



Diplomstudiengang Landschaftsökologie

Diplomarbeit

Zum Thema:

Untersuchung zur Eignung der Feststoffvergärung zur Verwertung von Landschaftspflegeaufwüchsen binsenreicher Moorstandorte

vorgelegt von:	Michael Röhrdanz
Matrikelnummer	8355630
Betreuender Gutachter:	Prof. Dr. Rainer Buchwald
Zweiter Gutachter	Dr. agr. Jürgen Müller

Oldenburg, den 16.01.2009

Danksagung

Bedanken möchte ich mich bei meinem Erstbetreuer Rainer Buchwald für die Betreuung der Diplomarbeit und körperlichen Einsatz beim Binsenschnibbeln, meinem Zweitbetreuer Jürgen Müller für Unterkunft und Organisation der Versuchsdurchführung sowie Betreuung der Diplomarbeit, seiner Lebensgefährtin für die leckere Verpflegung ☺, den FöJs Katrin Lampe und Nadine Schröter, der Praktikantin Jystina, sowie Melanie Willen und Esther Timmermann für das tüchtige Binsenschnibbeln, der S.I.G. – DR.-ING Steffen GmbH in Lühburg für die Bereitstellung des Biogaslabors und Beratung vor Ort, den Technikern der Uni Rostock und Christian Jantzen für die Betreuung des Biogaslabors während meiner Abwesenheit sowie dem Team des Botanischen Gartens der Uni Oldenburg für die Trocknungs- und Lagermöglichkeiten. Hinzu kommen die fleißigen Korrekturleser. Zum Schluss meinen Eltern, die mir das Studium erst ermöglicht haben.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Danksagung.....	ii
Abbildungsverzeichnis	vi
Tabellenverzeichnis.....	viii
Abkürzungsverzeichnis	ix
1 Anlass und Ziel	1
1.1 Bedeutung der Landschaftspflege.....	2
1.2 Alternative Verwertung von Landschaftspflegematerial	3
2 Grundlagen der Feststoffvergärung.....	4
2.1 Begriffsbestimmung und Termini.....	4
2.2 Grundlagen des Vergärungsprozesses	5
2.2.1 Biogasbildung.....	5
2.2.2 Verfahren und Milieubedingungen.....	6
2.2.2.1 Stofffluss	7
2.2.2.2 Animpfung	7
2.2.2.3 Perkolation	8
2.2.2.4 Sauerstoff	8
2.2.2.5 Betriebstemperatur	9
2.2.2.6 pH-Wert.....	10
2.2.2.7 Nährstoffversorgung	11
2.2.2.8 Fördernde Substanzen und Eigenschaften.....	12
2.2.2.9 Hemmstoffe.....	12
2.3 Biogaszusammensetzung	13
2.4 Biogasaufbereitung	14
2.5 Biogasverwendung.....	15
2.6 Verwendung des Gärrests	17
3 Stand der Technik	18
3.1 Feststoffvergärung	18
3.1.1 Diskontinuierliche Verfahren	18
3.1.2 Kontinuierliche Verfahren.....	21
3.2 Flüssigvergärung.....	21
3.3 Trocken-Nass-Simultan-Vergärung.....	21
4 Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen	22
4.1 Bau und Erhaltung der Biogasanlage.....	23
4.2 Produktionskosten des Substrats.....	24
4.3 Biogasertrag des Substrats	24
4.4 Erlöse durch die Biogasnutzung	25

4.5 Ausgleichszahlungen	27
5 Material und Methoden	28
5.1 Grünland	28
5.1.1 Flächenauswahl	28
5.1.2 Beschreibung der Versuchsstandorte.....	28
5.1.3 Ernteverfahren und Zusammensetzung der Substrate	29
5.2 Biogasversuche	31
5.2.1 Beschreibung des Biogaslabors	31
5.2.2 Versuchsdurchführung	33
5.2.2.1 Beschickung der Fermenter.....	33
5.2.2.2 Tägliche Messungen und Prozesssteuerungen	33
5.3 Laboruntersuchung auf Inhaltsstoffe	34
5.4 Bodenuntersuchungen.....	35
5.5 Statistische Auswertung.....	35
6 Ergebnisse	36
6.1 Gaserträge der einzelnen Varianten	36
6.1.1 Standort Emsland.....	36
6.1.1.1 Varianten 2 Binse	36
6.1.1.2 Varianten 4 Mix	38
6.1.2 Standort Darß.....	40
6.1.2.1 Varianten A Gras.....	40
6.1.2.2 Varianten B Mix.....	42
6.1.2.3 Varianten C Binse	44
6.1.3 Zusammenfassung der Biogas- und Methanerträge	46
6.2 Methanerträge im Vergleich	47
6.2.1 Vergleich der Varianten des Standorts Emsland	47
6.2.2 Vergleich der Varianten des Standorts Darß	48
6.2.3 Vergleich der Standorte Emsland – Darß	49
6.3 Prozessverlauf und physikalische Substrateigenschaften	49
6.3.1 Verlauf der Anfahrphase	49
6.3.2 Verweilzeit	50
6.3.3 Strukturstabilität der Substratstöcke.....	51
6.3.4 Massendifferenz und Perkolat-Bindeverhalten der Substratstöcke	53
6.3.5 Dichte der Substratstöcke	54
6.4 Inhaltsstoffe der Substrate.....	55
6.5 Ergebnisse der Bodenuntersuchung.....	57
7 Diskussion	58
7.1 Diskussion der Ergebnisse	58
7.1.1 Gaserträge der einzelnen Varianten.....	58
7.1.2 Methanerträge im Vergleich.....	58
7.1.2.1 Vergleich der Varianten des Standorts Emsland.....	58
7.1.2.2 Vergleich der Varianten des Standorts Darß.....	59
7.1.2.3 Vergleich der Standorte Emsland – Darß.....	59
7.1.2.4 Vergleich mit Mais- und Grassilage.....	60
7.1.2.5 Vergleich mit Literaturangaben	62
7.1.3 Prozessverlauf und physikalische Substrateigenschaften	63

7.1.3.1 Verlauf der Anfahrphase	63
7.1.3.2 Verweilzeit	64
7.1.3.3 Strukturstabilität der Substratstöcke.....	64
7.1.3.4 Massendifferenz und Perkolat-Bindeverhalten der Substratstöcke	65
7.1.3.5 Dichte der Substratstöcke	65
7.1.4 Inhaltsstoffe der Substrate	65
7.1.5 Bodenuntersuchungen	66
7.1.6 Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Praxisanlagen	66
7.2 Methodendiskussion	67
7.2.1 Ernteverfahren	67
7.2.2 Biogasversuche	67
8 Ausblick	69
9 Zusammenfassung.....	70
Literaturverzeichnis.....	71
Erklärung	77
Anhang	

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Anaerober Abbau. Verändert nach FNR (2007).	6
Abbildung 2: Temperatureinfluss auf die Methanbildung (FNR 2007).	10
Abbildung 3: Abhängigkeit der N-Verbindungen (LUXENBURGER 2004).	13
Abbildung 4: Einteilung der Feststoffvergärungsverfahren. Verändert nach WEILAND (2006).	18
Abbildung 5: Boxen- bzw. Garagenfermenter mit Perkolation (WEILAND 2006).	20
Abbildung 6: Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen. Frei nach WIEGMANN et al. (2007).	22
Abbildung 7: Einflussfaktoren auf den Methanertrag (PROCHNOW et al. 2007 b).	25
Abbildung 8: Stromgestehungskosten und Erlöse bei Wärmenutzung (WIEGMANN et al. 2007).	27
Abbildung 9: Lage der Varianten 2, 4 des Emslandes (verändert nach BUCHWALD et al. 2006) und der Beprobungsfläche des Darß (MÜLLER 2008).	29
Abbildung 10: Ernte des Substrats (M. Röhrdanz).	30
Abbildung 11: Lageskizze des Biogaslabors.	31
Abbildung 12: Bild vom Fermenter (M. Röhrdanz) und schematische Darstellung (JANTZEN 2008).	31
Abbildung 13: Milligasähler, Trommelgasähler und Gasanalysegerät am Messplatz II (M. Röhrdanz).	32
Abbildung 14: Kumulierter Methan- und Biogasertrag sowie Methangehalt (mit Standardfehler) der Variante 2 a Binse aus dem Emsland nach einer Verweilzeit von 60 Tagen.	36
Abbildung 15: Kumulierter Methan- und Biogasertrag sowie Methangehalt (mit Standardfehler) der Variante 2 b Binse aus dem Emsland nach einer Verweilzeit von 60 Tagen.	37
Abbildung 16: Kumulierter Methan- und Biogasertrag sowie Methangehalt (mit Standardfehler) der Variante 4 a Mix aus dem Emsland nach einer Verweilzeit von 60 Tagen.	38
Abbildung 17: Kumulierter Methan- und Biogasertrag sowie Methangehalt (mit Standardfehler) der Variante 4 b Mix aus dem Emsland nach einer Verweilzeit von 60 Tagen.	39
Abbildung 18: Kumulierter Methan- und Biogasertrag sowie Methangehalt (mit Standardfehler) der Variante A 1 Gras vom Darß nach einer Verweilzeit von 60 Tagen.	40
Abbildung 19: Kumulierter Methan- und Biogasertrag sowie Methangehalt (mit Standardfehler) der Variante A 2 Gras vom Darß nach einer Verweilzeit von 60 Tagen.	41
Abbildung 20: Kumulierter Methan- und Biogasertrag sowie Methangehalt (mit Standardfehler) der Variante B 1 Mix vom Darß nach einer Verweilzeit von 60 Tagen.	42
Abbildung 21: Kumulierter Methan- und Biogasertrag sowie Methangehalt (mit Standardfehler) der Variante B 2 Mix vom Darß nach einer Verweilzeit von 60 Tagen.	43
Abbildung 22: Kumulierter Methan- und Biogasertrag sowie Methangehalt (mit Standardfehler) der Variante C 1 Binse vom Darß nach einer Verweilzeit von 60 Tagen.	44
Abbildung 23: Kumulierter Methan- und Biogasertrag sowie Methangehalt (mit Standardfehler) der Variante C 2 Binse vom Darß nach einer Verweilzeit von 60 Tagen.	45
Abbildung 24: Zusammenfassung der Biogas- und Methanerträge aller Varianten nach einer Verweilzeit von 60 Tagen.	46
Abbildung 25: Gegenüberstellung der substratspezifischen Biogaserträge aller Varianten mit Standartabweichung nach einer Verweilzeit von 60 Tagen.	47
Abbildung 26: Vergleich der Methanerträge der Varianten des Emslandes.	48
Abbildung 27: Vergleich der Methanerträge der Varianten des Darß.	48
Abbildung 28: Vergleich der Methanerträge der Varianten des Emslandes (EL) und Darß.	49
Abbildung 29: Erreichen eines stabilen pH-Wertes in Tagen aller Varianten in der Anfahrphase.	50
Abbildung 30: Exemplarischer täglicher Methanertrag der Variante 4 b aus dem Emsland mit Trendlinie und Bestimmtheitsmaß (R^2).	50

Abbildung 31: Höhenverlust der Substratsstöcke aller Varianten nach der Vergärung.....	51
Abbildung 32: Durchschnittlicher Höhenverlust der Substratsstöcke nach Varianten mit Minimal- Maximal- und Mittelwert zusammengefasst.	52
Abbildung 33: Stabilität der Substratsstöcke durch den Einfluss der Binse mit linearer Trendlinie und Bestimmtheitsmaß (R^2).....	52
Abbildung 34: Perkolat-Bindeverhalten der Substratsstöcke mit unterschiedlichen Binsenanteilen mit linearer Trendlinie und Bestimmtheitsmaß (R^2) nach der Vergärung.	54
Abbildung 35: Dichteeinfluss und Methanertrag der Varianten Mix mit linearer Trendlinie und Bestimmtheitsmaß (R^2) nach der Vergärung.	54
Abbildung 36: Dichteeinfluss und Methanertrag der Varianten Binse mit linearer Trendlinie und Bestimmtheitsmaß (R^2) nach der Vergärung.	55
Abbildung 37: Vergleich der erhobenen durchschnittlichen Methanerträge (mit Minimum-und Maximumwert) mit Mais- und Grassilage.....	61
Abbildung 38: Wassergehalt des Biogases in Abhängigkeit von der Temperatur. Berechnet nach der Magnus-Formel. (http://www.schlattmann.de/forum/viewtopic.php?t=16 . Zugriff am 08.06.2008).....	Anhang

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: pH-Optima für die anaerobe Biozönose. Frei nach FNR (2007); EDER et al. (2006).	10
Tabelle 2: Durchschnittliche Zusammensetzung von Biogas. Frei nach KALTSCHMITT & HARTMANN (2001).	14
Tabelle 3: Biogasverwendung und –produkte. Frei nach WEILAND (2000); FNR (2004).	15
Tabelle 4: Personalaufwand für den Betrieb von Modellbiogasanlagen. Frei nach FNR (2007).	24
Tabelle 5: Grund- und Zusatzvergütungen für Biogasanlagen nach EEG (2009).	26
Tabelle 6: Variantenherkunft und Bewirtschaftungsform.	29
Tabelle 7: Variantenbezeichnung und Zusammensetzung der Substrate.	30
Tabelle 8: Einwaagen der Varianten.	33
Tabelle 9: Begleitdaten für die Varianten 2 a und 2 b Binse aus dem Emsland.	37
Tabelle 10: Begleitdaten für die Varianten 4 a und 4 b Mix aus dem Emsland.	39
Tabelle 11: Begleitdaten für die Varianten A 1 und A 2 Gras vom Darß.	41
Tabelle 12: Begleitdaten für die Varianten B 1 und B 2 Mix vom Darß.	43
Tabelle 13: Begleitdaten für die Varianten C 1 und C 2 Binse vom Darß.	45
Tabelle 14: Vergleich der Biogas- und Methanerträge begleitend für Abb. 24 mit niedriger (grau unterlegt) und hoher Einbaudichte.	46
Tabelle 15: Massendifferenz und Verhältnis Einwaage/Rückwaage aller Varianten.	53
Tabelle 16: Untersuchung der Inhaltsstoffe aller Varianten.	56
Tabelle 17: Ergebnisse der Bodenuntersuchung.	57
Tabelle 18: Zusammenfassung von Versuchen zur Vergärung von Landschaftspflegematerial.	62

Abkürzungsverzeichnis

a	Jahr
Abb.	Abbildung
Akh/d	Arbeitskraftstunden pro Tag
BHKW	Blockheizkraftwerk
cm	Zentimeter
d	Tag
EEG	Erneuerbare Energien Gesetz
FM	Frischmasse
i.d.R.	in der Regel
Kap.	Kapitel
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
KWKK	Kraft-Wärme-Kühl-Kopplung
l	Liter
l_N	Normliter
mündl.	mündlich
NawaRo	Nachwachsende Rohstoffe
org.	organisch
oTS	organische Trockensubstanz
PK-Dünger	Phosphor-Kalium-Dünger
ppm	parts per million (Teile pro Million)
s.	siehe
Tab.	Tabelle
TS	Trockensubstanz
u.a.	unter anderem
u.ä.	und ähnliche
vgl.	vergleiche
z. T.	zum Teil
%_{Masse}	Masse-Prozent
%_{Vol.}	Volumen-Prozent

1 Anlass und Ziel

Vor dem Hintergrund der globalen Klimaerwärmung wird seitens der EU und der Bundesregierung zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen eine Verdoppelung des Anteils erneuerbarer Energien an der Energiebereitstellung bis zum Jahr 2010 angestrebt (FNR 2007). Dabei kommt der energetischen Nutzung von Biomasse eine besondere Rolle zu, da diese einen natürlichen Speicher darstellt und über verschiedene Verfahren nutzbar gemacht werden kann. Neben den physikalischen und chemischen Prozessen zur Umwandlung von Biomasse in andere Primärenergieträger besteht bei den biologischen die Möglichkeit der Energiegewinnung über die anaerobe Methanvergärung, die schon seit langem praktiziert wird (FNR 2007).

Um diese erneuerbaren Energien zu fördern, trat das Erneuerbare Energien Gesetz (EEG) zum 01. April 2000 in Kraft. Durch die Novellierung des EEG zum 01.01.2009 erhält die Stromerzeugung aus Biomasse zusätzliche Anreize u.a. für den Einsatz von Biomasse aus der Landschaftspflege.

Biomasse aus der Landschaftspflege fällt in vielen Schutzgebieten und geschützten Biotopen regelmäßig an. Da die landwirtschaftliche Bewirtschaftung auf marginalen Standorten teils aufgegeben wird oder zugunsten naturschutzfachlicher Belange extensiviert wird nimmt der Anteil an Landschaftspflegematerial deutlich zu (PROCHNOW et al. 2007 a). Hierzu zählen auch die Hoch- und Niedermoorgrünländer. Damit stellt sich die Frage, wie dieser Aufwuchs verwertet werden soll.

Bisher wurde der Aufwuchs in geringem Umfang in der extensivierten Tierhaltung genutzt, gemulcht, als Gründünger auf Ackerflächen ausgebracht oder kompostiert, was jedoch durch ökologische, technische und ökonomische Probleme begrenzt wird (PROCHNOW et al. 2007 a). Einer der alternativen Verwertungsmöglichkeiten ist die energetische Nutzung durch die anaerobe Methanvergärung mit Bildung des so genannten Biogases.

In den vergangenen Jahren wurden wenige Versuche unternommen, Biomasse aus der Landschaftspflege anaerob zu vergären. Dabei kam es oftmals zu Problemen verschiedener Art (WIEGMANN et al. 2007; PETERS 2004).

Aufgrund der Eignung der so genannten Feststoffvergärung für strukturreiche und stapelbare Substrate (WEILAND 2006), zu denen Biomasse aus der Landschaftspflege gezählt werden kann, ergibt sich die Frage, ob dies ein geeignetes Vergärungsverfahren darstellt.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit soll die Frage geklärt werden, in wiefern sich binsenreiches Mahdgut von Naturschutzflächen auf Moorstandorten in Niedersachsen (Landkreis Emsland) und Mecklenburg Vorpommern (Darß) für die anaerobe Methangewinnung im Feststoffvergärungsverfahren eignet.

Dabei soll ermittelt werden, wie viel Biogas in welcher Qualität mit binsenreichen Substraten gewonnen werden kann. Einen wichtigen Aspekt spielen einerseits die verschiedenen Grünlandstandorte, da angenommen werden kann, dass die Hoch- und Niedermoorgrünländer (je nach Bewirtschaftung) unterschiedliche Basengehalte im Oberboden haben, was Einfluss auf die Biogasbildung hat (EDER et al. 2006). Andererseits besteht die Theorie, dass die physikalische Lagerungsdichte des Substrats den Biogasbildungsprozess beeinflusst (GRONAUER & ASCHMANN 2003).

Zusätzlich wird auf die Grundlagen des Vergärungsprozesses, technischen Belange sowie Wirtschaftlichkeit eingegangen, um die Komplexität dieser Thematik dar zu stellen.

1.1 Bedeutung der Landschaftspflege

Durch vielfältige Eingriffe in Natur und Landschaft des Menschen wurde der von ihm einst geschaffene Lebensraum vieler Tier- und Pflanzenarten zerstört oder zumindest eingeschränkt (JEDICKE 1996). Um den verbliebenen Lebensraum zu erhalten bzw. neuen zu schaffen, den Tier- und Pflanzenarten damit das Überleben zu sichern, bedarf es einer Pflege und Entwicklung dieser Flächen bzw. Gebiete. Dabei kommen Maßnahmen wie Mahd, Beweidung, Brennen u.ä. zum Tragen.

Im Fall eines Pflegeschnitts, maximal zwei Schnitte pro Jahr und späte Erntezeitspannen (PROCHNOW et al. 2005), ist eine Abfuhr des Mahdguts unbedingt erforderlich, um die oligotrophe Vegetation zu erhalten (OECHSNER 2005). Aufgrund des späten Schnittzeitpunktes und der damit verbundenen Zunahme des Rohfasergehaltes sowie der Inhomogenität der Biomasse (PROCHNOW et al. 2005) wird überwiegend Heu gewonnen, das wegen der geringen Qualität für Futterzwecke kaum gefragt ist. Ein Großteil wird daher derzeit unter Energie- und Kostenaufwand kompostiert (OECHSNER 2005). Da bei unterlassener Pflege und Bewirtschaftung der Flächen neben negativen Folgen für Flora und Fauna auch mit einer Beeinträchtigung des Landschaftsbildes zu rechnen ist, werden verschiedene alternative Verwertungsmöglichkeiten des Aufwuchses von Grünlandflächen diskutiert (OECHSNER 2005; PROCHNOW et al. 2005). Eine kostengünstigere und zukunftssträchtige alternative Verwertung

des Aufwuchses von Grünland- und Naturschutzflächen stellt die energetische Nutzung durch die anaerobe Vergärung dar (WIEGMANN et al. 2007; OECHSNER 2005; PROCHNOW et al. 2005).

1.2 Alternative Verwertung von Landschaftspflegematerial

Neben der Verwertung von Landschaftspflegematerial für die Biogasgewinnung gibt es eine Reihe von alternativen Verwertungsmöglichkeiten. Bei einer Verfütterung des Mahdguts kommen nur Tiere mit geringeren Ansprüchen an den Futterwert in Frage (BRIEMLE et al. 1991), da der Futterwert für die Milchkuhhaltung zu gering ist (DIERSCHKE & BRIEMLE 2002). Darüber hinaus kann das Mahdgut als Einstreu bei Kleintieren und bei der Haltung von Pferden verwendet werden.

Andererseits besteht auch die Möglichkeit der thermischen Verwertung, was TONN et al. (2008), OECHSER (2005) und KALTSCHMITT & HARTMANN (2001) untersucht haben. Problematisch gestalteten sich hier die Feinstaubimmissionen, hohe Aschegehalte sowie eine Verschlackung der Brennkammern, wodurch dieses Verfahren nur unter hohem Technik- und Kostenaufwand realisierbar ist. Dies schränkt die Wirtschaftlichkeit stark ein.

2 Grundlagen der Feststoffvergärung

Im Folgenden soll zunächst eine Übersicht über das Verfahren der Feststoffvergärung, deren Einflussfaktoren sowie deren Produkte gegeben werden.

2.1 Begriffsbestimmung und Termini

Der Begriff der „Trockenvergärung“ oder „Trockenfermentation“ beinhaltet eine Reihe von verschiedenen Verfahren, die mit hohen Trockensubstanzgehalten betrieben werden und ohne Zugabe von Gülle auskommen können (FNR 2007). Der verwendete Begriff „trocken“, ist jedoch irreführend, da aus biologischer Sicht eine feste Unterteilung der Verfahren in Nass- und Trockenfermentation nicht möglich ist. Die an den Abbauvorgängen beteiligten Bakterienkulturen benötigen in beiden Fällen ein flüssiges Medium für ihre Fortbewegung und ihr Überleben (SCHOLWIN et al. 2006; GRONAUER & ASCHMANN 2004). Darüber hinaus war der Begriff in der Novelle des EEG (2004) nicht präzise definiert, weshalb dieser zur Novellierung 2009 gestrichen wurde.

Einigkeit bei den Experten besteht darin, dass bei der Trockenfermentation stapelbare Biomassen eingesetzt werden, die nicht pumpfähig sind und einen organischen Trockensubstanzgehalt (oTS) von mindestens 30 % aufweisen sollten (WEILAND 2006).

Dementsprechend werden im weiteren Verlauf dieser Arbeit die Begriffe **Feststofffermentation** oder **Feststoffvergärung** verwendet (s. auch EDER et al. 2006; KUSCH et al. 2006; SCHOLWIN et al. 2006; GRONAUER & ASCHMANN 2004).

Ursprünglich wurden die „Trockenfermentationsverfahren“ für die Verwertung von Bio- und Restabfällen entwickelt, später dann für die Vergärung von nachwachsenden Rohstoffen (NawaRo) angepasst (WEILAND 2006).

2.2 Grundlagen des Vergärungsprozesses

2.2.1 Biogasbildung

Die Entstehung von Biogas ist ein weit verbreiteter natürlicher Prozess. Dieser Vorgang findet u. a. in Mooren, auf dem Grund von Seen, in Güllegruben oder im Pansen von Wiederkäuern statt. Dabei wird beim anaeroben Abbauprozess von organischem Substrat, als ein Stoffwechselprodukt der Bakterien, neben Wärme oder neuer Biomasse Biogas gebildet (EDER et al. 2006; FNR 2004).

Das gebildete Biogas ist ein Gasgemisch, bestehend aus ca. zwei Dritteln Methan und ca. einem Drittel Kohlendioxid. Daneben befinden sich noch geringe Mengen an Wasserstoff, Schwefelwasserstoff, Ammoniak und anderen Spurengasen im Gasgemisch (Kap. 2.3) (KALTSCHMITT & HARTMANN 2001). Der Entstehungsprozess des Biogases ist ein komplexes Zusammenspiel unterschiedlicher Bakteriengruppen, die das organische Material von komplexen Strukturen zu Biogas abbauen. Um diesen Abbauprozess deutlich zu machen, kann dieser exemplarisch in mehrere Teilschritte unterteilt werden (Abb. 1) (EDER et al. 2006; FNR 2004).

Die komplexen Verbindungen des Ausgangsmaterials wie Fette, Eiweiße und Kohlenhydrate werden im ersten Schritt, der **Hydrolyse**, durch hydrolytische Bakterien in einfachere Verbindungen wie z.B. Aminosäuren, Zucker oder Fettsäuren zerlegt. Sind viele pflanzliche Gerüstsubstanzen wie Cellulose, Hemicellulose und Lignin vorhanden, ist die Hydrolyse der geschwindigkeitsbestimmende Prozess (KALTSCHMITT & HARTMANN 2001).

Die gebildeten Zwischenprodukte werden dann in der **Acidogenese** (sog. Versäuerungsphase) durch säurebildende Bakterien weiter zu niederen Fettsäuren (Essig-, Propion- und Buttersäure) sowie Kohlendioxid und Wasserstoff abgebaut. Dabei entstehen auch Nebenprodukte wie Milchsäuren und Alkohole.

Diese Zwischenprodukte werden anschließend in der **Acetogenese** (sog. Essigsäurebildung) durch Bakterien zu Vorläufersubstanzen des Biogases wie Essigsäure, Wasserstoff und Kohlendioxid umgesetzt.

Im letzten Schritt, der **Methanogenese**, wird aus den Zwischenprodukten der Acetogenese das Methan gebildet.

Die Bakterien der Acetogenese und Methanogenese bilden dabei eine Lebensgemeinschaft. Die säurebildenden Bakterien produzieren als Stoffwechselprodukt unter anderem Wasserstoff, können aber nur bei geringen Wasserstoffkonzentrationen überleben. Somit würden sich die Bakterien durch ihr eigenes Stoffwechselprodukt hemmen. Deswegen bilden sie mit den methanogenen Bakterien eine Symbiose, da diese den gebildeten Wasserstoff für ihren

Stoffwechsel und somit für die Produktion des Biogases benötigen (FNR 2007; EDER et al. 2006; FNR 2004).

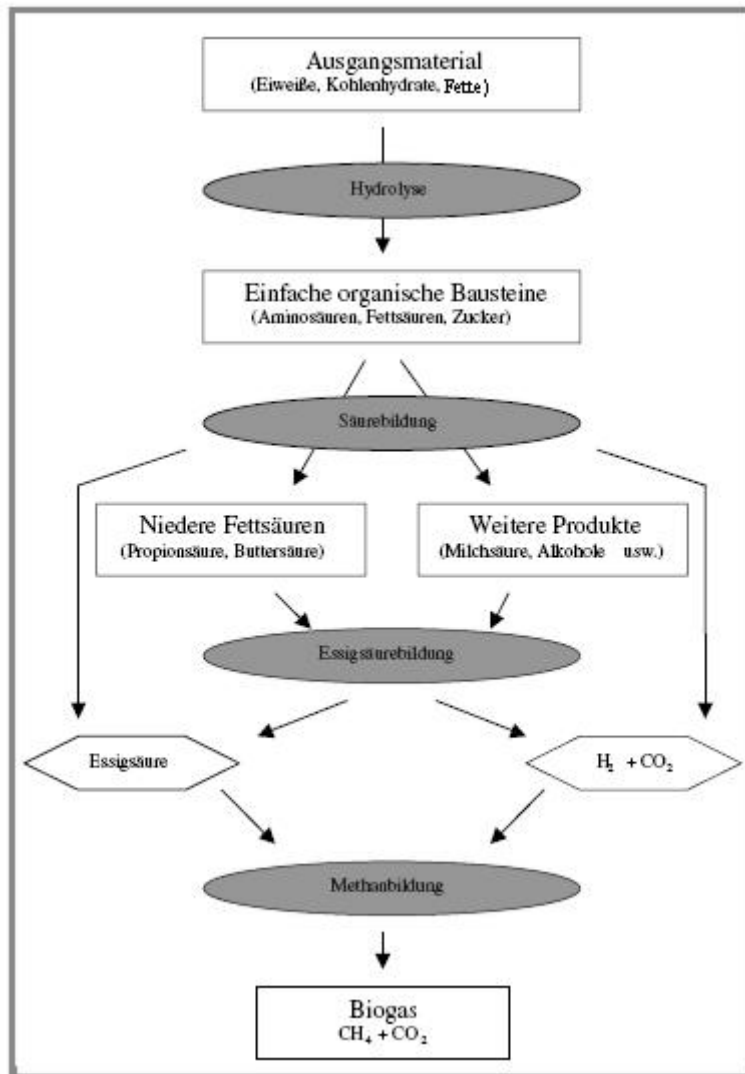


Abbildung 1: Anaerober Abbau. Verändert nach FNR (2007).

