem Zeitpunkt, bei dem pro Hektar möglichst viel Biomasse gewachsen ist und gleichzeitig die spezifische Methanausbeute aus der Biomasse nicht wesentlich abnimmt. Bei Klee gras ist das in der Regel vor dem „Beginn der Blüte“ (vgl. AMON, 2003, 44). Bei Wiesengras und Feldfutter beim Ähren- /Rispschieben (vgl. AMON et al., 2006, 89).

## 2.9.2 Methanbildungspotential von Grünlandbeständen

Die Biogaserträge aus Gras hängen vom Schnittzeitpunkt und vom Grünlandstandort ab (NEUMANN, 2007, 47). Bei der Vergärung von Gras, ist zu beachten, dass wie bei der Futtererzeugung nur ein früher erster Schnitt zu guten Gasausbeuten führt (vgl. MATTHIAS, 2002, 89). Das Vegetationsstadium der Pflanze ist sehr wichtig, da mit zunehmendem Alter die Methanausbeute aufgrund der Einlagerung von Lignin abnimmt (vgl. AMON, 2003, 44).

Versuche in Deutschland, mit Gras an unterschiedlichen Standorten zeigen bezüglich der Methanerträge wie in Abb.6 aufgezeichnet, folgende Ergebnisse:

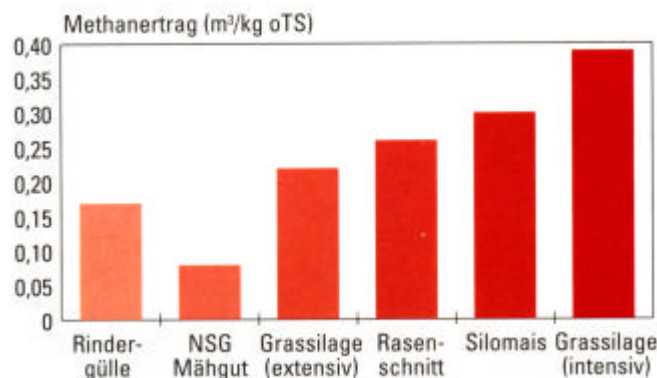


Abbildung 6: Methanerträge an unterschiedlichen Standorten

(Quelle: OECHSNER & LEMMER, 2002, 92 ff)

Der äußerst niedrige Methangehalt von 0,08 [m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/kg oTS] des Mähgutes aus dem Naturschutzgebiet lässt sich mit erhöhtem Ligninanteil begründen. Dieser nimmt in den vegetativen Pflanzenteilen mit fortschreitendem Vegetationsstadium zu. Lignin ist wie im tierischen Verdauungstrakt auch in einer Biogasanlage unverdaulich (vgl. OECHSNER & LEMMER, 2002, 92 ff). Lignin stört zwar den Gärprozess nicht, beansprucht aber bei der technischen Umsetzung in eine Biogasanlage unnötig Platz (vgl. HARTMANN & KALTSCHMITT, 2001, 641).

Ligninhaltige Ernterückstände eignen sich sehr gut zur Biogaserzeugung, jedoch müssen sie durch geeignete Methoden vorbehandelt werden. Für schwer abbaubare Substrate eignet sich das so genannte Thermo–Druck–Hydrolyse Verfahren (TDH). Die Biomasse wird bei einem Druck von 20 bis 30 bar und einer Temperatur von 200 °C für einige Minuten vorbehandelt. Durch diese Methode kommt es zu einer Zerstörung der Struktur auf der morphologischen und molekularen Ebene. TDH kann in bestehende Biogasanlagen integriert werden (vgl. HOPFNER – SIXT, 2007, 63). Da dieses Verfahren technisch und energetisch sehr aufwendig ist, sollte vor dem Einsatz der TDH eine Wirtschaftlichkeitsanalyse durchgeführt werden.

Weitere Untersuchungen von Wiesengras und Feldfutter welche von AMON et al. durchgeführt wurden, liefern in Bezug auf Methanerträge, welche in Tab. 16 abgebildet sind folgende Ergebnisse:

Tab. 16 Inhaltsstoffe, Bruttoenergiegehalt und spezifische Methanausbeute der Klee gras- (KM), Feldfutter- (IM) und Dauererwiesenmischung (DM) verschiedener Reifestadien und

Variante n	XP % TM	XL % TM	XF % TM	XA % TM	NfE % TM	ADL % TM	GE MJ* kgTS <sup>-1</sup>	CEL % TM	H- CEL % TM	C % TM	C/N	TS % FM	oTS % FM	CH <sub>4</sub> -Ertrag NI CH <sub>4</sub> * kg/oTS <sup>-1</sup>
IM 1 <sup>1)</sup>														
Silage	17,93	7,54	33,08	13,51	27,94	36,35	16,28	43,38	6,4	46,42	8,9	10,06	8,7	370
IM 2 <sup>2)</sup>														
Silage	13,7	4,59	34,36	10,73	36,63	37,43	15,81	39,3	14,69	44,47	12	12,3	10,98	326
IM 3 <sup>3)</sup>														
Silage	13,61	3,87	32,41	8,65	41,47	36,61	15,94	40,51	13,87	46,39	14,1	15,64	14,29	297
KM 1														
Silage	18,09	6,62	32,52	12,43	30,34	33,09	15,96	36,16	15,5	45,33	9,9	9,08	7,95	390
KM 2														
Silage	14,22	3,4	35,79	9,88	36,71	38,33	16,04	43,06	17,07	45,05	11,1	12,08	10,89	326
KM 3														
Silage	14,35	3,86	33,92	8,55	39,32	37,35	16,03	43,63	16,22	46,17	17,6	16,78	15,35	290
IM 2														
Frisch	15,94	3,8	24,2	8,12	47,94	27,63	15,83	29,52	18,9	45,17	18,4	19,34	17,77	237
DW 2														
Frisch	18,92	3,12	26,34	11,88	39,74	31,97	15,78	35,67	12,41	44,69	9,3	9,78	8,62	246
IM 2 Heu	12,53	2,46	27,84	7,39	49,77	30,24	16,14	34,29	16,85	45,16	79,1	87,6	81,14	267
KM 2 Heu	11,59	2,07	32,13	6,94	47,28	35,59	12,99	40,77	13,77	45	82,2	89,5	83,28	280

<sup>1</sup> Vegetationsstadium: Vor dem Ähren-Rispenschieben; <sup>2</sup> in der Blüte; <sup>3</sup> Ende der Blüte

Versuchsbedingungen: Gärversuchssystem (Batch), Fermentergröße 1l, Gärtage 58, Gärtemperatur 38°C

(Quelle: AMON et al., 2003, 44f)

Bei der Mischung IM handelt es sich um eine Feldfutter-Intensivmischung für milde und mittlere Lagen, für zwei bis drei Hauptnutzungsjahre. Der Kleeanteil dieser Mischung liegt bei 20 % und der Grasanteil bei 80 %. Die Mischung KM ist eine mittelintensive Klee grassmischung für zwei bis drei Hauptnutzungsjahre in trockenen Lagen für mittlere Bewirtschaftung. Sie setzt sich aus 45 % Klee und 55 % Gras zusammen. Bei der Mischung DW handelt es sich um eine

Dauerwiesenmischung, der Kleeanteil liegt zwischen 15 und 20 % und die der Gräser zwischen 80 und 85 % (vgl. KRAUTZER et al., 2008, 11ff)

Wie aus der oben angeführten Tab. 16 ersichtlich, wird der spezifische Methanertrag der Klee grasintensivmischung (KM) und der Feldfutterintensivmischung (IM) am stärksten durch die Vegetationsentwicklung der Pflanzenbestände zum Zeitpunkt der Ernte bestimmt. Der höchste Methanertrag wurde bei der Variante „Intensivmischung“, im Vegetationsstadium vor dem Ährenrispenschieben erreicht. Ersichtlich ist auch, dass der Erntezeitpunkt vor allem den Gehalt an Rohprotein (XP), Rohfett (XF) sowie an N-freien Extraktstoffen (NfE) in den Gärrohstoffen beeinflusst. Aus den Werten lässt sich auch ablesen, dass sich eine Silierung stark positiv auf den Methanertrag auswirkt (vgl. AMON et al., 2004, 46 ff).

Silierte Pflanzen zeigen im Vergleich zu grünen, nicht silierten Pflanzen ein deutlich höheres Methanbildungsvermögen. Es ist wahrscheinlich, dass durch die Vergärung für die Methanogenese wichtige Vorläufersubstrate wie z.B. Milchsäure, Essigsäure oder auch Propionsäure gebildet werden. Dadurch steigt das Methanbildungsvermögen der Biomasse (vgl. AMON, 2003, 44 ff). In Tab. 17 sind weitere „Biogas und Methanerträge von Grünland“ aufgezeigt. Diese Ergebnisse stammen aus unterschiedlichen Literaturquellen:

Tab. 17 Biogas und Methanerträge aus Grünland

Energiepflanzen	Biogasertrag [l <sub>N</sub> * kg oTS <sup>-1</sup> ]	Methanertrag [l <sub>N</sub> * kg oTS <sup>-1</sup> ] Methan- gehalt [%]	Methode	Quelle
Weidelgräser <sup>1)</sup> Leguminosen <sup>1)</sup> andere Gräser <sup>2)</sup> Grasfrischmasse <sup>3)</sup> Grassilagen <sup>3)</sup> Heu <sup>3)</sup>	477 – 846 390 – 714 443 – 711 k.A. k.A. k.A.	198 – 443 198 – 363 208 – 381 200 – 400 225 – 423 206 – 224	Weihen- stephaner Batch System	KAISER & GRONAUER, 2007, 7 ff
Heu <sup>4)</sup> Klee (Blüte) Klee (vegetativ) <sup>4)</sup>	k.A. k.A. k.A.	270 – 320 140 140 - 210	Batch Versuch	KAPARAJU et al, 2002, 275 ff
Weidelgrasfrischmasse Weidelgrassilage Knautgrasfrischmasse Knautgrassilage	830 860 720 650	- - - -	Batch Versuch	MÄHNERT et al, 2005, 4 ff
Kleegrassilage	k.A.	382	Hohen- heimer Biogas- ertragstest	MUKENGELE et al, 2006, 27
Kleegrassilage Kleegrasheu Gras – frisch <sup>5)</sup> Gras – trocken <sup>5)</sup> Rasen – Grünschnitt Rasen – Golfplatz Feldfutter – frisch Feldfutter – Silage Feldfutter - Heu	482 414 145 143 207 457 335 477 399	69,4 67,5 57 56,1 49 56,9 70,7 69,4 67,1	Labor- versuch	KTBL, 2005, 11

<sup>1)</sup>unterschiedliche Sorten

<sup>2)</sup>Löwenzahn, Wiesenrispe, Wiesenschwingel, Knautgras, Kleiner Bärenklau, Wiesenlieschgras, Wiesenfuchsschwanz

<sup>3)</sup>vom Allgäuer Alpenvorland, Bayrischer Wald u. Vorwald des Bayrischen Waldes

<sup>4)</sup>Partikelgröße 2.0, 1.0 und 0.5 cm

<sup>5)</sup>Gras von Landschaftspflege

Aus den Ergebnissen der oben angeführten Tabelle zeigt sich auch hier eine positive Wirkung der Silierung auf den Biogasertrag.

### 2.9.3 Methanhektarertrag von Grünlandbeständen

Der Methanhektarertrag wird als Produkt aus Biomasseertrag [oTS/ha] und der spezifischen Methanausbeute aus der Biomasse ermittelt.

Im Endbericht des Projektes „*Optimierung der Methanerzeugung aus Energiepflanzen mit dem Methanenergiewertsystem*“ wurden folgende Einflussfaktoren auf den Methanhektarertrag für Energiepflanzen angegeben:

- Biomasse pro Hektar
- Düngung
- Niederschlag bzw. Bewässerung
- Temperaturverlauf während der Vegetationsphase
- Alter und Reifegrad der Pflanze
- Erntezeitpunkt
- Qualität des Häckselgutes
- Konservierungsform des Erntegutes
- Vorbehandlung des Gärgutes
- Zusammensetzung der organischen Substanz
- Abbaugrad der organischen Substanz
- Verweildauer im Fermenter
- Spezifische Methanausbeute (vgl. AMON et al., 2006, 156).

Untersuchungen nach dem Weihenstephaner Batch System der Bayrischen Landesanstalt für Landwirtschaft zeigen bei den „Methanhektarerträgen, unterschiedlicher Grünlandnutzungen“ siehe auch Tab. 18 folgende Ergebnisse:



Tab. 18 Methanhektarerträge unterschiedlicher Grünlandvarianten

<b>Grünlandvariante/Gras-, Leguminosenart</b>	<b>Methanhektarertrag [m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/ha/a]</b>
<b>Gras - Silage</b> Allgäuer Alpenvorland, 5 Schnitte, mineral. Düngung (200 kg N/ha)	4462
<b>Gras - Frischmasse</b> Allgäuer Alpenvorland, 4 Schnitte, keine Düngung	1136
<b>2006, Weidelgras</b> (Sorte Stratos) – Frischmasse	2500
<b>Weidelgras</b> (Sorte Pirol) – Frischmasse	5600
<b>Weidelgras</b> (Sorte Weigra) - Silage	3000
<b>Weidelgras</b> (Sorte Pirol) - Silage	5800
<b>Leguminose</b> (Sorte Fee) – Frischmasse	1000
<b>Leguminose</b> (Sorte WKL Milkanova) - Frischmasse	3800
<b>Leguminose</b> (Sorte Fee) - Silage	1100
<b>Leguminose</b> (Sorte WKL Milkanova) - Silage	4000
<b>Wiesenrispe</b> (Sorte Oxford) – Frischmasse	3000
<b>Wiesenschwingel</b> (Sorte Hykor) – Frischmasse	5200
<b>Wiesenrispe</b> (Sorte Oxford) – Silage	2900
<b>Wiesenschwingel</b> (Sorte Hykor) – Silage	4800

(Quelle: Kaiser & Gronauer, 2007, 10)

Bei den Leguminosen liegt der Methanhektarertrag zwischen 1000 und 4000 [m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/ha/a]. Es zeigen sich geringere Schwankungen als bei den Weidelgräsern, bei diesen liegt der Methanhektarertrag zwischen 2500 und 5800 [m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/ha/a] (vgl. KAISER & GRONAUER, 2007, 10).

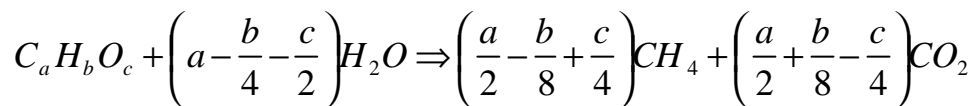
Nach AMON et al. (2004) verursachen Abweichungen vom optimalen Erntetermin durch zu späte Ernte eine Minderung im Methanhektarertrag bis zu 25 % (vgl. AMON et al., 2004, 21 ff).

## 2.10 Modelle zur Schätzung der Methanbildung aus Gärrohstoffen

In Bezug auf die Analyseapparaturen ist die Feststellung des Methanbildungsvermögens von Energiepflanzen im Labor einerseits sehr kostspielig und andererseits sehr arbeits- und zeitaufwendig. Um das Methanbildungsvermögen auch anhand der Inhaltstoffe abschätzen zu können, gelang es einigen Wissenschaftlern, näherungsweise Gleichungen für das Methanbildungsvermögen von Substraten aufzustellen (vgl. MINIHUBER, 2006, 30).

### Gleichung nach BUSWELL und MÜLLER (1952)

BUSWELL und MÜLLER haben eine Formel ausgearbeitet, nach der die Zusammensetzung des Biogases aufgrund der chemischen Zusammensetzung des Grundstoffes bestimmt werden kann.



Abbaureaktion nach BUSWELL und MÜLLER

Diese Werte sind theoretisch, es handelt sich um das maximal erreichbare Biogaspotential. Der Methangehalt sollte jedoch nicht abgeschätzt, sondern gemessen werden, da sich dieser im Verlauf der Zeit ändert (vgl. VDI, 2006, 53).

### Gleichung nach BOYLE (1976)

BOYLE erweiterte die Gleichung von BUSWELL um die stickstoff- (N) und schwefelhaltigen (S) Substanzen, um proteinreiche Substrate besser bewerten zu können. Eine genaue Beschreibung der Gleichungen findet sich in Kapitel 4.5.5.

### Anaerobic Digestion Model Nr. 1 (AMD1)

Das AMD1 ist ein mathematisches Simulationsmodell, welches entwickelt wurde, um die Nettoenergieproduktion bei der Vergärung von flüssigem Wirtschaftsdünger und Energiepflanzen berechnen zu können. Dieses Modell simuliert den Prozess der biochemischen Umsetzung bei der anaeroben Vergärung (vgl. LÜBKEN et al., 2007, 4085 ff).

Methanenergiewertmodell (MEWM)

Das Methanenergiewertmodell wurde entwickelt, um das spezifische Methanbildungsvermögen der Energiepflanzen anhand ihrer Nährstoffzusammensetzung bestimmen zu können. Die Methanproduktion organischer Substanzen wird primär durch die Zusammensetzung ihrer Rohnährstoffe wie z.B. dem Rohprotein, dem Rohfett, der Rohfaser und den stickstofffreien Extraktstoffen bestimmt. Diese werden zu Methan und Kohlendioxid abgebaut. Die Gleichung des Methanenergiewertmodells sieht folgendermaßen aus:

$$\begin{aligned} \text{MEW [l}_N \text{ CH}_4 \text{ * kg oTS}^{-1}] &= x_1 \text{ * Rohprotein (XP) (Gehalt in \% der Trockenmasse)} \\ &+ x_2 \text{ * Rohfett (XL)} \\ &+ x_3 \text{ * Rohfaser (XF)} \\ &+ x_4 \text{ * N- freie Extraktstoffe (XX)} \end{aligned}$$

Das MEWM hilft die Biogasproduktion zu optimieren in dem der Methanertrag der organischen Substanzen berechnet wird, des Weiteren wird der Bedarf an Nährstoffen für die Mikroorganismen, welche für die anaerobe Vergärung verantwortlich sind geschätzt (vgl. AMON et al., 2006, 3209).

Für nahezu alle Pflanzenarten, die sich für die Biogaserzeugung eignen, liegen bereits umfangreiche Datenbanken zum Gehalt an Rohprotein, Rohfett, Rohfaser und N-freien Extraktstoffen vor. Bislang werden die Daten zur Optimierung der Nährstoffversorgung von landwirtschaftlichen Nutztieren verwendet. Diese Datenbanken können in vollem Umfang auch zur Bestimmung des Methanenergiewertes bei der anaeroben Vergärung der Pflanzenbiomasse herangezogen werden. Darüber hinaus wird mit Hilfe eines neuen Methanenergiewertmodells eine exakte Berechnung der energetischen Leistung von Biogasanlagen in Abhängigkeit der verfügbaren Biomasse möglich (vgl. AMON et al., 2006, 47 f).

KRYVORUCHKO (2005) erstellte bereits ein Methanenergiewertmodell für Gras. Die „Regressionskoeffizienten der Schätzgleichung für Gras“ sind in Tab. 19 dargestellt. Sie geben den Beitrag der einzelnen Rohnährstoffe zur Methanbildung des Grases an. Das Regressionsmodell ist höchst signifikant, die einzelnen Parameter aber sind nicht signifikant. Laut KRYVORUCHKO muss aber das MEWM für Grünland noch verbessert werden.

Tab. 19 Parameter der Regressionsgleichung zur Berechnung des Methanenergiewertes von Gras anhand seiner Rohnährstoffe

<b>Inhaltsstoff</b>	<b>Regressionskoeffizient (x)</b>	<b>Signifikanz</b>
Rohprotein	2,19	0,602
Rohfett	31,38	0,017
Rohfaser	1,48	0,457
N- freie Extraktstoffe	1,85	0,217
Qualitätsparameter der Gesamtgleichung: R <sup>2</sup> =0,935 ; F-Wert = 126,976 ; Durbin-Watson- Wert = 0,804 ; Signifikanzniveau = 0,000 ;n = 40		

(Quelle: KRYVORUCHKO et al., 2005, 4)

Des Weiteren wurden noch zwei weitere Methanenergiewertmodelle am Institut für Landtechnik entwickelt, die genaue Beschreibung dieser Modelle erfolgt im Kapitel 4.5.7.

### 3 Problem- und Zielstellung

Durch die steigenden Energiepreise, den steigenden Energiebedarf, der Endlichkeit fossiler Energieträger als auch der Klima und Umweltproblematik gewinnen Nachwachsende Rohstoffe zunehmend an Bedeutung.

Durch die Biogaserzeugung werden nicht nur treibhausrelevante Emissionen reduziert sondern sie stellt auch ein Potential zur Produktion von Energie dar.

Laut Angaben der Statistik Austria reduzierte sich die Anzahl der Land- und Forstwirtschaftlichen Betriebe vom Jahr 1990 bis zum Jahr 2005, von 281.910 auf 189.591 Betriebe in Österreich. Im Zuge der Betriebsreduktion, kam es auch zu einer Abnahme der Rinderzahl. Von 1995 bis zum Jahr 2005 reduzierte sich die Anzahl der Rinder von 2.324.000 auf 2.003.000 Mio. Durch die Abnahme der Rinderanzahl könnte für Grünlandbauern eine Vergärung von Grünlandbiomasse ein interessanter Punkt sein.

Da in Österreich die Grünlandwirtschaft aufgrund der klein strukturierten Landwirtschaft dominiert und die Grünlandbiomasse zunehmend auch für die energetische Nutzung in Form von erneuerbarer Energie an Bedeutung gewinnt, wird in dieser Arbeit die Methanausbeute von Grünlandbiomasse bei unterschiedlichen Standorten, Nutzungsintensitäten und Ernteverfahren anhand der Nährstoffzusammensetzung untersucht.

Das Ziel einer wirtschaftlichen Biogaserzeugung ist:

- Die Mikroorganismen im Fermenter optimal mit Nährstoffen zu versorgen, um eine hohe Methanausbeute und gute Biogasqualität zu erreichen.
- Den Gärverlauf so zu gestalten, um einen hohen Methanertrag und einen bestmöglichen energetischen Wirkungsgrad zu erzielen.
- Den Gärrückstand als hochwertigen Dünger zu verwerten.
- Möglichst hohe Methanhektarerträge zu erreichen. Für diese ist es aber notwendig die standorttypischen Einflüsse, die Art der Nutzungsintensität, die Höhe der Ertragsfaktoren wie Biomasse pro Hektar und die spezifische Methanausbeute aus der Grünlandbiomasse zu kennen.

Es werden in der vorliegenden Arbeit die Methanhektarerträge für typische österreichische Grünlandstandorte in Tallagen, und höheren Lagen des Ennstales abhängig von der Nutzungsintensität und des Ernteverfahrens ermittelt.

Unter anderem kann sich die Art des Konservierungsverfahrens (Frischgut, Anwelkgut bzw. Heubereitung) auf den Ertragsfaktor der spezifischen Methanausbeute auswirken. Daher wird auch die Wirkung der unterschiedlichen Konservierungsverfahren auf die spezifische Methanausbeute untersucht.

Auf Basis bereits bestehender Untersuchungen wird das Methanenergiewertmodell für Grünlandbiomasse weiterentwickelt. Es soll in der Praxis zur a priori Bestimmung des Methanbildungsvermögens von Grünlandbiomasse in Abhängigkeit deren Nährstoffzusammensetzung eingesetzt werden.

Um den Untersuchungsaufwand für die Bestimmung des Methanbildungsvermögens längerfristig zu reduzieren, wird im experimentellen Teil die Beuteltechnik, eine methodische Neuentwicklung des Institutes für Landtechnik an der Universität für Bodenkultur, zur Bestimmung des Methanbildungsvermögens vergleichend zum Eudiometer Batch Gärtest nach VDI 4630 eingesetzt.

