



Universität für Bodenkultur Wien
Department für Nachhaltige Agrarsysteme
Institut für Landtechnik

Optimierung der Methanausbeute aus Zuckerrüben, Silomais, Körnermais, Sonnenblumen, Ackerfutter, Getreide, Wirtschaftsdünger und Rohglyzerin unter den Standortbedingungen der Steiermark

Forschungsprojekt Nr. 1421
BMLFUW, GZ LE.1.3.2/0050-II/1/2005

FA13B-80.26-1/04-G2

Endbericht
31. März 2007

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Thomas Amon
Dipl.-Ing. Dr. Andrea Machmüller
Dipl.-Ing. Dr. Vitaliy Kryvoruchko
Dipl.-Ing. Dr. Dejan Milovanovic
Dipl.-Ing. Regina Hrbek
Dipl.-Ing. Dr. Michael Werner Eder
Dipl.-Ing. Bernhard Stürmer

Optimierung der Methanausbeute aus Zuckerrüben, Silomais, Körnermais, Sonnenblumen, Ackerfutter, Getreide, Wirtschaftsdünger und Rohglyzerin unter den Standortbedingungen der Steiermark

Forschungsprojekt Nr. 1421

BMLFUW, GZ LE.1.3.2/0050-II/1/2005

FA13B-80.26-1/04-G2

Projektauftraggeber:

Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW)

Amt der Steiermärkischen Landesregierung

Projektnehmer:

Institut für Landtechnik

Department für Nachhaltige Agrarsysteme

Universität für Bodenkultur Wien

Projektleiter:

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

Projektmitarbeiter (alphabetische Reihenfolge):

Dipl.-Ing. Dr. Barbara Amon

Dipl.-Ing. Vitomir Bodiroza

Dipl.-Ing. Dr. Michael Werner Eder

Dipl.-Ing. Regina Hrbek

Dipl.-Ing. Dr. Vitaliy Kryvoruchko

Dipl.-Ing. Dr. Andrea Machmüller

Dipl.-Ing. Dr. Dejan Milovanovic

Renate Sapik

Dipl.-Ing. Bernhard Stürmer

Jaqueline Zima

Kooperationspartner:

Südsteirische Energie- und Eiweißerzeugung Reg.Gen.m.b.H. (SEEG), Ök.-Rat Karl Totter

Landeskammer für Land- und Forstwirtschaft Steiermark, Dipl.-Ing. Karl Mayer

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Stand des Wissens	4
2	Ziel- und Aufgabenstellung des Projektes	10
3	Material und Methoden	12
3.1	Gärrohstoffe	12
3.2	Untersuchungsvarianten	13
3.3	Verfahren zur Bestimmung des Methanertrages	14
3.3.1	Eudiometer	14
3.3.2	Versuchsdurchführung	15
3.3.3	Berechnungen	16
3.4	Nährstoffanalysen	20
3.5	Statistische Auswertung	20
4	Ergebnisse	21
4.1	Biomasseertrag der Energiepflanzen	21
4.2	Inhaltsstoffzusammensetzung der untersuchten Gärsubstrate	22
4.3	Konzentration an flüchtigen Fettsäuren und pH in den Fermentern	25
4.4	Gärdauer und Inhaltsstoffzusammensetzung der Gärrückstände	30
4.5	Abbaugrad der Trockensubstanz und der organischen Trockensubstanz	31
4.6	Qualität des gebildeten Biogases	32
4.7	Spezifischer Biogas- und Methanertrag der untersuchten Varianten	33
4.8	Energetischer Wirkungsgrad der Methanbildung	40
4.9	Kofermentationseffekte der untersuchten Mischungen	41
4.10	Methanenergiewertmodell für die untersuchten Mischungen	42
4.11	Methanhektarertrag der Energiepflanzen und Mischungen	46
4.12	Hydraulische Verweilzeit	48
5	Schlussfolgerungen	52
5.1	Empfehlungen und Leitfaden zu optimalen Gärrohstoffmischungen	52
5.2	Verwendung von Zuckerrübenanzpflanzensilagen als Gärsubstrat in der Biogasproduktion	53
5.3	Leitfaden zu ökologisch ausgewogenen und nachhaltigen Fruchtfolgen	56
5.3.1	Methoden zur Entwicklung ökologisch ausgewogener und nachhaltiger Fruchtfolgen	56
5.3.1.1	Datengrundlagen zur Erstellung von Fruchtfolgen	56
5.3.1.2	Datengrundlagen zur Erstellung von Humusbilanzen	59
5.3.2	Ergebnisse zur Entwicklung ökologisch ausgewogener und nachhaltiger Fruchtfolgen	61
5.3.2.1	Regionstypische Ausgangsfruchtfolgen und ihr Methanhektarertrag	61
5.3.2.2	Humusbilanzierung der regionstypischen Ausgangsfruchtfolgen	63
5.3.2.3	Nachhaltige Energiefruchtfolgen und ihr Methanhektarertrag	64
5.3.2.4	Humusbilanzierung der Energiefruchtfolgen	68
5.3.3	Schlussfolgerungen zur Entwicklung ökologisch ausgewogener und nachhaltiger Fruchtfolgen	69
5.3.4	Wirtschaftlichkeitsberechnungen	70
5.3.4.1	Methoden	70
5.3.4.2	Ergebnisse	72
5.3.4.3	Schlussfolgerungen	73
5.3.5	Ausblick auf nachhaltige Fruchtfolge- und Landnutzungssysteme	74
6	Zusammenfassung	75

7	Summary	76
	Verzeichnisse	77
7.1	Literaturverzeichnis	77
7.2	Abbildungsverzeichnis	83
7.3	Tabellenverzeichnis	84
7.4	Abkürzungsverzeichnis	88
8	Anhang	91
8.1	Anhang Fruchtfolgeberechnungen	91
8.1.1	Humusbilanzierung der regionstypischen Ausgangsfruchtfolgen	91
8.1.1.1	Humusbilanzierung der regionstypischen Ausgangsfruchtfolge A	91
8.1.1.2	Humusbilanzierung der regionstypischen Ausgangsfruchtfolge B	92
8.1.1.3	Humusbilanzierung der regionstypischen Ausgangsfruchtfolge C	93
8.1.2	Humusbilanzierung der Energiefruchtfolgen	94
8.1.2.1	Humusbilanzierung der Energiefruchtfolge A	94
8.1.2.2	Humusbilanzierung der Energiefruchtfolge B	95
8.1.2.3	Humusbilanzierung der Energiefruchtfolgen C	96
8.2	Anhang Wirtschaftlichkeitsberechnungen	101
8.2.1	Gesamtdeckungsbeitragsberechnungen für die regionstypischen Ausgangsfruchtfolgen	101
8.2.2	Gesamtdeckungsbeitragsberechnungen für die Energiefruchtfolgen	102

1 Einleitung und Stand des Wissens

Bedeutung der Biogaserzeugung im Kontext nationaler und internationaler Entwicklungsziele

Gemäß des Nationalen Biomasseaktionsplans für Österreich (BMLFUW, 2006) sind mittel- und langfristig die fossilen Energieträger durch Energieeffizienz und erneuerbare Energie zu ersetzen. Bereits im Regierungsprogramm 2003 hat sich die österreichische Bundesregierung das Ziel gesetzt, den energetischen Biomasseeinsatz bis 2010 um 75% zu erhöhen. Darüber hinaus wird für 2020 anvisiert, dass der Anteil an erneuerbaren Energieträgern am Gesamtenergieverbrauch in Österreich 45% ausmachen soll (BMLFUW, 2006). Die Europäische Union (EU) deckt derzeit etwa 4% ihres Energiebedarfs durch Biomasse (EC, 2005a). Es wird aber erwartet, dass bei vollständiger Nutzung des Potentials der Biomasseeinsatz von 69 Mio. t Rohöläquivalent (ROE) im Jahr 2003 bis auf ca. 185 Mio. t ROE im Jahr 2010 mehr als verdoppelt werden kann und dies „im Einklang mit der guten landwirtschaftlichen Praxis, unter Wahrung einer nachhaltigen Biomasseerzeugung und ohne nennenswerte Beeinträchtigung der inländischen Nahrungsmittelerzeugung“ geschieht (EC, 2005a). Für das Jahr 2010 sind die Ziele der EU, dass der Anteil an erneuerbarer Energie 12% des Bruttoenergieverbrauchs, der Anteil an Strom aus erneuerbaren Energiequellen 21% der Gesamtstromproduktion und der Anteil an Biokraftstoffen 5,75% des gesamten Kraftstoffverbrauchs ausmacht (EC, 2005b).

Die Nutzung von Biomasse in Biogasanlagen zur Energieproduktion ist zur Erreichung dieser Ziele sehr wichtig. Nach Kalkulationen des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW, 2006) ergibt sich für 2010 eine realistische Ökostromproduktion aus Biomasse von 3,2 TWh wobei erwartet wird, dass 22% (700 GWh) aus der Biogasproduktion kommen. Für 2020 wird eine Stromproduktion aus Biomasse von etwa 3,9 TWh abgeschätzt, wobei dann etwa 900 GWh aus der Biogasproduktion kommen würden. Im Vergleich dazu sieht die EU-Kommission für Österreich noch höhere Potentiale im Bereich der Biogasproduktion. Die EU-Kommission geht davon aus, dass in Österreich mittelfristig rund 2 GWh Strom aus der Biogasproduktion kommen können (EC, 2004).

Neben Strom wird in Biogasanlagen auch Wärme produziert, die genutzt werden kann (EC, 2005b). Darüber hinaus gibt es auch die Möglichkeit, dass das gebildete Methan statt verstromt direkt in das Gasnetz eingespeist wird oder als Treibstoff für Kraftfahrzeuge zum Einsatz kommt (EC, 2005b; EC, 2006). Voraussetzung für den zukünftigen Einsatz von Biogas als Treibstoff ist aber der Aufbau eines Erdgasankstellennetzes sowie die Verbreitung von Erdgasfahrzeugen (Steirische Initiative für Treibstoffe der Zukunft, 2005). Dann könnte aufbereitetes Biogas (Biomethan) dezentral ins Erdgasnetz eingespeist oder direkt verwendet werden. Schweden und die Schweiz sind in diesem Bereich Vorreiter, in diesen Ländern wird Biogas bereits in größerem Umfang in Fahrzeugen, insbesondere in öffentlichen Bussen eingesetzt (Steirische Initiative für Treibstoffe der Zukunft, 2005). Für Österreich ist ein flächendeckendes Netz an Erdgas- bzw. Methangastankstellen für 2010 geplant und ein Methankraftstoff mit einem Mindestgehalt von 20% Biomethan (Regierungsprogramm 2007-2010).

Biogas aus Energiepflanzen

Der Hauptrohstoff landwirtschaftlicher Biogasanlagen sind die Energiepflanzen (Karpenstein-Machan, 2005). Die Biogaserzeugung aus Energiepflanzen beginnt mit Pflanzenanbau, Ernte und Konservierung. Die Techniken hierfür sind ausgereift und im bewährten Praxiseinsatz. Ganzpflanzensilagen aller Arten von Halmfrüchten werden mit Exaktfeldhäckslverfahren und Silagebereitung erzeugt. Körner-, CCM- und Futterrübenlinien werden nach Zerkleinerung im Hochsilo konserviert. Offene Fragen bestehen bezüglich der Methanmenge, die aus der anaeroben Vergärung in Biogasanlagen von Energiepflanzen gewonnen werden kann. Verschiedene

Energiepflanzenarten wie z.B. Wiesengras, Luzerne, Klee und Klee gras, Getreide (Weizen, Gerste, Roggen, Hafer, Triticale), Futterrüben, Mais und Zuckerhirse werden als Rohstoffe zur Biogas erzeugung in praktischen Biogasanlagen eingesetzt. Praxis- und Laboruntersuchungen dienen der Ermittlung des Biogas bildungs vermögen dieser Rohstoffe (u.a. Nordberg, 1996; Borjesson, 1998; Kaparaju et al., 2001; Baserga & Egger, 1998; Chynoweth et al., 1993; Linke et al., 1999; Pouech et al., 1998a und 1998b; Amon et al., 2002a, 2002b, 2003, 2004b, 2006 und 2007).

Untersuchungen von Björnsson et al. (2001) zur Vergärung von Ernterückständen zeigten einen spezifischen Methanertrag von Zuckerrübenblättern, Gras und Weizenstroh von 0,37, 0,23 bzw. 0,15 m³/kg oTS. Die Untersuchungen wurden in Batch-Fermentern mit einer Größe von 1-30 m³ bei einer Gärtemperatur von 37°C durchgeführt. Die hydraulische Verweilzeit betrug 30-55 Tage. Es wurde keine Information darüber gegeben, ob sich die Methanerträge auf Normbedingungen bezogen oder nicht. Kaparaju et al. (2001) untersuchten die Kofermentation von Energiepflanzen mit Abfällen aus der Süßwarenherstellung und Rinderfestmist. Es wurden Langzeit-Batch-Untersuchungen im Labor und anschließend Praxisuntersuchungen durchgeführt. Batch-Versuche mit mesophil vergorenem Rindermist als Inokulum zeigten einen spezifischen Methanertrag von 0,35 m³/kg oTS bei Grasheu und 0,26 m³/kg oTS bei Hafer. Klee im vegetativen Wachstumsstadium zeigte eine spezifische Methanertrag von 0,21 m³/kg oTS. Im Wachstumsstadium der Blüte hatte Klee lediglich noch einen spezifischen Methanertrag von 0,14 m³/kg oTS. Es zeigte sich, dass das Wachstumsstadium der von Kaparaju et al. (2001) untersuchten Pflanzen den Methanertrag wesentlich beeinflusste. Pouech et al. (1998a) untersuchten die Methanproduktion verschiedener landwirtschaftlicher Kulturpflanzen in Langzeit-Batch-Gärversuchen. Es wurden die Pflanzenarten Weizen, Gerste, Alfalfa, Klee, Weidelgras, Mais, Futter-, Korn- und Zuckersorghum verwendet. Bei Weizen, Klee und Weidelgras wurde die Methanproduktion zu unterschiedlichen Wachstumsstadien der Pflanzen gemessen und dabei der Einfluss der biochemischen Pflanzenzusammensetzung, vor allem des Gehaltes an Zellulose und Hemizellulose und des C-H-O-N-Verhältnisses, auf die spezifische Methanausbeute und den Verlauf der Gärung untersucht. Der Methanertrag lag zwischen 0,30 und 0,40 m³/kg oTS. Der biologische Abbaugrad der Pflanzen lag zwischen 57% bei Alfalfa und 88% bei Weizen. Mais zeigte den höchsten spezifischen Methanertrag. Auch Leguminosen zeigten hohe Erträge.

Tabelle 1 gibt den Stand des Wissens zur Vergärung von Energiepflanzen im Überblick wieder.

Tabelle 1: Spezifischer Biogas- und Methanertrag von Energiepflanzen aus Literaturangaben (Auswahl)

<i>Energiepflanze</i>	<i>Biogasertrag</i> (l/kg oTS)	<i>Methanertrag</i> (l/kg oTS)	<i>Methode</i>	<i>Quelle</i>
Alfalfa	-	340	Batch-Versuch	Pouech et al., 1998a
Alfalfa-Silage	-	240*	Batch-Versuch	Zauner & Küntzel, 1986
Futterroggen-Grüngut	-	431	Berechnung	Linke et al., 1999
Futterrüben	-	411-430	Berechnung	Linke et al., 1999
Futterrüben-Massenrüben	850	-	k.A.	KTBL, 2005
Getreidestroh	250-350	-	k.A.	Baserga, 2000
Gras-frisch	-	282-438	Batch-Versuch	Kaiser et al., 2004
Gras-frisch	596	-	k.A.	KTBL, 2005
Gras-Silage	500-600	-	k.A.	Baserga, 2000
Gras-Silage	-	219-436	Batch-Versuch	Kaiser et al., 2004
Gras-Silage	627	-	k.A.	KTBL, 2005
Gras-Silage	-	128-392	Batch-Versuch	Amon et al., 2007

<i>Energiepflanze</i>	<i>Biogasertrag</i> (l/kg oTS)	<i>Methanertrag</i> (l/kg oTS)	<i>Methode</i>	<i>Quelle</i>
Gras-Heu	-	250-310	Batch-Versuch	Kaiser et al., 2004
Gras-Heu	580	-	k.A.	KTBL, 2005
Gras-Welksilage	-	433	Berechnung	Linke et al., 1999
Gras (verschiedene Arten)	678-929	-	Batch-Versuch	Mähnert et al., 2002
Gräser und Leguminosen 1. Schnitt	-	228-378	Batch-Versuch	Kaiser et al., 2004
Gräser und Leguminosen 2. Schnitt	-	287-330	Batch-Versuch	Kaiser et al., 2004
Grasmischung-Silage	-	199-244*	Laborflussdigester	Zauner & Küntzel, 1986
Grasmischung-Silage	-	298-315*	Batch-Versuch	Zauner & Küntzel, 1986
Hafer	-	365	Batch-Versuch	Pouech et al., 1998a
Hanf-Silage	-	409	Berechnung	Linke et al., 1999
Hanf-Silage	-	ca. 155	Batch-Versuch	Kaiser et al., 2004
Hanf-Silage	340	-	k.A.	KTBL, 2005
Heu	500	-	k.A.	Baserga, 2000
Hirse	635	-	k.A.	KTBL, 2005
Kartoffeln (zerkleinert)	728	-	k.A.	KTBL, 2005
Kartoffelkraut	500-600	-	k.A.	Baserga, 2000
Klee	-	350	Batch-Versuch	Pouech et al., 1998a
Klee	500-650	-	k.A.	Baserga, 2000
Klee	264	152	Laborflussdigester	Pouech et al., 1998b
Kleegras-Silage	482	-	k.A.	KTBL, 2005
Kleegras-Heu	414	-	k.A.	KTBL, 2005
Laub	400	-	k.A.	Baserga, 2000
Luzerne-Grüingut	-	432	Berechnung	Linke et al., 1999
Mais	-	397	Batch-Versuch	Pouech et al., 1998a
Mais-frisch	-	351	Batch-Versuch	Mukengele & Oechsner, 2007
Mais-getrocknet	-	345	Batch-Versuch	Mukengele & Oechsner, 2007
Mais-Silage	-	181-184*	Laborflussdigester	Zauner & Küntzel, 1986
Mais-Silage	-	270-289*	Batch-Versuch	Zauner & Küntzel, 1986
Mais-Silage	-	250-360	Batch-Versuch	Kaiser et al., 2004
Mais-Silage	-	360	Batch-Versuch	Mukengele & Oechsner, 2007
Mais-Silage (getrocknet)	-	347	Batch-Versuch	Mukengele & Oechsner, 2007
Mais-Silage (Milchreife)	578	-	k.A.	KTBL, 2005
Mais-Silage (Teigreife)	642	-	k.A.	KTBL, 2005
Mais-Silage (Vollreife)	593	-	k.A.	KTBL, 2005
Mais-Silage	-	359-422	Batch-Versuch	Amon et al., 2007
Mais-Stroh	500	-	k.A.	Baserga, 2000
Micanthus-frisch	-	ca. 180	Batch-Versuch	Kaiser et al., 2004
Micanthus-frisch	369	-	k.A.	KTBL, 2005
Micanthus-Silage	-	ca. 220	Batch-Versuch	Kaiser et al., 2004
Micanthus-Silage	470	-	k.A.	KTBL, 2005

<i>Energiepflanze</i>	<i>Biogasertrag</i> (l/kg oTS)	<i>Methanertrag</i> (l/kg oTS)	<i>Methode</i>	<i>Quelle</i>
Parthenium	-	152±15	Batch-Versuch	Gunaseelan, 1995
Pferdebohnen-Silage	-	356*	Batch-Versuch	Zauner & Küntzel, 1986
Pferdebohnen-Silage	-	226*	Laborflusdigestor	Zauner & Küntzel, 1986
Raps	-	336	Batch-Versuch	Pouech et al., 1998a
Raygras	-	390-409	Batch-Versuch	Pouech et al., 1998a
Reis-Stroh	380-471	188-240	Laborflusdigestor	Zhang und Zhang, 1999
Roggen-Ganzpflanzensilage	664	-	k.A.	KTBL, 2005
Roggen-Ganzpflanzensilage	-	140-275	Batch-Versuch	Amon et al., 2007
Roggen-Stroh	-	409	Berechnung	Linke et al., 1999
Rüben	-	ca. 360	Batch-Versuch	Kaiser et al., 2004
Rüben-Blatt	400-500	-	k.A.	Baserga, 2000
Rüben-Blatt	535	-	k.A.	KTBL, 2005
Rüben-Blatt (frisch)	-	ca. 345	Batch-Versuch	Kaiser et al., 2004
Rüben-Blatt (Silage)	-	ca. 240	Batch-Versuch	Kaiser et al., 2004
Silomais	-	422	Berechnung	Linke et al., 1999
Sonnenblume-Silage	-	154-454	Batch-Versuch	Amon et al., 2007
Sorghum	-	295-372	Batch-Versuch	Pouech et al., 1998a
Sudangras-frisch	363	-	k.A.	KTBL, 2005
Sudangras-Silage	-	ca. 305	Batch-Versuch	Kaiser et al., 2004
Sudangras-Silage	531	-	k.A.	KTBL, 2005
Triticale-Ganzpflanzensilage	-	212-286	Batch-Versuch	Amon et al., 2007
Weizen-Körner	764	-	k.A.	KTBL, 2005
Weizen-Stroh	280	-	k.A.	KTBL, 2005
Weizen	-	384	Batch-Versuch	Pouech et al., 1998a
Weizen	332	184	Laborflusdigestor	Pouech et al., 1998b
Weizen-Ganzpflanzensilage	-	228-343	Batch-Versuch	Amon et al., 2007
Wicken-Silage	-	323*	Batch-Versuch	Zauner & Küntzel, 1986
Wintergerste	-	420	Berechnung	Linke et al., 1999
Winterroggen	-	419	Berechnung	Linke et al., 1999
Zuckerrüben	775	-	k.A.	KTBL, 2005
Zuckerrübenblatt-frisch	704	-	k.A.	KTBL, 2005
Zuckerrübenblatt-Silage	503	-	k.A.	KTBL, 2005
Zuckerrübenblatt-Silage	-	294*	Batch-Versuch	Zauner & Küntzel, 1986
Zuckerrübenblatt-Silage	-	174*	Laborflusdigestor	Zauner & Küntzel, 1986

* l/kg TS; k.A. = keine Angabe

Die Biogasausbeute aus Energiepflanzenarten ist noch nicht optimiert. Bisherige Untersuchungen zum Biogas- bzw. Methanbildungsvermögen von Energiepflanzen wurden unter verschiedenen methodischen Rahmenbedingungen durchgeführt. Sie sind deswegen nur eingeschränkt vergleichbar und insgesamt nicht ohne weiteres auf praktische Verhältnisse übertragbar. Versuchsergebnisse (Labor- und Praxisergebnisse) sind nur vergleichbar, wenn der Methanertrag unter Normbedingungen (0 °C, 1013 mbar) angegeben wird. Dazu werden aber in den meisten Fällen keine Angaben gemacht. Oftmals ist auch nur der Biogasertrag angegeben. Für die Energiege-

winnung entscheidend ist aber der Methangehalt im Biogas und somit der Methanertrag. Der Methangehalt unterliegt je nach Gärbedingungen starken Schwankungen.

Die Methanausbeute aus der Biomasse wird durch den Gehalt an Eiweiß, Fett, Rohfaser und den N-freien Extraktstoffen bestimmt. Die Konzentration dieser wertgebenden Inhaltsstoffe ändert sich mit dem Alter der Pflanzen (Kirchgesser, 1992; Rieder, 1983). Der Zeitpunkt, an dem die zu vergärenden, pflanzlichen Rohstoffe geerntet werden ist deshalb in Bezug auf die Methanausbeute je kg Biomasse und je Hektar Anbaufläche von wesentlicher Bedeutung (Amon et al., 2002a). Die Nährstoffzusammensetzung der Energiepflanzen ist aber auch abhängig von der eingesetzten Sorte (Schnürer et al., 1999; Eder, 2006; Mukengele et al., 2006a). Für Silomais und Kleegras wurden die gärtechnischen Eigenschaften und das Methanenergiewertmodell (MEWM) samt aller damit verbundenen Vorteile für eine optimale Biogaserzeugung ermittelt (Amon et al., 2003). Wie die Untersuchungen zum Methanbildungsvermögen zeigten, bestimmen Eiweiß- und Fettgehalt der Energiepflanzen das Methanbildungsvermögen am stärksten.

Verschiedene Autoren weisen darauf hin, dass der „Zellulose-Lignin-Komplex“ die Abbaubarkeit der Substrate ungünstig beeinflusst (Gallert & Winter, 1998; Krieg & Fischer, 2002). Die Lignin-Inkrustierung von Zellulose reduziert den Zugang der Mikroorganismen und damit den anaeroben Abbau sowie die Biogaserzeugung (Weiland, 2001; Jäger, 2002). Nach Edelmann (2001) ist die generelle Abbaubarkeit der organischen Substanz vom Gehalt an Nährstoffen und von den Gerüstsubstanzen abhängig. Der Gehalt an Gerüstsubstanzen bestimmt nicht nur die Abbaufähigkeit sondern auch die Geschwindigkeit, mit der organische Substanz abgebaut wird. Das Hauptproblem des anaeroben Abbaus liegt also in der Vergärung des „Zellulose-Lignin-Komplexes“ der Biomasse und in der optimalen Versorgung der Mikroorganismen mit Nährstoffen. Untersuchungen zum Methanbildungsvermögen von Sudangrassilage ergaben einen spezifischen Methanertrag von 0,213 bis 0,239 m³_N/kg oTS (Amon et al., 2002b). Die Untersuchungen zeigten, dass der Ligningehalt im Gärgut die Methanbildung beeinflusst und dass der Biomasse-Hektarertrag stark sortenabhängig ist. Inhaltsstoffe und Sortenwahl stellen also die wesentlichsten Ertragsfaktoren für die Methanproduktivität pro Flächeneinheit dar. Von den Gerüstsubstanzen geht damit ein maßgeblicher Einfluss für die Verfügbarkeit von Nährstoffen der Biomasse für den anaeroben Stoffwechsel und letztendlich für den Methanbildungsprozess aus.

Mit Energiepflanzen kann ein geschlossener Produktionskreislauf gefahren werden. Die komplette Pflanze kann zur Biogasproduktion verwendet werden und die Gärrückstände (Biogasgülle) gelangen als Dünger wieder zurück auf die Anbauflächen der Energiepflanzen. Biogasgülle eignet sich hervorragend zur Düngung landwirtschaftlicher Kulturpflanzen und besitzt einen hohen Düngewert (FNR, 2004). In der Biogasgülle liegt der Stickstoff vorwiegend in mineralischer Form (Ammoniumstickstoff) vor und ist dadurch direkt pflanzenverfügbar. Der Gärrückstand ist dünnflüssig und besitzt eine bessere Fließfähigkeit als aus der Tierhaltung stammende Gülle. Das bedeutet, die Biogasgülle dringt schneller in den Boden ein, Ammoniakverluste werden weitgehend vermieden und Denitrifikations- und Immobilisationsvorgänge deutlich eingeschränkt. Organische Säuren werden während der anaeroben Vergärung in den Biogasanlagen abgebaut, so dass Verbrennungen der Pflanzen (Phänomen bei der Ausbringung von Gülle aus der Tierhaltung) ausgeschlossen werden können. Wegen dieser vorteilhaften Eigenschaften ist Biogasgülle nicht nur zur Düngung von Grünland, sondern auch als Kopfdünger für empfindliche Kulturen wie Getreide, Mais und Zuckerrüben einsetzbar (Messner, 1988; Dosch, 1995). Abhängig vom Grad der Hygienisierung während der Vergärung werden Krankheitserreger, Parasiten und Unkrautsamen abgetötet (FNR, 2004). Darüber hinaus werden Geruchsbelästigungen durch den Vergärungsprozess auf ein Minimum reduziert, d.h. Geruchsstoffe ganz oder teilweise während der Vergärung abgebaut (Karpenstein-Machan, 2005). Beim Ausbringen von Biogasgülle sind die Geruchsemissionen deutlich geringer als bei unvergorener Gülle. Die Grundlagen der sachgemäßen Ausbringung von Gülle sind aus Versuchen mit Wirtschaftsdüngern bekannt und gelten auch für die Düngung mit Biogasgülle.

Ein weiterer wichtiger Aspekt in Bezug auf die Biogaserzeugung aus Energiepflanzen ist, dass die bestehenden Potentiale nur ausgeschöpft werden können, wenn nachhaltige Konzepte entwickelt und an die unterschiedlichen Klimaregionen und Standorte angepasste werden. Eine standortangepasste Fruchtfolge ist Voraussetzung für eine hohe Produktivität bei gleichzeitig hoher Ertragsstabilität (Karpenstein-Machan, 2005). Um dauerhaft Erfolg zu bringen, muss der Energiepflanzenanbau nach den Grundsätzen einer nachhaltigen Fruchtfolge gestaltet sein. Die Basis einer jeden nachhaltigen Fruchtfolge ist die ausreichende Humusversorgung der Böden. Nur in standortangepassten und ausgewogenen Fruchtfolgesystemen ist die Erzeugung von Energiepflanzen sinnvoll.

Biogas aus Biomasse-mischungen

Mit den derzeitigen Modellen zur anaeroben Gärung (Batstone et al., 2001 und 2000; Angelidaki & Ahring, 1993; Angelidaki et al., 1993; Henze et al., 1986; Pavlostathis & Gossett, 1986; McCarty & Mosey, 1991; Zatarı et al., 2001) können Methanerträge aus der anaeroben Vergärung von Energiepflanzen nicht berechnet werden. Die Modelle sind meist sehr spezifisch und beziehen sich hauptsächlich auf die Modellierung der Kinetik der Gärung wie z.B. der theoretischen Darstellung und Optimierung wichtiger Prozessgrößen der Gärbiologie wie dem pH-Wert, dem NH_4 -Gehalt oder dem Gehalt an flüchtigen Fettsäuren im Gärgut. Weitere Anwendungsbereiche liegen hauptsächlich in der technischen Optimierung von Fermenterkonfigurationen und in der Prozesstechnologie. Die Modelle beziehen sich meist auf spezifische Anwendungsbereiche der anaeroben Behandlung von Abfällen und nicht auf den in Zukunft bedeutungsvollen Bereich der Biogaserzeugung aus Energiepflanzen.

Buswell (1936) und Boyle (1977) haben eine Formel entwickelt, mit der die Gaszusammensetzung (CH_4 , CO_2 , H_2S und NH_3) aus der chemischen Grundstruktur der Biomasse Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff und Schwefel berechnet werden kann. Dieses Modell berechnet die Biogasqualität und die theoretischen Biogas- und Methanerträge. Die so berechneten Gaserträge überschätzen aber die tatsächlich realisierbaren Gaserträge, da in diesem Berechnungsmodell von einem vollständigen Abbau der Substrate ausgegangen wird. Die Anwendung der „Buswellformel“ setzt auch voraus, dass die Elementarstoffe Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff und Schwefel in der Biomasse bekannt sind. In der Praxis liegen diese Angaben normalerweise nicht vor. Sie müssten für sämtliche Energiepflanzen mit hohem experimentellem Aufwand kostspielig ermittelt werden. Auch wird mit der „Buswellformel“ der Effekt, dass die Gerüstsubstanzen, wie Zellulose, Hemizellulose oder Lignin die anaerobe Vergärung verzögern bzw. hemmen können (Wellinger, 1984; Van Soest, 1994) nicht berücksichtigt.

Für Silomais und Klee-gras wurden von Amon et al. (2003) die gärtechnischen Eigenschaften und der Methanenergiewert (MEW) für eine optimale Biogaserzeugung ermittelt. Neuere Entwicklungen des Methanenergiewertmodells (MEWM) wurden kürzlich veröffentlicht (Amon et al., 2007). In einem nächsten Schritt ist es nun erforderlich, das Methanbildungsvermögen weiterer wichtiger Energiepflanzen (Sonnenblumen, Ackerfuttermischungen, Getreide z.B. Grünroggen, Zuckerrüben, Silomais, Körnermais) und Wirtschaftsdünger (Schweineflüssigmist) unter spezifischen Standort- und Erzeugungsbedingungen (z.B. Steiermark) zu messen. Darüber hinaus müssen ertragsoptimierte Gärrohstoffmischungen bestehend aus verschiedenen Energiepflanzenarten, Wirtschaftsdünger (Schweineflüssigmist) und Glycerin ermittelt werden. Durch die Vergärung in Mischungen können Synergien genutzt werden (Mukengele et al., 2006b) und es kann gegebenenfalls ein erhöhter Gasertrag im Vergleich zu einer Monofermentation erzielt werden (Kofermentationseffekt).

2 Ziel- und Aufgabenstellung des Projektes

Die Biogasproduktion aus Energiepflanzen ist eine Schlüsseltechnologie, um agrarische Biomasse nachhaltig energetisch und stofflich zu nutzen. Die vorhandenen Potentiale werden derzeit aber nur unzureichend genutzt, weil es erhebliche Unsicherheiten bezüglich der zu erwartenden Methanbildung und des Managements der Energiepflanzenvergärung gibt. Andererseits besteht an manchen Orten eine lokale Rohstoffknappheit hervorgerufen durch verstärkten Energiepflanzenanbau (vor allem Mais) mit allen dadurch verbundenen negativen Begleiterscheinungen.

Das vorliegende Projekt "Optimierung der Methanausbeute aus Zuckerrüben, Silomais, Körnermais, Sonnenblumen, Ackerfutter, Getreide, Wirtschaftsdünger und Rohglyzerin unter den Standortbedingungen der Steiermark" soll daher dazu beitragen, bestehende Wissenslücken zu schließen und zu helfen folgende Kernziele der Biogasproduktion aus Energiepflanzen zu erreichen:

- Energiepflanzen in ökologisch ausgewogenen, nachhaltigen Fruchtfolgen erzeugen;
- Biomasse bereitstellen, die sich besonders gut für die Vergärung in Biogasanlagen eignet;
- Kofermentationseffekte ausnutzen, d.h. Gärrohstoffmischungen finden, die besonders hohe Energieerträge ermöglichen;
- Gärverlauf sicher gestalten, mit hohem Methanertrag und bestmöglichem energetischen Wirkungsgrad;
- Mikroorganismen im Fermenter optimal mit Nährstoffen versorgen, um eine hohe Methanausbeute und gute Biogasqualität zu erreichen;
- bestmögliche Wirtschaftlichkeit der Biogasproduktion erreichen;
- Gärrest als hochwertigen Dünger verwerten.

Im Einzelnen werden im vorliegenden Projekt folgende Aufgaben bearbeitet:

1. Die gärtechnischen Eigenschaften, das spezifische Methanbildungsvermögen und die Biogasqualität werden bei der Vergärung von Silagen der Pflanzenarten: Zuckerrüben, Mais, Sonnenblumen, Klee gras, Grünroggen und Schweineflüssigmist sowie CCM zunächst einzeln ermittelt.
2. Die gärtechnischen Eigenschaften, das spezifische Methanbildungsvermögen und die Biogasqualität von verschiedenen eiweiß- und energiebetonten Gärrohstoffmischungen und von Gärrohstoffmischungen mit ausgeglichenem Eiweiß-Energie-Verhältnis werden untersucht. Die Methangärung wird unter exakt vergleichbaren optimalen Gärbedingungen im Labor durchgeführt.
3. Die Ergebnisse zum Verlauf der Methangärung und zum Methanbildungsvermögen der Gärrohstoffmischungen werden mit denen aus der Vergärung der einzelnen Gärrohstoffe verglichen. Dadurch können zusätzliche Methanausbeuten von Gärrohstoffmischungen (Kofermentationseffekte) ermittelt werden.
4. Für die Verwendung von Zuckerrübenanzpflanzensilagen werden geeignete Ernte-, Aufbereitungs- und Konservierungsverfahren vorgeschlagen.
5. Auf der Basis der Untersuchungsergebnisse zum spezifischen Methanbildungsvermögen der Gärrohstoffe und vorliegender pflanzenbaulicher Ertragsdaten werden Methanhektarerträge von ökologisch ausgewogenen nachhaltigen Fruchtfolgen bei typischen Erzeugungs- und Ertragsverhältnissen der Steiermark ermittelt.

6. Die Wirtschaftlichkeit der Biogaserzeugung wird bei Verwendung optimierter Gärrohstoffmischungen ermittelt.
7. Empfehlungen zu optimalen Gärrohstoffmischungen aus Zuckerrübensilage, Maissilage, CCM, Sonnenblumensilage, Kleegrassilage, Grünroggensilage und Schweineflüssigmist für die Biogaserzeugung bei typischen Erzeugungs- und Standortbedingungen der Steiermark werden aus den Untersuchungsergebnissen abgeleitet.
8. Ein Leitfaden für die optimale Biogaserzeugung aus Zuckerrüben, Mais, Sonnenblumen, Klee gras, Grünroggen und Schweineflüssigmist bei typischen Erzeugungs- und Standortbedingungen der Steiermark wird ausgearbeitet.

Mit der erfolgreichen Bearbeitung der im Projekt gestellten Aufgaben lassen sich erreichen:

- sicherer Gärverlauf mit hoher spezifischer Methanausbeute;
- hoher energetischer Wirkungsgrad bei der Transformation der Biomasseenergie in Methanenergie des Biogases;
- bedarfsgerechte und vollwertige Versorgung der Mikroorganismen mit Nährstoffen;
- hohe Qualität des Biogases (hoher Methangehalt und niedriger Schwefelwasserstoffgehalt des Biogases);
- hohe Methanhektarerträge von Fruchtfolgesystemen;
- optimale Dimensionierung der Anlagentechnik;
- bestmögliche Wirtschaftlichkeit der Biogaserzeugung aus Energiepflanzen, Wirtschaftsdünger und Glycerin;
- und maximale Rohstoffmobilisierung, vor allem im Bereich alternativer Energiepflanzenarten mit standortspezifischen Fruchtfolgesystemen zur integrierten Erzeugung von Lebensmitteln, Stoffen und Energie unter Einbeziehung lokal vorhandener organischer Reststoffe (Kaskadennutzung von Stoffen zum Zwecke der Energieerzeugung) mit Rückführung in den landwirtschaftlichen Nährstoffkreislauf.

3 Material und Methoden

3.1 Gärrohstoffe

Das vorliegende Projekt wurde mit nachfolgend aufgeführten, wichtigen Energiepflanzen steirischer Standort- und Produktionsverhältnisse durchgeführt: (1) Zuckerrüben, (2) Mais (Silo- und Körnermais), (3) Sonnenblumen, (4) Ackerfutter (Klee gras) und (5) Getreide (Grünroggen).

Die Energiepflanzen wurden dem Institut für Landtechnik aus Landessortenversuchen der Steiermark in Form frisch geernteter Pflanzen zur weiteren Verarbeitung im Biogaslabor der Universität für Bodenkultur an der Versuchswirtschaft Groß-Enzersdorf zur Verfügung gestellt. Die angelieferte frische Biomasse der Energiepflanzen wurde in einem Axialhäcksler (Viking GE 250, Viking GmbH, Langenkampfen/Kufstein, Österreich) auf eine Partikelgröße von 1 bis 3 cm grob vorzerkleinert (Abbildung 1a).



Abbildung 1: Grob- (a) und Feinzerkleinerung (b) der Energiepflanzen.

Das zerkleinerte Material der Energiepflanzen wurde anschließend gut durchmischt und zur Silierung in Polyflaschen von 2 l Volumen gefüllt. Das Material wurde mit einem Kolben per Hand verdichtet. Die randvoll befüllten Polyflaschen wurden verschlossen und mit Isolierband luftdicht gemacht. Der Siliervorgang erstreckte sich über einen Zeitraum von 5 bis 8 Wochen.

Die Silierung ist das Standardkonservierungsverfahren von Energiepflanzen in der Biogasproduktion. Im vorliegenden Projekt wurde die Silagebereitung für die Energiepflanzen Zuckerrüben (Rüben ohne Blatt), Silomais (Ganzpflanze), Sonnenblumen (Ganzpflanze), Klee gras und Grünroggen (Ganzpflanze) durchgeführt. Nicht siliert wurde der Körnermais, der als CCM verwendet wurde.

Nach der Silierung wurde das Material nochmals mit einem Mixer (BÜCHI Mixer B-400, BÜCHI Labortechnik AG, Flawil, Schweiz) feinzerkleinert (Abbildung 1b), um einen hohen Zerkleinerungsgrad (Partikelgröße 0,1 bis 0,3 cm) zu erreichen.

Neben den Energiepflanzen wurden als weitere Gärrohstoffe auch Schweinegülle und Rohglyzerin eingesetzt. Das verwendete Rohglyzerin wurde von der Südsteirischen Energie- und Eiweißproduktion (SEEG) dem Institut für Landtechnik zur Verfügung gestellt und ist ein Nebenprodukt der Bioethanolproduktion.