2.2.2 Verfahren und Milieubedingungen

Da die Bakterien spezielle Lebensbedingungen für den anaeroben Abbau benötigen, werden diese im einzelnen beschrieben. Dabei muss zwischen den so genannten kontinuierlichen und diskontinuierlichen Vergärungsverfahren unterschieden werden, da sich Besonderheiten in Bezug auf Substratzufuhr, Animpfung und Perkolation ergeben (FNR 2007).

2.2.2.1 Stofffluss

Bei den gegenwärtig praxisrelevanten Feststoffvergärungsanlagen handelt es sich um diskontinuierlich und kontinuierlich betriebene Verfahren (WEILAND 2006), die durch die Art des Stoffflusses unterschieden werden. Bei den kontinuierlichen wird das Substrat in zeitlichen Intervallen oder permanent in den Fermenter gegeben (vgl. auch Flüssigvergärung, Kap. 3.3). Bei den diskontinuierlichen Verfahren, auch **Batchverfahren** genannt, ist dies jedoch nicht möglich. Hier wird der Fermenter mit Substrat befüllt und verschlossen. Die Biogasbildung verläuft ohne weitere Substratzugabe, bis das eingebrachte Material vollständig abgebaut ist (FNR 2007; WEILAND 2006).

Vorteil des Batchverfahrens ist eine einfache verfahrenstechnische Gestaltung des Fermenters. Eintrag als auch Austrag des Gärsubstrats können maschinell erledigt werden. Es gibt keine beweglichen Teile im Fermenter, denn es muss weder der Fermenterinhalt gerührt, noch muss Substrat kontinuierlich eingebracht werden (LUTZ o. J.; WEILAND 2006). Nachteil dieses Verfahrens ist jedoch, dass der Fermentationsprozess nach jedem Befüllen des Fermenters erneut gestartet werden muss. Die Biologie wird daher jedes Mal neu aufgebaut, es bildet sich keine stationäre Fermenterbiologie (FNR 2007).

2.2.2.2 Animpfung

Die diskontinuierlichen Verfahren unterscheiden sich u.a. dadurch, dass das zu vergärende Material zu Beginn der Fermentation mit methanogenem Material beimpft werden muss, um die Biogasbildung einzuleiten (FNR 2007). Dabei gibt es gegenwärtig zwei gängige Verfahren. Zum einen die direkte Vermischung mit schon vergorenem Material. Zum anderen eine Animpfung des Materials mittels Perkulationsflüssigkeit (Perkolat) (Kap. 2.2.2.3), einer Bakterienlösung, mit der das zu vergärende Material berieselt wird (KRAFT et al. 2006; WEILAND 2006). In der Praxis hat sich jedoch gezeigt, dass, je nach eingesetztem Substrat, durch das alleinige Perkolieren des Substrates mit der Bakterienlösung der Biogasprozess nur schleppend anläuft (GRONAUER & ASCHMANN 2004), weshalb auch hier das frische Substrat mit bereits ausgefaultem Material vermischt werden muss. Die am Anfang des Prozesses starke Säurebildung wird somit abgepuffert und dadurch eine Hemmung der Methanbakterien vermieden. Dies ist aus Gründen der Prozessstabilität besonders wichtig (WEILAND 2006).

Doch dieser Punkt stellt den Anlagenbetreiber vor ein weiteres Problem: Die Mischung aus Substrat und Impfmateriel muss individuell eingestellt werden. Zur Gewährleistung eines stabilen Prozesses muss die Mischung bei einigen Substraten bis zu 85 % Impfmateriel

enthalten (FNR 2007, KRAFT et al. 2006), was die Wirtschaftlichkeit (Kap.4) in solchen Fällen stark einschränkt.

2.2.2.3 Perkolation

Bei den diskontinuierlichen Verfahren wird die Perkolutionsflüssigkeit (Definition s. Kap. 2.2.2.2) über dem Substrat versprüht, um eine stabile Methanbakterienpopulation und -dichte zu erhalten (WEILAND 2006). Weiterhin kann die Fermentertemperatur und die Befeuchtung des Substrats über das Perkolat geregelt werden (FNR 2007).

Die beim Anfahren des Vergärungsprozesses gebildeten Säuren reichern sich zunächst in der Perkolutionsflüssigkeit an, was durch die starke Versäuerungswirkung zu einer Hemmung des gesamten Prozesses führen kann (WEILAND 2006). Durch eine kreuzweise Führung des Perkolats kann die anfängliche Übersäuerung jedoch vermieden werden. Das saure Perkolat eines neu gestarteten Fermenters wird zur Perkolation eines Fermenters genutzt, der schon über eine stabile Biozönose verfügt (FNR 2007; WEILAND 2006). Die Perkolutionsflüssigkeit des eingearbeiteten Fermenters wird nun wiederum dem neu gestarteten Fermenter zugeführt (FNR 2007).

Um einen hohen Gasertrag und eine vollständige Ausnutzung des Substrats zu gewährleisten, ist eine möglichst gleichmäßige Verteilung des Perkolats über dem Substrat nötig. Je nach eingesetztem Substrat können sich durch oberflächigen Ablauf des Perkolats oder Kanalbildung sehr trockenen Zonen bilden, in denen kein oder nur ein relativ geringer Abbau des Substrats stattfindet (GRONAUER & ASCHMANN 2004). Bei strukturschwachen Substraten kann es dabei zu einem Verkleben oder Verstopfen des Perkolatkreislaufs kommen, weswegen ausreichend strukturstabile Substrate eingesetzt werden sollten (FNR 2007).

2.2.2.4 Sauerstoff

Methanbakterien sind Anaerobier. Dies bedeutet, dass sie auf eine sauerstofffreie Lebensumgebung angewiesen sind, um dauerhaft überleben zu können (BRAUN 1982). Doch bei jedem Feststoffeintrag kommt es substratbedingt zu geringen Sauerstoffeinträgen, die hemmend oder absterbend wirken können. Da die Methanbakterien jedoch in einer Gemeinschaft mit Bakterien aus den vorhergehenden Abbauschritten leben (Kap. 2.2.1), kommt der Biogasprozess nicht zum Erliegen (KALTSCHMITT & HARTMANN 2001; BRAUN 1982). Hierzu zählen auch die so genannten fakultativ anaerob lebenden Bakterien, die sowohl in einer Sauerstoffatmosphäre

als auch vollkommen ohne Sauerstoff überleben können. Somit sind diese Bakterien in der Lage, geringe Mengen an Sauerstoff zu verbrauchen, bevor sie vom Sauerstoff geschädigt werden (BRAUN 1982).

2.2.2.5 Betriebstemperatur

Im Allgemeinen laufen biochemische Reaktionen umso schneller ab, je höher die Umgebungstemperatur ist. Jedoch besitzen die an den Stoffwechselprozessen beteiligten Bakteriengruppen unterschiedliche Temperaturoptima innerhalb eines Temperaturfensters (KALTSCHMITT & HARTMANN 2001). Außerhalb dieser Temperaturbereiche kann es zu einer Hemmung oder im Extremfall zur unwiderruflichen Schädigung der beteiligten Bakterien kommen (FNR 2004). Die am Abbau beteiligten Bakterien lassen sich aufgrund ihrer Temperaturoptima in drei unterschiedliche Gruppen einteilen (Abb. 2). Dabei wird zwischen psychrophilen, mesophilen und thermophilen Bakterien unterschieden (KALTSCHMITT & HARTMANN 2001).

Psychrophile Bakterien haben ihr Temperaturoptimum bei ca. 25 °C. Ein Aufheizen des Fermenters bzw. Substrates ist nicht notwendig. Jedoch sind Abbauleistung und Gasproduktion stark reduziert (FNR 2004).

Mesophile Bakterien haben ihr Wachstumsoptimum zwischen 32 und 42 C°. Sie machen den größten Teil der bekannten Methanbakterien aus und sind in der Praxis am weitesten verbreitet. Es werden relativ hohe Gasausbeuten sowie eine gute Prozessstabilität erreicht (WEILAND 2000).

Thermophile Bakterien haben ihr Optimum im Temperaturbereich zwischen 50 und 57°C. Durch die hohe Prozesstemperatur wird hier eine teilweise höhere Gasausbeute erreicht (FNR 2004). Jedoch wird mehr Energie für das Aufheizen des Gärprozesses benötigt. Zudem ist der Gärprozess in diesem Temperaturbereich empfindlicher gegenüber Störungen oder Unregelmäßigkeiten in Bezug auf Substratzufuhr oder Betriebsweise (SCHATTNER & GRONAUER 2000).

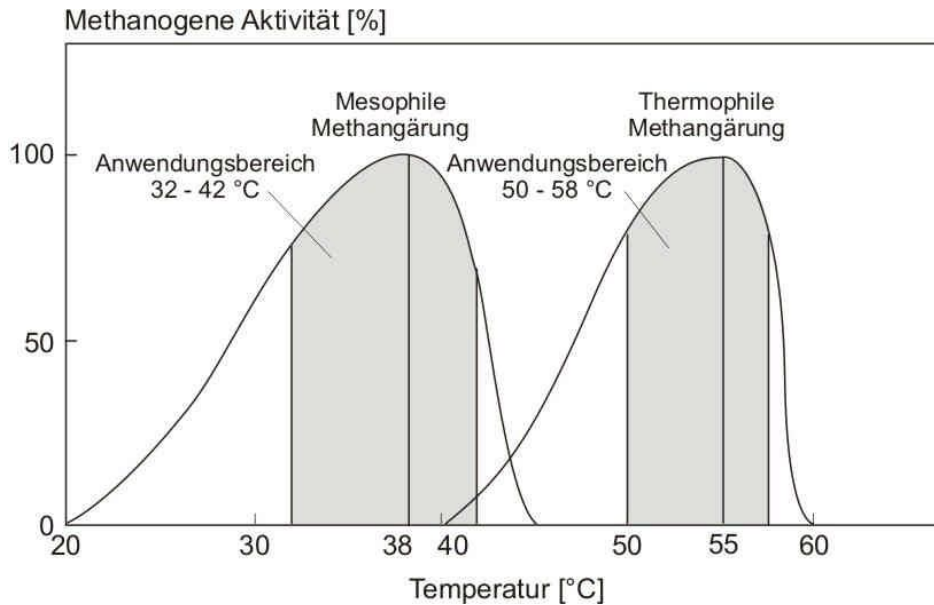


Abbildung 2: Temperatureinfluss auf die Methanbildung (FNR 2007).

2.2.2.6 pH-Wert

Veränderungen des pH-Wertes werden durch eine Vielzahl chemischer oder biochemischer Reaktionen hervorgerufen. Jede Bakterienart der einzelnen Prozessstufen der Biogasbildung hat seine optimalen Lebensbedingungen bei unterschiedlichen pH-Werten (FNR 2004).

Tabelle 1: pH-Optima für die anaerobe Biozönose. Frei nach FNR (2007); EDER et al. (2006).

Bakteriengruppen	pH-Optimum
hydrolisierende und säurebildenden Bakterien	4,5 – 6,3
essigsäurebildende und methanogene Bakterien	6,8 – 8

Wie in Tab. 1 zu erkennen ist, liegt das pH-Optimum für die hydrolisierenden und säurebildenden Bakterien bei pH 4,5 bis 6,3. Jedoch können sie durchaus bei geringfügig höheren pH-Werten noch überleben, ihre Leistung wird dadurch nur gering gehemmt (FNR 2004). Dagegen vertragen die essigsäure- und methanbildenden Bakterien nur einen pH-Wert im neutralen Bereich von 6,8 bis 8 (EDER et al. 2006). Daher muss dieser pH-Bereich im Fermenter eingehalten werden, um eine Prozessstabilität zu gewährleisten. Meist stellt sich der pH-Wert innerhalb des Systems jedoch automatisch durch die alkalischen und sauren Stoffwechselprodukte ein, die während des anaeroben Abbaus gebildet werden (KALTSCHMITT & HARTMANN 2001; BRAUN 1982).

Dieses Gleichgewicht ist aber empfindlich. Im Normalfall wird der pH-Wert durch das freigesetzte CO₂ im neutralen Bereich gepuffert (KALTSCHMITT & HARTMANN 2001). Sinkt der pH-Wert trotzdem ab (z.B. durch zu hohe Substratmengen), ist somit die Pufferkapazität erschöpft und die Methanbakterien werden in ihrer Stoffwechselaktivität gehemmt. Dadurch kommt es zu einer Anhäufung der Säuren aus der **Acidogenese**, der pH-Wert sinkt noch weiter ab. Der Prozess versauert zunehmend und die Methanbakterien stellen ihre Arbeit komplett ein (FNR 2004). In diesem Fall muss die Substratzufuhr sofort gestoppt werden, um den Methanbakterien die Möglichkeit zu geben, die vorhandenen Säuren abzubauen (EDER et al. 2006).

2.2.2.7 Nährstoffversorgung

Die Prozesse in einem Fermenter lassen sich mit den im Verdauungstrakt von Wiederkäuern ablaufenden Prozessen vergleichen. Die abzubauen organische Substanz liefert für die Vergärung Makro- und Mikronährstoffe (FNR 2004). Die Mikroorganismen benötigen für den Zellaufbau und Stoffwechsel die essentiellen Grundelemente Kohlenstoff (C) und Stickstoff (N) (EDER et al. 2006).

Um die Methanbakterien ausreichend mit Nährstoffen zu versorgen sollte das C:N:P:S-Verhältnis (Kohlenstoff-Stickstoff-Phosphor-Schwefel-Verhältnis) daher bei 600:15:5:1 liegen (Weiland 2001). Ein ausgewogenes Kohlenstoff/Stickstoffverhältnis (C/N-Verhältnis) liegt zwischen 10:1 und 40:1 (FNR 2007; THOMÉ-KOZMIENSKY 1995). Ist dieses Verhältnis zu weit (viel C und wenig N), kann der vorhandene Kohlenstoff nicht vollständig umgesetzt werden, es kommt zu negativen Erscheinungen hinsichtlich der mikrobiellen Proteinbildung (LUXENBURGER 2004), und das mögliche Methanpotenzial wird nicht vollständig genutzt. Umgekehrt kann es durch einen Stickstoffüberschuss zur Bildung von Ammoniak (NH₃) kommen, der schon in geringen Konzentrationen die Bakterien in Ihrem Stoffwechsel hemmt und sogar zum kompletten Zusammenbruch der gesamten Bakterienpopulation führen kann (Kap. 2.2.2.9) (BRAUN 1982).

Neben den „Hauptnährstoffen“ sind eine Reihe verschiedener Spurenelemente und weiterer Nährstoffe wie z.B. wie Eisen, Nickel, Kobalt, Selen, Molybdän und Wolfram für ihr Überleben gleichermaßen notwendig (BRAUN 1982). Diese werden zum Enzymbau benötigt (EDER et al. 2006).

Wie viel Methan sich aber letztendlich aus den eingesetzten Substraten gewinnen lässt, wird durch die Anteile an Proteinen, Fetten und Kohlenhydraten bestimmt (FNR 2007).

2.2.2.8 Fördernde Substanzen und Eigenschaften

Grundlegend werden leicht abbaubare Substanzen (z.B. einfache Zuckerverbindungen, Fette, Eiweiße; Kap.2.2.1) sowie Enzyme und Co-Enzyme als fördernd eingestuft. Substrate wie z.B. Getreideschrot oder Rüben werden aufgrund ihrer einfachen Struktur rasch aufgeschlossen und abgebaut (FNR 2007). Es kommt zu einer Belebung und Vergrößerung der Bakterienmasse (EDER et al. 2006).

Schwer abbaubare Substanzen können über Enzyme (z.B. Cellulasen) oder thermische Erhitzung sowie Ultraschall-Behandlungen aufgeschlossen und somit für Bakterien besser zugänglich gemacht werden (EDER et al. 2006). Zudem wirkt die Zugabe von Silikaten und Tonmineralen als Besiedlungsoberfläche für Mikroorganismen. Auch die Zugabe von Spurenelementen (Co-Enzyme) kann bei einem Mangel die Bakterienaktivität steigern (EDER et al. 2006). Jedoch ist die Wirkung wissenschaftlich umstritten.

Eine Substratzerkleinerung dient im Wesentlichen der Vergrößerung mikrobiologisch angreifbarer Oberflächen und damit der Beschleunigung des Abbauprozesses, aber nicht zwingend einer Steigerung der Gasausbeute (BAYLFU 2007). Durch eine ausgewogene Mischung an strukturreichen und –armen Substratbestandteilen wird die Verteilung des Perkolats verbessert (GRONAUER & ASCHMANN 2003) und erleichtert die Freisetzung des Biogases.

2.2.2.9 Hemmstoffe

Hemmstoffe sind Stoffe, die schon in geringen Mengen toxisch auf die Bakterien wirken und den Abbauprozess somit behindern (FNR 2004). Zur Beschreibung muss man die Hemmstoffe zunächst unterscheiden. Einige gelangen durch die Substratzugabe in den Fermenter, andere gehen als Zwischenprodukte der einzelnen Abbauschritte hervor (FNR 2004). Zudem können betriebstechnische Gründe wie z.B. Temperaturveränderungen (Kap. 2.2.2.5) oder pH-Wert Schwankungen (Kap. 2.2.2.6) für Hemmungen verantwortlich sein. Grundlegend kann jeder Inhaltsstoff eines in den Fermenter eingebrachten Substrats in hohen Mengen (durch eine übermäßige Substratzugabe) schädlich auf die Bakterien wirken (FNR 2004).

Dies gilt besonders für Substanzen wie Antibiotika, Desinfektions- oder Lösungsmittel, Herbizide, Salze oder Schwermetalle, die auch schon in geringen Mengen den Abbauprozess hemmen können (EDER et al. 2006). Aber auch lebenswichtige Spurenelemente können in zu hohen Konzentrationen toxisch auf die Bakterien wirken (FNR 2004). Da sich die Bakterien aber bis zu einem gewissen Maße auch an solche Stoffe anpassen können, ist die Konzentration nur

schwer zu bestimmen, ab der ein Stoff die Bakterien schädigt (KALTSCHMITT & HARTMANN 2001; BRAUN 1982). Es ist anzunehmen, dass auch Schimmelpilze mit ihren Toxinen die Bakterien direkt hemmen, z.B. bei schlecht siliertem Substrat (EDER et al. 2006).

Auch während des Gärprozesses werden Stoffe gebildet, die hemmend wirken können, insbesondere Ammoniak (NH_3) (BRAUN 1982). Je nach pH-Wert und Temperatur ändert sich die Konzentration zwischen NH_4 (Ammonium) und NH_3 (Abb. 3).

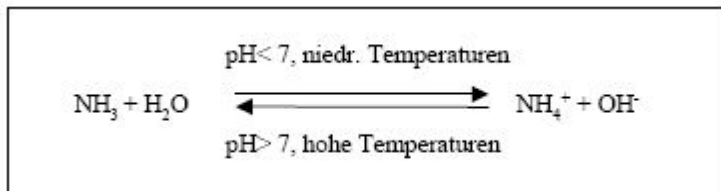


Abbildung 3: Abhängigkeit der N-Verbindungen (LUXENBURGER 2004).

Während Ammonium den meisten Bakterien als N-Quelle dient, wirkt Ammoniak schon in geringen Konzentrationen (ab 0,15 g/l) hemmend auf die Bakterien (BRAUN 1982). Je höher pH-Wert und Temperatur steigen, desto hemmender wirkt Ammoniak. Darüber hinaus kann auch eine Gesamtkonzentration an NH_3 und NH_4 ab ca. 3000 mg/l zu einer Hemmung des Biogasprozesses führen (FNR 2004).

Ein anderes Produkt des Gärprozesses ist Schwefelwasserstoff (H_2S). In gelöster Form wirkt dieser als Zellgift und kann schon in Konzentrationen von ca. 50 mg/l den Abbauprozess hemmen. Schwefel ist jedoch ebenfalls ein essentielles Spurenelement der methanbildenden Bakterien. Außerdem werden gelöste Schwermetalle durch Sulfidionen (S_2^-) gebunden und ausgefällt (BRAUN 1982).

Mögliche Hemmwirkungen verschiedener Stoffe hängen also von mehreren Faktoren ab. Eine Festlegung auf feste Grenzwerte ist daher nur schwer durchzuführen (FNR 2004).

2.3 Biogaszusammensetzung

Biogas ist ein Gasgemisch, das zu ca. einem Drittel aus Kohlendioxid (CO_2) und zu zwei Dritteln aus Methan (CH_4) sowie Wasserdampf und diversen Spurengasen besteht (Tab. 2) (KALTSCHMITT & HARTMANN 2001).

Tabelle 2: Durchschnittliche Zusammensetzung von Biogas. Frei nach KALTSCHMITT & HARTMANN (2001).

Bestandteil	Konzentration
Methan (CH ₄)	50-75 % Vol.
Kohlendioxid (CO ₂)	25-45 % Vol.
Wasser (H ₂ O)	2-7 % Vol. (bei 20-40 °C)
Stickstoff (N ₂)	<2 % Vol.
Sauerstoff (O ₂)	<2 % Vol.
Wasserstoff (H ₂)	<1 % Vol.
Schwefelwasserstoff (H ₂ S)	20-20000 ppm

In erster Linie ist der Methangehalt für den Betreiber einer Biogasanlage interessant. Also der prozentuale Anteil des Methans am Gasgemisch, da hieraus die zu gewinnende Energie resultiert. Der Gehalt an Methan im Biogas hängt jedoch von mehreren Faktoren wie beispielsweise Wassergehalt des Substrates, Gärtemperatur, Verweilzeit usw. ab (Kap. 2.2.2) (KALTSCHMITT & HARTMANN 2001).

Im Hinblick auf die Reinheit des Gasgemisches ist die Konzentration des Schwefelwasserstoffes (H₂S) wichtig. Diese sollte nicht zu hoch sein, da Schwefelwasserstoff schon in geringen Konzentrationen hemmend auf die abbauenden Bakterien wirkt (Kap. 2.2.2.9) (FNR 2004). Zudem führen hohe H₂S-Konzentrationen im Biogas zu Korrosionsschäden an Blockheizkraftwerken (Kap.3) (KALTSCHMITT & HARTMANN 2001).

2.4 Biogasaufbereitung

Biogas beinhaltet neben Methan (CH₄) und Kohlenstoffdioxid (CO₂) u. a. auch Spuren von Schwefelwasserstoff (H₂S) und Wasserdampf (Kap. 2.3) In Verbindung mit dem enthaltenen Wasserdampf kommt es zur Schwefelsäurebildung (FNR 2004), die bei der Verwertung des Biogases in Verbrennungsmotoren (Kap. 2.5) und anderen Bauteilen zu Korrosion führt (BAYLFU 2007). Aus diesen Gründen wird normalerweise eine Entschwefelung und Trocknung des Biogases durchgeführt.

Bei der Entschwefelung kommen unterschiedliche biologische, chemische und physikalische Entschwefelungsverfahren zum Einsatz. Zum Teil wird die Entschwefelung innerhalb des Fermenters durchgeführt, was viel Probleme mit sich bringt (z.B. O₂ Eintrag) (FNR 2004). Eine Entschwefelung außerhalb des Fermenters ist ebenfalls möglich (FNR 2004).

Da das Biogas zu 100% mit Wasserdampf gesättigt ist, muss dieser durch Kühlung als Kondensat ausgefällt werden. Neben dem Wasserdampf wird durch das Kondensat zusätzlich

ein Teil weiterer unerwünschter Inhaltsstoffe wie wasserlösliche Gase und Aerosole aus dem Biogas entfernt (FNR 2004). In Abhängigkeit von der verwendeten Nutzungstechnologie (Kap. 2.5) kann es allerdings notwendig sein, eine weitreichendere Gasaufbereitung durchzuführen.

2.5 Biogasverwendung

Biogas ist ein Energieträger, der nach entsprechender Aufbereitung sowohl zur Wärme- und Stromerzeugung als auch als Treibstoff genutzt werden kann (Tab. 3). Mit der anfallenden Wärme kann zusätzlich gekühlt (durch Kraft-Wärme-Kühl-Kopplung (KWKK)) oder landwirtschaftliche Substrate wie beispielsweise Getreide, getrocknet werden (BAYLFU 2007).

Tabelle 3: Biogasverwendung und –produkte. Frei nach WEILAND (2000); FNR (2004).

Biogasverwendung	Aufbereitung	Produkt
Gasheizkessel	Entschwefelung	Wärme
BHKW	Entschwefelung	Strom, Wärme
Mikrogasturbine	Gasaufbereitung	Strom, Wärme
Brennstoffzelle	Gasaufbereitung	Strom, Wärme
PKW, Motoren	Gasaufbereitung	Treibstoff
Gasnetz	Gasaufbereitung	Erdgas

Thermische Gasverwertung (Gasheizkessel)

Für die thermische Verwertung von Biogas werden handelsübliche Gasheizkessel eingesetzt, die in der Regel bivalent, d.h. mit Biogas oder Erdgas betrieben werden können (WEILAND 2000). Durch den im Biogas enthaltenen Schwefelwasserstoff ist mit Korrosion zu rechnen, weswegen eine Entschwefelung vorgenommen werden muss (FNR 2004).

Blockheizkraftwerke mit Verbrennungsmotoren (BHKW)

Bei Blockheizkraftwerken wird über die Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) gleichzeitig Kraft (bzw. Strom) und Wärme in einem Verhältnis von etwa 1:3 produziert (WIEGMANN et al. 2007). Laut FNR (2004) beträgt der elektrische Wirkungsgrad 34 - 40 %. Hier werden Verbrennungsmotoren (Gas-Ottomotoren, Zündstrahlmotoren), die mit einem Stromgenerator gekoppelt sind, verwendet (FNR 2004). Der Methangehalt des Biogases muss mindestens 45 %_{Vol.} betragen (FNR 2004). Die bei der Verbrennung entstehende Wärme wird jedoch oftmals nicht genutzt (FNR 2004). Auch in diesem Fall muss eine Entschwefelung des Biogases durchgeführt werden.

Nutzung in Mikrogasturbinen

Bei Mikrogasturbinen wird Luft aus der Umgebung angesaugt und mittels Verdichter auf hohen Druck verdichtet. Unter Zugabe von Biogas gelangt die Luft in eine Brennkammer, wo sie verbrannt wird (FNR 2004). Dabei wird eine Volumenausdehnung durch die stattfindende Temperaturerhöhung bewirkt. Die heißen Gase gelangen in eine Turbine, in der sie entspannt werden. Dadurch wird ein Generator zur Stromerzeugung angetrieben (FNR 2004). Unerwünschte Begleitstoffe müssen durch Gasreinigung und -trocknung rausgefiltert werden. Mikrogasturbinen können Methangehalte bereits ab 35 % vol. nutzen (DIELMANN 2001), haben aber oft einen geringeren elektrischen Wirkungsgrad (EDER et al. 2006).

Nutzung in Brennstoffzellen

Der Einsatz von Biogas in Brennstoffzellen stellt eine besonders zukunftssträchtige Nutzungsform dar. Die Umwandlung der chemischen Energie des Gases in Strom findet direkt statt (FNR 2004). Es werden hohe elektrische Wirkungsgrade bis zu 50 % bei nahezu emissionsfreier Betriebsweise garantiert (FNR 2004).

In einer Brennstoffzelle reagieren H_2 und O_2 unter Abgabe von elektrischer Energie und Wärme zu Wasser (H_2O) (EDER et al. 2006). Da für die elektrochemische Reaktion Wasser- und Sauerstoff in möglichst reiner Form benötigt werden, ist auch hier eine Gasaufbereitung bzw. Reformierung Voraussetzung. Nachteilig sind extrem hohe Investierungskosten von rund 12.000 Euro pro KW (EDER et al. 2006).

Treibstoff für Kraftfahrzeuge

Soll Biogas als Treibstoff für Fahrzeuge eingesetzt werden, muss es auch hier von H_2S , CO_2 und Wasserdampf gereinigt werden. Da es sich bei den angebotenen Fahrzeugen meist um Erdgasfahrzeuge handelt, ist eine Aufbereitung des Biogases auf Erdgasqualität notwendig (FNR 2004).