## 4 Material und Methoden

In diesem Kapitel werden der Versuchsstandort sowie die Versuchsdurchführung dargestellt. Für die Bestimmung der spezifischen Methanausbeute wird der Versuchsaufbau im Labor unter Verwendung der Eudiometeranlage sowie der Beuteltechnik beschrieben. Weiteres wird die statistische Berechnungsgrundlage für die Ermittlung des Methangehaltes der Grünlandbiomasse anhand der Nährstoffanalysen und Biomasserträge aufgezeigt.

### 4.1 Standortbeschreibung (Klima, Bewirtschaftung)

Die Forschungsergebnisse beziehen sich auf die Wiesengrasstandorte Admont - Buchau (extensiv genutzte Fläche) und Gumpenstein - Irdning (intensiver genutzte Fläche) im steirischen Ennstal. Diese stellen für die alpenländische Landwirtschaft in Österreich typische Grünlandstandorte dar. In Abb. 7 wird die genaue geographische Lage beider Versuchsstandorte aufgezeigt:



Abbildung 7: Geographische Lage der Versuchsstandorte  
(Quelle: <http://www.vacanteaustria.ro.>)

### 4.1.1 Klima und Bewirtschaftung des intensiv genutzten Standortes

In Abb. 8 sind die monatlichen Durchschnittstemperaturen und Niederschlagsmengen des intensiver genutzten Standortes in Gumpenstein aus dem Versuchsjahre 2007 aufgezeigt.

Die Wetterdaten für die intensiver genutzte Versuchsfläche stammen von der Wetterstation in Gumpenstein. Während des Zeitraumes von 14. Mai bis 2. Oktober 2007 lag die durchschnittliche Temperatur bei 14,3 °C. Im Juli erreichte die Temperatur ihr Maximum von 18,25 °C, das Minimum lag bei 7,53 °C im Oktober. Die Niederschlagsmenge betrug von Mai bis Oktober in Summe 850,7 l/m<sup>2</sup>. Mit 207,1 l/m<sup>2</sup> war der September am niederschlagreichsten, im Gegensatz dazu betrug der Niederschlag im April nur 12,2 l/m<sup>2</sup>. Die gesamte Jahresniederschlagsmenge im Jahr 2007 betrug 1267,7 l/m<sup>2</sup> (vgl. ZAMG, 2007, s.p.).

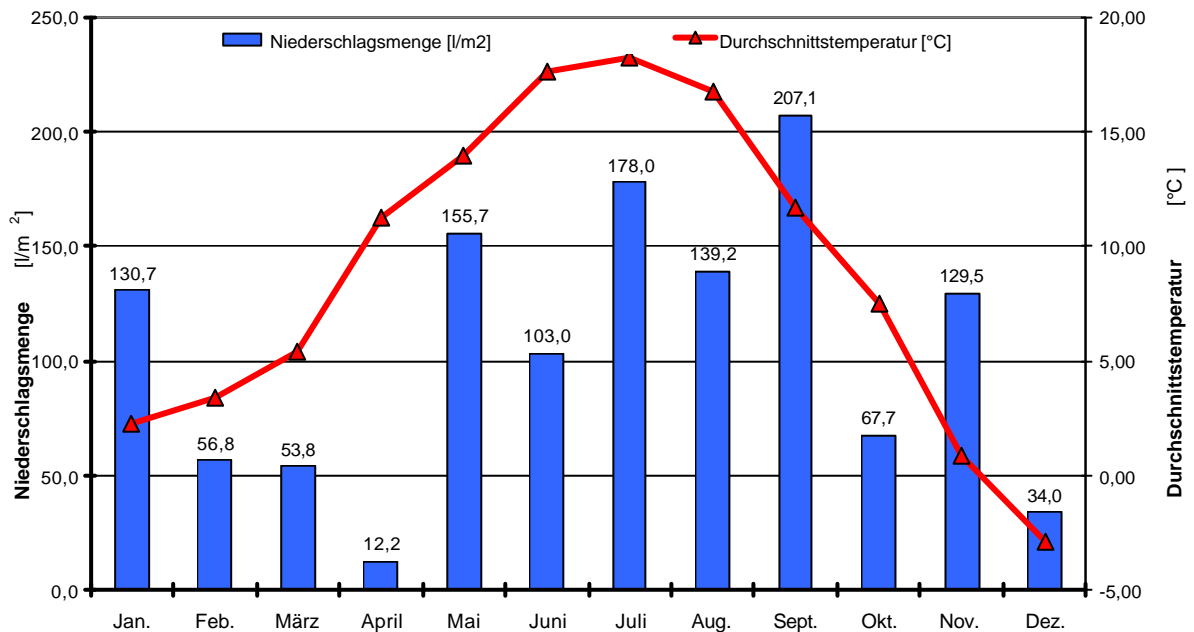


Abbildung 8: Klimadiagramm des intensiv genutzten Standortes Gumpenstein (Quelle: eigene Darstellung nach Werten der ZAMG, 2007, s.p.)



Die Versuchsfläche (siehe auch Abb. 28 im Anhang) der intensiveren Dreischnittwiese weist eine Fläche von 633,27 m<sup>2</sup> auf und besteht aus zwölf Parzellen mit je einer Erntefläche von 11,65 m<sup>2</sup>. Von jeder Parzelle gibt es vier Wiederholungen. Die Ernte des ersten Aufwuchses erfolgte am 30. Mai, jene des zweiten Aufwuchses am 23. Juli und die des dritten Aufwuchses am 1. Oktober 2007. Detaillierte Informationen über den Pflanzenbestand der intensiven Dreischnittwiese siehe Tab. 31 im Anhang. Eine Düngung der untersuchten Parzellen erfolgte nach jedem Schnitt mit verdünnter Gülle (Verhältnis 1 : 0,25).

Die Versuchsfläche der intensiven Vierschnittwiese (siehe Abb. 28 im Anhang) weist eine Fläche von 416,12 m<sup>2</sup> auf und besteht aus sieben Parzellen zu je einer Erntefläche von 11,56 m<sup>2</sup>. Von jeder Parzelle gibt es vier Wiederholungen. Die Ernte des ersten Aufwuchses der Vierschnittwiese erfolgte am 14. Mai, die des zweiten Aufwuchses am 25. Juni. Der dritte Aufwuchs wurde am 6. August und der vierte Aufwuchs wurde am 1. Oktober 2007 geerntet. Informationen über den Pflanzenbestand finden sich im Anhang in der Tab. 31. Eine Düngung der untersuchten Parzellen erfolgte nach jedem Schnitt, mit verdünnter Gülle (Verhältnis 1 : 0,25), zusätzlich wurden noch 50 kg N in Form von zwei Teilgaben mit je 25 kg gedüngt.

#### 4.1.2 Klima und Bewirtschaftung des extensiv genutzten Standortes

Die Klimadaten des extensiv genutzten Standortes Buchau, stammen von der Wetterstation in Admont. Admont liegt mit einer Seehöhe von 646 m, 244 hm unter der Buchau, welche sich auf einer Höhe von 890 m befindet.

Weiteres sind in Abb. 9 die monatlichen Durchschnittstemperaturen und Niederschlagsmengen des extensiv genutzten Standortes in Buchau des Versuchsjahres 2007 aufgezeigt

Während des Zeitraumes von 29. Mai bis 30. Oktober lag die durchschnittliche Temperatur in Buchau bei 14,4 °C. Im Juli erreichte die Temperatur ihr Maximum von 18,31 °C, das Minimum lag bei 7,31°C im Oktober. Die Niederschlagsmenge betrug von Mai bis Oktober in Summe 654,7 l/m<sup>2</sup>. Mit 192,6 l/m<sup>2</sup> war der September am niederschlagreichsten, im Gegensatz dazu betrug der Niederschlag im April nur 9,8 l/m<sup>2</sup>. Die gesamte Jahresniederschlagsmenge betrug im Jahr 2007, 1127 l/m<sup>2</sup> (vgl. ZAMG, 2007, s.p.).

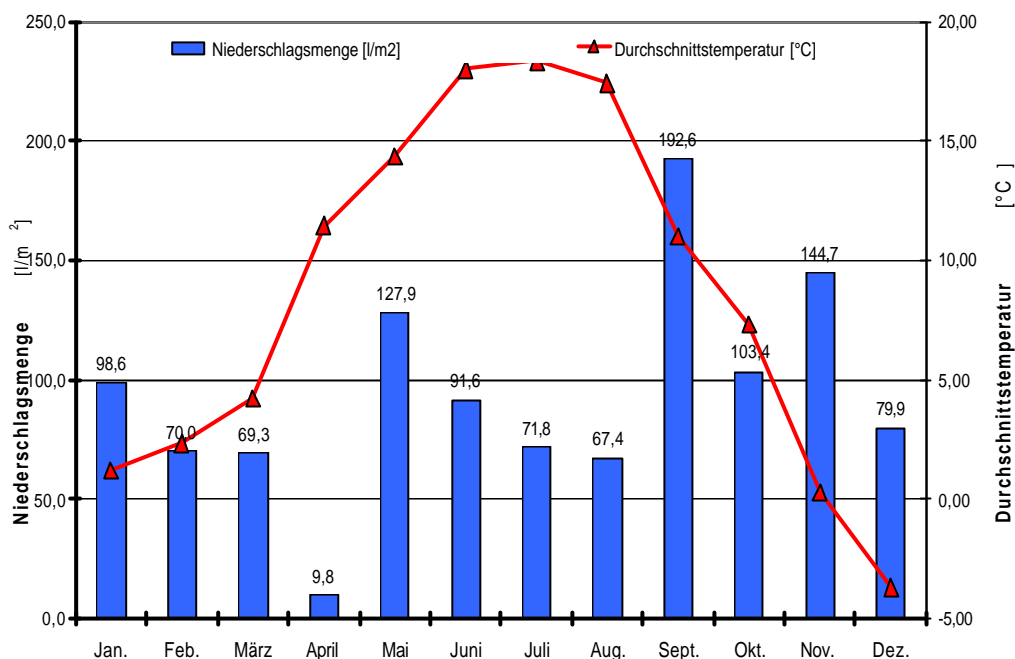


Abbildung 9: Klimadiagramm des extensiv genutzten Standortes Buchau (Quelle: eigene Darstellung nach Werten der ZAMG, 2007, s.p.)

Die Versuchsfläche des extensiven Standortes Buchau (siehe auch Abb. 29 im Anhang) weist eine Fläche von 144 m<sup>2</sup> auf. Sie besteht aus drei Parzellen mit einer Größe von je 16 m<sup>2</sup>. Von jeder Parzelle gibt es drei Wiederholungen. Die Ernten der Dreischnittflächen erfolgten am 29. Mai, 25. Juli und am 3. Oktober 2007, die der Zweischnittflächen am 19. Juni und am 3. Oktober 2007 und die der Einschnittfläche am 1. September 2007. Am Standort Buchau wurde vor jeder Mahd der Pflanzenbestand der einzelnen Parzellen bonitiert. Weiters wurden auch die Wuchshöhe und das Vegetationsstadium des Pflanzenbestandes bestimmt. Die Versuchsfläche wird einmal jährlich - im Herbst mit Stallmist gedüngt.

In Tab. 20 werden die wichtigsten Daten beider Wiesengrasversuchsstandorte zusammengefasst dargestellt. Die Standorte unterscheiden sich im Bodentyp, der Seehöhe, dem Jahresniederschlag und der durchschnittlichen Jahrestemperatur. Buchau liegt auf 890 m Seehöhe, 180 m über Gumpenstein. Am Standort Gumpenstein lag die jährliche Niederschlagsmenge im Jahr 2007 um 140,7 l/m<sup>2</sup> und die Jahresdurchschnittstemperatur um 0,3 °C höher als am Standort Buchau. An beiden Standorten wird kein Pflanzenschutz durchgeführt und die Nutzung erfolgt mehrjährig. Die Düngung des Standortes Buchau erfolgt einmal jährlich im Herbst mit Stallmist. Die Düngung der intensiven Dreischnittwiese (Variante 34) erfolgt nach jedem Schnitt mit Gülle 1 : 0,25. Auch die intensive Vierschnittwiese (Variante 43) wurde nach jedem Schnitt mit Gülle 1 : 0,25 und zusätzlich mit 50 kg N in zwei Teilgaben gedüngt.

Tab. 20 Übersicht der wichtigsten Daten der Standorte Buchau und Gumpenstein

Standort	See- höhe	Bodentyp	NS & Temp. im Jahres- durchschnitt (2007)	NS & Temp. der letzten 30 Jahren	Schnitt - nutzun- g	Anlage - jahr	Pflanzen- schutz	Düngung
Buchau	890 m	Braunlehm	1127 l/m <sup>2</sup> 8,5 °C	1399,9 l/m <sup>2</sup> 6,6 °C	eins, zwei und drei	ca. 1900	nein	Festmist
Gumpen- stein	710 m	Braunerde	1267,7 l/m <sup>2</sup> 8,8 °C	1014,1 l/m <sup>2</sup> 7 °C	drei und vier	2000	nein	Gülle u. N

(Quelle: ZAMG und mündliche Information durch Ing. Reinhard Resch)

## 4.2 Versuchsdurchführung - Arbeitsplan, Ernte & Probengewinnung

### 4.2.1 Arbeitsplan

Diese Varianten beider Grünlandversuche, GL-710 als intensiv genutzter Standort in Gumpenstein - Irdning und GL-750 als extensiv genutzter Standort in Admont - Buchau ergeben über die gesamte Vegetationsperiode 2007 verteilt insgesamt 13 Einzelaufwüchse. Der genaue Arbeitsplan der einzelnen Varianten mit ihren Schnittzeitpunkten und Art der Konservierung ist in Tab. 21 aufgezeigt:

Tab. 21 Arbeitsplan – Methanbildungspotential – Grassilage 2007

Termin	Versuch	Variante	Schnitt	Nasssilage 20-25 % TM Nr.	Anweilsilage 35 % TM Nr.	Gärheu 45-50 % TM Nr.
14.Mai <sup>1)</sup>	GL-710	43	1	3547 <sup>2)</sup>	3548	3549
30.Mai <sup>1)</sup>	GL-710	34	1	3538	3539	3540
25.Jun	GL-710	43	2	3550	3551	3552
23.Jul <sup>1)</sup>	GL-710	34	2	3541	3542	3543
06.Aug	GL-710	43	3	3553	3554	3555
01.Okt	GL-710	34	3	3544	3545	3546
01.Okt	GL-710	43	4	3556	3557	3558
29.Mai	GL-750	3	1	3529	3530	3531
19.Jun	GL-750	2	1	3523	3524	3525
25.Jul <sup>1)</sup>	GL-750	3	2	3532	3533	3534
03.Sep	GL-750	1	1	3520	3521	3522
03.Okt	GL-750	2	2	3526	3527	3528
03.Okt	GL-750	3	3	3535	3536	3537

(Quelle: eigene Darstellung nach Angaben von Doz. E.M. Pötsch, 2007)

<sup>1)</sup> eigene Mithilfe bei der Ernte.

<sup>2)</sup> Interne Probennummern

### 4.2.2 Ernte & Gewinnung der Proben

Die Flächen der einzelnen Varianten wurden zu den vorgegebenen Schnittzeitpunkten mit einem Motormäher, welcher eine Schnittbreite von 190 cm hat, geerntet. Siehe dazu Abb. 10 „Versuchsernte in Buchau (links) und Versuchsernte in Gumpenstein (rechts)“:



Abbildung 10: Versuchsernte in Buchau  
(Quelle: eigene Bilder)

&

Gumpenstein

Nach der Mahd wurde das Gewicht der Frischmasse der einzelnen Varianten mit der Feldwaage bestimmt (siehe Abb.11, Foto links). In weiterer Folge wurde das Erntegut mit einem Probenbohrer (siehe Abb. 11, Foto Mitte) auf eine Länge von ca. sieben cm geschnitten und beprobt (siehe Abb. 11, Foto rechts).



Abbildung 11: Gewicht  
(Quelle: eigene Bilder)

Zerkleinerung

Schnittlänge von 7 cm

Die 13 Aufwüchse der beiden Grundvarianten wurden in jeweils drei unterschiedlichen Anwelkstufen in Form von Nasssilage, mit einem TM-Gehalt von 20 bis 25 %, als Anwelksilage mit einem TM-Gehalt von 35 % und als Gärheu mit einem TM-Gehalt von 45 bis 50 % konserviert. Die TM wurde vor der Konservierung durch die Griff- und Wringprobe bestimmt. Diese Probe dient der groben praktischen Prüfung des TM-Gehaltes in der Silage.

Die Biomasse wurde, um bestmögliche Gärvoraussetzungen zu schaffen, in Einweckgläsern mit einem Füllvolumen von je zwei Litern manuell verdichtet und anschließend luftdicht verschlossen. Siehe Abb. 12, „Verdichten der Silage in Einweckgläser“ (Foto links). Weiteres wurden je Anwelkstufe drei Gläser mit 1 bis 2 kg Biomasse befüllt (Foto rechts). Für den Gärprozess wurden die Gläser kühl und dunkel in einem Keller gelagert.



Abbildung 12: Verdichten der Silage in Einweckgläser & konservierte Probe  
Bilder)

(Quelle: eigene

### 4.3 Aufbereitung der Grasproben

Nach dem Gärungsprozess wurden die konservierten Silagen von Gumpenstein in die Versuchsanstalt der Universität für Bodenkultur nach Groß Enzersdorf gebracht. Die silierte Biomasse wurde aus den Einweckgläsern genommen und mit der Labormühle, Mixer B400 (siehe Abb. 13, Foto links) auf eine Länge von 2 bis 3 cm (siehe Abb.13. Foto rechts) zermahlen. Die gemahlten Grassilageproben wurden anschließend im Trockenschrank bei einer Temperatur von 105 °C für 48 Stunden bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Durch Differenzwägung nach der Trocknung wurde der Trockensubstanzgehalt der Grassilagen ermittelt. Der Trockenmasseertrag je Hektar wurde aus dem Frischmasseertrag und den resultierenden Trockensubstanzgehalten der Grassilagen ermittelt.

Wie die Abb. 13. (rechtes Bild) zeigt, wurde die trockene Biomasse für die Weender-, Bombenkalorimeter- und Elementaranalyse auf eine Länge von 2 bis 3 mm gemahlen. Die Weender-Analyse wurde im Versuchslabor der Landwirtschaftskammer Niederösterreich, in Rosenau durchgeführt. Die Elementaranalyse vollzog sich im Mikroanalytischen Labor der Fakultät für Chemie, an der Universität Wien, während die Bombenkalorimeteranalyse an der Universität für Bodenkultur am Institut für Landtechnik durchgeführt wurde. Die übrigen Proben wurden für etwaige weitere Untersuchungen in Beutel mit dem Vacuumiergerät V 300 der Firma LA VA konserviert.



Abbildung 13: Labormühle Mixer B400  
(Quelle: eigene Bilder)



Gemahlene Probe für Analysen

#### 4.4 Versuchsaufbau im Labor

Die spezifische Methanausbeute der Gärrohstoffe wurde im Labor unter kontrollierten Gärbedingungen mit Hilfe von Eudiometern und der Beuteltechnik ermittelt. Als Inokulum diente eine Mischung aus aktivem Gärgut von zwei unterschiedlichen Biogasanlagen (Biogasanlage von Herrn DI J. Feigl und die Biogasanlage des Maschinenringes St. Margareten am Moos). Die Inputmaterialien auf dem Betrieb Feigl setzen sich vorwiegend aus Maissilage und Gemüseabfällen zusammen. Auf dem Betrieb in St. Margareten am Moos werden hauptsächlich Mais-, Sonnenblumen- und Grassilagen sowie Schweinegülle eingesetzt.

#### 4.4.1 Eudiometer Batch Test nach VDI 4630

Im Eudiometer wurden folgende Varianten zur Kontrolle in dreifacher Wiederholung angesetzt:

3529 → Ext.-3-1-NS

3530 → Ext.-3-1-AW

3544 → Int.-3-3-NS

3545 → Int.-3-3-AW

3546 → Int.-3-3-AW

Die Richtlinie VDI 4630 beschreibt die Regeln zur Beurteilung der Vergärbarkeit von organischen Stoffen und der notwendigen Ausrüstung der entsprechenden Versuchsanordnungen.

Ein Batch Test ist ein diskontinuierlicher Test, bei dem organische Substrate oder Co-Substrate unter definierten anaeroben Bedingungen einer Vergärung unterzogen werden (VDI - Richtlinie, 2006, 4 ff).

Um anaerobe Gärbedingungen zu schaffen, wurden die leeren Fermenter vor der Einwaage von Grassilage und Inokulum mit Stickstoff gefüllt. Danach wurden die Grassilagen in einem Verhältnis von 1:3 (Bezug TS zu Inokulum) und das Inokulum in die Fermenter eingewogen.

Zu Versuchsbeginn wurde der pH-Wert im Fermenterinhalt mittels Gaselektrode kontrolliert. Der Eudiometerversuch wurde am 22. November 2007 angesetzt, und nach 38 Tagen, am 27. Dezember 2007, nachdem kein Gas mehr gebildet wurde, abgesetzt.

Die Eudiometer-Messapparatur umfasst sechs Messzellen. Jede Messzelle besteht aus einem Reaktionsgefäß (Fermenter, 1000 ml Fassungsvermögen) und einem daran anschließenden Gassammelrohr. Das in den Fermentern gebildete Biogas wurde in einem Folienauffangbeutel gesammelt. Die Fermenter wurden in einem Wasserbad auf konstant 37,5 °C temperiert (Gärtemperatur). Mit Hilfe eines Magnetrührers wird der Fermenterinhalt in einem Intervall von 30 Minuten für jeweils zehn Minuten lang durchgemischt. In folgender Abb. 14 ist eine Eudiometer-Messapparatur mit ihren sechs Messzellen und den Folienauffangbeutel abgebildet:



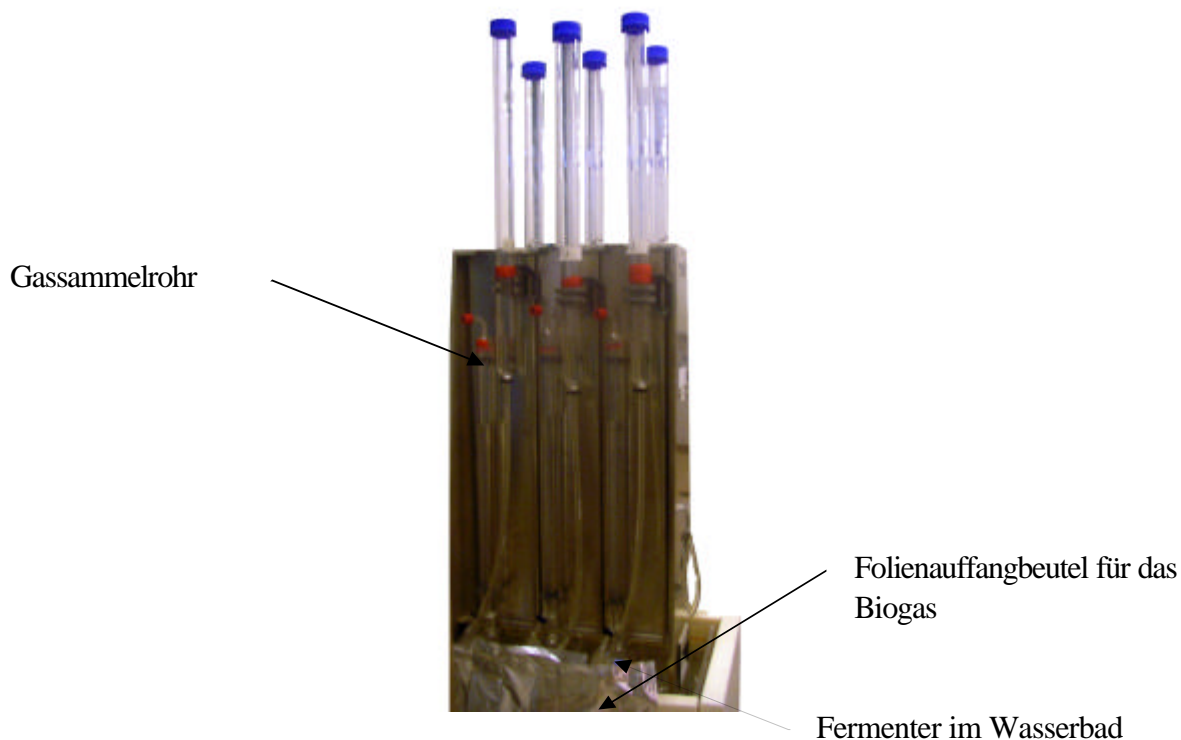


Abbildung 14: Eudiometer-Messapparatur (Quelle: eigene Bilder)

#### 4.4.2 Beuteltechnik

Die Beuteltechnik ist eine neue Methode für Batch-Versuche, sie wurde am Institut für Landtechnik an der Universität für Bodenkultur entwickelt. Erste vergleichende Untersuchungen mit dem Eudiometer Standardverfahren nach VDI 4630 sollen zeigen, ob diese neue Methode zu einem vereinfachten Standardverfahren zur Bestimmung des Gasbildungsvermögens aus Gärrohstoffen weiterentwickelt werden kann. Diese Technik wurde im Rahmen dieser Diplomarbeit erstmals unter Verwendung von Grassilage für die Bestimmung der Biogasproduktion eingesetzt und wissenschaftlich untersucht. Vergleichende Untersuchungen wurden bereits mit Hirse durchgeführt.