3.2 Untersuchungsvarianten

Alle Gärrohstoffe (Sonnenblumensilage, Kleegrassilage, Grünroggensilage, Maissilage, CCM, Schweinegülle, Zuckrübensilage und Rohglyzerin, Abschnitt 3.1) wurden alleine und in Mischungen untersucht. Die Zusammensetzung der verwendeten Gärrohstoffmischungen sind in Tabelle 2 wiedergegeben.

Tabelle 2: Geplante Zusammensetzung der verschiedenen Mischungen (in % der Frischmasse).

Block	Mischung	Gärrohstoff						
		Sonnenblumensilage	Kleegrassilage	Grünroggensilage	Maissilage	CCM	Schweinegülle	Zuckrübensilage
---	M1 ¹	0	0	0	31	15	54	0
Block 1 (energiebetont)	M2	20	0	0	30	10	20	20
	M3	15	0	0	25	20	10	30
	M4	30	0	0	20	0	20	30
	M5	20	0	0	40	0	30	10
Block 2 (eiweißbetont)	M6	5	30	10	10	5	40	0
	M7	5	40	20	0	0	35	0
	M8	5	30	30	5	0	20	10
	M9	0	40	20	5	0	30	5
Block 3 (ausgeglichen)	M10	20	10	10	20	0	20	20
	M11	30	5	5	10	10	20	20
	M12	35	7,5	7,5	35	5	0	10
	M13	15	0	10	45	0	15	15

¹M1 wurden zusätzlich 4% Rohglyzerin zugelegt

Die eingesetzten Mischungen unterschieden sich in ihrem Eiweiß-Energie-Verhältnis. Sie können in drei Blöcke eingeteilt werden:

- Block 1: Energiebetonte Mischungen (Mischungen 2 bis 5)
- Block 2: Eiweißbetonte Mischungen (Mischungen 6 bis 9)
- Block 3: Varianten mit ausgeglichenem Eiweiß-Energie-Verhältnis (Mischungen 10 bis 13)

Der Mischung 1 (eine Mischung aus Maissilage, CCM und Schweinegülle) wurde zusätzlich 4% Rohglyzerin als ertragssteigernder Zusatzstoff zugelegt. Die Wirkung von Rohglyzerin als ertragssteigernder Zusatzstoff auf den Methanertrag gängiger Gärrohstoffe wurde in einem vorhergehenden Forschungsprojekt „Untersuchungen zur Wirkung von Rohglyzerin aus der Biodieselerzeugung als leistungssteigerndes Zusatzmittel zur Biogaserzeugung aus Silomais, Körnermais, Rapspresskuchen und Schweinegülle“ bereits untersucht (Amon et al., 2004a). Die Mischung 1 gilt diesbezüglich als Referenzvariante.

3.3 Verfahren zur Bestimmung des Methanertrages

3.3.1 Eudiometer

Um repräsentative und miteinander vergleichbare Ergebnisse zum Methanertrag der verschiedenen Energiepflanzen und deren Mischungen zu erhalten ist es unbedingt erforderlich, alle möglichen Einflussparameter während der Vergärung konstant zu halten. Dies kann mit vertretbarem Aufwand nur im Labor erfolgen. Nur unter Laborbedingungen können bestimmte Rahmenbedingungen (Menge des Probenmaterials, Raumbelastung des Gärbehälters, Gärtemperatur, pH-Wert, Zusammensetzung des Inokulums, Mischintervall und Mischintensität) exakt definiert und konstant gehalten werden. Dagegen ist unter Praxisbedingungen damit zu rechnen, dass die Systemeinflüsse die tatsächlich vorliegenden Methanbildungspotentiale überlagern und somit Informationen über das eigentliche Methanbildungspotential nur sehr eingeschränkt ableitbar sind. Laboruntersuchungen haben darüber hinaus den Vorteil, dass eine größere Anzahl an Varianten in relativ kurzer Zeit untersucht werden kann. In Praxisbiogasanlagen müsste die Beschickung des Fermenters bei jeder zu untersuchenden Variante für den Zeitraum von mindestens zwei hydraulischen Verweilzeiten erfolgen bevor der Methanertrag ermittelt werden könnte. Diese Wartezeit ist erforderlich um Memoryeffekte auszuschließen, die dadurch zustande kommen, dass sich im Fermenter noch Gärgut der vorherigen Versuchsvariante befindet.

Im vorliegenden Projekt wurde der spezifische Methanertrag der Gärrohstoffe und Mischungen im Labor unter kontrollierten Gärbedingungen mit Hilfe von Eudiometern (SELUTEC GmbH, Steuer-, Elektro- und Umweltechnik, Mössingen-Öschingen, Deutschland) ermittelt. Die Untersuchungen erfolgten nach DIN 38414/Teil 8 bzw. VDI 4630 (VDI, 2006).

Eine Eudiometer-Messapparatur umfasst sechs Messzellen (Abbildung 2). Jede Messzelle besteht aus einem Reaktionsgefäß (Fermenter, 1000 ml Fassungsvermögen) und einem daran anschließendem Gassammelrohr. Das Gassammelrohr, das mit Sperrflüssigkeit (NaCl-Lösung, angesäuert mit Zitronensäure) gefüllt ist, ist am unteren Ende mit einem Ausgleichsgefäß verbunden. Das in den Fermentern gebildete Biogas verdrängt die Sperrflüssigkeit aus dem Gassammelrohr in das Ausgleichsgefäß. Die gebildete Biogasmenge wird an der Säulenskalierung des Gassammelrohres abgelesen. Die Fermenter werden in einem Wasserbad auf konstant 38°C temperiert (Gärtemperatur). Mit Hilfe eines Magnetrührers wird der Fermenterinhalt in Intervallen von 30 Minuten jeweils 10 Minuten lang durchmischt.

Im Fermenter befindet sich das zu untersuchende Probenmaterial und Inokulum. Als Inokulum wird aktives Gärgut aus landwirtschaftlichen Biogasanlagen eingesetzt. Um zu verhindern, dass dieses mit Luftsauerstoff in Berührung kommt, werden die leeren Fermenter mit Argon gefüllt um sie anaerob zu machen. Erst dann wird das Probenmaterial und das Inokulum in die Fermenter in einem Anaerobenschrank eingewogen (Abbildung 3).

Im vorliegenden Projekt wurde standardmäßig als Inokulum eine Mischung aus aktivem Gärgut aus zwei Biogasanlagen (Herrn Dipl.-Ing. J. Feigl und Maschinenring St. Margarethen am Moos, Niederösterreich) aus der näheren Umgebung zum Biogaslabor in Groß-Enzersdorf eingesetzt. Die Gärsubstrate auf dem Betrieb Feigl setzen sich vorwiegend aus Energiepflanzen (hauptsächlich Maissilage) und Gemüseabfällen zusammen. Auf dem Betrieb in St. Margarethen am Moos werden hauptsächlich Energiepflanzen (Mais-, Sonnenblumen- und Grassilagen) und Schweinegülle eingesetzt.

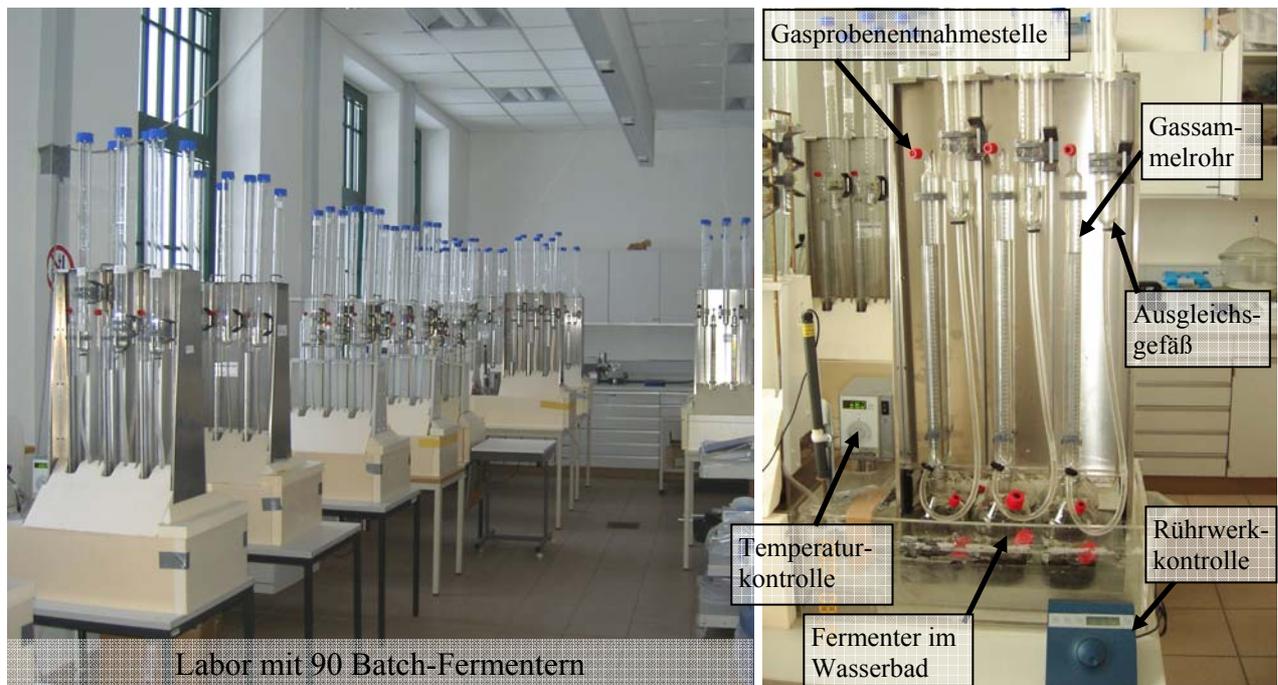


Abbildung 2: Laborüberblick und Detailansicht eines Eudiometers.

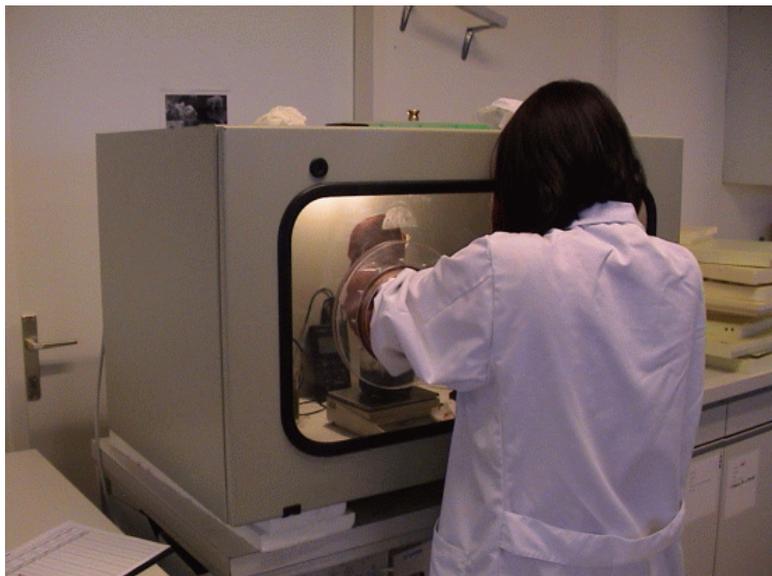


Abbildung 3: Einsetzen des Probenmaterials und des Inokulums in die Fermenter im Anaerobenschrank.

3.3.2 Versuchsdurchführung

Jede Untersuchungsvariante (Abschnitt 3.2) wurde in 3 bzw. 4 Wiederholungen in den Eudiometer-Fermentern vergoren. Das zu untersuchende Probenmaterial wurde im Verhältnis 1:3 der Trockenmasse zum Inokulum in die Fermenter eingewogen. Damit lag auch der Quotient für die σ_{TS} zwischen Probenmaterial und Inokulum wie in den VDI-Richtlinien (VDI, 2006) gefordert unter 0,5.

Im Verlauf der etwa 40 Tage andauernden Gärung wurden die gebildete Biogasmenge täglich und die Zusammensetzung des Biogases alle 3 bis 4 Tage bestimmt. Die Methankonzentration

(CH₄) des Biogases wurde mit dem portablen Gasanalysator (Dräger X-am 7000, Dräger Safety, Lübeck, Deutschland) jeden 3. Tag bestimmt (Genauigkeit der Messung: ± 1-3 % vom Messwert). Der Gasanalysator wurde mit Prüfgas (60% CH₄ und 40% CO₂) kalibriert. Die quasi kontinuierlichen Methankonzentrationsmessungen wurden in regelmäßigen Intervallen mit einer gaschromatographischen Referenzmethode validiert. Zur Bestimmung der Konzentration an Schwefelwasserstoff (H₂S) und Ammoniak (NH₃) wurde der portable Gasanalysator in Kombination mit Dräger Messröhrchen verwendet. Die H₂S-Konzentration im Biogas wurde 2 bis 3-mal pro Woche mit Dräger Messröhrchen verschiedener Messbereiche im Gasraum des Fermenters gemessen. Verwendete Dräger Messröhrchen: 0,5/a mit Messbereich 0,5-15 ppm; 2/a mit Messbereich 2-200 ppm; 100/a mit Messbereich 100-2000 ppm und 0,2/a mit Messbereich 0,02-7 Vol.%. Die Genauigkeit der Messung war ± 5-10% vom Messwert. Für die Bestimmung der NH₃-Konzentration des Biogases wurden Dräger Messröhrchen des Typs 5/b Iso 9001 (Messbereich 5-100 ppm) eingesetzt. Die Genauigkeit dieser Messung liegt bei ± 10-15% vom Messwert. Die Biogaszusammensetzung (Anteil an CH₄, H₂S und NH₃) erlaubte neben der Ermittlung des Methanertrages auch wesentliche Rückschlüsse auf den Zustand und den Verlauf der Gärung. Die Biogaszusammensetzung ist ein empfindliches Indiz für Störungen im Gärprozess.

Zu Versuchsbeginn (3. Versuchstag) und im Verlauf der Gärung (alle 10 Tage) wurde der pH-Wert im Fermenterinhalt mittels Glaselektrode (Testo[®] 230, Testo GesmbH, Wien, Österreich) kontrolliert. Neben dem pH-Wert-Verlauf sind auch die flüchtigen Fettsäuren ein wichtiger Indikator für die Qualität und Stabilität der anaeroben Fermentation. Die Analyse der Konzentration an flüchtigen Fettsäuren im Fermenterinhalt zu Beginn (3. Versuchstag) und am Ende der Vergärung erfolgte mittels Gaschromatographie (GC-Carlo Erba 5000, Trennsäule: DB-FFAP 15 m Länge; 0,53 mm ID; 1 µm Schicht). Es wurde die Konzentration folgender flüchtiger Fettsäuren bestimmt: Essigsäure (HAC), Propionsäure (PRO), Iso-Buttersäure (i-BUT), Buttersäure (n-BUT), Iso-Valeriansäure (i-VAL), Valeriansäure (n-VAL) und Capronsäure (CAP). Die Konzentration an Essig- und Propionsäure sind gute Indikatoren zur Beurteilung der Frage, ob der Gärprozess stabil verläuft oder nicht (Laaber et al., 2006). Liegt der Essigsäurewert unter 1000 mg/l und der Propionsäurewert unter 250 mg/l, so verläuft die Vergärung optimal. Übersteigt der Essigsäurewert 3000 mg/l bzw. der Propionsäurewert 1000 mg/l, so liegt eine Störung der anaeroben Gärung vor.

Aus den genannten Messgrößen konnte der Verlauf der Vergärung und die Stabilität des Gärprozesses beurteilt sowie der spezifische Biogas- und Methanertrag der Untersuchungsvarianten berechnet werden.

Zusätzlich zu den Untersuchungsvarianten wurden im Versuch zur Kontrolle eine Referenz (Klee gras) und ein Standard (Stärke) mitgeführt. Darüber hinaus gab es 4 Fermenter in denen sich nur Inokulum befand (Inokulum-Fermenter).

3.3.3 Berechnungen

Gebildete Biogasmenge bezogen auf Normvolumen (Biogasnornvolumen)

Zuerst wurde für jeden Versuchs-Fermenter das Normvolumen des in den einzelnen Zeitschnitten gebildeten Biogases berechnet.

$$V_{BG(P1)} = \frac{V_{neu} \times (P_{neu} - P_w + P_s) \times 273}{1013 \times T_{neu}} - \frac{V_{alt} \times (P_{alt} - P_w) \times 273}{1013 \times T_{alt}} \quad (1)$$

$V_{BG(P1)}$ = gebildete Biogasmenge aus Probenmaterial und Inokulum bezogen auf Normvolumen (ml_N)

V_{neu} = Biogasvolumen bei der aktuellen Ablesung (ml)

V_{alt} = Biogasvolumen bei der vorhergehenden Ablesung (ml)

P_{neu} = Luftdruck zur Zeit der aktuellen Ablesung (mbar)

P_{alt} = Luftdruck zur Zeit der vorhergehenden Ablesung (mbar)

P_{W} = Dampfdruck des Wassers in Abhängigkeit von der Temperatur des umgebenden Raumes (mbar)

P_{S} = Druck der Sperrflüssigkeit im Gassammelrohr in Abhängigkeit von der gebildeten Gasmenge (mbar)

T_{neu} = Temperatur des Biogases bzw. des umgebenden Raumes zur Zeit der aktuellen Ablesung (K)

T_{alt} = Temperatur des Biogases bzw. des umgebenden Raumes zur Zeit der vorhergehenden Ablesung (K)

273 = Normtemperatur (K)

1013 = Normdruck (mbar)

Gebildete Biogasmenge, die aus dem Inokulum stammt

Die Biogasmenge, die in den Versuchs-Fermentern aus dem Inokulum gebildet wurde, wurde mit Hilfe der Inokulum-Fermentern (Fermenter, in denen nur Inokulum vergärt wurde) errechnet.

$$V_{\text{BG(I)}} = \frac{V_{\text{IF}} \times m_{\text{VF}}}{m_{\text{IF}}} \quad (2)$$

$V_{\text{BG(I)}}$ = gebildete Biogasmenge aus dem Inokulum in den Versuchs-Fermentern bezogen auf Normvolumen (ml_{N})

V_{IF} = gebildete Biogasmenge im Inokulum-Fermenter bezogen auf Normvolumen (ml_{N})

m_{VF} = Masse des Inokulums im Versuchs-Fermenter (g)

m_{IF} = Masse des Inokulums im Inokulum-Fermenter (g)

Gebildete Biogasmenge, die aus dem Probenmaterial stammt (korrigiertes Biogasnormvolumen)

Um die Biogasmenge, die vom untersuchten Probenmaterial in den Versuchs-Fermentern gebildet wurde zu erhalten, wurde die anteilig vom Inokulum gebildete Biogasmenge von der gesamthaft in einem Fermenter gebildeten Biogasmenge abgezogen.

$$V_{\text{BG(P)}} = V_{\text{BG(PI)}} - V_{\text{BG(I)}} \quad (3)$$

$V_{\text{BG(P)}}$ = gebildete Biogasmenge aus Probenmaterial bezogen auf Normvolumen (ml_{N})

$V_{\text{BG(PI)}}$ = gebildete Biogasmenge aus Probenmaterial und Inokulum bezogen auf Normvolumen (ml_{N})

$V_{\text{BG(I)}}$ = gebildete Biogasmenge aus dem Inokulum in den Versuchs-Fermentern bezogen auf Normvolumen (ml_{N})

Spezifischer Biogasertrag des Probenmaterials zu einem bestimmten Zeitpunkt

Die aus dem Probenmaterial in einem bestimmten Zeitabschnitt gebildete Biogasmenge wurde in Relation zur Menge an organischer Trockensubstanz im Probenmaterial gesetzt.

$$V_{\text{BG(S)}} = \frac{V_{\text{BG(P)}} \times 10^4}{m \times \text{TS} \times \text{oTS}} \quad (4)$$

$V_{BG(S)}$ = spezifischer Biogasertrag des Probenmaterials (l_N/kg oTS)

$V_{BG(P)}$ = gebildete Biogasmenge aus Probenmaterial bezogen auf Normvolumen (ml_N)

m = Masse des eingewogenen Probenmaterials (g)

TS = Trockensubstanzgehalt des Probenmaterials (% FM)

oTS = organischer Trockensubstanzgehalt des Probenmaterials (% TS)

Kumulierte spezifische Biogasertrag des Probenmaterials

Der für die einzelnen Zeitabschnitte berechnete spezifische Biogasertrag des Probenmaterials wurde kumulativ addiert. Zur graphischen Darstellung wurden diese Werte gegen die Versuchsdauer aufgetragen.

$$V_{BG(kum)} = \sum_{Tag=0}^{Tag=n} V_{BG(S)} \quad (5)$$

$V_{BG(kum)}$ = kumulierte spezifische Biogasertrag des Probenmaterials (l_N/kg oTS)

$V_{BG(S)}$ = spezifischer Biogasertrag des Probenmaterials (l_N/kg oTS)

Gebildete Methanmenge, die aus dem Probenmaterial stammt

Zur Bestimmung der gebildeten Methanmenge aus dem Probenmaterial wurde die gebildete Biogasmenge im Versuchs-Fermenter mit der Methankonzentration des Biogases aus dem Versuchs-Fermenter multipliziert und die gebildete Biogasmenge aus dem Inokulum des Versuchs-Fermenter mit der Methankonzentration des Biogases aus dem Inokulum-Fermenter multipliziert. Von der Methanmenge, die vom Probenmaterial und Inokulum gebildet wurde, wurde die Methanmenge, die vom Inokulum stammte, abgezogen.

$$V_{CH_4(P)} = \frac{V_{BG(P)} \times C_{CH_4(VF)}}{100} - \frac{V_{BG(I)} \times C_{CH_4(IF)}}{100} \quad (6)$$

$V_{CH_4(P)}$ = gebildete Methanmenge aus Probenmaterial bezogen auf Normvolumen (ml_N)

$V_{BG(P)}$ = gebildete Biogasmenge aus Probenmaterial und Inokulum bezogen auf Normvolumen (ml_N)

$V_{BG(I)}$ = gebildete Biogasmenge aus dem Inokulum in den Versuchs-Fermentern bezogen auf Normvolumen (ml_N)

$C_{CH_4(VF)}$ = Methankonzentration im Biogas des Versuchs-Fermenter (%)

$C_{CH_4(IF)}$ = Methankonzentration im Biogas des Inokulum-Fermenter (%)

Spezifischer Methanertrag des Probenmaterials zu einem bestimmten Zeitpunkt

Die aus dem Probenmaterial in einem bestimmten Zeitabschnitt gebildete Methanmenge wurde in Relation zur Menge an organischer Trockensubstanz im Probenmaterial gesetzt.

$$V_{CH_4(S)} = \frac{V_{CH_4(P)} \times 10^4}{m \times TS \times oTS} \quad (7)$$

$V_{CH_4(S)}$ = spezifischer Methanertrag des Probenmaterials (l_N/kg oTS)

$V_{CH_4(P)}$ = gebildete Methanmenge aus Probenmaterial bezogen auf Normvolumen (ml_N)

m = Masse des eingewogenen Probenmaterials (g)

TS = Trockensubstanzgehalt des Probenmaterials (% FM)

oTS = organischer Trockensubstanzgehalt des Probenmaterials (% TS)

Kumulierte spezifische Methanertrag des Probenmaterials

Der für die einzelnen Zeitabschnitte berechnete spezifische Methanertrag des Probenmaterials wurde kumulativ addiert. Zur graphischen Darstellung wurden diese Werte gegen die Versuchsdauer aufgetragen.

$$V_{CH_4(kum)} = \sum_{Tag=0}^{Tag=n} V_{CH_4(S)} \quad (8)$$

$V_{CH_4(kum)}$ = kumulierte spezifische Methanertrag des Probenmaterials (l_N/kg oTS)

$V_{CH_4(S)}$ = spezifischer Methanertrag des Probenmaterials (l_N/kg oTS)

Energetischer Wirkungsgrad der Methanbildung

Der energetische Wirkungsgrad der Methanbildung (η) ergibt sich aus:

$$\eta = \frac{CH_4 \times 100}{BE} \quad (9)$$

η = energetischer Wirkungsgrad (%)

CH_4 = Methanenergie im gebildeten Biogas (kJ)

BE = Bruttoenergie des eingewogenen Futters (kJ)

Methanhektarertrag von Energiepflanzen

Aus dem spezifischen Methanertrag und dem Biomasseertrag der Energiepflanzen wurde der Methanhektarertrag berechnet.

$$V_{CH_4(ha)} = \frac{V_{CH_4(kum)} \times TS_{(ha)} \times oTS}{100} \quad (10)$$

$V_{CH_4(ha)}$ = Methanhektarertrag (m^3_N/ha)

$V_{CH_4(kum)}$ = kumulierte spezifische Methanertrag (l_N/kg oTS)

$TS_{(ha)}$ = Biomasseertrag (t TS/ha)

oTS = organischer Trockensubstanzgehalt (% TS)

Abbaugrad der Trockensubstanz und der organischen Trockensubstanz

Der Abbaugrad der Trockensubstanz und der organischen Trockensubstanz ergibt sich aus:

$$\text{TS-Abbau} = \frac{\text{TS}_{(\text{Inokulum})} + \text{TS}_{(\text{Gärsubstrat})} - \text{TS}_{(\text{Fermenterrückstand})}}{(\text{TS}_{(\text{Inokulum})} + \text{TS}_{(\text{Gärsubstrat})}) \times 100} \quad (11)$$

TS-Abbau = Abbaugrad der Trockensubstanz (%)

$\text{TS}_{(\text{Inokulum})}$ = Trockensubstanz des eingewogenen Inokulums (g TS)

$\text{TS}_{(\text{Gärsubstrat})}$ = Trockensubstanz des eingewogenen Gärsubstrats (g TS)

$\text{TS}_{(\text{Fermenterrückstand})}$ = Trockensubstanz des ausgewogenen Fermenterrückstands (g TS)

$$\text{oTS-Abbau} = \frac{\text{oTS}_{(\text{Inokulum})} + \text{oTS}_{(\text{Gärsubstrat})} - \text{oTS}_{(\text{Fermenterrückstand})}}{(\text{oTS}_{(\text{Inokulum})} + \text{oTS}_{(\text{Gärsubstrat})}) \times 100} \quad (12)$$

oTS-Abbau = Abbaugrad der organischen Trockensubstanz (%)

$\text{oTS}_{(\text{Inokulum})}$ = organische Trockensubstanz des eingewogenen Inokulums (g TS)

$\text{oTS}_{(\text{Gärsubstrat})}$ = organische Trockensubstanz des eingewogenen Gärsubstrats (g TS)

$\text{oTS}_{(\text{Fermenterrückstand})}$ = organische Trockensubstanz des ausgewogenen Fermenterrückstands (g TS)

3.4 Nährstoffanalysen

Vor und nach der Vergärung der Energiepflanzen und ihrer Mischungen wurden Inhaltsstoffanalysen durchgeführt. Folgende Inhaltsstoffe wurden bestimmt: Trockensubstanz (TS), Rohasche (XA), organische Trockensubstanz (oTS), Rohprotein (XP), Rohfett (XL), Rohfaser (XF), N-freie Extraktstoffe (XX), Zucker, Stärke und Bruttoenergie (BE). Die Inhaltsstoffanalysen wurden nach Standardverfahren (ALVA, 1983) durchgeführt. Da es bei der Trocknung von Silagen zu nicht unwesentlichen Stoffverlusten infolge des Verdampfens flüchtiger Substanzen und Atmungsprozessen kommt, wurde der TS-Gehalt der Silagen nach Vorgaben von Weißbach und Kuhla (1995) korrigiert.

Der Gehalt an organischem Stickstoff (N_{org}) und organischem Kohlenstoff (C_{org}) wurden mit Hilfe eines Elementaranalysators bestimmt. Die Bestimmung des Gehalts an Ammoniumstickstoff ($\text{NH}_4\text{-N}$) erfolgte mittels Destillationverfahren (DIN 38406/Teil 5). NDF (neutral detergent fibre), ADF (acid detergent fibre) und ADL (acid detergent lignin = Rohlignin) wurden nach der Methode von Van Soest et al. (1991) ermittelt. Der Gehalt an Zellulose (Zel) ist die Differenz zwischen ADF und ADL und der Gehalt an Hemizellulose (H-Zel) die Differenz zwischen NDF und ADF.

3.5 Statistische Auswertung

In den Ergebnistabellen und -abbildungen sind, wenn vorhanden, die Mittelwerte und die Standardabweichungen angegeben. Die statistische Auswertung der Ergebnisse erfolgte mit Hilfe des Statistikprogramms SPSS für Windows Version 11.5.1. Für den Mittelwertvergleich wurde eine einfaktorische ANOVA mit Post-Hoc-Test (Scheffé-Prozedur) durchgeführt. Für die untersuchten Mischungen wurden Regressionsgleichungen zur Schätzung des spezifischen Methanertrages mit Hilfe des Statistikprogramm SAS für Windows Version 9.1.3 ermittelt.

4 Ergebnisse

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Batch-Fermenter-Untersuchungen dargestellt. Im Einzelnen sind dies: (1) Biomasseertrag der Energiepflanzen, (2) Inhaltsstoffzusammensetzung der untersuchten Gärsubstrate, (3) Konzentration an flüchtigen Fettsäuren und pH in den Fermentern, (4) Gärdauer und Inhaltsstoffzusammensetzung der Gärrückstände, (5) Abbaugrad der Trockensubstanz und der organischen Trockensubstanz, (6) Qualität des gebildeten Biogases, (7) Spezifischer Biogas- und Methanertrag der untersuchten Varianten, (8) Energetischer Wirkungsgrad der Methanbildung, (9) Kofermentationseffekte der untersuchten Mischungen, (10) Methanenergiewertmodell für die untersuchten Mischungen, (11) Methanhektarertrag der Energiepflanzen und Mischungen, und (12) hydraulische Verweilzeit.

4.1 Biomasseertrag der Energiepflanzen

Abbildung 4 gibt den Biomasseertrag der im vorliegenden Projekt verwendeten Energiepflanzen wieder. Der höchste Biomasseertrag (29,7 t TS/ha) wurde mit der Ernte des Silomais als Ganzpflanze erreicht. Zuckerrüben (nur Rüben) und Körnermais (CCM) hatten einen vergleichbaren Biomasseertrag, der bei durchschnittlich 15,3 t TS/ha lag. Grünroggen und Sonnenblumen als Ganzpflanzen geerntet besaßen einen Biomasseertrag von 14,3 bzw. 12,7 t TS/ha. Das in einem Bewirtschaftungssystem mit 4 Aufwüchsen angebaute Klee gras erreichte einen Biomasseertrag von 10,2 t TS/ha.

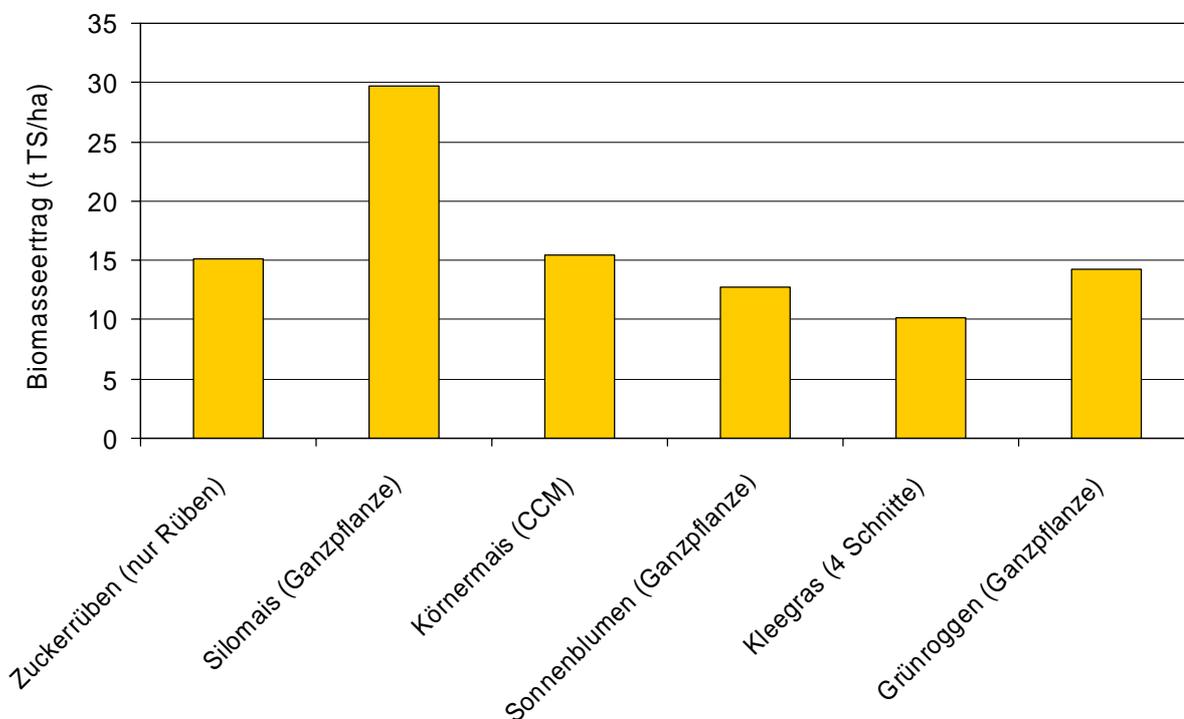


Abbildung 4: Biomasseertrag der eingesetzten Energiepflanzen.

4.2 Inhaltsstoffzusammensetzung der untersuchten Gärsubstrate

In Tabelle 3 ist die Inhaltsstoffzusammensetzung der untersuchten Gärsubstrate wiedergegeben.

Von den Gärrohstoffkomponenten hatte die Schweinegülle den niedrigsten Gehalt an Trockensubstanz (4% in FM) und organischer Trockensubstanz (2% in FM). Die eingesetzten Silagen hatten einen Trockensubstanzgehalt, der zwischen 18 (Zuckerrübensilage) und 32% (Maissilage) lag. Der Gehalt an organischer Substanz lag bei den Silagen zwischen 18 und 30%. Den höchsten Gehalt an Trockensubstanz (69% in FM) und organischer Trockensubstanz (68% in FM) besaß der CCM. Das verwendete Glycerin hatte einen Trockensubstanzgehalt von 47% und einen Gehalt an organischer Trockensubstanz von 33%. Der Rohaschegehalt lag am höchsten in der Schweinegülle (42% in TS) und am niedrigsten im CCM (2% in TS). Rohproteinreiche Gärrohstoffkomponenten waren Schweinegülle, Klee Grassilage, CCM und Grünroggensilage (13 bis 18% in TS). Der Rohproteingehalt der Sonnenblumensilage lag bei knapp 10%. Mais- und Zuckerrübensilagen besaßen einen Rohproteingehalt unter 10%. Das Glycerin enthielt 68% Rohfett. Von den anderen Gärrohstoffkomponenten war vor allem die Sonnenblumensilage (16% Rohfett in TS) fettreich, alle anderen Rohstoffkomponenten hatten einen Rohfettgehalt, der unter 5% lag. Reich an Rohfaser bzw. Zellulose waren Klee gras-, Grünroggen- und Sonnenblumensilage (31, 29, 28% bzw. 30, 32, 30%). Glycerin enthielt keinerlei Rohfaser bzw. Zellulose. Von den anderen Komponenten besaß CCM den niedrigsten Rohfaser- und Zellulosegehalt (2% in TS). Zuckerrübensilage und CCM hatten aber einen sehr hohen Gehalt an N-freien Extraktstoffen der bei rund 80% lag. Bei der Zuckerrübensilage war das durch den hohen Zuckergehalt (61% in TS) verursacht, beim CCM durch den hohen Stärkegehalt (71% in TS). Die Maissilage besaß etwa die Hälfte des Stärkegehalts des CCM und einen relativ hohen Hemizellulosegehalt (23%) wodurch der Gehalt an N-freien Extraktstoffen noch bei 65% lag. Die Silagen aus Sonnenblumen, Klee gras bzw. Grünroggen hatten einen Gehalt an N-freien Extraktstoffen, der zwischen 34 und 47% lag. Da diese Silagen kaum Stärke oder Zucker enthielten, war dies hauptsächlich durch den Gehalt an Hemizellulose verursacht bzw. im Fall der Sonnenblumensilage durch den Gehalt an löslichen Anteilen von Cellulose und Lignin. Das Glycerin enthielt keine N-freien Extraktstoffe. Von den anderen Gärrohstoffkomponenten hatte die Schweinegülle mit 25% den geringsten Gehalt an N-freien Extraktstoffen. In der Schweinegülle wurden aber der höchste ADL-Wert bestimmt (11% in TS). Auch die Sonnenblumen und der Grünroggen hatten im Vergleich zu den anderen Komponenten noch einen relativ hohen ADL-Gehalt von 10 bzw. 6%. Alle anderen Gärrohstoffkomponenten besaßen einen ADL-Gehalt von unter 4%. Am energiereichsten war die Sonnenblumensilage (21 MJ/kg TS) und auch in der Maissilage, Klee grassilage und CCM lag der Bruttoenergiegehalt noch über 19 MJ/kg TS. Der Bruttoenergiegehalt in der Grünroggen- bzw. Zuckerrübensilage lag bei knapp 19 bzw. 18 MJ/kg TS. Auch für das Glycerin wurde ein Bruttoenergiegehalt von 18 MJ/kg TS ermittelt. Den geringsten Bruttoenergiegehalt hatte die Schweinegülle mit knapp 15 MJ/kg TS. Es wurde auch der Quotient (Verhältnis) zwischen Rohprotein und Bruttoenergie berechnet. Nur in der Schweinegülle lag dieser Quotient mit 1,3 über 1, für alle anderen Gärrohstoffkomponenten darunter. Den niedrigsten Quotienten mit 0,1 hatte das Glycerin. Die Ergebnisse zum Kohlenstoffgehalt zeigen auf, dass die meisten Gärrohstoffkomponenten einen Gehalt von über 46% aufweisen. Nur das Glycerin und die Schweinegülle besaßen einen geringeren Kohlenstoffgehalt, der bei 27 bzw. 32% lag. Das C/N-Verhältnis unterschied sich zwischen den Gärrohstoffkomponenten sehr stark. Der niedrigste Quotient ergab sich für die Schweinegülle (4,2). Glycerin, Klee grassilage und Grünroggensilage hatten ein C/N-Verhältnis, das unter 20 lag und CCM und Sonnenblumensilage ein C/N-Verhältnis, das unter 30 lag. Für Maissilage ergab sich ein C/N-Verhältnis von 35 und für die Zuckerrüben sogar ein C/N-Verhältnis von über 50.

Die Inhaltsstoffzusammensetzungen der 13 Mischungen wurden aus den Inhaltsstoffen ihrer Einzelkomponenten berechnet, d.h. die Höhe der Werte erklärt sich aus der Höhe und Anteilen der Einzelkomponenten. Die Mischungen 2 bis 5 (Block 1) enthielten vor allem energiereiche Gär-

rohstoffe (Sonnenblumensilage, Maissilage und CCM). Der Bruttoenergiegehalt dieser Mischungen lag bei durchschnittlich 18,4 MJ/kg TS. In den Mischungen 6 bis 9 (Block 2) lag der Bruttoenergiegehalt bei durchschnittlich 17,7 MJ/kg TS und damit tiefer als in den Mischungen von Block 1. In den Mischungen 10 bis 13 (Block 3) ergab sich ein durchschnittlicher Bruttoenergiegehalt von 18,8 MJ/kg TS und damit ein höherer als in Block 1. Die Mischungen 6 bis 9 (Block 2) enthielten vor allem proteinreiche Gärrohstoffe (Kleegrassilage, Grünroggensilage und Schweinegülle). Der Rohproteingehalt dieser Mischungen lag bei durchschnittlich 14,6%. In den Mischungen 2 bis 5 (Block 1) und Mischungen 10 bis 13 (Block 3) ergab sich ein niedrigerer Rohproteingehalt von durchschnittlich 9,9%.

Tabelle 3: Inhaltsstoffzusammensetzung der untersuchten Gärsubstrate.