Einspeisung in das Erdgasnetz

Die Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz könnte eine weitere zukünftige Nutzungsmöglichkeit darstellen (FNR 2004). Auch hier müsste das Biogas auf Erdgasqualität aufgereinigt werden. Jedoch mangelt es vielfach an der Anbindung an das Erdgasnetz (WEILAND 2000) aufgrund der meist dezentralen Lage von Biogasanlagen.

2.6 Verwendung des Gärrests

Neben dem Energieertrag des Substrats darf im Bereich der landwirtschaftlichen Biogasanlagen auch der nach dem Prozess anfallende Gärrest nicht außer Acht gelassen werden. In den meisten Fällen werden die Gärreste als Wirtschaftsdünger verwendet (AGROPLAN 2006). Dabei ist ein Großteil des Stickstoffs langfristig pflanzenverfügbar (MÜLLER-LANGER et al. 2006) und dient somit zur Einsparung mineralischer Dünger und der entsprechenden Kosten. Eine andere zukunftssträchtige Nutzung ist die Herstellung von Pellets, die thermisch genutzt werden können (SCHOLWIN et al. 2006).

3 Stand der Technik

3.1 Feststoffvergärung

Bei den praxisrelevanten Anlagenkonzepten der Feststoffvergärung handelt es sich um diskontinuierlich und kontinuierlich betriebene Verfahren (Abb. 4).



Abbildung 4: Einteilung der Feststoffvergärungsverfahren. Verändert nach WEILAND (2006).

3.1.1 Diskontinuierliche Verfahren

Sämtliche diskontinuierlich betriebenen Verfahren zeichnen sich durch eine einfache technische Gestaltung des Fermenters aus. Für die Beschickung mit Substrat, Durchmischung und die Entnahme des Gärrückstands sind keine eigenen Eintrags- und Austrags- sowie Durchmischungssysteme erforderlich, was sie technisch sehr einfach und kostengünstig macht (FNR 2007; WEILAND 2006). Diese Verfahren eignen sich vorzugsweise für kleine bis mittlere Verarbeitungskapazitäten, da das Arbeitsvolumen des einzelnen Fermenters in der Regel 150 m^3 nicht übersteigt (WEILAND 2006). Je nach Art der Animpfung des frischen Materials wird in drei Grundtypen unterschieden (FNR 2007):

- **Perkolationsverfahren**
- **Aufstauverfahren**
- **Haufwerksverfahren**

Perkolationsverfahren

Bei den diskontinuierlich betriebenen Perkolationsverfahren wird i.d. R. ein container-, boxen- oder garagenförmiger Fermenter eingesetzt. Befüllung und Entleerung erfolgt stirnseitig über ein hydraulisch bewegtes, luftdichtes Tor (Abb. 5) (WEILAND 2006). Die Substratzufuhr erfolgt direkt mittels Radlader oder durch eine vom Abrollkipper eingeschobene Gitterbox. Zur Beschleunigung der Methanbildung wird dem frischen Substrat meist Gärrückstand aus der vorherigen Vergärung zugemischt (WEILAND 2006). Teilweise wird das Substrat kurzzeitig belüftet, um durch Bildung biogener Wärme auf die gewünschte Gärtemperatur zu kommen. Anschließend wird durch Außenluftabschluss und Perkolation die anaerobe Phase eingeleitet, die je nach Substrat zwischen 4 und 8 Wochen dauert (FNR 2007; WEILAND 2006).

Die Perkolation erfolgt periodisch oder kontinuierlich und wird einige Tage vor Beendigung des Abbauprozesses abgeschaltet, um eine Entwässerung zu erreichen. Vor Öffnung des Tores erfolgt entweder eine Spülung des Fermenters mit den Abgasen des BHKW oder mit Umgebungsluft, die über einen Biofilter abgezogen wird (FNR 2007). Um eine gleichmäßige und stabile Gasproduktion zu erreichen, müssen mehrere Fermenter zeitversetzt betrieben werden (WEILAND 2006). Der Behälterboden wird beheizt und verfügt zur Ableitung des Perkolats über Schlitze oder wird in einem Bodenschacht gesammelt. Das Perkolat wird in separaten, beheizten Perkolattanks gelagert (WEILAND 2006).

Durch die so genannte kreuzweise Führung des Perkolats kann eine Übersäuerung zu Beginn der Vergärung vermieden werden (Kap. 2.2.2.3). Dabei wird das mit organischen Säuren durchsetzte Perkolat eines neu gestarteten Fermenters zur Perkolation eines bereits gut eingearbeiteten Fermenters mit stabilem pH-Wert genutzt. Im Gegenzug wird die Perkolationsflüssigkeit des eingearbeiteten Fermenters mit geringem Säuregehalt wiederum in dem neu gestarteten Fermenter versprüht (FNR 2007; KUSCH et al. 2006; WEILAND 2006).

Eine wichtige Voraussetzung für die Funktionsfähigkeit der Perkolationsverfahren ist eine relativ grobe Feststoffstruktur mit ausreichendem Porenvolumen. Diese sollte während des anaeroben Abbaus nicht zusammenbrechen, um die Durchrieselung mit Perkolat aufrecht zu erhalten (WEILAND 2006) und das Ausgasen zu ermöglichen. Daher ist die Höhe des Substrathaufens auf 2-3 m begrenzt, da ansonsten aufgrund des statischen Druckes die unteren Substratschichten zu stark verdichtet würden (WEILAND 2006). Erste Verfahren dieser Bauart sind bereits im Praxiseinsatz und werden bzw. wurden mit Landschaftspflegematerial betrieben (CARIUS 2007; GRONAUER & ASCHMANN 2003).

Das 3A-Verfahren, bei dem das Substrat in einem wannenförmigen Reaktor zeitlich und räumlich voneinander getrennt zuerst aerob, dann anaerob und wiederum aerob behandelt wird (daher 3A-Verfahren), nutzt ebenfalls die kreuzweise Führung des Perkolats für die Vergärung

(WEILAND 2006). Das 3A-Verfahren wurde bisher lediglich in zwei Containerlaboren erprobt und stellt noch keine marktreife Technik dar (FNR 2007).

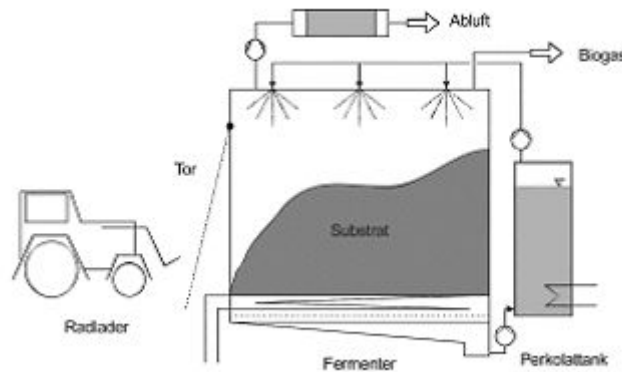


Abbildung 5: Boxen- bzw. Garagenfermenter mit Perkolation (WEILAND 2006).

Aufstauverfahren

Aufstauverfahren unterscheiden sich gegenüber Perkulationsverfahren darin, dass das stapelfähige Gärgut nicht perkoliert, sondern mit zwischengespeicherter Prozessflüssigkeit periodisch überstaut und gleichzeitig beimpft wird (WEILAND 2006). Mit dieser Technik sollen die Probleme der ungleichmäßigen Verteilung des Perkolats im Substratstapel vermieden werden. Durch das Überstauen des Gärguts mit Flüssigkeit besteht jedoch die Gefahr, dass das Gärgut aufschwimmt. Daher müssen nach Befüllung des Fermenters spezielle Einbauten eingebracht werden, um ein Aufschwimmen der Biomasse zu verhindern, wodurch der Arbeitsaufwand erschwert wird (KUSCH & OECHSNER 2004). Auch hier handelt es sich um keine marktreife Technik (WEILAND 2006).

Haufwerksverfahren

Bei dieser Variante erfolgt die Vergärung ohne Gegenwart externer Flüssigkeiten. Zum Animpfen wird das Gärgut vor der Vergärung mit bereits ausgefaultem Feststoff intensiv vermischt (WEILAND 2006). Um eine Übersäuerung des Gemisches vorzubeugen, muss das Verhältnis zwischen Frischsubstrat und Animpfmaterial sorgfältig ausgewählt werden. Eine spätere Korrektur der Milieubedingungen ist nicht möglich. Dabei muss der Anteil an Impfmateriel mindestens 50 % betragen, wodurch die Ausnutzung des Fermentervolumens entsprechend sinkt (WEILAND 2006). Als Fermenter können Boxen- oder Garagenfermenter eingesetzt werden. Die Einhaltung einer konstanten Temperatur im Substratstapel mittels Wand- und Bodenheizung stellt hierbei das Hauptproblem dar (WEILAND 2006).

3.1.2 Kontinuierliche Verfahren

Bei den kontinuierlichen Verfahren sind wie bei der Flüssigvergärung (Kap. 3.2) stets Dosier- und Entnahmeverrichtungen erforderlich. Die Durchmischung des Fermenterinhalts erfolgt bei diesen Verfahren entweder mechanisch, hydraulisch oder pneumatisch (WEILAND 2006). Dabei wird keine vollständige Durchmischung angestrebt, um für das gesamte zugeführte Substrat eine möglichst gleiche Verweilzeit im Fermenter zu erreichen (FNR 2007). Kontinuierlich betriebene Anlagen sind vor allem für Fermentergrößen bis zu 2.000 m³ Arbeitsvolumen geeignet (WEILAND 2006).

Aufgrund des höheren Technologieaufwands spielen die kontinuierlichen Trockenvergärungsverfahren am Markt bisher nur eine untergeordnete Rolle (WEILAND 2006). Aus diesem Grund und der nur mäßigen Referenzliteratur wird auf diese Verfahren nicht näher eingegangen.

3.2 Flüssigvergärung

Im Gegensatz zur Feststoffvergärung werden bei der Flüssigvergärung (oder oft als Nassvergärung bezeichnet) flüssige und pumpfähige Substrate, meist NawaRos wie beispielsweise Mais, mit einem Anteil an org. Trockensubstanz von weniger als 30%_{Masse} verwendet (WEILAND 2006). Dabei wird dem flüssigen Gärsubstrat meist kontinuierlich Biomasse zugeführt, die unter ständiger Durchmischung des Fermenterinhalts vergoren wird (KUSCH et al. 2006). Siehe hierzu auch Kap. 4.

Dieses Verfahren wurde ebenfalls für die Vergärung von Landschaftspflegematerial erwogen, scheiterte jedoch an der Tatsache, dass die strukturreiche und faserige Biomasse u.a. durch Lufteinschlüsse auftrieb und sogenannte Schwimmdecken bildete und daher mit diesem Verfahren nicht bzw. technisch nur schwer und aufwändig vergärbar war (WIEGMANN et al. 2007; RODE et al. 2005).

3.3 Trocken-Nass-Simultan-Vergärung

Bei diesem Verfahren handelt es sich um eine Kombination aus der Feststoffvergärung mit der Flüssigvergärung (FNR 2007). Das Perkolat wird nach dem Durchrieseln des Feststofffermenters einem Flüssigfermenter zugeführt, der gleichzeitig als beheizter Perkolatpeicher dient. Hier wird die organische Fracht des Perkolats zu Biogas abgebaut. Die Gasbildung findet sowohl im Feststofffermenter als auch im Flüssigfermenter statt (FNR 2007).

4 Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen

Im Folgenden soll eine Übersicht über die Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen mit Landschaftspflegegut als Substrat gegeben werden. Da es jedoch kaum praktische Erfahrungen mit der energetischen Nutzung von Biomasse aus der Biotoppflege gibt (GRONAUER & ASCHMANN 2003) und die vorhandene Literatur sehr dünn ist, kann nur auf wenige Werke verwiesen werden. Zudem steigen die Stromgestehungskosten* kontinuierlich, wodurch Wirtschaftlichkeitsberechnungen einzelner Literaturquellen als veraltet angesehen werden können.

Die Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen ist grob betrachtet von vier Faktoren abhängig (Abb. 6)

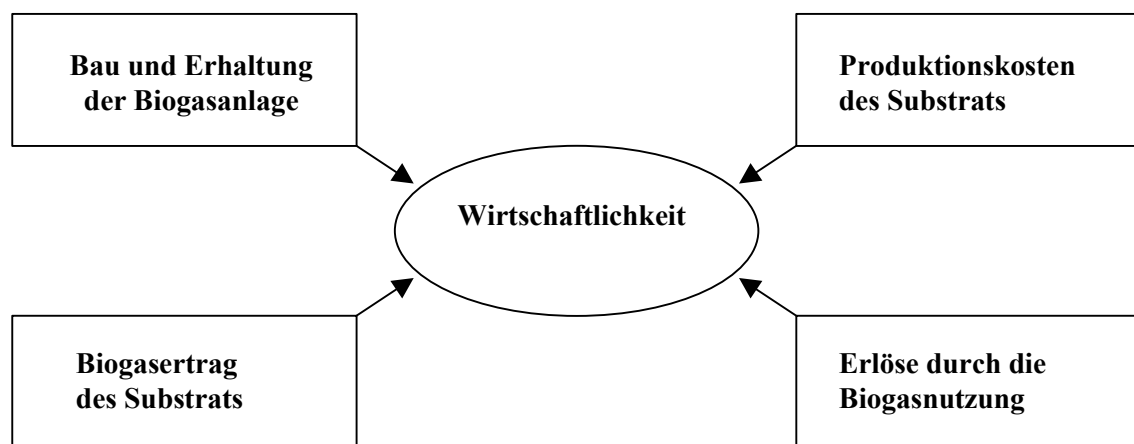


Abbildung 6: Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen. Frei nach WIEGMANN et al. (2007).

- **Bau und Erhaltung der Biogasanlage**

Hierzu gehören Bau und Wartung der Anlage, Technik, BHKW, Eigenverbrauch der Anlage an Strom und Wärme sowie Personalkosten, Betriebsmittel, Kosten für Versicherung u.ä. (WIEGMANN et al. 2007).

- **Produktionskosten des Substrats**

Zu den Produktionskosten gehören Mahd, Wenden, Zerkleinern und Transport des Substrats, Größe der zu befahrenden Flächen, Befahrbarkeit des Bodens, Geländegegebenheiten, Länge der Transportwege u.ä. (WIEGMANN et al. 2007).

* Stromgestehungskosten bezeichnen die Kosten, die für die Energieumwandlung von einer anderen Energieform in elektrischen Strom notwendig sind (FNR 2007).

- **Biogasertrag des Substrats**

Der Biogasertrag kann als einer der entscheidenden Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeit genannt werden (WIEGMANN et al. 2007). Hierbei spielen Gasqualität und –quantität eine wichtige Rolle.

- **Erlöse durch die Biogasnutzung**

Hierunter fallen die finanziellen Erlöse, die durch die Biogasnutzung erzielt werden können. Dazu zählen die Vergütung von elektrischem Strom und die Nutzung der bei der Verstromung anfallenden Wärme (WIEGMANN et al. 2007).

Ziel ist es, eine alternative Verwertungsmöglichkeit von Landschaftspflegematerial durch die Vergärung zu Biogas zu schaffen. Dabei steht im Vordergrund die Kosten für die Landschaftspflege zu senken, indem das Mahdgut nicht entsorgt, sondern energetisch genutzt wird. Im besten Fall könnten Gewinne erzielt werden. Im Folgenden werden Möglichkeiten erläutert, um diesem Ziel näher zu kommen. Dabei steht das Garagenverfahren, durch seine besondere Eignung und Referenzen für Landschaftspflegematerial, im Vordergrund.

4.1 Bau und Erhaltung der Biogasanlage

Nach Berechnungen von LEMMER & OECHSNER (2001) sowie FNR (2000) lohnt sich der Einsatz von Gras (im allgemeinen Sinn) nur dann, wenn eine bereits ausreichend große Anlage bzw. ein leerstehendes Fahrsilo vorhanden ist. Somit können Neubaukosten für ein Silo eingespart werden. Grundsätzlich gilt: Je mehr vorhandene Bausubstanz und Technik integriert wird, desto günstiger wird die Biogasanlage (SCHOLWIN et al. 2006).

Der Energiebedarf der Garagenverfahren ist aufgrund der geringeren technischen Ausstattung nach Herstellerangaben mit etwa 1 % Eigenstromanteil und 20 % Wärmeverbrauch zu Grunde gelegt (FNR 2007). Verglichen mit dem Bedarf der Flüssigvergärung von rund 10 % Strom- und 30 % Wärmebedarf (FNR 2007) ist das Verfahren als energetisch günstiger anzusehen. Trotz der höheren Anlageninvestitionskosten des Garagenverfahrens (gegenüber der Flüssigvergärung) werden höhere Erlöse durch den geringeren Eigenenergiebedarf erzielt (FNR 2007).

Was den täglichen Arbeitsstundenaufwand betrifft, so ist dieser beim Feststoff- und Flüssigverfahren nahezu identisch (Tab. 4). Größter Arbeitsaufwand beim Garagenverfahren ist hier das Be- und Entladen (FNR 2007).

Tabelle 4: Personalaufwand für den Betrieb von Modellbiogasanlagen. Frei nach FNR (2007).

Anlagengröße	150 kW	250 kW	500 kW
Verfahren	Akh/d*	Akh/d*	Akh/d*
Garage	2,5	3,0	3,5
Flüssig	2,5	3,0	4,0

Ist das Gelände schwer zugänglich (z.B. starke Hangneigung, schlechte Befahrbarkeit des Bodens), wäre optional die Pflege von Hand oder der Einsatz spezieller Maschinen nötig (WIEGMANN et al. 2007), was kostenintensiver wäre.

4.2 Produktionskosten des Substrats

WIEGMANN et al. (2007) hat die Bereitstellungskosten von Naturschutzflächen des Freisinger Moores untersucht. Dabei wurden Arbeitsschritte wie Mähen, Wenden, Festfahren sowie Bergen und Transport betrachtet. Als Flächen wurden gedüngtes und ungedüngtes Grünland, das Kerngebiet, sowie klein strukturierte Wiesen mit verschiedenen Transportdistanzen gewählt. Ein wichtiges Ergebnis war, dass steigende Transportkosten eine untergeordnete Rolle einnahmen. Dagegen war eine deutliche Abhängigkeit der Bereitstellungskosten vom Flächentyp zu erkennen. Besonders kleinstrukturierte Wiesen mit geringen Flächenenerträgen (sprich geringer Biomassebildung) ließen die Bereitstellungskosten stark ansteigen.

Zusätzlich hat WIEGMANN et al. (2007) auch die Bereitstellungskosten und Stromerlöse für unterschiedliche Silagen miteinander verglichen. Hierbei ergab sich, dass Grassilage von gedüngten Flächen des Freisinger Moores trotz geringerer Biogasausbeuten zu höheren Erlösen führen kann, als der Einsatz von landwirtschaftlich erzeugter Grassilage. Dies wurde damit begründet, dass, gegenüber Flächen landwirtschaftlich erzeugter Grassilage, für die Flächen des Freisinger Moores keine Pachtkosten veranschlagt wurden, was die Kosten entscheidend senkt. Auch SCHOLWIN et al. (2006) empfiehlt den Einsatz kostengünstigerer Substrate, wie beispielsweise Ernterückstände, um den Kostenanteil der Biogasanlage zu reduzieren. Hierzu kann auch das Landschaftspflegematerial gezählt werden.

4.3 Biogasertrag des Substrats

Eine weitere wichtige Größe bei der Wirtschaftlichkeitsanalyse einer Biogasanlage ist die Höhe des Biogasertrags (WIEGMANN et al. 2007). Dabei spielen Gasvolumen und –qualität ein

* Akh/d = Arbeitskraftstunden pro Tag

entscheidende Rolle. Diese sind wiederum von vielen Faktoren abhängig wie beispielsweise der Art und Zusammensetzung der Biomasse, des Erntezeitpunkts, der Verweilzeit im Fermenter u.ä.. Eine Übersicht gibt hier Abb. 8. Weitere Faktoren sind in Kap. 2.2 erläutert.

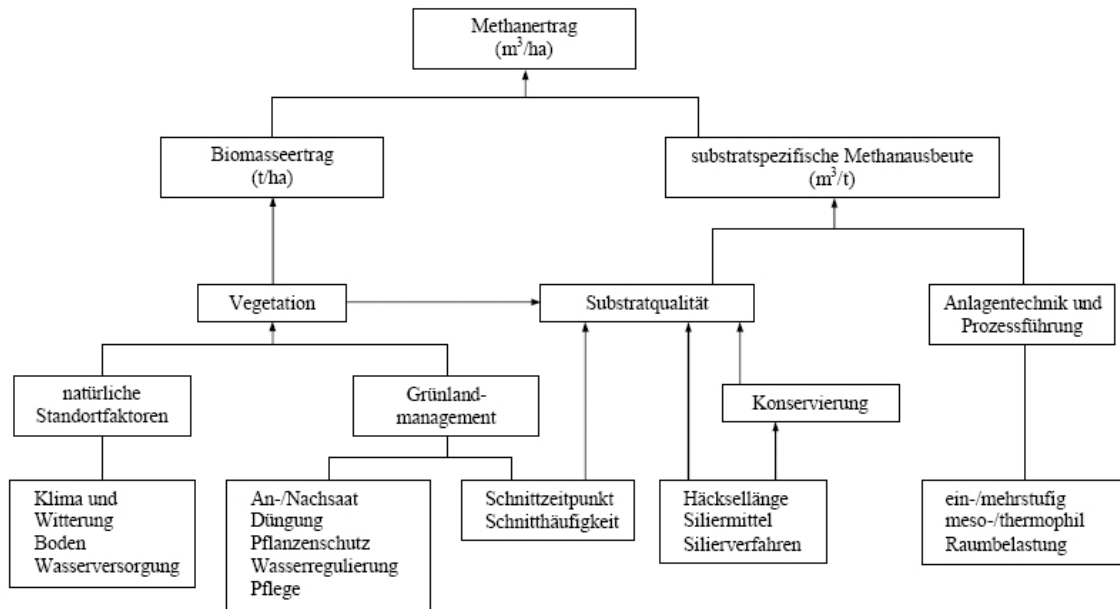


Abbildung 7: Einflussfaktoren auf den Methanertrag (PROCHNOW et al. 2007 b).

4.4 Erlöse durch die Biogasnutzung

Das produzierte Biogas wird i.d.R. in einem BHKW verstromt. Der elektrische Strom wird dabei ins Stromnetz durch das EEG (Erneuerbare Energien Gesetz) zu festen Sätzen eingespeist. Je nach Substrat und Vergärungstechnik wird der Strom neben der Grundvergütung über verschiedenen Boni vergütet (EEG 2009):

- bei der Einhaltung von Immissionsvorschriften (Immissions-Bonus)
- beim Einsatz nachwachsender Rohstoffe (NawaRo-Bonus)
- beim Einsatz von Landschaftspflegematerial (Landschaftspflege-Bonus)
- bei einer Realisierung der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK-Bonus)
- beim Einsatz innovativer Technologien (Technologie-Bonus)
- beim Einsatz von Gülle (Gülle-Bonus)

Tabelle 5: Grund- und Zusatzvergütungen für Biogasanlagen nach EEG (2009).

Anlagen- größe	Grundver- gütung ab 01.01.2009 [ct kWh ⁻¹]	Immis- sions- Bonus [ct kWh ⁻¹]	NawaRo- Bonus [ct kWh ⁻¹]	Landsch.- pflege Bonus [ct kWh ⁻¹]	KWK- Bonus [ct kWh ⁻¹]	Techno- logie- Bonus [ct kWh ⁻¹]	Gülle- Bonus [ct kWh ⁻¹]
bis 150 kW	11,76	1	7	2	3	1-2**	4
bis 500 kW	9,18	1	7	2	3	1-2**	1
bis 5 MW	8,25*	k.A.	4	k.A.	3	1-2**	k.A.
bis 20 MW	7,79*	k.A.	k. A.	k.A.	3	k. A.	k.A.

* nur wenn gleichzeitig KWK betrieben wird

** je nach Technik

Wird Landschaftspflegematerial vergoren, so steht dem Betreiber zunächst der NawaRo-Bonus und Landschaftspflege-Bonus zu. Bei Einhaltung der Immissionsgrenzwerte, bei Verwendung der Kraft-Wärme-Kopplung usw. stehen dem Betreiber weitere Boni zur Verfügung (Tab. 5), die unterschiedlich kombinierbar sind. Darauf wird jedoch nicht näher eingegangen.

Eine weitere Einnahmequelle ist der Verkauf der anfallenden Wärme des BHKW, die durch eine Fernwärmeleitung an Abnehmer übertragen werden kann. Dies können z.B. große Gebäude und Einrichtungen mit großem Wärmebedarf sein (WIEGMANN et al. 2007). Die Realisierung eines Wärmenutzungskonzepts ist für die Wirtschaftlichkeit einer Biogasanlage von entscheidender Bedeutung. Dies hat auch WIEGMANN et al. (2007) durch eine Untersuchung zu den Stromgestehungskosten und Erlösen mit einer Abwärmenutzung gezeigt.

In Abb. 8 sind die Stromgestehungskosten für verschiedene Substratmischungen und Erlöse bei Wärmenutzung mit 1, 20, 50 und 100 % dargestellt. Zur erkennen ist, dass je mehr von der Wärme genutzt wird, desto wirtschaftlicher kann eine Biogasanlage betrieben werden. Wird keine Wärme genutzt, so liegen die Stromgestehungskosten deutlich über den Erlösen, die Biogasanlage kann nicht wirtschaftlich betrieben werden.

Steigen die Stromgestehungskosten (SKost in Abb. 8) um 10 bzw. 20 % an, müssen zwischen knapp 50 bis 100 % der anfallenden Wärme genutzt werden. Daher sollten die Produktionskosten des Substrats möglichst gering ausfallen.

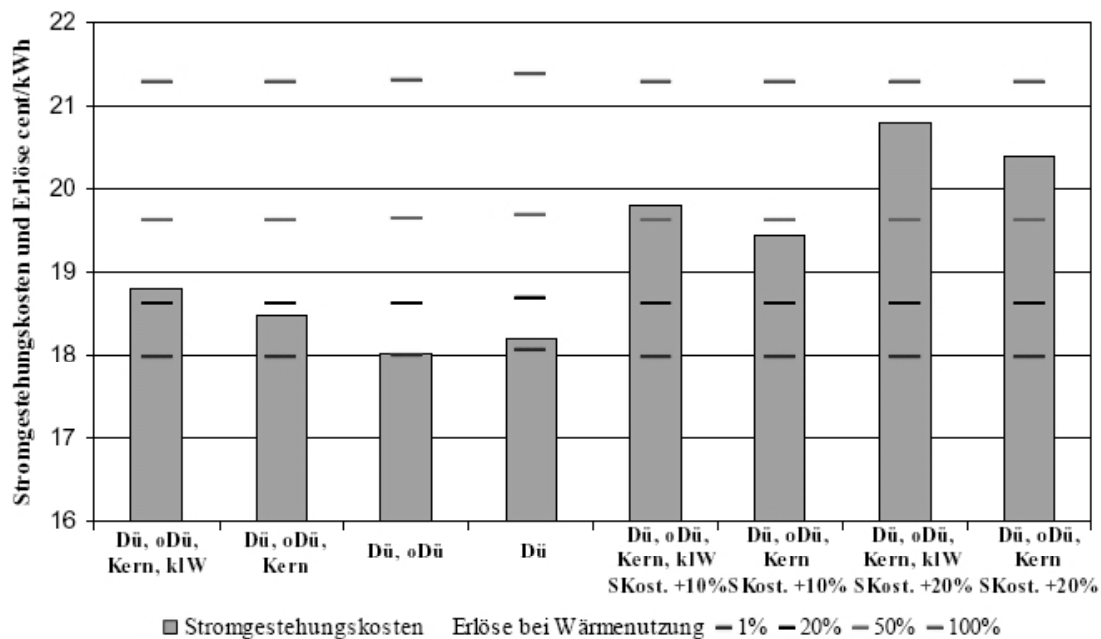


Abbildung 8: Stromgestehungskosten und Erlöse bei Wärmenutzung (WIEGMANN et al. 2007).

Problematisch gestaltet sich die Abnahme der Wärme jedoch in den warmen Sommermonaten. Hier könnten durch die KWKK z.B. Gebäude gekühlt oder allgemein Kälteanlagen betrieben werden (BAYLFU 2007). Zusätzlich können auch Substrate wie beispielsweise Getreide oder Gärreste durch die Abwärme getrocknet werden (Kap. 2.6) (BAYLFU 2007).