Die genaue Einwaage (siehe Abb. 15, Foto links) der gemahlene Grassilage und des Inokulums erfolgte im Verhältnis 1 : 3 (Bezug TS zu Inokulum).

Weiteres wurde die berechnete Menge an Biomasse und je 150 g Inokulum, in speziell, verschweißbare Foliensäcke mit einem Volumen von zwei Litern der Firma Caso im Anaerobschrank befüllt (siehe Abb. 15, Foto Mitte). Anschließend wurden die Beutel mit dem

Vacuumiergerät V 300 der Firma LA VA luftleer gemacht und verschweißt (siehe Abb. 15, Foto rechts). Jede Variante wurde in dreifacher Wiederholung angesetzt.

Zur Kontrolle wurden jeweils 11 Beutel mit Cellulose und Inokulum, und 11 nur mit Inokulum befüllt. Nachdem die Beutel am 22. November 2007 verschweißt wurden, kamen sie für 38 Tage, bis 27. Dezember 2007, in den Temperaturschrank, welcher eine kontinuierliche Temperatur von 38 °C aufweist (siehe Abb. 16, Foto rechts und Foto links). Alle drei Tage wurden die Beutel manuell leicht gerüttelt. In diesen 38 Tagen fanden die Vergärung der Biomasse und die Bildung von Biogas statt.

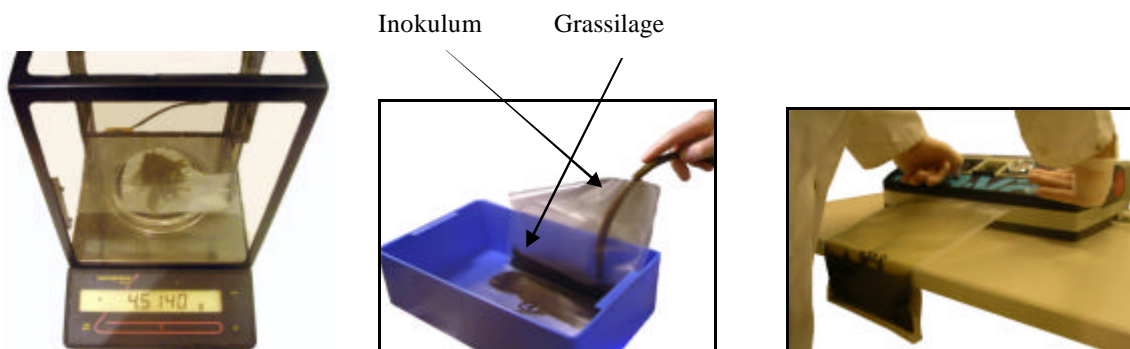


Abbildung 15: Einwaage  
(eigene Bilder)

Impfung der Beutel

Vacuumieren der Beutel (Quelle:

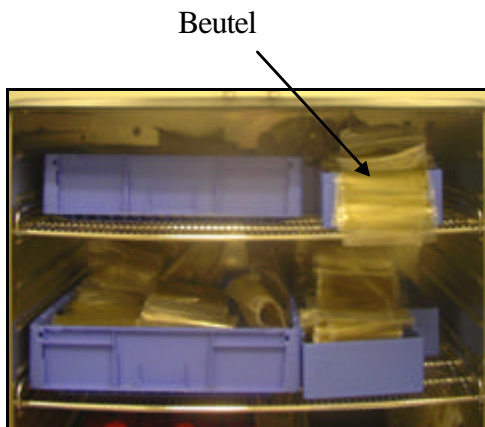


Abbildung 16: Beutel im Schrank  
(Quelle: eigene Bilder)



Temperatur

## 4.5 Analyse & Auswertung

Zur Bestimmung der Inhaltsstoffe wurden eine einfache Weender-Analyse, eine Elementaranalyse sowie eine Energiewertbestimmung mit dem Bombenkalorimeter durchgeführt.

Für die Bestimmung der Methanausbeute der Grassilagen wurde bei diesen Untersuchungen einerseits das Methanenergiewertmodell (MEWM) für Gras verwendet. Andererseits wurde die Methanausbeute anhand der gemessenen Methankonzentration rechnerisch ermittelt. Alle Analysen und Auswertungen werden in weiterer Folge detailliert beschrieben:

### 4.5.1 Nährstoffanalyse nach Weender

Die Weender Futtermittelanalyse ist ein Standardverfahren zur Ermittlung der Inhaltsstoffe von Futtermitteln. Es wird nach Rohasche (XA), Rohfaser (XF), Rohprotein (XP), Rohfett (XL) und stickstofffreien Extraktstoffen (NfE) unterschieden. Die Ergebnisse sind meistens auf die Trockenmasse, seltener auf die Frischmasse bezogen. HENNEBERG und STOHMANN entwickelten bereits 1864 die heute noch geltenden Weender-Methoden (vgl. NN. 2007, s.p.).

In Abb. 17 ist die Einteilung der Nährstoffe aufgezeigt, welche sich aus der Weender Futtermittelanalyse ergibt (vgl. KIRCHGEBNER M. 1997, 21ff):

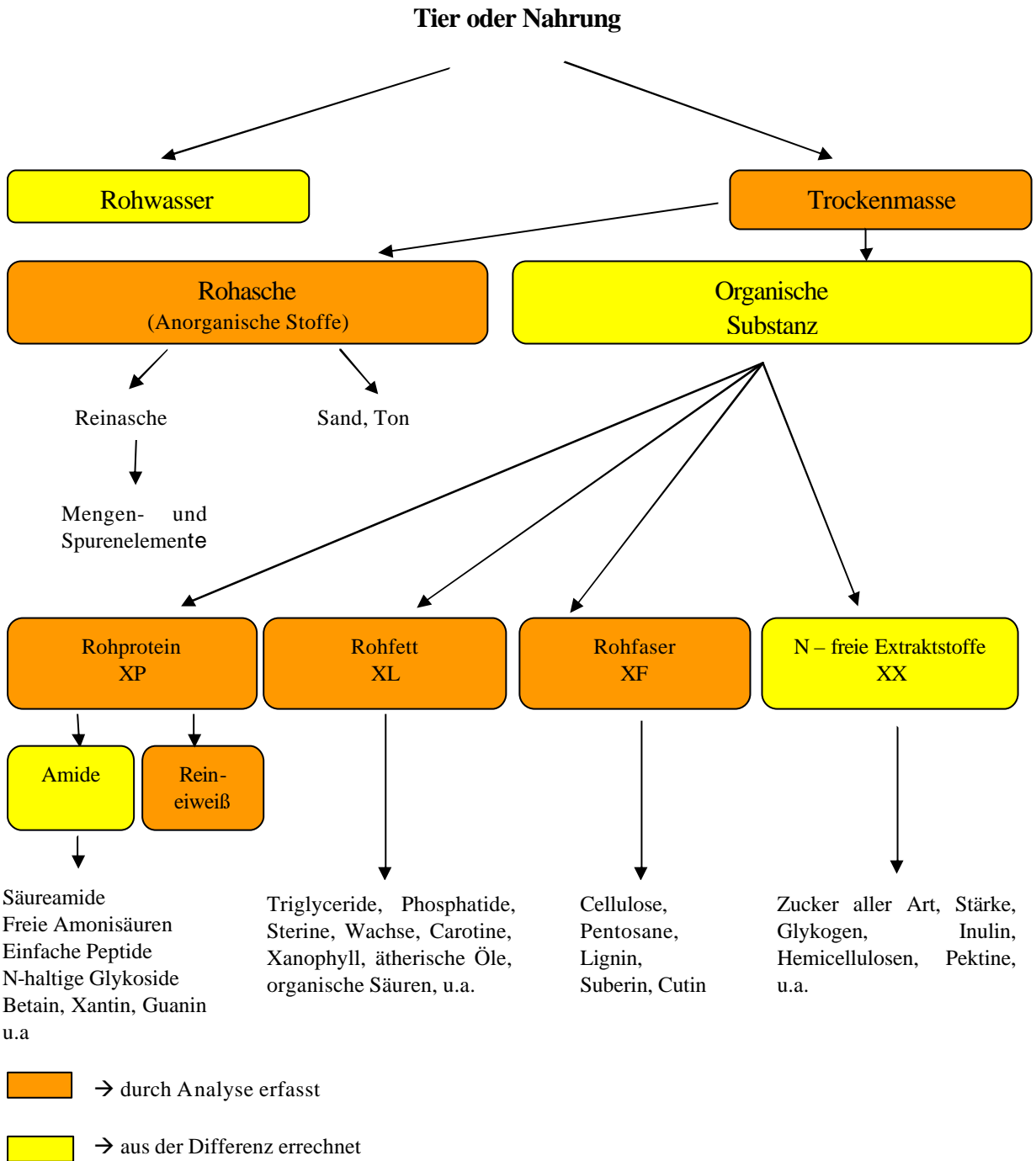


Abbildung 17: Chemische Zusammensetzung von Tier und Nahrung (Quelle: KIRCHGEBNER M. 1997, 21ff, eigene Darstellung)

### 4.5.2 Elementaranalyse

Die Bestimmung von C/H/N erfolgte mit Hilfe eines 2400 CHN Elemental Analyzer von Perkin Elmer (vgl. THEINER J. 2007).

### 4.5.3 Analyse des Energiewertes mit dem Bombenkalorimeter

Für eine Berechnung des Methanbildungspotentials mit dem MEWM ist der Energiewert der Grassilagen von Bedeutung. Dieser wurde mit dem Bombenkalorimeter IKA C200 der Firma MÜLLER und SCHERR an der Universität für Bodenkultur am Institut für Landtechnik ermittelt. Im Bombenkalorimeter wird der Brennwert der Grassilagen unter Sauerstoffatmosphäre und hohem Druck (30 bar) bestimmt.

### 4.5.4 Analyse der Methankonzentration und des Gasnormvolumens

#### 4.5.4.1 Eudiometer

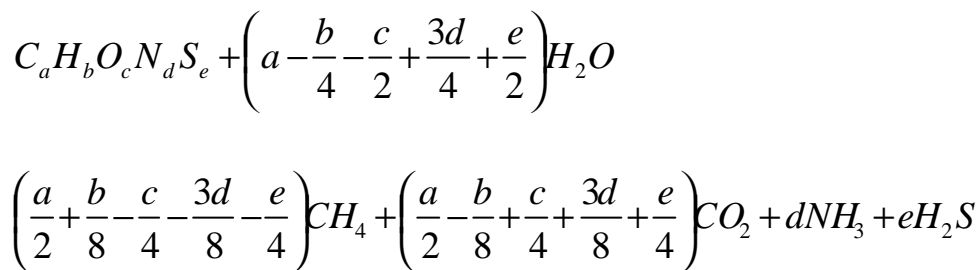
Im Verlauf des Versuches wurde die gebildete Biogasmenge regelmäßig alle zwei bis vier Tage abgelesen und dokumentiert. Die gebildeten Gase wurden erstmals bei einem Grasgärversuch im Folienauffangbeutel gesammelt. Am Ende des Gärversuches wurden die gebildeten Gase mit dem Gaschromatographen Multiple Gas Analyzer 2, SRI 8610C der Firma SCHAMBECK analysiert. Vor der Messung und auch zwischen den Messungen wurden Messungen mit dem Prüfgas (60 % CH<sub>4</sub> und 40 % CO<sub>2</sub>) durchgeführt.

#### 4.5.4.2 Beutel

Die Konzentrationen der Gase CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S und H<sub>2</sub> wurde am Ende des Versuches mit dem portablen Gasanalysator X-am 7000 der Firma DRÄGER (Genauigkeit der Messung ± 1 bis 3 %) vom Messwert) analysiert. Der Gasanalysator wurde vor Beginn der Messung mit dem Prüfgas (60 % CH<sub>4</sub> und 40 % CO<sub>2</sub>) kalibriert. Das Gasvolumen wurde mit dem Gastrommelzähler Type TG 05/5 der Firma RITTER bestimmt. Dieser wurde mit dem Gasanalysator verbunden, somit konnte auch gleichzeitig die Konzentrationsmessung der gebildeten Gase erfolgen. Von jeder Variante wurde zur Kontrolle mit einer Spritze (5 ml) Gas entnommen, dieses wurde wiederum zur Kontrolle mit dem Gaschromatographen gemessen.

### 4.5.5 Auswertung des Methanertrages nach Buswell und Boyle

BUSWELL (1936) und BOYLE (1977) haben eine Formel ausgearbeitet, nach der die Zusammensetzung des Biogases aufgrund der chemischen Zusammensetzung des Grundstoffes bestimmt werden kann (vgl. BRENN et al, 2006, 5 ff). Diese Formel beschreibt die Umwandlung organischer Substanz im wässrigen Milieu in  $\text{CH}_4$  und  $\text{CO}_2$  sowie in  $\text{NH}_3$  und  $\text{H}_2\text{S}$ , sofern im Ausgangsstoff N und S enthalten waren. Über das Molvolumen lässt sich damit wieder die erzeugte Gasmenge aus der umgesetzten organischen Trockensubstanz ermitteln (vgl. LANGHANS, 1997, 31). In weiterer Folge ist die Gleichung nach BUSWELL und BOYLE dargestellt:



Gleichung nach Buswell und Boyle (vgl. VDI - 4630, 2006, 53).

Die Werte der Elementaranalyse waren in Gewichtsprozent angegeben, welche auf [% oTS] umgerechnet wurden. Um aber die [mol/kg oTS] zu ermitteln, welche für die Berechnung der theoretisch maximalen spezifischen CH<sub>4</sub>-Ausbeute relevant sind, wurde das jeweilige Element [% oTS] durch ihre Atommasse dividiert und dann mit 10 multipliziert. Diese Werte der einzelnen Elemente wurden dann in die Gleichung eingesetzt, und mit dem Faktor 22,4 multipliziert. Somit erhielt man die Ergebnisse für die theoretisch maximale spezifische Methanausbeute. In weiterer Folge wird die Berechnung am Beispiel der Variante Ext.1-1-NS dargestellt:

Tab. 22 Daten für die Berechnung nach BUSWELL (1936) & BOYLE (1977)

Ext.1-1-NS	w - %	% oTS	Atommasse	mol/kg oTS
C	42,11	46,84	12,01	<b>39,00</b>
H	5,64	6,27	1,01	<b>62,12</b>
N	1,86	2,07	14,01	<b>1,47</b>
S	0,19	0,21	21,07	<b>0,10</b>
O	40,10	44,61	16,00	<b>27,88</b>
oTS % von TS = <b>89,89</b>				

(Quelle: eigene Darstellung)

$$\text{theor.max. CH}_4 \text{ Ausbeute} \left( \frac{39,00}{2} + \frac{62,12}{8} + \frac{27,88}{4} - \frac{3 \cdot 1,47}{8} - \frac{0,10}{4} \right) * 22,4 = 441,73 [\text{ml/kg oTS}]$$

#### 4.5.6 Auswertung der gemessenen Methanerträge

Aufgrund von Versuchsproblemen mit der Beuteltechnik (atypisch hohe gemessene Methankonzentrationen und Biogasvolumina), mussten für die einzelnen Anwelkstufen beider Standorte Korrekturfaktoren für die weitere Auswertung des gemessenen Methans berechnet werden. Mögliche Ursachen für das Auftreten von Problemen könnten in der Durchmischungstechnik oder an der Lagerung der Beutel liegen. Diese Korrekturfaktoren wurden anhand der Kontrollvarianten, welche im Eudiometer angesetzt wurden, berechnet. In weiterer Folge wurden mit diesen Faktoren das Biogasvolumen und die spezifische Methanausbeute ermittelt. In Tab. 23 ist die „Berechnung der Korrekturfaktoren“ dargestellt:

Tab. 23 Berechnung der Korrekturfaktoren

Kontrollvariante im Eudiometer	Variante	gemessenes BG- Volumen im Eudiometer [ml]	Mittelwert [ml]	theor. BG- Volumen nach Buswell [ml/kg oTS]	Korrekturfaktor		
					NS	AW	GH
Ext.3-1 <sup>1)</sup> Nasssilage	3529 <sup>3)</sup>	642,1 638,0 479,6	586,57	935,54	<b>0,63</b>		
Ext.3-1 Anwelksilage	3530	637,4 614,9 496,3	582,87	934,84		<b>0,62</b>	
Ext. 3-1 Gärheu	3531	-	-	-			<b>0,53</b>
Int.3-3 <sup>2)</sup> Nasssilage	3544	676,9 640,4 651,9	656,40	958,71	<b>0,68</b>		
Int.3-3 Anwelksilage	3545	638,6 661,7	650,15	966,44		<b>0,67</b>	
Int.3-3 Gärheu	3546	418,9 609,6 485,6	504,70	875,31			<b>0,58</b>

(Quelle: eigene Darstellung)<sup>1)</sup> erster Schnitt der extensiver genutzten Dreischnittweise mit dem <sup>2)</sup> dritter Schnitt der intensiver genutzten Dreischnittweise <sup>3)</sup> interne Probennummer



#### 4.5.7 Auswertung des Methanertrages mit dem MEWM

Mit dem Methanenergiewertmodell (MEWM) wird der Einfluss einzelner Pflanzeninhaltsstoffe (Rohprotein, Rohfett, Rohfaser und N-freie Extraktstoffe) auf das Methanbildungsvermögen von Energiepflanzen bei der Biogaserzeugung bestimmt. Das spezifische Methanbildungsvermögen von Energiepflanzen steht im direkten Zusammenhang zur Inhaltsstoffzusammensetzung der Energiepflanzen. Es können dadurch Gleichungen zur Schätzung des Methanenergiewertes (MEW) einzelner Energiepflanzen kalkuliert werden (vgl. AMON et al., 2006, 11).

Diese Regressionsmodelle für das Gärheu und für die Nass- und Anwelksilage, welche mit Hilfe des Statistikprogrammes SAS für Windows Version 9.1.3 erstellt wurden werden dazu verwendet, das spezifische Methanbildungsvermögen von Grünlandfutter anhand seiner Rohnährstoffzusammensetzung berechnen zu können.

Für die Berechnung der spezifischen Methanausbeute mit dem MEWM wurde das Modell 1 verwendet. Es wurde mit den gemessenen Methanerträgen nach berechneter Korrektur und den Rohnährstoffen XP, XL, XF und XA aus der Elementaranalyse erstellt. Da die Methanausbeute bei der Nass- und Anwelksilage ähnlich hoch waren, wurde ein gemeinsames Modell für diese zwei Ernteverfahren erstellt. Für das Gärheu wurde ein eigenes Modell erstellt, da die Methanausbeuten wesentlich niedriger, als bei der Anwelk- und Nasssilage waren.

Aufgrund der zu wenigen Datenergebnisse beim Gärheu, schied für eine weitere Kalkulation zur Berechnung der Methanausbeute das MEWM 2 und das MEWM 3 aus. In Tab. 24 sind alle drei Methanenergiewertmodelle zusammengefasst dargestellt:

Tab. 24 Methanenergiewertmodelle für Grünlandfutter

MEWM	Formel
MEWM 1	$CH_4 [l_N/kg \text{ oTS}^{-1}] = x_1 * XL - x_2 * XP + x_3 * XF + x_4 * XA$
MEWM 2	$CH_4 [l_N/kg \text{ oTS}^{-1}] = -x_1 * XP + x_2 * XL - x_3 * ADL + x_4 * HCEL + x_5 * CEL + x_6 * STK + x_7 * ZUC$
MEWM 3	$CH_4 [l_N/kg \text{ oTS}^{-1}] = -x_1 * XA - x_2 * XP/BE - x_3 * XP/ADL + x_4 * XL/ADL - x_5 * HCEL/ADL + x_6 * CEL/ADL - x_7 * STK/ADL + x_8 * ZUC/ADL$

(Quelle: eigen Darstellung nach Angabe von FISTAROL LYSON, D.)

In Tab. 25 sind die Regressionskoeffizienten, die Signifikanz und die Anzahl der Varianten der Schätzgleichung für das Gärheu sowie für die Nass- und Anwelksilage dargestellt. Das Modell der Nass- und Anwelksilage ist hoch signifikant und das Modell des Gärheus ist nicht signifikant. Des Weiteren ist in Abb. 18 der Zusammenhang zwischen gemessenem und geschätztem spezifischen Methanertrag beider Ernteverfahren graphisch dargestellt:

Tab. 25 Parameter der Regressionsgleichungen zur Berechnung des Methanenergiewertes von Gärheu sowie von Nass- und Anwelksilage

Modell	Regressionsgleichung	n	R <sup>2</sup>	Signif.
MEWM 1 für GH	$CH_4 = 301,38 (\pm 97,74) - 0,44 XA (\pm 0,29) + 0,27 XP (\pm 0,25) + 0,16 XL (\pm 0,66) - 0,13 XF (\pm 0,20)$	13	0,5408	0,1402
MEWM 1 für NS & AW	$CH_4 = 257,77 (\pm 52,56) + 0,08 XA (\pm 0,11) - 0,26 XP (\pm 0,23) + 1,77 XL (\pm 0,29) + 0,03 XF (\pm 0,10)$	26	0,7296	<0,0001
Qualitätsparameter der Gesamtgleichung für das GH: Durbin- Watson- Wert= 1,304, F-Wert = 2,36. für die NS und AW: Durbin- Watson- Wert= 2,287, F-Wert = 14,16.				

(Quelle: eigene Darstellung, nach Angabe von FISTAROL LYSON, D.)