Gärsubstrate	TS ¹ (% FM)	oTS (% FM)	XA (% TS)	XP (% TS)	XL (% TS)	XF (% TS)	XX (% TS)	ADL (% TS)	ZEL (% TS)	H-ZEL (% TS)	Stärke (% TS)	Zucker (% TS)	BE (MJ/kg TS)	XP/BE	C _{org} (% TS)	C/N
Glyzerin	47,2	32,9	30,3	1,7	68,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	18,1	0,1	26,6	14,1
Schweinegülle	4,0	2,3	42,1	18,3	2,8	11,4	25,4	11,3	13,5	13,0	1,5	0,4	14,6	1,3	32,1	4,2
Zuckerrübensilage	18,4	17,6	4,2	4,5	0,6	6,8	83,8	3,2	6,1	12,5	0,0	61,1	17,7	0,3	48,2	50,2
Maissilage	31,6	30,2	4,6	7,2	4,7	18,1	65,4	2,6	18,3	23,2	32,9	0,6	19,5	0,4	47,2	35,2
CCM	68,6	67,5	1,6	13,4	3,5	1,9	79,4	0,8	1,7	18,4	71,2	0,8	19,1	0,7	47,9	20,9
Sonnenblumensilage	24,0	20,8	13,2	9,4	15,6	27,9	33,9	9,9	29,6	1,6	1,4	0,8	21,3	0,4	46,6	24,0
Kleegrassilage	21,5	19,4	9,8	14,7	3,8	31,0	40,7	3,9	29,9	18,1	0,0	0,1	19,4	0,8	47,4	16,7
Grünroggensilage	25,1	23,0	8,3	13,2	2,5	28,6	47,3	6,0	31,8	17,6	0,0	0,8	18,6	0,7	53,6	19,6
---	M1	23,2	17,5	24,8	13,6	6,2	11,6	43,8	6,7	12,7	16,2	20,7	16,8	0,8	38,6	16,2
Block 1 (energiebetont)	M2	25,5	22,0	13,7	10,0	5,5	14,8	55,9	5,8	15,5	14,2	17,4	18,4	0,5	44,2	28,1
	M3	30,8	28,0	9,3	9,2	4,7	12,3	64,6	4,5	12,6	14,7	22,5	18,6	0,5	45,9	31,8
	M4	19,6	16,7	14,9	9,4	6,3	16,3	53,1	6,8	17,0	11,5	7,2	18,6	0,5	44,1	29,8
	M5	20,3	16,7	17,7	10,7	5,9	16,9	48,8	6,8	17,8	14,7	13,7	18,2	0,6	42,6	25,1
Block 2 (eiweißbetont)	M6	18,1	14,1	22,2	15,0	3,9	19,9	39,1	7,1	20,8	15,7	7,4	17,4	0,9	41,7	14,3
	M7	16,0	12,6	21,3	15,4	3,8	23,3	36,1	7,3	24,4	15,4	0,6	17,6	0,9	43,1	13,1
	M8	19,4	16,5	15,1	13,3	3,6	23,0	45,0	6,2	24,1	15,8	2,1	18,1	0,7	46,2	19,9
	M9	17,0	13,7	19,2	14,7	3,1	22,5	40,4	6,6	23,3	16,4	2,1	17,6	0,8	43,8	15,8
Block 3 (ausgeglichen)	M10	20,1	17,1	14,9	10,7	5,3	18,8	50,3	6,4	19,6	13,7	7,1	18,4	0,6	44,8	26,1
	M11	23,7	20,1	15,2	11,0	6,4	17,0	50,4	6,8	17,9	11,6	10,9	18,5	0,6	44,4	25,1
	M12	28,2	25,9	8,1	9,0	7,8	21,4	53,7	5,5	22,1	13,6	15,6	19,8	0,5	47,6	29,5
	M13	23,6	20,7	12,0	9,4	5,2	17,9	55,5	5,5	18,8	16,2	15,1	18,6	0,5	45,6	29,4

TS = Trockensubstanz, oTS = organische Trockensubstanz, XA = Rohasche, XP = Rohprotein, XL = Rohfett, XF = Rohfaser, XX = N-freie Extraktstoffe, ADL = Lignin, ZEL = Zellulose, H-Zell = Hemizellulose, BE = Bruttoenergie, XP/BE = Rohprotein/Bruttoenergie-Verhältnis, C_{org} = organischer Kohlenstoff, C/N = Kohlenstoff/Stickstoff-Verhältnis

¹Der TS-Gehalt der Silagen wurde um die Stoffverluste, die während der Trocknung auftreten korrigiert (Weißbach und Kuhla, 1995).

4.3 Konzentration an flüchtigen Fettsäuren und pH in den Fermentern

Im Verlauf der Vergärung wurden die Konzentrationen und die Zusammensetzung der flüchtigen Fettsäuren in den Fermentern bestimmt. In Tabelle 4, Abbildung 5 und Abbildung 6 sind die Daten für den 3. Versuchstag wiedergegeben, in Tabelle 5, Abbildung 7 und Abbildung 8 die Daten für den letzten Versuchstag.

Tabelle 4: Konzentration an flüchtigen Fettsäuren und pH in den Fermentern am 3. Versuchstag.

Variante		Flüchtige Fettsäuren (mg/l) / 3. Versuchstag							pH	
		HAC	PRO	i-BUT	n-BUT	i-VAL	n-VAL	CAP		HAC/PRO
Glycerin		642,54	11115,34	n.d.	18,78	9,41	10,93	15,51	0,06	7,81
Schweinegülle		1022,19	196,55	19,73	10,52	22,66	4,44	11,42	5,20	7,83
Zuckerrübensilage		3323,97	1339,45	60,12	3055,00	92,16	80,88	364,92	2,48	7,70
Maissilage		3676,78	1879,45	60,59	751,27	96,19	9,57	19,62	1,96	7,77
CCM		3388,41	2157,99	86,24	1651,98	143,42	39,46	60,88	1,57	7,76
Sonnenblumensilage		3253,39	1040,43	51,10	190,79	83,07	9,64	34,47	3,13	7,70
Kleegrassilage		3192,19	742,84	290,52	180,57	206,20	231,70	93,94	4,30	7,77
Grünroggensilage		2882,49	1239,38	76,66	185,49	113,56	22,60	27,94	2,33	7,97
---	M1	5692,47	2847,96	39,29	495,07	54,70	60,38	12,86	2,00	7,91
Block 1 (energiebetont)	M2	4051,76	2240,51	45,68	633,30	83,46	21,00	16,33	1,81	7,68
	M3	5044,11	2379,39	57,20	853,81	104,15	19,69	19,50	2,12	7,75
	M4	3728,58	1838,90	30,55	775,38	51,04	17,54	13,43	2,03	7,82
	M5	4229,50	2230,73	49,73	507,73	87,42	17,30	13,47	1,90	8,24
Block 2 (eiweißbetont)	M6	2379,15	1191,50	198,62	20,93	167,53	23,75	9,77	2,00	7,98
	M7	2300,43	1052,37	167,64	19,21	99,38	20,66	26,27	2,19	7,80
	M8	3088,17	1577,71	199,24	122,10	218,57	133,78	58,82	1,96	7,95
	M9	2894,34	1261,25	193,13	42,51	143,30	50,73	15,53	2,30	8,09
Block 3 (ausgeglichen)	M10	2811,08	1709,04	80,98	565,77	123,52	64,68	29,37	1,64	7,83
	M11	3224,15	2308,54	70,60	455,77	113,49	65,10	25,25	1,40	8,01
	M12	4551,43	2034,28	80,40	618,31	137,79	62,63	17,51	2,24	8,22
	M13	3251,55	1921,61	98,95	410,52	173,56	48,58	34,33	1,69	8,12

HAC = Essigsäure, PRO = Propionsäure, i-BUT = iso-Buttersäure, n-But = n-Buttersäure, i-Val = iso-Valeriansäure, n-VAL = n-Valeriansäure, CAP = Kapronsäure, HAC/PRO = Essigsäure/Propionsäure-Verhältnis, n.d. = nicht detektiert

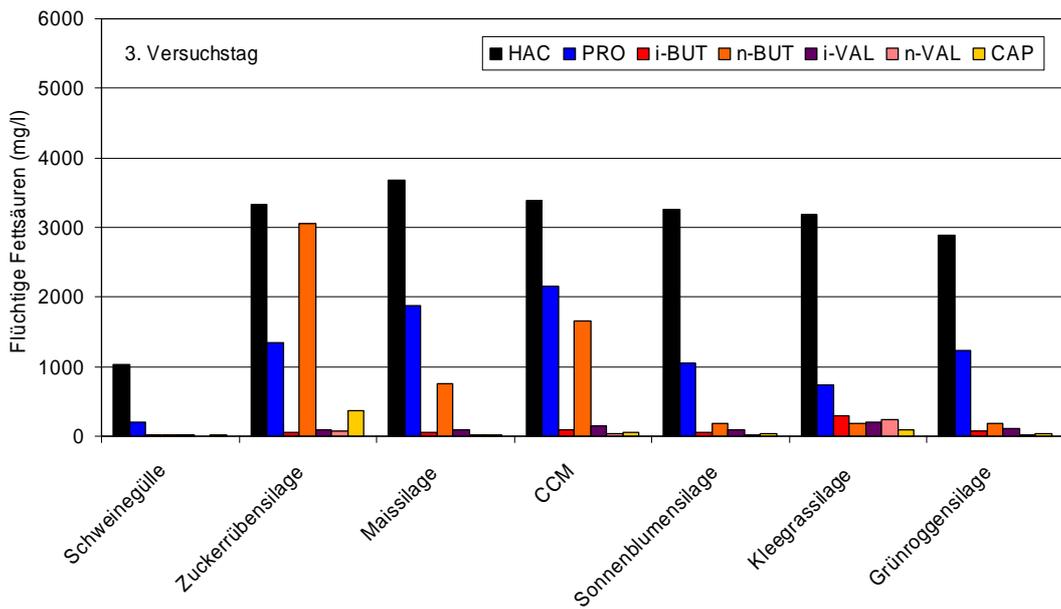


Abbildung 5: Konzentration an flüchtigen Fettsäuren in den Fermentern am 3. Versuchstag bei alleiniger Vergärung der Gärrohstoffe (ohne Glycerin).

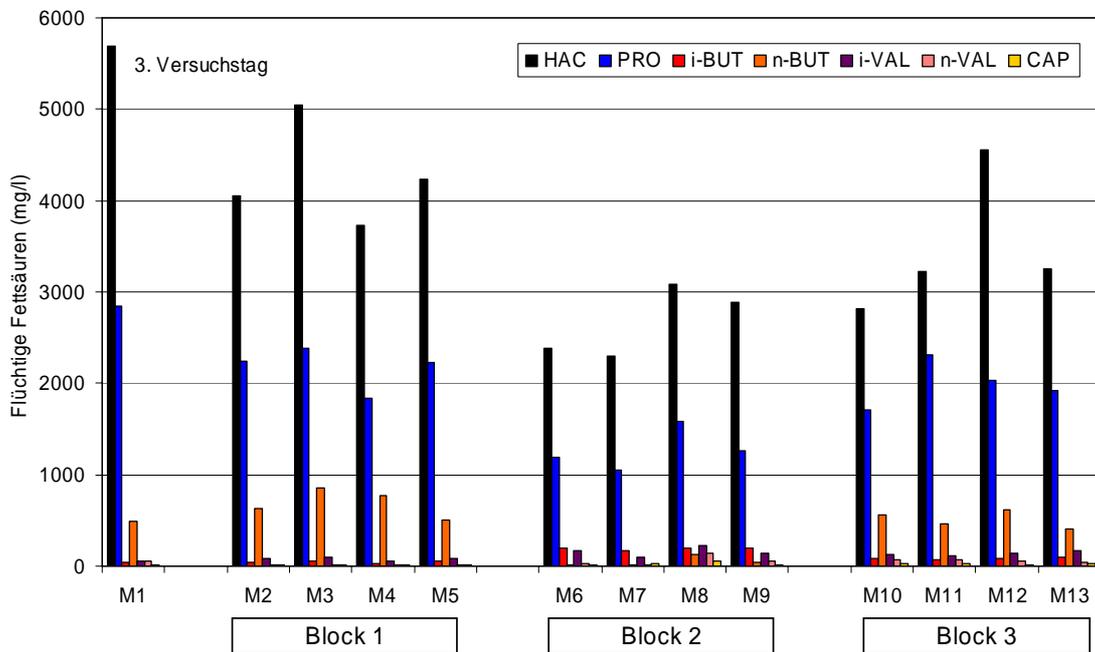


Abbildung 6: Konzentration an flüchtigen Fettsäuren in den Fermentern am 3. Versuchstag für die Mischungen.

Tabelle 5: Konzentration an flüchtigen Fettsäuren in den Fermentern am letzten Versuchstag und durchschnittlicher pH-Wert im Verlauf der Vergärung.

Variante		Flüchtige Fettsäuren (mg/l) / Letzter Versuchstag							pH Ø	
		HAC	PRO	i-BUT	n-BUT	i-VAL	n-VAL	CAP		HAC/PRO
Glyzerin		1297,20	10474,87	26,99	607,13	15,09	434,14	69,95	0,12	6,47
Schweinegülle		120,11	26,81	n.d.	10,16	n.d.	3,64	14,59	4,64	7,82
Zuckerrübensilage		49,57	14,05	n.d.	3,18	n.d.	2,43	8,52	3,55	7,76
Maissilage		84,74	14,32	n.d.	8,38	n.d.	4,50	13,77	5,92	7,75
CCM		81,62	10,99	n.d.	8,47	n.d.	3,85	11,87	7,42	7,81
Sonnenblumensilage		68,23	9,01	n.d.	6,41	n.d.	2,18	10,21	7,64	7,75
Kleegrassilage		58,09	7,93	n.d.	n.d.	n.d.	3,16	12,27	7,34	7,80
Grünroggensilage		49,85	6,57	n.d.	3,62	n.d.	3,72	10,86	7,56	7,86
---	M1	93,06	11,15	n.d.	3,69	n.d.	4,05	11,46	8,37	7,72
Block 1 (energiebetont)	M2	80,24	10,56	n.d.	3,58	n.d.	3,83	11,54	7,58	7,68
	M3	64,08	8,76	n.d.	2,59	n.d.	3,65	11,21	7,32	7,73
	M4	67,74	9,76	n.d.	2,74	n.d.	2,71	8,58	6,93	7,73
	M5	53,24	8,41	n.d.	2,62	n.d.	3,08	7,69	6,33	7,87
Block 2 (eiweißbetont)	M6	82,78	10,75	n.d.	3,10	n.d.	3,77	10,96	7,76	7,76
	M7	205,36	11,88	n.d.	5,20	n.d.	4,33	14,40	17,32	7,68
	M8	137,49	14,33	n.d.	5,17	n.d.	5,05	12,05	9,92	7,75
	M9	127,11	15,24	n.d.	4,32	n.d.	6,09	13,97	8,53	7,81
Block 3 (ausgeglichen)	M10	86,07	12,25	n.d.	4,22	n.d.	3,05	8,17	7,02	7,72
	M11	110,18	16,68	n.d.	4,69	n.d.	3,72	10,53	6,63	7,76
	M12	78,83	12,41	n.d.	3,24	n.d.	2,20	12,03	6,35	7,88
	M13	103,59	14,95	n.d.	3,10	n.d.	1,55	11,15	6,96	7,80

HAC = Essigsäure, PRO = Propionsäure, i-BUT = iso-Buttersäure, n-But = n-Buttersäure, i-Val = iso-Valeriansäure, n-VAL = n-Valeriansäure, CAP = Kapronsäure, HAC/PRO = Essigsäure/Propionsäure-Verhältnis, n.d. = nicht detektiert

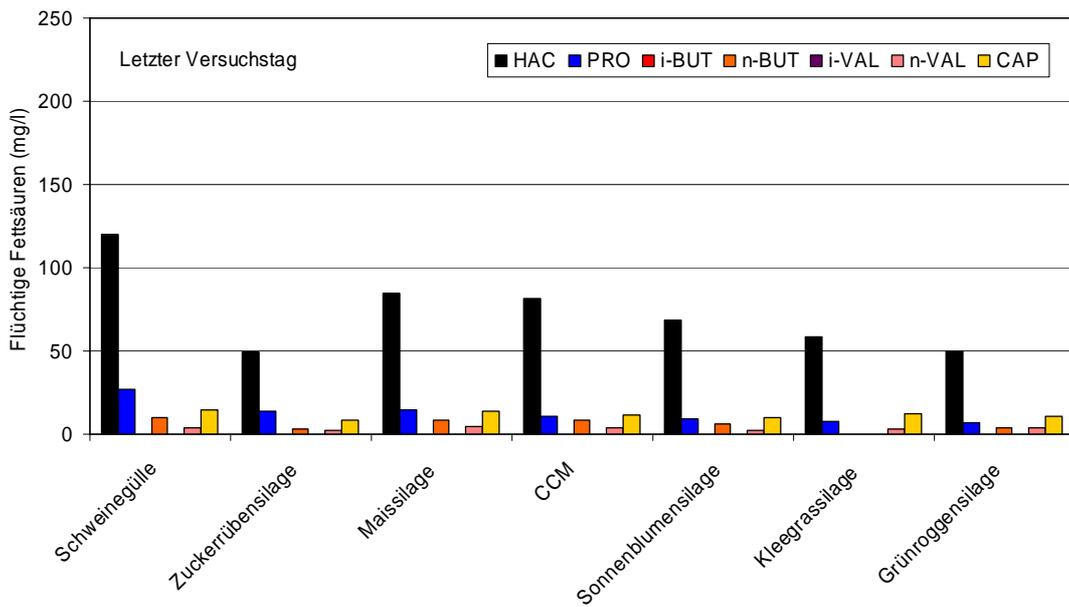


Abbildung 7: Konzentration an flüchtigen Fettsäuren in den Fermentern am letzten Versuchstag bei alleiniger Vergärung der Gärrohstoffe (ohne Glycerin).

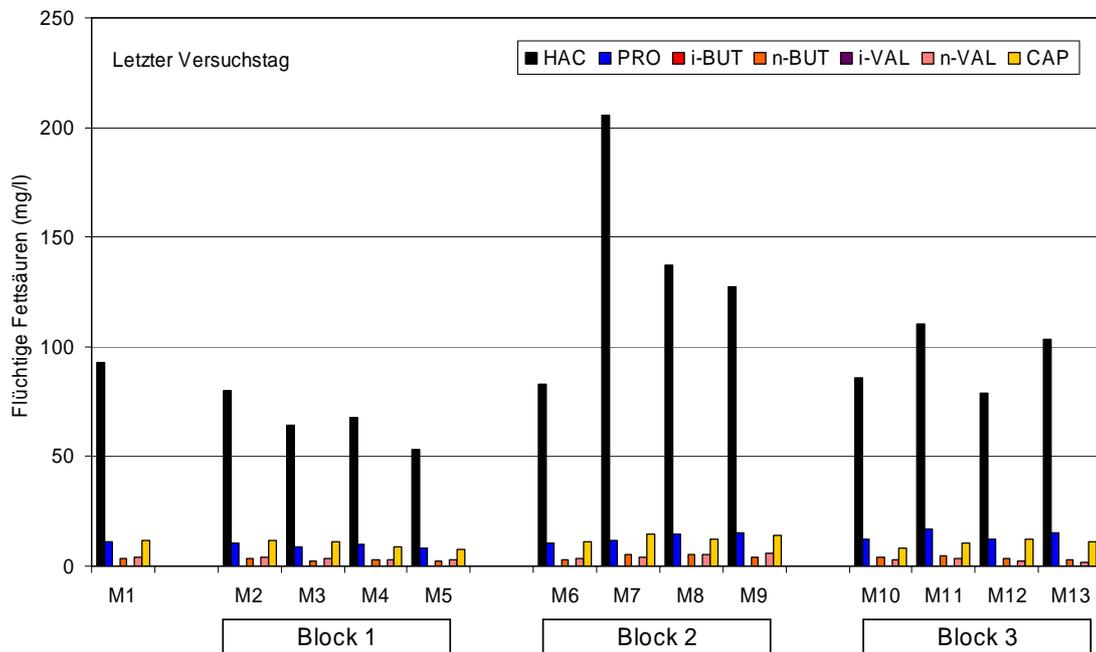


Abbildung 8: Konzentration an flüchtigen Fettsäuren in den Fermentern am letzten Versuchstag für die Mischungen.

Die flüchtigen Fettsäuren sind Stoffwechselprodukte der Mikroorganismen. Zu Beginn der Gärversuche (3. Versuchstag) lagen die Konzentrationen der flüchtigen Fettsäuren um ein Vielfa-

ches höher als am Ende. Für die flüchtigen Fettsäuren können optimale Wertebereiche angegeben werden: 0-1000 mg/l für Essigsäure; 0-250 mg/l für Propionsäure; 0-50 mg/l für iso-Buttersäure, n-Buttersäure und iso-Valeriansäure, 0-20 mg/l für n-Valeriansäure (Laaber et al., 2006).

In der Anfangsphase der Vergärung wurden diese optimalen Konzentrationen bei fast allen flüchtigen Fettsäuren überschritten. Am Ende der Vergärung traf dies nicht mehr zu. Eine Ausnahme stellte die Vergärung von 100% Glycerin dar. Mit dieser Variante wurden zu Beginn und am Ende der Vergärung extrem hohe Propionsäurekonzentrationen gemessen, dies spiegelte sich auch in dem extrem niedrigem HAC/PRO-Quotienten wieder.

Zusätzlich zu den flüchtigen Fettsäuren gibt Tabelle 4 den pH-Wert in den Fermentern am 3. Versuchstag und Tabelle 5 den durchschnittlichen pH-Wert während der gesamten Vergärung wieder. Das Aktivitätsoptimum der methanbildenden Mikroorganismen liegt zwischen 6,5 und 8,0. Einige Mischungen (Mischung 5, 9, 11, 12 und 13) hatten am 3. Versuchstag einen pH-Wert von über 8,0 (Tabelle 4). Die im weiteren Verlauf der Gärversuche ermittelten pH-Werte lagen aber bei allen untersuchten Varianten unterhalb 8,0 und somit auch der durchschnittliche pH-Wert im Verlauf der Vergärung (Tabelle 5). In der Variante mit 100% Glycerin ergab sich sogar ein durchschnittliche pH-Wert, der unter 6,5 lag. Zusammen mit den hohen Konzentrationen an flüchtigen Fettsäuren in dieser Variante ist dies ein Hinweis darauf, dass der Gärprozess in dieser Variante gehemmt war.

4.4 Gärdauer und Inhaltsstoffzusammensetzung der Gärrückstände

Alle untersuchten Varianten wurden mindestens 40 Tage vergärt (Tabelle 6). Tabelle 6 gibt darüber hinaus auch Auskunft über die Inhaltsstoffzusammensetzung der Gärrückstände am Ende der Vergärung (Düngewert). Der Gehalt an Trockensubstanz lag zwischen 1,8 und 3,2 und der Gehalt an organischer Trockensubstanz zwischen 0,9 und 1,8. In dieser Spanne nicht enthalten sind die Daten zur Vergärung von 100% Glycerin, da diese um einiges über den durchschnittlichen Werten lagen. In den Gärrückständen der Glycerin-Variante lag der Trockensubstanzgehalt bei 3,87% in FM und der Gehalt an organischer Trockensubstanz bei 2,85% in FM. Die Gehalte an N_t (4,68% in TS), NH_4-N (2,34% in TS und 50,04% in N) lagen dagegen in der Glycerin-Variante um einiges unter denen der anderen Varianten. Der Mittelwert der anderen Varianten für diese Inhaltsstoffe lag bei 8,8% N_t in der TS ($\pm 1,0$; Standardabweichung), 5,9% NH_4-N in der TS ($\pm 0,9$) bzw. 66,8% Rohasche in der TS ($\pm 3,9$).

Tabelle 6: Gärdauer und Inhaltsstoffzusammensetzung der Gärrückstände.

Variante		Gärdauer (Tage)	TS (% FM)	oTS (% FM)	N_t (% TS)	NH_4-N (% TS)	NH_4-N (% N)
Glycerin		40	3,87	2,85	4,68	2,34	50,04
Schweinegülle		40	2,71	1,47	8,68	6,01	69,22
Zuckerrübensilage		40	2,19	1,23	8,59	5,59	65,08
Maissilage		40	2,40	1,45	8,82	5,38	60,99
CCM		40	2,98	1,76	8,19	4,91	59,90
Sonnenblumensilage		40	2,58	1,55	8,02	5,26	65,56
Kleegrassilage		40	2,36	1,42	8,97	6,03	67,23
Grünroggensilage		40	2,59	1,50	8,13	5,22	64,25
---	M1	44	2,30	1,27	9,14	6,58	71,94
Block 1 (energiebetont)	M2	44	2,26	1,30	9,25	6,25	67,58
	M3	44	1,96	1,06	10,36	7,01	67,65
	M4	45	2,02	1,11	10,13	6,66	65,82
	M5	45	1,97	0,85	9,58	6,76	70,59
Block 2 (eiweißbetont)	M6	44	2,51	1,13	7,70	5,41	70,33
	M7	43	3,16	1,50	7,04	4,51	64,06
	M8	40	2,87	1,26	8,44	5,03	59,55
	M9	40	2,68	1,70	7,82	5,27	67,41
Block 3 (ausgeglichen)	M10	43	2,28	1,39	9,06	6,11	67,47
	M11	43	1,94	1,12	9,99	7,31	73,09
	M12	43	1,79	1,05	10,45	7,63	73,04
	M13	44	2,77	1,75	7,90	5,20	65,84

TS = Trockensubstanz, oTS = organische Trockensubstanz, NH_4-N = Ammoniumstickstoff, N_t = Gesamtstickstoff

4.5 Abbaugrad der Trockensubstanz und der organischen Trockensubstanz

Es wurde der Abbaugrad der Trockensubstanz und der organischen Trockensubstanz vom gesamten Fermenterinhalt für jede Variante berechnet (Tabelle 7). Von den Gärrohstoffen besaß die Variante mit 100% Glycerin den niedrigsten TS- und oTS-Abbaugrad (45 bzw. 47%). Auch in der Schweinegülle-Variante lag der TS-Abbaugrad unter 50%, der oTS-Abbaugrad aber bei durchschnittlich 62%. Der TS-Abbaugrad bei allen anderen Gärrohstoffen lag zwischen 61 und 70%, der oTS-Abbaugrad sogar zwischen 72 und 80%. Mit Ausnahme der Variante M7 lag der TS-Abbaugrad der Mischungen über 61%. Die Spanne im oTS-Abbau reichte bei den Mischungen von 70 bis 85%.

Tabelle 7: TS- und oTS-Abbau des Fermenterinhalt.

Gärrohstoff		TS-Abbau (%)			oTS-Abbau (%)		
		MW	n	STABW	MW	n	STABW
Glycerin		45,2	3	0,40	47,3	3	0,36
Schweinegülle		48,3	3	0,16	62,0	3	0,18
Zuckerrübensilage		69,5	4	0,10	79,5	4	0,07
Maissilage		67,8	3	0,14	76,7	3	0,10
CCM		60,8	4	0,14	72,4	4	0,10
Sonnenblumensilage		64,6	4	0,13	73,9	4	0,09
Kleegrassilage		67,7	3	0,18	76,4	3	0,13
Grünroggensilage		65,2	3	0,37	75,5	3	0,29
---	M1	68,8	4	0,09	77,8	4	0,06
Block 1 (energiebetont)	M2	69,2	4	0,16	78,1	4	0,12
	M3	73,5	4	0,10	82,6	4	0,07
	M4	71,8	4	0,18	80,8	4	0,13
	M5	72,6	4	0,08	85,1	4	0,05
Block 2 (eiweißbetont)	M6	64,7	4	0,04	79,7	4	0,02
	M7	55,3	4	0,12	73,2	4	0,07
	M8	60,8	4	0,11	78,7	4	0,06
	M9	62,2	4	0,24	69,9	4	0,20
Block 3 (ausgeglichen)	M10	68,6	4	0,03	76,1	4	0,03
	M11	73,4	4	0,10	80,9	4	0,07
	M12	75,7	4	0,02	82,7	4	0,02
	M13	62,7	4	1,28	71,0	4	0,96

TS = Trockensubstanz, oTS = organische Trockensubstanz, MW = Mittelwert, n = Anzahl Beobachtungen (Fermenter pro Variante), STABW = Standardabweichung

Tabelle 8 gibt die mittleren Werte für den TS- und oTS-Abbau in den Mischungsblöcken wieder. Die Fermenter mit den energiebetonten Mischungen (Block 1) zeigten im Durchschnitt den höchsten TS- und oTS-Abbau, die Fermenter mit den eiweißbetonten Mischungen (Block 2) im Durchschnitt den geringsten TS- und oTS-Abbau.

Tabelle 8: TS- und oTS-Abbau des Fermenterinhalt (Mittelwerte der Blöcke).

Block	TS-Abbau (%)			oTS-Abbau (%)		
	MW	n	STABW	MW	n	STABW
Block 1 (energiebetont)	71,8	16	1,67	81,7	16	2,64
Block 2 (eiweißbetont)	60,7	16	3,57	75,4	16	4,16
Block 3 (ausgeglichen)	70,1	16	5,21	77,7	16	4,71

TS = Trockensubstanz, oTS = organische Trockensubstanz, MW = Mittelwert, n = Anzahl Beobachtungen (Fermenter pro Block), STABW = Standardabweichung

4.6 Qualität des gebildeten Biogases

Die Qualität des Biogases bestimmt die verbrennungstechnischen Eigenschaften des Biogases. Qualitätsmerkmale des Biogases sind der Methan-, Schwefelwasserstoff- und Ammoniakgehalt, wobei der Gehalt an Methan so hoch wie möglich sein sollte und der Gehalt an Schwefelwasserstoff und Ammoniak so niedrig wie möglich. Hohe Schwefelwasserstoff- und Ammoniakgehalte können die Vergärung ungünstig beeinflussen, darüber hinaus verursacht Schwefelwasserstoff Korrosionsschäden im gesamten gasführenden System. In Tabelle 9 sind die durchschnittlichen Methan-, Schwefelwasserstoff- und Ammoniakgehalte im aus dem gesamten Fermenterinhalt (Substrat und Inokulum) gebildeten Biogas wiedergegeben. Grosse Standardabweichungen sind ein Hinweis darauf, dass sich die Gaszusammensetzung im Verlauf der Gärung wesentlich verändert hat.

Der im gebildeten Biogas durchschnittlich gemessene Methangehalt lag mit Ausnahme der Variante mit 100% Glycerin bei allen Varianten über 48 Vol.% (Tabelle 9). Bei den Einzelkomponenten ergab sich der höchste, durchschnittliche Methangehalt für CCM (60,0 Vol.%) und bei den Mischungen für Mischung 9 (58,0 Vol.%). Der durchschnittliche Methangehalt in den Blöcken 1, 2 und 3 lag bei 54,4, 55,8 bzw. 56,5 Vol.%. Der sehr niedrige Methangehalt in der Variante mit 100% Glycerin ist ein Hinweis darauf, dass in dieser Variante die methanbildenden Mikroorganismen gehemmt waren. Bei einer vorhergehenden Untersuchung mit ebenfalls 100% Glycerin wurde keine Hemmung der Fermentationsprozesse beobachtet und der gemessene Methangehalt lag bei durchschnittlich 55,9% (Amon et al., 2004a).

Der durchschnittliche Gehalt an Schwefelwasserstoff im gebildeten Biogas lag zwischen 108 und 1798 ppm (Tabelle 9). Der niedrigste Wert ergab sich für die Variante mit Mischung 3, der höchste Wert für die Schweinegülle-Variante. Für Block 1 wurde ein durchschnittlicher Wert von 168 ppm H₂S bestimmt, für Block 2 ein Wert von 307 ppm H₂S und für Block 3 ein Wert von 321 ppm H₂S. Das bedeutet, dass die Mischungen aus Block 1 im Durchschnitt einen um fast die Hälfte geringeren Schwefelwasserstoffgehalt aufwiesen. Dass mit den Mischungen aus Block 2 mehr Schwefelwasserstoff produziert werden würde war zu erwarten gewesen, da die Mischungen in diesem Block einen höheren Rohproteingehalt hatten. Schwefelwasserstoff entsteht während der Vergärung durch den Abbau von Proteinen (d.h. den schwefelhaltige Aminosäuren Cystein und Methionin) oder durch Reduktion anorganischer Schwefelverbindungen. Es wurde auch der Schwefelgehalt der Substrate bestimmt. Für die Mischungen in Block 2 ergab sich ein durchschnittlicher Schwefelgehalt von 0,5% in der TS. Der Schwefelgehalt der Mischungen in Block 1 und 3 unterschieden sich nicht und lagen bei durchschnittlich 0,3% in der TS. Der höhere Gehalt an Schwefelwasserstoff in Block 3 im Vergleich zu Block 1 kann daher nur durch eine unterschiedliche Aktivität der schwefelwasserstoffbildenden Mikroorganismen erklärt werden.

Der Gehalt an Ammoniak im produzierten Biogas war ebenfalls sehr variabel (Tabelle 9). Die Werte reichten von 13,0 (Mischung 12) bis 31,6 (Mischung 6). In der Glycerin-Variante war

kein Ammoniak detektierbar. Die durchschnittlichen Werte für Block 1 (23 ppm NH₃), Block 2 (22 ppm NH₃) und Block 3 (20 ppm NH₃) waren sehr ähnlich.

Tabelle 9: Durchschnittlicher Methan-, Schwefelwasserstoff- und Ammoniakgehalt im gebildeten Biogas.

Variante		CH ₄ -Gehalt (Vol.%)			H ₂ S-Gehalt (ppm)			NH ₃ -Gehalt (ppm)		
		MW	n ¹	STABW	MW	n ¹	STABW	MW	n ¹	STABW
Glycerin		26,4	4	5,12	122	4	57,9	n.d.	---	---
Schweinegülle		48,6	9	8,28	1798	9	406,5	17,0	2	5,66
Zuckerrübensilage		56,8	9	10,78	160	9	131,8	18,5	2	4,95
Maissilage		53,6	9	11,17	151	9	96,4	14,5	2	6,36
CCM		60,0	7	11,58	325	7	207,6	18,0	2	1,41
Sonnenblumensilage		48,3	9	16,93	218	9	204,4	18,0	2	1,41
Kleegrassilage		54,9	9	12,57	402	9	232,3	18,0	2	2,83
Grünroggensilage		56,0	9	11,00	233	9	165,3	14,5	2	4,95
---	M1	49,2	8	21,20	210	8	233,0	20,0	2	1,41
Block 1 (energiebetont)	M2	54,9	8	16,29	109	8	79,8	23,0	2	12,73
	M3	56,2	8	18,24	108	8	134,4	22,0	2	12,73
	M4	52,9	8	17,49	188	8	147,8	21,5	2	4,95
	M5	53,4	8	16,78	266	8	228,2	26,5	2	3,54
Block 2 (eiweißbetont)	M6	54,2	8	16,50	298	7	176,0	31,6	2	13,44
	M7	54,3	7	5,94	232	7	260,9	14,0	2	2,83
	M8	56,7	7	8,24	286	7	250,4	21,0	2	4,24
	M9	58,0	7	7,72	407	7	403,6	21,0	2	5,66
Block 3 (ausgeglichen)	M10	56,4	7	10,30	265	7	248,7	15,5	2	3,54
	M11	57,2	6	12,54	368	6	348,8	31,0	2	11,31
	M12	54,6	6	16,11	338	6	297,3	13,0	3	9,64
	M13	57,8	6	9,93	312	6	284,1	19,0	3	12,29

CH₄ = Methan, H₂S = Schwefelwasserstoff, NH₃ = Ammoniak, n.d. = nicht detektiert

¹Messungen pro Variante im Verlauf des Versuches

4.7 Spezifischer Biogas- und Methanertrag der untersuchten Varianten

Der spezifische Biogas- und Methanertrag der alleinigen Vergärung der Gärrohstoffe (Monofermentation) ist in Tabelle 10 und Abbildung 9 aufgeführt. Abbildung 10 gibt den Verlauf des spezifischen Methanertrags der Gärrohstoffe über die gesamte Gärdauer wieder.

Die Vergärung von Maissilage ergab den höchsten spezifischen Biogasertrag mit 627,3 l_N/kg oTS (Tabelle 10 und Abbildung 9). Ein ähnlich hoher Wert ergab sich mit 615,7 l_N/kg oTS für die CCM-Variante. Die Werte für Maissilage und CCM lagen signifikant über denen der Varianten Zuckerrübensilage, Schweinegülle und Glycerin, unterschieden sich aber nicht signifikant von den anderen Varianten (Grünroggen-, Sonnenblumen- bzw. Kleegrassilage). Der signifikant geringste spezifische Biogasertrag (127,8 l_N/kg oTS) ergab sich für Glycerin. In dieser Variante lag

auch der spezifische Methanertrag (42,4 l_N/kg oTS) signifikant unter allen anderen untersuchten Varianten. Es kann davon ausgegangen werden, dass in der Variante Glycerin der Gärprozess nicht optimal ablief. Die hohen Konzentrationen an flüchtigen Fettsäuren, die in dieser Variante gemessen wurden (siehe Abschnitt 4.3) haben durch eine Absenkung des pH-Wertes die methanbildenden Mikroorganismen gehemmt. Ein ganz anderes Ergebnis wurde in einer früheren Untersuchung erzielt, in der ebenfalls Glycerin allein vergoren wurde (Amon et al., 2004a). Dort wurde mit der Glycerin-Variante ein spezifischer Biogasertrag von 1294,9 l_N/kg oTS erzielt und der spezifische Methanertrag belief sich auf 749,6 l_N/kg oTS. Der Unterschied zu der vorliegenden Untersuchung beruht wahrscheinlich darauf, dass in der früheren Untersuchung das TS-Verhältnis zwischen Glycerin und Inokulum weiter war. In der vorliegenden Untersuchung wurden alle Substrate in einem Verhältnis von 1:3 der TS zum Inokulum in die Fermenter eingewogen und in der früheren Untersuchung in einem Verhältnis von 1:5. Das bedeutet, dass man bei einer Monovergärung von Glycerin ganz besonders auf das Mischverhältnis zwischen Glycerin und Inokulum achten muss.

Die KTBL-Schrift „Gasausbeute in landwirtschaftlichen Biogasanlagen“ (KTBL, 2005) gibt Richtwerte basierend auf Laboruntersuchungen für den spezifischen Biogasertrag ausgewählter Energiepflanzen wieder. Nur für wenige, im vorliegenden Projekt untersuchten Energiepflanzen bzw. Gärsubstrate werden in der KTBL-Schrift Richtwerte angegeben. Die im vorliegenden Projekt ermittelten spezifischen Methanerträge für die Mais- und Sonnenblumensilage liegen aber genau in dem Bereich der KTBL-Richtwerte bzw. der in Tabelle 1 zusammengestellten Literaturangaben. Für Schweinegülle wird in der KTBL-Schrift ein etwas höherer Wert angegeben, für Getreideganzpflanzensilagen ein etwas geringerer. Der spezifische Methanertrag der im vorliegenden Versuch eingesetzten Zuckerrübensilage lag um 28% unter dem von Kaiser et al. (2004) ermittelten Wert.

Im Vergleich der Gärrohstoffe ergab sich der höchste spezifische Methanertrag mit 343,5 l_N/kg oTS für die CCM-Variante. Der zweithöchste Wert ergab sich für die Maissilage. CCM und Maissilage unterschieden sich im spezifischen Methanertrag nicht signifikant voneinander und es ergaben sich auch keine signifikanten Unterschiede zur Grünroggen-, Sonnenblumen- bzw. Kleegrassilage. Der spezifische Methanertrag von Maissilage und CCM war aber signifikant verschieden zu den drei Varianten Zuckerrübensilage, Schweinegülle und Glycerin.

Tabelle 10: Spezifischer Biogas- und Methanertrag der Gärrohstoffe bei alleiniger Vergärung.