4.5 Ausgleichszahlungen

Da die Erlöse aus dem Strom- und Wärmeverkauf, vermutlich auf Grund der technischen Reife, Vergütungen und steigenden Stromgestehungskosten, die Bau- und Betriebskosten nicht decken, wären entsprechende Ausgleichszahlungen erforderlich. Diese könnten z.B. über den Vertragsnaturschutz oder als Entsorgungserlöse durch die Kommunen gedeckt werden (WIEGMANN et al. 2007). Die Höhe der Ausgleichszahlungen wird jedoch sehr unterschiedlich eingeschätzt. Diese liegt zwischen 122 Euro/ha und 1.300 Euro/ha (WIEGMANN et al. 2007). Daher scheint eine genaue Kostenaufstellung hier nicht angebracht zu sein, da je nach Substrat unterschiedliche Biogasquantitäten und -qualitäten realisiert und damit unterschiedlich hohe Ausgleichszahlungen erforderlich sind. Zudem sind die verfügbaren Literaturreferenzen nicht aktuell genug (Verfahrenstechnik veraltet, Kalkulationen beinhalten keine oder zu geringe steigende Stromgestehungskosten).

5 Material und Methoden

5.1 Grünland

Das zu vergärende Substrat wurde auf zwei räumlich getrennten Moorstandorten geerntet. Dabei handelte es sich um Hochmoorgrünland im Landkreis Emsland (Niedersachsen) und Niedermoorgrünland auf dem Darß, Landkreis Nordvorpommern (Mecklenburg-Vorpommern).

5.1.1 Flächenauswahl

Die Flächenauswahl im Landkreis Emsland fand in Anlehnung an das Hochmoorgrünlandprojekt von BUCHWALD et al. (2006) statt. Die Beprobungsflächen entsprachen dabei einigen der Bewirtschaftungsvarianten. Dabei wurden die Varianten 2 und 4 beprobt (Abb.9) und deren Bezeichnungen in dieser Arbeit übernommen. Dies geschah vor dem Hintergrund, die Biogaserträge direkt auf die Flächen mit den dazu gehörigen Pflanzenbeständen und Bewirtschaftungsformen zu beziehen.

Auf dem Darß stammt das Substrat jeder Variante von der selben Beprobungsfläche (Abb. 9). Hier lag die Bedeutung bei der unterschiedlichen Zusammensetzung und Lagerungsdichte des Substrats zugrunde.

5.1.2 Beschreibung der Versuchsstandorte

Die Flächen der Varianten 2 und 4 aus dem Emsland befanden sich nahe Papenburg (Abb. 9), wobei Variante 2 innerhalb der Naturschutzflächen der etwa drei Kilometer von der Stadt entfernt gelegenen Auto-Teststrecke (Automotive Testing Papenburg) lag. Variante 4 befand sich westlich im Bereich des „Wilden Moores“. Bei den vorkommenden Pflanzenarten handelte es sich um weit verbreitete Grünlandarten frischer bis nasser Standorte (BUCHWALD et al. 2006). Die Böden der Varianten 2 und 4 sind durch mehr oder weniger stark vererdete Hochmoortorfe gekennzeichnet (RATH 2007). Die beprobten Flächen wurden teils gemäht, beweidet und gedüngt (Tab. 6).

Bei der Fläche des Darß handelte es sich um 2-schüriges Dauergrünland nahe dem Kurort Prerow (Abb. 9; Tab. 6), Landkreis Nordvorpommern. Die dort vorkommende Pflanzengesellschaft ist der Knickfuchsschwanz-Flutrasen (MÜLLER 2008). Beim Boden handelt es sich um stark humosen bis anmoorigen Feinsandgley (MÜLLER 2008).

Tabelle 6: Variantenherkunft und Bewirtschaftungsform.

Herkunft	Variante	Jährliche Bewirtschaftungsform
Emsland	2	1 x PK- Düngung , Beweidung (Esel und Schafe)
Emsland	4	2 x Mähen , 1 x Düngung (Gülle)
Darß	A, B, C	2 x Mähen

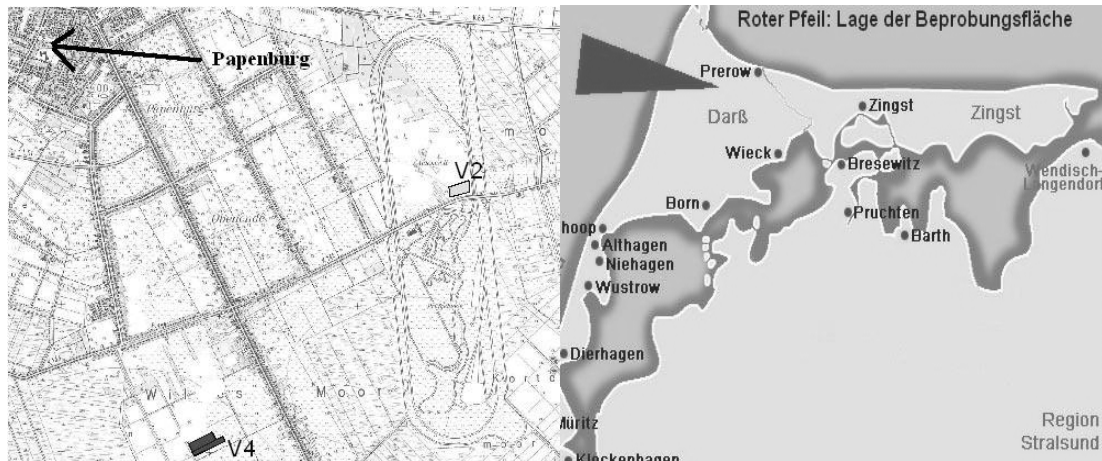


Abbildung 9: Lage der Varianten 2, 4 des Emslandes (verändert nach BUCHWALD et al. 2006) und der Beprobungsfläche des Darß (MÜLLER 2008).

5.1.3 Ernteverfahren und Zusammensetzung der Substrate

Die Ernte des Substrats fand im Zeitraum von Oktober bis Anfang November 2007 statt. Dabei wurde das Substrat mittels handelsüblichen Gartengeräten geerntet, da das Substrat durch den Einsatz von Maschinen wie Rasentrimmern zu stark zerfasert worden wäre. Dabei kamen Rasenkantenschere, Sichel oder Heckenschere zum Einsatz. Das Substrat wurde anschließend auf eine Länge von vier bis acht cm zerkleinert (Abb. 10), um die Substratoberfläche zu vergrößern (Kap. 2.2.2.8) und gleichzeitig praxisnäher zu arbeiten. Nach der Ernte fand eine kurze Anwelkung des Substrats statt, um anschließend, in Plastiksäcken bzw. Regentonnen luftdicht eingelagert, silieren zu können.

Bei der geernteten Vegetation der Variante 2 des Emslandes handelt es sich um *Juncus effusus* (>99 %_{Masse}) mit hohem Anteil abgestorbener org. Substanz von ca. 20 %_{Masse}, *Holcus lanatus* und *Ranunculus repens*. Bei der Variante 4 hingegen dominierte neben *Juncus effusus* (50 %_{Masse}) noch *Holcus lanatus*, *Ranunculus repens*, und *Cirsium arvense*. Daneben kamen *Rumex acetosella*, *Anthoxanthum odoratum*, *Elymus repens*, *Dactylis glomerata*, *Festuca rubra* agg. und andere vor. Auch hier lag der Anteil an abgestorbener org. Substanz bei ca. 10 %_{Masse}.

Bei der Variante A des Darß hingegen dominierte *Phalaris arundinacea* (>50 %_{Masse}), *Alopecurus geniculatus*, und *Agrostis stolonifera*. Gering vertreten waren *Alopecurus pratensis*, *Glyceria fluitans*, *Poa trivialis* und andere. Bei der Variante B kam *Juncus effusus* mit 50 %_{Masse} hinzu. Variante C bestand hingegen rein aus *Juncus effusus*.

Probenbezeichnung, Substratzusammensetzung und Erntedatum sind in Tabelle 7 zusammengefasst. Die Massenanteile in Prozent wurden nach dem Anwelken geschätzt.

Tabelle 7: Variantenbezeichnung und Zusammensetzung der Substrate.

Herkunft	Variantenbezeichnung	Zusammensetzung des Substrats in % _{Masse}				Erntedatum
		Gras	Kräuter	Binse	Totanteil	
Emsland	2 (a + b) Binse	<1	<1	>98	20	Nov.07
Emsland	4 (a + b) Mix	40	10	50	10	Nov.07
Darß	A (1 + 2) Gras	100	0	0	0	Okt.07
Darß	B (1 + 2) Mix	50	0	50	0	Okt.07
Darß	C (1 + 2) Binse	0	0	100	0	Okt.07



Abbildung 10: Ernte des Substrats (M. Röhrdanz).

5.2 Biogasversuche

5.2.1 Beschreibung des Biogaslabors

Die Biogasversuche fanden in einem Biogaslabor bei der S.I.G. – DR.-ING Steffen GmbH in Lühburg bei Rostock statt. In diesem Biogaslabor befanden sich zehn nummerierte Fermenter mit je einem Volumen von 120 L (Abb. 12). Die Fermenter wurden in zwei wärmeisolierten Holzboxen zu 4 und 6 Fermentern untergebracht (Abb.11). Jede der Holzboxen verfügte dabei über eine elektrische Heizvorrichtung, deren Temperatur über einen Thermocontroller bei rund 38 °C gehalten wurde.

Meßplatz I	Holzbox mit Fermenter rechts				Meßplatz II
	I	II	III	IV	
Gang					
Holzbox mit Fermenter links					Tür
VI	V	IV	III	II	I

Abbildung 11: Lageskizze des Biogaslabors.

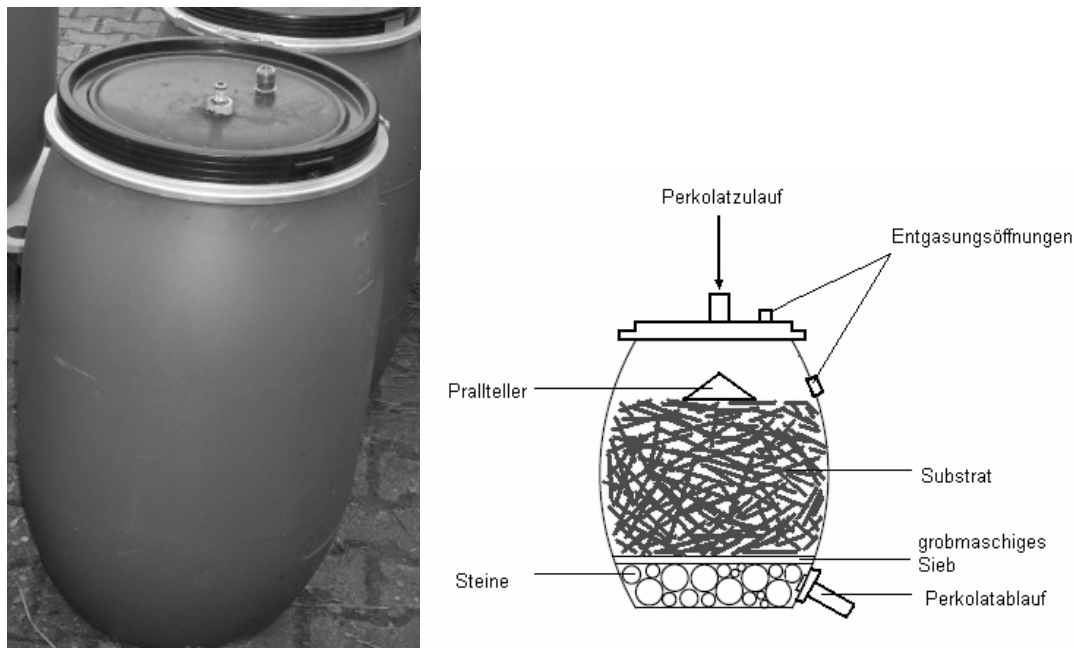


Abbildung 12: Bild vom Fermenter (M. Röhrdanz) und schematische Darstellung (JANTZEN 2008).

Auf jedem Fermenter wurde von außen eine Füllstandsskala zur Bestimmung des eingefüllten Volumens angebracht. Da auf dem Boden der Fermenter eine Schicht aus mittelgroßen Kieselsteinen, darüber ein grobgliedriges Sieb, als Perkolatsammel- bzw. Filtervorrichtung eingebaut waren (Abb. 12), schrumpfte das maximale Beschickungsvolumen auf etwa 90 Liter. Jeder Fermenterdeckel verfügte über einen Verschluss, an den ein Schlauch für die Zufuhr des Perkolats angeschlossen war. Um eine gleichmäßige Perkolatverteilung zu gewährleisten, traf das Perkolat während der Perkolation auf einen Prallteller. Der Ablauf des Perkolats erfolgte über einen Ablaufhahn im Bereich des Fermenterbodens. Perkolatzu- und -abflüsse waren über Schläuche mit den unterhalb der Holzboxen angebrachten wärmeisolierten Perkolattanks verbunden. Dabei handelte es sich um vier beheizte Perkolattanks (je 120 L Volumen), zwei auf der linken und zwei auf der rechten Laborseite, mit jeweils stabilem und frischem Perkolat. Dies ermöglichte eine kreuzweise Führung des Perkolats (Kap. 2.2.2.3). Die Perkolatzuleitung wurde durch eine handelsübliche Bohrmaschinenpumpe realisiert. Die Perkolatmengenmessung fand über handelsübliche Wasseruhren statt.

Für die Biogasableitung befanden sich eine Entgasungsöffnung im Fermenterdeckel montiert sowie an der oberen Seite des Fermenters (Abb. 12). Das gewonnene Biogas wurde über nummerierte Gasschläuche zu den Messplätzen weitergeleitet. Dort befanden sich vier Trommelgaszähler Typ TG 05/5 der Firma Ritter (Abb. 13), ein Milligascounter der Firma Ritter Typ MGC-10 und ein Milligaszähler Hengstler tico 731 (Abb. 13). Zusätzlich gab es ein mobiles Gasanalysegerät DGA 3 der Bernt GmbH Düsseldorf (Abb. 13). Als pH-Meter kam das pH 315i / SET von WTW zu Einsatz.



Abbildung 13: Milligaszähler, Trommelgaszähler und Gasanalysegerät am Messplatz II (M. Röhrdanz).

5.2.2 Versuchsdurchführung

Der Biogasversuch fand im Zeitraum vom 29.11.2007 bis 28.01.2008 statt. Dies entspricht einer Verweilzeit von 60 Tagen.

5.2.2.1 Beschickung der Fermenter

Es wurden jeweils zwei Fermenter mit der selben Variante mit unterschiedlichen Dichten befüllt (Tab. 8). Dies entspricht einer Wiederholung pro Variante. Die jeweils **erste** Probe wurde mit einer **niedrigen** Dichte beschickt, die **zweite** mit einer **hohen** Dichte. Dies geschah vor dem Hintergrund Rückschlüsse ziehen zu können, ob der Binsenanteil die Schadverdichtungen verhindern kann. Die Fermenter auf der linken Seite des Biogaslabors wurden mit der Varianten A, B und C des Darß, die der rechten Seite mit den Varianten 2 und 4 des Emslandes beschickt (Abb. 11). Dies entsprach mit insgesamt 10 Fermentern der vollen Auslastung der Anlagenkapazität. Anschließend wurden die Fermenter luftdicht verschlossen und in die Holzboxen gebracht. Das Animpfen des Substrats sowie Initialisierung der Vergärung fanden über das Perkolat statt (Kap. 2.2.2.2). Zum Ende der Vergärung wurde das Substrat rückgewogen und das Volumen bestimmt (Tab. 15).

Tabelle 8: Einwaagen der Varianten.

Herkunft	Variante	Einwaage FM* [g]	Volumina [l]	Dichte [g * l ⁻¹]
Emsland	2 a Binse	5173	85	61
Emsland	2 b Binse	7977	85	94
Emsland	4 a Mix	7192	80	90
Emsland	4 b Mix	12748	95	134
Darß	A 1 Gras	11841	85	139
Darß	A 2 Gras	21897	80	274
Darß	B 1 Mix	7836	85	92
Darß	B 2 Mix	11024	85	130
Darß	C 1 Binse	6070	85	71
Darß	C 2 Binse	11006	95	116

* Frischmasse

5.2.2.2 Tägliche Messungen und Prozesssteuerungen

Zu Beginn jedes Messtages wurde zunächst das produzierte Biogasvolumen gemessen. Dazu wurden die Werte von den Trommelgaszählern, Milligascountern und Milligasähler abgelesen

und ins Messprotokoll übertragen (s. Anhang), um die Menge an produziertem Biogas in 24 Stunden zu ermitteln. Da die Anzahl der Gasvolumenmessgeräte der Fermenteranzahl nicht entsprach, wurden die angeschlossenen Fermenter täglich gewechselt.

Nach dem Biogasvolumen wurde die Biogaszusammensetzung gemessen. Dazu wurden die Gasleitungen von den Gasvolumenmessgeräten abgeklemmt und an das Gasanalysegerät angeschlossen. Mit dem Gasanalysegerät wurden die Volumenprozentanteile an Sauerstoff (O_2), Kohlendioxid (CO_2) und Methan (CH_4) gemessen und ebenfalls ins Messprotokoll übertragen.

Nach den ersten beiden Schritten folgte der Perkulationsvorgang. Als Perkolat wurde dabei bereits vorhandenes Perkolat, aus Gülle gewonnen, verwendet. Zunächst wurde das Perkolat vom Vortag, welches sich noch in den Fermentern befand, abgelassen. Dazu musste jedoch der pH-Wert bestimmt werden. Ein geringer Teil des Perkolats wurde als „Mittelstrahl“ in einem Becherglas aufgefangen, dessen pH-Wert bestimmt wurde. War der pH-Wert unter pH 7, fand eine Einleitung in den Perkolattank für frisches Perkolat statt. Perkolat mit einem pH-Wert über pH 7 wurde in den Perkolattank für stabiles Perkolat geleitet. Nach Ableitung des Perkolats wurden die Ablaufhähne geschlossen, die Zulaufhähne geöffnet und mit der Perkulation begonnen. In den ersten Tagen wurde mit stabilem Perkolat perkoliert, um eine Übersäuerung des Fermenters zu verhindern (Kap. 2.2.2.3 und 2.2.2.6). Ab dem zwölften Versuchstag wurde auch mit saurem Perkolat perkoliert. Dabei wurde bei jedem Perkulationsdurchgang mit ca. drei Litern perkoliert. Die PH-Werte wurden im Messprotokoll festgehalten (s. Anhang).

Biogasvolumen und –qualität wurden je ein Mal pro Tag zu Beginn gemessen. Die Perkulation fand drei Mal pro Tag statt: morgens, mittags und am Nachmittag. Ausnahmen betrafen Wochenenden sowie Feiertage.

Die pH-Wert Messung fand bis zum zwölften Versuchstag statt. Da das Perkolat jeden Fermenters ab diesem Zeitpunkt einen stabilen pH-Wert aufwies, wurde auf weitere Messungen verzichtet. Zusätzlich wurde täglich die Temperatur kontrolliert.

5.3 Laboruntersuchung auf Inhaltsstoffe

Die entnommenen Proben der Frischmasse und Gärreste wurden bis zum Zeitpunkt der Analyse eingefroren. Die Proben wurden auf ihre Gehalte an Rohprotein (XP), Rohfaser (XF) und Rohasche (XA) nach WEENDER (NAUMANN & BASSLER 1993) analysiert. Auf die einzelnen Methoden der Analyse soll in dieser Untersuchung nicht näher eingegangen werden.

5.4 Bodenuntersuchungen

Die Untersuchungen des Bodens auf pH-Wert, Gehalte an K_2O (Kaliumoxid), Mg (Magnesium) und P_2O_5 (Phosphat) fanden nach SCHLICHTING et al. (2005) statt, auf dessen Methode nicht näher eingegangen wird. Die Böden des Darß wurden im Herbst 2007, die des Emslandes im Herbst 2008 beprobt. Bei den Bodenergebnissen des Emslandes handelt es sich um Mittelwerte von jeweils sechs Proben (s. Anhang).

5.5 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung der Daten fand mit Microsoft Excel und SPSS statt. Da während der Wochenenden und Feiertage z.T. keine Messungen durchgeführt wurden bzw. es an einigen Tagen technisch bedingte Messausfälle gab, sind die Daten durch Mittelwertbildung interpoliert worden.

Die Biogaserträge wurden auf Normliter (l_N)* und organische Trockensubstanz (oTS) nach DIN 6430 umgerechnet, da die Änderung des Volumens in Abhängigkeit von Druck und Temperatur bis zu 20 % betragen kann (<http://www.lfl.bayern.de/ilb/technik/03039>). Die für die Umrechnung notwendigen Luftdruckdaten stammten aus einer nahegelegenen Wetterstation, die Gastemperatur wurde auf 15° C geschätzt und der Gehalt an Wasserdampf wurde anhand der Magnusformel (s. Anhang) ermittelt.

Die in Kap. 6.1 erwähnten durchschnittlichen Methangehalte beziehen sich auf den Zeitraum ab dem zwölften Versuchstag, da ab diesem bei allen Varianten ein stabiler Prozessverlauf zu erkennen war (Kap. 7.1.3.1). Als Kriterium für einen stabilen pH-Wert in Abb. 29 wurde ein gleichbleibender Wert von pH 7,5 gewählt.

Beim Vergleich der Methanerträge des Emslandes und des Darß in Kap. 6.2 wurde der Anteil an Kräutern der emsländischen Varianten vernachlässigt.

* Normliter - Liter bei Normbedingungen (1,013 bar, 0° C, 0% Luftfeuchte) (BAYLFU 2007).

6 Ergebnisse

6.1 Gaserträge der einzelnen Varianten

Die dargestellten Ergebnisse zeigen, wie sich die Biogas- und Methanerträge sowie Methangehalte der einzelnen Varianten während des Vergärungszeitraums entwickelt haben.

6.1.1 Standort Emsland

6.1.1.1 Varianten 2 Binse

In Abb. 14 sind der Methan- und Biogasertrag sowie der Methangehalt der Variante 2 a Binse aus dem Emsland dargestellt. Hier lag die Einbaudichte bei $61 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$ (Tab. 9). Die Methanbildung beginnt bereits in den ersten Tagen, steigt bis zum 20. Verweiltage kontinuierlich an, erreicht ab dem 37. Tag einen Methanertrag von über $50 \text{ \% vol.}$ und bleibt bis zum Ende weitgehend stabil. Der Biogas- und Methanertrag nimmt in den ersten Tagen gering zu. Ab etwa dem zehnten Tag ist eine deutliche Zunahme der Erträge bis zum Versuchsende zu erkennen. Nach 60 Tagen sind 194 l_N Biogas bzw. 84 l_N Methan produziert worden. Der maximale Methangehalt liegt bei $52,8 \text{ \% vol.}$, der durchschnittliche bei $45,8 \text{ \% vol.}$ (Tab. 9).

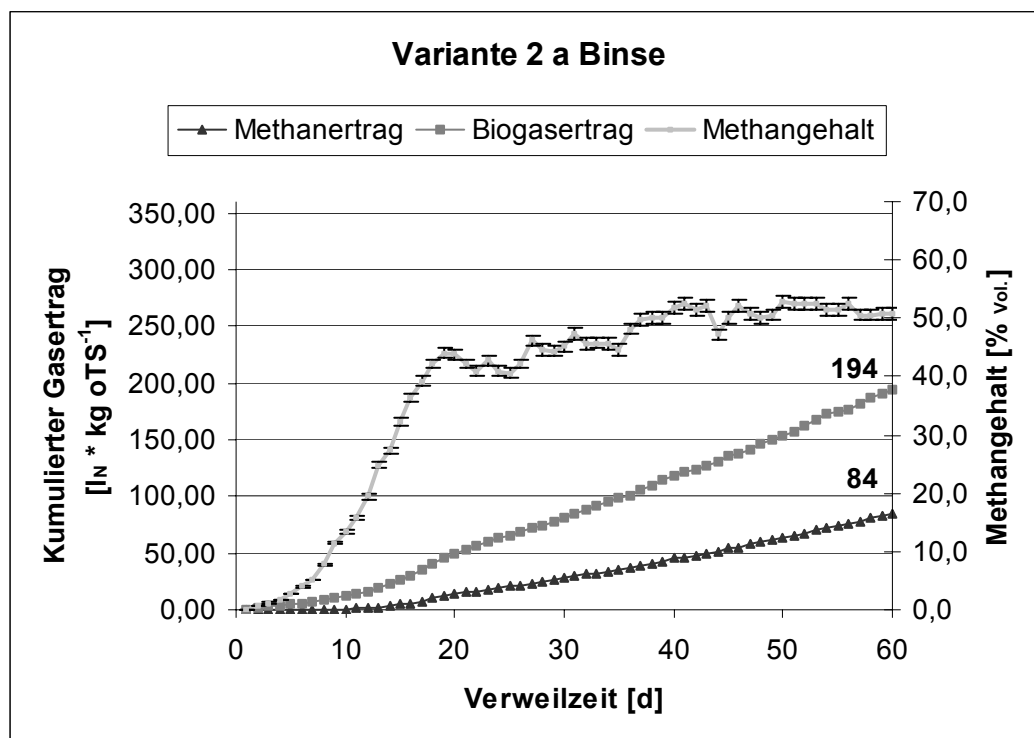


Abbildung 14: Kumulierter Methan- und Biogasertrag sowie Methangehalt (mit Standardfehler) der Variante 2 a Binse aus dem Emsland nach einer Verweilzeit von 60 Tagen.

In Abb. 15 sind der Methan- und Biogasertrag sowie der Methangehalt der Variante 2 b Binse aus dem Emsland dargestellt. Hier lag die Einbaudichte bei $94 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$ bezogen auf die Frischmasse (Tab. 9). Die Methanbildung beginnt nach ca. sechs Tagen. Der Methangehalt steigt bis zum 35. Tag kontinuierlich an, dann deutlich langsamer. Am Versuchsende wird ein Methangehalt von über $50 \% \text{ Vol.}$ erreicht. Der Biogasertrag beginnt ab etwa dem zehnten Tag an zu steigen, bis nach 60 Tagen 99 l_N Biogas produziert wurden. Der Methanertrag steigt erkennbar ab dem 25. Tag an und erreicht nach der Vergärungszeit von 60 Tagen einen Wert von 38 l_N . Der maximale Methangehalt liegt hier bei $52,0 \% \text{ Vol.}$, der durchschnittliche ab dem 12. Versuchstag bei $39,4 \% \text{ Vol.}$ (Tab. 9).

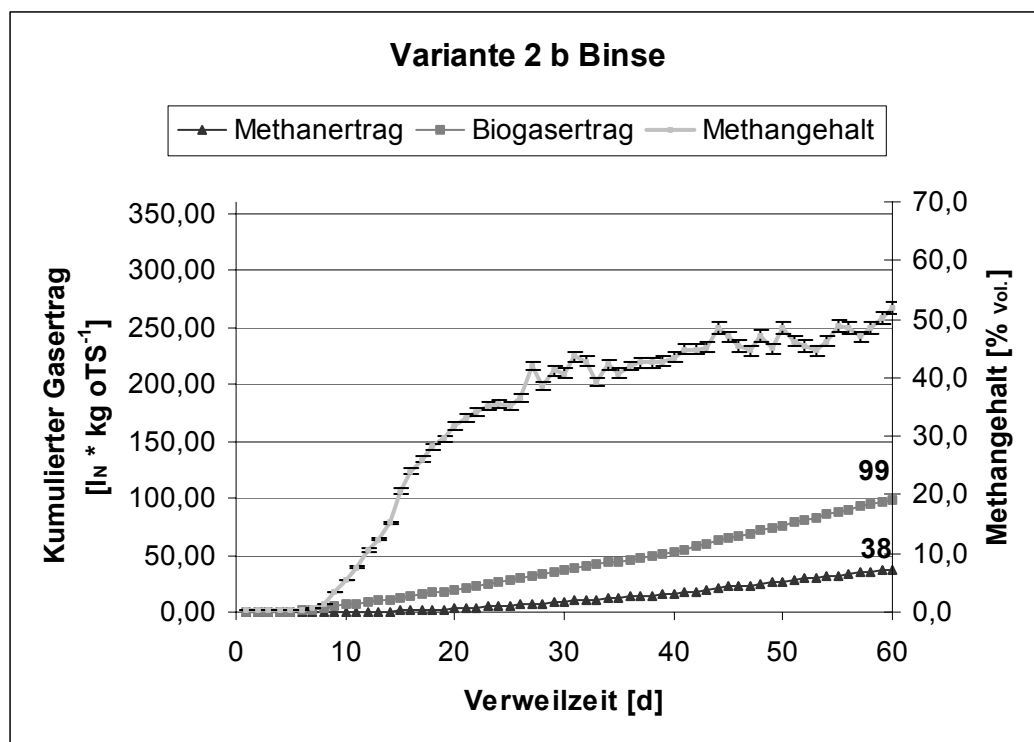


Abbildung 15: Kumulierter Methan- und Biogasertrag sowie Methangehalt (mit Standardfehler) der Variante 2 b Binse aus dem Emsland nach einer Verweilzeit von 60 Tagen.