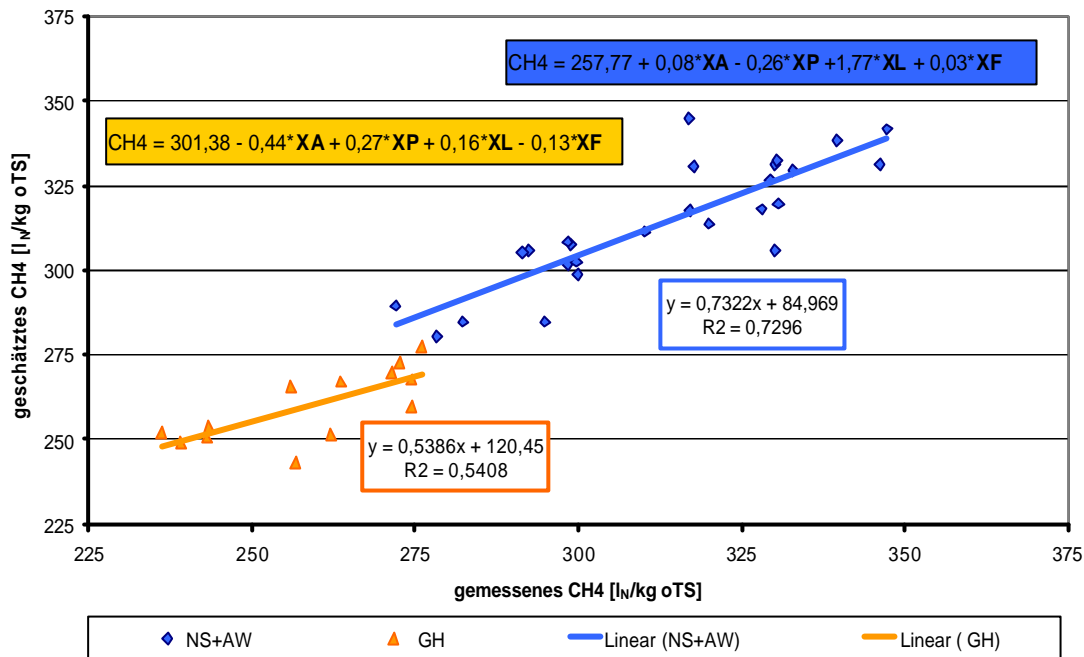


Abbildung 18: Zusammenhang zwischen gemessenem und geschätztem spezifischem Methanertrag der Konservierungsverfahren (Regressionsmodell 1)

## 4.6 Statistische Auswertung

Die Mittelwerte und Standardabweichungen, sofern vorhanden (je nach Datenbasis), sind in den Ergebnistabellen und Abbildungen angegeben. Die statistische Auswertung der Biomasseerträge und die der spezifischen Methanausbeute erfolgte mit Hilfe des Statistikprogramms SPSS Version 11.5.1. Das Modell zur Berechnung des Methanenergiewertes für Grünlandfutter wurde mit Hilfe einer multiplen, linearen Regressionsanalyse mit dem Statistikprogramm SAS ermittelt.

Zur Beschreibung der Zusammenhänge der Biomasseertragspotentiale zwischen dem intensiven und dem extensiven Standort wurde der T-Test, ein parametrischer Mittelwertvergleich von zwei unabhängigen Stichproben, angewendet.

Für die Beschreibung der Zusammenhänge der Biomasseertragspotentiale bei unterschiedlicher Nutzungsintensität am intensiven und am extensiven Standort wurde die einfaktorielle ANOVA (Varianzanalyse) mit dem Post Hoc Test, Scheffé-Prozedur angewendet. Diese statistischen Testverfahren wurden auch für die Beschreibung der Zusammenhänge zwischen den einzelnen Anweckstufen angewendet. Die Ergebnisse der statistischen Auswertungen sind im Anhang detailliert angeführt.

## 5 Ergebnisse. und Diskussion

Der Anbau und die Ernte von Grünlandfutter bzw. dessen Konservierung in Form von Silage sind sehr gut mechanisierbar und relativ unproblematisch. Je nach Witterung, Klimabedingungen und Düngungsintensität kann im Durchschnitt mit drei bis sieben Ernten pro Jahr gerechnet werden. Die Erntemenge an Grassilage, die letztlich für eine Verwertung in Biogasanlagen zur Verfügung steht, hängt von mehreren Faktoren ab, diese sind im Wesentlichen:

- Standort
- Bodenqualität
- Klimabedingungen
- Pflanzensoziologie des Grünlandstandortes
- Reifestadium der Pflanzen zum Erntezeitpunkt
- Art der Konservierung
- Pflanzenbestand
- Düngungsintensität
- Nutzungsfrequenz

### 5.1 Biomassebildungsvermögen - Einfluss des Standortes und der Nutzungsintensität

Wie bereits in Kapitel 4 beschrieben wurden von zwei Standorten insgesamt 13 Aufwüchse zu unterschiedlichen Terminen geerntet. Aufgrund der unterschiedlichen Standorte, Nutzungsintensitäten und Erntetermine ergaben sich verschiedene Biomasseerträge. Von der Biomasse wurden jeweils der Frischmasseertrag und der Trockenmasseertrag bestimmt. Um aber die Erträge mit jenen aus dem Vorjahr vergleichen zu können, werden diese bei den extensiven und den intensiven Flächen aus dem Jahr 2006 in den Abb. 20 und Abb. 21 aufgezeigt und in weiterer Folge auch beschrieben. Weiteres sind die Ergebnisse der statistischen Auswertung in der Tab. 26 zusammengefasst dargestellt:

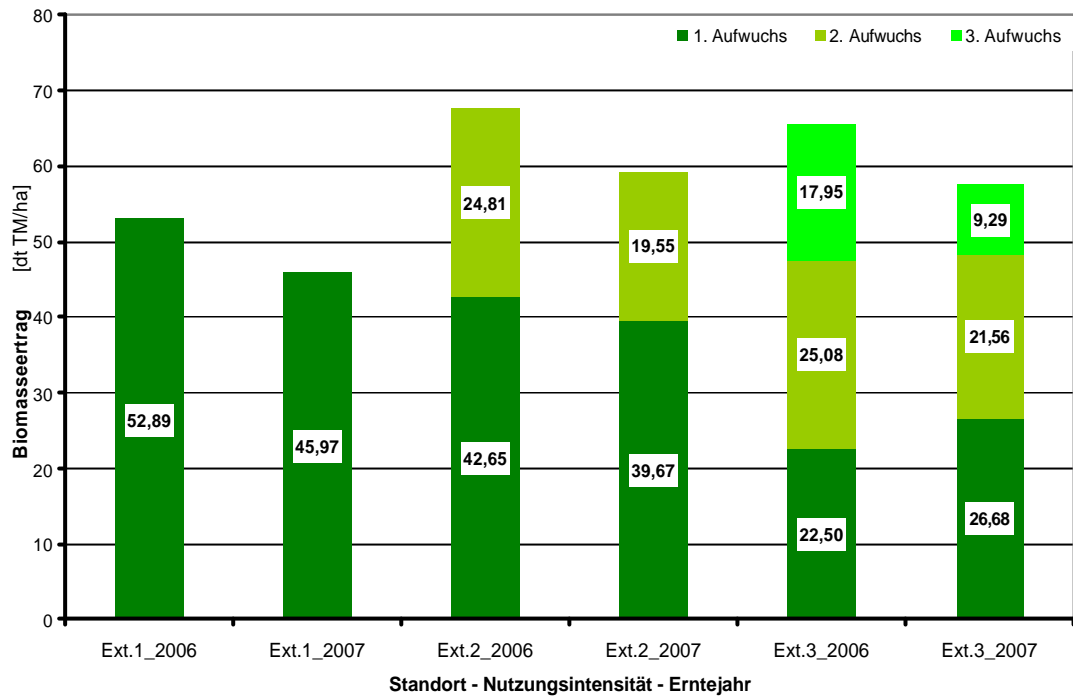


Abbildung 19: Biomasseerträge des extensiven Standortes im Jahr 2006 und 2007

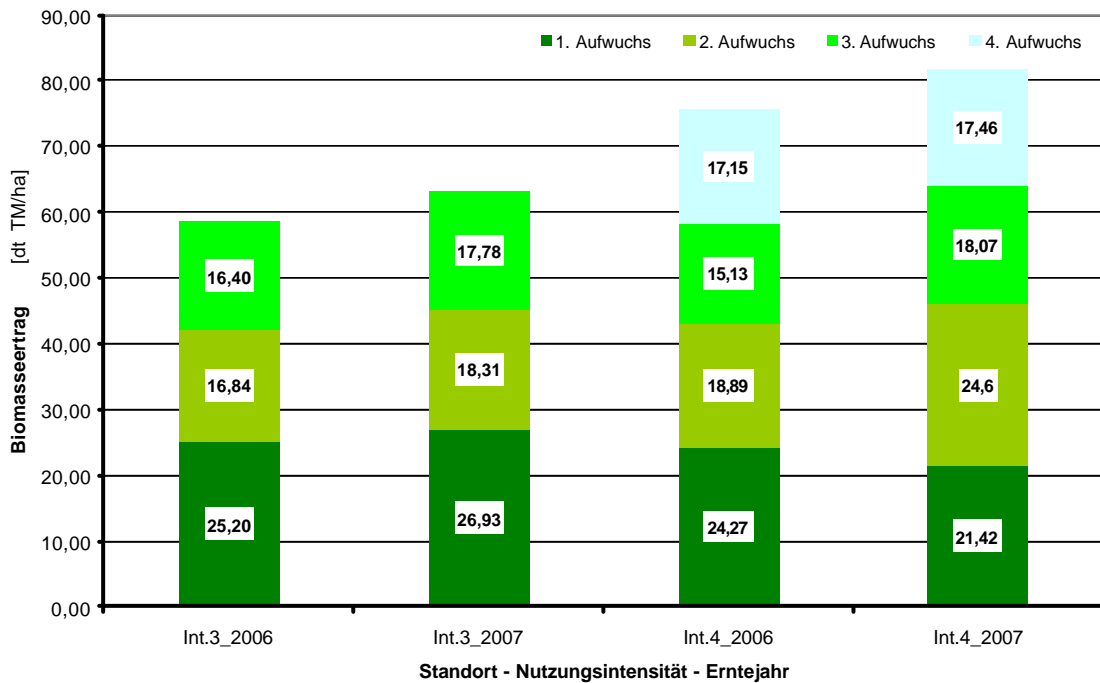


Abbildung 20: Biomasseerträge des intensiven Standortes im Jahr 2006 und 2007

Tab. 26 Zusammenfassung der statistischen Auswertung bezüglich Biomasseerträge

Analyse der Biomasseerträge	Test	N	MW	STBW	Signifikanz
zwischen int. u. ext. Standort	T- Test	9 (extensiv) 28 (intensiv)	54,24 70,96	2,499 2,551	0,291
am ext. Standort	Scheffe - Prozedur	3 (1-Schnittn.) 3 (2-Schnittn.) 3 (3-Schnittn.)	45,96 <sup>a</sup> 59,21 <sup>b</sup> 57,53 <sup>ab</sup>	-	-
am int. Standort	T- Test	12 (3-Schnittn.) 16 (4-Schnittn.)	63,02 81,56	7,89 11,79	0,476

n = Anzahl der untersuchten Varianten, MW = Mittelwert der Biomasseerträge; a, b Mittelwerte innerhalb einer Spalte mit unterschiedlichen Indices sind signifikant voneinander verschieden voneinander (P = 0,05; Scheffé-Prozedur)

### Extensiver Standort – Buchau

Bei den extensiven Flächen siehe Abb. 19 zeigt sich in Summe der höchste Gesamtbiomasseertrag von 59,22 dt/ha bei der Zweischnittwiese, gefolgt von der Dreischnittwiese mit 57,53 dt/ha und der Einschnittwiese mit 45,97 dt/ha. Der Unterschied zwischen Zwei- und Dreischnittflächen legt bei einem Mehrertrag der Zweischnittfläche von 1,69 dt/ha. Vergleicht man die Zweischnittfläche, welche den höchsten Gesamtertrag aufweist, mit der Einschnittfläche, welche den niedrigsten Gesamtertrag aufweist, liegt die Differenz bei 13,25 dt/ha.

Die höchsten Einzelerträge werden jeweils bei den ersten Schnitten mit 45,97 dt/ha bei Ext.1-1, 39,67 dt/ha bei Ext.2-1 und 26,68 dt/ha bei Ext.3-1 erzielt. Der dritte Schnitt der Fläche Ext.3-3 ist mit einem Ertrag von 9,29 dt/ha eher niedrig einzustufen.

Des Weiteren wurde anhand eines Post Hoc Testes (Scheffé-Prozedur) nach vorangegangener Varianzanalyse geprüft, ob sich die Biomasseerträge hinsichtlich der Nutzungsintensitäten signifikant unterscheiden. Das Ergebnis der statistischen Auswertung, siehe Tab. 26, zeigt, dass sich die Einschnitt- und die Zweischnittwiese bezüglich der Biomassejahreserträge signifikant voneinander unterscheiden. Zwischen Einschnitt- und Dreischnittwiese, sowie zwischen Dreischnitt- und Zweischnittwiese ergaben sich keine signifikanten Unterschiede.

Vergleicht man die Erträge aus dem Jahr 2007 mit den Erträgen aus dem Jahr 2006 (siehe auch folgende Abb. 20), zeigen sich bei allen drei Varianten höhere Biomasseerträge im Jahr 2006.

Eine mögliche Ursache könnte in der anderen Verteilung der Niederschläge und der Monatsmitteltemperatur im Jahr 2006 sein.

#### Intensiver Standort - Gumpenstein

Bei der intensiven Fläche siehe Abb. 21 zeigt sich in Summe der höchste Gesamtbiomasseertrag von 81,55 dt/ha bei der Vierschnittwiese, die Dreischnittwiese weist einen Gesamtbiomasseertrag von 63,02dt/ha auf.

Den höchsten Einzelertrag liefert der erste Schnitt der intensiven Dreischnittwiese mit 26,93 dt/ha, gefolgt vom zweiten Schnitt der intensiven Vierschnittwiese von mit 24,60 dt/ha. Der zweite Schnitt der Dreischnittfläche lieferte einen Ertrag von 18,31 dt/ha und der dritte Schnitt 17,78 dt/ha. Ähnlich hoch waren auch der dritte und der vierte Schnitt der Vierschnittfläche mit je 18,07 dt/ha beim dritten und 17,46 dt/ha beim vierten Schnitt.

Bei der statistischen Auswertung (siehe Tab. 26), bezüglich Biomasseerträge und der Nutzungsintensität am intensiven Standort, zeigt sich kein signifikanter Unterschied (Signifikanz von 0,476) zwischen Drei- und Vierschnittwiese.

Vergleicht man die Erträge aus dem Jahr 2007 mit den Erträgen aus dem Jahr 2006, siehe auch Abb. 21 zeigen sich im Jahr 2006 bei der Dreischnittwiese mit einem Jahresertrag von 58,44 dt/ha und bei der Vierschnittwiese mit einem Jahresertrag von 75,44 dt/ha jeweils niedrigere Erträge. Bei der Dreischnittwiese fiel der Ertrag im Jahr 2006 um 4,58 dt/ha niedriger und bei der Vierschnittwiese um 6,11 dt/ha niedriger als im Jahr 2007 aus.

Bei der statistischen Auswertung siehe Tab. 26 zeigt sich zwischen intensivem und extensivem Standort kein signifikanter Unterschied (Signifikanz von 0,291) bei den Biomassejahreserträgen.

Aus den vorliegenden Ergebnissen aus dem Jahr 2007 bezüglich Biomasseerträge von Wiesengras lassen sich in Hinblick auf eine standortangepasste optimale Nutzungsintensität folgende Punkte ableiten:

- Die optimale Nutzungsintensität am extensiven Standort Buchau ist eine Einschnitt- und Zweischnittnutzung, da der Biomasseertrag bei der Dreischnittwiese beim dritten Schnitt

bei 9,29 dt TM/ha liegt und in Summe der Jahresertrag der Dreischnittwiese um 1,69 dt/ha unter dem Jahresertrag der Zweischnittwiese liegt.

- Für den intensiven Standort wäre anhand der Ergebnisse der Biomasseerträge eine Vierschnittnutzung mit einem Jahresertrag von 81,55 dt/ha optimal, denn dieser liegt um 18,53 dt/ha über dem Jahresertrag der Dreischnittwiese.

## 5.2 Methanbildungsvermögen der Grünlandbiomasse

Ein gutes Methanbildungsvermögen mit einem hohen energetischen Wirkungsgrad setzt die richtige Nährstoffversorgung der Mikroorganismen im Fermenter der Biogasanlage voraus. Nachfolgend werden die Ergebnisse der Inhaltsstoffe, der spezifischen Methanausbeute und der Wirkungsgrad der Methangärung beschrieben.

### 5.2.1 Inhaltsstoffe des Erntematerials

In Tab. 27 sind die Ergebnisse der Nährstoffanalysen nach Weender, der Elementaranalyse, des Bruttoenergiewertes und die der Methanausbeuten beider Standorte mit ihren unterschiedlichen Konservierungsverfahren, welche mit dem MEWM 1 berechnet wurden, dargestellt

Bezüglich der Standorte zeigen sich in Summe bei allen Ergebnissen der Analysen (XF, XP, XL, BE, C, N, oTS) die höheren Werte beim intensiv genutzten Standort, mit Ausnahme der Rohasche, diese ist beim extensiv genutzten Standort höher.

In Bezug auf die Nutzungsintensität sinken der Rohfasergehalt (XF), die Bruttoenergie sowie die organische Trockensubstanz mit zunehmendem Aufwuchs. Die Anteile von Rohprotein (XP), Rohfett (XL), Rohasche (XA) sowie Kohlenstoff (C) und Stickstoff (N) nehmen mit zunehmender Schnitthäufigkeit zu. Diese Ergebnisse zeigen sich sowohl am extensiv als auch am intensiv genutzten Standort - mit einer Ausnahme, der intensiven Vierschnittwiese. Hier sind beim zweiten Schnitt der Rohfaseranteil und die Bruttoenergie höher als beim ersten Schnitt.



Tab. 27 Nährstoffanalysen und Methan ausbeute beider Standorte, aller Aufwüchse und Konservierungsverfahren

Variante	XF	XP	XL	XA	BE	C	H	N	S	O	oTS	oTS	CH <sub>4</sub> -Ausbeute
	[TS%]	[TS%]	[TS%]	[TS%]	[MJ/kg oTS]	[% oTS]	[% oTS]	[% oTS]	[% oTS]	[% oTS]	[% TS]	[%FM]	[l <sub>N</sub> /kg oTS]
Ext-1-1-NS	32,20	10,20	1,70	11,70	18,71	46,84	6,27	2,07	0,21	44,61	89,89	23,85	280
Ext-1-1-AW	32,80	10,10	2,00	10,10	19,20	48,79	6,54	1,84	0,18	42,65	90,49	34,02	285
Ext-1-1-GH	32,90	10,40	1,90	10,60	19,10	49,38	6,60	2,13	0,20	41,69	88,45	41,37	243
Ext-2-1-NS	33,10	10,10	3,30	9,80	17,85	48,91	6,47	2,02	0,16	42,44	90,96	21,64	308
Ext-2-1-AW	33,00	9,50	2,20	9,60	17,65	46,40	6,35	1,89	0,19	45,17	93,24	38,99	290
Ext-2-1-GH	33,30	8,70	2,50	7,20	17,88	47,67	6,47	1,73	0,12	44,01	92,99	49,10	254
Ext-2-2-NS	24,30	12,20	3,30	13,60	17,42	48,54	6,69	2,34	0,21	42,22	83,45	22,11	303
Ext-2-2-AW	28,70	12,10	3,10	11,10	17,92	49,32	6,62	2,34	0,20	41,52	87,12	30,51	299
Ext-2-2-GH	25,60	11,40	2,70	11,60	17,49	46,75	6,46	2,27	0,21	44,33	89,61	52,81	252
Ext-3-1-NS	31,85	11,50	3,30	12,60	17,92	48,05	6,52	2,34	0,18	42,90	90,39	16,08	306
Ext-3-1-AW	31,00	12,40	2,45	8,40	17,73	47,85	6,33	2,53	0,17	43,11	91,26	59,79	285
Ext-3-1-GH	36,70	11,90	1,40	8,90	17,09	47,24	6,43	2,29	0,18	43,86	91,48	70,94	249
Ext-3-2-NS	25,00	15,60	3,60	16,90	17,59	48,61	6,62	2,72	0,26	41,79	87,34	13,91	302
Ext-3-2-AW	24,30	14,80	4,10	11,70	17,83	49,27	6,62	2,99	0,25	40,87	88,36	27,51	309
Ext-3-2-GH	25,10	17,40	3,40	11,00	15,20	49,19	6,69	2,90	0,23	40,99	89,11	42,42	265
Ext-3-3-NS	20,40	15,30	3,90	16,00	17,19	51,21	7,21	3,33	0,32	37,93	78,69	19,46	306
Ext-3-3-AW	19,80	15,60	3,90	16,30	16,75	48,07	6,75	3,05	0,31	41,82	86,02	24,98	305
Ext-3-3-GH	19,90	14,70	3,20	15,70	16,65	49,46	6,95	2,88	0,27	40,44	83,47	41,34	251
Int-3-1-NS	32,60	9,60	3,90	7,50	17,97	47,97	6,61	2,17	0,20	43,06	93,25	18,86	318
Int-3-1-AW	32,70	9,70	3,60	6,80	18,39	47,69	6,59	1,88	0,17	43,67	93,70	61,36	312
Int-3-1-GH	33,10	9,00	2,50	6,10	17,95	48,45	6,61	1,98	0,16	42,79	93,82	76,54	260
Int-3-2-NS	30,40	13,00	5,70	9,70	18,59	50,42	7,04	2,34	0,32	39,89	88,27	20,77	342
Int-3-2-AW	31,40	12,40	5,10	9,40	18,43	49,64	6,80	2,35	0,27	40,95	91,02	27,99	333
Int-3-2-GH	29,00	12,00	4,50	8,20	18,45	47,49	6,43	2,25	0,22	43,61	91,59	49,43	267
Int-3-3-NS	23,95	13,25	4,95	16,65	18,31	48,77	6,94	2,88	0,28	41,12	83,66	16,10	331
Int-3-3-AW	23,35	13,35	4,75	15,25	18,43	49,19	6,98	2,90	0,26	40,68	84,38	28,21	327
Int-3-3-GH	24,85	12,60	3,75	13,30	18,21	44,83	6,40	2,30	0,23	46,24	91,70	45,40	251
Int-4-1-NS	28,00	13,60	4,60	7,30	19,45	49,01	6,75	2,76	0,14	41,34	94,12	21,54	318
Int-4-1-AW	29,40	14,00	4,40	7,20	19,75	48,50	6,80	2,71	0,17	41,83	92,61	35,56	314
Int-4-1-GH	28,90	13,70	3,80	6,70	19,61	48,89	6,58	2,64	0,16	41,74	93,38	48,36	277
Int-4-2-NS	35,70	12,00	4,80	11,40	19,93	50,43	6,97	2,11	0,21	40,28	88,62	17,62	331
Int-4-2-AW	34,10	12,90	4,40	9,30	19,57	49,41	6,91	2,46	0,21	41,01	89,77	28,18	320
Int-4-2-GH	30,50	13,80	4,10	8,10	19,64	47,96	6,70	2,59	0,18	42,57	91,96	50,01	270
Int-4-3-NS	29,40	15,50	6,20	11,20	19,09	47,77	6,73	2,82	0,26	42,42	89,68	15,07	345
Int-4-3-AW	27,60	15,00	5,40	10,10	19,34	48,05	6,87	2,74	0,23	42,11	90,25	34,67	331
Int-4-3-GH	26,90	14,50	4,80	9,20	19,29	47,80	6,83	2,64	0,21	42,51	90,79	55,07	273
Int-4-4-NS	26,10	15,90	5,70	16,40	18,70	49,75	7,01	3,06	0,29	39,90	84,41	16,97	338
Int-4-4-AW	26,10	15,60	5,30	13,30	19,13	49,49	7,02	2,96	0,26	40,26	85,32	22,73	329
Int-4-4-GH	24,60	15,20	4,10	11,20	19,19	6,90	2,82	0,23	42,12	42,12	87,89	49,01	268

Um die Unterschiede der Ergebnisse der Nährstoffanalysen bei den einzelnen Konservierungsverfahren besser zu veranschaulichen, wurde die Tab. 28 erstellt. Bei den Werten handelt es sich um Mittelwerte der einzelnen Anwelkstufen.

Tab. 28 Mittelwerte der Nährstoffanalysen und der Methanausbeute bei den unterschiedlichen Konservierungsverfahren.