Gärrohstoff	Spezifischer Biogasertrag (l _N /kg oTS)			Spezifischer Methanertrag (l _N /kg oTS)		
	MW	n	STABW	MW	n	STABW
Glycerin	127,8 ^d	4	67,97	42,4 ^d	4	20,92
Schweinegülle	361,0 ^c	3	19,82	205,7 ^c	3	10,43
Zuckerrübensilage	460,4 ^{bc}	4	11,22	260,8 ^{bc}	4	5,82
Maissilage	627,3 ^a	3	28,88	338,2 ^a	3	11,15
CCM	615,7 ^a	4	65,18	343,5 ^a	4	29,15
Sonnenblumensilage	572,2 ^{ab}	4	48,51	293,5 ^{ab}	4	29,30
Kleegrassilage	543,8 ^{ab}	3	56,52	290,7 ^{ab}	3	28,72
Grünroggensilage	573,1 ^{ab}	3	18,13	324,5 ^{ab}	3	26,71

MW = Mittelwert, n = Anzahl Beobachtungen (Fermenter pro Variante), STABW = Standardabweichung

^{a,b,c,d}Mittelwerte innerhalb einer Spalte mit unterschiedlichen Hochbuchstaben sind signifikant verschieden voneinander ($P < 0.05$; Scheffé-Prozedur)

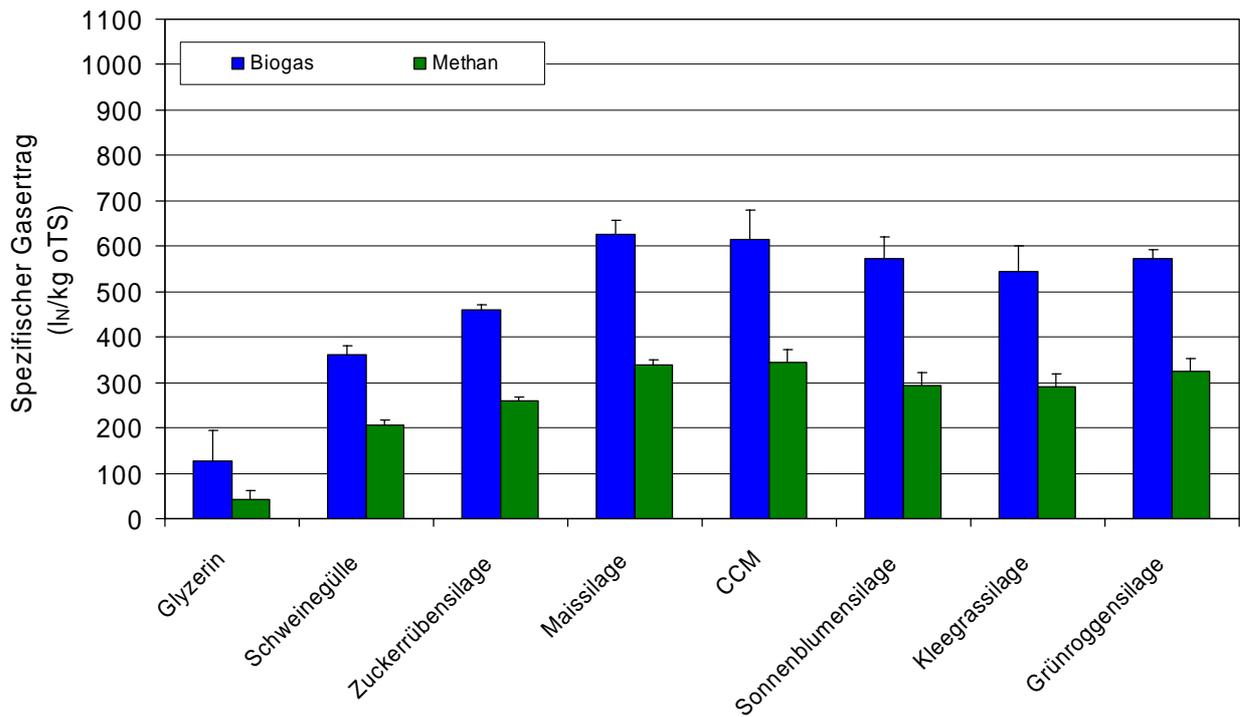


Abbildung 9: Spezifischer Biogas- und Methanertrag der Gärrohstoffe bei alleiniger Vergärung.

Der in Abbildung 10 dargestellte Verlauf des spezifischen Methanertrages zeigt deutlich die gehemmte Methanbildung der Variante Glycerin und das im Vergleich zu den anderen Varianten geringere Methanbildungspotential der Varianten Schweinegülle und Zuckerrübensilage. Nach diesen Ergebnissen scheint eine alleinige Vergärung von Schweinegülle (Monovergärung) nicht sinnvoll. Eine alleinige Vergärung von Glycerin führte in der vorliegenden Untersuchung zu einer Hemmung der Fermentationsvorgänge, ist aber bei einem anderen (weiteren) Mischverhältnis zwischen Glycerin und Inokulum durchaus möglich (Amon et al., 2006a). Darüber hinaus zeigt die Abbildung, dass sich der spezifische Methanertrag für die Variante CCM stufenartig entwickelte. In den ersten fünf Tagen gab es kaum eine Methanfreisetzung, dann ein steiler Anstieg, was sich nach Tag 10 nochmals wiederholte. Der Gärrohstoff CCM hatte den höchsten Stärkegehalt, d.h. viel leichtabbaubare Kohlenhydrate. In den ersten fünf Tagen kam es daher wahrscheinlich durch die hohe Konzentration an flüchtigen Fettsäuren (siehe Abschnitt 4.3) zu einer Hemmung der methanbildenden Mikroorganismen. Die zweite Stufe nach zehn Tagen Gärdauer markiert wahrscheinlich den Zeitpunkt, an dem die schwerer abbaubaren Kohlenhydrate umgesetzt wurden.

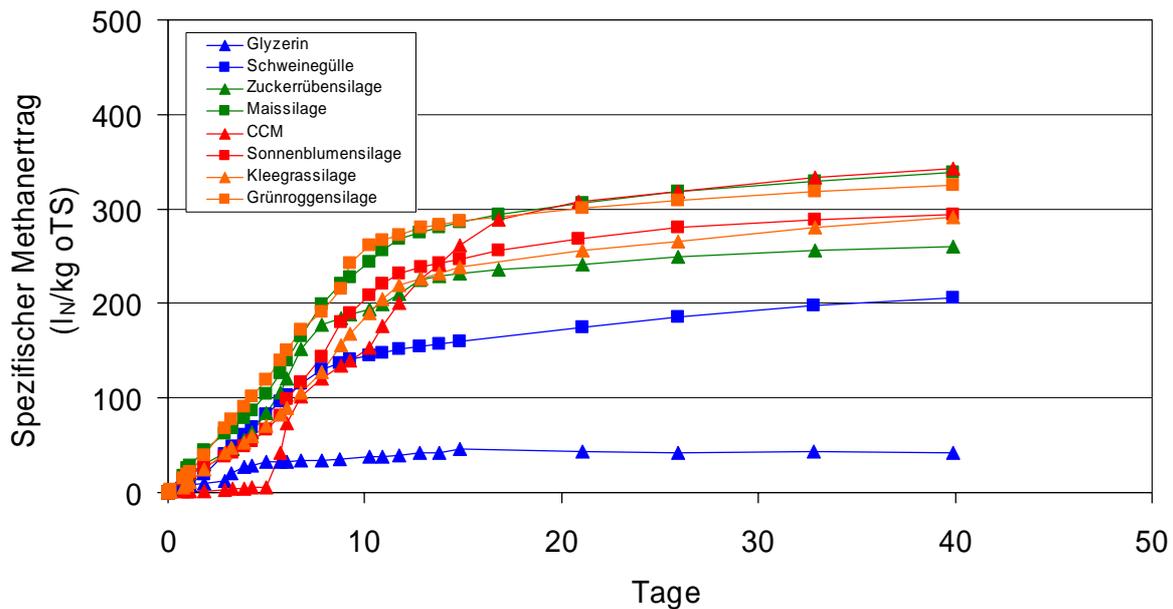


Abbildung 10: Verlauf des spezifischen Methanertrags der Gärrohstoffe bei alleiniger Vergärung.

Der spezifische Biogas- und Methanertrag der Gärrohstoffmischungen und Blöcke ist in Tabelle 11 bzw. Tabelle 12 aufgeführt sowie in Abbildung 11 graphisch dargestellt.

Der signifikant höchste spezifische Biogasertrag ergab sich für die Mischung 1. Aufgrund eines etwas geringeren Methangehaltes im gebildeten Biogas (siehe Abschnitt 4.6) lag der spezifische Methanertrag dieser Mischung aber nur im mittleren Bereich aller Mischungen. Der höchste spezifische Methanertrag ergab sich mit 426,5 l_N/kg oTS für die Mischung 13. Signifikant niedrigere Werte im Vergleich zu Mischung 13 ergaben sich für die Mischungen 4 und 12.

Vergleicht man den mittleren spezifischen Biogas- und Methanertrag der Blöcke (Tabelle 12) zeigte sich, dass die eiweißbetonten Mischungen (Block 2) einen im Vergleich zu den anderen Blöcken signifikant höheren spezifischen Biogasertrag hatten. Auch der mittlere spezifische Methanertrag von Block 2 (378,4 l_N/kg oTS) lag noch signifikant über dem von Block 1.

Darüber hinaus wurde auch untersucht, welche Mischungen innerhalb eines Blockes den besten spezifischen Biogas- bzw. Methanertrag aufwiesen. Die im Block 1 und 2 eingesetzten Mischungen unterschieden sich weder im spezifischen Biogasertrag noch im spezifischen Methanertrag (Abbildung 11). In Block 3 wurde für die Mischung 10 und 13 der signifikant höchste spezifische Biogasertrag ermittelt. Im spezifischen Methanertrag unterschied sich Mischung 13 signifikant von allen anderen Mischungen im Block 3.

Abbildung 12, Abbildung 13 und Abbildung 14 geben aufgeteilt in die drei Blöcke den Verlauf des spezifischen Methanertrags der Gärrohstoffmischungen über die gesamte Gärdauer wieder. Im graphischen Verlauf des spezifischen Methanertrages ist gut zu erkennen, dass einige der Mischungen zu Beginn einen gehemmten Verlauf aufwiesen. Dies war Mischungen 1 (Glycerinzulage und höchstem Schweinegülleanteil), 6 (hoher Schweinegülleanteil) und 12 (höchster Anteil an Sonnenblumensilage). Mischung 12 besaß durch den höchsten Anteil an Sonnenblumensilage auch den höchsten Rohfettgehalt (15,6% in TS). Es ist bekannt, dass sich Fett bzw. Fettsäuren hemmend auf die anaerobe Vergärung und Methanbildung auswirken können (Machmüller et

al., 1998). In einer Untersuchung von Prins et al. (1972) zeigte sich, dass speziell die Linolsäure, d.h. die Fettsäure, die im Sonnenblumenöl hauptsächlich vorkommt, eine direkt hemmende Wirkung auf Methanogene hat.

Tabelle 11: Spezifischer Biogas- und Methanertrag der Mischungen.

Block	Mischung	Spezifischer Biogasertrag (l _N /kg oTS)			Spezifischer Methanertrag (l _N /kg oTS)		
		MW	n	STABW	MW	n	STABW
---	M1	958,0 ^a	4	93,44	382,5 ^{ab}	4	30,70
Block 1 (energiebetont)	M2	710,6 ^b	4	73,28	366,5 ^{ab}	4	18,81
	M3	646,9 ^b	4	35,87	348,9 ^{ab}	4	7,61
	M4	633,8 ^b	4	29,13	302,0 ^b	4	17,57
	M5	639,2 ^b	4	104,90	346,5 ^{ab}	4	62,20
Block 2 (eiweißbetont)	M6	764,3 ^b	4	27,74	370,5 ^{ab}	4	11,57
	M7	720,4 ^b	4	19,11	362,5 ^{ab}	4	8,37
	M8	738,9 ^b	4	38,18	394,5 ^a	4	26,37
	M9	718,9 ^b	4	27,76	386,3 ^{ab}	4	27,70
Block 3 (ausgeglichen)	M10	685,4 ^b	4	31,08	369,3 ^{ab}	4	18,92
	M11	666,3 ^b	4	34,09	378,2 ^{ab}	4	14,62
	M12	617,4 ^b	4	10,13	303,1 ^b	4	5,43
	M13	718,9 ^b	4	32,53	426,5 ^a	4	15,00

MW = Mittelwert, n = Anzahl Beobachtungen (Fermenter pro Variante), STABW = Standardabweichung

^{a,b}Mittelwerte innerhalb einer Spalte mit unterschiedlichen Hochbuchstaben sind signifikant verschieden voneinander ($P < 0.05$; Scheffé-Prozedur)

Tabelle 12: Spezifischer Biogas- und Methanertrag der Blöcke.

Block	Spezifischer Biogasertrag (l _N /kg oTS)			Spezifischer Methanertrag (l _N /kg oTS)		
	MW	n	STABW	MW	n	STABW
Block 1 (energiebetont)	657,6 ^b	16	68,7	341,0 ^b	16	39,0
Block 2 (eiweißbetont)	735,6 ^a	16	32,1	378,4 ^a	16	22,4
Block 3 (ausgeglichen)	672,0 ^b	16	45,8	369,3 ^{ab}	16	47,2

MW = Mittelwert, n = Anzahl Beobachtungen (Fermenter pro Block), STABW = Standardabweichung

^{a,b}Mittelwerte innerhalb einer Spalte mit unterschiedlichen Hochbuchstaben sind signifikant verschieden voneinander ($P < 0.05$; Scheffé-Prozedur)

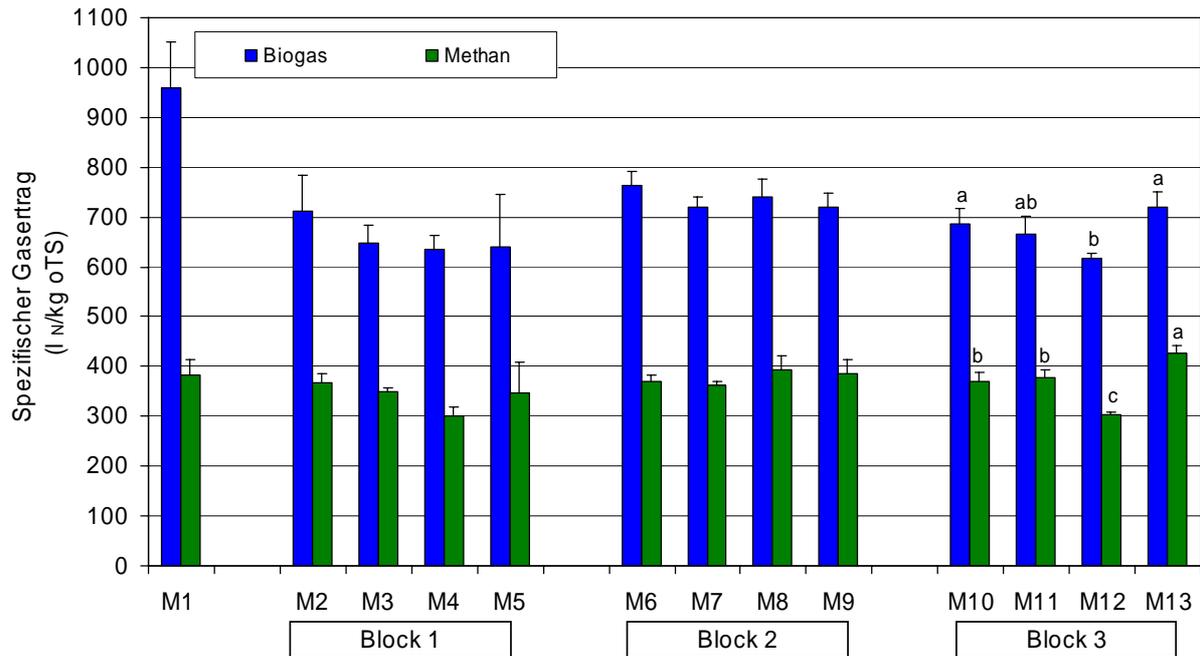


Abbildung 11: Spezifischer Biogas- und Methanertrag der Mischungen am Ende der Fermentationsperiode. Mittelwerte innerhalb eines Blockes mit unterschiedlichen Hochbuchstaben sind signifikant verschieden voneinander ($P > 0.05$, Scheffé-Prozedur).

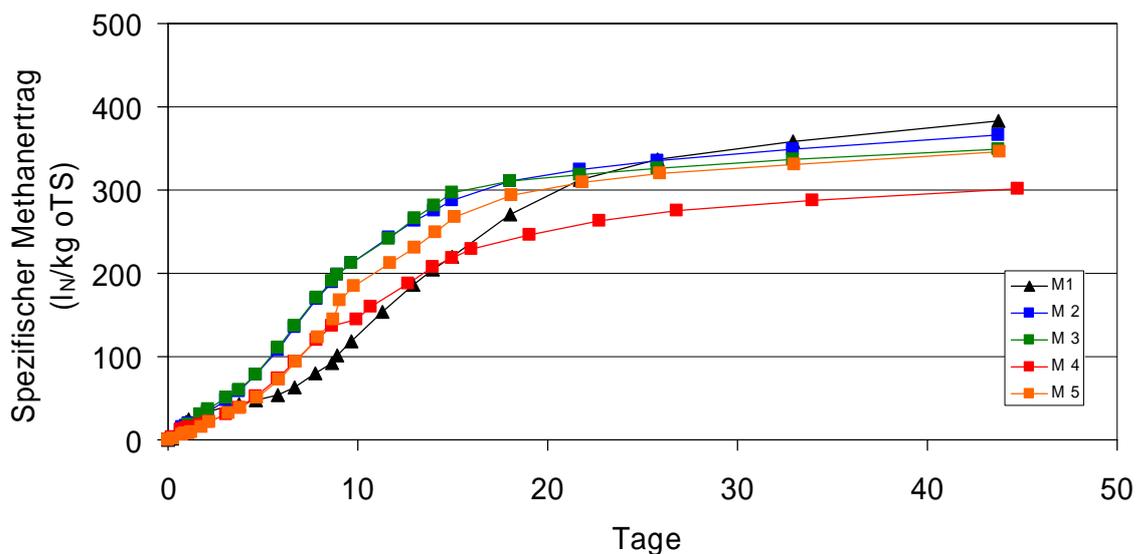


Abbildung 12: Verlauf des spezifischen Methanertrags der Mischungen 1 bis 5 (M1 bis M5).

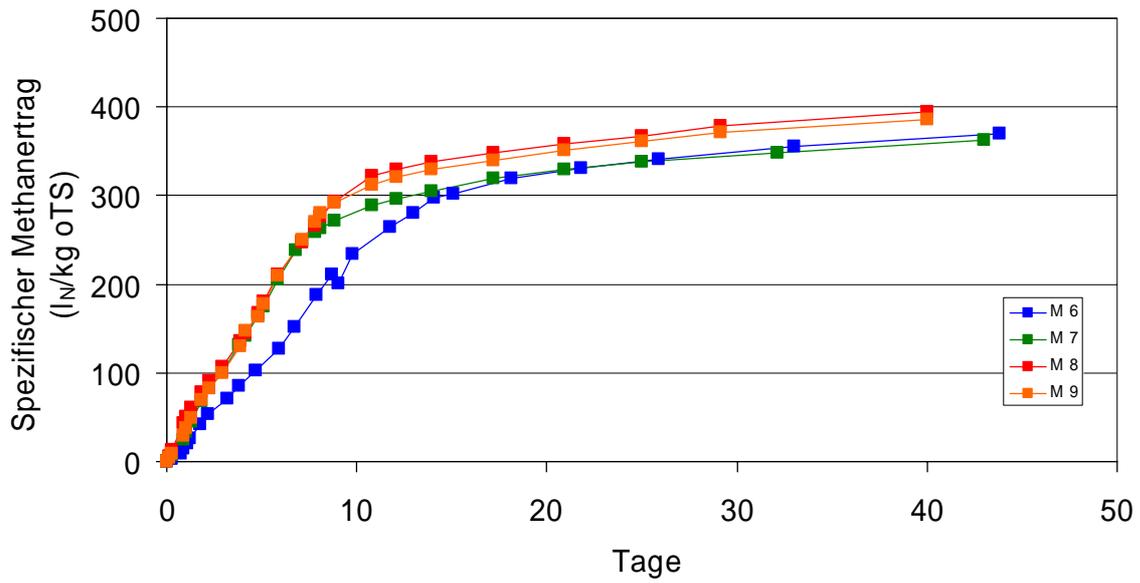


Abbildung 13: Verlauf des spezifischen Methanertrags der Mischungen 6 bis 9 (M6 bis M9).

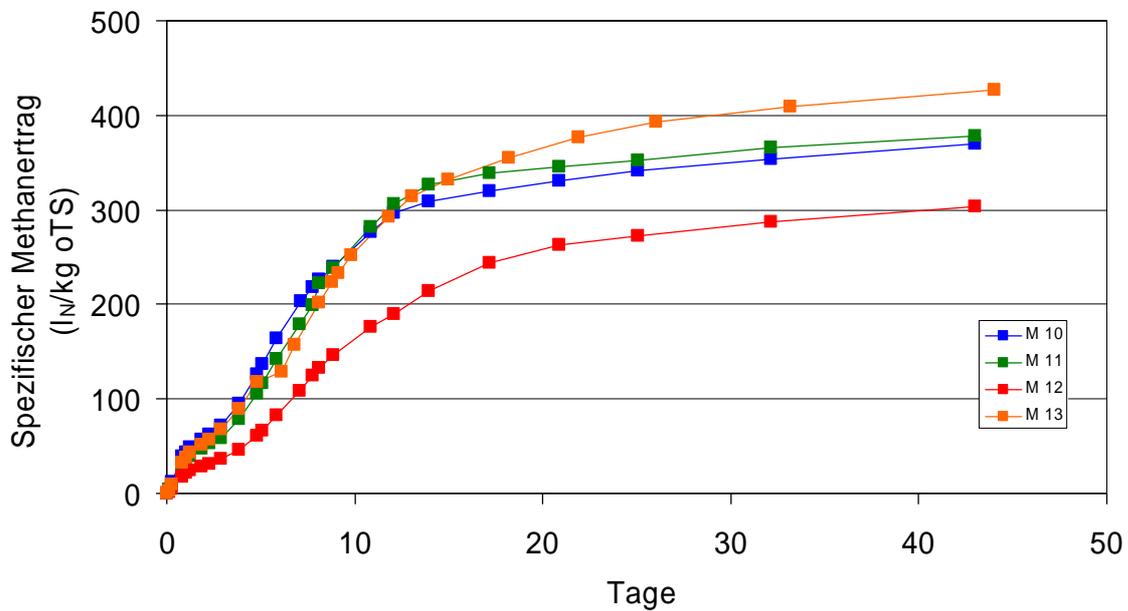


Abbildung 14: Verlauf des spezifischen Methanertrags der Mischungen 10 bis 13 (M10 bis M13).

4.8 Energetischer Wirkungsgrad der Methanbildung

Für alle Gärrohstoffe und Gärrohstoffmischungen wurde der energetische Wirkungsgrad der Methanbildung berechnet. Tabelle 13 gibt die Ergebnisse für die Gärrohstoffe wieder. Der signifikant geringste energetische Wirkungsgrad ergab sich für die Glycerin-Variante. Dieser energetische Wirkungsgrad ist nicht realistisch, da es in der vorliegenden Untersuchung zu einer Hemmung gekommen ist und Ergebnisse früherer Untersuchungen (Amon et al., 2004a) einen sehr hohen energetischen Wirkungsgrad erwarten lassen würden. Auch die Schweinegülle hatte mit 33% einen im Vergleich zu allen anderen Gärrohstoffen signifikant geringeren energetischen Wirkungsgrad. Der höchste energetische Wirkungsgrad mit knapp 71% ergab sich für die Variante CCM. Ebenfalls noch einen hohen energetischen Wirkungsgrad lieferte die Mais- und Grünroggensilage mit knapp 65%. Diese Varianten unterschieden sich nicht signifikant von der CCM-Variante.

In Tabelle 14 sind die energetischen Wirkungsgrade für die Mischungen wiedergegeben. Der höchste energetische Wirkungsgrad ergab sich mit 80% für die Mischung 13. Dies war signifikant höher im Vergleich zu den Mischungen 4, 5 und 12.

Wurden nur die Mittelwerte der Mischungen innerhalb der Blöcke miteinander verglichen ergab sich für Block 1 keine signifikanten Unterschiede zwischen den Mischungen. Innerhalb von Block 2 unterschied sich Mischung 8 signifikant von Mischung 7 und innerhalb von Block 3 unterschied sich Mischung 13 signifikant von allen anderen Mischungen und Mischung 12 hatte den signifikant niedrigsten energetischen Wirkungsgrad.

Die mittleren energetischen Wirkungsgrade der Blöcke unterschieden sich nicht signifikant von einander (Tabelle 15). Der durchschnittliche energetische Wirkungsgrad aller Mischungen lag bei knapp 67% und damit um 35% über dem Durchschnittswert für die in Monofermentation vergärten Gärrohstoffe.

Tabelle 13: Energetischer Wirkungsgrad der Gärrohstoffe bei alleiniger Vergärung.

Gärrohstoff	Energetischer Wirkungsgrad (%)		
	MW	n	STABW
Glycerin	6,5 ^c	4	3,20
Schweinegülle	32,5 ^d	3	1,65
Zuckerrübensilage	56,3 ^{bc}	4	1,26
Maissilage	65,8 ^{ab}	3	2,17
CCM	70,6 ^a	4	5,99
Sonnenblumensilage	47,6 ^c	4	4,75
Kleegrassilage	53,9 ^{bc}	3	5,32
Grünroggensilage	63,8 ^{ab}	3	5,25

MW = Mittelwert, n = Anzahl Beobachtungen (Fermenter pro Variante), STABW = Standardabweichung
^{a,b,c,d,e}Mittelwerte innerhalb einer Spalte mit unterschiedlichen Hochbuchstaben sind signifikant verschieden voneinander ($P < 0.05$; Scheffé-Prozedur)

Tabelle 14: Energetischer Wirkungsgrad der Mischungen.

Block	Mischung	Energetischer Wirkungsgrad (%)		
		MW	n	STABW
---	M1	68,1 ^{abc}	4	5,56
Block 1 (energiebetont)	M2	68,3 ^{abc}	4	3,51
	M3	67,7 ^{abc}	4	1,48
	M4	55,4 ^c	4	3,22
	M5	62,5 ^{bc}	4	11,21
Block 2 (eiweißbetont)	M6	65,9 ^{abc}	4	2,06
	M7	64,6 ^{abc}	4	1,49
	M8	73,6 ^{ab}	4	4,92
	M9	70,5 ^{abc}	4	5,05
Block 3 (ausgeglichen)	M10	68,1 ^{abc}	4	3,49
	M11	68,9 ^{abc}	4	2,66
	M12	55,9 ^c	4	1,00
	M13	80,2 ^a	4	2,82

MW = Mittelwert, n = Anzahl Beobachtungen (Fermenter pro Variante), STABW = Standardabweichung
^{a,b,c}Mittelwerte innerhalb einer Spalte mit unterschiedlichen Hochbuchstaben sind signifikant verschieden voneinander ($P < 0.05$; Scheffé-Prozedur)

Tabelle 15: Energetischer Wirkungsgrad der Blöcke.

Block	Energetischer Wirkungsgrad (%)		
	MW ¹	n	STABW
Block 1 (energiebetont)	63,5	16	7,67
Block 2 (eiweißbetont)	68,6	16	5,02
Block 3 (ausgeglichen)	68,3	16	9,18

MW = Mittelwert, n = Anzahl Beobachtungen (Fermenter pro Block), STABW = Standardabweichung
¹Mittelwerte waren nicht signifikant verschieden voneinander ($P < 0.05$; Scheffé-Prozedur)

4.9 Kofermentationseffekte der untersuchten Mischungen

Zusätzlich zu dem im Versuch gemessenen spezifischen Methanertrag wurde für die Mischungen ein zu erwartender Methanertrag durch anteilmäßige Addition der spezifischen Methanerträge der einzelnen Gärrohstoffkomponenten berechnet. Aus dem Vergleich zwischen gemessenem und erwartetem spezifischen Methanertrag wurde der zusätzliche Methanertrag bzw. Kofermentationseffekt der Mischungen bestimmt (Tabelle 16). Mit Ausnahme von Mischung 12 ergab sich für alle anderen Mischungen ein positiver Kofermentationseffekt, d.h. durch die Kofermentation der verschiedenen Gärrohstoffe in Mischungen wurde mehr Methan produziert als durch Monofermentation der gleichen Gärrohstoffe. Der höchste Kofermentationseffekt ergab sich für die Mischung 13. Mit Mischung 13 wurden 129 l_N CH₄/kg oTS mehr produziert, d.h. es ergab sich ein um 43% höherer spezifischer Methanertrag als erwartet. Auch für die Mischungen 1, 6, 9 und 8 lag der gemessene spezifische Methanertrag noch mehr als 100 l_N/kg oTS über dem erwarteten Wert.

Tabelle 16: Vergleich zwischen gemessenem und erwartetem spezifischen Methanertrag der Gärrohstoffmischungen (Berechnung des Kofermentationseffektes).

Gärrohstoffmischung	Spezifischer Methanertrag		Zusätzlicher Methanertrag	
	Gemessen (l _N /kg oTS)	Erwartet (l _N /kg oTS)	Absolut (l _N /kg oTS)	Relativ (% von Erwartetem)
Mischung 1	382,5	257,6	124,9 ^a	48,5 ^a
Mischung 2	366,5	287,1	79,4 ^{ab}	27,7 ^{abc}
Mischung 3	348,9	295,0	53,8 ^{abc}	18,2 ^{abc}
Mischung 4	302,0	274,1	27,9 ^{bc}	10,2 ^{bc}
Mischung 5	346,5	281,0	65,5 ^{abc}	23,3 ^{abc}
Mischung 6	370,5	266,6	103,9 ^{ab}	39,0 ^{ab}
Mischung 7	362,5	266,9	95,6 ^{ab}	35,8 ^{ab}
Mischung 8	394,5	283,2	111,3 ^{ab}	39,3 ^{ab}
Mischung 9	386,3	271,2	115,1 ^a	42,4 ^a
Mischung 10	369,3	280,6	88,8 ^{ab}	31,6 ^{ab}
Mischung 11	378,2	279,2	99,1 ^{ab}	35,5 ^{ab}
Mischung 12	303,1	310,5	-7,3 ^c	-2,4 ^c
Mischung 13	426,5	298,0	128,5 ^a	43,1 ^a

^{a,b,c}Mittelwerte innerhalb einer Spalte mit unterschiedlichen Hochbuchstaben sind signifikant verschieden voneinander ($P < 0.05$; Scheffé-Prozedur)

Für Block 1 ließ sich ein durchschnittlicher Kofermentationseffekt von 57 l_N CH₄/kg oTS bzw. 20% errechnen, für Block 3 ein durchschnittlicher Kofermentationseffekt von 77 l_N CH₄/kg oTS bzw. 27% (Tabelle 17). In Block 2 lag der Kofermentationseffekt bei durchschnittlich 107 l_N CH₄/kg oTS bzw. 39% und damit im Vergleich der Blöcke am höchsten. Der mittlere zusätzliche Methanertrag (absolut und relativ) von Block 2 unterschied sich signifikant von Block 1.

Tabelle 17: Vergleich zwischen gemessenem und erwartetem spezifischen Methanertrag der Blöcke (Berechnung des Kofermentationseffektes).

Block	Spezifischer Methanertrag		Zusätzlicher Methanertrag	
	Gemessen (l _N /kg oTS)	Erwartet (l _N /kg oTS)	Absolut (l _N /kg oTS)	Relativ (% von Erwartetem)
Block 1 (energiebetont)	341,0	284,3	56,7 ^b	19,8 ^b
Block 2 (eiweißbetont)	378,4	272,0	106,5 ^a	39,1 ^a
Block 3 (ausgeglichen)	369,3	292,1	77,2 ^{ab}	27,0 ^{ab}

^{a,b,c}Mittelwerte innerhalb einer Spalte mit unterschiedlichen Hochbuchstaben sind signifikant verschieden voneinander ($P < 0.05$; Scheffé-Prozedur)

4.10 Methanenergiewertmodell für die untersuchten Mischungen

Für die untersuchten Energiepflanzenmischungen (n = 48; ohne M1 da in M1 mit Glycerin ein nichtlandwirtschaftliches Produkt eingesetzt wurde) wurden Regressionsgleichungen zur Schät-

zung des spezifischen Methanertrages berechnet (Tabelle 18). Die Regressionsgleichungen beruhen auf den Weender-Rohnährstoffgehalten: Trockensubstanz, organische Trockensubstanz, Rohprotein, Rohfett, Rohfaser und N-freie Extraktstoffe (Methanenergiewertmodell; Amon et al., 2004b) bzw. Hemizellulose, Zellulose, Lignin, Stärke, Zucker, Bruttoenergie, Kohlenstoff und Kohlenstoff:Stickstoff-Verhältnis.

Tabelle 18: Regressionsgleichungen zur Schätzung des spezifischen Methanertrags der Mischungen (n = 48)

Modell	Regressionsgleichung	korr. R ²	R ²	Signifikanz
1	CH ₄ = -1410,48 oTS*** - 1876,97 XL*** - 451,46 XF*** + 937,16 C*** + 8309,46 BE*** + 139,38 CN*** - 59293***	0,5418	0,6003	***
2	CH ₄ = 7399,91 XP*** + 2405,65 ADL*** - 193,76 Zell*** + 1721,50 BE*** - 442,94 Zuc*** + 3076,48 CN*** - 197204***	0,5416	0,6001	***
3	CH ₄ = 2811,98 TS*** + 4400,48 XA*** - 3872,16 XP*** + 3532,00 XF*** + 1983,89 H-Zell*** + 1476,69 Zuc*** - 192070***	0,5412	0,5998	***
4	CH ₄ = 2811,98 TS*** - 4400,48 oTS*** - 3872,16 XP*** + 3532,00 XF*** + 1983,89 H-Zell*** + 1476,69 Zuc*** + 247978***	0,5412	0,5998	***
5	CH ₄ = 2671,87 TS*** - 5785,54 oTS*** - 6880,89 ADL*** + 3888,33 Zel*** + 962,75 Zuc*** + 2082,47 CN*** + 340401***	0,5408	0,5994	***
6	CH ₄ = 3911,18 XP* + 4515,25 XL* + 4864,12 ADL* + 1665,29 Zel* + 3840,62 H-Zell* + 936,88 Stä* + 1955,44 Zuc* - 213356	0,5307	0,6006	***
7	CH ₄ = -7,19 XP - 23,22 XL** + 1,96 XF + 527,80***	0,2385	0,2871	**
8	CH ₄ = -13,32 XP - 26,85 XL** + 1,19 XF - 1,71 XX + 715,92*	0,2263	0,2922	**
9	CH ₄ = 13,15 H-Zell*** + 172,82***	0,2498	0,2658	***
10	CH ₄ = -15,16 XL*** + 440,64***	0,2354	0,2517	***
11	CH ₄ = -2,01 oTS + 533,12***	0,0230	0,0438	n.s.
12	CH ₄ = -1,86 TS + 403,57***	0,0206	0,0415	n.s.
13	CH ₄ = 1,92 XF + 327,07***	0,0044	0,0256	n.s.

ADL = Lignin (% TS); BE = Bruttoenergie (MJ/kg TS); C = Kohlenstoff (% TS); CH₄ = spezifischer Methanertrag (l_N/kg oTS); CN = C/N-Verhältnis; H-Zell = Hemizellulose (% TS); oTS = organische Trockensubstanz (% TS); Stä = Stärke (% TS); TS = Trockensubstanz (% FM); XF = Rohfaser (% TS); XL = Rohfett (% TS); XP = Rohprotein (% TS); XX = N-freie Extraktstoffe (% TS); Zell = Zellulose (% TS); Zuc = Zucker (% TS); korr. R² = korrigiertes Bestimmtheitsmaß; R² = Bestimmtheitsmaß

Signifikanzniveau der Modelle und der Regressionskoeffizienten: * < 0,05; ** < 0,01; *** < 0,001; n.s. = nicht signifikant

Zur Feststellung der besten Regressionsmodelle wurde die „korrigierte R²-Auswahlmethode“ gewählt. Die ersten fünf Regressionsmodelle in Tabelle 18 sind die nach dieser Methode gefundenen besten fünf Modelle. Modell 1 basiert auf den Faktoren organische Trockensubstanz, Rohfett, Rohfaser, Kohlenstoff, Bruttoenergie und dem Kohlenstoff:Stickstoff-Verhältnis. Rohprote-

in, Lignin, Zellulose, Bruttoenergie, Zucker und das Kohlenstoff:Stickstoff-Verhältnis sind die Faktoren, auf denen Modell 2 basiert. Modell 3 und 4 unterscheiden sich nur darin, dass das Modell 3 Rohasche als Faktor enthält und Modell 4 anstelle dessen die organische Trockensubstanz. Modell 5 basiert auf den sechs Faktoren Trockensubstanz, organische Trockensubstanz, Lignin, Zellulose, Zucker und dem Kohlenstoff:Stickstoff-Verhältnis.

Das Regressionsmodell 6 beruht auf den sieben Nährstoffkomponenten, Rohprotein, Rohfett, Lignin, Zellulose, Hemizellulose, Stärke und Zucker, mit der die organische Trockenmasse vollständig charakterisiert werden kann. Dieses Modell unterscheidet sich kaum (vergleiche Bestimmtheitsmaß und Signifikanzniveau) von den ersten fünf Modellen. Dies zeigt sich auch, wenn dem geschätzten spezifischen Methanertrag der gemessene gegenübergestellt wird (Abbildungen 15 und 16).

Regressionsmodelle, die auf den Weender-Rohnährstoffgehalten beruhen (Modelle 7 und 8) weisen ein geringeres Signifikanzniveau für das Modell und auch für die einzelnen Regressionskoeffizienten auf (Tabelle 18). Die Beziehung zwischen geschätztem und gemessenem spezifischen Methanertrag wird schlechter (Abbildung 17). Modell 9 und 10, die jeweils nur auf einem Faktor beruhen (Hemizellulose bzw. Rohfett), sind genauso gut wie Modell 7 und 8 und daher empfehlenswerter, da weniger Nährstoffanalysen durchgeführt werden müssen. Regressionsmodelle, die sich auf die organische Trockenmasse, die Trockenmasse oder den Rohfasergehalt beziehen (Modelle 11 bis 13), sind nicht signifikant und weisen nur sehr geringe, unter 0,05 liegende, Bestimmtheitsmaße auf.

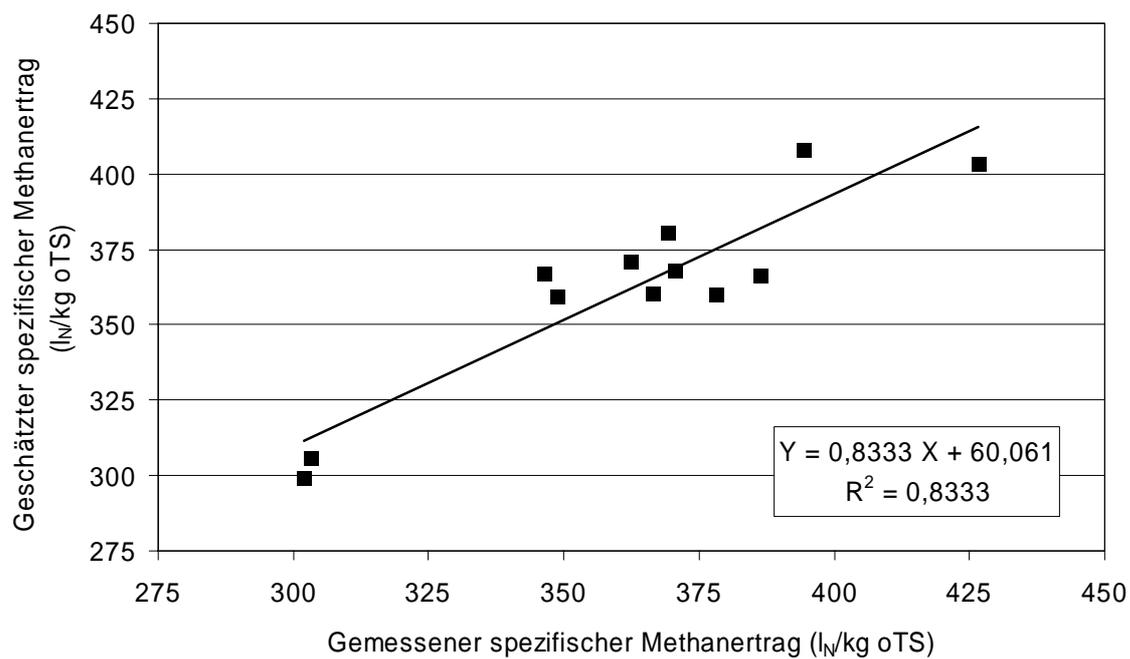


Abbildung 15: Zusammenhang zwischen gemessenem und geschätztem spezifischen Methanertrag der Mischungen (Regressionsmodell 1).

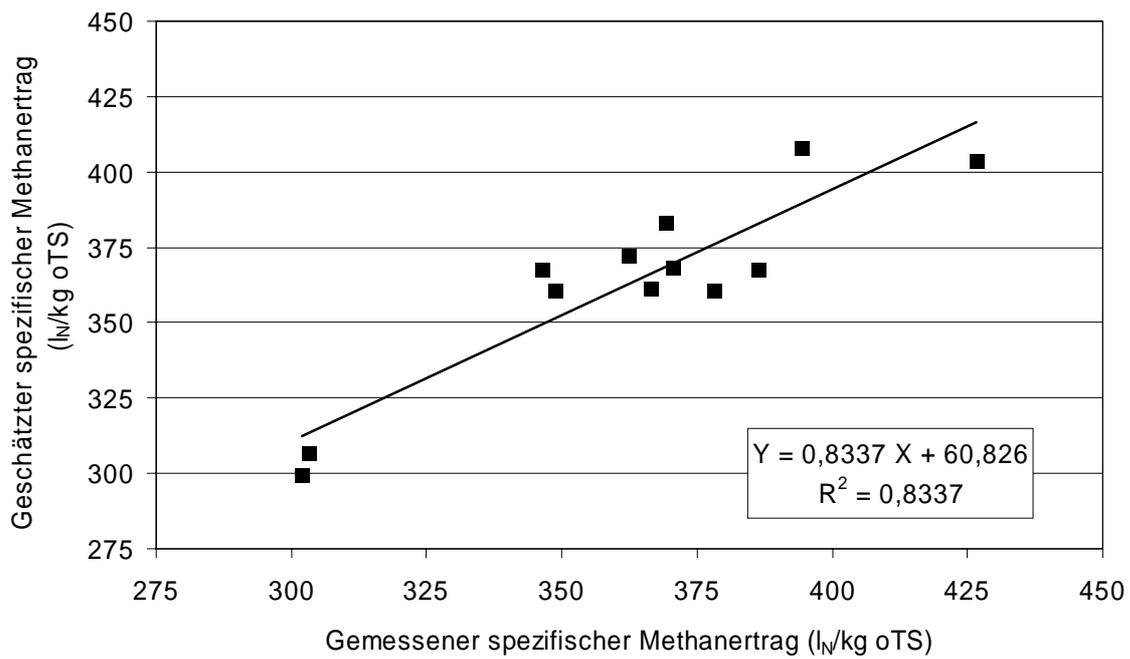


Abbildung 16: Zusammenhang zwischen gemessenem und geschätztem spezifischen Methanertrag der Mischungen (Regressionsmodell 6).