Tabelle 9: Begleitdaten für die Varianten 2 a und 2 b Binse aus dem Emsland.

Variante	Dichte Einbau Frischm. [$\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$]	oTS [%]	Biogas gesamt [$\text{l}_\text{N} \cdot \text{kg oTS}^{-1}$]	Methan gesamt [$\text{l}_\text{N} \cdot \text{kg oTS}^{-1}$]	Max. Methangehalt [% Vol.]	Durchschn. Methangehalt ab 12. Versuchstag [% Vol.]
2 a Binse	61	62,5	194,2	84,2	52,8	45,8
2 b Binse	94	62,5	98,9	37,7	52,0	39,4

6.1.1.2 Varianten 4 Mix

In Abb. 16 sind der Methan- und Biogasertrag sowie der Methangehalt der Variante 4 a Mix aus dem Emsland dargestellt. Hier lag die Einbaudichte bei $90 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$ (Tab. 10). Die Methanbildung beginnt nach etwa fünf Tagen, steigt bis zum 15. Tag auf etwa $40 \%_{\text{Vol.}}$ kontinuierlich an, erreicht an dem 25. Tag einen Wert von knapp $50 \%_{\text{Vol.}}$, schwankt um diesen Wert bis zum etwa 47. Tag und nimmt zum Ende hin ab. Der Biogasertrag nimmt von Versuchsbeginn an kontinuierlich zu, verbleibt etwa vom 35. bis 42. Tag auf etwa 140 l_N und steigt bis zum Ende auf 189 l_N an. Ein deutlicher Anstieg des Methanertrages ist ab dem zwölften Tag zu beobachten. Zwischen dem 35. bis 42. Tag verbleibt dieser bei einem Wert von ca. 50 l_N . Bis zum Versuchsende werden insgesamt 70 l_N Methan produziert. Der durchschnittliche Methangehalt ab dem 12. Versuchstag liegt bei $43,4 \%_{\text{Vol.}}$, der maximale bei $49,4 \%_{\text{Vol.}}$ (Tab. 10).

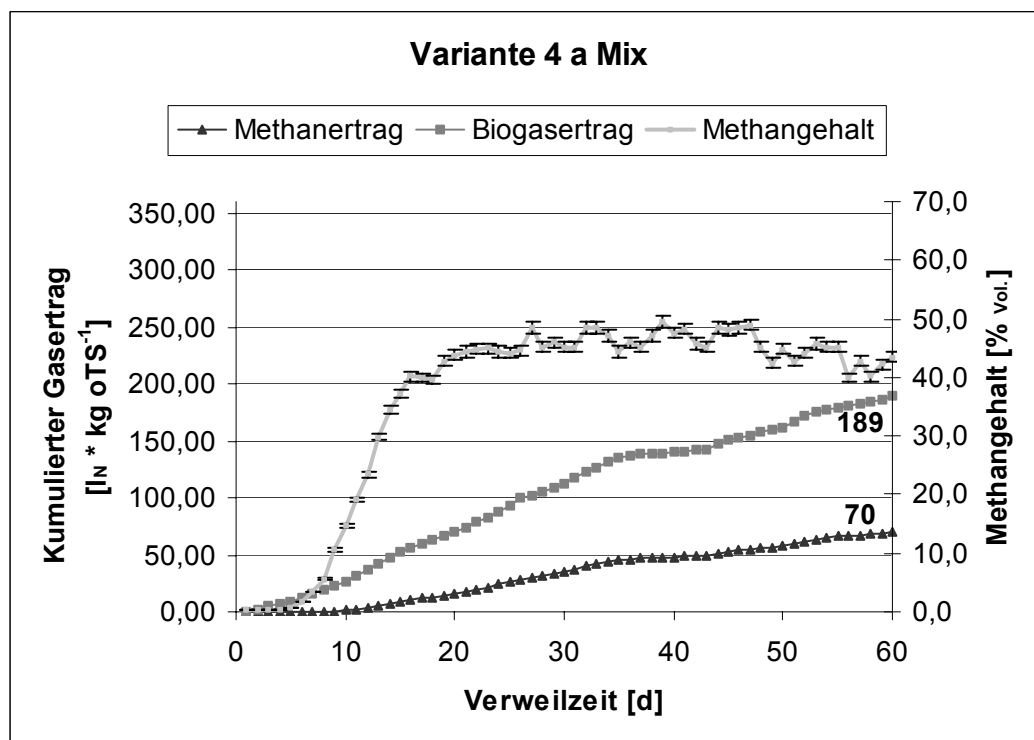


Abbildung 16: Kumulierter Methan- und Biogasertrag sowie Methangehalt (mit Standardfehler) der Variante 4 a Mix aus dem Emsland nach einer Verweilzeit von 60 Tagen.

In Abb. 17 sind der Methan- und Biogasertrag sowie der Methangehalt der Variante 4 b Mix aus dem Emsland dargestellt. Hier lag die Einbaudichte bei $134 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$ (Tab. 10). Die Methanproduktion beginnt nach wenigen Tagen. Der Methangehalt steigt bis zum 13. Tag kontinuierlich auf einen Wert von $50 \% \text{ Vol.}$ an, schwankt dann im Bereich zwischen 50 und $55 \% \text{ Vol.}$, nimmt um den 50. Tag leicht ab und steigt zum Versuchsende wieder. Die Biogasproduktion setzt nach wenigen Tagen ein und nimmt bis zum Ende kontinuierlich zu. Es werden 280 l_N Biogas nach 60 Tagen produziert. Ein deutlicher Anstieg des Methanertrages ist ab dem zwölften Tag zu beobachten. Dieser steigt kontinuierlich bis auf einen Wert von 134 l_N . Der durchschnittliche Methangehalt ab dem 12. Versuchstag liegt bei $50,5 \% \text{ Vol.}$, der maximale bei $53,4 \% \text{ Vol.}$ (Tab. 10).

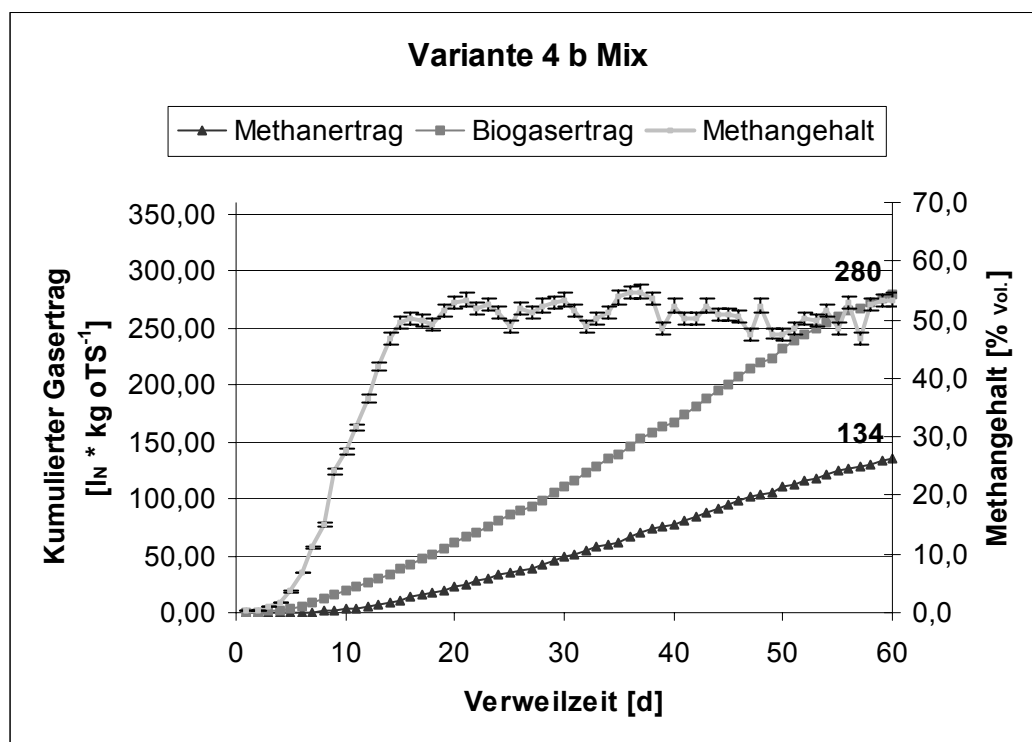


Abbildung 17: Kumulierter Methan- und Biogasertrag sowie Methangehalt (mit Standardfehler) der Variante 4 b Mix aus dem Emsland nach einer Verweilzeit von 60 Tagen.

Tabelle 10: Begleitdaten für die Varianten 4 a und 4 b Mix aus dem Emsland.

Variante	Dichte Einbau Frischm. $[\text{g} \cdot \text{l}^{-1}]$	oTS [%]	Biogas gesamt $[\text{l}_\text{N} \cdot \text{kg oTS}^{-1}]$	Methan gesamt $[\text{l}_\text{N} \cdot \text{kg oTS}^{-1}]$	Max. Methangehalt [% Vol.]	Durchschn. Methangehalt ab 12. Versuchstag [% Vol.]
4 a Mix	90	42,5	189,1	70,0	49,4	43,4
4 b Mix	134	42,5	279,7	134,4	53,4	50,5

6.1.2 Standort Darß

6.1.2.1 Varianten A Gras

In Abb. 18 sind der Methan- und Biogasertrag sowie der Methangehalt der Variante A 1 Gras vom Darß dargestellt. Hier lag die Einbaudichte bei $139 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$ (Tab. 11). Der Anstieg des Methangehaltes beginnt wenige Tage nach Beschickung des Fermenters, steigt bis zum 13. Tag kontinuierlich bis auf 50 % vol. an, hält bis zum 25. Tag einen Wert von knapp 60 % vol. ein, unterliegt dann größeren Schwankungen zwischen 40 und 50 % vol. und nimmt zum Ende hin wieder zu, mit einem Wert von knapp 60 % vol.. Die Biogasproduktion setzt nach wenigen Tagen ein, und nimmt kontinuierlich zu. Gleiches gilt für den Methanertrag. Es werden 275 l_N Biogas produziert mit einem Anteil von 130 l_N Methan. Der maximal erreichte Methangehalt beträgt 56,4 % vol., der durchschnittliche ab dem zwölften Versuchstag 50,0 % vol. (Tab. 11).

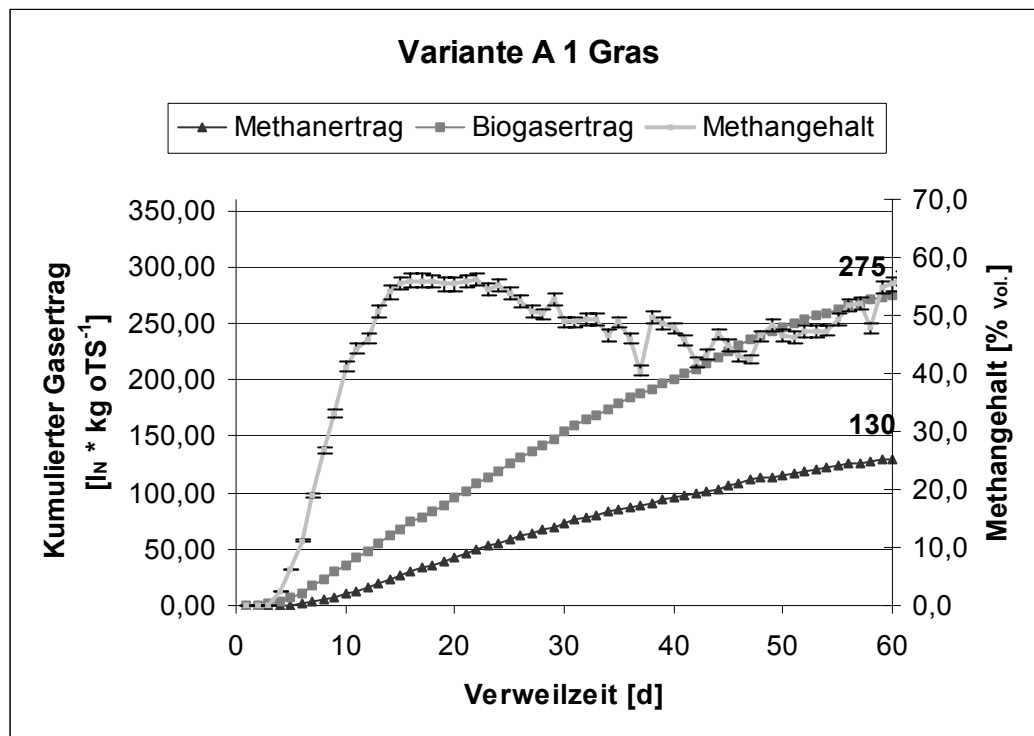


Abbildung 18: Kumulierter Methan- und Biogasertrag sowie Methangehalt (mit Standardfehler) der Variante A 1 Gras vom Darß nach einer Verweilzeit von 60 Tagen.

In Abb. 19 sind der Methan- und Biogasertrag sowie der Methangehalt der Variante A 2 Gras vom Darß dargestellt. Die Befüllungsdichte betrug $274 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$ (Tab.11). Der Anstieg des Methangehaltes beginnt kurz nach Beschickung des Fermenters, erreicht am 13. Verweiltage einen Anteil von $50 \% \text{ vol.}$, pendelt sich auf etwa $55 \% \text{ vol.}$ ein und erreicht gegen Versuchsende $65 \% \text{ vol.}$. Der Biogasertrag nimmt von Versuchsbeginn an kontinuierlich zu. Zum Ende hin wird dieser leicht schwächer und erreicht einen Ertrag von 195 l_N . Der Verlauf des Methanertrages ist ähnlich und erreicht gegen Versuchsende einen Wert von 99 l_N . Dabei beträgt der maximale Methangehalt $64,4 \% \text{ vol.}$, der durchschnittliche $55,5 \% \text{ vol.}$ (Tab 11).

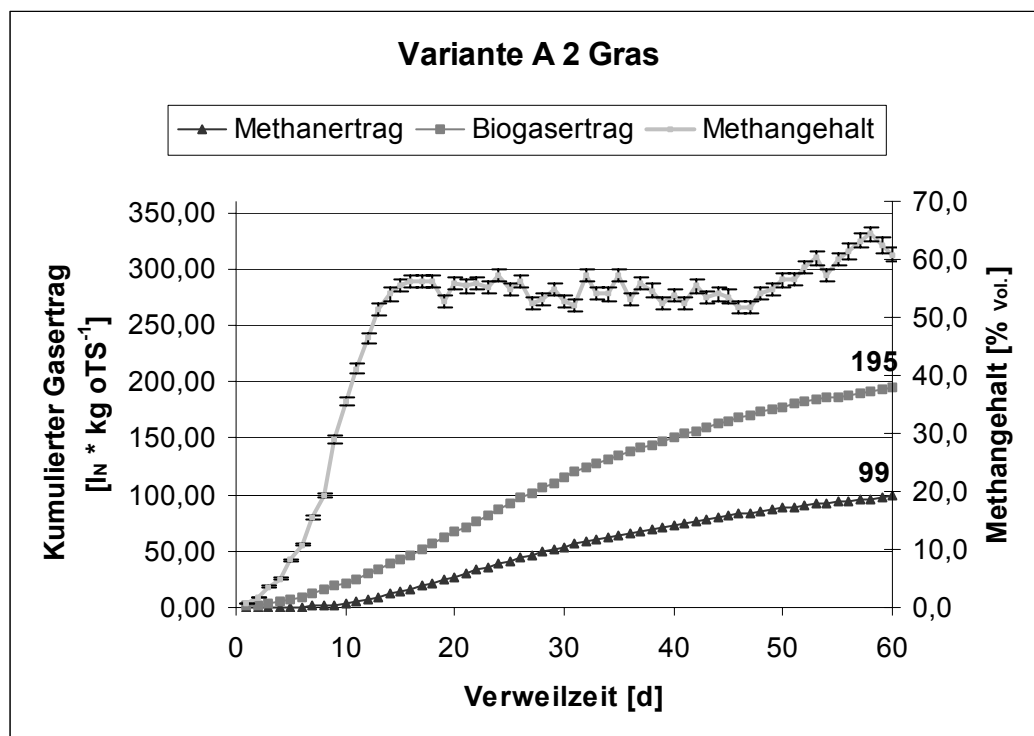


Abbildung 19: Kumulierter Methan- und Biogasertrag sowie Methangehalt (mit Standardfehler) der Variante A 2 Gras vom Darß nach einer Verweilzeit von 60 Tagen.

Tabelle 11: Begleitdaten für die Varianten A 1 und A 2 Gras vom Darß.

Variante	Dichte Einbau Frischm. [$\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$]	oTS [%]	Biogas gesamt [$\text{l}_\text{N} \cdot \text{kg oTS}^{-1}$]	Methan gesamt [$\text{l}_\text{N} \cdot \text{kg oTS}^{-1}$]	Max. Methangehalt [% vol.]	Durchschn. Methangehalt ab 12. Versuchstag [% vol.]
A 1 Gras	139	26,0	275,2	130,2	56,4	50,0
A 2 Gras	274	26,0	195,5	98,5	64,4	55,5

6.1.2.2 Varianten B Mix

In Abb. 20 sind der Methan- und Biogasertrag sowie der Methangehalt der Variante B 1 Mix vom Darß dargestellt. Die Einbaudichte betrug $90 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$ (Tab. 12). Der Anstieg des Methangehaltes beginnt wenige Tage nach Beschickung des Fermenters, erreicht ab dem 16. Tag einen Anteil von $50 \% \text{ vol.}$, nimmt kurz darauf wieder auf $45 \% \text{ vol.}$ ab bis zum 50. Tag und nimmt gegen Ende wieder zu. Der durchschnittliche Methangehalt beträgt dabei $47,3 \% \text{ vol.}$, der maximale $54,8 \% \text{ vol.}$ (Tab. 12). Wenige Tage nach der Fermenterbeschickung setzen Biogas- und Methanertragzunahmen ein und erreichen nach 60 Tagen einen Gasertrag von 226 bzw. 96 l_N .

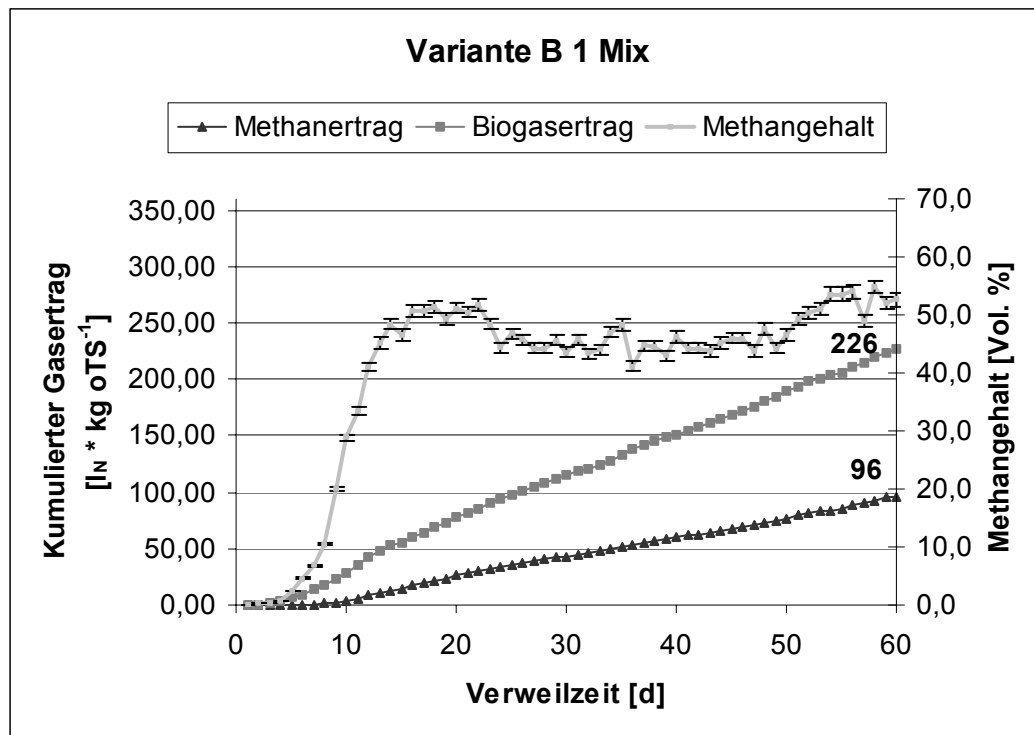


Abbildung 20: Kumulierter Methan- und Biogasertrag sowie Methangehalt (mit Standardfehler) der Variante B 1 Mix vom Darß nach einer Verweilzeit von 60 Tagen.

In Abb. 21 sind der Methan- und Biogasertrag sowie der Methangehalt der Variante B 2 Mix vom Darß mit einer Einbaudichte von $130 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$ (Tab. 12) dargestellt. Der Anstieg des Methangehaltes beginnt kurz nach Beschickung des Fermenters, erreicht am 13. Versuchstag einen Anteil von über 50 % Vol., steigt kurz auf knapp 60 % Vol., schwankt dann bis zum 55. Tag um 55 % Vol. und nimmt gegen Ende auf ca. 60 % Vol. zu. Kurz nach Versuchsbeginn nimmt der Biogasertrag zu, steigt kontinuierlich an bis auf einen Wert von 282 l_N . Einen ähnlichen Verlauf hat auch der Methanertrag. Dieser nimmt einen Wert von 138 l_N nach 60 Tagen ein. Der maximale bzw. durchschnittliche Methangehalt beträgt hier 60,2 bzw. 53,7 % Vol. (Tab. 12).

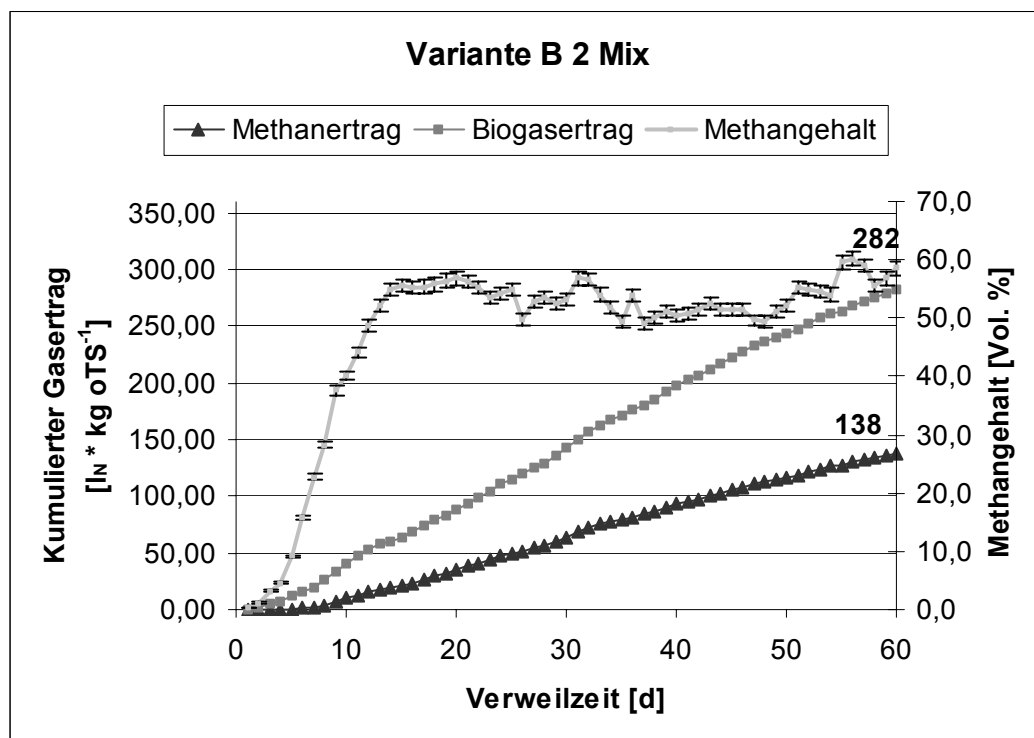


Abbildung 21: Kumulierter Methan- und Biogasertrag sowie Methangehalt (mit Standardfehler) der Variante B 2 Mix vom Darß nach einer Verweilzeit von 60 Tagen.

Tabelle 12: Begleitdaten für die Varianten B 1 und B 2 Mix vom Darß.

Variante	Dichte Einbau Frishm. [$\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$]	oTS [%]	Biogas gesamt [$\text{l}_\text{N} \cdot \text{kg oTS}^{-1}$]	Methan gesamt [$\text{l}_\text{N} \cdot \text{kg oTS}^{-1}$]	Max. Methangehalt [% Vol.]	Durchschn. Methangehalt ab 12. Versuchstag [% Vol.]
B 1 Mix	92	32,2	226,2	96,0	54,8	47,3
B 2 Mix	130	32,2	281,7	138,0	60,2	53,7

6.1.2.3 Varianten C Binse

In Abb. 22 sind der Methan- und Biogasertrag sowie der Methangehalt der Variante C 1 Binse vom Darß dargestellt. Hier lag die Einbaudichte bei $71 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$ (Tab. 13). Der Anstieg des Methangehaltes beginnt kurz nach Fermenterbeschickung, erreicht am 14. Versuchstag einen Anteil von 50 % vol., liegt bis zum 25. Tag stabil bei 55 % vol., schwankt bis zum 50. Tag zwischen 45 und 55 % vol. und pendelt sich zum Versuchsende bei 55 % vol. ein. Der Biogasertrag nimmt kurz nach Versuchsbeginn zu, steigt ab dem 28. Tag stark an und erreicht nach 60 Tagen einen Wert von 335 l_N. Der Verlauf des Methanertrags ist ähnlich. Es werden 157 l_N Methan in 60 Tagen produziert. In Tab. 13 sind maximale bzw. durchschnittliche Methangehalte mit einem Volumen von 55,0 bzw. 49,5 % dargestellt.

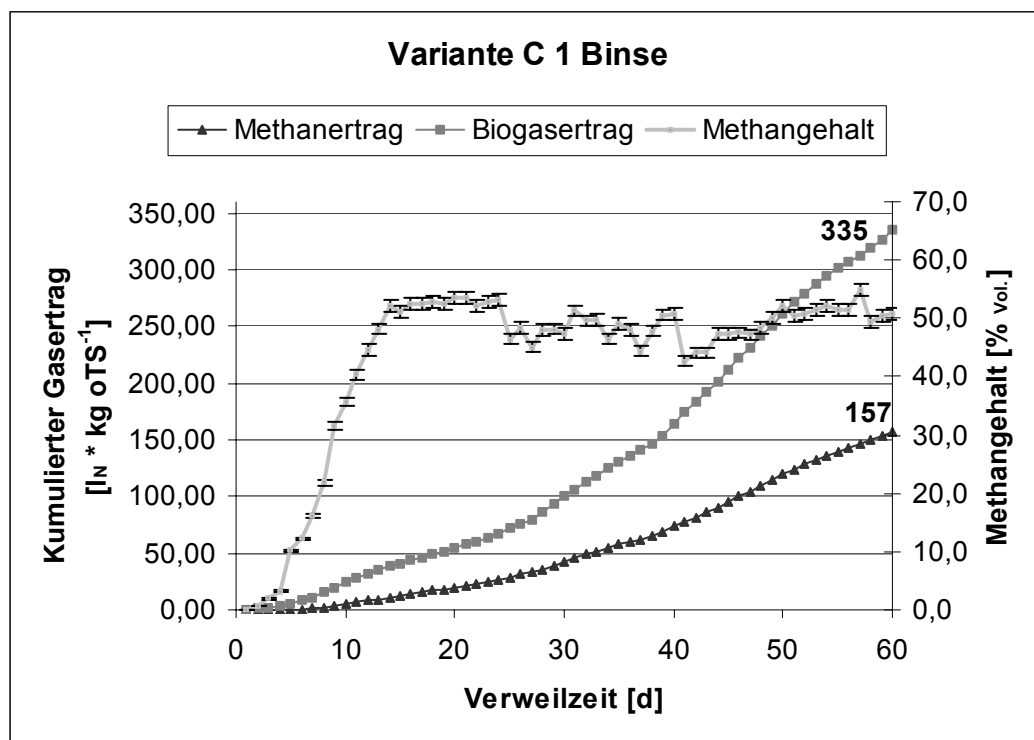


Abbildung 22: Kumulierter Methan- und Biogasertrag sowie Methangehalt (mit Standardfehler) der Variante C 1 Binse vom Darß nach einer Verweilzeit von 60 Tagen.