	Einheit	Nasssilage	Anwelksilage	Gärheu
XF	[TS%]	28,69	28,79	28,57
XP	[TS%]	12,90	12,88	12,72
XL	[TS%]	4,23	3,90	3,28
XA	[TS%]	12,37	10,66	9,83
NFE	[TS%]	41,81	43,77	45,61
H-ZEL	[TS%]	16,15	16,46	20,77
ZEL	[TS%]	34,89	34,13	33,07
Stärke	[TS%]	0,46	0,38	0,25
Zucker	[TS%]	1,48	2,72	6,38
ADL	[TS%]	6,57	7,05	7,16
org. Rest	[TS%]	10,94	11,83	9,31
BE	[MJ/kg oTS]	18,36	18,47	18,13
C	[% oTS]	48,94	48,59	48,94
H	[% oTS]	6,76	6,71	6,62
N	[% oTS]	2,54	2,51	2,42
S	[% oTS]	0,23	0,22	0,20
O	[% oTS]	41,53	41,97	42,84
oTS	[% TS]	87,90	89,50	90,48
oTS	[% FM]	18,77	34,96	51,68
CH <sub>4</sub> -Ausbeute	[l <sub>N</sub> /kg oTS]	318	311	260

Bei der Nasssilage zeigen sich im Gegensatz zum Gärheu die höheren Werte bei der Rohfaser, dem Rohprotein, dem Rohfett, der Rohasche, der Zellulose und dem organischen Rest. Die niedrigeren Werte zeigen sich bei den stickstofffreien Extraktstoffen, der Hemizellulose, dem Zucker und dem Lignin (ADL). Die weniger hohe Methanausbeute beim Gärheu mit 260 [l<sub>N</sub>/kg oTS] könnte unter anderem an den höheren Werten bei Zucker und dem Lignin liegen. Lignin kann von den Mikroorganismen im Fermenter nicht verdaut werden. In der Literatur liefern die Kohlehydrate die niedrigsten Methanerträge, gefolgt von den Proteinen und dem Fett. (Siehe Kapitel 2.8, Tab. 14) Die Anwelksilagen liegen bei den Ergebnissen der Weender Analyse zwischen den Ergebnissen von Nasssilage und dem Gärheu, mit der Ausnahme des organischen Restes, hier zeigt sich der höchste Wert bei der Anwelksilage.

Bei den Ergebnissen der Energiewertbestimmung mit dem Bombenkalorimeter weisen die Anwelksilagen die höheren Werte auf, gefolgt von der Nasssilage und dem Gärheu.

Laut Ergebnissen der Elementaranalyse zeigen sich für Kohlenstoff, Wasserstoff, Stickstoff und Schwefel die höheren Werte bei der Nasssilage, gefolgt von der Anwelksilage und dem Gärheu. Bei Sauerstoff liefert das Gärheu, gefolgt von der Anwelksilage und der Nasssilage die höheren Werte.

### 5.2.2 Methanausbeute aus der Grünlandbiomasse

Weiteres werden die Methanausbeuten des extensiven Standortes (siehe Abb. 21) und intensiven Standortes (siehe Abb. 22) graphisch dargestellt und beschrieben. In der Tab. 26 sind die Ergebnisse der statistischen Analyse zusammengefasst dargestellt:

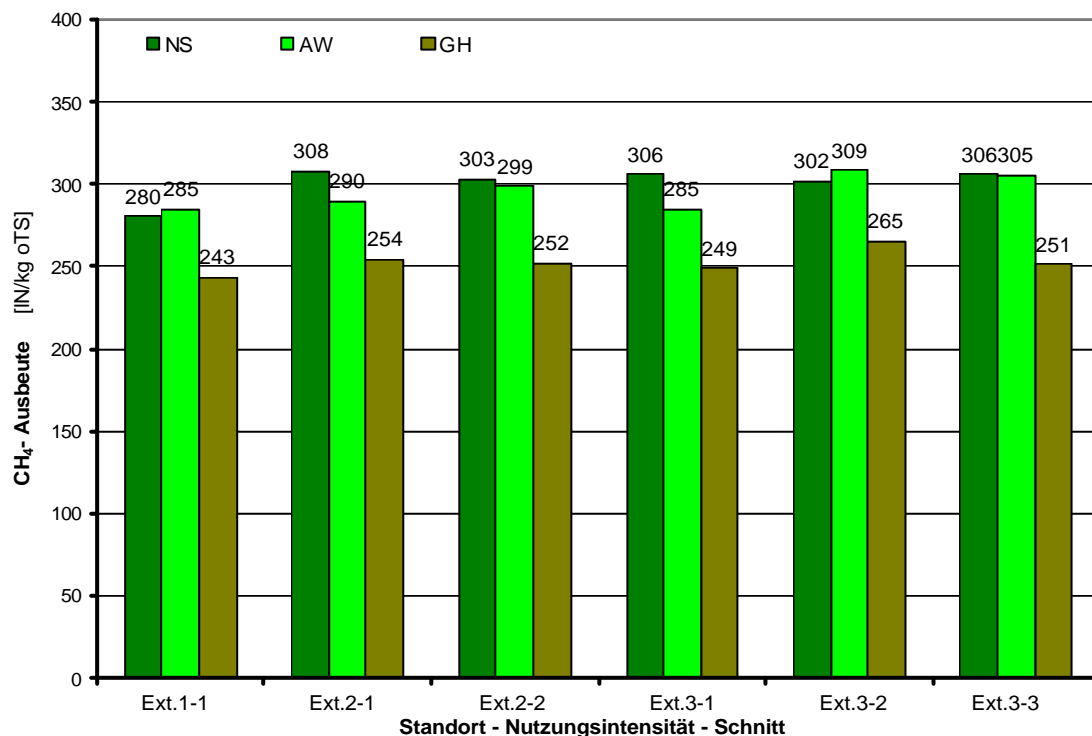


Abbildung 21: Spezifische Methanausbeute am extensiv genutzten Standort – Buchau

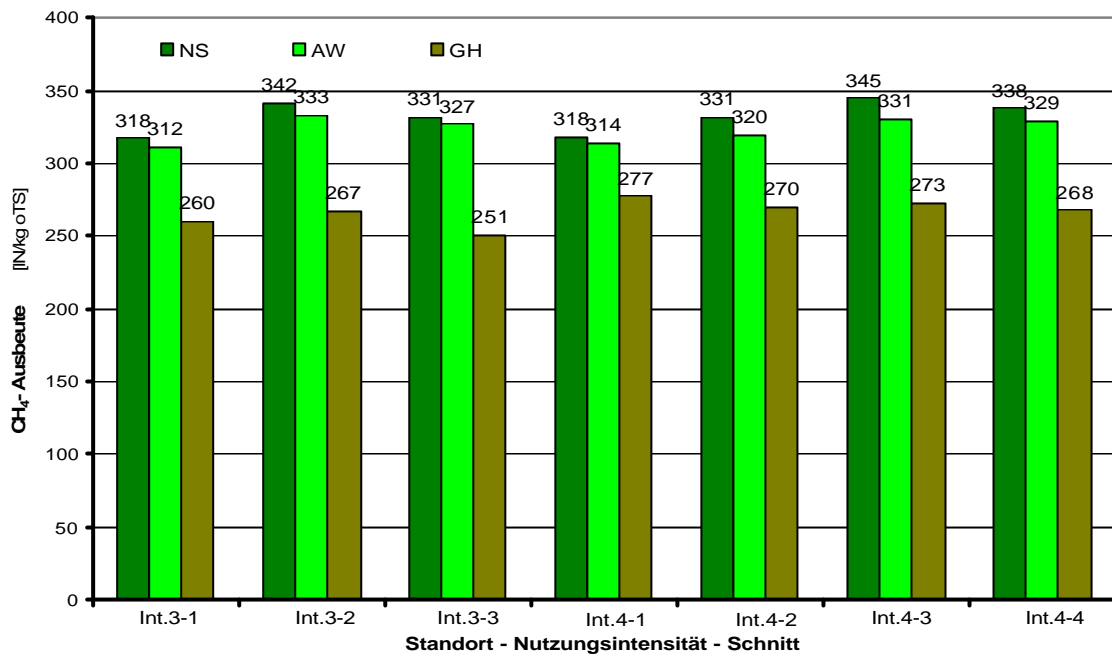


Abbildung 22: Spezifische Methanausbeute am intensiv genutzten Standort – Gumpenstein

Den höchsten spezifischen Methanertrag mit 345 [N/kg oTS] erreichte das Ernteverfahren der Nasssilage am intensiv genutzten Standort, nämlich beim dritten Schnitt der Vierschnittwiese. Am extensiv genutzten Standort Buchau lag die maximale Methanausbeute mit 308 [N/kg oTS] beim Ernteverfahren der Anwelksilage und zwar beim zweiten Schnitt der Dreischnittwiese. Die niedrigste Methanausbeute mit 243 [N/kg oTS] lieferte die Einschnittwiese, mit dem Ernteverfahren des Gärheus.

Bei der statistischen Analyse (Scheffé-Prozedur) ergab sich bezüglich des spezifischen Methanertrags auf beiden Standorten ein signifikanter Unterschied zwischen Gärheu und Nasssilage sowie zwischen Gärheu und Anwelksilage. Zwischen Anwelksilage und Nasssilage ergaben sich keine signifikanten Unterschiede.

Sowohl am extensiv als auch am intensiv genutzten Standort zeigt sich das beste Methanbildungspotential beim Ernteverfahren der Nasssilage, gefolgt von der Anwelksilage und dem Gärheu.

Aus diesen Ergebnissen lässt sich im Hinblick auf den optimalen Standort, die optimale Nutzungsintensität und das optimale Konservierungsverfahren folgendes ableiten:

- Die spezifische Methanausbeute von Einzelaufwüchsen ist am intensiven Standort höher als am extensiven Standort.
- Das Konservierungsverfahren der Nasssilage liefert die höchsten spezifischen Methanausbeuten, gefolgt von der Anwelksilage und dem Gärheu
- Zwischen den unterschiedlichen Aufwüchsen, d.h. ob es jetzt der erste, zweite, dritte oder vierte Aufwuchs auf einem Standort war, gab es keine großen Unterschiede bezüglich der Methanausbeute. Beispielsweise lag die Variationsbreite bei der extensiven Dreischnittwiese mit dem Konservierungsverfahren der Nasssilage zwischen 302 und 306 [ $\text{l}_\text{N}/\text{kg oTS}$ ]. Die Variationsbreite der intensiven Vierschnittwiese mit dem Konservierungsverfahren des Gärheus lag zwischen 277 und 268 [ $\text{l}_\text{N}/\text{kg oTS}$ ].

Tab. 29 Zusammenfassung der statistischen Auswertung bezüglich Methanausbeute

Analyse der CH <sub>4</sub> -Ausbeute	Test	n	MW	STBW	Signifikanz
zwischen int. u. ext. Standort <u>ohne</u> Berücksichtigung des Ernteverfahrens	T-Test	18 extensiv 19 intensiv	282,83 307,32	23,91 23,10	0,108
am ext. Standort <u>mit</u> Berücksichtigung des Ernteverfahrens	Scheffe- Prozedur	6 Gärheu 6 Anwelksilage 6 Nasssilage	252,45 <sup>a</sup> 295,28 <sup>b</sup> 300,74 <sup>b</sup>	-	-
am int. Standort <u>mit</u> Berücksichtigung des Ernteverfahrens	Scheffe - Prozedur	7 Gärheu 7 Anwelksilage 7 Nasssilage	266,48 <sup>a</sup> 323,57 <sup>b</sup> 331,92 <sup>b</sup>	-	-

n = Anzahl der untersuchten Varianten, MW = Mittelwert des spezifischen Methanertrages, a, b Mittelwerte innerhalb einer Spalte mit unterschiedlichen Indices sind signifikant verschieden voneinander (P = 0,05; Scheffé-Prozedur)

### 5.2.3 Energetischer Wirkungsgrad (?)

Die Ausnutzung der Energie lässt sich bei der Methanbildung anhand des energetischen Wirkungsgrades (?) kalkulieren. Dabei wird berechnet, wie viel von der Bruttoenergie in tatsächliche Methanenergie umgewandelt wird. Der energetische Wirkungsgrad wird durch folgende Formel berechnet:

$$h = \frac{CH_4 * 100}{BE} [\%]$$

$\eta$  = energetischer Wirkungsgrad (%)  
 $CH_4$  = Methanenergie im gebildeten Biogas (kJ)  
 $BE$  = Bruttoenergie der Grassilagen (kJ)

Die Umsetzbarkeit der Energie bei den Grünlandproben liegt im Bereich von 15,9 [MJ/kg oTS] bei der Variante Ext.3-3-GH und 19,9 [MJ/kg oTS] bei der Variante Int.4-4-NS. Abb. 24 und Abb. 25 zeigen die Wirkungsgrade der Versuchsvarianten am extensiv und am intensiv genutzten Standort:

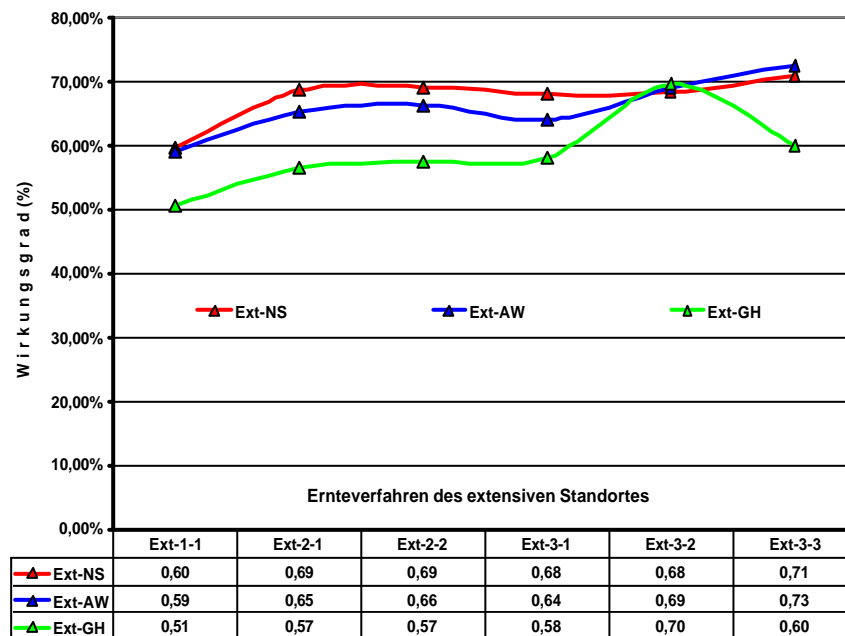


Abbildung 23: Energetischer Wirkungsgrad der Grünlandproben am extensiven Standort

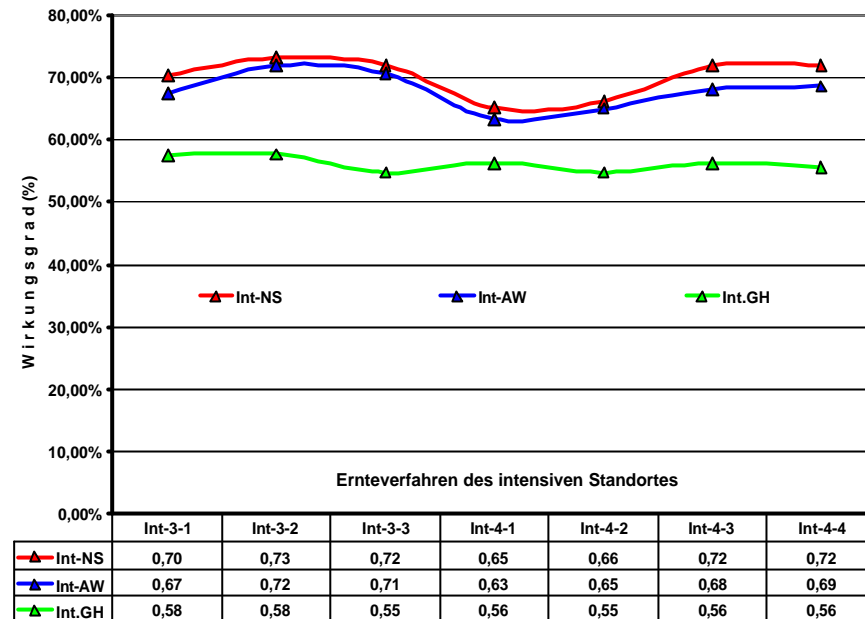


Abbildung 24: Energetischer Wirkungsgrad der Grünlandproben am intensiven Standort

Die untersuchten Proben des intensiven Standortes zeigen einen höheren energetischen Wirkungsgrad als die des extensiven Standortes.

Bezüglich Nutzungsintensität liefert am intensiven Standort die Dreischnittwiese höhere Wirkungsgrade als die Vierschnittwiese. Am extensiven Standort zeigen sich die besseren Wirkungsgrade bei der Dreischnittwiese, gefolgt von der Zweischnitt- und Einschnittwiese.

Bezüglich Ernteverfahren zeigen sich die höchsten Wirkungsgrade bei der Nasssilage, gefolgt von der Anwelksilage und dem Gärheu, dies gilt für beide Standorte. Aus diesen Ergebnissen lässt sich bezüglich dem energetischen Wirkungsgrad und der optimalen Nutzung eines Grünlandstandortes zusammenfassend folgendes ableiten:

- Die intensive Dreischnittwiese zeigt beim Konservierungsverfahren der Nasssilage die höchsten Wirkungsgrade.
- Im extensiven Bereich werden die höchsten Wirkungsgrade bei der Dreischnittwiese erreicht.
- Das optimale Konservierungsverfahren hinsichtlich des Wirkungsgrades ist jenes der Nasssilage.

### 5.3 Methanhektarertrag im Grünland

Einflussgrößen wie der Standort (Ungunstlage/Gunstlage, Boden, Wetter/Klima), das Düngungsniveau (extensiv/intensiv) die Nutzungsintensität (Ein-, Zwei-, Drei- oder Vierschnittnutzung) sowie das Konservierungsverfahren (Nass- oder Anwelksilage und Gärheu) wirken sich auf den Ertrag und die Qualität der Biomasse aus, was sich in weiterer Folge auch in der spezifischen Methanausbeute zeigt. Der Methanhektarertrag wird als Produkt des Biomasseertrages und des spezifischen Methanertrages ermittelt und in Normkubikmeter Methan/Fläche [ $\text{Nm}^3 \text{CH}_4/\text{ha}$ ] angegeben. Abb. 26 zeigt die Methanhektarerträge des extensiv genutzten Standortes in Buchau. Abb. 27 zeigt die Methanhektarerträge des intensiv genutzten Standortes in Gumpenstein.

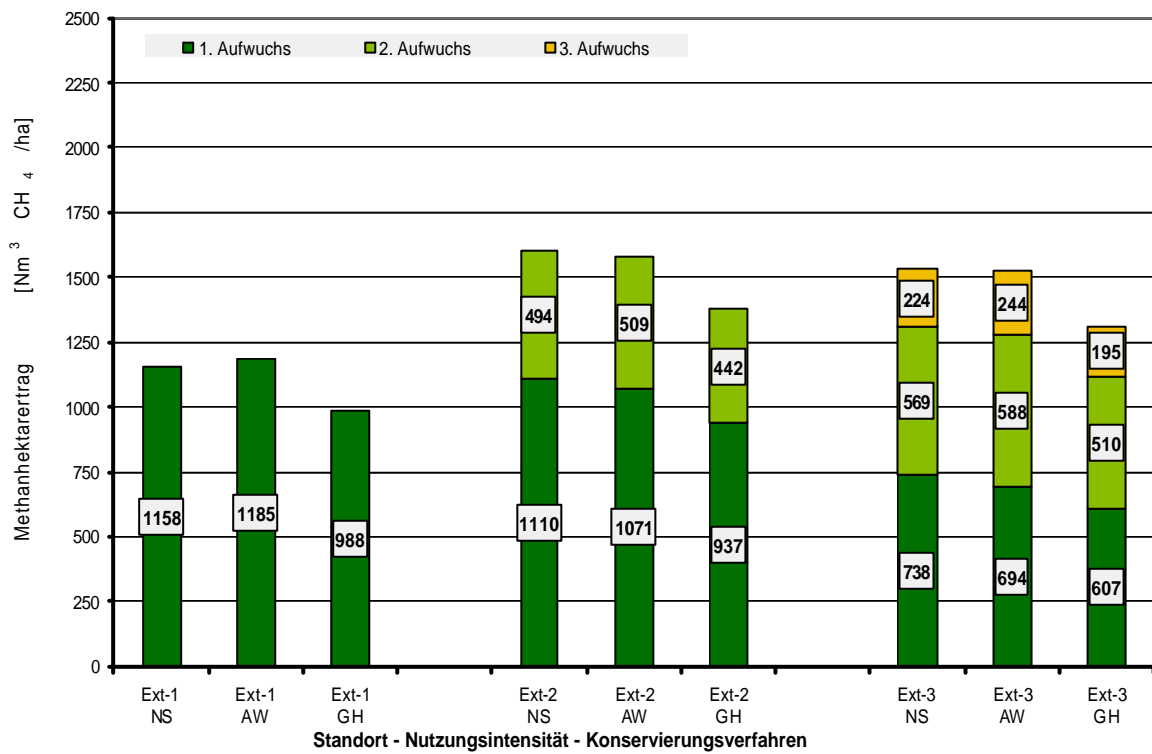


Abbildung 25: Methanhektarertrag am extensiven Standort – Buchau



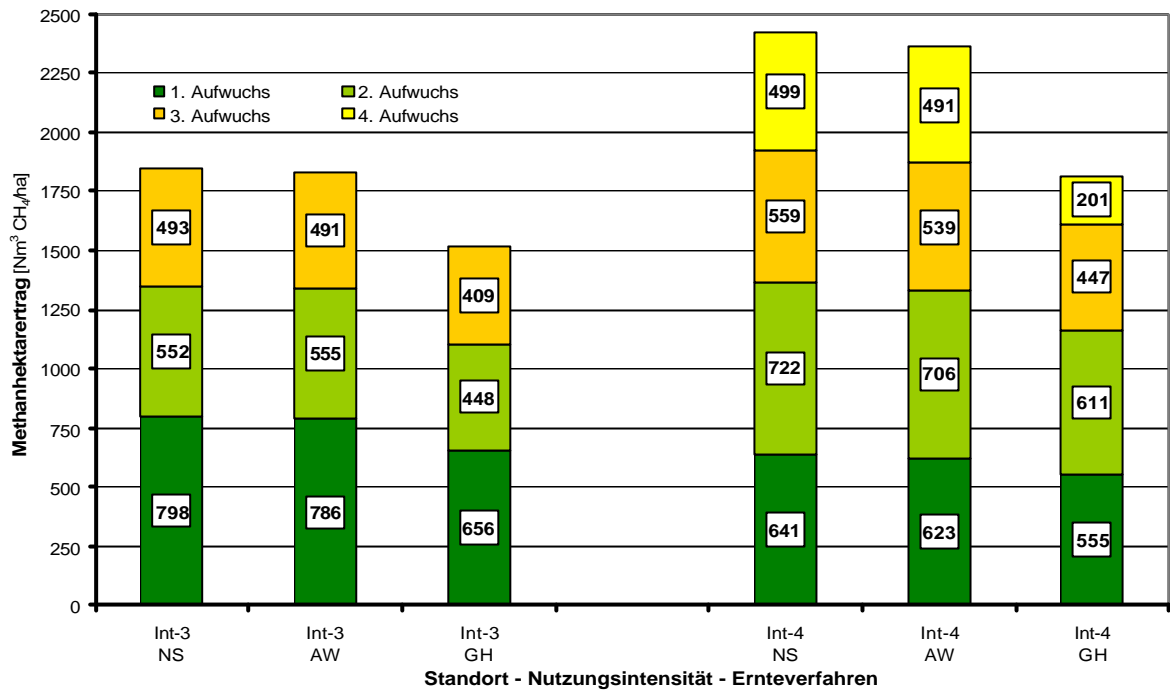


Abbildung 26: Methanhektarertrag am intensiven Standort – Gumpenstein

Der Methanhektarertrag des intensiven Standortes liegt deutlich über dem des extensiv genutzten Standortes. Den maximalen Methanhektarertrag mit 2421 [Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/ha] liefert die Vierschnittwiese des intensiven Standortes mit dem Ernteverfahren der Nasssilage, gefolgt von der Anwelksilage mit 2359 [Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/ha]. Die niedrigsten Methanhektarerträge mit 988 [Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/ha] liefert die extensive Einschnittwiese mit dem Ernteverfahren des Gärheus.