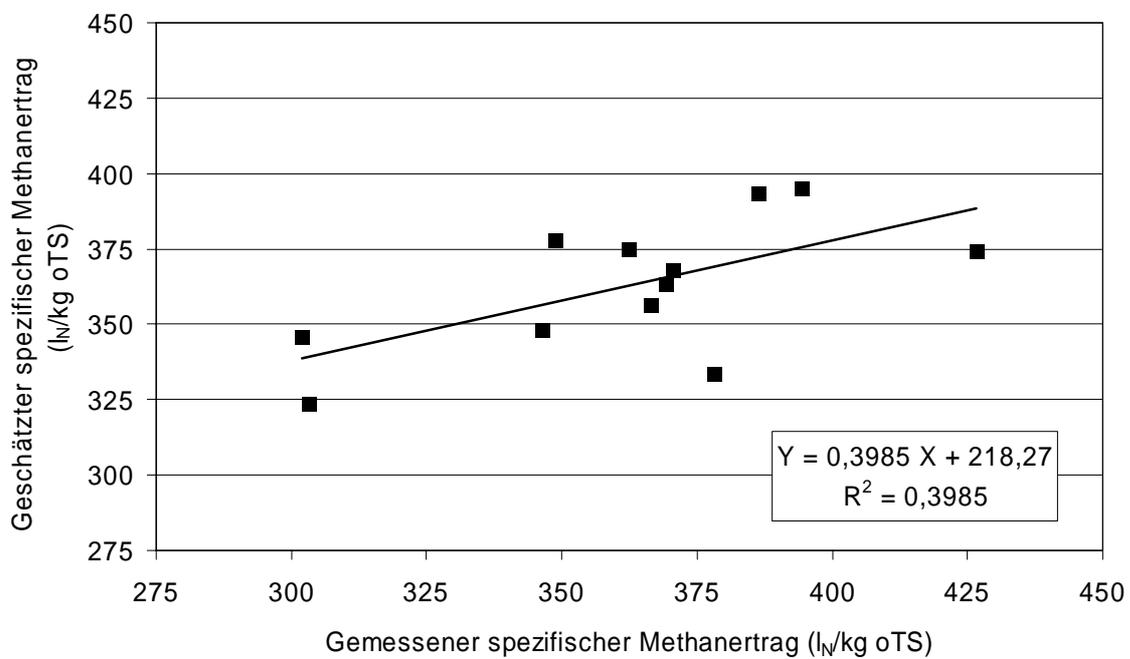


Abbildung 17: Zusammenhang zwischen gemessenem und geschätztem spezifischen Methanertrag der Mischungen (Regressionsmodell 7).

4.11 Methanhektarertrag der Energiepflanzen und Mischungen

Aus dem spezifischen Methanertrag und dem Biomasseertrag wurde der Methanhektarertrag der eingesetzten Energiepflanzen ermittelt (Tabelle 19 und Abbildung 18). Der signifikant höchste Methanhektarertrag ergab sich mit über 9500 m³_N/ha für den Silomais. Knapp 5200 m³_N CH₄/ha ergaben sich für CCM. Alle anderen Energiepflanzen lagen um mehr als die Hälfte unter dem Methanhektarertrag vom Silomais. Um die 4000 m³_N CH₄/ha ergaben sich für den Grünroggen und die Zuckerrüben und um die 3000 m³_N CH₄/ha für die Sonnenblumen und das Klee gras.

Tabelle 19: Methanhektarertrag der Energiepflanzen bei alleiniger Vergärung.

Gärrohstoff	Methanhektarertrag (m ³ _N /ha)		
	MW	n	STABW
Zuckerrüben (nur Rüben)	3770 ^{cd}	4	84,2
Silomais (Ganzpflanze)	9583 ^a	3	315,8
Körnermais (CCM)	5203 ^b	4	441,5
Sonnenblumen (Ganzpflanze)	3234 ^{de}	4	322,9
Klee gras (4 Schnitte)	2675 ^e	3	264,2
Grünroggensilage (Ganzpflanze)	4257 ^c	3	350,3

MW = Mittelwert, n = Anzahl Beobachtungen (Fermenter pro Variante), STABW = Standardabweichung
^{a,b,c,d,e}Mittelwerte innerhalb einer Spalte mit unterschiedlichen Hochbuchstaben sind signifikant verschieden voneinander ($P < 0.05$; Scheffé-Prozedur)

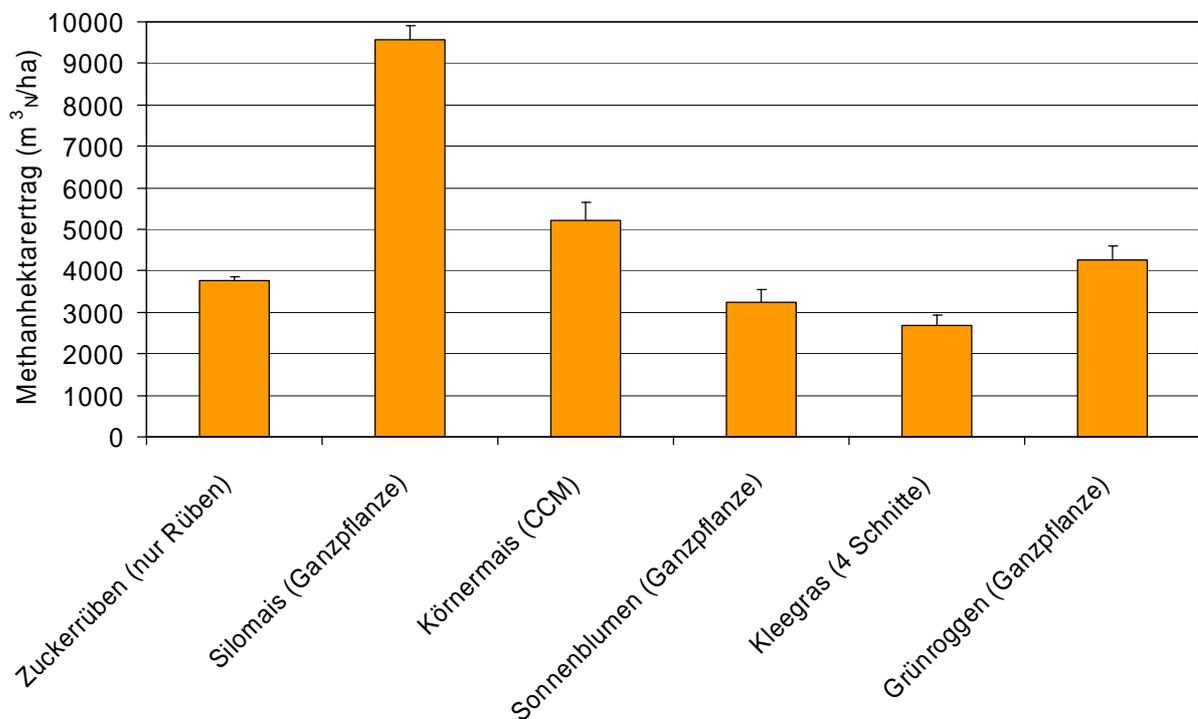


Abbildung 18: Methanhektarertrag der eingesetzten Energiepflanzen.

Um die besten Fruchtfolgesysteme identifizieren zu können, wurden die Methanhektarerträge der Energiepflanzenmischungen aus deren Energiepflanzenanteilen berechnet (Tabelle 20). Die Methanhektarerträge der Energiepflanzenmischungen lagen zwischen 3823 und 9192 m³_N/ha. Der höchste und zu allen anderen Mischungen außer Mischung 13 signifikant verschiedene Methanhektarertrag ergab sich für Mischung 1. Mischung 1 war eine Mischung aus den Energiepflanzen Silo- und Körnermais, sowie Schweinegülle und Glycerin. Auch der Methanhektarertrag der Mischung 13 lag mit 8957 m³_N/ha noch nah bei dem Wert für Silomais bei alleiniger Vergärung.

Tabelle 20: Methanhektarertrag der Energiepflanzenmischungen.

Block	Mischung	Methanhektarertrag (m ³ _N /ha)		
		MW	n	STABW
---	M1	9192 ^a	4	737,7
Block 1 (energiebetont)	M2	6920 ^{cd}	4	355,2
	M3	6234 ^{cde}	4	136,0
	M4	5022 ^{ef}	4	292,2
	M5	7405 ^{bc}	4	1329,2
Block 2 (eiweißbetont)	M6	5071 ^{ef}	4	158,4
	M7	3823 ^f	4	88,3
	M8	5006 ^{ef}	4	334,7
	M9	4663 ^{ef}	4	334,3
Block 3 (ausgeglichen)	M10	5992 ^{cde}	4	306,9
	M11	5503 ^{def}	4	212,7
	M12	5348 ^{def}	4	95,8
	M13	8957 ^{ab}	4	315,1

MW = Mittelwert, n = Anzahl Beobachtungen (Fermenter pro Variante), STABW = Standardabweichung
^{a,b,c,d,e,f}Mittelwerte innerhalb einer Spalte mit unterschiedlichen Hochbuchstaben sind signifikant verschieden voneinander ($P < 0.05$; Scheffé-Prozedur)

Tabelle 21 gibt die mittleren Methanhektarerträge für die drei Blöcke wieder. Es ergab sich kein signifikanter Unterschied zwischen dem mittleren Methanhektarertrag von Block 1 und 3. Der mittlere Methanhektarertrag für die eiweißbetonten Mischungen (Block 2) lag aber mit 4641 m³_N/ha signifikant unter denen der anderen beiden Blöcke (Ø 6423 m³_N/ha).

Tabelle 21: Methanhektarertrag der Blöcke.

Block	Methanhektarertrag (m ³ _N /ha)		
	MW	n	STABW
Block 1 (energiebetont)	6395 ^a	16	1120,0
Block 2 (eiweißbetont)	4641 ^b	16	561,1
Block 3 (ausgeglichen)	6450 ^a	16	1531,2

MW = Mittelwert, n = Anzahl Beobachtungen (Fermenter pro Block), STABW = Standardabweichung
^{a,b}Mittelwerte innerhalb einer Spalte mit unterschiedlichen Hochbuchstaben sind signifikant verschieden voneinander ($P < 0.05$; Scheffé-Prozedur)

In Abbildung 17 sind die Methanhektarerträge aller Mischungen nochmals graphisch dargestellt. Die Hochbuchstaben geben an, welche Mischungen sich innerhalb eines Blockes signifikant voneinander unterscheiden. Innerhalb der energiebetonten Mischungen (Block 1) ergaben sich im Vergleich zu Mischung 4 für Mischung 2 und 5 signifikant höhere Methanhektarerträge. Mischung 2 und 5 hatten einen höheren Silomaisanteil als Mischung 4. Innerhalb des einweißbetonten Blockes (Block 2) ergab sich für Mischung 7 ein zu den anderen drei Mischungen signifikant geringerer Methanhektarertrag. Im Vergleich zu den anderen Mischungen war in Mischungen 7 kein Mais (Silo- oder Körnermais) enthalten. In Block 3 (ausgeglichene Mischungen) war der berechnete Methanhektarertrag von Mischung 13 im Vergleich zu allen anderen Mischungen in diesem Block am signifikant höchsten. Von den vier Mischungen in diesem Block hatte Mischung 13 den höchsten Silomaisanteil.

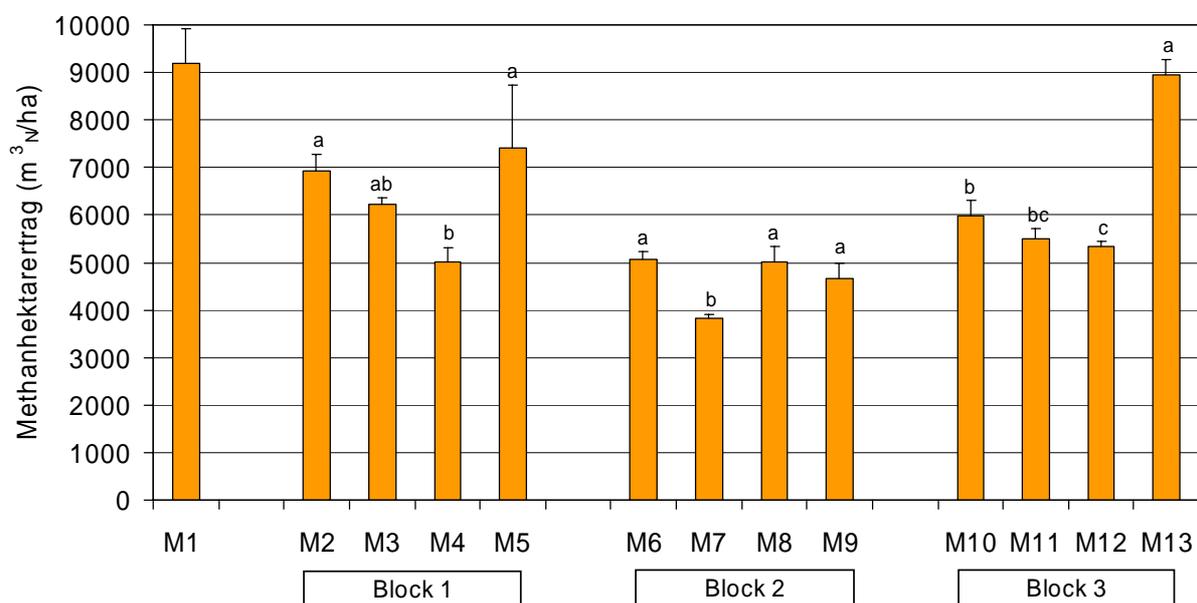


Abbildung 19: Berechneter Methanhektarertrag der Mischungen. Mittelwerte innerhalb eines Blockes mit unterschiedlichen Hochbuchstaben sind signifikant verschieden voneinander ($P > 0.05$, Scheffé-Prozedur).

4.12 Hydraulische Verweilzeit

Die hydraulische Verweilzeit ist ein wichtiger Kennwert, um Praxisbiogasfermenter korrekt dimensionieren zu können. Nach DIN 38414/Teil 8 definiert sie sich als die durchschnittliche Aufenthaltszeit des Substrats im Fermenter. Die Messzeiträume in den Batch-Fermentern lagen zwischen 40 bis 45 Tagen (Abschnitt 4.4). Die notwendige hydraulische Verweilzeit der im vorliegenden Projekt eingesetzten Energiepflanzen und Energiepflanzenmischungen wurden aus der zeitlichen Entwicklung des gebildeten Biogases abgeleitet. Nach VDI (2006) gilt der biologische Abbau als weitgehend abgeschlossen, wenn die tägliche Biogasrate nur noch 1% des bis zu diesem Zeitpunkt angefallenen Biogasgesamtvolumens beträgt. Tabelle 22 gibt die hydraulische Verweilzeit der im vorliegenden Projekt untersuchten Energiepflanzen wieder. Die signifikant geringste hydraulische Verweilzeit mit nur knapp 15 Tagen ergab sich für die Zuckerrübensilage. Für die Gärrohstoffe Grünroggensilage, Maissilage, CCM und Kleegrassilage wurden hydraulische

sche Verweilzeiten zwischen 17 und 22 Tagen ermittelt, dies war nicht signifikant verschieden zur Zuckerrübensilage. Die hydraulische Verweilzeit der Gärrohstoffe Sonnenblumensilage und Glycerin lagen bei 24 und 28 Tagen und unterschieden sich signifikant von der Zuckerrübensilage. Für die Schweinegülle wurde sogar eine hydraulische Verweilzeit von 32 Tagen ermittelt, d.h. mehr als die doppelte Zeit wie für die Zuckerrübensilage.

Tabelle 22: Hydraulische Verweilzeit der Gärrohstoffe bei alleiniger Vergärung.

Gärrohstoff	Hydraulische Verweilzeit (d)		
	MW	n	STABW
Glycerin	28,0 ^{ab}	4	4,71
Schweinegülle	31,5 ^a	3	1,73
Zuckerrübensilage	14,9 ^d	4	0,25
Maissilage	19,8 ^{cd}	3	3,51
CCM	22,1 ^{bcd}	4	1,80
Sonnenblumensilage	23,8 ^{abc}	4	2,10
Kleegrassilage	22,2 ^{bcd}	3	1,26
Grünroggensilage	17,2 ^{cd}	3	1,53

MW = Mittelwert, n = Anzahl Beobachtungen (Fermenter pro Variante), STABW = Standardabweichung
^{a,b,c,d}Mittelwerte innerhalb einer Spalte mit unterschiedlichen Hochbuchstaben sind signifikant verschieden voneinander ($P < 0.05$; Scheffé-Prozedur)

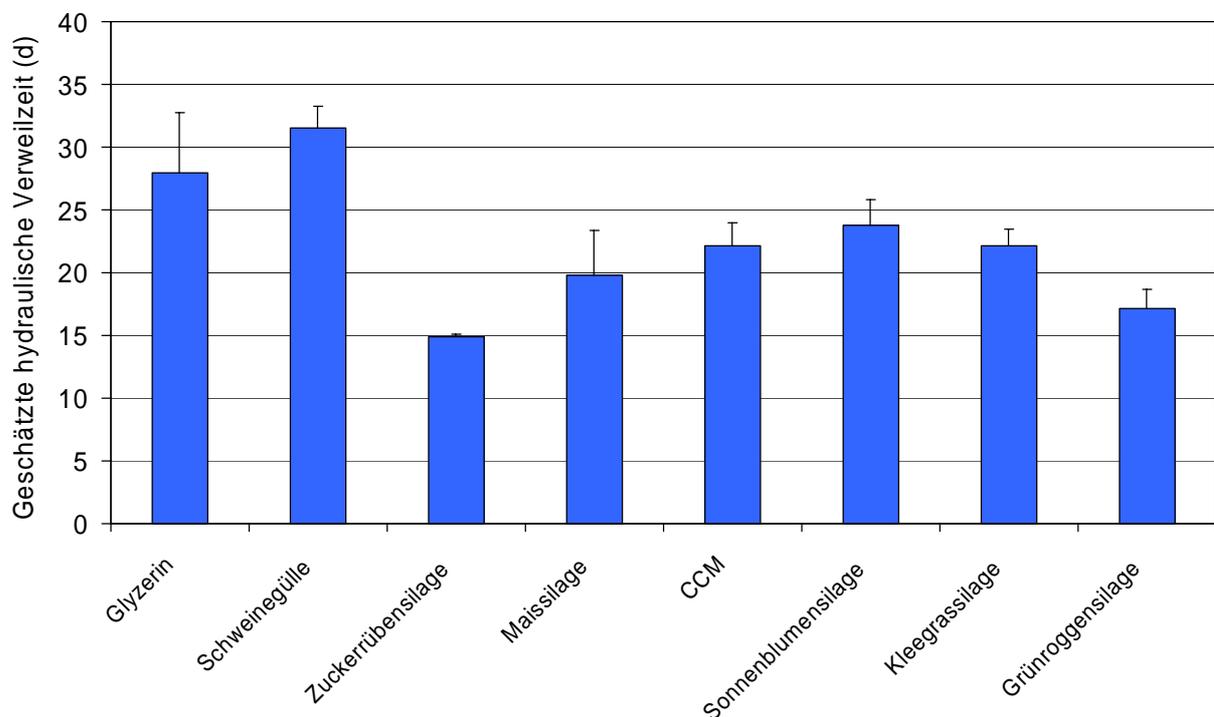


Abbildung 20: Hydraulische Verweilzeit der Gärrohstoffe bei alleiniger Vergärung.

Die hydraulische Verweilzeit der Mischungen ist in Tabelle 23 wiedergegeben. Obwohl sich Werte ergaben, die zwischen 16 und 25 Tagen lagen, gab es keine signifikanten Unterschiede zwischen den Mischungen. Die niedrigste hydraulische Verweilzeit ergab sich für Mischung 8,

die höchste für Mischung 1 und 13. Mischung 8 besaß den höchsten Grünroggenanteil, Zuckerrübensilage aber wenig Schweinegülle. Mischung 1 hatte den höchsten Anteil an Schweinegülle. Der Grund, warum für Mischung 13 eine so hohe hydraulische Verweilzeit ermittelt wurde, konnte nicht über die Mischungszusammensetzung erklärt werden.

Tabelle 23: Hydraulische Verweilzeit der Mischungen.

Block	Mischung	Hydraulische Verweilzeit (d)		
		MW ¹	n	STABW
---	M1	25,3	4	7,60
Block 1 (energiebetont)	M2	20,6	4	3,57
	M3	18,9	4	1,70
	M4	22,9	4	4,27
	M5	23,3	4	4,59
Block 2 (eiweißbetont)	M6	19,3	4	1,19
	M7	18,3	4	0,50
	M8	16,0	4	0,58
	M9	16,8	4	0,50
Block 3 (ausgeglichen)	M10	17,1	4	0,48
	M11	17,1	4	0,63
	M12	22,5	4	3,58
	M13	25,4	4	2,78

MW = Mittelwert, n = Anzahl Beobachtungen (Fermenter pro Variante), STABW = Standardabweichung

¹Mittelwerte waren nicht signifikant verschieden voneinander ($P < 0.05$; Scheffé-Prozedur)

In Tabelle 24 sind die hydraulischen Verweilzeiten für die Blöcke wiedergegeben. Die im Durchschnitt kürzeste hydraulische Verweilzeit (18 Tage) ergab sich für die eiweißbetonten Mischungen (Block 2). Dies war signifikant verschieden zu den Mischungen in Block 1 und 3, deren hydraulische Verweilzeit über 20 Tagen lag.

Tabelle 24: Hydraulische Verweilzeit der Blöcke.

Block	Hydraulische Verweilzeit (d)		
	MW ¹	n	STABW
Block 1 (energiebetont)	21,4 ^a	16	3,79
Block 2 (eiweißbetont)	17,6 ^b	16	1,47
Block 3 (ausgeglichen)	20,5 ^{ab}	16	4,21

MW = Mittelwert, n = Anzahl Beobachtungen (Fermenter pro Block), STABW = Standardabweichung

^{a,b}Mittelwerte innerhalb einer Spalte mit unterschiedlichen Hochbuchstaben sind signifikant verschieden voneinander ($P < 0.05$; Scheffé-Prozedur)

Innerhalb der Blöcke unterschied sich die hydraulische Verweilzeit der Mischungen in Block 2 und 3 (Abbildung 21). In Block 2 ergab sich ein signifikanter Unterschied zwischen den Mischung 8 zu Mischung 6. Mischungen 7 und 9 hatten mittlere Werte. In Block 3 gab es zwei

Gruppen, Mischung 10 und 11 mit einer mittleren hydraulischen Verweilzeit von 17 Tagen und Mischung 12 und 13 mit einer mittleren Verweilzeit von 24 Tagen.

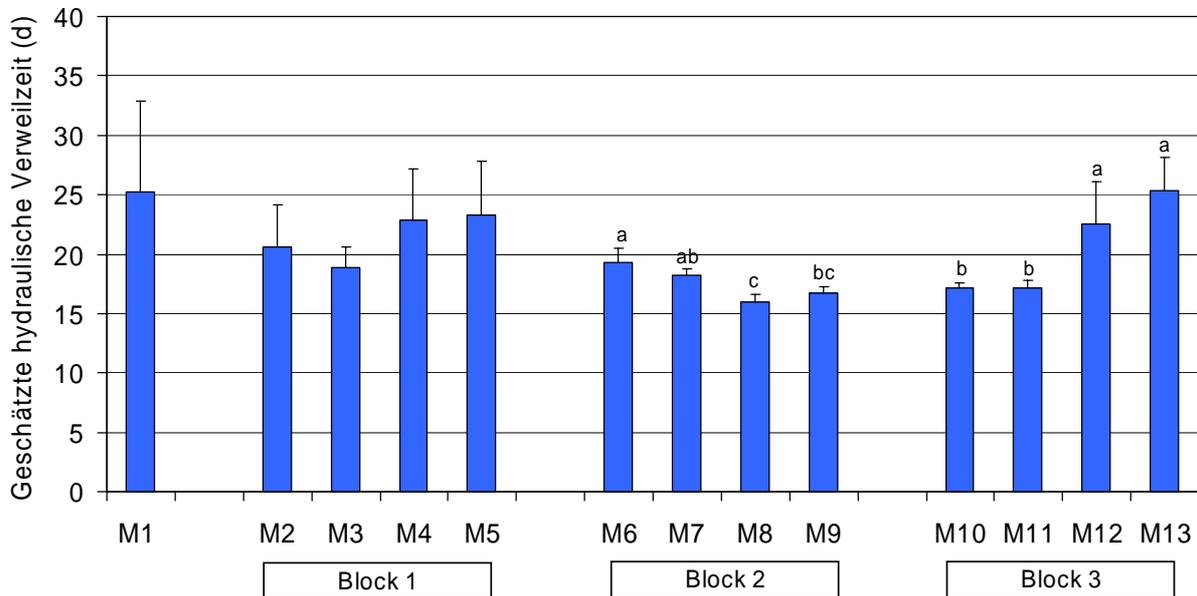


Abbildung 21: Hydraulische Verweilzeit der Mischungen. Mittelwerte innerhalb eines Blockes mit unterschiedlichen Hochbuchstaben sind signifikant verschieden voneinander ($P > 0.05$, Scheffé-Prozedur).

Die hier ermittelten hydraulischen Verweilzeiten können nur als Schätzungen der wirklichen hydraulischen Verweilzeiten gelten, da sie aus Daten von Batch-Fermenteruntersuchungen abgeleitet wurden. Um für die Praxis Empfehlungen für die optimale hydraulische Verweilzeit ableiten zu können, müssten noch genauere Untersuchungen mit einem Durchfluß-Fermentersystem durchgeführt werden.

5 Schlussfolgerungen

5.1 Empfehlungen und Leitfaden zu optimalen Gärrohstoffmischungen

In der vorliegenden Untersuchung wurden Energiepflanzen aus der Steiermark allein und in Mischungen in Batch-Fermentersystemen vergärt und der spezifische Methanertrag bestimmt. Es wurden fünf verschiedene Energiepflanzen eingesetzt: (1) Zuckerrüben, (2) Mais (Silo- und Körnermais), (3) Sonnenblumen, (4) Ackerfutter (Klee gras) und (5) Getreide (Grünroggen). Aus diesen Energiepflanzen wurden 13 verschiedene Mischungen, in drei Blöcken: (1) energiebetont, (2) eiweißbetont und (3) ausgeglichen, zusammengestellt. 12 Mischungen enthielten zusätzlich auch Schweinegülle und eine Mischung eine Zulage von Glycerin.

Bei der alleinigen Vergärung der Energiepflanzen ergab sich der höchste spezifische Methanertrag mit 343,5 l_N/kg oTS für den Körnermais (CCM). Mit Ausnahme einer Variante (Mischung ohne Schweinegülle und mit hohem Anteil an Sonnenblumensilage) ergab sich durch die Vergärung von zwei bis sechs Energiepflanzen in Mischungen immer eine Erhöhung des spezifischen Methanertrags im Vergleich zum erwarteten Methanertrag (Kofermentationseffekt). Bei 11 der 13 untersuchten Mischungen wurde sogar ein spezifischer Methanertrag gemessen, der über dem des CCM lag. Der höchste spezifische Methanertrag ergab sich mit 426,5 l_N/kg oTS für Mischung 13, eine Mischung aus Block 3 (ausgeglichene Mischungen). Mischung 13 enthielt Mais- (45% FM), Sonnenblumen- (15% FM), Zuckerrüben- (15% FM) und Grünroggensilage (10% FM) sowie Schweinegülle (15% FM). Noch mit drei weiteren Mischungen wurde ein spezifischer Methanertrag, der über 380 l_N/kg oTS lag, erzielt. Zwei dieser drei Mischungen (Mischung 8 und 9) stammten aus dem Block 2 (eiweißbetonte Mischungen), die dritte Mischung (Mischung 1) war die Mischung mit Glycerin-Zulage. Die vier Mischungen mit den höchsten spezifischen Methanerträgen wiesen auch die höchsten Gehalte an Hemicellulose auf. In allen anderen analysierten Nährstoffgehalten gab es zum Teil große Unterschiede zwischen den vier Mischungen.

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen deutlich auf, dass eine Vergärung von Energiepflanzen in Mischungen fast immer einen Vorteil gegenüber einer alleinigen Fermentation von Energiepflanzen aufweist. Aus den vorliegenden Untersuchungsergebnissen lassen sich folgenden Empfehlungen zu optimalen Gärrohstoffmischungen aus Zuckerrübensilage, Maissilage, CCM, Sonnenblumensilage, Klee grassilage, Grünroggensilage und Schweinegülle für die Biogaserzeugung bei typischen Erzeugungs- und Standortbedingungen der Steiermark ableiten:

1. Zur Biogaserzeugung sollten immer Energiepflanzenmischungen eingesetzt werden.
2. Mais muss nicht die Hauptkomponente der Energiepflanzenmischung sein.
3. Die Energiepflanzenmischungen sollten immer auch Schweinegülle enthalten.
4. Die Energiepflanzenmischungen sollten einen hohen Gehalt an Hemicellulosen aufweisen.
5. Empfohlene Energiepflanzenmischungen (in % der Frischmasse):
 - a. 45% Maissilage, 15% Sonnenblumensilage, 15% Zuckerrübensilage, 10% Grünroggensilage und 15% Schweinegülle (Mischung 13)
 - b. 30% Klee grassilage, 30% Grünroggensilage, 10% Zuckerrübensilage, 5% Maissilage, 5% Sonnenblumensilage und 20% Schweinegülle (Mischung 8)
 - c. 40% Klee grassilage, 20% Grünroggensilage, 5% Maissilage, 5% Zuckerrübensilage und 30% Schweinegülle (Mischung 9)

- d. 30% Maissilage, 14% CCM, 52% Schweinegülle und 4% Rohglyzerin (Mischung 1)

5.2 Verwendung von Zuckerrübanganzpflanzensilagen als Gärsubstrat in der Biogasproduktion

Kalkulationen zur Verwendung von Zuckerrübanganzpflanzensilagen

Im Durchschnitt der Jahre 2000 bis 2005 lagen die Erträge in der Steiermark für Zuckerrüben bei 80 t FM/ha und für Zuckerrübenblatt bei 20 t FM/ha. Das würde in etwa einen Ertrag von durchschnittlich 16,9 t oTS/ha für Zuckerrüben und 2,6 t oTS/ha für Zuckerrübenblatt ergeben. In Tabelle 25 ist der spezifische Methanertrag von Zuckerrüben- und Zuckerrübenblattsilage angegeben, womit sich ein Methanhektarertrag für Zuckerrübanganzpflanzensilage von 5025 m³_N/ha berechnen lässt, was um 33% über dem Wert für reine Zuckerrübensilage liegt (3770 m³_N/ha, vorliegendes Projekt).

Tabelle 25: Spezifischer Biogas- und Methanertrag von Zuckerrüben und Zuckerrübenblatt

	Verwendungsart	Spezifischer Biogasertrag (l _N /kg oTS)	Spezifischer Methanertrag (l _N /kg oTS)	Quelle der Daten
Zuckerrüben	frisch	700	357	KTBL, 2005
	Silage	460	261	vorliegendes Projekt
Zuckerrübenblatt	frisch	704	344	KTBL, 2005
	Silage	503	236	KTBL, 2005

Die Daten in Tabelle 25 zeigen auch auf, dass der spezifische Biogas- bzw. Methanertrag von frischem Material über dem von siliertem Material liegt. Ein Teil der Bruttoenergie im Pflanzenmaterial wird während des Siliervorganges von den Mikroorganismen für die Bildung der konservierenden Gärsäuren verbraucht, d.h. bei einer Silierung ist immer mit unvermeidbaren Verlusten in Höhe von mindestens 5% der Bruttoenergie des Ausgangsmaterials zu rechnen (JBS, 2004). Wenn Zuckerrübanganzpflanzen in frischem Zustand eingesetzt werden würden, würde sich daher sogar ein Methanhektarertrag von 6928 m³_N/ha und damit ein Ertrag, der noch über dem von Körnermais liegt (5203 m³_N/ha, vorliegendes Projekt), ergeben. Frische Zuckerrübanganzpflanzen können in der Biogaserzeugung aber leider nicht verwendet werden, da das ganze Jahr über für die Biogasanlage Gärsubstrat benötigt wird. Eine Mietenlagerung ist in diesem Zusammenhang nur begrenzt möglich und bei längerer Lagerung mit deutlichen Trockenmasseverlusten verbunden. Daher ist eine Konservierung (Silierung) der Zuckerrüben unbedingt notwendig.

Für die Ernte von Zuckerrübanganzpflanzen sollten neue, einfache Erntemaschinen entwickelt werden, die den kompletten Rübenkörper mit Blatt ernten, wobei darauf zu achten ist, dass so wenig Erde wie möglich an den Rübenkörpern anhaften bleibt. Rübenkörper und Rübenblatt können aber auch mit gängigen Erntemaschinen separat geerntet werden. Vor dem Siliervorgang müssen die Rübenkörper und die Rübenblätter dann noch zerkleinert werden. Eine Silierung ist im Flach- und Hochsilo möglich. Die flüssige Einsilierung in Hochsilos hat die wesentlichen Vorteile eines minimalen Energieverlustes und einer guten Automatisierungsmöglichkeit der Substratbeschickung zur Biogasanlage (KTBL, 2006). Ein weiterer Vorteil der Flüssigsilierung ist auch, dass dieses Substrat für die Mikroorganismen in der Biogasanlage hochverdaulich ist,

da der Primäraufschluss zu Milchsäure und anderen kurzkettigen, organischen Fettsäuren bereits während der Silierung erfolgt ist. Dadurch ist die Verweildauer von Silagen aus Hochsilos im Biogasfermenter kürzer als bei anderen Substraten. Nichtsdestotrotz hat die Verwendung von Hochsilos den großen Nachteil der relativ hohen Investitionskosten. Im Flachsilo kann die Silierung von Rüben auch als Mischsilage im Verhältnis 1:2 mit Silomais erfolgen (KTBL, 2006). Für solch ein Verfahren müssen die Rüben aber vor dem Mais geerntet und am Silierort zwischengelagert werden.

Futterrüben als Alternative zu Zuckerrüben

Ziel der Produktion von Rüben zur Biogasgewinnung ist ein möglichst hoher Trockenmasseertrag bzw. Methanertrag pro Hektar mit möglichst geringem Erdanhang, guter mechanischer Verarbeitbarkeit und hoher Lagerfähigkeit. In diesem Zusammenhang haben bei bestimmten Verfahren Futterrüben gegenüber Zuckerrüben Vorzüge (z.B. geringerer Schmutzanteil, bessere Verarbeitbarkeit und höherer Erträge) aufzuweisen (KTBL, 2006).

In der Untersuchung von Hassan (2003) wurde die Biogasproduktion von Ganzpflanzen-Futter- und Zuckerrübensilage in Monovergärung miteinander verglichen. Es zeigte sich, dass unter mesophilen Temperaturverhältnissen (37°C), untersucht mit Batch-Fermentern, der spezifische Methanertrag der Futterrübensilage bei 468 l/kg oTS lag, der von Zuckerrüben aber um knapp 15% niedriger, d.h. bei 400 l/kg oTS (zu beachten: die produzierte Methanmenge wurde von Hassan (2003) nicht auf Normbedingungen umgerechnet). Mit einem semi-kontinuierlichen Durchfluss-Fermentersystem wurde die maximale Raumbelastung für Zuckerrüben- und Futterrübensilage ermittelt. Sie lag sowohl für die Zuckerrüben- als auch für die Futterrübensilage bei 4 kg oTS pro m³ Fermentervolumen und Tag. Mit dieser Raumbelastung ergab sich die maximale Methanproduktivität von 1,72 m³ Methan pro m³ Fermentervolumen und Tag für Zuckerrüben- und 1,92 für Futterrübensilage.

Hassan (2003) ermittelte auch die Energiebilanz, d.h. Output-Summe erneuerbarer Energie (Biogasproduktion) in Relation zu Input-Summe fossiler Energie. Es wurde der Verbrauch an fossiler Energie bei Anbau, Ernte und Silierung der Energiepflanzen berücksichtigt, sowie der Verbrauch bei der Biogasproduktion selbst. In der Energiebilanz unterschieden sich Futter- und Zuckerrüben aber nicht. Hassan (2003) betrachtete auch den ökologischen Kreislauf der Biogasproduktion aus Rüben. Die Rübe (Futter- oder Zuckerrübe) ist als Energiepflanze für die Produktion von Biogas gut geeignet, da man mit ihr einen geschlossenen Produktionskreislauf fahren kann. Die komplette Pflanze kann zur Biogasproduktion verwendet werden und die Reststoffe der Biogasproduktion (Biogasgülle) gelangen als Dünger wieder zurück auf die Zuckerrübenanbauflächen.

Biorefinery-Konzept/Kaskadennutzung

Marktf Früchte wie Zuckerrüben werden bislang noch wenig in Biogasanlagen vergärt (Eder et al., 2004). Doch die aktuelle, österreichische Versorgungsbilanz für Zucker liegt bei 135% (AMA, 2006a). Die Überschussproduktion sowie Reststoffe aus der Zuckerherstellung und das Rübenblatt könnten in die Biogasproduktion gehen. Das derzeitige Potential Österreichs in diesem Bereich liegt bei ca. 184 Mio. m³ Methan bzw. 0,16 Mio. t ROE pro Jahr (berechnet auf Grundlage der Daten im Grünen Bericht 2005, <http://www.gruener-bericht.at>). Der Bruttoinlandverbrauch Österreichs für Methangas (Naturgas) liegt derzeit bei ca. 7,62 Mio t ROE pro Jahr (<http://epp.eurostat.ec.europa.eu>), d.h. allein durch die Nutzung der Überschussproduktion und der Reststoffe aus der Zuckerrübenproduktion könnten ca. 2% des österreichischen Bruttoinlandverbrauchs für Methangas abgedeckt werden.

Aus Zuckerrüben lässt sich auch Bioethanol herstellen. Grundsätzlich eignen sich zur Erzeugung von Bioethanol eine Reihe von Feldfrüchten, es zeigte sich aber, dass durch die hohe Flächen-

produktivität der Zuckerrübe, von 1 ha Zuckerrüben (= 65 t FM) ca. 7500 Liter Bioethanol erzeugt werden können, d.h. mehr als doppelt so viel wie von 1 ha Getreide (KWS, 2006). Für die Bioethanolproduktion wird der in den Zuckerrübenfabriken gewonnene Rohsaft bzw. Dicksaft vergoren. Die Reststoffe (Pressschnitzel und/oder Vinasse) könnten dann anschließend in Biogasanlagen energetisch weiter verwertet werden.

Für das Biorefinery-Konzept „Bioethanol und Biogas aus Zuckerrüben“ wurde der Energieertrag für das Land Steiermark abgeschätzt (Tabelle 26). Durch die Mehrfachnutzung (Kaskadennutzung) der Zuckerrübe konnte ein Gesamtenergieertrag von 74144 kWh/ha berechnet werden. Dieser Wert liegt um 7,5% bzw. 48,1% über dem Ertrag, den man erzielen kann, wenn man Zuckerrübanganzpflanzen frisch oder als Silage in Biogasanlagen verwertet.