In Abb. 23 sind der Methan- und Biogasertrag sowie der Methangehalt der Variante C 2 Binse vom Darß mit einer Einbaudichte von $116 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$ (Tab. 13) dargestellt. Der Anstieg des Methangehaltes beginnt kurz nach Versuchsbeginn, erreicht am 40. Tag einen Volumenanteil von 50 % und schwankt bis zum Ende um 55 % vol. Biogas- und Methanertragszunahmen beginnen wenige Tage nach Fermenterbeschickung. Die Erträge nehmen ab dem 22. Tag sichtbar zu und erreichen gegen Ende des Versuches 189 l_N Biogas bzw. 85 l_N Methan. In Tab. 13 sind maximale bzw. durchschnittliche Methangehalte mit einem Volumen von 58,2 bzw. 47,5 % dargestellt.

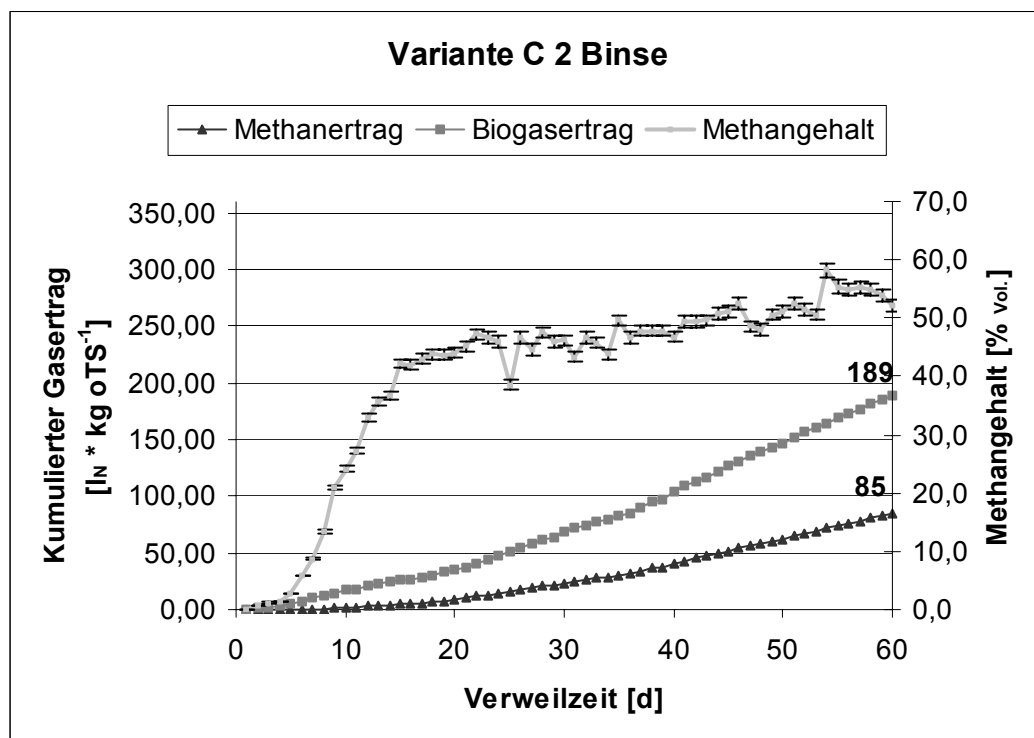


Abbildung 23: Kumulierter Methan- und Biogasertrag sowie Methangehalt (mit Standardfehler) der Variante C 2 Binse vom Darß nach einer Verweilzeit von 60 Tagen.

Tabelle 13: Begleitdaten für die Varianten C 1 und C 2 Binse vom Darß.

Variante	Dichte Einbau Frischm. $[\text{g} \cdot \text{l}^{-1}]$	oTS [%]	Biogas gesamt $[\text{l}_N \cdot \text{kg oTS}^{-1}]$	Methan gesamt $[\text{l}_N \cdot \text{kg oTS}^{-1}]$	Max. Methangehalt [% vol.]	Durchschn. Methangehalt ab 12. Versuchstag [% vol.]
C 1 Binse	71	33,1	334,9	157,2	55,0	49,5
C 2 Binse	116	33,1	188,6	84,6	58,2	47,5

6.1.3 Zusammenfassung der Biogas- und Methanerträge

In Abb. 24 sind Biogas- und Methanerträge der Abb. 14 bis 23 zusammengefasst. Den geringsten Biogas- und Methanertrag verzeichnet die Variante 2 b Binse aus dem Emsland, die größten Erträge Variante C 1 Binse vom Darß. Die Erträge der übrigen Varianten liegen zwischen ca. 180 und 280 l_N Biogas bzw. ca. 70 bis 130 l_N Methan (Tab. 14).

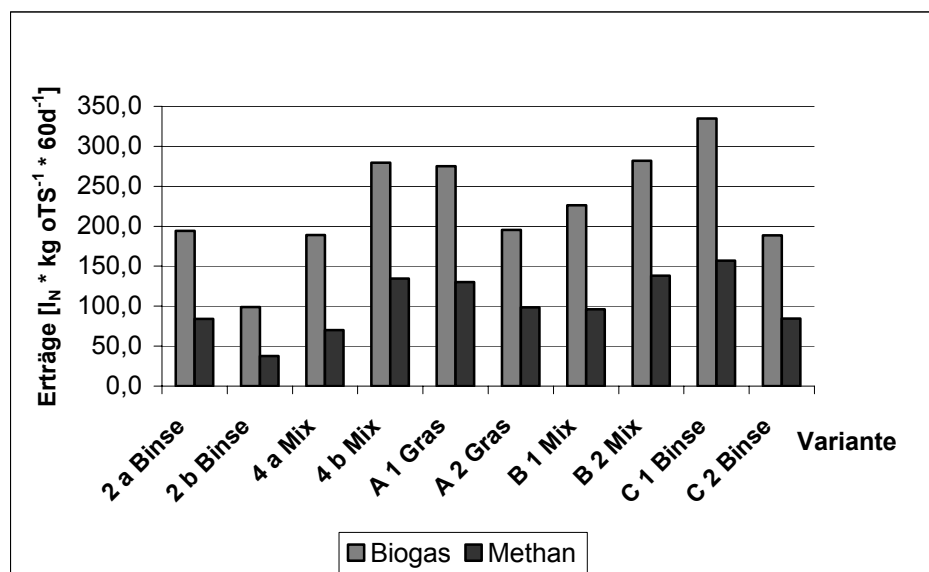


Abbildung 24: Zusammenfassung der Biogas- und Methanerträge aller Varianten nach einer Verweilzeit von 60 Tagen.

Tabelle 14: Vergleich der Biogas- und Methanerträge begleitend für Abb. 24 mit niedriger (grau unterlegt) und hoher Einbaudichte.

Variante	Biogas gesamt [l _N * kg oTS ⁻¹]	Methan gesamt [l _N * kg oTS ⁻¹]
2 a Binse	194,2	84,2
2 b Binse	98,9	37,7
4 a Mix	189,1	70,0
4 b Mix	279,7	134,4
A 1 Gras	275,2	130,2
A 2 Gras	195,5	98,5
B 1 Mix	226,2	96,0
B 2 Mix	281,7	138,0
C 1 Binse	334,9	157,2
C 2 Binse	188,6	84,6

In Abb. 25 sind die Biogaserträge aller Varianten nach Art des Substrats zusammengefasst. Eine große Bedeutung kommt hier den Medianen der Varianten zu. Die gemittelten Gaserträge der Varianten Mix und Gras liegen um etwa 50 % höher als diejenigen der Varianten Binsen. Gleichzeitig ist die Streuung der Werte und damit die Standardabweichung der Varianten Binse am höchsten.

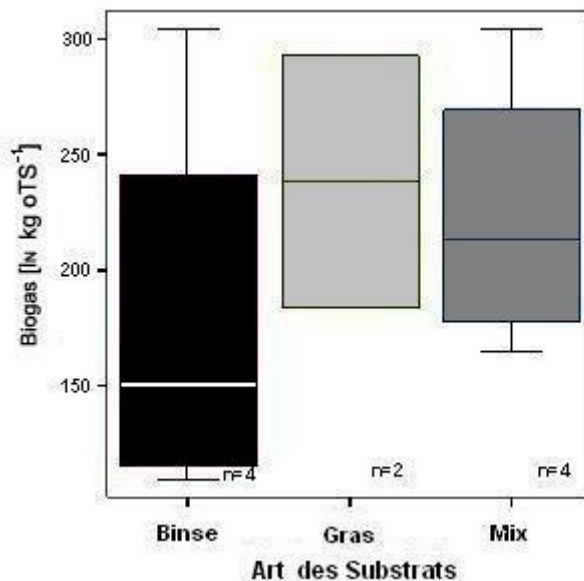


Abbildung 25: Gegenüberstellung der substratspezifischen Biogaserträge aller Varianten mit Standardabweichung nach einer Verweilzeit von 60 Tagen.

6.2 Methanerträge im Vergleich

Im Folgenden werden nur die erhobenen **Methanerträge** miteinander verglichen.

6.2.1 Vergleich der Varianten des Standorts Emsland

In Abb. 26 sind die Methanerträge der Varianten des Standorts Emsland graphisch dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Variante 2 b Binse die geringsten Methanerträge verzeichnet. Die Variante 4 b Mix hingegen hat die höchsten Methanerträge. Die Varianten 2 a Binse und 2 a Mix haben annähernd gleiche Erträge.

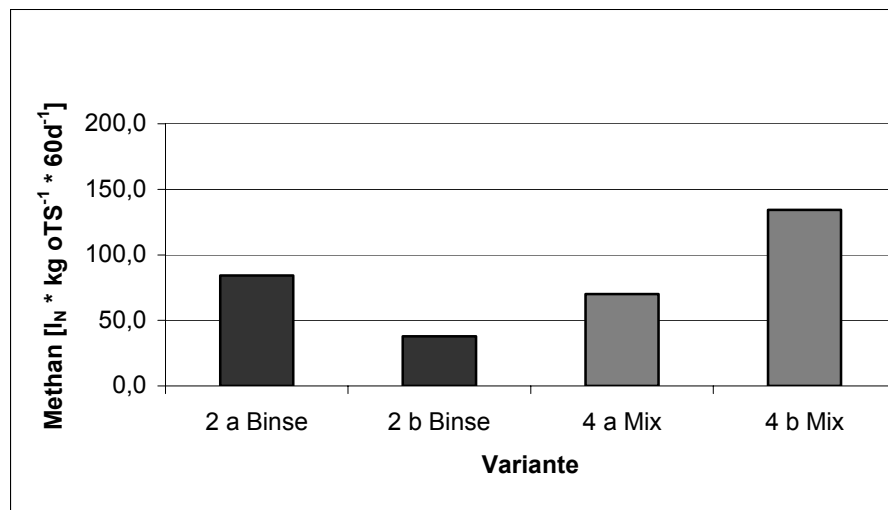


Abbildung 26: Vergleich der Methanerträge der Varianten des Emslandes.

6.2.2 Vergleich der Varianten des Standorts Darß

In Abb. 27 sind die Methanerträge der Varianten des Standorts Darß dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Variante C 1 Binse die höchsten Erträge mit ca. 157 l_N Methan verzeichnet, gefolgt von den Varianten B 2 Mix und A 1 Gras. Variante C 2 Binse hingegen hat die geringsten Erträge zu verzeichnen. Bei Betrachtung der Varianten A hat Variante A 1 Gras erheblich mehr Methan produziert als Variante A 2 Gras. Beim Vergleich der Varianten B 1 Mix und B 2 Mix ist dieser Unterschied geringfügig größer.

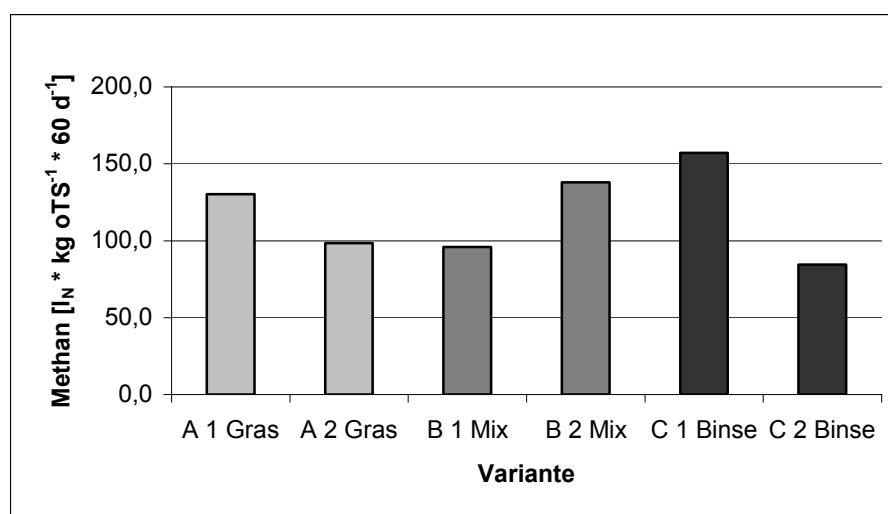


Abbildung 27: Vergleich der Methanerträge der Varianten des Darß.

6.2.3 Vergleich der Standorte Emsland – Darß

Beim Ertragvergleich der Standorte Emsland (EL) und Darß können nur die Varianten Mix und Binse heran gezogen werden. Dies ist in Abb. 28 dargestellt. Wie zu erkennen ist, wurde bei den Varianten des Darß z.T. deutlich mehr Methan produziert. Dies wird besonders deutlich bei der Variante Binse. Der höchste Methanertrag des Darß, Variante C 1 Binse, liegt fast doppelt so hoch wie der höchste Methanertrag des Emsland, Variante 2 a Binse. Gleiches gilt für das Verhältnis Variante C 2 Binse und 2 b Binse. Bei der Variante Mix hingegen ist die Spanne geringer. Die höchsten Methanerträge der Standorte Darß und Emsland sind annähernd gleich.

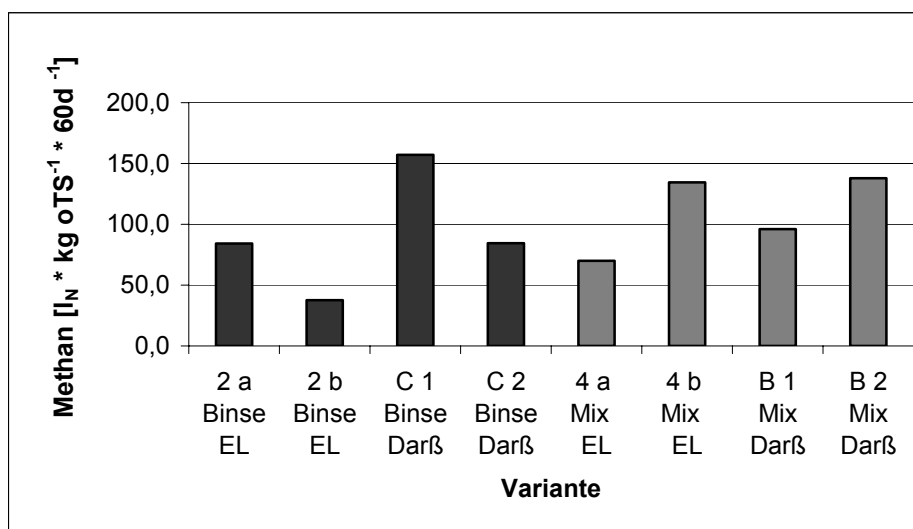


Abbildung 28: Vergleich der Methanerträge der Varianten des Emslandes (EL) und Darß.

6.3 Prozessverlauf und physikalische Substrateigenschaften

6.3.1 Verlauf der Anfahrphase

In Abb. 29 ist die Stabilität des pH-Werts in der Anfahrphase der einzelnen Varianten in Tagen aufgetragen. Wie zu erkennen ist, trat diese zwischen dem siebten (Variante 2 b Binse) und dem zwölften Tag ein.

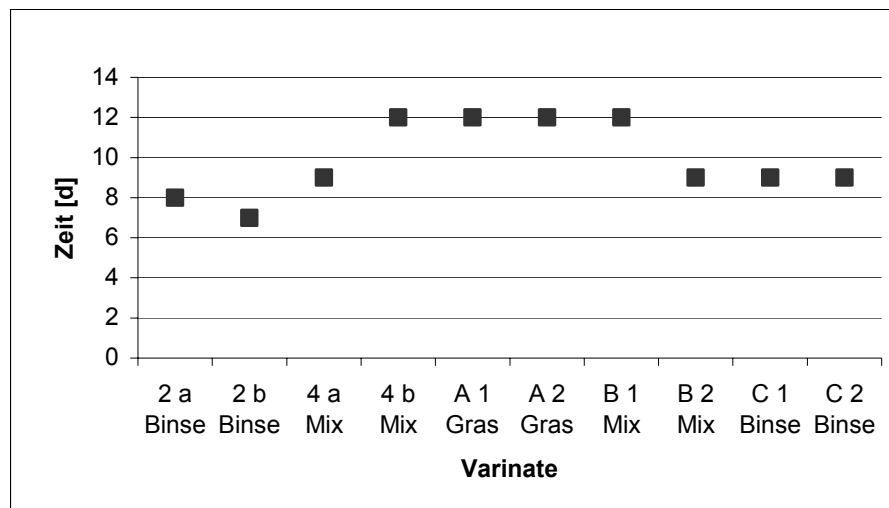


Abbildung 29: Erreichen eines stabilen pH-Wertes in Tagen aller Varianten in der Anfahrphase.

6.3.2 Verweilzeit

In Abb. 30 ist der tägliche Methanertrag in Abhängigkeit der Verweilzeit mit logarithmischer Trendlinie und Bestimmtheitsmaß exemplarisch anhand der Variante 4 b aus dem Emsland abgebildet. Wie zu erkennen ist, schwanken die täglichen Methanerträge ab etwa dem 15. Versuchstag. Die Trendlinie steigt ab dem dritten bis etwa zehnten Tag stark an. Danach nimmt die Steigung ab und hält diesen Trend bis zum Versuchsende.

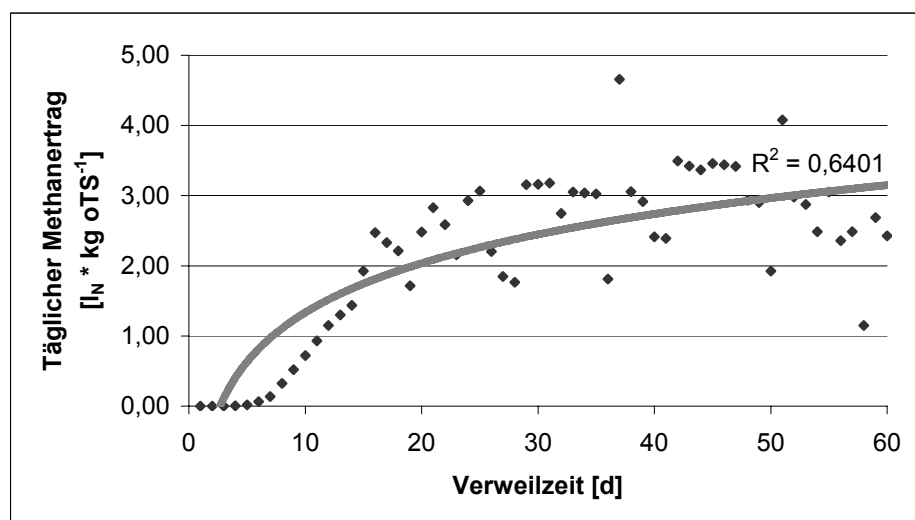


Abbildung 30: Exemplarischer täglicher Methanertrag der Variante 4 b aus dem Emsland mit Trendlinie und Bestimmtheitsmaß (R^2).

6.3.3 Strukturstabilität der Substratstöcke

In Abb. 31 ist der Höhenverlust der einzelnen Varianten in cm dargestellt. Zu erkennen ist, dass die Varianten Gras und Variante Mix 4 a die größten Höhenverluste, die Varianten 2 b und C 1 Binse dagegen die geringsten verzeichnen. Einen mäßigen Verlust weisen die restlichen Varianten auf.

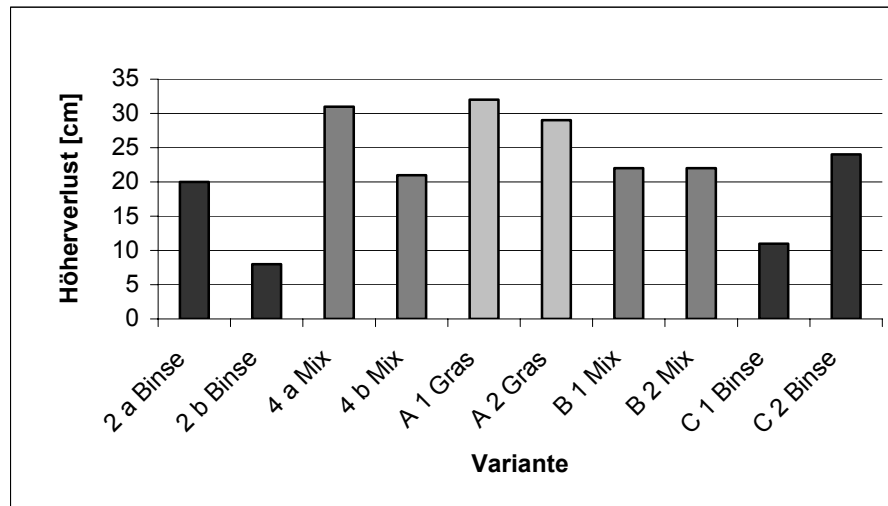


Abbildung 31: Höhenverlust der Substratsstöcke aller Varianten nach der Vergärung.

In Abb. 32 sind die Einzelergebnisse aus Abb. 31 nach Art des Substrats zusammengefasst. Die Variante Gras hat dabei den größten, die Variante Binse den geringsten Höhenverlust an Substrat mit gleichzeitig großen Minimal- und Maximalwerten zu verzeichnen.

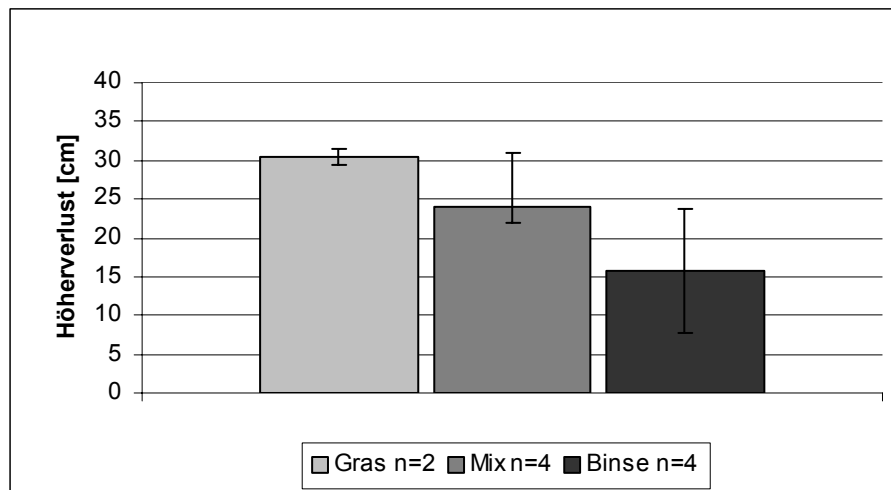


Abbildung 32: Durchschnittlicher Höhenverlust der Substratsstöcke nach Varianten mit Minimal-Maximal- und Mittelwert zusammengefasst.

In Abb. XXX ist die Stabilität des Substratsstocks durch Binsenanteile mit linearer Trendlinie und Bestimmtheitsmaß nach der Vergärung von 60 Tagen dargestellt. Der Höhenverlust nimmt mit steigendem Binsenanteil ab, d.h. je mehr Binse im Substratsstock vorhanden ist, desto weniger sackt dieser zusammen.

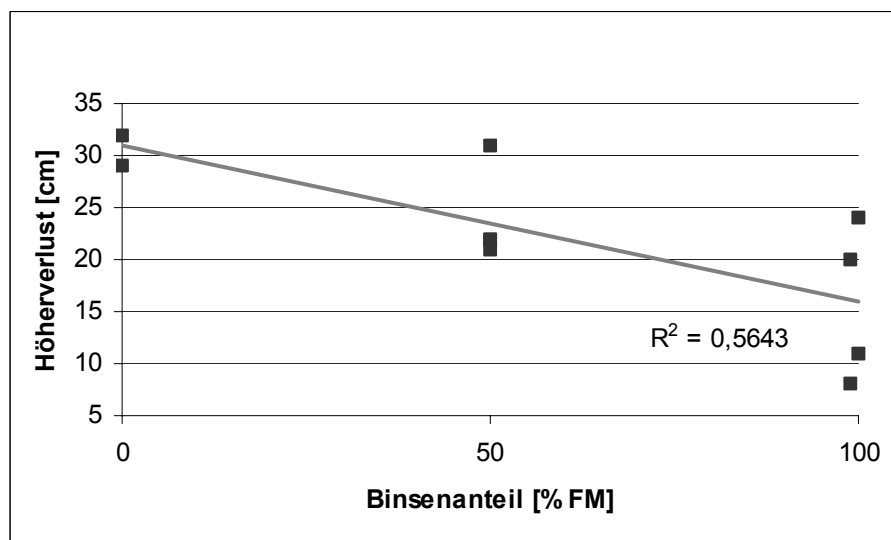


Abbildung 33: Stabilität der Substratsstöcke durch den Einfluss der Binse mit linearer Trendlinie und Bestimmtheitsmaß (R^2).

6.3.4 Massendifferenz und Perkolat-Bindeverhalten der Substratstücke

In Tab. 15 sind Einwaagen, Rückwaagen sowie Massendifferenzen und Verhältnis Rückwaage/Einwaage der einzelnen Varianten dargestellt. Die Massendifferenzen kommen durch Eigenschaften einiger Substrate, das Perkolat zu binden, zustande. Wie in der Spalte Verhältnis Rückwaage/Einwaage zu erkennen ist, hat dieses bei den Varianten Binse und Mix zugenommen, sich bei der Variante C 1 Binse und 2 a Binse sogar mehr als verdoppelt. Bei Variante C 2 Binse jedoch war die Zunahme nur gering. Bei den Varianten Gras hingegen hat die Masse abgenommen, bei A 2 Gras ein Vielfaches mehr als bei A 1 Gras.

Tabelle 15: Massendifferenz und Verhältnis Einwaage/Rückwaage aller Varianten.

Variante	Einwaage FM [g]	Rückwaage [g]	Massendifferenz Rückwaage - Einwaage [g]	Verhältnis Rückwaage / Einwaage
2 a Binse	5173	10767	5594	2,08
2 b Binse	7977	14799	6822	1,86
4 a Mix	7192	9833	2641	1,37
4 b Mix	12748	15228	2480	1,19
A 1 Gras	11841	11447	-394	0,97
A 2 Gras	21897	16621	-5276	0,76
B 1 Mix	7836	11630	3794	1,48
B 2 Mix	11024	15356	4332	1,39
C 1 Binse	6070	13607	7537	2,24
C 2 Binse	11006	11502	496	1,05

In Abb. 34 ist die Massendifferenz in Abhängigkeit des Binsenanteils mit linearer Trendlinie und Bestimmtheitsmaß nach der Vergärung dargestellt. Wie zu erkennen ist, nimmt die Massendifferenz der Substrate, durch Bindung der Perkolats, mit steigendem Binsenanteil zu.

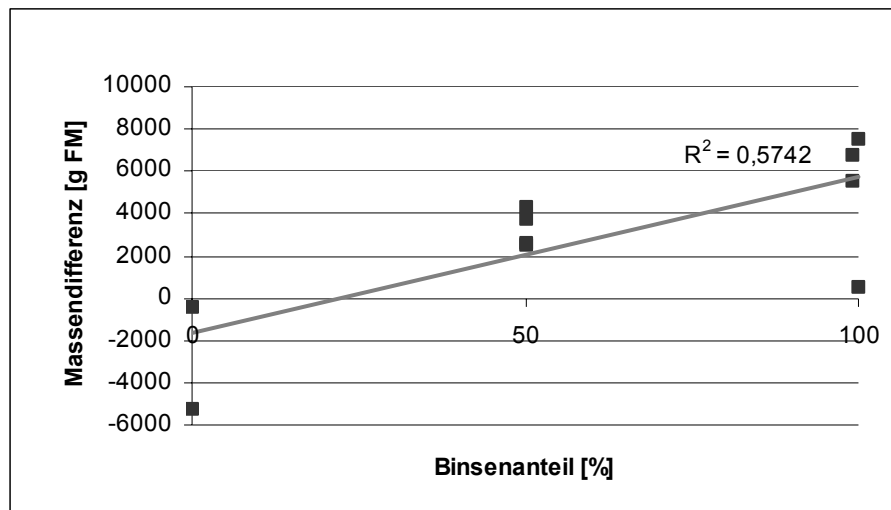


Abbildung 34: Perkolat-Bindeverhalten der Substratstöcke mit unterschiedlichen Binsenanteilen mit linearer Trendlinie und Bestimmtheitsmaß (R^2) nach der Vergärung.