Bezüglich Nutzungsintensität und Aufwuchs fällt der Methanhektarertrag mit zunehmendem Aufwuchs mit Ausnahme der intensiven Vierschnittwiese. Hier weist der zweite Aufwuchs höhere Erträge als der Erste auf.

Am extensiv genutzten Standort liefert die Zweischnittwiese die absolut höchsten und die Einschnittwiese die absolut niedrigsten Methanhektarerträge. Bei allen drei Varianten des extensiv genutzten Standortes fällt der Methanhektarertrag mit zunehmenden Aufwuchs.

Im Hinblick auf das Konservierungsverfahren liefert die Nasssilage die besten Methanhektarerträge, gefolgt von der Anwelksilage und dem Gärheu mit Ausnahme der extensiven Einschnittwiese. Hier zeigt die Anwelksilage mit 1185 [Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/ha] höhere Erträge als die Nasssilage mit 1158 [Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/ha].

Aus diesen Ergebnissen lässt sich zusammenfassend in Bezug auf Standort, Nutzungsintensität und Ernteverfahren folgendes ableiten:

- Der intensive genutzte Standort liefert höhere Methanhektarerträge als der extensiv genutzte Standort.
- Bezüglich Nutzungsintensität zeigen sich im intensiven Bereich die besten Erträge bei der Vierschnittwiese und im extensiven Bereich bei der Zweischnittwiese.
- Das Ernteverfahren der Nasssilage liefert die höchsten Methanhektarerträge, gefolgt von der Anwelksilage und dem Gärheu.

## 6 Schlussfolgerung

Auf Basis der Angaben aus der Literatur und den vorliegenden Untersuchungsergebnissen können folgende Empfehlungen für die Biogaserzeugung aus Grünlandbiomasse bezüglich Standort, Nutzungsintensität und Ernteverfahren abgeleitet werden:

Ein intensiv genutzter Standort, mit einer Drei- oder Vierschnittnutzung, wie jener in Gumpenstein eignet sich zur Energiegewinnung in Form von Biogas besser als ein extensiv genutzter wie jener in Buchau, welcher ein-, zwei- und dreimal geschnitten wurde.

Zwischen den unterschiedlichen Schnitte, d.h. ob es jetzt der erste, zweite, dritte oder vierte Schnitt ist, gibt es keine wesentlichen Unterschiede bezüglich der Methanausbildung.

Das Ernteverfahren der Nasssilage liefert die besten Ergebnisse hinsichtlich der Methanbildung, gefolgt von der Anwelksilage und dem Gärheu. In der landwirtschaftlichen Praxis produzieren jedoch die meisten Landwirte Anwelksilagen, da dieses Konservierungsverfahren eine Reihe von Vorteilen bezüglich der Gärbiologie aufweist. Allerdings können bei der Verwendung von Nasssilagen für Biogasanlagen, auch Sickersäfte welche üblicherweise bei den Nasssilagen zu großen Verlusten führen zur Vergärung herangezogen werden. Ein großer Nachteil der Nasssilagen ist die intensive Geruchsbelästigung.

Entscheidend für den Methanhektarertrag sind der Biomasseertrag und das spezifische Methanbildungsvermögen, welches aber maßgeblich durch die Nährstoffzusammensetzung bestimmt wird. Bezüglich der Nährstoffzusammensetzung wirkt sich ein hoher Rohprotein- und Rohfettanteil positiv auf das Methanbildungsvermögen aus. Der hohe Anteil an Rohfaser hat eine negative Auswirkung auf das spezifische Methanbildungsvermögen. Dieser Effekt ist auf das Lignin zurückzuführen, welches nicht vergoren werden kann. In Summe liefert die intensiv genutzte Vierschnittwiese den höchsten Methanhektarertrag, mit  $2421 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4/\text{ha}$  beim Ernteverfahren der Nasssilage.

## 7 Weiterführende Arbeiten

In diesem Kapitel werden Überlegungen beschrieben, welche in Zukunft noch näher untersucht werden könnten um die Biogaserzeugung aus Grünlandbiomasse zu optimieren.

Im Bereich des Grünlandes hat die botanische Zusammensetzung einen starken Einfluss auf den Gehalt an vergärbaren Roh Nährstoffen. Der Bedarf an weiteren Untersuchungen bezüglich der unterschiedlichen botanischen Zusammensetzung von Grünlandbeständen mit Gräsern, Kräutern und Leguminosen und dessen Einfluss auf das spezifische Methanbildungsvermögen sowie auf den Methanhektarertrag scheint gegeben.

Bis dato wurden der intensiv genutzte Standort in Gumpenstein und der extensiv genutzte in Buchau untersucht, interessant ist sicherlich auch eine Untersuchung bezüglich Methanausbeute von extrem intensiv genutzten Grünlandstandorten in Salzburg, Tirol oder Vorarlberg mit bis zu sieben Nutzungen pro Jahr (vgl. BUCHGRABER, 2004, 3).

Potential besteht auch für die Vergärung von kommunalen Grünschnittabfällen. Untersuchungen bezüglich der Biogas- und Methanbildung dieser anfallenden Biomasse wären sicherlich spannend.

Des Weiteren sind noch Untersuchungen der einzelnen Konservierungsverfahren wie Nass- und Anwelksilage sowie Gärheu notwendig. Ein interessanter Punkt wäre etwa die Qualität von Silagen hinsichtlich Biogas- und Methanbildung mit folgenden Fragestellungen zu untersuchen:

- Welche Auswirkung hat eine verschimmelte, mit Toxinen angereicherte Silage?
- Wie beeinflussen die Gär säuren von Silagen die Mikroorganismen im Fermenter?
- Wie wirkt sich eine Fehlgärung mit hohen Anteilen an Buttersäure und/oder Essigsäure auf die anaerobe Vergärung aus?

Um die spezifische Methanausbeute mit dem MEWM anhand der Nährstoffanalysen aus den Futterwerttabellen für Grünland berechnen zu können, sind auch hier noch weitere Analysen für die Erstellung eines in der Praxis anwendbaren „Methanenergiewertmodells“ notwendig.

Eine Biogaserzeugung kann auch nur dann funktionieren, wenn sich diese als ökonomisch und nachhaltig erweist. Durch Kostenkalkulationen kann die Wirtschaftlichkeit der Biogasanlagen, sowie der Einsatz unterschiedlicher Substrate welche im Fermenter vergoren werden berechnet werden.

## 8 Zusammenfassung

Der weltweite Hunger nach Energie ist unersättlich, daher erlebt auch die anaerobe Vergärung im Zuge der Nutzung erneuerbarer Energiequellen einen starken Zuwachs. Die Grünlandwirtschaft ist in Österreich von sehr großer Bedeutung, denn auf den rund 2,0 Mio. ha Grünlandflächen wachsen jährlich 6-7 Mio. Tonnen Trockenmasse, 30 % werden als Grünfutter, 27 % als Heu und 43 % als Silage verwendet (vgl. RESCH et al., 2006, 2). Das Grünland spielt nicht nur bei den Raufutterverzellern eine große Rolle sondern, sondern auch zunehmend bei der Energieproduktion von Biogas.

Da es in Österreich noch sehr wenige Untersuchungsergebnisse zum Thema Biogasbildungsvermögen von Grünlandbiomasse in Abhängigkeit deren Nährstoff- und Energiegehalt gibt, wurde im Rahmen dieser Diplomarbeit dieses Thema genauer erforscht. Die Untersuchungen wurden am Standort Gumpenstein und am Standort Buchau durchgeführt. In Gumpenstein befinden sich die Versuchspartellen der intensiver genutzten Flächen, mit einer Dreischnitt- und einer Vierschnittwiese. In der Buchau sind die Versuchspartellen der extensiver genutzten Flächen, mit einer Ein-, Zwei und Dreischnittwiese angelegt.

Auf beiden Versuchsstandorten wurden die Partellen zu den vorgegebenen Ernteterminen geerntet. Des Weiteren wurde der Biomasseertrag am Feld bestimmt und das Futter anschließend bis zum erforderlichen Trockenmassegehalt, je nach Konservierungsverfahren (Nasssilage, Anwelksilage und Gärheu) angewelkt. Die Biomasse wurde danach auf eine Länge von ca.7 cm geschnitten und in Einweckgläsern siliert. In Summe ergaben sich 39 verschiedene Versuchsvarianten. Nach dem Gärprozeß wurde von den Proben eine Weender – Analyse, eine Elementaranalyse und eine Energiewertbestimmung durchgeführt.

Die Untersuchung der spezifischen Methanausbeute der Gärrohstoffe wurde im Labor unter kontrollierten Gärbedingungen mit Hilfe von Eudiometern und der Beuteltechnik ermittelt. Nach 38 Tagen erfolgte die Analyse der Methankonzentration und des Gasnormvolumens.

Anhand der Ergebnisse aus der Weender–Analyse und der Elementaranalyse, sowie der Beuteltechnik und dem Eudiometerversuch, wurde mit Hilfe des Statistikprogramms SAS für Windows Version 9.1.3. ein Methanenergiewertmodell zur Schätzung des

Methanenergiewertes erstellt. Die statistische Auswertung der Biomasseertragspotentiale und der spezifischen Methanausbeute der einzelnen Ernteverfahren erfolgte mit dem Statistik Programm SPSS Version 11.5.1.

Bezüglich des Biomassebildungsvermögens zeigen sich folgende Ergebnisse:

Bei den extensiven Flächen zeigt sich in Summe der höchste Gesamtbiomasseertrag von 59,22 dt/ha bei der Zweischnittwiese, gefolgt von der Dreischnittwiese mit 57,53 dt/ha und der Einschnittwiese mit 45,97 dt/ha. Die höchsten Einzelerträge zeigen sich jeweils beim ersten Schnitt. Die statistische Auswertung liefert einen signifikanten Unterschied zwischen Einschnitt- und Zweischnittwiese.

Bei den intensiven Flächen zeigt sich in Summe der höchste Gesamtbiomasseertrag von 81,55 dt/ha bei der Vierschnittwiese, die Dreischnittwiese weist einen Gesamtbiomasseertrag von 63,03 dt/ha auf. Auch bei den intensiven Flächen zeigen sich die höchsten Einzelerträge jeweils beim ersten Schnitt. Die statistische Auswertung liefert keinen signifikanten Unterschied zwischen Drei- und Vierschnittwiese.

Neben dem Biomassebildungspotential ist vor allem auch ein hohes spezifisches Methanbildungspotential wichtig. Dieses wurde mit dem Methanenergiewertmodell anhand der Inhaltsstoffzusammensetzung der Grasproben berechnet.

Den höchsten spezifischen Methanertrag mit 345 [l<sub>N</sub>/kg oTS] erreichte das Konservierungsverfahren der Nasssilage am intensiv genutzten Standort, nämlich beim dritten Schnitt der Vierschnittwiese.

Am extensiv genutzten Standort Buchau lag der maximale spezifische Methanertrag mit [308 l<sub>N</sub>/kg oTS] beim Konservierungsverfahren der Anwelksilage und zwar beim zweiten Schnitt der Dreischnittwiese. Die niedrigste Methanausbeute mit 243 [l<sub>N</sub>/kg oTS] lieferte die Einschnittwiese mit dem Konservierungsverfahren des Gärheus.

Bezüglich des Konservierungsverfahrens zeigte sich sowohl am intensiv wie auch am extensiv genutzten Standort das beste Methanbildungspotential bei der Nasssilage. Hinsichtlich der Inhaltsstoffe zeigen sich bei der Nasssilage im Gegensatz zum Gärheu die höheren Werte bei der Rohfaser, dem Rohprotein, dem Rohfett, der Rohasche, der Zellulose und dem organischen Rest.

Die niedrigeren Werte zeigen sich bei den stickstofffreien Extraktstoffen, der Hemizellulose, dem Zucker und dem Lignin (ADL). Die weniger hohe Methanausbeute beim Gärheu mit 260 [N/kg oTS] könnte unter anderem an den höheren Werten bei Zucker und dem Lignin liegen. Lignin kann von den Mikroorganismen im Fermenter nicht verdaut werden.

Das Produkt des Biomasseertrages und dem spezifischen Methanbildungsvermögen ergibt den Methanhektarertrag. Den maximalen Methanhektarertrag, mit 2421 [Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/ha] liefert, die Vierschnittwiese des intensiven Standortes mit dem Ernteverfahren der Nasssilage, gefolgt von der Anwelksilage mit [2359 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/ha]. Die niedrigsten Methanhektarerträge mit 988 [Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/ha] liefert die extensive Einschnittwiese mit dem Konservierungsverfahren des Gärheus. In Summe liefert der intensive Standort höhere Methanhektarerträge als der extensive Standort.

Die Ausnutzung der in der Biomasse enthaltenen Energie lässt sich bei der Methanbildung anhand des energetischen Wirkungsgrades ( $\eta$ ) kalkulieren. Die Bruttoenergie der Grünlandproben lag im Bereich von 15,9 MJ/kg oTS beim Gärheu des dritten Schnittes des extensiven Standortes und 19,9 MJ/kg oTS bei der Nasssilage des vierten Schnittes. Bei den untersuchten Proben zeigt sich in Summe ein höherer energetischer Wirkungsgrad am intensiven Standort, jedoch zeigt hier die Vierschnittwiese einen geringeren Wirkungsgrad als die Dreischnittwiese. Bezüglich des Konservierungsverfahrens weist die Nasssilagen den höchsten Wirkungsgrad auf, gefolgt von der Anwelksilage und dem Gärheu, dies lässt sich auf beiden Standorten beobachten.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass es einen Unterschied zwischen intensiver und extensiver Grünlandwirtschaftung bezüglich Biomasseertrag, spezifischer Methanausbeute und Methanhektarertrag gibt, ebenso zeigen sich Unterschiede hinsichtlich der Konservierungsverfahren Nasssilage, Anwelksilage und Gärheu.



## 9 Literatur- und Quellenverzeichnis

AMON, T.; KRYVORUCHKO, V.; HOPFNER-SIXT, K.; AMON B.; RAMUSCH, M.; MILOVANOVIC, D.; BODIROZA, V.; SAPI, R.; ZIMA, J.; MACHMÜLLER, A.; ZOLLITSCH, W.; KNAUS, W.; FRIEDEL, J.; HRBEK, R.; PÖTSCH, E.; GRUBER, L.; STEINWIDDER, A.; PFUNDTNER, E. & WAGENTRISTL, H. (2006): Optimierung der Methanerzeugung aus Energiepflanzen mit dem Methanenergiesystem. Endbericht März 2006 Projektnummer: 807736/8539 – KA/HN. Auftraggeber: Univ. für BOKU, Department Nachhaltige Agrarsysteme, Institut für Landtechnik, Wien

AMON, T.; KRYVORUCHKO, V.; HOPFNER-SIXT, K.; AMON B.; VIOTMIR B.; RAMUSCH M.; HRBEK R.; FRIEDEL K.; ZOLLITSCH, W. & BOXBERGER, J. (2006): Rohstoffpflanzen für Biogasanlagen – Rohstoffaufbringung und Energieeffizienz. Vortrag beim Ackerbautag II der Wintertagung 2006 des Ökosozialen Forums Österreich. am 14.02.2006 in Hollabrunn.

AMON, T.; KRYVORUCHKO, V.; BODIROZA, V.; MACHMÜLLER, A. & AMON, B. (2006): Methanbildungsvermögen und Biogasqualität bei der Vergärung von Weizen und Cellulose Bericht VDLUFA: Ringversuch Biogas. S 2 – 6.

AMON, T. (2003): Das Grünland und den Acker für die Biogasproduktion nutzen. Der fortschrittliche Landwirt. 7, 44 – 45.

AMON, T.; KRYVORUCHKO, V.; AMON, B.; BUGA, S.; AMID, A.; MAYER, K.; PÖTSCH, E. & ZOLLITSCH, W. (2004): Biogaserträge aus landwirtschaftlichen Gärgütern. 10. Alpenländisches Expertenforum 18. / 19. März 2004 an der BAL Gumpenstein. S. 21 – 26.

AMON, T.; KRYVORUCHKO, V.; AMON, B.; REIHOOLD, G.; OECHSNER, H.; SCHWAB, M.; WEILAND, P. & LINKE, B. (2004): Biogaserträge von Energiepflanzen und Wirtschaftsdüngern – Laborversuchsergebnisse. KTBL- Schrift 420. Die Landwirtschaft als Energieerzeuger. Wo liegen die Chancen für Biogas, Biokraftstoff, Biobrennstoff und Fotovoltaik. KTBL- Tagung vom 20. bis 31. März in Osnabrück.

AMON, T.; ARENDS, F.; ASCHMANN, V.; BÖHNI, T.; DORSCH, K.; GERS-GREPPERHAUS, C.; GOTTFRIED, H.; ROTHER, R.; WARECKA, T.; GREPMEIER, M.; GRUBER, W.; JÄKEL, K.; WANKA, U.; ALBERT, E.; KEYMER, U.; KÖTTNER, M.; KOHRT, J.; KOCK, L.; KRIEG, A.; NEUMANN, H.; MAEGAARD, P.; MATTHIAS, J.; MITTERLEITNER, H.; OECHSER, H.; LEMMER, A.; PESTA, G.; MEYER-PITTRUFF, R.; PORSCH, G.; COSTA GOMES, C.; RAU, B.; SCHNEIDER, E.; SCHRADER, S.; SCHUMMER, J.; TENTSCHER, W. & WEILAND, P. (2002): Biogas Strom aus Gülle und Biomasse. Top Agrar Fachbuch. Münster: Landwirtschaftsverlag GmbH

AMON, T.; AMON, B.; KRYVOURUCHKO, V.; MACHMÜLLER, A.; HOPFNER SIXT,- K.; BODIROZA, V.; HRBEK, R.; FRIEDEL, J.; PÖTSCH, E.; WAGENTRISTL, H.; SCHREINER, M. & ZOLLITSCH, W. (2006): Methane production through anaerobic digestion of various energy crops grown in sustainable crop rotations. *Bioresource Technology* 98, 3204-3212.

BRENN, G.; HOHENWARTER, U.; RENETZEDER, P. & BAMBERGER, G. (2006): Brennstoffzellen – Blockheizkraftwerk für anaerobes Biogas, Endbericht des Projektes Februar 2006, GZ: 40 Br 02 – PE, D-1307000031

BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND-, FORST-, UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT (2006): Bundesgesetzblatt für die Republik Österreich – Ökostromverordnung 2006. Wien: Selbstverlag. S. 1 – 4.

BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND-, FORST-, UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT (2007): Der sachgerechte Einsatz von Biogasgülle und Gärrückständen im Acker und Grünland. 2. Auflage. Entwurf. Wien: Selbstverlag

BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, INNOVATION UND TECHNOLOGIE (2005): Anlagensicherheit und Genehmigung von Biomassevergassungsanlagen – Leitfaden für Betreiber, Hersteller und Behörden. Wien: Selbstverlag.

BRUNNMAYR, W. & KIRCHMEYR, F. (2005) Biogas – Energieträger der Zukunft. ARGE, Kompost und Biogas. S. 2 – 18

BUCHGRABER, K. (2004): Energetisch und stofflich nutzbare Biomasse aus dem österreichischen Grünland. 10. Alpenländisches Expertenforum 18. / 19. März 2004 an der BAL Gumpenstein. S. 15 – 19.

BUCHGRABER, K. & GINDL, G. (2004): Zeitgemässe Grünlandbewirtschaftung. 2 völlig neue bearbeitet Auflage; Leopold Stocker Verlag, Graz

BUCHGRABER, K. (2004): Skriptum zur Grünlandbewirtschaftung. 2. Vorlesungsseminar im Sommersemester 2007.

BUGA, S. (2004): Biogaserzeugung aus Mais: Einfluss der Sorte und des Erntezeitpunktes auf die spezifische Methanausbeute und dem Methanhektarertrag. Wien: Diplomarbeit Universität für Bodenkultur.

EDER, B. & SCHULZ, H. (2006): Biogas Praxis, Grundlagen, Planung, Anlagenbau, Beispiele, Wirtschaftlichkeit. 3 vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage; Ökobuchverlag, Staufen bei Freiburg

GÖRISCH, U. & HELM, M. (2006): Biogasanlagen. Ulmerverlag, Stuttgart (Hohenheim)

GRONAUER, A.; ASCHMANN, V.; EFFENBERGER, M.; KAISER, T.; KISSEL, R.; MITTERLEITNER, H.; SCHLATTMANN, M.; SPECKMEIER, M. & ZIEHFREUND, G.; (2004): Biogashandbuch Bayern – Materialienband – Stand Dez. 2004

GRÜNER BERICHT (2005): Hrsg. 2005 Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Wien: Selbstverlag.

GRÜNER BERICHT (2006): Hrsg. 2006 Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Wien: Selbstverlag.

GRÜNER BERICHT (2007): Hrsg. 2007 Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Wien: Selbstverlag.

HARTMANN, H. & KALTSCHMITT, M. (2001): Energie aus Biomasse. Grundlagen, Technik und Verfahren. Berlin: Springer – Verlag.

HILFRICH A. (2008): Schriftliche Auskunft zum aktuellen Stand der genehmigten Biogasanlagen in Österreich im Juli 2008. (03.07.2008)

HOPFNER – SIXT, K. (2007): Landwirtschaftliche Biogasanlagen. 2. Auflage. ÖKL. Wien: Selbstverlag.

HOPFNER – SIXT, K.; AMON, T.; BODIROZA, V.; MILOVANOVIC, D.; ZOLLITSCH, W. & BOXBERGER, J. (2006a): Stand der Technik österreichischer Biogasanlagen. Landtechnik 61, S. 30 . 31.

KABASCI, S. & HILLER, R. (2005): Anforderungen an die Gasqualitäten in der Weiternutzung – Gasreinigung im Bereich der Motoren. In: VDI – Richtlinien 2005, VDI – Berichte 1972

KAISER, F. & GRONAUER, A. (2007.): Methanproduktivität nachwachsender Rohstoffe in Biogasanlagen. Hrsg.: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft. Freising – Weihenstephan.

KAPARAJU, P.; LUOSTARINEN, S.; KALMARI, E.; KALMARI, J. & RINTALA, J. (2002): Co-digestion of energy crops and industrial confectionery by – produkts with cow manure: batch – scale and farm – scale. Water Science and Technology.

KARG, H. (2007): Wertermittlung landwirtschaftlicher Biogasanlagen. 1. Auflage 2007. HLBS Verlag GmbH, Sankt Augustin

KIRCHGEßNER, M. (1997): Tiernernährung. Leitung für Studium, Beratung und Praxis. !0. neubearbeitete Auflag. Frankfurt am Main: Verlagsunion Agrar.

KRAUTZER B.; LEONHARD C.; BUCHGRABER K. & LUFTENSTEINER H. (2008): Handbuch für ÖAG-Empfehlung von ÖAG-kontrollierten Qualitätssaatgutmischungen für das Dauergrünland und den Feldfutterbau. Hrsg.: ÖAG-Fachgruppe Saatgutproduktion und Züchtung von Futterpflanzen.