Tabelle 26: Berechnungen zum Energieertrag aus Zuckerrüben für das Land Steiermark

Erzeugung	Substratart	Substrat (t FM/ha)	Bioethanol (l/ha)	Energie ² (kWh/ha)
Bioethanol	Zuckerrüben	80	9231	54185
Biogas	Reststoffe Bioethanolproduktion	17,8 ¹		11518
	Zuckerrübenblätter	20		8441
Energieertrag Biorefinery-Konzept (Bioethanol und Biogas aus Zuckerrüben), Summe				74144
Vergleichswerte				
Energieertrag Biogas aus Zuckerrübanganzpflanzen, frisch (6928 m ³ _N CH ₄ /ha)				69003
Energieertrag Biogas aus Zuckerrübanganzpflanzen, Silage (5025 m ³ _N CH ₄ /ha)				50049

¹Reststoffe aus der Bioethanolproduktion ca. 22,29%

²Umrechnungsfaktoren: 1 l Ethanol = 5,87 kWh, 1 m³_N CH₄ = 9,96 kWh

Fazit

1. Monovergärung von Zuckerrübanganzpflanzensilagen in Biogasanlagen ist möglich
2. Mit Futterrübanganzpflanzensilagen erzielt man einen höheren Methanertrag als mit Zuckerrübanganzpflanzensilagen
3. Biorefinery-Konzept/Kaskadennutzung mit Zuckerherstellung und Bioethanolerzeugung möglich
4. Höchste Energieerträge pro Hektar können erreicht werden, wenn Biogas und Bioethanol aus den Zuckerrüben erzeugt werden (Biorefinery-Konzept/Kaskadennutzung)

5.3 Leitfaden zu ökologisch ausgewogenen und nachhaltigen Fruchtfolgen

Damit der Energiepflanzenbau seine Potentiale ausschöpfen kann, müssen für unterschiedliche Klimaregionen und Standorte angepasste und nachhaltige Konzepte entwickelt werden. Eine standortangepasste Fruchtfolge ist Voraussetzung für eine hohe Produktivität bei gleichzeitig hoher Ertragsstabilität (Karpenstein-Machan, 2005). Um dauerhaft Erfolg zu bringen, muss der Energiepflanzenanbau nach den Grundsätzen einer nachhaltigen Fruchtfolge gestaltet sein. Nur in standortangepassten und ausgewogenen Fruchtfolgesystemen ist die Erzeugung von Energiepflanzen sinnvoll. Die Nachhaltigkeit der Biogaserzeugung ist unter folgenden Gesichtspunkten zu betrachten:

- der Menge an Methan, die aus einem Hektar Energiepflanzenanbau gebildet werden kann,
- der Menge an Methan, die über die gesamte Fruchtfolge pro Hektar erzeugt werden kann,
- der Wirtschaftlichkeit der Nutzung und
- der ökologischen Verträglichkeit im System Boden-Pflanze.

Vor allem in intensiven Maisanbaugebieten wie der Steiermark muss die Entwicklung von nachhaltigen Fruchtfolgen intensiviert werden, um Fruchtfolgeschädlinge wie z. B. den Maiswurzelbohrer zu vermeiden.

Ein ausreichend hoher Humusanteil in den Böden ist der wesentliche Faktor, um die Bodenfunktionen zu gewährleisten und insbesondere eine hohe Bodenfruchtbarkeit von landwirtschaftlichen Nutzflächen aufrechtzuerhalten. Die Bedeutung des Humus liegt in der komplexen Verbesserung nahezu aller Bodeneigenschaften. Mit dem Schutz der Böden vor Humusverlust geht ein Erhalt der Bodenfruchtbarkeit und eine Minimierung der CO₂-Emissionen aus Böden einher. Daher sind ausgewogene Fruchtfolgen, die Humusverlust vorbeugen, ein wichtiger Beitrag zur Reduzierung von Emissionen und der langfristigen Sicherung der Bodenfruchtbarkeit.

Auf der Basis der vorliegenden Untersuchungsergebnisse (spezifischen Methanbildungsvermögen der Gärrohstoffe und ihren Mischungen) und steirischen Ertragsdaten war das Ziel, die Methanhektarerträge von Fruchtfolgen oststeirischer Marktfruchtbetriebe (regionstypische Ausgangsfruchtfolgen = Ist-Zustand) zu errechnen und anschließend Energiefruchtfolgen zu gestalten, die die Kulturen der besten Mischungen beinhalteten. Für alle Fruchtfolgen wurde eine Humusbilanzierung durchgeführt.

5.3.1 Methoden zur Entwicklung ökologisch ausgewogener und nachhaltiger Fruchtfolgen

5.3.1.1 Datengrundlagen zur Erstellung von Fruchtfolgen

Als Modellbetriebe wurden drei Marktfruchtbetriebe herangezogen, deren Eigenschaften wie im Folgenden beschrieben ermittelt wurden. Zunächst wurde die Anbaufläche ausgewählter Kulturen von oststeirischen Marktfruchtbetrieben aus den INVEKOS-Daten (2005) ermittelt (Tabelle 27).

Tabelle 27: Angebaute Kulturen von konventionellen oststeirischen Marktfruchtbetrieben

Bezeichnung	Summe der Fläche (ha)	Anzahl der Betriebe	Hauptfrüchte (% der Ackerfläche)
Landwirtschaftliche Nutzfläche gesamt	24365	4233	-
davon Ackerfläche	15490	3539	-
davon Grünland	3448	3002	-
Körnermais	6514	1912	42,05
Bracheflächen	1847	1304	11,93
Körnerleguminosen	729	264	4,71
Sommergerste	702	506	4,53
Mais für Corn Cob Mix (CCM)	667	205	4,31
Silomais	626	168	4,04
Winterweizen	606	328	3,91
Wintergerste	211	182	1,36
Sommerweizen	171	169	1,10

Quelle: INVEKOS (2005)

In Tabelle 28 wurden die Daten aus Tabelle 27 noch genauer unterteilt und die angebaute Kulturen von Betrieben ohne Viehhaltung mit über 5 ha Ackerfläche (Marktfruchtbetriebe) dargestellt. Als Kriterium für die Unterteilung wurde der Anteil an Mais verwendet. Tabelle 28 zeigt Durchschnittswerte der Anbaufläche der wichtigsten Kulturen, von Betrieben mit einem Maisanteil von 25% bis über 75%. Sonderkulturen und Kulturen unter 1% der Ackerfläche wurden nicht berücksichtigt.

Tabelle 28: Angebaute Kulturen von konventionellen oststeirischen Marktfruchtbetrieben (Betriebe ohne Viehhaltung, >5 ha Ackerfläche)

Bezeichnung	Anteil an Mais		
	25-50%	50-75%	>75%
Anzahl der Betriebe	145	172	218
Mittlere Ackerfläche (ha)	16,1	20,9	11,8
Mittelwert Mais (%)	38,4	64,1	91,8
davon Körnermais	34,7	54,6	69,9
Corn-cob-mix (CCM)	1,4	3,5	14,6
Silomais	2,2	6,0	7,2
Mittelwert Winterweichweizen	6,8	1,6	0,4
Mittelwert Wintergerste	3,1	1,1	0,2
Mittelwert Sommergerste	6,5	1,9	0,6
Mittelwert Körnerleguminosen	5,9	2,1	0,1
Mittelwert Ölkürbis	15,7	9,7	1,9
Mittelwert Brachefläche	9,1	12,2	2,7
Mittelwert Sonnenblumen	1,0	0,4	0,1

Quelle: INVEKOS (2005)

Aufbauend auf diesen Daten wurden zwei verschiedene Kategorien von Fruchtfolgen formuliert:

1. regionstypische Ausgangsfruchtfolgen
2. aus den regionstypischen Ausgangsfruchtfolgen wurden nachhaltige Fruchtfolgen für den Energiepflanzenanbau (Energiefruchtfolgen) gestaltet, die mit den Kulturen, die in den besten Mischungen enthalten waren (Sonnenblume, Klee gras, Grünroggen und Zuckerrübe), ergänzt wurden

Als Vorlage für die Gestaltung der regionstypischen Ausgangsfruchtfolgen wurden die in Tabelle 28 dargestellten Anbauflächen der Kulturen herangezogen.

Folgende Ausgangssituation für die regionstypischen Ausgangsfruchtfolgen wurde angenommen:

- die Betriebe liefern den gesamten Mais in Form von Silomais an die Biogasanlage
- auf den Bracheflächen wird Klee gras angebaut, welches auch energetisch genutzt wird
- alle anderen Kulturen werden als Marktfrüchte verkauft
- der Betrieb mit der regionstypischen Ausgangsfruchtfolge A nimmt am Österreichischen Programm zur Förderung einer umweltgerechten, extensiven und den natürlichen Lebensraum schützenden Landwirtschaft, der ÖPUL-Maßnahme „Begrünung“ teil
- die Betriebe mit der regionstypischen Ausgangsfruchtfolge B und C nehmen nicht an der ÖPUL Maßnahme „Begrünung“ teil (nach INVEKOS (2005) nehmen in der Region Oststeiermark weniger als 15% an der Maßnahme „Begrünung“ teil)
- das anfallende Stroh verbleibt auf dem Feld

Für die nachhaltigen Energiefruchtfolgen wurde folgendes angenommen:

- drei der besten Mischungen (M13, M8 und M1) werden in die regionstypischen Ausgangsfruchtfolgen eingebaut (Mischungsverhältnisse in % Frischmasse wurden anteilig auf die benötigte Fläche umgerechnet)
- M13 wird aufgrund des ähnlichen Maisanteils in die regionstypische Ausgangsfruchtfolge A integriert; Mischung M8 wird als zweitbeste Mischung in die regionstypische Ausgangsfruchtfolge B integriert; Mischung 1 (höchster Maisanteil im Vergleich der Mischungen) wird in die regionstypische Ausgangsfruchtfolge C integriert
- bei den Energiefruchtfolgen, die auf der regionstypischen Ausgangsfruchtfolge C basieren werden auch Kulturen angebaut, die Kombinationen von Mischungen erlauben, um so wenn möglich die Methanerträge zusätzlich zu steigern
- um den in der vorliegenden Untersuchung festgestellten Kofermentationseffekt der Mischungen M13 und M8 zu bekommen, wird angenommen, dass die Schweinegülle von einem Schweinebetrieb zugeliefert wird
- um den in der vorliegenden Untersuchung festgestellten Kofermentationseffekt der Mischung M1 zu bekommen, muss Glycerin dazugemischt werden
- die Fläche, die nicht für den Anbau der in den Mischungen enthaltenen Kulturpflanzen benötigt wird, wird für andere Energiepflanzen (spezifischer Methanertrag entspricht dann dem Faktor der alleinigen Vergärung der jeweiligen Energiepflanze) oder für Marktfrüchte zur Verfügung gestellt
- der Anteil an Mais wird auf maximal 50% beschränkt
- der Anteil an Mais und Getreide wird auf maximal 75% beschränkt
- es wird angenommen, dass alle Betriebe an der ÖPUL Maßnahme „Begrünung“ teilnehmen und daher Zwischenfrüchte in die Fruchtfolge integrieren
- Zwischenfrüchte und Stroh verbleiben als Gründüngung am Feld und werden nicht energetisch genutzt

Für beide Kategorien der Fruchtfolgen wurde angenommen, dass alle energetisch genutzten Kulturen mit Biogasgülle gedüngt werden. Dadurch wird eine weitgehende Schließung der Stoffkreisläufe erreicht. Alle anderen Kulturen werden mineralisch gedüngt.

5.3.1.2 Datengrundlagen zur Erstellung von Humusbilanzen

Für jede Fruchtfolge wurde eine Humusbilanz nach den Richtlinien der VDLUFA (2004) durchgeführt, um die Humusversorgung der Ackerflächen beurteilen zu können.

In der Humusbilanzierung nach VDLUFA (2004) werden für die anbau- bzw. fruchtartenspezifische Veränderung der organischen Bodensubstanz folgende Richtwerte angegeben (Tabelle 29). Zur Berechnung der anbauspezifischen Veränderung der Humusvorräte von Bracheböden wurde der Wert für Feldfutter für ein Hauptnutzungsjahr angenommen, da Klee gras angebaut werden soll. In der vorliegenden Untersuchung wurden die unteren Werte für die weiteren Berechnungen herangezogen.

Tabelle 29: Richtwerte für die anbauspezifische Veränderung der Humusvorräte von Böden

Hauptfruchtarten	kg Humus-C/ha und Jahr Verlust (-) oder Gewinn (+)	
	untere Werte	obere Werte
Zucker- und Futterrübe	-760	-1300
Silo- und Körnermais	-560	-800
Getreide einschließlich Öl- und Faserpflanzen, Sonnenblumen	-280	-400
Körnerleguminosen	+160	+240
Bedarfsfaktoren für Zucker- und Futterrüben, Getreide einschließlich Körnermais und Ölfrüchten ohne Koppelprodukte; bei den restlichen Fruchtarten ist die Humusersatzleistung der Koppelprodukte im Humusbedarf berücksichtigt.		
Feldfutter		
Ackergras, Leguminosen, Leguminosen-Gras-Gemenge		
je Hauptnutzungsjahr	+600	+800
im Ansaatzjahr		
als Frühjahrsblanksaat	+400	+500
als Untersaat	+200	+300
als Sommerblanksaat	+100	+150
Zwischenfrüchte (Aufwuchs abgefahren)*		
Winterzwischenfrüchte	+120	+160
Untersaaten	+200	+300
Brache		
Gezielte Begrünung		
ab Sommer der Brachlegung inklusive des folgenden Brachejahres	+700	
ab Frühjahr des Brachejahres	+400	

Quelle: VDLUFA (2004); * = bei Verbleib des Aufwuchses als Gründüngung, Grünmassezufuhr nach Tabelle 30 berechnen

Die Humusreproduktionsleistung organischer Düngestoffe, ausgedrückt in kg Humus-C je t Substrat, ist in Tabelle 30 dargestellt.

Tabelle 30: Richtwerte für die Humusreproduktionsleistung verschiedener organischer Materialien

Material		TS (%)	Humusreproduktion (kg Humus-C/t Substrat)*
Pflanzenmaterial	Stroh	86	80-110
	Gründüngung, Rübenblatt, Marktabfälle	10	8
	Grünschnitt	20	16
Gärrückstände	flüssig	4	6
		7	9
		10	12

Quelle: VDLUFA (2004); * = Umrechnungsfaktoren: 1 t ROS (Reproduktionswirksame organische Substanz) \approx ca. 200 kg Humus-C, 1 HE (Humuseinheiten) \approx ca. 580 kg Humus-C

Es wurde angenommen, dass die Zwischenfrüchte nicht abgefahren werden und als Gründüngung auf dem Feld bleiben. Das Stroh bleibt ebenfalls auf dem Feld zurück. Für die Berechnung der Humusreproduktionsleistung des Strohs wird beim Getreide ein Korn/Stroh-Verhältnis von 1:0,8 angenommen (Freyer, 2003). Die durchschnittlichen Erträge von in den Fruchtfolgen vorkommenden Getreide und Zwischenfrüchten (zur Berechnung der Humusreproduktionsleistung von Stroh und Gründüngung) ist in Tabelle 31 dargestellt.

Tabelle 31: Durchschnittserträge der Steiermark

Kultur	Ertrag (t FM/ha)
Sommergerste	4,5*
Winterweizen	6,0*
Zwischenfrüchte	15,0**

Quelle: *Anonym (2007), **Kolbe et al. (2004)

Um eine Humusbilanz korrekt durchführen zu können, muss die Menge des zugeführten organischen Düngers angegeben werden. Es wurde angenommen, dass die energetisch genutzten Kulturen mit Biogasgülle gedüngt werden und dass die Biogasgülle einen Stickstoffgehalt von 0,38% hat (Karpenstein-Machan, 2005). Die weiteren Kalkulationen wurden mit den in Tabelle 32 aufgeführten maximalen Stickstoffbedarfswerten und diesen Werten entsprechenden Biogasgülemengen durchgeführt.

Tabelle 32: Maximale N-Bedarfswerte für Kulturen in mittlerer Ertragslage

Kultur	Maximale N-Bedarfswerte (kg/ha)	Entsprechende Menge an Biogasgülle (t/ha)
Winterroggen	100	26,4
Körnermais	140	36,8
Silomais	160	42,1
Sonnenblume	60	15,8
Zuckerrübe	110	29,0

Quelle: ÖPUL (2007)

Die Bewertung der Humusversorgung erfolgt auf Basis der Humussalden und ist in Tabelle 33 dargestellt.

Tabelle 33: Bewertung der Humussalden

Humussaldo		Bewertung
kg Humus-C/ha und Jahr	Gruppe	
< -200	A – sehr niedrig	Ungünstige Beeinflussung von Bodenfunktion und Ertragsleistung
-200 bis -76	B – niedrig	Mittelfristig tolerierbar, besonders auf mit Humus angereicherten Böden
-75 bis 100	C – optimal	Optimal hinsichtlich Ertragssicherheit bei geringem Verlustrisiko; langfristige Einstellung standortangepasster Humusgehalte
100 bis 300	D – hoch	Mittelfristig tolerierbar, besonders auf mit Humus verarmten Böden
> 300	E – sehr hoch	Erhöhtes Risiko für N-Verluste, niedrige N-Effizienz

Quelle: VDLUFA (2004); * = Umrechnungsfaktoren: 1 t ROS (Reproduktionswirksame organische Substanz) \approx ca. 200 kg Humus-C, 1 HE (Humuseinheiten) \approx ca. 580 kg Humus-C

5.3.2 Ergebnisse zur Entwicklung ökologisch ausgewogener und nachhaltiger Fruchtfolgen

5.3.2.1 Regionstypische Ausgangsfruchtfolgen und ihr Methanhektarertrag

In Tabelle 34 ist der Anteil der angebauten Kulturen eines Marktfruchtbetriebes mit einem Maisanteil zwischen 25-50% dargestellt. Die dargestellte Fruchtfolge orientiert sich an Tabelle 28.

Tabelle 34: Regionstypische Ausgangsfruchtfolge A für einen Marktfruchtbetrieb (Maisanteil zwischen 25-50%)

Jahr bzw. Teilschlag	Kultur	Anteil in der FF (%)	Mittlerer Ertrag		Methanfaktor $\text{m}^3_{\text{N}}/\text{dt oTS}$	MHE der Kultur $\text{m}^3_{\text{N}}/\text{ha und Jahr}$	MHE der FF $\text{m}^3_{\text{N}}/\text{ha und Jahr}$
			dt TS/ha und Jahr	dt oTS/ha und Jahr			
1a	Silomais	25	297	283	33,8	9565	2391
	ZF als US	-					
2a	Silomais	15	297	283	33,8	9565	1435
2b	Sommergerste	10	-	-	-	-	-
3a	Ölkürbis	20	-	-	-	-	-
3b	Körnerleguminosen	5	-	-	-	-	-
4a	Winterweizen	15	-	-	-	-	-
4b	Brache (Klee gras)	10	102	92	29,1	2677	268
Summe Methanhektarertrag der Fruchtfolge							4094

FF = Fruchtfolge, TS = Trockensubstanz, oTS = organische Trockensubstanz, MHE = Methanhektarerträge, ZF = Zwischenfrucht, US = Untersaat

Der Methanhektarertrag der regionstypischen Ausgangsfruchtfolge A für einen Marktfruchtbetrieb (Maisanteil zwischen 25-50%) beträgt 4094 $\text{m}^3_{\text{N}}/\text{ha}$ und Jahr.

In Tabelle 35 ist der Anteil der angebauten Kulturen eines Marktfruchtbetriebes mit einem Maisanteil zwischen 50-75% dargestellt. Die dargestellte Fruchtfolge orientiert sich an Tabelle 28.

Tabelle 35: Regionstypische Ausgangsfruchtfolge B für einen Marktfruchtbetrieb (Maisanteil zwischen 50-75%)

Jahr bzw. Teilschlag	Kultur	Anteil in der FF (%)	Mittlerer Ertrag		Methanfaktor $\text{m}^3_{\text{N}}/\text{dt oTS}$	MHE der Kultur $\text{m}^3_{\text{N}}/\text{ha und Jahr}$	MHE der FF $\text{m}^3_{\text{N}}/\text{ha und Jahr}$
			dt TS/ha und Jahr	dt oTS/ha und Jahr			
1a	Silomais	25	297	283	33,8	9565	2391
2a	Silomais	25	297	283	33,8	9565	2391
3a	Silomais	15	297	283	33,8	9565	1435
3b	Ölkürbis	10	-	-	-	-	-
4a	Brache (Klee gras)	15	102	92	29,1	2677	402
4b	Winterweizen	10	-	-	-	-	-
Summe Methanhektarertrag der Fruchtfolge							6619

FF = Fruchtfolge, TS = Trockensubstanz, oTS = organische Trockensubstanz, MHE = Methanhektarerträge

Der Methanhektarertrag der regionstypischen Ausgangsfruchtfolge B für einen Marktfruchtbetrieb (Maisanteil zwischen 50-75%) beträgt 6619 $\text{m}^3_{\text{N}}/\text{ha}$ und Jahr.

In Tabelle 36 ist der Anteil der angebauten Kulturen eines Marktfruchtbetriebes mit einem Maisanteil über 75% dargestellt. Die dargestellte Fruchtfolge orientiert sich an Tabelle 28.

Tabelle 36: Regionstypische Ausgangsfruchtfolge C für einen Marktfruchtbetrieb (Maisanteil über 75%)

Jahr bzw. Teilschlag	Kultur	Anteil in der FF (%)	Mittlerer Ertrag		Methanfaktor $\text{m}^3_{\text{N}}/\text{dt oTS}$	MHE der Kultur $\text{m}^3_{\text{N}}/\text{ha}$ und Jahr	MHE der FF $\text{m}^3_{\text{N}}/\text{ha}$ und Jahr
			dt TS/ha und Jahr	dt oTS/ha und Jahr			
1a	Silomais	25	297	283	33,8	9565	2391
2a	Silomais	25	297	283	33,8	9565	2391
3a	Silomais	25	297	283	33,8	9565	2391
4a	Silomais	15	297	283	33,8	9565	1435
4b	Brache (Klee gras)	5	102	92	29,1	2677	134
4c	Ölkürbis	5	-	-	-	-	-
Summe Methanhektarertrag der Fruchtfolge							8742

FF = Fruchtfolge, TS = Trockensubstanz, oTS = organische Trockensubstanz, MHE = Methanhektarerträge

Der Methanhektarertrag der regionstypischen Ausgangsfruchtfolge C für einen Marktfruchtbetrieb (Maisanteil über 75%) beträgt $8742 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{ha}$ und Jahr.

Aufgrund des extrem hohen Anteils an Silomais ergab sich für die regionstypische Ausgangsfruchtfolge C der höchste Methanhektarertrag. Der Methanhektarertrag und die Humusversorgung entwickeln sich aber gegenläufig. Das heißt je mehr Silomais angebaut wird, desto höher ist der Methanhektarertrag aber desto schlechter wird die Humusversorgung der Böden (siehe nächstes Kapitel).

5.3.2.2 Humusbilanzierung der regionstypischen Ausgangsfruchtfolgen

Die Ergebnisse der Humusbilanzierung der regionstypischen Ausgangsfruchtfolgen sind in Tabelle 37 zusammengefasst. Die genauen Berechnungen der Humusbilanzen sind im Anhang (Kapitel 8.1.1) detailliert dargestellt.

Wenn man die Methanhektarerträge der Humusbilanzierung gegenüberstellt, ergibt sich folgendes Bild: Die regionstypische Ausgangsfruchtfolge A mit dem geringsten Silomaisanteil von 40% und auch dem geringsten Methanhektarertrag hat die beste bzw. ausgeglichene Humusversorgung ($-15 \text{ kg Humus-C}/\text{ha}$ und Jahr, d.h. Gruppe C – optimale Versorgung; siehe Tabelle 33). Die regionstypische Ausgangsfruchtfolge B mit 65% Mais liegt mit $-124 \text{ kg Humus-C}/\text{ha}$ und Jahr bereits in der Gruppe B (niedrige Versorgung) und wäre daher nur mittelfristig tolerierbar. Die regionstypische Ausgangsfruchtfolge C mit einem Silomaisanteil von 90% und dem höchsten Methanhektarertrag weist mit $-260 \text{ kg Humus-C}/\text{ha}$ und Jahr eine extrem schlechte Humusversorgung auf (Gruppe A – sehr niedrige Versorgung), was eine ungünstige Beeinflussung der Bodenfunktion und längerfristig auch eine ungünstige Beeinflussung der Ertragsleistung bedeutet.

Tabelle 37: Humussaldo der regionstypischen Ausgangsfruchtfolgen in Humusäquivalenten

Regionstypische Ausgangsfruchtfolgen	Humusbedarf	Humusreproduktion	Humussaldo (kg Humus-C/ha)	
			je Fruchtfolge	je Jahr
Ausgangsfruchtfolge A	-928	+870	-58	-15
Ausgangsfruchtfolge B	-1320	+824	-496	-124
Ausgangsfruchtfolge C	-1952	+911	-1041	-260

5.3.2.3 Nachhaltige Energiefruchtfolgen und ihr Methanhektarertrag

Die Regionstypische Ausgangsfruchtfolge A (Tabelle 34) wurde mit Kulturen (anteilig auf % der benötigten Fläche umgerechnet) aus der Mischung 13 verändert (Tabelle 38). Dass heißt, der Winterweizen und die Sommergerste werden nicht mehr angebaut und der Ölkürbis auf 14% reduziert. Die Brache wird auf einen Anteil von 14% erhöht und energetisch genutzt (der Methanfaktor entspricht dem Wert der alleinigen Vergärung von Klee gras).

Tabelle 38: Energiefruchtfolge A für einen Marktfruchtbetrieb (ehemaliger Maisanteil zwischen 25-50%: Mischung 13)

Jahr bzw. Teilschlag	Kultur	Anteil in der FF (%)	Mittlerer Ertrag		Methanfaktor $\frac{\text{m}^3_{\text{N}}}{\text{dt oTS}}$	MHE der Kultur $\frac{\text{m}^3_{\text{N}}}{\text{ha und Jahr}}$	MHE der FF $\frac{\text{m}^3_{\text{N}}}{\text{ha und Jahr}}$
			dt TS/ha und Jahr	dt oTS/ha und Jahr			
1a	Silomais (M13)	25	297	283	42,7	12084	3021
	ZF als US	-					
2a	Silomais (M13)	3	297	283	42,7	12084	363
2b	Sonnenblumen (M13)	17	127	110	42,7	4697	799
2c	Körnerleguminosen	5	-	-	-	-	-
3a	Grünroggen (M13)	11	143	131	42,7	5594	615
3b	Brache (Klee gras)	14	102	92	29,1	2677	375
	ZF nach 3a	-					
4a	Zuckerrübe (M13)	11	153	145,0	42,7	6192	681
4b	Ölkürbis	14	-	-	-	-	-
Summe Methanhektarertrag der Fruchtfolge							5854

ZF = Zwischenfrucht, US = Untersaat, M13 = Kulturen, die anteilmäßig zur Mischung M13 gehören, FF = Fruchtfolge, TS = Trockensubstanz, oTS = organische Trockensubstanz, MHE = Methanhektarerträge

Um die positiven Kofermentationseffekte der Mischung M13 zu bekommen, müssen noch 15% Schweinegülle (in % der Frischmasse) zum Substrat für die Biogasanlage dazugemengt werden. Der Methanhektarertrag der Energiefruchtfolge A für einen Marktfruchtbetrieb (ehemaliger Maisanteil zwischen 25-50%: Mischung 13) beträgt dann 5854 $\text{m}^3_{\text{N}}/\text{ha}$ und Jahr. Obwohl der Maisanteil von 40% auf 27% sinkt, wird durch den positiven Kofermentationseffekt der Mischung und des größeren Gärsubstratinputs ein höherer Methanhektarertrag in $\text{m}^3_{\text{N}}/\text{ha}$ und Jahr in der Energiefruchtfolge erreicht (Erhöhung von 4094 $\text{m}^3_{\text{N}}/\text{ha}$ und Jahr (regionstypischen Ausgangsfruchtfolge A) auf 5854 $\text{m}^3_{\text{N}}/\text{ha}$ und Jahr). Die oben angeführte Energiefruchtfolge A hat

annähernd die gleiche Humusversorgung (Tabelle 43) wie die Ausgangsfruchtfolge (regionstypische Ausgangsfruchtfolge A, Tabelle 37).

Die Regionstypische Ausgangsfruchtfolge B (Tabelle 35) wurde mit Kulturen (anteilig auf % der benötigten Fläche umgerechnet) aus der Mischung 8 verändert. Auf der Fläche, die nicht für den Anbau der in der Mischung 8 enthaltenen Kulturpflanzen benötigt wird, wird Silomais angebaut und ebenfalls vergoren (der Methanfaktor entspricht dem Wert der alleinigen Vergärung von Silomais). Der Anteil an Ölkürbis bleibt annähernd gleich und wird als Marktfrucht verkauft. Daraus entsteht folgende Energiefruchtfolge (Tabelle 39):

Tabelle 39: Energiefruchtfolge B für einen Marktfruchtbetrieb (ehemaliger Maisanteil zwischen 50-75%: Mischung 8)

Jahr bzw. Teilschlag	Kultur	Anteil in der FF (%)	Mittlerer Ertrag		Methanfaktor $\text{m}^3_{\text{N}}/\text{dt oTS}$	MHE der Kultur $\text{m}^3_{\text{N}}/\text{ha}$ und Jahr	MHE der FF $\text{m}^3_{\text{N}}/\text{ha}$ und Jahr
			dt TS/ha und Jahr	dt oTS/ha und Jahr			
1a	Brache (Klee gras) (M8)	10	102	92	39,5	3634	364
1b	Klee gras (M8)	15	102	92	39,5	3634	545
2a	Silomais	25	297	283	33,8	9565	2391
	ZF vor 3b-e	-					
3a	Klee gras (M8)	4	102	92	39,5	3634	145
3b	Zuckerrübe (M8)	6	153	145,0	39,5	5728	344
3c	Silomais (M8)	2	297	283	39,5	11179	224
3d	Sonnenblume (M8)	4	127	110	39,5	4345	174
4a	Ölkürbis	9	-	-	-	-	-
4b	Grünroggen (M8)	25	143	131	39,5	5175	1294
Summe Methanhektarertrag der Fruchtfolge							5481

ZF = Zwischenfrucht, M8 = Kulturen, die anteilmäßig zur Mischung M8 gehören, FF = Fruchtfolge, TS = Trockensubstanz, oTS = organische Trockensubstanz, MHE = Methanhektarerträge

Um die Kofermentationseffekte der Mischung M8 zu bekommen, müssen noch 20% Schweinegülle (in % der Frischmasse) zum Gärsubstrat zugemischt werden. Der Methanhektarertrag der Energiefruchtfolge B für einen Marktfruchtbetrieb (ehemaliger Maisanteil zwischen 50-75%: Mischung 8) beträgt 5481 $\text{m}^3_{\text{N}}/\text{ha}$ und Jahr. Der Maisanteil wird von 65% auf 27% gesenkt. Der positive Kofermentationseffekt der Mischung reicht nicht aus um einen höheren Methanhektarertrag zu erreichen (der Methanhektarertrag sinkt von 6619 $\text{m}^3_{\text{N}}/\text{ha}$ und Jahr (regionstypischen Ausgangsfruchtfolge B) auf 5481 $\text{m}^3_{\text{N}}/\text{ha}$ und Jahr). Für die Bodenfruchtbarkeit als deutlich positiv zu bewerten ist die vielfältige Fruchtfolge, die Verringerung des Maisanteils und die deutlich bessere Humusversorgung (vgl. Tabelle 37 mit Tabelle 43).

Die Regionstypische Ausgangsfruchtfolge C (Tabelle 36) wurde mit Kulturen (anteilig auf % der benötigten Fläche umgerechnet) der Mischung 1 verändert. Die Mischung 1 braucht 33% der Fläche für Mais (Tabelle 40). Der Maisanteil in der Fruchtfolge wird auf die maximale Begrenzung von 50% aufgestockt. Dieser zusätzliche Silomais (17%) wird ebenfalls in der Biogasanlage vergoren (der Methanfaktor entspricht dem Wert der alleinigen Vergärung von Silomais). Der Bracheanteil wird auf 16% der Fruchtfolge angehoben und das dort angebaute Klee gras vergoren (der Methanfaktor entspricht dem Wert der alleinigen Vergärung von

Klee gras). Der Anteil an Ölkürbis verändert sich nur geringfügig. Die Sommergerste wird mit 25% in die Fruchtfolge eingegliedert.

Tabelle 40: Energiefruchtfolge 1C für Marktfruchtbetriebe (ehemaliger Maisanteil über 75%: Mischung 1)

Jahr bzw. Teilschlag	Kultur	Anteil in der FF (%)	Mittlerer Ertrag		Methanfaktor $\text{m}^3_{\text{N}}/\text{dt oTS}$	MHE der Kultur $\text{m}^3_{\text{N}}/\text{ha und Jahr}$	MHE der FF $\text{m}^3_{\text{N}}/\text{ha und Jahr}$
			dt TS/ha und Jahr	dt oTS/ha und Jahr			
1a	Körnermais (M1)	22	153	151	38,2	5768	1269
1b	Silomais (M1)	11	297	283	38,2	10811	1189
	ZF als US	-					
2a	Silomais	17	297	283	33,8	9565	1626
2b	Brache (Klee gras)	16	102	92	29,1	2677	428
3a	Sommergerste	25	-	-	-	-	-
3b	Ölkürbis	9	-	-	-	-	-
Summe Methanhektarertrag der Fruchtfolge							4512

ZF = Zwischenfrucht, US = Untersaat, M1 = Kulturen, die anteilmäßig zur Mischung M1 gehören, FF = Fruchtfolge, TS = Trockensubstanz, oTS = organische Trockensubstanz, MHE = Methanhektarerträge

Um die Kofermentationseffekte der Mischung M1 zu bekommen, müssen noch 54% Schweinegülle (in % der Frischmasse) und 4% Rohglyzerin als ertragssteigernder Zusatzstoff zum Gärsubstrat zugemengt werden. Der Methanhektarertrag der Energiefruchtfolge 1C für Marktfruchtbetriebe (ehemaliger Maisanteil über 75%: Mischung 1) beträgt 4512 $\text{m}^3_{\text{N}}/\text{ha}$ und Jahr. Der Maisanteil wird von 90% auf 50% gesenkt. Der positive Kofermentationseffekt der Mischung reicht nicht aus um einen Methanhektarertrag wie in der regionstypischen Ausgangsfruchtfolge C (Tabelle 36) zu erreichen (der Methanhektarertrag sinkt von 8742 auf 4512 $\text{m}^3_{\text{N}}/\text{ha}$ und Jahr). Die Senkung des hohen Maisanteils der regionstypischen Ausgangsfruchtfolge C bewirkt aber eine enorme Verbesserung der Humusversorgung der Böden. Dies hat langfristig gesehen eine positivere Auswirkung auf die Ertragsleistung, hemmt Fruchtfolgeschädlinge und ist dem Anbau von Mais in Monokultur vorzuziehen (vgl. Tabelle 37 mit Tabelle 43).

Um den Methanhektarertrag der Energiefruchtfolge 1C noch zu steigern, wurden zwei Mischungen (zusätzlich zur Mischung M1, noch die Kulturen der Mischung M8) in die Energiefruchtfolge 2C integriert (Tabelle 41). Das hat nicht nur den Vorteil, dass sich der Methanhektarertrag erhöht, sondern auch dass die Fruchtfolge vielfältiger und somit nachhaltiger wird.

Tabelle 41: Energiefruchtfolge 2C für Marktfruchtbetriebe (ehemaliger Maisanteil über 75%: Kombination aus Mischung 1 und Mischung 8)

Jahr bzw. Teilschlag	Kultur	Anteil in der FF (%)	Mittlerer Ertrag		Methanfaktor $\text{m}^3_{\text{N}}/\text{dt oTS}$	MHE der Kultur $\text{m}^3_{\text{N}}/\text{ha}$ und Jahr	MHE der FF $\text{m}^3_{\text{N}}/\text{ha}$ und Jahr
			dt TS/ha und Jahr	dt oTS/ha und Jahr			
1a	Körnermais (M1)	22	153	151	38,2	5768	1269
1b	Silomais (M1)	3	297	283	38,2	10811	324
	ZF als US	-					
2a	Silomais (M1)	8	297	283	38,2	10811	865
2b	Silomais (M8)	2	297	283	39,5	11179	224
2c	Sonnenblume (M8)	4	127	110	39,5	4345	174
2d	Zuckerrübe (M8)	6	153	145	39,5	5728	344
2e	Kleegrass (M8)	5	102	92	39,5	3634	182
3a	Kleegrass (M8)	25	102	92	39,5	3634	909
4a	Grünroggen (M8)	25	143	131	39,5	5175	1294
	ZF	-					
Summe Methanhektarertrag der Fruchtfolge							5585

ZF = Zwischenfrucht, US = Untersaat, M1 = Kulturen, die anteilmäßig zur Mischung M1 gehören, M8 = Kulturen, die anteilmäßig zur Mischung M8 gehören, FF = Fruchtfolge, TS = Trockensubstanz, oTS = organische Trockensubstanz, MHE = Methanhektarerträge

Um die Kofermentationseffekte der Mischungen M1 und M8 zu bekommen, müssen noch 54% Schweinegülle zu Mischung 1 (in % der Frischmasse) bzw. 20% Schweinegülle zu Mischung 8 (in % der Frischmasse) zugemengt werden. Zur Mischung M1 muss zusätzlich noch 4% Rohglyzerin als ertragssteigernder Zusatzstoff beigefügt werden. Der Methanhektarertrag der Energiefruchtfolge 2C für Marktfruchtbetriebe (ehemaliger Maisanteil über 75%: Kombination aus Mischung 1 und Mischung 8) beträgt 5585 $\text{m}^3_{\text{N}}/\text{ha}$ und Jahr. Der Methanhektarertrag konnte somit von 4512 $\text{m}^3_{\text{N}}/\text{ha}$ und Jahr (Energiefruchtfolge 1C) auf 5585 $\text{m}^3_{\text{N}}/\text{ha}$ und Jahr gesteigert werden. Die Humusbilanz der Energiefruchtfolge 2C wurde im Vergleich zur regionstypischen Ausgangsfruchtfolge C deutlich gesteigert und wäre für humusverarmte Böden geeignet (vgl. Tabelle 37 mit Tabelle 43).

In Tabelle 42 werden zusätzlich zur Mischung 1 (Energiefruchtfolge 1C) die Kulturen der Mischung 10 in die Energiefruchtfolge integriert.

Tabelle 42: Energiefruchtfolge 3C für Marktfruchtbetriebe (ehemaliger Maisanteil über 75%: Kombination aus Mischung 1 und Mischung 10)

Jahr bzw. Teilschlag	Kultur	Anteil in der FF (%)	Mittlerer Ertrag		Methanfaktor $\text{m}^3_{\text{N}}/\text{dt oTS}$	MHE der Kultur $\text{m}^3_{\text{N}}/\text{ha}$ und Jahr	MHE der FF $\text{m}^3_{\text{N}}/\text{ha}$ und Jahr
			dt TS/ha und Jahr	dt oTS/ha und Jahr			
1a	Körnermais (M1)	22	153	151	38,2	5768	1269
1b	Silomais (M1)	3	297	283	38,2	10811	324
	ZF als US	-					
2a	Silomais (M1)	8	297	283	38,2	10811	865
2b	Silomais (M10)	11	297	283	36,9	10443	1149
2c	Zuckerrübe (M10)	6	153	145	36,9	5351	321
	ZF	-					
3a	Sonnenblume (M10)	19	127	110	36,9	4059	771
3b	Zuckerrübe (M10)	6	153	145	36,9	5351	321
4a	Kleegras (M10)	11	102	92	36,9	3395	373
4b	Kleegras	5	102	92	29,1	2677	134
4c	Grünroggen (M10)	9	143	131	36,9	4834	435
	ZF nach 4c	-					
Summe Methanhektarertrag der Fruchtfolge							5962

ZF = Zwischenfrucht, US = Untersaat, M1 = Kulturen, die anteilmäßig zur Mischung M1 gehören, M10 = Kulturen, die anteilmäßig zur Mischung M10 gehören, FF = Fruchtfolge, TS = Trockensubstanz, oTS = organische Trockensubstanz, MHE = Methanhektarerträge

Um die Kofermentationseffekte der Mischungen M1 und M10 zu bekommen, müssen noch 54% Schweinegülle zu Mischung 1 (in % der Frischmasse) bzw. 20% Schweinegülle zu Mischung 10 (in % der Frischmasse) zugemengt werden. Zur Mischung M1 muss zusätzlich noch 4% Rohglyzerin als ertragssteigernder Zusatzstoff beigefügt werden. Der Methanhektarertrag der Energiefruchtfolge 3C für Marktfruchtbetriebe (ehemaliger Maisanteil über 75%: Kombination aus Mischung 1 und Mischung 10) beträgt $5962 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{ha}$ und Jahr und liegt damit noch über dem Wert für die Energiefruchtfolge 2C. Die Humusbilanz der Energiefruchtfolge 3C liegt im optimalen Bereich der Humusversorgung (vgl. Tabelle 37 mit Tabelle 43).

5.3.2.4 Humusbilanzierung der Energiefruchtfolgen

Die Ergebnisse der Humusbilanzierung der Energiefruchtfolgen sind in Tabelle 43 zusammengefasst. Die genauen Berechnungen der Humusbilanzen sind im Anhang (Kapitel 8.1.2) detailliert dargestellt.

Alle Energiefruchtfolgen liegen mit Ausnahme der Energiefruchtfolge 2C in der Bewertung der Humusversorgung im optimalen Bereich (Gruppe C, vgl. Tabelle 33). Die Energiefruchtfolge 2C liegt mit $+132 \text{ kg Humus-C}/\text{ha}$ und Jahr in der Bewertung der Humusversorgung im hohen Bereich (Gruppe D, vgl. Tabelle 33) und wäre für humusverarmte Böden mittelfristig tolerierbar.