6.3.5 Dichte der Substratstöcke

In Abb. 35 ist der Methanertrag in Abhängigkeit von der Dichte mit linearer Trendlinie und Bestimmtheitsmaß der Varianten Mix abgebildet. Mit steigender Dichte nimmt der Methanertrag signifikant zu.

Bei den Varianten Binse war kein Zusammenhang erkennbar (Abb. 36), bei den Varianten Gras war die Datenmenge ($n=2$) zu gering.

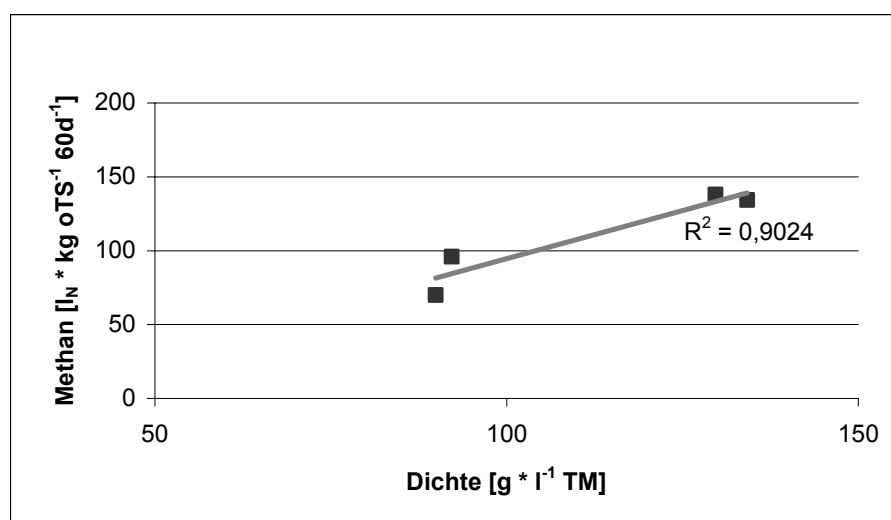


Abbildung 35: Dichteeinfluss und Methanertrag der Varianten Mix mit linearer Trendlinie und Bestimmtheitsmaß (R^2) nach der Vergärung.

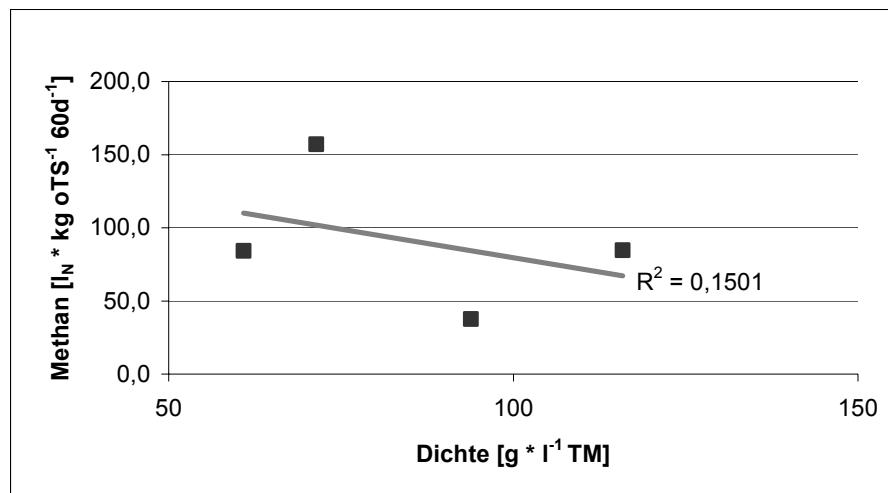


Abbildung 36: Dichteeinfluss und Methanertrag der Varianten Binse mit linearer Trendlinie und Bestimmtheitsmaß (R^2) nach der Vergärung.

6.4 Inhaltsstoffe der Substrate

In Tab. 16 sind die Anteile an Rohasche (XA), Rohprotein (XP) und Rohfaser (XF) dargestellt. Dabei wurde zwischen Anteilen der Silage, des Gärrests und der Differenz beider unterschieden. Je nach Grad der Zersetzung des Substrats wurden dabei mehrere Proben genommen.

Wie zu erkennen ist, nehmen die Anteile der Rohasche bei der Silage Werte zwischen 3,5 und 6,6 % der Trockenmasse (TM) ein. Die Anteile des Rohproteins liegen zwischen 10,8 und 15,8 % der TM und die der Rohfaser zwischen 23,0 und 31,4 % der TM.

Beim Gärrest liegen die Anteile der Rohasche zwischen 4,4 und 17,7 % der TM, die des Rohproteins zwischen 10,0 und 21,1% der TM und der Rohfaser zwischen 19,8 und 32,6 % der TM.

Die Werte der Differenz zwischen Silage und Gärrest liegen bei der Rohasche zwischen -1,0 und -11,1 % der TM, die des Rohproteins zwischen 3,4 und -5,3% der TM und der Rohfaser zwischen 6,3 und -4,9 % der TM.

Tabelle 16: Untersuchung der Inhaltsstoffe aller Varianten.

Variante	Grad der Zersetzung	XA Silage [% TM]	XP Silage [% TM]	XF Silage [% TM]	XA Gärrest [% TM]	XP Gärrest [% TM]	XF Gärrest [% TM]	XA Diff. Sila. - Gärr. [% TM]	XP Diff. Sila. - Gärr. [% TM]	XF Diff. Sila. - Gärr. [% TM]
2 a Binse	stark schwach	3,5	10,8	31,4	7,0	11,8	31,0	-3,5	-1,0	0,4
2 b Binse		3,5	10,8	31,4	6,8	11,5	32,6	-3,3	-0,7	-1,2
2 b Binse		3,5	10,8	31,4	4,4	11,1	32,2	-1,0	-0,3	-0,8
4 a Mix	stark schwach	6,1	15,8	26,8	11,4	17,6	20,8	-5,4	-1,8	6,0
4 b Mix		6,1	15,8	26,8	11,3	21,1	20,4	-5,2	-5,3	6,3
4 b Mix		6,1	15,8	26,8	8,9	15,4	30,3	-2,8	0,4	-3,5
A 1 Gras	stark	6,6	13,4	23,0	12,2	14,0	27,8	-5,6	-0,6	-4,8
A 1 Gras	schwach	6,6	13,4	23,0	8,3	10,0	27,9	-1,7	3,4	-4,9
A 2 Gras	stark	6,6	13,4	23,0	17,7	16,9	20,8	-11,1	-3,5	2,2
A 2 Gras	schwach	6,6	13,4	23,0	10,3	15,5	25,1	-3,7	-2,0	-2,0
B 1 Mix		5,0	13,6	27,5	10,1	12,4	25,2	-5,2	1,3	2,3
B 2 Mix		5,0	13,6	27,5	11,6	15,4	23,7	-6,6	-1,8	3,8
C 1 Binse		5,5	14,7	25,9	10,0	16,4	21,4	-4,6	-1,7	4,5
C 2 Binse		5,5	14,7	25,9	11,1	18,0	19,8	-5,6	-3,4	6,1

6.5 Ergebnisse der Bodenuntersuchung

In Tab. 17 sind die Ergebnisse der Bodenuntersuchungen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der pH-Wert der Fläche des Darß geringfügig höher ist als der pH-Wert der Flächen der Varianten V 2 und V 4 des Emslandes. Die Gehalte an K_2O , Mg und P_2O_5 der emsländischen Flächen hingegen liegen deutlich höher als die des Darß, besonders der Magnesiumgehalt der Variante V 4 des Emslandes mit $83,5 \text{ mg} \cdot 100\text{g}^{-1}$ Boden.

Ein Zusammenhang zwischen den Ergebnissen der Bodenuntersuchung und den Methanerträgen konnte nicht festgestellt werden.

Tabelle 17: Ergebnisse der Bodenuntersuchung.

Herkunft/ Variante	pH- Wert	K_2O [mg * 100g ⁻¹ Boden]	Mg [mg * 100g ⁻¹ Boden]	P_2O_5 [mg * 100g ⁻¹ Boden]
Darß	4,5	3,0	6,5	8,0
Emsland V 2	3,7	13,4	39,2	11,1
Emsland V 4	4,3	19,8	83,5	17,4

7 Diskussion

7.1 Diskussion der Ergebnisse

Grundsätzlich lässt sich sagen, dass die Vergärung von Landschaftspflegematerial im Feststoffvergärungsverfahren möglich ist. Je nach Substrat und dessen Eigenschaften und Herkunft, sowie der Prozessführung der Vergärung ergeben sich unterschiedliche Gaserträge, die im einzelnen diskutiert werden.

Der Verfasser weist jedoch darauf hin, dass die geringe Anzahl an Vergärungswiederholungen (jeweils eine Wiederholung pro Variante) bei der Diskussion zu berücksichtigen ist.

7.1.1 Gaserträge der einzelnen Varianten

Bei Betrachtung der Abb. 14 bis 23 fallen zunächst Schwankungen der Methangehalte **aller** Varianten auf. Dies ist nach Auffassung des Verfassers damit zu erklären, dass ab dem 21. Versuchstag die Betreuung der Anlage und Messung der Daten durch verschiedene Personen durchgeführt worden sind. Zudem befanden sich im Versuchszeitraum mehrere Wochenend- bzw. Feiertage.

Weitere Auffälligkeiten werden in den folgenden Kapiteln diskutiert.

7.1.2 Methanerträge im Vergleich

7.1.2.1 Vergleich der Varianten des Standorts Emsland

Die in Abb. 26 auffälligen Unterschiede der Methanerträge zwischen den Varianten Binse und Mix könnten nach Ansicht des Verfassers damit zusammen hängen, dass der in den Varianten Mix vorhandene Gras- und Kräuteranteil von zusammen 50 %_{Masse} mehr leicht abbaubare Substanzen geliefert hat. Bei den Varianten Binse lieferte das ligninhaltige Substrat mit hohen Rohfaseranteilen (Tab. 16) nur wenige Nährstoffe (MÄHNERT et al. 2005; PROCHNOW et al. 2005). Zudem wies das Substrat einen Anteil an toter org. Substanz von 20 %_{Masse} auf. Daher besteht, wie in Kap. 2.2.2.9 beschrieben, die Möglichkeit, dass das Substrat aus dem Emsland aufgrund des Anteils an abgestorbener org. Substanz bereits mit hemmend wirkenden Schimmelpilzen durchsetzt war (EDER et al. 2006).

Auffällig ist zudem, dass die Methangehalte der Variante 2 Binse nur langsam und unterdurchschnittlich angestiegen sind (Abb. 14 und 15), und bei Variante 2 b Binse nur gegen

Versuchsende einen Methananteil von knapp über 50 %_{Vol.} erreichten. Daraus resultieren auch die geringen Methanerträge. Weitere Erläuterungsmöglichkeiten zu den Methanerträgen siehe Kap. 7.1.2.3 und Kap. 7.2.

7.1.2.2 Vergleich der Varianten des Standorts Darß

Bei Betrachtung der Varianten A Gras und B Mix in Abb. 27 wären beim Gras höhere Methanerträge aufgrund der leichter abbaubaren Substanzen zu erwarten (Kap. 2.2.2.8). Jedoch liegen diese bei den Varianten B Mix geringfügig höher. Eine mögliche Erklärung des Verfassers ist die hohe Beschickungsdichte der Fermenter. Diese lag bei der Variante A 2 Gras fast doppelt so hoch wie bei A 1 Gras (Tab. 14). Dadurch „verklebte“ das Substrat, die Perkulations-flüssigkeit konnte schwerer alle Bereiche erfassen, es bildeten sich tote Zonen. Zusätzlich konnten die entstandenen Gase schwerer entweichen. Dieses Phänomen wurde bereits von GRONAUER & ASCHMANN (2004) beschrieben (Kap. 3.1.1).

Bei den Varianten Mix hingegen wurde durch den Binsenanteil von 50 %_{Masse} ein lockeres Gefüge geschaffen, wodurch sich das Perkolat besser verteilen und die Gase besser entweichen konnten (GRONAUER & ASCHMANN 2004).

Bei den Varianten C Binse gilt in Hinsicht auf die Dichte selbiges wie bei den Varianten A Gras. Bei höherer Dichte (Variante C 2) sinkt der Gasertrag. Auffällig ist auch, dass die Variante C 1 Binse den höchsten Methanertrag mit 157,2 l_N hat. Die Variante C 2 Binse liegt mit knapp 84,6 l_N weit darunter (Tab. 14). Obwohl wenig leicht abbaubare Substanzen vorhanden waren, wurde hier Methan gebildet. Mögliche Ursache könnte nach Meinung des Verfassers die Oberflächenstruktur der Binse sein. An dieser könnten sich die Bakterien besser ansiedeln und – abgesehen von der guten Perkolatverteilung und Entweichungsmöglichkeit der Gase – die im Perkolat gelösten Nährstoffe aufnehmen und umwandeln

7.1.2.3 Vergleich der Standorte Emsland – Darß

Wie in Abb. 28 zu erkennen ist, wurde bei den Varianten des Darß z.T. deutlich mehr Methan produziert. Dies ist bei den Varianten Binse nach Auffassung des Verfassers durch die unterschiedlichen Bewirtschaftungsformen zu erklären (Tab. 6). Während die Fläche des Darß zwei Mal pro Jahr gemäht wurde, und die Biomasse von der Struktur her somit jünger war, fand auf der Fläche der Varianten 2 Binse des Emslandes nur eine Beweidung mit geringem Verbiss statt. Somit handelte es sich bei der Biomasse der Varianten 2 Binse um ältere lignifizierte

Bestände mit hohen Anteilen an Rohfaser (Tab. 16). Zudem nahm der Anteil an abgestorbener org. Substanz einen Wert von ca. 20 %_{Masse} ein (vgl. Erläuterung zur abgestorbenen org. Substanz, Kap. 7.1.2.1).

Bei den Varianten Mix hingegen fallen die Unterschiede kleiner aus. Auch in diesem Fall nimmt der Anteil an abgestorbener org. Substanz der Varianten 4 Mix aus dem Emsland einen Wert von ca. 10 %_{Masse} ein (vgl. Erläuterung zur abgestorbener org. Substanz, Kap. 7.1.2.1).

Nach Ansicht des Verfassers bestätigt dieses Ergebnis, in Hinblick auf die anaerobe Vergärung von Landschaftspflegematerial, die Notwendigkeit eines regelmäßigen Schnittes der betrachteten Flächen. Dies kann durch Untersuchungen durch PROCHNOW et al. (2005) bestätigt werden.

Eine weitere mögliche Erklärung dieser Unterschiede liegt nach Meinung des Verfassers in der Anlagentechnik (Kap. 7.2). In den ersten Tagen der Vergärung gab es bei den Varianten des Emslandes Probleme mit der Perkolation. Die Perkolationsflüssigkeit war nicht ausreichend, sodass das Perkolat mit Wasser verdünnt wurde. Somit war möglicherweise die Bakteriendichte zu Versuchsbeginn geringer und konnte sich erst im Verlauf des Versuches stabilisieren. Zusätzlich war einer der Heizstäbe eines Perkolattanks defekt. Dies würde die in Abb. 14 bis 17 dargestellten langsam zunehmenden Methangehalte der Varianten des Emslandes erklären.

7.1.2.4 Vergleich mit Mais- und Grassilage

In Abb. 37 werden die eigenen Versuchsergebnisse mit denen von LUXENBURGER (2004) (Mais- und Grassilage) verglichen. Diese Daten wurden ebenfalls in Lühburg erhoben. Dabei beziehen sich die Daten auf einen Vergärungszeitraum von 57 Tagen. Die Fermenter hatten ein Volumen von 60 Litern. Es wurde nur eine Versuch je Substrat ohne Wiederholung durchgeführt. Dabei handelte es sich um das 3-A-Verfahren (Kap. 3.1.1). Die Ergebnisse wurden nicht in Normliter, sondern nur in Liter angegeben. Die eigenen Ergebnisse beider Standorte wurden dabei nach Art des Substrats zusammen gefasst.

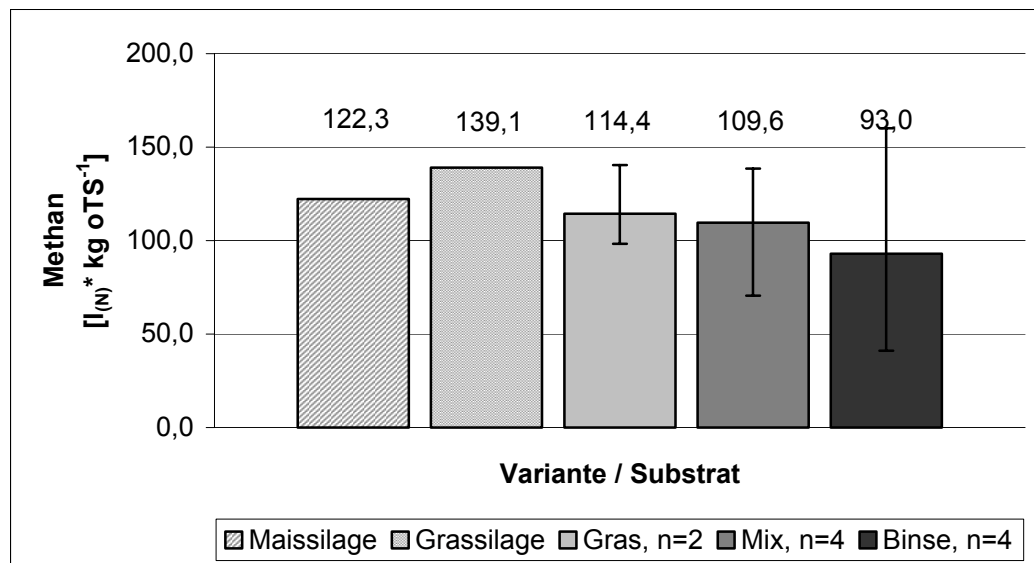


Abbildung 37: Vergleich der erhobenen durchschnittlichen Methanerträge (mit Minimum- und Maximumwert) mit Mais- und Grassilage.

Wie in Abb. 37 zu erkennen ist, hat die Grassilage von LUXENBURGER (2004) mehr Methan produziert als die Maissilage, sowie die Varianten Gras, Mix und Binse. Dies kann nach Meinung des Verfassers damit zusammen hängen, dass die Ergebnisse von LUXENBURGER (2004) nicht in Normliter umgerechnet worden sind (Kap. 5.5) und es nur einen Vergärungsversuch je Substrat ohne Wiederholung gab. Zudem wurden die Gehalte an Schwefelwasserstoff und Ammoniak der eigenen Substrate nicht gemessen (jedoch geruchlich festgestellt), was zu Hemmungen der Bakterien führen kann (Kap. 2.2.2.9; Kap. 7.2). Darüber hinaus stammten Mais- und Grassilage aus intensiver Landwirtschaft (mit regelmäßiger Bewirtschaftung), während die eigenen Substrate aus extensiver bis halb intensiver Bewirtschaftung stammten, da die naturschutzfachlichen Belange und nicht die Flächenproduktivität ausschlaggebende Nutzungskriterien waren. Aus den genannten Gründen können die Biogaserträge der Varianten Gras und Mix als widererwartend hoch angesehen werden.

Die Varianten Binse sind schwer zu vergleichen, da Minimum-, Mittel- und Maximumwert weit auseinander liegen. Diese Ertragsunterschiede kommen durch die geringen Methanerträge der Variante 2 b Binse und die hohen Methanerträge der Variante C 1 Binse zu Stande. Im Vergleich zu den Varianten Gras und Mix hat die Binse im Mittel etwa 20 % weniger Methan produziert, was trotz der schwer abbaubaren Substanzen wie z.B. Lignin als durchaus positiv zu bewerten ist.

Würde nur vom Maximumwert ausgegangen werden, bestünde die Theorie, dass die Binse durch ihre gute Oberflächenstruktur den Bakterien lediglich den Lebensraum bieten kann,

während die im Perkolat gelösten Nährstoffe aufgenommen werden. Der Substratstock dient nur als Lebensraum, nicht als Nährstoffquelle. Entsprechende Perkulationsversuche mit künstlichen anorganischen Substratstöcken sollen durchgeführt werden (LUXENBURGER 2008 mündl.).

7.1.2.5 Vergleich mit Literaturangaben

In Tab. 18 sind Versuche zur anaeroben Vergärung von Landschaftspflegegrün (LPG) verschiedener Autoren zusammengefasst. Dabei wurden verschiedene Substrate bei **unterschiedlichen** Versuchsbedingungen vergoren.

Tabelle 18: Zusammenfassung von Versuchen zur Vergärung von Landschaftspflegematerial.

Quelle	Substrat- charakterisierung	Versuchsbedingungen (Verfahren/ Verweilzeit/ Temperatur/ Nutzvolumen/ Animpfung)	Biogas- ertrag [kg oTS]	Methan- ertrag [kg oTS]
PROCHNOW et al. (2005)	LPG der Nuthe- Nieplitz-Niederung (Brandenburg). Eutropher, frischer Niedermoorstandort Mahd Oktober Ø Mahd November Ø	Monovergärung im Batch-Ansatz/ 28 d/ 35°C/ 2 l, davon 1500 ml ausgefaulte Rindergülle und 50 g LPG	449 l _N 381 l _N	215 l _N 185 l _N
OECHSNER (2005)	LPG „nicht näher definiert Mahd September Grassilage, extensiv (2-schurig) Mahd September	Flüssigvergärung im Durchlaufprinzip / 25 d/ mesophil/ 18 l/ Grundsubstrat Flüssigmist	k. A. k. A.	80 l _N 220 l _N
GRONAUER & ASCHMANN (2003)	LPG mit teilweise stark angewelktem Rasenschnitt mit Laubanteilen	Feststoffvergärung im Boxen- fermenter, Praxisanlage/ 52 d/ ca. 37° C/ 112 m³, Nutzvolumen ca. 52 m³/ Animpfung mit vergorener Grassilage von 65 %	189 l	96 l

Wie in Tab. 18 dargestellt, lagen die Methanerträge der Autoren zwischen 80 und 220 Litern bzw. Normlitern pro kg oTS. Im Vergleich dazu liegen die eigenen Ergebnisse mit den Varianten Gras Ø 114 l_N, Mix Ø110 l_N und Binse Ø 91 l_N weit unter den Literaturerträgen (Abb. 37).

Nach Ansicht des Verfassers ist dies mit den unterschiedlichen Versuchsbedingungen und der Art der LPGs zu erklären. Bei PROCHNOW et al. (2005) und OECHSNER (2005) wurden Flüssigvergärungsverfahren mit hohen Anteilen an Impfmateriel verwendet. Bei PROCHNOW et

al. (2005) betrug der Anteil an LPG nur 50 g. Bei OECHSNER (2005) war der Anteil nicht zu ermitteln. Zusätzlich betrug die Verweilzeit 25 bzw. 28 Tage, die der eigenen Versuche hingegen 60 Tage. Bei PROCHNOW et al. (2005) handelt es sich um **ideale** Labor-Versuchsbedingungen mit kleinen Batch-Fermentern (2 Liter Volumen), die eine optimale Temperatur- und Animpfmaterial-verteilung ermöglichen. Hier spielt die Frage der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Praxisanlagen eine wichtige Rolle, da Substrate mit hohen Trockensubstanzanteilen für die Flüssigvergärung nicht geeignet sind (Kap.3.2). Gleiches gilt für das von OECHSNER (2005) gewählte Flüssigvergärungsverfahren im Durchlaufprinzip.

Ansatzweise vergleichbare Versuchsbedingungen sind bei GRONAUER & ASCHMANN (2003) zu finden. Hier handelt es sich um eine Feststoffvergärung im Boxenfermenter über einen Zeitraum von 52 Tagen mit einem Impfmaterialeanteil von ca. 65 %. Der Methanertrag von 96 Litern (nicht Normliter!) ist mit den eigenen Ergebnissen als annähernd übereinstimmend zu sehen. Jedoch ist das LPG nur mangelhaft beschrieben. Zudem ist der Ertrageinfluss des Impfmateriale von ca. 65 % vergorener Gassilage zu berücksichtigen.

Darüber hinaus ist zu bedenken, dass eine mögliche Methanbildung in den Perkolattanks der eigenen Versuche nicht berücksichtigt wurde (Kap. 3.3; Kap. 7.2). Zudem wurden die Konzentrationen an Schwefelwasserstoff und Ammoniak nicht gemessen (Kap. 2.2.2.9; 7.1.2.4).

7.1.3 Prozessverlauf und physikalische Substrateigenschaften

7.1.3.1 Verlauf der Anfahrphase

Wie in Kap. 6.1.3.1 beschrieben, kann bereits nach maximal zwölf Tagen von stabilen Fermentationsprozessen ausgegangen werden. Dabei wurden die Substrate nur durch die Perkulationsflüssigkeit beimpft, was nach GRONAUER & ASCHMANN (2004) zu einem schleppenden Anlauf des Fermenters führt. Die zu Beginn des Vergärungsprozesses anfallenden Säuren konnten durch die kreuzweise Führung des Perkolats gepuffert werden. Eine Versauerung des Substrats und damit einhergehende Hemmung der Methanbakterien (WEILAND 2006; GRONAUER & ASCHMANN 2004) fand nicht statt. Somit ist die alleinige Animpfung des Substrats mittels Perkulationsflüssigkeit unter Berücksichtigung der kreuzweisen Führung des Perkolats durchaus möglich.

Darüber hinaus kann die alleinige Beimpfung des Substrats durch das Perkolat positive Effekte auf die Wirtschaftlichkeit einer Biogasanlage haben, da einerseits keine Vermischung mit schon vergorenem Material durchgeführt werden muss (Kap. 2.2.2.2), was bis zu 85 % Impfmateriale

enthalten kann (FNR 2007; KRAFT et al. 2006). Andererseits können, vor allem bei längeren Vergärungszeiträumen von 60 Tagen, die zeitaufwändigen Arbeitsschritte des Be- und Entladens (FNR 2007; Kap. 4.1) verringert werden, wodurch wiederum Kosten und Arbeitsaufwand gesenkt werden können.

7.1.3.2 Verweilzeit

Wie in Abb. 30 dargestellt, steigt die Trendlinie zu den täglichen Methanerträgen bis zum Versuchsende an. Dies lässt den Verfasser vermuten, dass nach 60 Versuchstagen der maximale tägliche Methanertrag noch nicht erreicht wurde und dass ein Vergärungszeitraum von **über** 60 Tagen durchaus möglich erscheint. Dies hätte wiederum positiven Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit (Kap. 4; Kap. 7.1.3.1). Zudem muss beachtet werden, dass nach KALTSCHMITT & HARTMANN (2001) bei pflanzlichen Gerüstsubstanzen wie Cellulose, Hemicellulose und Lignin die **Hydrolyse** (Kap. 2.2.1) der geschwindigkeitsbestimmende Prozess ist. Somit lässt sich die langsam anlaufende Vergärung erklären (Abb. 30).

Im Vergleich dazu nahm beim Vergärungsversuch von LUXENBURGER 2004 der tägliche Methanertrag von Maissilage bis zum 29. Versuchstag kontinuierlich zu, fiel jedoch ab dem 30. Versuchstag kontinuierlich ab. Dies zeigt nach Ansicht des Verfassers, dass die org. Substanz des Mais schneller aufschließbar war, während das Aufschließen komplexerer org. Verbindungen des LPGs wie z.B. Lignin einen längeren Zeitraum beansprucht (KALTSCHMITT & HARTMANN 2001). Dies könnte zudem auch die in Abb. 14 bis 23 z.T. langsam ansteigenden Methangehalte erklären.

Die starken Schwankungen der täglichen Methanerträge dürfen jedoch nicht außer Acht gelassen werden. Diese kamen vermutlich durch den Wechsel des Betreuungspersonals, der Verwendung unterschiedlicher Gasvolumenmessgeräte sowie durch Wochenend- und Feiertage während des Versuchszeitraums zustande (Kap. 7.2).

7.1.3.3 Strukturstabilität der Substratstöcke

Wie in den Abb. 31 bis 33 dargestellt, hat der Anteil der Binse Einfluss auf die Stabilität der Substratstöcke. Dass steigende Rohfasergehalte die Verdichtbarkeit herabsetzen wurde schon von PROCHNOW et al. (2005) beobachtet. Wie bereits durch GRONAUER & ASCHMANN (2004) vermutet, bleibt der Substratstock durch Anteile strukturreicher Substratzusammensetzungen

stabiler, sackt weniger zusammen, wodurch eine gleichmäßige Verteilung des Perkolats erleichtert wird. Gleichzeitig haben die gebildeten Gase die Möglichkeit leichter zu entweichen.