KRYVORUCHKO, V.; AMON, T.; AMON, B.; HOPFNER –SIXT, K.; MACHMÜLLER, A.; PÖTSCH, E.; AL AFIF, R.; ZOLLITSCH, W. & ZWATZ, E. (s.a.): Sustainable biogasproduction from energycrops. Wien: unveröffentl. Ausgabe.

KTBL – Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (2005): Gasausbeute in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Münster: Landwirtschaftsverlag GmbH.

LEMMER, A. & PREIBLER, D. (2007): Gärprozess: Auf die Säuren achten! Top Agrar 2007, S 14 – 15, Jahrbuch neue Energie.

LANGHANS, G. (1997): Reale Werte. Mit Hilfe der theoretischen Gasausbeute-Berechnung können realistische Prognosen und optimierte Anlagen für die Abfallvergärung erstellt werden. Müllmagazin 1, 30-33.

LÜBKEN, M.; WICHERN, M.; SCHLATTMANN, M.; GRONAUER, A. & HORN, H. (2007): Modelling the energy balance of an anaerobic digester fed with cattle manure an renewable energy crops. Water Research 41, 4085 – 4096.

MÄHNERT, P.; HEIERMANN, M. & LINKE, B. (2005): Batch and Semi-continuous Biogas Produktion from Different Grass Spezies. Argricultural Engineering International: the CIGR Ejournal. Manusdript EE 05 010. Vol. VII. December, 2005.

MINIHUBER, J. (2007): Eignung verschiedener Energiemaissortentypen zur Biogaserzeugung unter den Standortbedingungen des nordöstlichen Hausruckviertels. Wien: Diplomarbeit Universität für Bodenkultur.

MUKENGELE, M.; BRULÉ, M. & OECHSNER, H. (2006): Einfluss der Substratmischung aus Energiepflanzen auf Abbaukinetik und Methanertrag. Landtechnik 1. 26 -27.

NIEDERMAIR, M. (2007): Der Klimaplan des WWF – Eine Antwort auf die globale Energiekrise, S. 2 – 14.

NEUMANN, H. (2007): Gas aus Gras: Lohnt sich das? Top – Jahrbuch 2007.

N.N. (2006): Der Bauer als Energiewirt – Das Energiekonzept der landwirtschaftlichen Fachschule Tulln. S. 1 – 7.

N.N. (2007): Stoff mit Zukunft in der Pipeline. Heizung, Lüftung, Klimatechnik Nr. 8/9.

PÖTSCH, E.M. (2007): Sachgerechter Einsatz von Fermentationsrückständen aus Biogasanlagen. In: Club Niederösterreich, Multitalent Biogas II, 4/5/2007. S. 76 - 81.

PÖTSCH, E.; PFUNDTNER, R.; RESCH, R. & MUCH, P. (2004): Stoffliche Zusammensetzung und Ausbringungseigenschaften von Gärrückständen aus Biogasanlagen. 10. Alpenländisches Expertenforum 18. / 19. März 2004 an der BAL Gumpenstein. S. 37 – 47.

RESCH, R.; GUGGENBERGER T.; GRUBERL.; RINGDORFER F.; BUCHGRABER K.; WIEDNER G.; KASAL A. & WURM K. (2006): Futterwerttabellen für das Grundfutter im Alpenraum. Der fortschrittliche Landwirt 24, 2.

RÖSCH, C.; RAAB, K.; STELZER, V. & JOHANN, J. (2005): Grünlandnutzung zur Energieerzeugung am Beispiel Baden-Württemberg. Der fortschrittliche Landwirt 5, 62 – 63.

SEMLITSCH, S. (2006): Grünlandnutzung der Zukunft. Der fortschrittliche Landwirt 3, S. 10 – 11.

SONNLEITNER, P. (2004): Beeinflussung der Keimfähigkeit von Samen des Rumex obtusifolius und Rumex crispus im innerbetrieblichen landwirtschaftlichen Kreislauf. Gumpenstein: Maturaarbeit Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt für Landwirtschaft.

THEISSING, M. (2006): Biogas – Einspeisung und Systemintegration in bestehende Gasnetze. (Hrsg.): Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien.

VDI – Verein deutsche Ingenieure (2006): VDI- Richtlinien: Vergärung organischer Stoffe – Stoffcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche.

WEILAND, P. (2001): Grundlagen der Methangärung – Biologie und Substrate. In: VDI – Richtlinien 2001, VDI – Berichte 1620

ZAMG – ZENTRALE ANSTALT FÜR METEOROLOGIE UND GEODYNAMIK (2007): Klimadaten vom Standort Gumpenstein – Irnding und vom Standort Admont aus dem Jahr 2007.

#### Internet:

Statistik Austria – Agrarstrukturerhebung. In:  
[http://www.statistik.at/web\\_de/static/tierbestand\\_1995\\_1999\\_und\\_2005\\_023243.pdf](http://www.statistik.at/web_de/static/tierbestand_1995_1999_und_2005_023243.pdf)  
[http://www.statistik.at/web\\_de/static/land\\_und\\_forstwirtschaftliche\\_betriebe\\_und\\_derer\\_gesamtf\\_laeche\\_1990\\_1995\\_\\_022961.pdf](http://www.statistik.at/web_de/static/land_und_forstwirtschaftliche_betriebe_und_derer_gesamtf_laeche_1990_1995__022961.pdf) (01.07.08)

Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften (2001) – Richtlinie 2001/77/EG des Europäischen Parlaments und des Rates zur Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen im Elektrizitätsbinnenmarkt. In: [http://www.iwr.de/re/eu/recht/rili\\_aus.html](http://www.iwr.de/re/eu/recht/rili_aus.html) (01.08.07)

MOIDL, ST., LEONHART L. & PEKNY W. (2008): Footprint. Der ökologische Fußabdruck Österreichs. 3. Auflage. Hersg.: Plattform Footprint. Jänner 2008. S 1-16. In: <http://www.greenpeace.at/footprint/index.html> (30.06.08)

N.N. (s.a): Brennstoffzellen – Blockheizkraftwerk für anaerobes Biogas. In: [http://www.noest.or.at/intern/dokumente/021\\_Brennstoffzell\\_Block\\_Endbericht.pdf](http://www.noest.or.at/intern/dokumente/021_Brennstoffzell_Block_Endbericht.pdf) (16.08.07)

N.N. (s.a.): Geographische Karte Österreich - Vacanteustria In:  
[http://www.vacanteustria.ro/images/austria/harta\\_austria/Austria-physical-map.gif](http://www.vacanteustria.ro/images/austria/harta_austria/Austria-physical-map.gif)  
(17.02.2008)

N.N.(2008): Futtermittelanalytik. In: <http://de.wikipedia.org/wiki/Rohfaser#Rohfaser>  
(02.04.2008)

Umweltbundesamt (2007): Novelle Ökostromgesetz. In:  
<http://www.umweltbundesamt.at/umweltschutz/energie/erneuerbare/novelle/?wai=1> (05.06.07)

N.N. (s.a.): Futtermittelanalytik. In: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie. Bearbeitungsstand: 21.  
November 2007, 10:34 UTC. In:  
<http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Futtermittelanalytik&oldid=39206644> (12. 02.2008)

THEINER, J. (2006): Elementaranalyse. Fakultät für Chemie, Mikroanalytisches Laboratorium,  
Universität Wien, In: <http://www.univie.ac.at/Mikrolabor/chn.htm> (19.03.2008)

## 10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Phasen der Biogasentstehung	- 16 -
Abbildung 2:	Vermehrungskurve von Bakterien bei begrenztem Nährstoffangebot	- 19 -
Abbildung 3:	Generationszeiten der Bakterien	- 20 -
Abbildung 4:	Einfluss der Temperatur auf die Bakterienaktivität	- 23 -
Abbildung 5:	Einflüsse auf die Qualität der Pflanzenbiomasse, den Gärrohstoff und das Gärgut bei Nutzung von Energiepflanzen in der Biogaserzeugungskette	- 37 -
Abbildung 6:	Methanerträge an unterschiedlichen Standorten	- 41 -
Abbildung 7:	Geographische Lage der Versuchsstandorte	- 52 -
Abbildung 8:	Klimadiagramm des intensiv genutzten Standortes Gumpenstein	- 53 -
Abbildung 9:	Klimadiagramm des extensiv genutzten Standortes Buchau	- 55 -
Abbildung 10:	Versuchsernte in Buchau & Gumpenstein	- 58 -
Abbildung 11:	Gewicht Zerkleinerung Schnittlänge von 7 cm	- 58 -
Abbildung 12:	Verdichten der Silage in Einweckgläser & konservierte Probe	- 59 -
Abbildung 13:	Labormühle Mixer B400 Gemahlene Probe für Analysen	- 60 -
Abbildung 14:	Eudiometer-Messapparatur	- 62 -
Abbildung 15:	Einwaage Impfung der Beutel Vacuumieren der Beutel	- 63 -
Abbildung 16:	Beutel im Schrank Temperatur	- 63 -
Abbildung 17:	Chemische Zusammensetzung von Tier und Nahrung	- 65 -
Abbildung 18:	Zusammenhang zwischen gemessenem und geschätztem spezifischem Methanertrag der Konservierungsverfahren	- 72 -
Abbildung 19:	Biomasserträge des extensiven Standortes im Jahr 2006 und 2007	- 74 -
Abbildung 20:	Biomasserträge des intensiven Standortes im Jahr 2006 und 2007	- 74 -
Abbildung 21:	Spezifische Methanausbeute am extensiv genutzten Standort – Buchau	- 80 -
Abbildung 22:	Spezifische Methanausbeute am intensiv genutzten Standort – Gumpenstein	- 81 -
Abbildung 23:	Energetischer Wirkungsgrad der Grünlandproben am extensiven Standort	- 83 -

Abbildung 24: Energetischer Wirkungsgrad der Grünlandproben am intensiven Standort	- 84 -
Abbildung 25: Methanhektarertrag am extensiven Standort – Buchau	- 85 -
Abbildung 26: Methanhektarertrag am intensiven Standort – Gumpenstein	- 86 -
Abbildung 27: Versuchsflächen des Intensiven Standortes in Gumpenstein	- 105 -
Abbildung 28: Versuchsstandort Admont – Buchau	- 108 -



## 11 Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Einspeisetarif für Ökostrom aus Biogasanlagen	- 5 -
Tab. 2	Energiekennzahlen der Biogaserzeugung in spezialisierten und integrierten Systemen	- 7 -
Tab. 3	Produktionskosten unterschiedlicher Substrate bezogen auf die Methanausbeute	- 11 -
Tab. 4	Anbaufläche in ha in Abhängigkeit von der elektrischen Leistung des BHKW und der Zusammensetzung des Substratinputs	- 12 -
Tab. 5	Stoffumsetzungen in der hydrolytischen Phase und Beispiele beteiligter Mikroorganismen	- 17 -
Tab. 6	Stoffumsetzungen in der acidogenen Phase und Beispiele beteiligter Mikroorganismen	- 17 -
Tab. 7	Stoffumsetzungen in der acetogenen Phase und Beispiele beteiligter Mikroorganismen	- 18 -
Tab. 8	Stoffumsetzungen in der methanogenen Phase und Beispiele beteiligter Mikroorganismen	- 19 -
Tab. 9	Physikalisch – chemische Mindestanforderungen für die Methanogenese	- 22 -
Tab. 10	Temperaturbereiche der anaeroben Vergärung	- 23 -
Tab. 11	Verweilzeit und Reaktorbelastung bei unterschiedlichen Substraten	- 28 -
Tab. 12	Biogas und Faulgaszusammensetzung	- 33 -
Tab. 13	Hemmstoffe bei anaeroben Abbauprozessen	- 36 -
Tab. 14	Ertrag und Methangehalt von Pflanzenbaustoffen	- 38 -
Tab. 15	Trockenmassejahreserträge am österreichischen Grünland	- 40 -
Tab. 16	Inhaltsstoffe, Bruttoenergiegehalt und spezifische Methanausbeute der Klee gras- (KM), Feldfutter- (IM) und Dauererwiesenmischung (DM) verschiedener Reifestadien und Konservierungsformen	- 42 -
Tab. 17	Biogas und Methanerträge aus Grünland	- 44 -
Tab. 18	Methanhektarerträge unterschiedlicher Grünlandvarianten	- 46 -
Tab. 19	Parameter der Regressionsgleichung zur Berechnung des Methan-Energiewertes von Gras anhand seiner Rohnährstoffe	- 49 -
Tab. 20	Übersicht der wichtigsten Daten der Standorte Buchau und Gumpenstein	- 56 -

Tab. 21	Arbeitsplan – Methanbildungspotential – Grassilage 2007	- 57 -
Tab. 22	Daten für die Berechnung nach Buswell	- 68 -
Tab. 23	Berechnung der Korrekturfaktoren	- 69 -
Tab. 24	Methanenergiewertmodelle für Grünlandfutter	- 71 -
Tab. 25	Parameter der Regressionsgleichungen zur Berechnung des Methanenergiewertes von Gärheu sowie von Nass- und Anwelksilage	- 71 -
Tab. 26	Zusammenfassung der statistischen Auswertung bezüglich Biomasseerträge	- 75 -
Tab. 27	Nährstoffanalysen und Methanausbeute der Grassilagen	- 78 -
Tab. 28	Mitterwert der Nährstoffanalysen und der Methanausbeute bei den unterschiedlichen Konservierungsverfahren	- 79 -
Tab. 29	Zusammenfassung der statistischen Auswertung bezüglich Methanausbeute	- 82 -
Tab. 30	Pflanzenbestandsaufnahme der intensiven Dreischnittwiese	- 106 -
Tab. 31	Pflanzenbestandsaufnahme der intensiven Vierschnittwiese	- 107 -
Tab. 32	Mittelwertsvergleich der Biomasseerträge beider Standorte	- 109 -
Tab. 33	T-Test: Statistische Analyse der Biomassejahreserträge beider Standorte	- 109 -
Tab. 34	Scheffé-Prozedur: Statistische Analyse der Biomasseerträge in Bezug auf die Nutzungsintensität am extensiven Standort	- 109 -
Tab. 35	Mittelwertsvergleich der Biomasseerträge am intensiven Standort	- 110 -
Tab. 36	T-Test: Statistische Analyse der Biomassejahreserträge des intensiven Standortes	- 110 -
Tab. 37	Mittelwertsvergleich der Methanausbeute am intensiven und extensiven Standort ohne Berücksichtigung des Ernteverfahrens	- 110 -
Tab. 38	T-Test: Statistische Analyse der Methanausbeute des intensiven und extensiven Standortes	- 110 -
Tab. 39	Scheffé-Prozedur: Statistische Analyse der Methanausbeute am extensiven Standort im Bezug auf die Ernteverfahren	- 111 -
Tab. 40	Scheffé-Prozedur: Statistische Analyse der Methanausbeute am intensiven Standort im Bezug auf die Ernteverfahren	- 111 -
Tab. 41	Mittelwertsvergleich der Methanausbeute beim Ernteverfahren der Nasssilage am intensiven und extensiven Standort	- 111 -

Tab. 42	T-Test: Statistische Analyse der Methanausbeute beim Ernteverfahren der Nasssilage am intensiven und extensiven Standortes	- 112 -
Tab. 43	Mittelwertsvergleich der Methanausbeute beim Ernteverfahren der Anwelksilage am intensiven und extensiven Standort	- 112 -
Tab. 44	T-Test: Statistische Analyse der Methanausbeute beim Ernteverfahren der Anwelksilage am intensiven und extensiven Standortes	- 112 -
Tab. 45	Mittelwertsvergleich der Methanausbeute beim Ernteverfahren des Gärheus am intensiven und extensiven Standort	- 113 -
Tab. 46	T-Test: Statistische Analyse der Methanausbeute beim Ernteverfahren des Gärheus am intensiven und extensiven Standortes	- 113 -
Tab. 47	Mittelwertsvergleich der Methanausbeute beim Ernteverfahren der Anwelksilage am intensiven Standort in Bezug auf die Nutzungsintensität	- 113 -
Tab. 48	T-Test: Statistische Analyse der Methanausbeute beim Ernteverfahren der Anwelksilage am intensiven Standorte in Bezug auf die Nutzungsintensität	- 114 -
Tab. 49	Mittelwertsvergleich der Methanausbeute beim Ernteverfahren der Nasssilage am intensiven Standort in Bezug auf die Nutzungsintensität	- 114 -
Tab. 50	T-Test: Statistische Analyse der Methanausbeute beim Ernteverfahren der Nasssilage am intensiven Standorte in Bezug auf die Nutzungsintensität	- 114 -
Tab. 51	Mittelwertsvergleich der Methanausbeute beim Ernteverfahren des Gärheus am intensiven Standort in Bezug auf die Nutzungsintensität	- 115 -
Tab. 52	T-Test: Statistische Analyse der Methanausbeute beim Ernteverfahren des Gärheus am intensiven Standorte in Bezug auf die Nutzungsintensität	- 115 -
Tab. 53	T-Test: Statistische Analyse der Methanausbeute beim Ernteverfahren der Nasssilage am intensiven Standorte in Bezug auf die Nutzungsintensität	- 115 -
Tab. 54	Methanenergiewertmodelle 1	- 116 -
Tab. 55	Methanenergiewertmodelle 2	- 117 -
Tab. 56	Methanenergiewertmodelle 3	- 118 -



<b>WD - Versuch Gumpenstein</b>			<b>Vers.-Nr: GL-710</b>						
Pflanzenbestandsaufnahme in Fl. %			bonitiert am: 03.06.2005						
<b>3 - Schnittflächen</b>			NPK		Gülle		Rotte		15 t
1,28 GVE/ha (1 ÖPUL GVE)			+Bios	Gülle	+Bios	Gülle	mist+	omp.+	Rotte
			alin	1:0,25	alin	1:1	Jauch	Jauch	mist i.
							e 1:1	e 1:1	t
Prüf.-Nr.	PK	NPK	33	34	35	36	37	38	39
	31	32	33	34	35	36	37	38	39
Proj. Deckung	93	92	93	94	95	94	93	93	92
offener Boden in %	11	11	9	8	8	10	10	9	11
WHV in cm	73	74	74	76	76	71	79	85	87
Gräser in Gewichtsprozent	79	80	81	75	76	74	80	83	81
Leguminosen in Gewichtsprozent	16	6	6	18	14	16	14	10	14
Kräuter in Gewichtsprozent	5	14	13	7	10	10	6	7	5
Rot-Straußgras									0.3
Wiesen-Fuchsschwanzgras	2	3	4	2	4	3	4	3	
Glatthafer	40	37	38	31	35	32	41	47	44
Knautgras	6	5	6	8	9	6	7	5	7
Acker-Quecke	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3		0.3	0.7	1
Wiesen-Schwingel	2	4	4	5	4	4	4	3	3
Rot-Schwingel	3	2	3	2	1	3	0.7	2	2
Wolliges Honiggras							1		
Englisches Raygras	3	1	1	2	2	1	0.7	1	1
Bastardraygras					0.3	0.7			
Wiesen-Lieschgras	3	3	4	5	4	4	4	2	2
Einjahrs-Rispe	1	1	0.5	1	0.6	0.6	1	1	1
Wiesen-Rispe	6	4	5	7	7	6	6	6	5
Gemeine-Rispe	4	7	5	7	8	9	11	10	11
Goldhafer	11	17	13	13	10	11	10	11	12
<b>S Gräser</b>	<b>80</b>	<b>82</b>	<b>84</b>	<b>80</b>	<b>84</b>	<b>79</b>	<b>88</b>	<b>90</b>	<b>89</b>
Gew. Hornklee	3	2	2	4	3	3	3	2	2
Röt-Klee	0.3	1		2	2		1	0.3	2
Weißklee	15	4	4	15	11	15	12	8	13
<b>S Leguminosen</b>	<b>17</b>	<b>7</b>	<b>6</b>	<b>21</b>	<b>15</b>	<b>17</b>	<b>15</b>	<b>10</b>	<b>16</b>
Echte Schafgarbe	2					0.7	0.5		
Geißfuß	2	2	2	2	0.3	0.7	0.7	5	0.3
Gänseblümchen	1	1	2	0.7	2	0.7	1	0.7	1
Wiesen-Glockenblume	1		1		0.3	0.7	0.4	0.7	0.3
Gew. Hirtentäschel						0.3		0.3	
Wiesen-Flockenblume			2						
Gew. Hornkraut	0.7	1	0.7	1	1	1	1	0.7	0.5
Wiesen-Pippau	2					1		0.3	
Großes Wiesen-Labkraut				1				0.3	
Echte Gundelrebe			0.7		0.3		0.5	0.3	0.3
Gew. Bärenklau					1				
Weiß-Taubnessel							0.7		
Wiesen-Löwenzahn				0.5	0.4	0.7	0.3	0.5	
Spitz-Wegerich	0.3					1			
Scharfer Hahnenfuß		2	0.3			0.7		1	0.3
Kriech-Hahnenfuß								0.3	1
Wiesen-Sauerampfer	1	1	2	1	2	3	2	2	1
Rote Lichtnelke				0.5	0.4	0.3		0.3	0.4
Weiß Lichtnelke	0.6	1	0.7	1	1	2	1	1	0.7
Gew. Löwenzahn	3	8	8	4	4	4	4	3	4
Feld-Ehrenpreis	0.5	0.3	0.5	0.4	0.3	1	0.6	1	0.3
Gamander-Ehrenpreis	0.4	0.5	0.5		1	1	0.3	0.7	2
Quendel-Ehrenpreis	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3		0.3	0.3	0.3
<b>S Kräuter</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>20</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>17</b>	<b>12</b>	<b>18</b>	<b>12</b>
Gesamtdeckung	112	105	109	114	113	113	116	118	117
<b>Artenanzahl</b>	<b>28</b>	<b>25</b>	<b>27</b>	<b>26</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>33</b>	<b>29</b>