Tabelle 43: Humussaldo der Energiefruchtfolgen in Humusäquivalenten

	Humusbedarf	Humusreproduktion	Humussaldo (kg Humus-C/ha)	
			je Fruchtfolge	je Jahr
Energiefruchtfolge A	-811	+666	-145	-36
Energiefruchtfolge B	-416	+589	+173	+43
Energiefruchtfolge 1C	-646	+699	+53	+18
Energiefruchtfolge 2C	-251	+781	+530	+132
Energiefruchtfolge 3C	-917	+912	-4	-1

5.3.3 Schlussfolgerungen zur Entwicklung ökologisch ausgewogener und nachhaltiger Fruchtfolgen

Die Basis einer jeden nachhaltigen Fruchtfolge ist die ausreichende Humusversorgung der Böden. Es konnte gezeigt werden, dass ein zu hoher Maisanteil und der Verzicht auf Zwischenfruchtanbau negative Auswirkungen auf die Humusversorgung der Böden hat. Darüber hinaus ist die Gefahr der Ausbreitung des Maiswurzelbohrers in Österreich zu beachten. Vor vier Jahren ist der Maiswurzelbohrer erstmals im Osten der Steiermark gesichtet worden. Die einfachste Bekämpfungsmethode ist eine Fruchtfolge mit niedrigem Maisanteil. Die Larven des Maiswurzelbohrers haben nur ein geringes Wandervermögen und wenn sie keine Maiswurzeln finden, ist ihre Überlebenschance sehr gering. Aus diesem Grund sollte Mais nicht nach Mais angebaut werden. In den vorliegenden Energiefruchtfolgen wurde der Maisanteil zwar erheblich reduziert, aber ein Anbau von Mais nach Mais im darauf folgenden Jahr auf einem Teil der Flächen auch weiterhin angenommen. Dies war aus der vorgegebenen Verteilung der verschiedenen Kulturen in den zugrunde liegenden Mischungen nicht anders möglich, in der Praxis sollte aber darauf wenn möglich verzichtet werden. Vor allem in intensiven Maisanbaugebieten wie der Steiermark muss die Entwicklung von nachhaltigen Fruchtfolgen intensiviert werden, um Fruchtfolgeschädlinge wie z.B. den Maiswurzelbohrer zukünftig zu vermeiden.

Die regionstypische Ausgangsfruchtfolge A zeigt mit ihrem geringeren Maisanteil die beste Humusversorgung innerhalb der regionstypischen Ausgangsfruchtfolgen liegt aber auch schon im negativen Bereich (Humussaldo-Gruppe C). Die regionstypischen Ausgangsfruchtfolgen B und C liegen bereits in den Humussaldo-Gruppen B (niedrig) und A (sehr niedrig), was eine ungünstige Beeinflussung der Bodenfunktion bis hin zum Verlust der Bodenfruchtbarkeit ergeben kann und längerfristig auch die Ertragsleistung mindert. Das bedeutet, je mehr Silomais angebaut wird, desto höher sind die Methanhektarerträge aber desto schlechter fällt das Humusbilanzsaldo aus. Die Ergebnisse der Humusbilanzierung der regionstypischen Ausgangsfruchtfolgen basiert hauptsächlich auf der Annahme, dass alle energetisch genutzten Kulturen mit Biogasgülle gedüngt (weitgehende Schließung der Stoffkreisläufe) und die Kulturen die nicht vergoren werden mineralisch gedüngt werden. Wenn man den Mais auch mineralisch düngen würde, was praxisüblich ist, würden sich die Humusbilanzen noch erheblich verschlechtern. Wenn man für die regionstypische Ausgangsfruchtfolge A annehmen würde, dass auch die 40% Silomais mineralisch gedüngt werden würden, dann würde sich der im optimalen Bereich befindende Humussaldo von -15 kg Humus-C/ha und Jahr auf -116 kg Humus-C/ha und Jahr verschlechtern. Bei den regionstypischen Ausgangsfruchtfolgen B und C wären bei mineralischer Düngung der Maisflächen die negativen Auswirkungen auf den Humussaldo noch deutlicher. Bei der Energiefruchtfolge A wären die Auswirkungen einer mineralischen Maisdüngung ähnlich wie bei der Ausgangsfruchtfolge A (Humussaldo von -36 kg Humus-C/ha und Jahr auf -107 kg Humus-C/ha und Jahr). Die Energiefruchtfolgen B und C (1C, 2C und 3C) weisen eine deutlich bessere Humusversorgung auf als die regionspezifischen Ausgangsfruchtfolgen, was nicht nur auf den

niedrigeren Maisanteil sondern auch auf den Anbau von Zwischenfrüchten und Untersaaten zurückzuführen ist. Auch hier gilt aber, wenn der Mais mineralisch gedüngt werden würde, käme es zu einer Verschlechterung der Humusbilanz, die aber nicht so deutlich ausfallen würde wie bei den regionstypischen Ausgangsfruchtfolgen B und C.

Die Methanhektarerträge der Energiefruchtfolgen sind mit Ausnahme der Energiefruchtfolge A niedriger als in den regionstypischen Ausgangsfruchtfolgen. Dieses Ergebnis resultiert aus den hohen Silomaisanteilen in den regionstypischen Ausgangsfruchtfolgen, welche den Ist-Zustand in der Oststeiermark widerspiegeln. Silomais ist die wirtschaftlichste Energiepflanze im konventionellen Landbau (Walla und Schneeberger, 2005), trotzdem sollten in Hinblick auf Bodenfruchtbarkeit und Fruchtfolgeschädlinge eine gewisse Grenze des Maisanteils nicht überschritten werden. In der vorliegenden Untersuchung wurde bei den Energiefruchtfolgen der Mais mit maximal 50 % begrenzt.

5.3.4 Wirtschaftlichkeitsberechnungen

Die in der Untersuchungsregion in der Praxis vorzufindenden maisbetonten Fruchtfolgen spiegeln die klimatischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen der Region wider. Hohe Maiserträge stellen im Zusammenhang mit der Veredelung in der Schweinehaltung in vielen Fällen die beste Verwertung des knappen Faktors Boden dar. Da Mais auch in der Biogasproduktion eine herausragende Stellung bezüglich des Methanhektarertrages einnimmt und in der Regel als die kostengünstigste Energiepflanze gilt (Walla und Schneeberger, 2007), ist er in klimatisch begünstigten Regionen meist die dominierende bzw. einzige Kultur als Substrat für die Biogasproduktion. Neben den hohen Masseerträgen spielen auch die jährlich nur einmal durchzuführende Ernte sowie die praxiserprobte und leicht verfügbare Erntetechnik in wirtschaftlicher Hinsicht eine große Rolle. Auf die negativen Begleiterscheinungen hinsichtlich Ökologie und Nachhaltigkeit einseitiger Fruchtfolgen wurde weiter oben schon hingewiesen.

Um reichhaltigere Fruchtfolgen auch kurzfristig wirtschaftlich attraktiver zu gestalten, bedarf es einer Optimierung hinsichtlich der Methanausbeuten (Kofermentationseffekte) und der Kosten der Bereitstellung der Substrate sowie die mögliche Inanspruchnahme von Direktzahlungen (z.B. Begrünungsprämie im ÖPUL). Mit der Schätzung von Regressionsmodellen für unterschiedliche Mischungen von Substraten wurde ein erster Schritt hinsichtlich der Optimierung von Biogasfruchtfolgen getan. Auf Basis solcher Regressionsmodelle ist es möglich in weiterer Folge Gesamtbetriebsmodelle mit Hilfe der linearen Planungsrechnung zu erstellen. Je nach den gegebenen Rahmenbedingungen (z.B. Fruchtfolgebeschränkung für einzelne Kulturen) lassen sich damit hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit optimierte Fruchtfolgen generieren.

Derzeit ist allerdings für die Erstellung von Betriebsmodellen mit den vorliegenden Mischungen ein noch zu geringes Spektrum an Mischungspartnern und -verhältnissen abzubilden. Aus diesem Grund wurde für die Wirtschaftlichkeitsanalyse ein Ansatz mit fix vorgegebenen Energiefruchtfolgen, die auf ausgewählten, im Projekt untersuchten Mischungen von Substraten beruhen, gewählt. Diesen Fruchtfolgen sind viehlose Ackerbaubetriebe unterstellt, die in den Mischungen enthaltene Gülle wird zugekauft.

5.3.4.1 Methoden

Auf der Grundlage der konzipierten Fruchtfolgen (Kapitel 5.3.2) wurden Fruchtfolgedeckungsbeiträge errechnet. Für Kulturen, die als Marktfrüchte verkauft werden, errechnet sich aus Verkaufserlös abzüglich der variablen Kosten (inklusive der Handelsdüngerkosten) der Deckungsbeitrag. Kulturen, die als Substrat für die Biogasanlage dienen, werden die variablen Kosten der Produktion frei Silo angelastet. Die variablen Kosten enthalten allerdings keine Düngerkosten,

weil die Düngung durch die Rückführung des Substrates gewährleistet ist. Die Kosten für die Substratausbringung werden mit 2,50 € je m³ veranschlagt. Die Leistung der Kulturen zur Energieproduktion errechnet sich aus dem Methanertrag der eingebrachten Substratmischung. Die durch Summierung der Deckungsbeiträge der einzelnen Kulturen kalkulierten Gesamtdeckungsbeiträge enthalten keine Direktzahlungen (Betriebsprämie) mit Ausnahme einer allfälligen Begrünungsprämie.

In einer Untersuchung von Walla et al. (2006) wurden Kosten für den Zukauf von Gülle im Durchschnitt von 3,29 € je m³ (1,00 bis 5,15 € je m³) ermittelt. Da die Oststeiermark eine hohe Dichte in der Schweineproduktion aufweist und Gülle daher leicht verfügbar ist, wird in den vorliegenden Berechnungen ein Wert von 2,50 € je m³ Gülle angenommen. In Tabelle 30 sind die Deckungsbeiträge (DB), variable Kosten (vK) und Erlöse zur Berechnung der Gesamtdeckungsbeiträge dargestellt.

Tabelle 44: Deckungsbeiträge, variable Kosten und Erlöse

	DB	vK	Erlöse	Einheit
Methanerlös			170	€/1000 m ³ _N
Prämie Begrünung			80	€/ha
Begrünung		53		€/ha
Begrünung Untersaat		33		€/ha
CCM ^{*)}		760		€/ha
Grünroggen ^{*)}		760		€/ha
Kleegras ^{*)}		690		€/ha
Silomais ^{*)}		1010		€/ha
Sonnenblumen ^{*)}		750		€/ha
Zuckerrübe ^{*)}		1540		€/ha
Schweinegülle		250		€/100m ³
Ausbringung Biogasgülle		250		€/100m ³
Körnerleguminosen	-210			€/ha
Ölkürbis	650			€/ha
Sommergerste	-30			€/ha
Winterweizen	1			€/ha

DB = Deckungsbeitrag, vK = variable Kosten, m³_N = Normkubikmeter

*) exkl. Düngerkosten, inkl. Biogasgülleausbringung

Quelle: BMLFUW, 2002, verändert; AMA, 2006b; eigene Berechnungen

Als Erlös für den Methanertrag werden je 1000 m³_N Methan 170 € angenommen. Dieser Verrechnungswert wurde auf Grundlage der Kalkulation einer Biogasanlage mit dem Programm EcoGas ermittelt. Die Rahmendaten für diese Biogasanlagenberechnung waren folgende:

- 250 kW_{el}
- Substrat ist ausschließlich zugekaufte Maissilage (3325 t FM)
- 1,1 Mio. € Investitionskosten
- 30% Investitionszuschuss
- 100% Fremdfinanzierung
- 415000 m³_N Methan Jahresproduktion
- 60% Brennstoffnutzungsgrad
- 15,15 Cent/kWh (exkl. MwSt) Einspeisetarif

- 13 Jahre Nutzungsdauer

Für den Zukauf von Maissilage wurden keine Kosten in Rechnung gestellt. Die Annuität aus der Summe der kapitalisierten jährlichen Betriebserfolge ist somit der maximal zu zahlende Preis für den Zukauf von Maissilage um einen positiven Betriebserfolg in der Biogasproduktion zu erzielen. Für die unternehmerische Tätigkeit in der Biogasproduktion werden 10% der Annuität veranschlagt. Durch Division der um 10% verringerten Annuität durch die erzeugte Menge an Methan ergibt sich der Verrechnungswert von ca. 0,17 € je m³_N Methan als Hilfsgröße für die Berechnung von Fruchtfolgedeckungsbeiträgen.

5.3.4.2 Ergebnisse

Für die Berechnung der regionstypischen Ausgangsfruchtfolgen A, B und C aus Kapitel 5.3.2 wurden die Deckungsbeiträge der Marktfrüchte sowie die variablen Kosten für die Kulturen, die über die Biogasanlage verwertet werden, herangezogen. Die angenommenen regionstypischen Ausgangsfruchtfolgen B und C weisen keine Zwischenfrucht oder Untersaat als Begrünung auf. Die Klee grasflächen reichen nicht, um einen Prämienanspruch für Begrünung geltend zu machen. Nur für die regionstypische Ausgangsfruchtfolge A besteht ein Prämienanspruch für die Untersaat (Zwischenfrucht) von 80 €/ha, der den Gesamtdeckungsbeitrag (GDB) hinzugerechnet wird. Gülle wird bei den regionstypischen Ausgangsfruchtfolgen nicht als Kosubstrat eingesetzt. Der berechnete Methanertrag wurde mit 170 € je 1000 m³_N bewertet (siehe Anhang, Kapitel 8.2.1).

Die silomaisbetonte, regionstypische Ausgangsfruchtfolge C wies durch den hohen Methanertrag den höchsten Deckungsbeitrag für die angenommene Fruchtfolge auf (575 €/ha). In der regionstypischen Ausgangsfruchtfolge A konnte der mit 20% in der Fruchtfolge kalkulierte, deckungsbeitragsstarke Ölkürbis die niedrigeren Methanerlöse nur geringfügig ausgleichen (411 €/ha). Die regionstypische Ausgangsfruchtfolge B mit einem Silomaisanteil von 75% erreichte mit 430 €/ha einen zwischen den regionstypischen Ausgangsfruchtfolgen A und C liegenden Deckungsbeitrag.

Die Deckungsbeitragsberechnung für die Energiefruchtfolgen (siehe Anhang, Kapitel 8.2.2) erfolgte nach demselben Schema wie bei den regionstypischen Ausgangsfruchtfolgen. In der Kalkulation wurde der für die Begrünung notwendige Zwischenfruchtanbau mit den Kosten im GDB berücksichtigt. Die in der Substratmischung notwendige Schweinegülle verursacht Kosten von 2,5 €/m³, die ebenfalls in die Berechnung des GDB einfließen. Durch den Anbau von Zwischenfrüchten kann ein Prämienanspruch für die gesamte Kulturfläche lukriert werden.

Durch die Umstrukturierung der Fruchtfolge konnte bei keiner Energiefruchtfolge ein höherer Deckungsbeitrag je ha erreicht werden. Obwohl die Energiefruchtfolge A einen verhältnismäßig niedrigen Anteil der Kulturfläche, die über die Biogasanlage veredelt wird (A: 81%, B: 91%, 1C: 66%, 2C: 100%, 3C: 100%) hat, erreicht sie den höchsten Deckungsbeitrag (352 €/ha) gegenüber den anderen Energiefruchtfolgen (B: 245 €, 1C: 234 €, 2C: 144 €, 3C: 119 €). Hervorzuheben ist auch, dass die Energiefruchtfolge A die einzige Energiefruchtfolge ist, die einen höheren Methanertrag je Hektar erreicht als die dazugehörige regionstypische Ausgangsfruchtfolge.

Die Energiefruchtfolge B benötigt nur 70% der Fläche der regionstypischen Ausgangsfruchtfolge B, um den gleichen Methanertrag je ha zu erzielen. Für die Energiefruchtfolgen 2C und 3C muss mit einem 1,5 fachen Flächenbedarf gerechnet werden (2C: 157%, 3C: 147%) und für die Energiefruchtfolge 1C ist rund die doppelte Fläche für einen äquivalenten Methanertrag notwendig. Für die zusätzlich benötigte Fläche müssen Nutzungskosten veranschlagt werden. Die Höhe der Nutzungskosten richtet sich nach den zu ersetzenden Kulturen bzw. Fruchtfolgen. Da sie betriebsindividuell sehr unterschiedlich anzusetzen sind und für diese Untersuchung hierzu keine Daten zur Verfügung standen, wurden keine weiterführenden Berechnungen diesbezüglich angestellt.

Die Höhe der errechneten GDB's werden von dem angenommenen Erlös je m^3_N Methan und von den angebauten Marktfrüchten stark beeinflusst. Daher werden in einem weiteren Berechnungsschritt nur mehr die variablen Kosten der in der Biogasanlage eingesetzten Kulturen, die Kosten der Schweinegülle sowie die Kosten und Prämien der Begrünung summiert und auf den Methanertrag umgelegt. Ergebnisse sind die variablen Kosten je m^3_N Methan bzw. die variablen Kosten für das Substrat je Hektar (Tabelle 45).

Tabelle 45: Variable Kosten für Methan und Substratbereitstellung der Fruchtfolgen

Fruchtfolge	vK je m^3_N		Fruchtfolgeanteil für Biogasanlage (%)	vK Substrat (€ je ha)
	Methan (Cent)	vK Substrat (€)		
Basis A	11,6	473	50	946
Energie A	13,5	789	81	974
inkl. vK und Prämien für Begrünung	12,4	723	81	893
Basis B	11,5	760	80	950
Energie B	14,8	814	91	894
inkl. vK und Prämien für Begrünung	13,6	745	91	818
Basis C	10,8	944	95	993
Energie 1C	14,5	653	66	989
inkl. vK und Prämien für Begrünung	12,9	584	66	885
Energie 2C	15,5	864	100	864
inkl. vK und Prämien für Begrünung	14,4	805	100	805
Energie 3C	15,9	949	100	949
inkl. vK und Prämien für Begrünung	15,0	895	100	895

vK = variable Kosten, m^3_N = Normkubikmeter

Der Tabelle 45 ist zu entnehmen, dass die Energiefruchtfolgen höhere variable Kosten je m^3_N Methan verursachen als die regionstypischen Ausgangsfruchtfolgen. Durch den zusätzlichen Anspruch an Prämien für die Begrünung kann das Ergebnis verbessert werden. Dennoch ist die regionstypische Ausgangsfruchtfolge C mit einem Maisanteil von 90% unter den angenommenen Verhältnissen die Wirtschaftlichste. Bezieht man die variablen Kosten nicht auf den Methanertrag sondern auf ein Hektar, sind vor allem die variablen Kosten der Kulturen zur Bereitstellung des Substratgemisches, ausschlaggebend. In diesem Zusammenhang sind vor allem Fruchtfolgen mit hohem Zuckerrüben- und/oder Silomaisanteil gegenüber Fruchtfolgen mit hohem CCM- und/oder Kleegrasanteil benachteiligt (vgl. mit Tabelle 44).

Für die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit des Einsatzes unterschiedlicher Substrate für die Biogasproduktion müssen noch zusätzliche Aspekte, die von Betrieb zu Betrieb sehr unterschiedlich zu bewerten sind, berücksichtigt werden. Dies sind z.B. die unterschiedliche Menge an anfallendem Substrat, der Erntezeitpunkt und die Erntetechnik oder die Silierbarkeit der Substrate. Diese Punkte haben Einfluss auf die Ausgestaltung der Biogasanlage, den benötigten Siloraum oder sind maßgeblich bei der Planung betrieblicher Arbeitsabläufe.

5.3.4.3 Schlussfolgerungen

In klimatisch begünstigten Regionen sind Fruchtfolgen mit hohen Maisanteilen hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit bei der Verwertung in Biogasanlagen aufgrund ihres extrem hohen Methanhektarertrages allen anderen Kulturen überlegen. Trotz der in den untersuchten Substratmischungen festgestellten Kofermentationseffekte sind Fruchtfolgen mit diesen Mischungspartnern bei kurzfristiger Betrachtung in Bezug auf die variablen Kosten je m^3_N Methan als auch dem erzielbaren Deckungsbeitrag je ha dem Mais unterlegen. Längerfristig müssen allerdings die positiven Effekte (Humusbilanz, Verminderung von Krankheits- und Schädlingsdruck) einer vielfältigeren und nachhaltigeren Fruchtfolge in Betracht gezogen werden. Eine monetäre Bewertung dieser

Effekte konnte im Rahmen dieser Untersuchung nicht angestellt werden. Die Ausweitung der Untersuchungen zu Kofermentationseffekten unter Einbeziehung weiterer Kulturen und Mischungsverhältnisse könnte zu einer verbesserten Datengrundlage für die Erstellung von Regressionsgleichungen führen. Mit Hilfe dieser Regressionsgleichungen wäre es dann möglich, Betriebsmodelle unter Einbeziehung der agrarpolitischen Rahmenbedingungen zu erstellen und zu optimieren.

5.3.5 Ausblick auf nachhaltige Fruchtfolge- und Landnutzungssysteme

Durch den immer größer werdenden Biomassebedarf in der Bioenergiewirtschaft entsteht derzeit eine gewisse Konkurrenzsituation um Biomasse zwischen den beiden Bereichen Lebensmittel- und Bioenergieerzeugung. Problemfelder in diesem Zusammenhang sind: zunehmende Flächenkonkurrenz, abnehmende Biomasseverfügbarkeit, steigende Rohstoffkosten, einseitige Fruchtfolgen und daraus resultierende geringe Nachhaltigkeit der Anbau- und Biomasseproduktionssysteme. Aus dieser Konkurrenzsituation resultiert auch eine abnehmende Marktakzeptanz für Bioenergie und im Speziellen der Biogasenergie.

Dieser Entwicklung kann aber mit neuen Konzepten entgegengewirkt werden. Wie mit der vorliegenden Untersuchung von Energiepflanzenmischungen gezeigt werden konnte, ist es möglich, dass in Biogasanlagen durch eine komplementäre Kopplung der verschiedenen Nährstoffgruppen (Eiweiß, Kohlenhydrate und Fette) zusätzliche Energieerträge durch Kofermentationseffekte erzeugt werden können. Darüber hinaus zeigt die vorliegende Arbeit auf, dass nachhaltige und standortangepasste Fruchtfolgesysteme für die zukünftige Entwicklung der Biogaserzeugung eine zentrale Bedeutung besitzen. Die ökologischen Vorteile nachhaltiger Fruchtfolgesysteme liegen in der Verbesserung der Pflanzengesundheit und der Humus- sowie Nährstoffbilanz. Aufgrund eines Zwischenfruchtanbaus besitzen nachhaltige Fruchtfolgesysteme aber immer einen etwas verminderten Deckungsbeitrag im Vergleich zu konventionellen Fruchtfolgesystemen.

Um die Konkurrenzsituation um Biomasse zwischen den Bereichen Lebensmittel- und Bioenergieerzeugung noch stärker abzubauen, sollte Biogaserzeugung in nachhaltige Landnutzungssysteme integriert werden. Das bedeutet, dass unter Aufrechterhaltung der Selbstversorgung mit Lebensmitteln in solchen Landnutzungssystemen Lebensmittel, Stoffe und Energie gleichzeitige erzeugt werden. Die ganze Vielfalt der Biomasse sollte genutzt werden. So sollten Ernterückstände und Koppelprodukte (z.B. Ölsaatenpressrückstände) des Acker- und Pflanzenbaus umfangreicher als bisher nach dem Prinzip der Kaskadennutzung für die Stoff- und Energieerzeugung genutzt werden. Dies gilt auch für die bislang nicht genutzten oberirdischen Pflanzenteile von Vor-, Nach- oder Zwischenfrüchten oder die Nutzung so genannter extensiver Flächen. Biorefinery-Konzepte müssen entwickelt werden, d.h. lignozellulosereiche Biomasse aus allen Bereichen der nahrungsmittel- und rohstoffverarbeitenden Industrie in die Biogaserzeugung integriert werden. Das Potential lignozellulosereicher Biomasse wird derzeit noch nicht voll ausgeschöpft, aber neuere technologische Entwicklungen wie die Thermodruckhydrolyse sind in der Entwicklungsphase und schon bald praxisreif, so dass zukünftig der Methanertrag von Gärrohstoffmischungen durch thermodruckhydrolysebehandelte Rohstoffe noch weiter maximiert werden kann.

Zur erfolgreichen Umsetzung der dargelegten Lösungswege in die Praxis trägt das vorliegende Projekt substantziell bei.

6 Zusammenfassung

Das zentrale Ziel des vorliegenden Projektes war es, optimale Gärrohstoffmischungen aus Energiepflanzen von typischen Standort- und Erzeugungsbedingungen der Steiermark für die Biogasproduktion zu ermitteln. Dazu wurden fünf verschiedene Energiepflanzenarten eingesetzt: (1) Zuckerrüben, (2) Mais (Silo- und Körnermais), (3) Sonnenblumen, (4) Ackerfutter (Klee gras) und (5) Getreide (Grünroggen). Alle Energiepflanzenarten wurden in Landessortenversuchen der Landeskammer für Land- und Forstwirtschaft Steiermark angebaut, geerntet und der Biomassertrag ermittelt. Für die nachfolgenden Untersuchungen im Labor wurden alle Energiepflanzen als Silagen konserviert. Eine Ausnahme bildete der Körnermais, er wurde als CCM (Corn-Cob-Mix) eingesetzt. Neben den Energiepflanzen wurden als weitere Gärrohstoffe Schweinegülle und Rohglyzerin (Nebenprodukt der Bioethanolerzeugung) verwendet.

Alle Gärrohstoffe wurden alleine und in Mischungen untersucht. Die eingesetzten Mischungen unterschieden sich in ihrem Eiweiß-Energie-Verhältnis. Es gab drei Blöcke: Block 1 = energiebetonte Mischungen (Mischungen 2 bis 5), Block 2 = eiweißbetonte Mischungen (Mischungen 6 bis 9) und Block 3 = Varianten mit ausgeglichenem Eiweiß-Energie-Verhältnis (Mischungen 10 bis 13). Der Mischung 1 (eine Mischung aus Maissilage, CCM und Schweinegülle) wurde zusätzlich 4% Rohglyzerin als ertragssteigernder Zusatzstoff beigemischt.

In allen Gärrohstoffen wurden umfangreiche Inhaltstoffanalysen durchgeführt, um eine genaue Charakterisierung der Gärsubstrate zu haben. Basierend auf DIN 38414 und VDI 4630 (2006) wurden Stoff- und Energiewechsel der Gärrohstoffe (Monofermentation) und Mischungen (Kofermentation) während einer Vergärung von mindestens 40 Tagen bei 38°C gemessen. In den Fermentern wurde die Zusammensetzung an flüchtigen Fettsäuren bestimmt, der pH-Wert gemessen sowie der Gehalt an Methan, Schwefelwasserstoff und Ammoniak im Biogas. Inhaltstoffanalysen wurden auch in allen Gärrückständen durchgeführt, um den Düngewert feststellen zu können. Der Abbaugrad der TS und oTS sowie der energetische Wirkungsgrad der Methanbildung wurden berechnet, die hydraulische Verweilzeit aus der zeitlichen Entwicklung des gebildeten Biogases abgeleitet. Der spezifische Biogas- und Methanertrag der Gärrohstoffkomponenten und Mischungen wurde bestimmt.

Bei Monofermentation der Gärrohstoffkomponenten zeigte CCM mit 344 l_N/kg oTS den höchsten spezifischen Methanertrag. Durch Kofermentation wurde dieser Wert noch übertroffen. Mit vier Mischungen wurde ein spezifischer Methanertrag der über 380 l_N/kg oTS lag erzielt (Mischung 13: 427 l_N/kg oTS, Mischung mit dem höchsten Anteil an Maissilage; Mischung 8 und 9: 395 bzw. 386 l_N/kg oTS, Mischungen mit hohem Anteil an Klee gras- und Grünroggensilage; Mischung 1: 383 l_N/kg oTS, Mischung mit Rohglyzerinzulage). Für diese vier Mischungen konnten auch die höchsten Kofermentationseffekte von +39 bis +49% bestimmt werden. Bis auf Mischung 12 besaßen alle Mischungen einen positiven Kofermentationseffekt. Dies bedeutet, dass durch die Fermentation von Gärrohstoffen in Mischungen fast immer mehr Methan produziert wird als durch eine alleinige Fermentation (Monofermentation) der gleichen Gärrohstoffe.

Aus dem spezifischen Methanertrag und dem Biomassertrag wurde der Methanhektarertrag der untersuchten Energiepflanzen und Energiepflanzenmischungen berechnet. Für die Energiepflanzenmischungen wurden Regressionsgleichungen zur Schätzung des spezifischen Methanertrages erstellt (Methanenergiewertmodelle). Empfehlungen zu optimalen Gärrohstoffmischungen und ein Leitfaden zu ökologisch ausgewogenen und nachhaltigen Fruchtfolgen (inklusive Wirtschaftlichkeitsberechnungen) für die Biogaserzeugung bei typischen Standort- und Erzeugungsbedingungen der Steiermark wurden aus den Untersuchungsergebnissen abgeleitet. Möglichkeiten zur Verwendung von Zuckerrübanganzpflanzensilagen als Gärsubstrat in der Biogasproduktion wurden diskutiert und ein Biorefinery-Konzept (Kaskadennutzung) favorisiert.

7 Summary

The central aim of the present project was to determine optimal mixtures of fermentation raw material from energy crops from typical habitat and production terms and conditions of Styria for biogas production. For this purpose five different energy crop species were used: (1) sugar beets, (2) maize (maize for silage and maize of corn), (3) sun flowers, (4) field forage (clover) and (5) cereal (green rye). All energy crop species were grown and harvested in species experiments of the Styria chamber of agriculture and forestry. The biomass yield was determined and for the subsequent laboratory investigations all energy crops were preserved as silage. An exception was the maize for corn which was used as CCM (Corn-Cob-Mix). Beside the energy crops pig manure and crude glycerin (byproduct from the bioethanol production) were used as additional fermentation raw material.

All fermentation raw materials were investigated alone and in mixtures. The used mixtures differed in their protein-energy-proportion. There were three blocks: block 1 = energy-rich mixtures (mixture 1 to 5), block 2 = protein-rich mixtures (mixture 6 to 9) and block 3 = variants with a balanced protein-energy-proportion (mixture 10 to 13). Mixture 1 (a mixture of maize silage, CCM and pig manure) was supplemented with 4% crude glycerin, as a performance-enhancing additive.

For the used energy crops comprehensive analyses of the ingredients were done to have an exact characterisation of the fermentation substrates. Based on DIN 38414 and VDI 4630 (2006) the alteration of matter and energy in the fermentation raw material (mono-fermentation) and the mixtures (co-fermentation) were measured in fermentation experiments of at least 40 days at 38°C. In the fermenters the composition of the volatile fatty acids were determined, the pH-value was measured as well as the content of methane, hydrogen sulfide and ammonia in the biogas. Analyses of the ingredients also were completed for all fermentation residues to be able to determine the fertilisation value. The degradation of TS and VS as well as the energy efficiency of the methane formation was calculated. The hydraulic residence time was derived from the development of the generated biogas over time. The specific biogas and methane yield of the fermentation raw material and mixtures were determined.

With mono-fermentation of the fermentation raw material, CCM showed the highest specific methane yields with 344 l_N/kg VS. With co-fermentation this value was even exceeded. With four mixtures a specific methane yield above 380 l_N/kg VS was achieved (mixture 13: 427 l_N/kg VS, mixture with the highest proportion of maize silage; mixture 8 and 9: 395 and 386 l_N/kg VS, respectively, mixtures with high proportions of clover and green rye silage; mixture 1: 383 l_N/kg VS, mixture with the additive crude glycerin). For these four mixtures a co-fermentation effect could be determined of +39 to +49%. With the exception of mixture 12 all mixtures had a positive co-fermentation effect. This means, that through the fermentation of fermentation raw material in mixtures almost always more methane will be produced as compared to mono-fermentation of the same fermentation raw materials.

Based on the specific methane yield and the biomass yield, the methane yield per hectare of the used energy crops and energy crop mixtures were calculated. For the energy crop mixtures regression equations estimating the specific methane yield were developed (Methane Energy Value Model). Recommendations for optimal mixtures of fermentation raw material and a guideline for ecologically balanced and sustainable crop rotations for the biogas production of typical habitat and production terms and conditions of Styria as well as economic efficiency calculation were derived from the experimental results. Possibilities of using whole crop sugar beet silage as fermentation substrate for biogas production were discussed. A biorefinery concept (cascade utilisation) was favoured.

Verzeichnisse

7.1 Literaturverzeichnis

- ALVA (1983) Österreichisches Methodenbuch für die Untersuchung von Futtermitteln, Futterzusatzstoffen und Schadstoffen. Herausgegeben im Auftrag des Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft von der Arbeitsgemeinschaft Landwirtschaftlicher Versuchsanstalten in Österreich (ALVA).
- AMA, Agrarmarkt Austria (2006a) Versorgungsbilanzen in Österreich für Zucker, Reis, Öle, Kartoffeln und Kartoffelstärke. <http://www.ama.at/Portal.Node/public?am=PCP&p.contentid=10007.20177>
- AMA, Agrarmarkt Austria (2006b) ÖPUL 2007 - Herbstantrag 2006, Eigenverlag, Wien
- Amon T., Kryvoruchko V., Amon B., Moitzi G., Lyson D., Hackl E., Jeremic D., Zollitsch W., Pötsch E., Mayer K., Plank J. (2002a) Methanbildungsvermögen von Mais – Einfluss der Sorte, der Konservierung und des Erntezeitpunktes. Endbericht für Pioneer Saaten Ges.m.b.H. Parndorf.
- Amon T., Hackl E., Jeremic D., Amon B. (2002b) Kofermentation von Wirtschaftsdüngern mit Energiegräsern in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Optimierung der Gärgutmischungen und des Biogasertrages. Endbericht für die Kammer der Wiener Wirtschaft.
- Amon T., Kryvoruchko V., Amon B., Moitzi G., Lyson D., Hackl E., Jeremic D., Zollitsch W., Pötsch E. (2003) Optimierung der Biogaserzeugung aus den Energiepflanzen Mais und Klee gras. Endbericht für das Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt- und Wasserwirtschaft.
- Amon T., Kryvoruchko V., Amon B., Schreiner M. (2004a) Untersuchungen zur Wirkung von Rohglycerin aus der Biodieselerzeugung als leistungssteigerndes Zusatzmittel zur Biogaserzeugung aus Silomais, Körnermais, Rapspresskuchen und Schweinegülle. Endbericht für Südsteirische Energie- und Eiweißherzeugung Reg.Gen.m.b.H. (SEEG).
- Amon T., Kryvoruchko V., Amon B., Gruber L. (2004b) Anaerobic digestion of maize, clover grass and animal manures: influence of nutrient composition on methane production. In: Weiske A. (Ed.) Proceedings of the International Conference „Greenhouse Gas Emissions from Agriculture, Mitigation Options and Strategies, February 10-12, Leibzig, Germany, 101-106.
- Amon T., Kryvoruchko V., Hopfner-Sixt K., Amon B., Ramusch M., Milovanovic D., Bodiroza V., Sapik R., Zima J., Machmüller A., Zollitsch W., Knaus W., Friedel J., Hrbek R., Pötsch E., Gruber L., Steinwidder A., Pfundtner E. and Wagentristl H. (2006) Optimierung der Methanherzeugung aus Energiepflanzen mit dem Methanenergiewertsystem. Endbericht für das Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT), Projektnummer 807736/8539 – KA/HN
- Amon T., Amon B., Kryvoruchko V., Machmüller A., Hopfner-Sixt K., Bodiroza V., Hrbek R., Friedel J., Pötsch E., Wagentristl H., Schreiner M., Zollitsch W. (2007) Methane production through anaerobic digestion of various energy crops grown in sustainable crop rotations. Bioresource Technology, available online 28 August 2006, in press.
- Angelidaki I., Ahring B.K. (1993) Thermophilic anaerobic digestion of livestock waste – the effect of ammonia. Appl. Microbiol Biotechn. 38, 560-564.

- Angelidaki I., Ellegaard L., Ahring B.K. (1993) A mathematical model for dynamic simulation of anaerobic digestion of complex substrates: Focusing on ammonia inhibition. *Biotech. Bioeng.* 42, 159-166.
- Anonym (2007) Die steirische Land- und Forstwirtschaft in den Jahren 2002 und 2003. http://www.agrar.steiermark.at/cms/dokumente/10149400_13942186/fe2bfda9/kap_5a.pdf (1.3.2007)
- Baserga U., Egger K. (1998) Vergärung von Energiegras zur Biogasgewinnung. *Biogas-Forum* <http://www.biogas.ch/f+e/grasbasi.htm>
- Baserga U. (2000) Vergärung organischer Reststoffe in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. *FAT-Berichte* 546.
- Batstone D.J., Keller J., Newell R.B., Newland M. (2000) Modelling anaerobic degradation of complex wastewater. Part II: parameter estimation and validation using slaughterhouse effluent. *Bioresource Techn.* 75, 75-85.
- Batstone D.J., Keller J., Angelidaki R.I., Kalyuzhny S.V., Pavlostathis S.G., Rozzi A., Sanders W.T.M., Siegrist H., Vavilin V.A. (2001) The IWA Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1), Proceedings of 9th World Congress Anaerobic Digestion, September 2-6, Antwerpen, Belgium, 65-73.
- Björnsson L., Batstone D., Christensson K., Mattiasson B. (2001) Agrigas – Biogas produktion from crop residues. Proceedings of 9th World Congress Anaerobic Digestion, September 2-6, Antwerpen, Belgium, 561-567.
- BMLFUW, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (2002) Standarddeckungsbeiträge und Daten für die Betriebsberatung 2002/03, Konventionelle Produktion, Ausgabe Westösterreich, Wien
- BMLFUW, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (2006) Nationaler Biomasseaktionsplan für Österreich. Begutachtungsentwurf, 21.9.2006.
- Borjesson P. (1998) Environmental effects of energy crop cultivation. Proceedings of 10th European Conference and Technology Exhibition "Biomass for Energy and Industry", June 8-11, Würzburg, Germany, 163-165.
- Boyle W.C. (1977) Energy recovery from sanitary landfills. In: A.G. Schlegel, J. Barnea (Eds.) *Microbial Energy Conversion*, 119-138.
- Buswell A.M. (1936) Anaerobic fermentations. *Bull. No. 32*, Div. State Water Survey, University of Illinois.
- Chynoweth D.P., Turick C.E., Owens J.M., Jerger D.E., Peck M.W. (1993) Biochemical methane potential of biomass and waste feedstocks. *Biomass and Bioenergy* 5, 95-111.
- Döhler H., Menzi H., Schwab M. (2002) Emissionen bei der Ausbringung von Fest- und Flüssigmist und Minderungsmaßnahmen. In: *Emissionen der Tierhaltung*, KTBL/UBA Symposium 3.-5. Dezember 2001, Bildungszentrum Kloster Banz, Hrsg. KTBL, Darmstadt.
- Dosch (1995) Optimierung der Verwertung von Güllestickstoff durch Separiertechnik und kulturartspezifische Applikationstechniken. In: *Bayrisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (Eds.), Gelbes Heft Nr. 56, Landtechnische Berichte aus Praxis und Forschung*, München.
- EC, Commission of the European Communities (2004) The share of renewable energy in the EU. Country profiles. Overview of renewable energy sources in the enlarged European Union. Commission staff working document, Brussels, 26.5.2004, SEC(2004) 547.