7.1.3.4 Massendifferenz und Perkolat-Bindeverhalten der Substratstöcke

Die in Kap. 6.3.4 erwähnte Massendifferenz des Substratstocks scheint von der Eigenschaft der Binsenoberfläche, die Perkulationsflüssigkeit aufnehmen zu können, abhängig zu sein (Tab. 15). Nach Meinung des Verfassers kann das Perkolat besser im Substratstock gehalten werden und steht den Bakterien über einen längeren Zeitraum zu Verfügung, bis beim nächsten Perkulationsvorgang neues Perkolat gebunden wird. Da einfache org. Bestandteile durch die Hydrolyse im Perkolat gelöst wurden (Kap. 2.2.1) standen diese spätestens ab dem zwölften Versuchstag zur Verfügung, da ab hier der pH-Wert des Perkolats als stabil eingestuft wurde und somit auch mit saurem Perkolat (mit gelösten Amino- und Fettsäuren) perkoliert wurde (Kap. 5.2.2.2).

7.1.3.5 Dichte der Substratstöcke

Mit steigender Dichte nimmt der Methanertrag in Abb. 35 deutlich zu. Somit kann, wie schon in Kap. 7.1.3.3 erwähnt, der Substratstock durch das Perkolat gut durchflossen werden und die Gase können entweichen (GRONAUER & ASCHMANN 2004). Gleichzeitig liefert die Begleitvegetation (Gräser und Kräuter) leicht abbaubare Nährstoffe und die Binse bietet den Fermentationsbakterien Lebensraum durch ihre Oberflächenstruktur.

Daraus ist zu schließen, dass auch mit einer hohen Dichte des zu vergärenden Substrats, unter der Berücksichtigung eines ausgewogenen und strukturstabilen Substratmix (GRONAUER & ASCHMANN 2004), hohe Gaserträge realisierbar sind.

7.1.4 Inhaltsstoffe der Substrate

Auffällig sind in Tab. 16 die Differenzen zwischen Silage und Gärrest. Zum Teil haben die Gehalte an XA, XP und XF zugenommen (siehe negative Werte). Die Zunahme der Rohasche (XA) lässt sich nach Meinung des Verfassers dadurch erklären, dass Teile der organischen Substanz abgebaut wurden und dabei die anorganischen Bestandteile übrig geblieben sind und sich angereichert haben. Durch die Verwendung von substratfremden Perkolat, dass hier als

externe N-Quelle angesehen werden kann (Kap. 5.2.2.2), lässt sich die Zunahme des Rohproteins (XP) erklären. Der höhere Anteil an Rohfaser (XF) lässt vermuten, dass die Rohfaser weniger stark abgebaut wurde (im Gegensatz zu beispielsweise Zuckerverbindungen, Kap. 2.2.2.8) und sich somit relativ anreichert. Dies deutet darauf hin, dass die Faserbestandteile, vornehmlich die der Zellwände, zur Methanbildung herangezogen wurden, was die These der Strukturstabilität (Kap. 7.1.3.3) und Besiedlungsdichte der Binse untermauert.

7.1.5 Bodenuntersuchungen

Die deutlichen Unterschiede zwischen dem Darß und Emsland in Bezug auf die Gehalte an K_2O , Mg und P_2O_5 kommen nach Ansicht des Verfassers durch die regelmäßige Düngung (V 2 mit PK-Dünger, V 4 mit Gülle) der emsländischen Flächen zustande (Tab. 6). Dass die Biogasversuche Ende 2007/Anfang 2008 und die Bodenuntersuchungen des Emslandes im Herbst 2008 stattfanden kann vernachlässigt werden, da die Bewirtschaftung und Düngung der Flächen in jedem Jahr unverändert blieb.

Der Einfluss der Bodennährstoffe auf das Pflanzenwachstum (SITTE et al. 1998) und damit auch auf den Biogasertrag (Kap. 2.2.2.7) kann schwer diskutiert werden, da trotz guter Basenversorgung auf den Flächen des Emslandes die Biogaserträge, gegenüber denen des Darß, niedriger ausgefallen sind. Die bereits erwähnten Erläuterungen (Pflegemaßnahmen, Kap. 7.1.2.3 und Methodendiskussion, Kap. 7.2) greifen hier. Eine weitgreifendere Diskussion ergibt aus den genannten Gründen keinen Sinn.

7.1.6 Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Praxisanlagen

Wie bereits zu Anfang des Kapitels erwähnt worden ist, muss bei der Diskussion der Ergebnisse die geringe Anzahl an Wiederholungen berücksichtigt werden. Die unterschiedlichen Methanerträge werden besonders bei den Varianten Binse deutlich (Abb. 25).

Zudem ist zu erwähnen, dass es sich bei diesem Vergärungsversuch um reine Laborergebnisse handelt, die zwar relativ praxisnah durchgeführt wurden, deren Übertragbarkeit auf Praxisanlagen jedoch zu überprüfen ist.

Dies zeigen auch die bereits durchgeführten und aktuellen Vergärungsversuche von GRONAUER & ASCHMANN (2003) sowie CARIUS (2007). Hier ergaben sich diverse Probleme technischer Art ergeben bzw. die Methanerträge blieben z.T. weit unterhalb der Erwartung.

Dass die Vegetationsstruktur von Pflegeflächen meist heterogen ist (Kap. 1.1), kann als großer Vorteil angesehen werden, da die Varianten Mix ertrags- und verfahrenstechnisch am besten geeignet sind (Kap. 6.3; Abb. 37).

7.2 Methodendiskussion

7.2.1 Ernteverfahren

Maßgeblicher Kritikpunkt beim Ernteverfahren ist der Erntezeitpunkt. Dieser lag mit Oktober/November außerhalb der gängigen Mahdzeitpunkten für Landschaftspflegemaßnahmen (PROCHNOW et al. 2007). Zudem gab es bei den Varianten 2 Binse und 4 Mix des Emslandes Anteile an toter org. Substanz von 10 - 20 %_{Masse} mit den erwähnten möglichen Konsequenzen in Kap. 7.1.

7.2.2 Biogasversuche

Bei den Biogasversuchen können folgenden Kritikpunkte genannt werden:

- Leckagen der Fermenter und Gasleitungen.

Zu Beginn des Versuchs bestanden erhebliche Undichtigkeiten bei einigen Fermentern und Gasleitungen, wodurch einerseits Sauerstoff in die Fermenter gelangen konnte mit den daraus resultierenden Problemen für die Stabilität der Bakterienpopulationen (Kap. 2.2.2.4). Andererseits führte dies zu veränderten Messergebnissen durch Gasaustritte.

- Verwendung unterschiedlicher Gasvolumenmessgeräte.

Es wurden sieben Gasvolumenmessgeräte von zwei unterschiedlichen Typen für zehn Fermenter verwendet. Daher mussten täglich die angeschlossenen Fermenter gewechselt werden, was zu einer zusätzlichen Interpolation der Daten führte. Zudem reagierten die unterschiedlichen Typen an Messgeräten unterschiedlich auf die in den Fermentern herrschenden Gasdrücke.

- Temperaturschwankungen und Sauerstoffeintrag in den Perkolattanks.

Das Perkolat der Varianten des Emslandes unterlag starken Temperaturschwankungen, da einerseits eine defekte Heizeinheit zu spät entdeckt und andererseits die zu kurzen Heizintervalle über eine Zeitschaltuhr gesteuert wurden, was ebenfalls zu spät bemerkt

wurde. Zusätzlich waren die Perkolattanks nicht luftdicht abgeschlossen, sodass permanent Sauerstoff ins Perkolat diffundieren konnte (Kap. 2.2.2.4 und 2.2.2.5).

- Biogasbildung im Perkolattank.

Es ist davon auszugehen, dass auch im Perkolattank Biogas gebildet wurde. Diese wurde jedoch nicht erfasst (Kap. 3.3).

- Messgeräte für die Berechnung in Normliter.

Es wurden keine Temperatur und Feuchte des Gases gemessen sowie kein Luftdruck. Daher mussten Gastemperatur und -feuchte geschätzt sowie externe Luftdruckdaten eingeholt werden.

- Wechsel des Betreuungspersonals.

Ab dem 21. Versuchstag haben vier Personen die Betreuung der Anlage übernommen. Dies führte zu unterschiedlichen Fehlern in der Prozessführung sowie Biogasmessung.

- Messung von Ammoniak und Schwefelwasserstoff.

Es wurden während des Versuches **kein** Ammoniak und Schwefelwasserstoff im Perkolat gemessen. Das Vorhandensein war jedoch deutlich geruchlich festzustellen. Bezüglich der Hemmungen durch Ammoniak und Schwefelwasserstoff s. Kap. 2.2.2.9.

- Anzahl an Wiederholungen.

Für jede beprobte Variante gab es nur **eine** Wiederholung. Aufgrund der z. T. starken Ertragsunterschiede (Abb. 25) der Wiederholungen ist zu erahnen, dass mehrere Wiederholungen nötig gewesen wären, um haltbarere Aussagen zu machen.

- Untersuchung zur Bakterienbesiedelung der Binse.

Leider wurde die Binsenoberfläche nicht in Hinblick auf die Besiedelungsdicht durch Bakterien untersucht. Dies hätte einige der Thesen belegen können.

8 Ausblick

Wie in Kap. 6 und 7 dargestellt und erwähnt, ist die Vergärung von binsenreichem Landschaftspflegematerial von Hoch- und Niedermoorstandorten im Feststoffvergärungsverfahren möglich. Es bedarf jedoch weiterer Untersuchungen bezüglich der Perkolationsintervalle, der Verlagerung von Nährstoffen aus dem Substrat ins Perkolat, Untersuchungen zu längeren Verweilzeiten und unterschiedlichen Substratzusammensetzungen sowie der Wirkung und Anteilen von groben Strukturelementen und deren Habitatvorteile für die Bakterienarten. Darüber hinaus sind weitere Wirtschaftlichkeitsanalysen durchzuführen.

Vor allem aber sollte die Frage geklärt werden, wie man die meist dezentral gelegenen Flächen mit den mehr oder minder dezentral gelegenen Biogasanlagen, die Transportwege der Biomasse und die Art der Nutzung des Biogases miteinander kombinieren kann.

Darüber hinaus sind noch andere Formen energetischer Nutzung zu berücksichtigen. Da die Verbrennung von LPG von vielen Autoren wie beispielsweise KALTSCHMITT & HARTMANN (2001) als problematisch angesehen wird (hohe Staubimmissionen, Verschlackung der Brennöfen), und deren technische Lösungen aufwendig und teuer sind, kann dieses Verfahren außer Acht gelassen werden. Zukunftssträchtiger hingegen sind Verfahren zur Verflüssigung/Vergasung bzw. Reformierung der Kohlen(wasser)stoffverbindungen. Hierzu zählen die Verfahren BTL (biomass to liquid), hydrothermale Karbonisierung sowie Heatpipe-Reformer.

Beim Verfahren BTL werden Kraftstoffe aus Biomasse synthetisiert (JUNGBLUTH et al. 2008). Allerdings gehen zur Zeit 30 bis 60 % der in der Biomasse gespeicherten Energie verloren (JUNGBLUTH et al. 2008), wodurch eine positive CO₂-Bilanz anzuzweifeln ist.

Bei der hydrothermalen Karbonisierung wird Biomasse mittels Durchflussreaktor unter Druck, Temperatur und einem Katalysator zu komplexen (aromatischen) Kohlenstoffverbindungen verändert (BENDEN 2007). Dabei soll bei diesem Verfahren durch eine exotherme Reaktion Wärme gewonnen werden. Die dabei gebildeten Kohlenstoffverbindungen können im Gartenbau als Torfersatz verwendet werden (BUCHWALD et al. 2008). Das Verfahren ist jedoch noch in der Entwicklungsphase.

Beim Heatpipe-Reformer wird durch eine Vergasung bei rund 800°C ein wasserstoffreiches Synthesegas mit hohem Heizwert gebildet. Vorteil ist der Einsatz als dezentrale Anlage (<http://www.heatpipe-reformer.de/>).

Abschließend sei gesagt, letztendliches Ziel ist die Bewirtschaftung von (Feucht-) Grünlandflächen im Naturschutz bezahlbar zu machen.

9 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird die Frage bearbeitet, ob sich binsenreiches Landschaftspflegematerial von Hochmoorstandorten des Emslandes (Nds.) und Niedermoorstandorten des Darß (MVP) für die anaerobe Vergärung in der Feststofffermentation eignet. Dabei ist anzunehmen, dass die physikalische Substratzusammensetzung sowie die Substratherkunft wichtige Einflussparameter darstellen.

Die eigenen Untersuchungsergebnisse zeigen, dass sich die Feststoffvergärung zur Verwertung von Landschaftspflegeaufwüchsen binsenreicher Moorstandorte eignet. Die Methanerträge lagen zwischen 37,7 und 157,2 l_N*kg oTS⁻¹ nach einer Verweilzeit von 60 Tagen. Am positivsten haben die Varianten Mix abgeschnitten, da hier eine ausgewogene Mischung aus strukturreichen und -armen Substratbestandteilen für gute Perkolationseigenschaften des Substratstocks sorgte und das gebildete Biogas so leichter entweichen konnte. Darüber hinaus zeigt sich, dass die Art der Pflege des Grünlands einen entscheidenden Einfluss auf die Biogas- und Methanerträge hat. Ältere, stark lignifizierte Pflanzenbestände scheinen deutlich schwerer abbaubar zu sein, zumal hier bei einigen Varianten höhere Anteile an abgestorbener org. Substanz vorhanden waren.

Eine Versauerung des Perkolats und einhergehende Prozessinstabilität der Vergärung konnte durch die kreuzweise Führung der Perkulationsflüssigkeit verhindert werden. Zudem ist das alleinige Animpfen des Substrats durch das Perkolat möglich.

Es wurden unterschiedliche Ertragsmengen zwischen den Standorten des Darß und des Emslandes festgestellt. Zum Teil produzierten die Varianten des Darß mehr Biogas aufgrund einerseits jüngerer Pflanzenbestände, andererseits durch Probleme technischer Art im Vergärungsverfahren. Ein Einfluss der Bodennährstoffe auf die Substrate und damit auf den Biogasertrag konnte nicht belegt werden.

Im Vergleich zu den Substraten Mais- und Grassilage, die im Biogaslabor zu einem früheren Zeitpunkt im 3-A-Verfahren vergoren wurden, lieferten die eigenen Substrate geringere Erträge.

Literaturverzeichnis

- AGROPLAN - BÜRO FÜR UMWELT- UND AGRARPLANUNG (2006): Bioenergie und Biogasförderung nach dem neuen EEG und ihre Auswirkungen auf Natur und Landschaft. Wolfenbüttel.
- ASUE - ARBEITSGEMEINSCHAFT FÜR SPARSAMEN UND UMWELTFREUNDLICHEN ENERGIEVERBRAUCH E.V. (Hrsg.) (o.J.): Mikro-KWK Motoren, Turbinen und Brennstoffzellen. Verlag Rationeller Erdgaseinsatz.
- BAYLFU (BAYR. LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ (Hrsg.)) (2007): Biogashandbuch Bayern – Materialienband. Augsburg.
- BRAUN, R. (1982) : Biogas – Methangärung organischer Abfallstoffe. Springer Verlag Wien. New York.
- BRIEMLE, G.; EICKHOFF, D.; WOLF, R. (1991): Mindestpflege und Mindestnutzung unterschiedlicher Grünlandtypen aus landschaftsökologischer und landeskultureller Sicht - Praktische Anleitung zur Erkennung, Nutzung und Pflege von Grünlandgesellschaften. Beihefte zu den Veröffentlichungen für Naturschutz und Landschaftspflege in Baden- Württemberg 60.
- BUCHWALD, R.; MÜLLER, J.; RATH, A.; RÖHRDANZ, M.; WILLEN, M. (2008): Projekt „Wiederherstellung artenreichen Hochmoorgrünlandes durch eine nachhaltige landwirtschaftliche Nutzung unter besonderer Berücksichtigung der Flatterbinsen-Problematik“. 3. unveröff. Zwischenbericht. Univ. Oldenburg.
- BUCHWALD, R.; RATH, A.; WILLEN, M. (2006): Projekt „Wiederherstellung artenreichen Hochmoorgrünlandes durch eine nachhaltige landwirtschaftliche Nutzung unter besonderer Berücksichtigung der Flatterbinsen-Problematik“. 1. unveröff. Zwischenbericht. Univ. Oldenburg.
- CARIUS, W.; HUNTEMANN, R. (2007): BUND Projekt Grünlandmanagement und Biogaserzeugung am Beispiel „Unteres Delmetal“. Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland Landesverband Niedersachsen e.V.. Zwischenbericht 2007.
- DIELMANN, K.P. (2001): Mikrogasturbinen Technik und Anwendung. BWK Das Energie-Fachmagazin 06/2001. Springer VDI Verlag.
- DIERSCHKE, H.; BRIEMLE, G. (2002): Kulturgrasland: Wiesen, Weiden und verwandte Staudenfluren. Eugen Ulmer Verlag. Stuttgart.
- EDER, B. ; SCHULZ, H. ; KRIEG, A. (2006): Biogas-Praxis : Grundlagen, Planung, Anlagenbau, Beispiele. Ökobuch-Verlag. Staufen bei Freiburg.

- EEG (2009): Gesetz zur Neuregelung des Rechts der Erneuerbaren Energien in Strombereich und zur Änderung damit zusammenhängender Vorschriften vom 25. Oktober 2008: Bundesgesetzblatt Jahrgang 2008 Teil I. Nr. 49. Seite 2074.
- FNR (Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e.V.) (Hrsg.) (2007): Biogaserzeugung durch Trockenvergärung von organischen Rückständen, Nebenprodukten und Abfällen aus der Landwirtschaft. Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Braunschweig; Institut für Energetik und Umwelt gGmbH (IE), Leipzig; Lehrstuhl für Verfahrenstechnik / Biotechnologie, Universität Rostock. Gülzow.
- FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.) (Hrsg.) (2006): Trockenfermentation- Stand der Entwicklungen und weiterer F +E-Bedarf. Gülzower Fachgespräche Bd. 24. Gülzow.
- FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.) (Hrsg.) (2004): Handreichung Biogasgewinnung und –nutzung. Gülzow.
- FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.) (Hrsg.) (2000): Leitfaden Bioenergie. Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen. Gülzow.
- GRONAUER, A.; ASCHMANN, V. (2004) : Trockenfermentation und nachwachsende Rohstoffe. In: Zweite gem. Fachtagung der Regierung Niederbayern und der Fachhochschule Deggendorf 2004: Innovationen in der Biogastechnologie. Deggendorf. Seite 89 - 98.
- GRONAUER, A.; ASCHMANN, V. (2003): Wissenschaftliche Begleitung einer Pilotanlage zur Feststoffvergärung von landwirtschaftlichen Gütern. Az: N/01/17. Endbericht. Landtechnischer Verein in Bayern e.V..Weihenstephan.
- JANTZEN, C. (2008): Aspekte der energetischen Verwertung von binsenreichen Grünlandaufwüchsen. Unveröff. Bachelorarbeit. Universität Rostock.
- JEDICKE, E.; FREY, W.; HUNSDORFER, M.; STEINBACH, E. (1996): Praktische Landschaftspflege. Ulmer. Stuttgart.
- JUNGBLUTH, N.; BÜSSER, S.; FRISCHKNECHT, R.; TUCHSCHMID, M. (2008): Ökobilanz von Energieprodukten. Life Cycle Assesment of biomass-to-liquid luels. Final report. ESU-services Ltd., fair consulting in sustainability. Bern, Schweiz.
- KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H. (2001): Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren. Berlin, Heidelberg. Springer Verlag.
- KRAFT, E.; HAUPT, T.; TSCHERPEL, B. (2006): Ergebnisse zum Einfluss physikalischer Feststoffparameter auf die Trockenfermentation von nachwachsenden Rohstoffen. In: FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.) (Hrsg.) (2006): Trockenfermentation- Stand der Entwicklungen und weiterer F +E-Bedarf. Gülzower Fachgespräche Bd. 24. Gülzow. Seite 80 – 94.

- KUSCH, S.; OECHSNER, H.; JUNGBLUTH, T. (2006): Ausgewählte Ergebnisse zur Vergärung von Feststoffen in berieselten Boxenfermentern mit Batch-Betrieb. In: FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.) (Hrsg.) (2006): Trockenfermentation- Stand der Entwicklungen und weiterer F +E-Bedarf. Gülzower Fachgespräche Bd. 24. Gülzow. Seite 59 – 79.
- KUSCH, S.; OECHSNER, H. (2004): Vergärung landwirtschaftlicher Substrate in Feststofffermentern. In: FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.) (Hrsg.) (2004): Trockenfermentation- Evaluierung des Forschungs- und Entwicklungsbedarfs. Gülzower Fachgespräche Bd. 23. Gülzow. Seite 105-113.
- LUXENBURGER, D. (2004): Gewinnung erneuerbarer Energien aus nachwachsenden Rohstoffen mit dem 3A-Verfahren. Unveröff. Diplomarbeit. Universität Rostock.
- MÜLLER-LANGER, F.; SCHNEIDER, S.; WITT, J.; THRÄN, D. (2006): Monitoring zur Wirkung der Biomassenverordnung. Zwischenbericht. Forschungsprojekt im Auftrag des Umweltbundesamts. FuE-Vorhaben. Förderkennzeichen 204 41 133. Leipzig.
- NAUMANN, C.; BASSLER, R. (1993): Methodenbuch Band III - Die chemische Untersuchung von Futtermitteln. VDLUFA-Verlag. Darmstadt.
- OECHSNER, H. (2005): Möglichkeiten zur energetischen Verwertung von Landschaftspflegeheu. In: Natur und Landschaft (2005). Heft 9/10. Seite 426 – 429.
- PETERS, K. (2004): Energieerzeugung aus Biomasse. Eine Chance für die Grünlandpflege? Unveröff. Diplomarbeit. Hannover.
- PROCHNOW, A.; HEIRMANN, M.; DRENKHAN, A.; SCHELLE, H. (2007) a: Biomethanisierung von Landschaftspflegeaufwuchs. In: Naturschutz und Landschaftsplanung 39, (1). Seite 19 – 24.
- RATH, A. (2007): Aktuelle Vegetation und Diasporenbank im Projekt „Wiederherstellung artenreichen Hochmoorgrünlandes durch eine nachhaltige landwirtschaftliche Nutzung unter besonderer Berücksichtigung der Flatterbinsen-Problematik“. Unveröff. Diplomarbeit. Univ. Oldenburg.
- RODE, M.; SCHNEIDER, C.; KETELKAKE, G.; REIBHAUER, D. (2005): Naturschutzverträgliche Erzeugung und Nutzung von Biomasse zur Wärme- und Stromgewinnung. Ergebnisse aus dem F+E-Vorhaben 80283040 des Bundesamts für Naturschutz. Bonn.
- SCHATTNER, S.; GRONAUER, A. (2000): Methanbildung verschiedener Substrate – Kenntnisstand und offene Fragen. In: FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.) (Hrsg.) 2000: Energetische Nutzung von Biogas: Stand der Technik und Optimierungspotenzial. Gülzower Fachgespräche Bd. 15. Weimar . Seite 28 – 39.

- SCHLICHTING, E.; BLUME, H.-P.; STAHR, K.(2005): Bodenkundliches Praktikum : eine Einführung in pedologisches Arbeiten für Ökologen, insbesondere Land- und Forstwirte, und für Geowissenschaftler. Berlin.
- SCHOLWIN, F.; THRÄN, D.; DANIEL, L.; WEBER, M.; WEBER, A.; FISCHER, E.; JAHRAUS, E.; KLINSKI, S.; VETTER, A.; BECK, J. (2007): Monitoring zur Wirkung des novellierten Erneuerbare- Energien-Gesetzes (EEG) auf die Entwicklung der Stromerzeugung aus Biomasse. Endbericht im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU).
- SCHOLWIN, F.; DANIEL, J.; PATERSON, M. (2006): Potenziale, ökonomische und ökologische Beurteilung der Feststoffvergärung. In: FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.) (Hrsg.) (2006): Trockenfermentation- Stand der Entwicklungen und weiterer F +E-Bedarf. Gülzower Fachgespräche Bd. 24. Gülzow. Seite 39 – 49.
- SITTE, P.; ZIEGLER, H.; EHRENDORFER, F.; BRESINSKY, A. (1998): Strasburger – Lehrbuch der Botanik. 34. Auflage. Gustav Fischer Verlag.
- THOMÉ-KOZMIENSKY, K.J. (1995): Biologische Abfallbehandlung. EF-Verlag. Berlin.
- TONN, B.; THUMM, U.; CLAUPEIN, W. (2008): Verbrennung von Landschaftspflegeheu. Pflanzenbestand und Schnittzeitpunkt als Einflussfaktoren auf die chemische Brennstoffqualität. In: Naturschutz und Landschaftsplanung. Heft 11/2008. Seite 367 – 372.
- VDI (Verein Deutscher Ingenieure) 4630 (2006): Vergärung organischer Stoffe. Substratcharakterisierung, Probennahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche. VDI-Handbuch Energietechnik. Beuth Verlag GmbH. Berlin.
- WEILAND, P. (2007): Wichtige Messdaten für den Prozessablauf und Stand der Technik in der Praxis. In : FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.) (Hrsg.) (2007): Messen, Steuern, Regeln bei der Biogaserzeugung. Gülzower Fachgespräche Bd. 27. Gülzow. Seite 18 – 32.
- WEILAND, P. (2006): Stand der Technik bei der Trockenfermentation – Aktuelle Entwicklungen. In: FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.) (Hrsg.) (2006): Trockenfermentation- Stand der Entwicklungen und weiterer F +E-Bedarf. Gülzower Fachgespräche Bd. 24. Gülzow. Seite 22 – 38.
- WEILAND, P. (2001): Grundlagen der Methangärung – Biologie und Substrate. In: VDI-Berichte, Nr. 1620: Biogas als regenerative Energie – Stand und Perspektiven. VDI-Verlag. Seite 19-32.
- WEILAND, P. (2000): Stand und Perspektiven der Biogasnutzung und –erzeugung in Deutschland. In: FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.) (Hrsg.) (2000):

Energetische Nutzung von Biogas: Stand der Technik und Optimierungspotenzial. Gülzower Fachgespräche Bd. 15. Weimar. Seite 8 – 27.

WIEGMANN, K.; HEINTZMANN, A.; PETRS, W.; SCHEUERMANN, A.; SEIDENBERGER, T.; THOSS, C. (2007): Bioenergie und Naturschutz: Sind Synergien durch die Energienutzung von Landschaftspflegereesten möglich? Endbericht an das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Darmstadt.

Internet:

BENDEN, S. (2007): Hydrothermale Karbonisierung.

<http://www.jufo.stmg.de/2007/Karbonisierung/Karbonisierung.pdf>

Zugriff am 06.01.2009.

LUTZ, P. (o.J.) : Das BEKON-Trockenfermentationsverfahren zur Biogaserzeugung aus Biomasse.

<http://www.bekon-energy.de/images/BEKON-Verfahrensbeschreibung407.pdf>

Zugriff am 15.11.2007

MÄHNERT, P.; HEIERMANN, M.; LINKE, B. (2005): Batch- and Semi-continuous Biogas Production from Different Grass Species. In: Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal. Manuscript EE 05 010. Vol. VII. December 2005. Seite 1 – 11.

<http://cigrejournal.tamu.edu/submissions/volume7/EE%2005%20010%20Maehnert%20final%2020Dec2005.pdf>

Zugriff am 26.06.2008

PROCHNOW, A.; HEIERMANN, M.; IDLER, C.; LINKE, B.; MÄHNERT, P.; PLÖCHL, M. (2007) b : Biogas vom Grünland: Potentiale und Erträge. Leibnitz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim. Seite k. A..

<http://www.atbpotsdam.de/Hauptseitedeutsch/Institut/Abteilungen/Abt2/Mitarbeiter/mploechl/Publikationen/atb%202007%20biogas%20vom%20gr%C3%BCnland%20%20potenziale%20und%20ertr%C3%A4ge.pdf>. K.A. .

Zugriff am 26.06.2008.

PROCHNOW, A.; HEIERMANN, M.; DRENCKHAN, A.; SCHELLE, H. (2005): Seasonal pattern of biomethanisation of grass from landscape management. In: Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal. Manuscript EE 05 011. Vol. VII. December 2005. Seite 1 – 17.

<http://cigrejournal.tamu.edu/submissions/volume7/EE%2005%20011%20Prochnow%20final%2019Jan2006.pdf>

Zugriff am 26.06.2008.

<http://www.heatpipe-reformer.de/>

<http://www.lfl.bayern.de/ilb/technik/03039/>

<http://www.schlattmann.de>

Sonstige:

LUXENBURGER, D. (2008): Gespräch am 27.03.2008.

MÜLLER, J. (2008): Email vom 16.04.2008.

DUDENVERLAG (Hrsg.) (2006): Duden - Die deutsche Rechtschreibung: auf der Grundlage der neuen amtlichen Rechtschreibregeln. 24., völlig neu bearb. und erw. Aufl.. Mannheim.

Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel und Quellen benutzt habe.