Tab. 30 Pflanzenbestandsaufnahme der intensiven Dreischnittwiese

<b>WD - Versuch Gumpenstein Vers.-Nr:GL-710</b>							
Pflanzenbestandsaufnahme in Fl. %				bonitiert am: 03.06.2005			
<b>4 - Schnittflächen</b> 2,56 GVE/ha (2 ÖPUL GVE)	NPK+		Gülle		Rotte		Anb.k
	50	N+Bio	1:0,25	N+	Gülle	mist+	omp.+
	NPK+	N+Bio	Gülle	Biosal	Gülle	Jauch	Jauch
	50 N	salin	+50 N	in	1:1+5 0 N	e+50 N	e+50 N
<b>Prüf.-Nr.</b>	<b>41</b>	<b>42</b>	<b>43</b>	<b>44</b>	<b>45</b>	<b>46</b>	<b>47</b>
Proj. Deckung	92	94	93	94	94	95	96
offener Boden in %	15	11	10	10	11	12	11
WHV in cm	51	48	42	43	44	54	56
Gräser in Gewichtsprozent	66	65	58	56	55	57	67
Leguminosen in Gewichtsprozent	4	4	9	15	17	9	10
Kräuter in Gewichtsprozent	30	31	33	29	28	34	23
Rot-Straußgras	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3		
Wiesen-Fuchsschwanzgras	1	2	3	2	3	3	2
Glatthafer	18	16	10	9	16	6	8
Knautgras	7	7	11	6	10	12	10
Acker-Quecke	0.5	1	0.3	1	0.3	0.3	0.5
Wiesen-Schwingel	8	9	8	8	9	14	19
Rot-Schwingel	4	3	3	2	2	2	2
Wolliges Honiggras				1			
Italienisches Raygras	0.3						
Englisches Raygras	5	4	3	5	3	1	2
Wiesen-Lieschgras	3	3	4	4	5	1	2
Einjahrs-Rispe	1	1	2	1	1	0.6	1
Wiesen-Rispe	10	7	11	9	6	9	10
Gemeine-Rispe	3	3	7	7	4	6	3
Goldhafer	14	17	6	7	6	17	18
<b>S Gräser</b>	<b>73</b>	<b>73</b>	<b>67</b>	<b>61</b>	<b>62</b>	<b>70</b>	<b>77</b>
Gew. Hornklee	0.7	0.3	1	0.5	0.7	1	1
Rot-Klee	0.3	0.3	1	1	0.7	3	1
Weißklee	4	4	8	15	17	8	9
<b>S Leguminosen</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>10</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>11</b>	<b>11</b>
Echte Schafgarbe	1	2	2	0.3	0.5	2	1
Geißfuß		0.7	1	1	2	4	
Schmalwand	0.6	0.5	0.3	0.7	0.3		
Gänseblümchen	3	3	2	2	2	2	2
Wiesen-Glockenblume	1	0.7	1	0.3	0.3	1	0.7
Gew. Hirtentäschel		0.3	1	1	1	0.3	
Gew. Hornkraut	2	1	1	1	1	1	1
Großes Wiesen-Labkraut							0.7
Echte Gundelrebe	0.7		0.3	0.3	0.3	0.7	1
Weiß-Taubnessel						2	
Magerwiesen-Margerite	1						
Kuckuckslichtnelke	0.7	0.3					
Scharfer Hahnenfuß			0.7	0.3	0.3	0.3	
Kriech-Hahnenfuß				0.3			
Wiesen-Sauerampfer	1	0.7	1	0.5	0.7	1	0.3
Liegendes Mastkraut						0.3	0.3
Weiß Lichtnelke	3	3	1	1	2	0.5	0.7
Gew. Löwenzahn	24	23	26	26	21	25	20
Feld-Ehrenpreis	0.5	1	0.6	0.7	0.3	0.7	
Gamander-Ehrenpreis	1	0.5	0.3	0.3	0.3		
Quendel-Ehrenpreis	1	1	1	1	0.6	1	0.6
Gew. Acker-Stiefmütterchen					0.3		
<b>S Kräuter</b>	<b>40</b>	<b>37</b>	<b>37</b>	<b>36</b>	<b>33</b>	<b>42</b>	<b>29</b>
Gesamtdeckung	118	114	114	113	113	122	117
<b>Artenanzahl</b>	<b>31</b>	<b>30</b>	<b>31</b>	<b>33</b>	<b>32</b>	<b>30</b>	<b>26</b>

Tab. 31 Pflanzenbestandsaufnahme der intensiven Vierschnittwiese

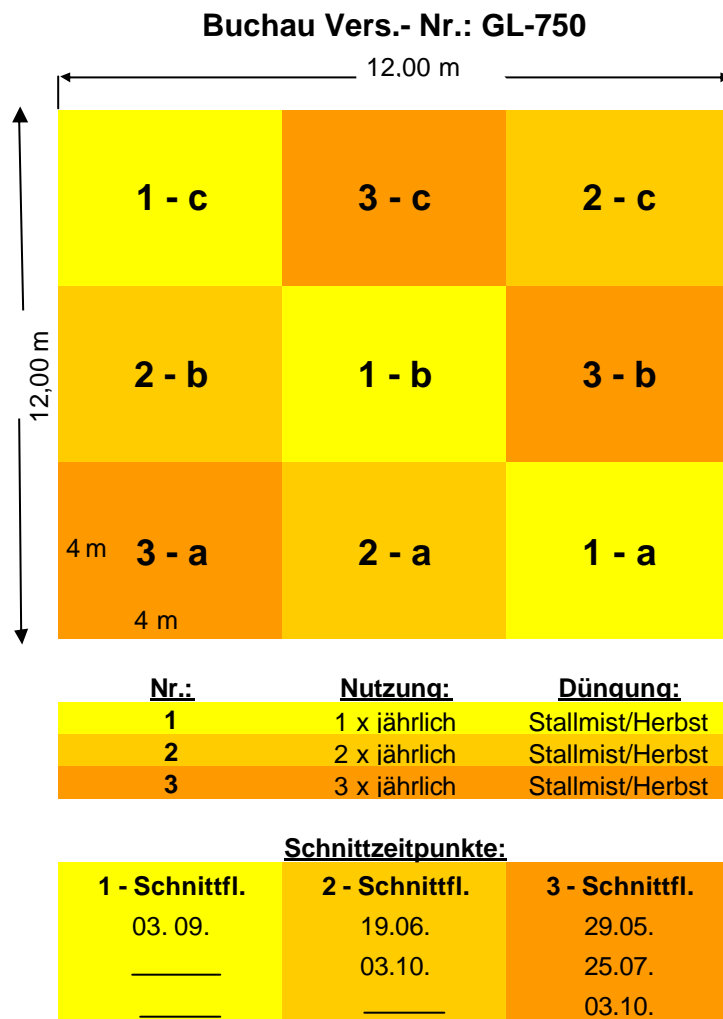


Abbildung 28: Versuchsstandort Admont – Buchau

Tab. 32 Mittelwertsvergleich der Biomasseerträge beider Standorte

	<b>STANDORT</b>	<b>n</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>Standardabweichung</b>	<b>Standardfehler des Mittelwertes</b>
Biomasse-Gesamtertrag	Extensiv	9	54,240	7,496	2,499
	Intensiv	28	70,962	12,236	2,551

Tab. 33 T-Test: Statistische Analyse der Biomassejahreserträge beider Standorte

		<b>Levene - Test d. Varianzgleichheit</b>		<b>T-Test für die Mittelwertgleichheit</b>						
		F	Signifik.	T	df	Sig. 2-seitig	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
									Untere	Obere
BMg es. ertrag	Varianzen sind gleich	1,1	,291	-3,808	30	,001	-16,72	4,391	-25,69	-7,75
	Varianzen sind nicht gleich	57		-4,683	23,9	,000	-16,72	3,571	-24,09	-9,35

Tab. 34 Scheffé-Prozedur: Statistische Analyse der Biomasseerträge in Bezug auf die Nutzungsintensität am extensiven Standort

	<b>Codierung</b>	<b>n</b>	<b>Untergruppe für Alpha = .05.</b>	
			<b>1</b>	<b>2</b>
<b>Scheffé-Prozedur(a)</b>	Extensive 1-Schnittwiese	3	45,965	
	Extensive 3-Schnittwiese	3	57,535	57,535
	Extensive 2-Schnittwiese	3		59,219
	Signifikanz		,067	,912

Die Mittelwerte für die in homogenen Untergruppen befindlichen Gruppen werden angezeigt.

a Verwendet ein harmonisches Mittel für Stichprobengröße = 3,000.



Tab. 35 Mittelwertsvergleich der Biomasseerträge am intensiven Standort

	<b>Codierung</b>	<b>n</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>STABW</b>	<b>Standardfehler des Mittelwertes</b>
Biomasse-Gesamtertrag	Intensive 3-Schnittwiese	12	63,029	7,89	2,28
	Intensive 4-Schnittwiese	12	81,561	11,79	3,40

Tab. 36 T-Test: Statistische Analyse der Biomassejahreserträge des intensiven Standortes

		<b>Levene-Test Varianzgleichheit</b>		<b>T-Test für die Mittelwertgleichheit</b>						
		F	Signifikanz	T	df	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
									Untere	Obere
Biomasse-Gesamtertrag	Varianzen sind gleich	,525	,476	-4,525	22	,000	-18,53	4,095	-27,02	-10,03
	Varianzen sind nicht gleich			-4,525	19,21	,000	-18,53	4,095	-27,09	-9,96

Tab. 37 Mittelwertsvergleich der Methanausbeute am intensiven und extensiven Standort ohne Berücksichtigung des Ernteverfahrens

	<b>Code für Standort (1 / 2)</b>	<b>n</b>	<b>MW</b>	<b>STABW.</b>	<b>Standardfehler des MW</b>
Methanausbeute	Extensiv	18	282,8317	23,91512	5,63685
	Intensiv	21	307,3274	31,12241	6,79147

Tab. 38 T-Test: Statistische Analyse der Methanausbeute des intensiven und extensiven Standortes

		<b>Levene-Test Varianzgleichheit</b>		<b>T-Test für die Mittelwertgleichheit</b>						
		F	Signifikanz	T	df	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
									Untere	Obere
Methan-Ausbeute	Varianzen sind gleich	2,715	,108	-2,720	37	,010	-24,49	9,00729	-42,74	-6,245
	Varianzen sind nicht gleich			-2,775	36,608	,009	-24,49	8,82599	-42,38	-6,606

Tab. 39 Scheffé-Prozedur: Statistische Analyse der Methanausbeute am extensiven Standort im Bezug auf die Ernteverfahren

	Code für Anwelkstufe	n	Untergruppe für Alpha = .05.	
			1	2
<b>Scheffé-Prozedur(a)</b>	Gärheu	6	252,4583	
	Anwelksilage	6		295,2892
	Nasssilage	6		300,7475
	Signifikanz		1,000	,614

Die Mittelwerte für die in homogenen Untergruppen befindlichen Gruppen werden angezeigt.

a Verwendet ein harmonisches Mittel für Stichprobengröße = 6,000.

Tab. 40 Scheffé-Prozedur: Statistische Analyse der Methanausbeute am intensiven Standort im Bezug auf die Ernteverfahren

	Code für Anwelkstufe	n	Untergruppe für Alpha = .05.	
			1	2
<b>Scheffé-Prozedur(a)</b>	Gärheu	7	266,4821	
	Anwelksilage	7		323,5729
	Nasssilage	7		331,9271
	Signifikanz		1,000	,281

Die Mittelwerte für die in homogenen Untergruppen befindlichen Gruppen werden angezeigt.

a Verwendet ein harmonisches Mittel für Stichprobengröße = 7,000.

Tab. 41 Mittelwertsvergleich der Methanausbeute beim Ernteverfahren der Nasssilage am intensiven und extensiven Standort

	Code für Standort	n	MW	STABW	Standardfehler des MW
Methanausbeute	Extensiv	6	300,7475	10,22256	4,17334
	Intensiv	7	331,9271	10,83540	4,09540

Tab. 42 T-Test: Statistische Analyse der Methanausbeute beim Ernteverfahren der Nasssilage am intensiven und extensiven Standortes

		Levene -Test der Varianzgleichheit		T-Test für die Mittelwertgleichheit						
		F	Signifikanz	T	df	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
									Untere	Obere
Methanausbeute	Varianzen sind gleich	,185	,675	-5,30	11	,000	-31,17	5,87574	-44,1	-18,2
	Varianzen sind nicht gleich			-5,332	10,868	,000	-31,17	5,84714	-44,06	-18,29

Tab. 43 Mittelwertsvergleich der Methanausbeute beim Ernteverfahren der Anwelksilage am intensiven und extensiven Standort

	Code für Standort	n	MW	STABW	Standardfehler des MW
Methanausbeute	Extensiv	6	295,2892	10,33770	4,22035
	Intensiv	7	323,5729	8,52356	3,22160

Tab. 44 T-Test: Statistische Analyse der Methanausbeute beim Ernteverfahren der Anwelksilage am intensiven und extensiven Standortes

		Levene -Test der Varianzgleichheit		T-Test für die Mittelwertgleichheit						
		F	Signifikanz	T	df	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
									Untere	Obere
Methanausbeute	Varianzen sind gleich	,659	,434	-5,413	11	,000	-28,2837	5,22506	-39,78	-16,78
	Varianzen sind nicht gleich			-5,327	9,762	,000	-28,28	5,30943	-40,15	-16,41

Tab. 45 Mittelwertsvergleich der Methanausbeute beim Ernteverfahren des Gärheus am intensiven und extensiven Standort

	Code für Standort	n	MW	STABW	Standardfehler des MW
Methanausbeute	Extensiv	6	252,4583	7,39981	3,02096
	Intensiv	7	266,4821	8,85027	3,34509

Tab. 46 T-Test: Statistische Analyse der Methanausbeute beim Ernteverfahren des Gärheus am intensiven und extensiven Standortes

		Levene-Test der Varianzgleichheit		T-Test für die Mittelwertgleichheit						
		F	Signifikanz	T	df	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
									Untere	Obere
Methanausbeute	Varianzen sind gleich	,302	,594	-3,06	11	,011	-14,02	4,57471	-24,09	-3,95
	Varianzen sind nicht gleich			-3,11	10,99	,010	-14,02	4,50731	-23,9	-4,10

Tab. 47 Mittelwertsvergleich der Methanausbeute beim Ernteverfahren der Anwelksilage am intensiven Standort in Bezug auf die Nutzungsintensität

	Code für Nutzungsintensität	n	MW	STABW	Standardfehler des Mittelwertes
Methanausbeute	3.Schnittnutzung	3	323,7333	10,96741	6,33204
	4.Schnittnutzung	4	323,4525	8,06644	4,03322

Tab. 48 T-Test: Statistische Analyse der Methanausbeute beim Ernteverfahren der Anwelksilage am intensiven Standorte in Bezug auf die Nutzungsintensität

		Levene -Test der Varianzgleichheit		T-Test für die Mittelwertgleichheit						
		F	Signifikanz	T	df	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
									Untere	Obere
Methanausbeute	Varianzen sind gleich	,318	,597	,039	5	,970	,2808	7,13021	-18,0	18,60
	Varianzen sind nicht gleich			,037	3,561	,972	,2808	7,50744	-21,6	22,17

Tab. 49 Mittelwertsvergleich der Methanausbeute beim Ernteverfahren der Nasssilage am intensiven Standort in Bezug auf die Nutzungsintensität

	Code für Nutzungsintensität	n	MW	STABW	Standardfehler des MW
Methanausbeute	3.Schnittnutzung	3	330,2667	12,10273	6,98752
	4.Schnittnutzung	4	333,1725	11,50375	5,75187

Tab. 50 T-Test: Statistische Analyse der Methanausbeute beim Ernteverfahren der Nasssilage am intensiven Standorte in Bezug auf die Nutzungsintensität

		Levene -Test der Varianzgleichheit		T-Test für die Mittelwertgleichheit						
		F	Signifikanz	T	df	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
									Untere	Obere
Methanausbeute	Varianzen sind gleich	,000	,996	-,324	5	,759	-2,905	8,97192	-25,96	20,157
	Varianzen sind nicht gleich			-,321	4,310	,763	-2,905	9,05038	-27,3	21,52

Tab. 51 Mittelwertsvergleich der Methanausbeute beim Ernteverfahren des Gärheus am intensiven Standort in Bezug auf die Nutzungsintensität

	Code für Nutzungsintensität	n	MW	STABW	Standardfehler des MW
Methanausbeute	3.Schnittnutzung	3	259,1950	8,32955	4,80907
	4.Schnittnutzung	4	271,9475	4,17984	2,08992

Tab. 52 T-Test: Statistische Analyse der Methanausbeute beim Ernteverfahren des Gärheus am intensiven Standorte in Bezug auf die Nutzungsintensität

		Levene-Test der Varianzgleichheit		T-Test für die Mittelwertgleichheit						
		F	Signifikanz	T	df	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
									Untere	Obere
Methanausbeute	Varianzen sind gleich	1,108	,341	-2,700	5	,043	-12,75	4,72269	-24,85	-,6124
	Varianzen sind nicht gleich			-2,432	2,761	,101	-12,75	5,24355	-30,28	4,7820

Tab. 53 T-Test: Statistische Analyse der Methanausbeute beim Ernteverfahren der Nasssilage am intensiven Standorte in Bezug auf die Nutzungsintensität

		Levene-Test der Varianzgleichheit		T-Test für die Mittelwertgleichheit						
		F	Signifikanz	T	df	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
									Untere	Obere
Methanausbeute	Varianzen sind gleich	,318	,597	,039	5	,970	,2808	7,13021	-18,04	18,609
	Varianzen sind nicht gleich			,037	3,561	,972	,2808	7,50744	-21,61	22,177

Tab. 54 Methanenergiewertmodelle 1

Modell	Gleichung	n	R2	Signifikanz	Kolinearität
MEWM 1 Wender	CH4 = 85,48 (±88,89) +0,48 (±0,20) <b>XA</b> -0,34 (±0,38) <b>XP</b> +3,02 (±0,50) <b>XL</b> +0,32 (±0,18) <b>XF</b>	39	0,6063	<0,0001	ok
MEWM 2 Wender	CH4 = 505,00 (±181,23) -0,76 (±0,47) <b>XP</b> +0,66 (±1,30) <b>XL</b> -1,27 (±0,65) <b>ADL</b> -0,51 (±0,30) <b>CEL</b> +0,2 (±0,32) <b>HCEL</b> -0,04 (±1,91) <b>STK</b> -0,69 (±0,57) <b>ZUC</b>	39	0,7635	0,0016	ok
MEWM 3 Wender	CH4 = 314,42 (±100,14) +0,07 (±0,47) <b>XA</b> -12,37 (±13,10) <b>XP/BE</b> +26,07 (±62,71) <b>XP/ADL</b> +60,36 (±120,50) <b>XL/ADL</b> -24,16 (±32,24) <b>CEL/ADL</b> +10,92 (±32,97) <b>HCEL/ADL</b> +38,21 (±190,91) <b>STK/ADL</b> -43,83 (±40,90) <b>ZUC/ADL</b>	39	0,7078	0,0142	ok
MEWM 1 Elementar	CH4 = 110,11 (±68,66) + 0,41 (±0,16) <b>XA</b> - 0,22 (±0,29) <b>XP</b> + 2,23 (±0,39) <b>XL</b> + 0,29 (±0,14) <b>XF</b>	39	0,5954	<0,0001	ok
MEWM 2 Elementar	CH4 = 399,43 (±127,61) - 0,63 (±0,33) <b>XP</b> + 0,96 (±0,92) <b>XL</b> - 0,63 (±0,46) <b>ADL</b> - 0,31 (±0,21) <b>HCEL</b> + 0,13 (±0,22) <b>CEL</b> - 0,10 (±1,34) <b>STK</b> - 0,13 (±0,40) <b>ZUC</b>	39	0,7639	0,0016	ok
MEWM 3 Elementar	CH4 = 296,66 (±77,74) + 0,14 (±0,36) <b>XA</b> - 7,21 (±10,17) <b>XP/BE</b> + 2,21 (±48,69) <b>XP/ADL</b> + 71,01 (±93,55) <b>XL/ADL</b> - 14,30 (±25,03) <b>HCEL/ADL</b> + 6,30 (±25,59) <b>CEL/ADL</b> + 3,37 (±148,21) <b>STK/ADL</b> - 26,42 (±31,75) <b>ZUC/ADL</b>	39	0,6645	0,0300	ok
MEWM 1 Wender (NS)	CH4=300,61(±49,04) -0,07 <b>XA</b> (±0,12) -0,26 <b>XP</b> (±0,25) +2,09 <b>XL</b> (±0,33) -0,06 <b>XF</b> (±0,10)	13	0,9018	0,0004	ok

Tab. 55 Methanenergiewertmodelle 2

Modell	Gleichung	n	R2	Signifikanz	Kolinearität
MEWM 1 Elementar (NS)	CH4= 308,45 (±78,37) + 0,02 <b>XA</b> (±0,20) - 0,31 <b>XP</b> (±0,41) + 1,72 <b>XL</b> (±0,53) - 0,09 <b>XF</b> (±0,16)	13	0,6856	0,0366	ok
MEWM 1 Wender (AW)	CH4= 217,78 (±62,87) + 0,005 <b>XA</b> (±0,13) + 0,06 <b>XP</b> (±0,22) + 1,75 <b>XL</b> (±0,27) + 0,11 <b>XF</b> (±0,12)	13	0,9212	0,0002	ok
MEWM 1 Elementar (AW)	CH4= 132,98 (±82,45) + 0,22 <b>XA</b> (±0,17) - 0,01 <b>XP</b> (±0,29) + 1,75 <b>XL</b> (±0,36) + 0,29 <b>XF</b> (±0,16)	13	0,8572	0,0018	ok
MEWM 1 Wender (GH)	CH4= 162,08 (±89,46) - 0,03 <b>XA</b> (±0,26) + 0,02 <b>XP</b> (±0,23) + 1,87 <b>XL</b> (±0,60) + 0,10 <b>XF</b> (±0,18)	13	0,7871	0,0085	ok
<b>MEWM 1 Elementa r (GH)</b>	<b>CH4= 301,38 (±97,74)</b> <b>- 0,44 XA (±0,29)</b> <b>+ 0,27 XP (±0,25)</b> <b>+ 0,16 XL (±0,66)</b> <b>- 0,13 XF (±0,20)</b>	<b>13</b>	<b>0,5412</b>	<b>0,1402</b>	<b>ok</b>
MEWM 1 Wender (S1)	CH4= 218,98 (±282,47) + 0,66 <b>XA</b> (±0,47) - 0,24 <b>XP</b> (±0,61) + 3,54 <b>XL</b> (±1,31) - 0,19 <b>XF</b> (±0,66)	15	0,6238	0,0310	ok
MEWM 1 Elementar (S1)	CH4= 271,30 (±162,43) + 0,35 <b>XA</b> (±0,27) - 0,27 <b>XP</b> (±0,35) + 2,40 <b>XL</b> (±0,75) - 0,18 <b>XF</b> (±0,38)	15	0,7033	0,0104	ok
MEWM 1 Wender (S2)	CH4= -15,69 (±147,25) + 1,04 <b>XA</b> (±0,44) - 0,37 <b>XP</b> (±0,77) + 3,46 <b>XL</b> (±1,44) + 0,38 <b>XF</b> (±0,33)	11	0,7317	0,0617	ok
MEWM 1 Elementar (S2)	CH4= -7,42 (±117,72) + 0,89 <b>XA</b> (±0,35) - 0,24 <b>XP</b> (±0,62) + 2,79 <b>XL</b> (±1,15) + 0,44 <b>XF</b> (±0,27)	11	0,7762	0,0373	ok
MEWM 1 Wender (S3_4)	CH4= 250,09 (±299,82) + 0,35 <b>XA</b> (±0,54) - 0,92 <b>XP</b> (±0,98) + 5,82 <b>XL</b> (±2,48) - 0,47 <b>XF</b> (±0,86)	13	0,8085	0,0057	ok
MEWM 1 Elementar (S3_4)	CH4= 115,49 (±335,67) + 0,53 <b>XA</b> (±0,60) - 0,18 <b>XP</b> (±1,10) + 3,13 <b>XL</b> (±2,77) - 0,01 <b>XF</b> (±0,96)	13	0,6254	0,0690	ok



Tab. 56 Methanenergiewertmodelle 3

Model	Gleichung	n	R2	Signifikanz	Kolinearität
MEWM1 Elementar (NS+AW)	CH4 = 257,77 ( $\pm 52,56$ ) + 0,08 XA ( $\pm 0,11$ ) - 0,26 XP ( $\pm 0,23$ ) + 1,77 XL ( $\pm 0,29$ ) + 0,03 XF ( $\pm 0,10$ )	26	0,7296	<0,0001	Ok
MEWM2 Elementar (NS+AW)	CH4 = 275,73 ( $\pm 115,92$ ) - 0,15 ( $\pm 0,33$ ) XP + 1,13 ( $\pm 0,78$ ) XL - 0,24 ( $\pm 0,40$ ) ADL + 0,05 ( $\pm 0,19$ ) HCEL + 0,04 ( $\pm 0,21$ ) CEL + 0,14 ( $\pm 1,11$ ) STK + 0,29 ( $\pm 0,36$ ) ZUC	18	0,7404	0,0226	ok
MEWM3 Elementar (NS+AW)	CH4 = 272,59 ( $\pm 70,35$ ) - 0,03 ( $\pm 0,28$ ) XA - 0,34 ( $\pm 11,11$ ) XP/BE - 4,66 ( $\pm 40,69$ ) XP/ADL + 22,44 ( $\pm 71,47$ ) XL/ADL - 8,07 ( $\pm 18,20$ ) HCEL/ADL + 10,42 ( $\pm 19,89$ ) CEL/ADL - 53,65 ( $\pm 105,66$ ) STK/ADL + 31,37 ( $\pm 26,89$ ) ZUC/ADL	17	0,7364	0,0838	ok