- EC, Commission of the European Communities (2005a) Aktionsplan für Biomasse. Mitteilung der Kommission, Brüssel, 7.12.2005, SEK(2005) 1573.
- EC, Commission of the European Communities (2005b) Biomass - Green energy for Europe. General information. EUR21350.
- EC, Commission of the European Communities (2006) Biofuels in the European Union - A vision for 2030 and beyond. Final report of the Biofuels Research Advisory Council. EUR22066.
- Edelmann W. (2001) Biogaserzeugung und Nutzung. In: Energie aus Biomasse – Grundlagen, Technik und Verfahren. Kaltschmitt & Hartmann (Hrsg.), Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 641-692.
- Eder B., Eder J., Gronauer A., Kaiser F., Papst C. (2004) Mehr Gas als aus der Gülle. Bayerisches, landwirtschaftliches Wochenblatt; BLW 47, 46-48.
- Eder B. (2006) Anbau von Mais als Energiepflanze für einen optimalen Gasertrag. In: Tagungsband "14. Symposium Bioenergie", Kloster Banz, Bad Staffelstein, Deutschland, 278-283.
- FNR, Fachagentur Nachwachsender Rohstoffe e.V. (2004) Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung. Institut für Energetik und Umwelt gGmbH, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.
- Freyer B. (2003) Fruchtfolgen, Konventionell – Integriert – Biologisch. Verlag Eugen Ulmer GmbH & Co, Stuttgart.
- Gallert C., Winter J. (1998) Mikrobiologie anaerober Gärprozesse, In: Technik anaerober Prozesse. H. Märkl & R. Stegmann (Hrsg.), DACHEMA-Fachgespräche Umweltschutz, Beiträge einer Veranstaltung des Sonderforschungsbereiches 238 der DFG in Zusammenarbeit mit dem DACHEMA-Forschungsausschuß Biotechnologie vom 7.-9. Oktober 1998 an der Technischen Universität Hamburg-Harburg, 19-34.
- Gronauer (1993) Einflussfaktoren auf die Ammoniakfreisetzung aus Flüssigmist als Grundlage verfahrenstechnischer Verbesserungen. Dissertation veröffentlicht in „Gelbes Heft“ Nr. 47, Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten.
- Gunaseelan V.N. (1995) Effect of inoculum/substrate ratio and pretreatments on methane yield from Parthenium. Biomass & Bioenergy 8, 39-44.
- Hassan E.A. (2003) Biogas production from forage and sugar beets. Dissertation, Universität Kassel, Witzenhausen
- Henze M., Grady C.P.L., Gujer W., Marais G.v.R., Matsuo T. (1986) Activated Sludge Model No. 1. IAWQPRC, London.
- INVEKOS (2005) Daten über flächen- und tierbestandsbezogene Förderungen landwirtschaftlicher Betriebe in der Region Oststeiermark. BMLFUW/LFRZ (Land- und Forstwirtschaftliches Rechenzentrum), Wien.
- Jäger F. (2002) Mais als Energiepflanze für die Biogasproduktion. KWS Mais GmbH, Fachberatung Mais.
- JBS (2004) Silageinformation. April 2004, Joachim Behrens Scheessel GmbH (Hrsg.)
- Kaiser F., Diepolder M., Eder J., Hartmann S., Prestele H., Gerlach R., Ziehfrend G., Gronauer A. (2004) Ertragspotenziale verschiedener nachwachsender Rohstoffe in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. In: Biogas in Bayern. LfL, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (Hrsg.), Tagungsband zur Jahrestagung am 9. Dezember 2004 in Rosenheim, Nr. 13, 43-55.
- Kaparaju P., Luostarinen S., Kalmari E., Kalmari J., Rintala J. (2001) Co-digestion of energy crops and industrial confectionery by-products with cow manure: Batch scale and farm sca-

- le evaluation. Proceedings of 9th World Congress Anaerobic Digestion, September 2-6, Antwerpen, Belgium, 363-368.
- Karpenstein-Machan M. (2005) Energiepflanzenbau für Biogasanlagenbetreiber, DLG -Verlags-GmbH, Frankfurt.
- Kirchgessner M. (1992) Tierernährung, 8. Auflage, DLG-Verlag, Frankfurt am Main.
- Kolbe H., Schuster M., Hänsel M., Grünbeck A., Schließer I., Köhler A., Karalus W., Krellig B., Pommer R., Arp B. (2004) Zwischenfrüchte im Ökologischen Landbau. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft - Fachmaterial. Eigenverlag.
- Krieg A., Fischer T. (2002) Grasvergärung aus wissenschaftlicher Sicht. <http://www.KriegFischer.de>.
- KTBL (2005) Gasausbeute in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), Darmstadt.
- KTBL (2006) Energiepflanzen. Daten für die Planung des Energiepflanzenbaus. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), Darmstadt und Leibnitz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. (ATB), Potsdam.
- KWS (2006) Bioethanol aus Zuckerrüben. <http://www.kws.de/go/id/bxfz/>
- Laaber M., Vasilieva V., Corcoba A., Braun R., Kirchmayr R. (2006) Biologische Prozessoptimierung von Biogasanlagen. In: Tagungsband "biogas06", ARGE Kompost & Biogas Österreich, 22. und 23. Februar 2006, Linz, 161-169.
- Linke B., Baganz K., Schlauderer R. (1999) Nutzung von Feldfrüchten zur Biogasgewinnung. Agrartechnische Forschung 5, 82-90.
- Machmüller A., Ossowski D.A., Wanner M., Kreuzer M. (1998) Potential of various fatty feeds to reduce methane release from rumen fermentation in vitro (Rusitec). Anim. Feed Sci. Technol. 71, 117-130.
- Mähnert P., Heiermann M., Plöchl M., Schelle H., Linke B. (2002) Verwertungsalternativen für Grünlandbestände – Futtergräser als Kosubstrat für die Biomethanisierung. Landtechnik 5/2002, 260-261.
- McCarty P.L., Mosey F.E. (1991) Modelling of anaerobic digestion process (a discussion of concepts). Water Sci. Technol. 24, 17-33.
- Messner (1988) Düngewirkung anaerob fermentierter und unbehandelter Gülle. Dissertation, Technische Universität München-Weihenstephan, Fakultät für Landwirtschaft und Gartenbau, Freising.
- Mukengele M., Oechsner H., Hahn V. (2006a) Einfluss der Inhaltsstoffe auf den spezifischen Methanertrag bei Sonnenblumen. In: Tagungsband "15. Symposium Bioenergie", Kloster Banz, Bad Staffelstein, Germany, 346-351.
- Mukengele M., Brulé M., Oechsner H. (2006b) Einfluss der Substratmischung aus Energiepflanzen auf Abbaukinetik und Methanertrag. Landtechnik 61 (1), 26-27.
- Mukengele M., Oechsner H. (2007) Einfluss der Silierung auf den spezifischen Methanertrag bei Mais. Landtechnik 62 (1), 20-21.
- Nordberg A. (1996) One and two-phase anaerobic digestion of ley crop silage with and without liquid recirculation – report 64, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden.
- ÖPUL (2007) Agrarumweltprogramm und Tierschutz. Anhänge. <http://land.lebensministerium.at/filemanager/download/18593> (1.3.2007)

- Pavlostathis S.G., Gossett J.M. (1986) A kinetic model for anaerobic digestion of biological sludge. *Biotech. Bioeng.* 28, 1519-1530.
- Pouech P., Fruteau H., Bewa H. (1998a) Agricultural Crops for Biogas Production on Anaerobic Digestion Plants. In: *Biomass for Energy and Industry*, C.A.R.E.N., Proceeding of the International Conference Würzburg, Germany, 8-11 June 1998, 163-165.
- Pouech P., Fruteau H., Bewa H. (1998b) Biomass Co-fermentation in a Full-scale anaerobic Digester influence of running Parameters. Proceedings of 10th European Conference and Technology Exhibition "Biomass for Energy and Industry", June 8-11, Würzburg, Germany, 714-717.
- Prins R.A., Van Nevel C.J., Demeyer D.I. (1972) Pure culture studies of inhibitors for methanogenic bacteria. *Ant. V. Leeuwenhoek J. Microbiol.* 38, 281-287.
- Rieder J. (1983) *Dauergrünland*. BLV Verlagsgesellschaft; Frankfurt (Main).
- Schnürer A., Zellner G., Svensson H. (1999) Mesophilic syntrophic acetate oxidation during methane formation in biogas reactors. *FEMS Microbiology Ecology* 29, 249-261.
- Steirische Initiative für Treibstoffe der Zukunft (2005) *Treibstoffe der Zukunft*. Broschüre der Steirische Initiative für Treibstoffe der Zukunft. Joanneum Research. Version Oktober 2005.
- Van Soest P.J., Robertson J.B., Lewis B.A. (1991) Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *J. Dairy Sci.* 74, 3583-3597.
- Van Soest P.J. (1994) *Nutritional ecology of the ruminant*. Second edition. Comstock Publishing Associates, Cornell University Press, Ithaca and London.
- VDI (2006) *Vergärung organischer Stoffe. Substratcharakterisierung, Probennahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche (VDI 4630)*. Verein Deutscher Ingenieure (Ed.), VDI-Handbuch Energietechnik, Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- VDLUFA (2004) *Humusbilanzierung. Methode zur Beurteilung und Bemessung der Humusversorgung von Ackerland*. Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA). Bonn.
- Walla C., Schneeberger W. (2005) *Ökonomische Analysen zum Betriebszweig Energiepflanzenproduktion für Biogasanlagen*. Beitrag präsentiert bei der Mitteleuropäischen Biomassekonferenz, 26.-29. Januar 2005 in Graz.
- Walla C., Hopfner-Sixt K., Amon T., Schneeberger W. (2006) *Ökonomisches Monitoring von Biogasanlagen in Österreich*. *Agrarische Rundschau* 6, 10-16.
- Walla C., Schneeberger W. (2007): *Ökostromerzeugung aus Energiepflanzen von konventionell wirtschaftenden Betrieben*. Eingereicht in *Die Bodenkultur*.
- Weiland P. (2001) *Grundlagen der Methangärung – Biologie der Substrate*. In: *Biogas als regenerative Energie – Stand und Perspektiven*. Tagung Hannover, 19./20. Juni 2001, VDI-Gesellschaft Energietechnik, Düsseldorf, VDI-Berichte Nr. 1620, 19-33.
- Weißbach F., Kuhla S. (1995) *Stoffverluste bei der Bestimmung des Trockenmassegehaltes von Silagen und Grünfütter: Entstehende Fehler und Möglichkeiten der Korrektur*. *Übersichten zur Tierernährung* 23, 189-214.
- Wellinger A. (1984) *Biogas - Handbuch, Grundlagen - Planung - Betrieb landwirtschaftlicher Anlagen*. Verlag Wirz AG, Aarau.
- Zauner E., Küntzel U. (1986) *Methane production from ensiled plant material*. *Biomass* 10, 207-223.

- Zatari T.M., Bozinis N.A., Alexiou I.E. (2001) Steady-state modelling of the vertical sequential reactor treating PFMSW. Proceedings of 9th World Congress Anaerobic Digestion, Antwerpen, Belgium, September 2-6.
- Zhang R., Zhang Z. (1999) Biogasification of rice straw with an anaerobic-phased solids digester system. *Bioresource Technology* 68, 235-245.

7.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Grob- (a) und Feinzerkleinerung (b) der Energiepflanzen.....	12
Abbildung 2: Laborüberblick und Detailansicht eines Eudiometers.	15
Abbildung 3: Einsetzen des Probenmaterials und des Inokulums in die Fermenter im Anaerobenschrank.	15
Abbildung 4: Biomasseertrag der eingesetzten Energiepflanzen.....	21
Abbildung 5: Konzentration an flüchtigen Fettsäuren in den Fermentern am 3. Versuchstag bei alleiniger Vergärung der Gärrohstoffe (ohne Glyzerin).	26
Abbildung 6: Konzentration an flüchtigen Fettsäuren in den Fermentern am 3. Versuchstag für die Mischungen.....	26
Abbildung 7: Konzentration an flüchtigen Fettsäuren in den Fermentern am letzten Versuchstag bei alleiniger Vergärung der Gärrohstoffe (ohne Glyzerin).	28
Abbildung 8: Konzentration an flüchtigen Fettsäuren in den Fermentern am letzten Versuchstag für die Mischungen.....	28
Abbildung 9: Spezifischer Biogas- und Methanertrag der Gärrohstoffe bei alleiniger Vergärung.	35
Abbildung 10: Verlauf des spezifischen Methanertrags der Gärrohstoffe bei alleiniger Vergärung.	36
Abbildung 11: Spezifischer Biogas- und Methanertrag der Mischungen am Ende der Fermentationsperiode. Mittelwerte innerhalb eines Blockes mit unterschiedlichen Hochbuchstaben sind signifikant verschieden voneinander ($P>0.05$, Scheffé-Prozedur).	38
Abbildung 12: Verlauf des spezifischen Methanertrags der Mischungen 1 bis 5 (M1 bis M5). ..	38
Abbildung 13: Verlauf des spezifischen Methanertrags der Mischungen 6 bis 9 (M6 bis M9). ..	39
Abbildung 14: Verlauf des spezifischen Methanertrags der Mischungen 10 bis 13 (M10 bis M13).	39
Abbildung 15: Zusammenhang zwischen gemessenem und geschätztem spezifischen Methanertrag der Mischungen (Regressionsmodell 1).....	44
Abbildung 16: Zusammenhang zwischen gemessenem und geschätztem spezifischen Methanertrag der Mischungen (Regressionsmodell 6).....	45
Abbildung 17: Zusammenhang zwischen gemessenem und geschätztem spezifischen Methanertrag der Mischungen (Regressionsmodell 7).....	45
Abbildung 18: Methanhektarertrag der eingesetzten Energiepflanzen.	46
Abbildung 19: Berechneter Methanhektarertrag der Mischungen. Mittelwerte innerhalb eines Blockes mit unterschiedlichen Hochbuchstaben sind signifikant verschieden voneinander ($P>0.05$, Scheffé-Prozedur).	48
Abbildung 20: Hydraulische Verweilzeit der Gärrohstoffe bei alleiniger Vergärung.	49
Abbildung 21: Hydraulische Verweilzeit der Mischungen. Mittelwerte innerhalb eines Blockes mit unterschiedlichen Hochbuchstaben sind signifikant verschieden voneinander ($P>0.05$, Scheffé-Prozedur).	51

7.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Spezifischer Biogas- und Methanertrag von Energiepflanzen aus Literaturangaben (Auswahl)	5
Tabelle 2: Geplante Zusammensetzung der verschiedenen Mischungen (in % der Frischmasse).	13
Tabelle 3: Inhaltsstoffzusammensetzung der untersuchten Gärsubstrate.	24
Tabelle 4: Konzentration an flüchtigen Fettsäuren und pH in den Fermentern am 3. Versuchstag.	25
Tabelle 5: Konzentration an flüchtigen Fettsäuren in den Fermentern am letzten Versuchstag und durchschnittlicher pH-Wert im Verlauf der Vergärung.	27
Tabelle 6: Gärdauer und Inhaltsstoffzusammensetzung der Gärrückstände.	30
Tabelle 7: TS- und oTS-Abbau des Fermenterinhalt.	31
Tabelle 8: TS- und oTS-Abbau des Fermenterinhalt (Mittelwerte der Blöcke).	32
Tabelle 9: Durchschnittlicher Methan-, Schwefelwasserstoff- und Ammoniakgehalt im gebildeten Biogas.	33
Tabelle 10: Spezifischer Biogas- und Methanertrag der Gärrohstoffe bei alleiniger Vergärung.	34
Tabelle 11: Spezifischer Biogas- und Methanertrag der Mischungen.	37
Tabelle 12: Spezifischer Biogas- und Methanertrag der Blöcke.	37
Tabelle 13: Energetischer Wirkungsgrad der Gärrohstoffe bei alleiniger Vergärung.	40
Tabelle 14: Energetischer Wirkungsgrad der Mischungen.	41
Tabelle 15: Energetischer Wirkungsgrad der Blöcke.	41
Tabelle 16: Vergleich zwischen gemessenem und erwartetem spezifischen Methanertrag der Gärrohstoffmischungen (Berechnung des Kofermentationseffektes).	42
Tabelle 17: Vergleich zwischen gemessenem und erwartetem spezifischen Methanertrag der Blöcke (Berechnung des Kofermentationseffektes).	42
Tabelle 18: Regressionsgleichungen zur Schätzung des spezifischen Methanertrags der Mischungen (n = 48).	43
Tabelle 19: Methanhektarertrag der Energiepflanzen bei alleiniger Vergärung.	46
Tabelle 20: Methanhektarertrag der Energiepflanzenmischungen.	47
Tabelle 21: Methanhektarertrag der Blöcke.	47
Tabelle 22: Hydraulische Verweilzeit der Gärrohstoffe bei alleiniger Vergärung.	49
Tabelle 23: Hydraulische Verweilzeit der Mischungen.	50
Tabelle 24: Hydraulische Verweilzeit der Blöcke.	50
Tabelle 25: Spezifischer Biogas- und Methanertrag von Zuckerrüben und Zuckerrübenblatt	53
Tabelle 26: Berechnungen zum Energieertrag aus Zuckerrüben für das Land Steiermark	55
Tabelle 27: Angebaute Kulturen von konventionellen oststeirischen Marktfruchtbetrieben	57
Tabelle 28: Angebaute Kulturen von konventionellen oststeirischen Marktfruchtbetrieben (Betriebe ohne Viehhaltung, >5 ha Ackerfläche).....	57
Tabelle 29: Richtwerte für die anbauspezifische Veränderung der Humusvorräte von Böden	59

Tabelle 30: Richtwerte für die Humusreproduktionsleistung verschiedener organischer Materialien.....	60
Tabelle 31: Durchschnittserträge der Steiermark.....	60
Tabelle 32: Maximale N-Bedarfswerte für Kulturen in mittlerer Ertragslage.....	61
Tabelle 33: Bewertung der Humussalden.....	61
Tabelle 34: Regionstypische Ausgangsfruchtfolge A für einen Marktfruchtbetrieb (Maisanteil zwischen 25-50%).....	62
Tabelle 35: Regionstypische Ausgangsfruchtfolge B für einen Marktfruchtbetrieb (Maisanteil zwischen 50-75%).....	62
Tabelle 36: Regionstypische Ausgangsfruchtfolge C für einen Marktfruchtbetrieb (Maisanteil über 75%).....	63
Tabelle 37: Humussaldo der regionstypischen Ausgangsfruchtfolgen in Humusäquivalenten....	64
Tabelle 38: Energiefruchtfolge A für einen Marktfruchtbetrieb (ehemaliger Maisanteil zwischen 25-50%: Mischung 13).....	64
Tabelle 39: Energiefruchtfolge B für einen Marktfruchtbetrieb (ehemaliger Maisanteil zwischen 50-75%: Mischung 8).....	65
Tabelle 40: Energiefruchtfolge 1C für Marktfruchtbetriebe (ehemaliger Maisanteil über 75%: Mischung 1).....	66
Tabelle 41: Energiefruchtfolge 2C für Marktfruchtbetriebe (ehemaliger Maisanteil über 75%: Kombination aus Mischung 1 und Mischung 8).....	67
Tabelle 42: Energiefruchtfolge 3C für Marktfruchtbetriebe (ehemaliger Maisanteil über 75%: Kombination aus Mischung 1 und Mischung 10).....	68
Tabelle 43: Humussaldo der Energiefruchtfolgen in Humusäquivalenten.....	69
Tabelle 44: Deckungsbeiträge, variable Kosten und Erlöse.....	71
Tabelle 45: Variable Kosten für Methan und Substratbereitstellung der Fruchtfolgen.....	73
Tabelle 46: Humusbedarf der regionstypischen Ausgangsfruchtfolge A für einen Marktfruchtbetrieb (Maisanteil zwischen 25-50%).....	91
Tabelle 47: Humusreproduktion der zugeführten organischen Dünger der regionstypischen Ausgangsfruchtfolge A für einen Marktfruchtbetrieb (Maisanteil zwischen 25-50%).....	91
Tabelle 48: Humussaldo der regionstypischen Ausgangsfruchtfolge A für einen Marktfruchtbetrieb (Maisanteil zwischen 25-50 %) in Humusäquivalenten.....	92
Tabelle 49: Humusbedarf der regionstypischen Ausgangsfruchtfolge B für einen Marktfruchtbetrieb (Maisanteil zwischen 50-75%).....	92
Tabelle 50: Humusreproduktion der zugeführten organischen Dünger der regionstypischen Ausgangsfruchtfolge B für einen Marktfruchtbetrieb (Maisanteil zwischen 50-75%).....	92
Tabelle 51: Humussaldo der regionstypischen Ausgangsfruchtfolge B für einen Marktfruchtbetrieb (Maisanteil zwischen 50-75%) in Humusäquivalenten.....	92
Tabelle 52: Humusbedarf der regionstypischen Ausgangsfruchtfolge C für einen Marktfruchtbetrieb (Maisanteil über 75%).....	93

Tabelle 53: Humusreproduktion der zugeführten organischen Dünger der regionstypischen Ausgangsfruchtfolge C für einen Marktfruchtbetrieb (Maisanteil über 75 %)	93
Tabelle 54: Humussaldo der regionstypischen Ausgangsfruchtfolge C für einen Marktfruchtbetrieb (Maisanteil über 75 %) in Humusäquivalenten.....	93
Tabelle 55: Humusbedarf der Energiefruchtfolge A für einen Marktfruchtbetrieb (ehemaliger Maisanteil zwischen 25-50 %: Mischung 13)	94
Tabelle 56: Humusreproduktion der zugeführten organischen Dünger der Energiefruchtfolge A für einen Marktfruchtbetrieb (ehemaliger Maisanteil zwischen 25-50 %: Mischung 13).....	94
Tabelle 57: Humussaldo der Energiefruchtfolge A für einen Marktfruchtbetrieb (ehemaliger Maisanteil zwischen 25-50%: Mischung 13) in Humusäquivalenten	95
Tabelle 58: Humusbedarf der Energiefruchtfolge B für einen Marktfruchtbetrieb (ehemaliger Maisanteil zwischen 50-75%: Mischung 8)	95
Tabelle 59: Humusreproduktion der zugeführten organischen Dünger der Energiefruchtfolge B für einen Marktfruchtbetrieb (ehemaliger Maisanteil zwischen 50-75%: Mischung 8).....	96
Tabelle 60: Humussaldo der Energiefruchtfolge B für einen Marktfruchtbetrieb (ehemaliger Maisanteil zwischen 50-75%: Mischung 8) in Humusäquivalenten	96
Tabelle 61: Humusbedarf der Energiefruchtfolge 1C für Marktfruchtbetriebe (ehemaliger Maisanteil über 75%: Mischung 1)	96
Tabelle 62: Humusreproduktion der zugeführten organischen Dünger der Energiefruchtfolge 1C für Marktfruchtbetriebe (ehemaliger Maisanteil über 75%: Mischung 1).....	97
Tabelle 63: Humussaldo der Energiefruchtfolge 1C für Marktfruchtbetriebe (ehemaliger Maisanteil über 75%: Mischung 1) in Humusäquivalenten	97
Tabelle 64: Humusbedarf der Energiefruchtfolge 2C für Marktfruchtbetriebe (ehemaliger Maisanteil über 75 %: Kombination aus Mischung 1 und Mischung 8).....	97
Tabelle 65: Humusreproduktion der zugeführten organischen Dünger der Energiefruchtfolge 2C für Marktfruchtbetriebe (ehemaliger Maisanteil über 75%: Kombination aus Mischung 1 und Mischung 8).....	98
Tabelle 66: Humussaldo der Energiefruchtfolge 2C für Marktfruchtbetriebe (ehemaliger Maisanteil über 75 %: Kombination aus Mischung 1 und Mischung 8) in Humusäquivalenten	98
Tabelle 67: Humusbedarf der Energiefruchtfolge 3C für Marktfruchtbetriebe (ehemaliger Maisanteil über 75 %: Kombination aus Mischung 1 und Mischung 10).....	99
Tabelle 68: Humusreproduktion der zugeführten organischen Dünger der Energiefruchtfolge 3C für Marktfruchtbetriebe (ehemaliger Maisanteil über 75%: Kombination aus Mischung 1 und Mischung 10).....	100
Tabelle 69: Humussaldo der Energiefruchtfolge 3C für Marktfruchtbetriebe (ehemaliger Maisanteil über 75%: Kombination aus Mischung 1 und Mischung 10) in Humusäquivalenten	100
Tabelle 70: Gesamtdeckungsbeitrag für die regionstypische Ausgangsfruchtfolge A	101
Tabelle 71: Gesamtdeckungsbeitrag für die regionstypische Ausgangsfruchtfolge B	101
Tabelle 72: Gesamtdeckungsbeitrag für die regionstypische Ausgangsfruchtfolge C	101
Tabelle 73: Gesamtdeckungsbeitrag für die Energiefruchtfolge A (Mischung 13).....	102

Tabelle 74: Gesamtdeckungsbeitrag für die Energiefruchtfolge B (Mischung 8)	102
Tabelle 75: Gesamtdeckungsbeitrag für die Energiefruchtfolge 1C (Mischung 1)	102
Tabelle 76: Gesamtdeckungsbeitrag für die Energiefruchtfolge 2C (Mischung 1 und 8)	103
Tabelle 77: Gesamtdeckungsbeitrag für die Energiefruchtfolge 3C (Mischung 1 und 10)	103

7.4 Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung
°C	Grad Celsius
%	Prozent
ADF	acid detergent fiber
ADL	acid detergent lignin
BE	Bruttoenergie
bzw.	beziehungsweise
C	Kohlenstoff
ca.	cirka
CAP	Kapronsäure
C _{org}	organischer Kohlenstoff
CCM	Corn-Cob-Mix
CH ₄	Methan
cm	Zentimeter
CO ₂	Kohlendioxid
d	Tag(e)
DB	Deckungsbeitrag
DIN	Deutsches Institut für Normung
dt	Dezitonne
EU	Europäische Union
exkl.	exklusiv
FF	Fruchtfolge
FM	Frischmasse
g	Gramm
GC	Gaschromatographie
GDB	Gesamtdeckungsbeitrag
GVE	Großvieheinheit
GWh	Gigawattstunde
H ₂ S	Schwefelwasserstoff
ha	Hektar
HAC	Essigsäure
H-Zell	Hemizellulose
i-BUT	iso-Buttersäure

i-Val	iso-Valeriansäure
K	Kelvin
kg	Kilogramm
kW _{el}	Kilowatt (elektrische Leistung)
kWh	Kilowattstunde
l	Liter
l _N	Normliter
µm	Mykrometer
m	Meter
m ³	Kubikmeter
m ³ _N	Normkubikmeter
ml	Milliliter
ml _N	Normmilliliter
mm	Millimeter
M1 bis M13	Mischungen 1 bis 13
mbar	Millibar
MEW	Methanenergiewert
MEWM	Methanenergiewertmodell
mg	Milligramm
MHE	Methanhektarertrag
Mio.	Millionen
MJ	Megajoule
MW	Mittelwert
MwSt	Mehrwertsteuer
n	Anzahl Beobachtungen
N	Stickstoff
NaCl	Natriumchlorid
n-But	n-Buttersäure
n.d.	nicht detektiert
NDF	neutral detergent fiber
NH ₃	Ammoniak
NH ₄ -N	Ammonium-Stickstoff
N _{org}	organischer Stickstoff
n-VAL	n-Valeriansäure
ÖPUL	Österreichische Programm zur Förderung einer umweltgerechten, extensiven und den natürlichen Lebensraum schützenden Landwirtschaft
oTS	organische Trockensubstanz

ppm	parts per million
PRO	Propionsäure
ROE	Rohöleinheit (Rohöläquivalent)
STABW	Standardabweichung
t	Tonne
TS	Trockensubstanz
TWh	Terawattstunde
u.a.	unter anderem
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
vK	variable Kosten
Vol.%	Volumenprozent
XA	Rohasche
XF	Rohfaser
XL	Rohfett
XP	Rohprotein
XX	N-freie Extraktstoffe
z.B.	zum Beispiel
Zel	Zellulose

8 Anhang

8.1 Anhang Fruchtfolgeberechnungen

8.1.1 Humusbilanzierung der regionstypischen Ausgangsfruchtfolgen

8.1.1.1 Humusbilanzierung der regionstypischen Ausgangsfruchtfolge A

Tabelle 46: Humusbedarf der regionstypischen Ausgangsfruchtfolge A für einen Marktfruchtbetrieb (Maisanteil zwischen 25-50%)

Schlag	Kultur	Anteil in der FF (%)	Schlaggröße (ha)	Humusbedarf (kg Humus-C/Schlag)
1a	Silomais	25	1,0	-560
	ZF als US	25	1,0	+200
2a	Silomais	15	0,6	-336
2b	Sommergerste	10	0,4	-112
3a	Ölkürbis	20	0,8	-224
3b	Körnerleguminosen	5	0,2	+32
4a	Winterweizen	15	0,6	-168
4b	Brache (Klee gras)	10	0,4	+240
Summe Humusbedarf				-928

FF = Fruchtfolge

Tabelle 47: Humusreproduktion der zugeführten organischen Dünger der regionstypischen Ausgangsfruchtfolge A für einen Marktfruchtbetrieb (Maisanteil zwischen 25-50%)

Schlag				Organischer Dünger		Humusreproduktion	
Schlag	Kultur	Anteil FF (%)	Schlag (ha)	Art	Menge (t FM/ha)	kg Humus-C/ t Substrat	kg Humus-C/ Schlag
1a	Silomais	25	1,0	Gülle	42,1	6	253
	ZF als US	25	1,0	Gründüng.	15,0	8	120
2a	Silomais	15	0,6	Gülle	42,1	6	152
2b	Sommergerste	10	0,4				0
		10	0,4	Stroh	3,6	80	115
3a	Ölkürbis	20	0,8				0
3b	Körnerleguminosen	5	0,2				0
4a	Winterweizen	15	0,6				0
		15	0,6	Stroh	4,8	80	230
4b	Brache (Klee gras)	10	0,4				0
Summe Humusreproduktion							+870

FF = Fruchtfolge, FM = Frischmasse, Gründüng. = Gründüngung

Tabelle 48: Humussaldo der regionstypischen Ausgangsfruchtfolge A für einen Marktfruchtbetrieb (Maisanteil zwischen 25-50 %) in Humusäquivalenten

Humusbedarf	Humusreproduktion	Humussaldo (kg Humus-C/ha)	
		je Fruchtfolge	je Jahr
-928	+870	-58	-15

8.1.1.2 Humusbilanzierung der regionstypischen Ausgangsfruchtfolge B

Tabelle 49: Humusbedarf der regionstypischen Ausgangsfruchtfolge B für einen Marktfruchtbetrieb (Maisanteil zwischen 50-75%)

Schlag	Kultur	Anteil in der FF (%)	Schlaggröße (ha)	Humusbedarf (kg Humus-C/Schlag)
1a	Silomais	25	1,0	-560
2a	Silomais	25	1,0	-560
3a	Silomais	15	0,6	-336
3b	Ölkürbis	10	0,4	-112
4a	Brache (Klee gras)	15	0,6	+360
4b	Winterweizen	10	0,4	-112
Summe Humusbedarf				-1320

FF = Fruchtfolge

Tabelle 50: Humusreproduktion der zugeführten organischen Dünger der regionstypischen Ausgangsfruchtfolge B für einen Marktfruchtbetrieb (Maisanteil zwischen 50-75%)

Schlag				Organische Dünger		Humusreproduktion	
Schlag	Kultur	Anteil FF (%)	Schlag (ha)	Art	Menge (t FM/ha)	kg Humus-C/ t Substrat	kg Humus-C/ Schlag
1a	Silomais	25	1,0	Gülle	42,1	6	253
2a	Silomais	25	1,0	Gülle	42,1	6	253
3a	Silomais	15	0,6	Gülle	42,1	6	152
3b	Ölkürbis	10	0,4				0
4a	Brache (Klee gras)	15	0,6				0
4b	Winterweizen	10	0,4				0
		10	0,4	Stroh	5,2	80	166
Summe Humusreproduktion							+824

FF = Fruchtfolge, FM = Frischmasse

Tabelle 51: Humussaldo der regionstypischen Ausgangsfruchtfolge B für einen Marktfruchtbetrieb (Maisanteil zwischen 50-75%) in Humusäquivalenten

Humusbedarf	Humusreproduktion	Humussaldo (kg Humus-C/ha)	
		je Fruchtfolge	je Jahr
-1320	+824	-496	-124

8.1.1.3 Humusbilanzierung der regionstypischen Ausgangsfruchtfolge C

Tabelle 52: Humusbedarf der regionstypischen Ausgangsfruchtfolge C für einen Marktfruchtbetrieb (Maisanteil über 75%)

Schlag	Kultur	Anteil in der FF (%)	Schlaggröße (ha)	Humusbedarf (kg Humus-C/Schlag)
1a	Silomais	25	1,0	-560
2a	Silomais	25	1,0	-560
3a	Silomais	25	1,0	-560
4a	Silomais	15	0,6	-336
4b	Brache (Klee gras)	5	0,2	+120
4c	Ölkürbis	5	0,2	-56
Summe Humusbedarf				-1952

FF = Fruchtfolge

Tabelle 53: Humusreproduktion der zugeführten organischen Dünger der regionstypischen Ausgangsfruchtfolge C für einen Marktfruchtbetrieb (Maisanteil über 75 %)

Schlag				Organische Dünger		Humusreproduktion	
Schlag	Kultur	Anteil FF (%)	Schlag (ha)	Art	Menge (t FM/ha)	kg Humus-C/t Substrat	kg Humus-C/Schlag
1a	Silomais	25	1,0	Gülle	42,1	6	253
2a	Silomais	25	1,0	Gülle	42,1	6	253
3a	Silomais	25	1,0	Gülle	42,1	6	253
4a	Silomais	15	0,6	Gülle	42,1	6	152
4b	Brache (Klee gras)	5	0,2				0
4c	Ölkürbis	5	0,2				0
Summe Humusreproduktion							+911

FF = Fruchtfolge, FM = Frischmasse

Tabelle 54: Humussaldo der regionstypischen Ausgangsfruchtfolge C für einen Marktfruchtbetrieb (Maisanteil über 75 %) in Humusäquivalenten

Humusbedarf	Humusreproduktion	Humussaldo (kg Humus-C/ha)	
		je Fruchtfolge	je Jahr
-1952	+911	-1041	-260

8.1.2 Humusbilanzierung der Energiefruchtfolgen

8.1.2.1 Humusbilanzierung der Energiefruchtfolge A

Tabelle 55: Humusbedarf der Energiefruchtfolge A für einen Marktfruchtbetrieb (ehemaliger Maisanteil zwischen 25-50 %: Mischung 13)

Schlag	Kultur	Anteil in der FF (%)	Schlaggröße (ha)	Humusbedarf (kg Humus-C/Schlag)
1a	Silomais (M13)	25	1,0	-560
	ZF als US	25	1,0	+200
2a	Silomais (M13)	3	0,1	-67
2b	Sonnenblumen (M13)	17	0,7	-190
2c	Körnerleguminosen	5	0,2	+32
3a	Grünroggen (M13)	11	0,4	-123
3b	Brache (Klee gras)	14	0,6	+336
	ZF nach 3a	11	0,4	+53
4a	Zuckerrübe (M13)	11	0,4	-334
4b	Ölkürbis	14	0,6	-157
Summe Humusbedarf				-811

ZF = Zwischenfrucht, US = Untersaat, M13 = Kulturarten, die anteilmäßig zur Mischung M13 gehören, FF = Fruchtfolge

Tabelle 56: Humusreproduktion der zugeführten organischen Dünger der Energiefruchtfolge A für einen Marktfruchtbetrieb (ehemaliger Maisanteil zwischen 25-50 %: Mischung 13)

Schlag				Organische Dünger		Humusreproduktion	
Schlag	Kultur	Anteil FF (%)	Schlag (ha)	Art	Menge (t FM/ha)	kg Humus-C/ t Substrat	kg Humus-C/ Schlag
1a	Silomais (M13)	25	1,0	Gülle	42,1	6	253
	ZF als US	25	1,0	Gründüng.	15,0	8	120
2a	Silomais (M13)	3	0,1	Gülle	42,1	6	30
2b	Sonnenblumen (M13)	17	0,7	Gülle	15,8	6	64
2c	Körnerleguminosen	5	0,2				0
3a	Grünroggen (M13)	11	0,4	Gülle	26,4	6	70
3b	Brache (Klee gras)	14	0,6				0
	ZF nach 3a	11	0,4	Gründüng.	15,0	8	53
4a	Zuckerrübe (M13)	11	0,4	Gülle	29,0	6	77
4b	Ölkürbis	14	0,6	Gülle			0
Summe Humusreproduktion							+666

ZF = Zwischenfrucht, US = Untersaat, M13 = Kulturarten, die anteilmäßig zur Mischung M13 gehören, FF = Fruchtfolge, Gründüng. = Gründüngung, FM = Frischmasse

Tabelle 57: Humussaldo der Energiefruchtfolge A für einen Marktfruchtbetrieb (ehemaliger Maisanteil zwischen 25-50%: Mischung 13) in Humusäquivalenten

Humusbedarf	Humusreproduktion	Humussaldo (kg Humus-C/ha)	
		je Fruchtfolge	je Jahr
-811	+666	-145	-36

8.1.2.2 Humusbilanzierung der Energiefruchtfolge B

Tabelle 58: Humusbedarf der Energiefruchtfolge B für einen Marktfruchtbetrieb (ehemaliger Maisanteil zwischen 50-75%: Mischung 8)

Schlag	Kultur	Anteil in der FF (%)	Schlaggröße (ha)	Humusbedarf (kg Humus-C/Schlag)
1a	Brache (Klee gras) (M8)	10	0,4	+240
1b	Klee gras (M8)	15	0,6	+360
2a	Silomais	25	1,0	-560
	ZF vor 3b-e	21	0,8	+101
3a	Klee gras (M8)	4	0,2	+96
3b	Zuckerrübe (M8)	6	0,2	-182
3c	Silomais (M8)	2	0,1	-45
3d	Sonnenblume (M8)	4	0,2	-45
4a	Ölkürbis	9	0,4	-101
4b	Grünroggen (M8)	25	1,0	-280
Summe Humusbedarf				-416

ZF = Zwischenfrucht, M8 = Kulturarten, die anteilmäßig zur Mischung M8 gehören, FF = Fruchtfolge

Tabelle 59: Humusproduktion der zugeführten organischen Dünger der Energiefruchtfolge B für einen Marktfruchtbetrieb (ehemaliger Maisanteil zwischen 50-75%: Mischung 8)

Schlag				Organische Dünger		Humusproduktion	
Schlag	Kultur	Anteil FF (%)	Schlag (ha)	Art	Menge (t FM/ha)	kg Humus-C/ t Substrat	kg Humus-C/ Schlag
1a	Brache (Kleegras) (M8)	10	0,4				0
1b	Kleegras (M8)	15	0,6				0
2a	Silomais	25	1,0	Gülle	42,1	6	253
	ZF vor 3b-e	21	0,8	Gründung.	15,0	8	101
3a	Kleegras (M8)	4	0,2				0
3b	Zuckerrübe (M8)	6	0,2	Gülle	29,0	6	42
3c	Silomais (M8)	2	0,1	Gülle	42,1	6	20
3d	Sonnenblume (M8)	4	0,2	Gülle	15,8	6	15
4a	Ölkürbis	9	0,4				0
4b	Grünroggen (M8)	25	1,0	Gülle	26,4	6	158
Summe Humusproduktion							+589

ZF = Zwischenfrucht, M8 = Kulturarten, die anteilmäßig zur Mischung M8 gehören, FF = Fruchtfolge, Gründung. = Gründüngung, FM = Frischmasse

Tabelle 60: Humussaldo der Energiefruchtfolge B für einen Marktfruchtbetrieb (ehemaliger Maisanteil zwischen 50-75%: Mischung 8) in Humusäquivalenten

Humusbedarf	Humusproduktion	Humussaldo (kg Humus-C/ha)	
		je Fruchtfolge	je Jahr
-416	+589	+173	+43

8.1.2.3 Humusbilanzierung der Energiefruchtfolgen C

Tabelle 61: Humusbedarf der Energiefruchtfolge 1C für Marktfruchtbetriebe (ehemaliger Maisanteil über 75%: Mischung 1)

Schlag	Kultur	Anteil in der FF (%)	Schlaggröße (ha)	Humusbedarf (kg Humus-C/Schlag)
1a	Körnermais (M1)	22	0,7	-373
1b	Silomais (M1)	11	0,3	-187
	ZF als US	33	1,0	+200
2a	Silomais	17	0,5	-288
2b	Brache (Kleegras)	16	0,5	+291
3a	Sommergerste	25	0,8	-212
3b	Ölkürbis	9	0,3	-76
Summe Humusbedarf				-646

ZF = Zwischenfrucht, US = Untersaat, M1 = Kulturarten, die anteilmäßig zur Mischung M1 gehören, FF = Fruchtfolge

Tabelle 62: Humusreproduktion der zugeführten organischen Dünger der Energiefruchtfolge 1C für Marktfruchtbetriebe (ehemaliger Maisanteil über 75%: Mischung 1)

Schlag				Organische Dünger		Humusreproduktion	
Schlag	Kultur	Anteil FF (%)	Schlag (ha)	Art	Menge (t FM/ha)	kg Humus-C/t Substrat	kg Humus-C/Schlag
1a	Körnermais (M1)	22	0,7	Gülle	36,8	6	147
1b	Silomais (M1)	11	0,3	Gülle	42,1	6	84
	ZF als US	33	1,0	Gründung.	15,0	8	120
2a	Silomais	17	0,5	Gülle	42,1	6	130
2b	Brache (Kleegras)	16	0,5				0
3a	Sommergerste	25	0,8				0
		25	0,8	Stroh	3,6	80	218
3b	Ölkürbis	9	0,3				0
Summe Humusreproduktion							+699

ZF = Zwischenfrucht, US = Untersaat, M1 = Kulturarten, die anteilmäßig zur Mischung M1 gehören, FF = Fruchtfolge, Gründung. = Gründüngung, FM = Frischmasse

Tabelle 63: Humussaldo der Energiefruchtfolge 1C für Marktfruchtbetriebe (ehemaliger Maisanteil über 75%: Mischung 1) in Humusäquivalenten

Humusbedarf	Humusreproduktion	Humussaldo (kg Humus-C/ha)	
		je Fruchtfolge	je Jahr
-646	+699	+53	+18

Tabelle 64: Humusbedarf der Energiefruchtfolge 2C für Marktfruchtbetriebe (ehemaliger Maisanteil über 75 %: Kombination aus Mischung 1 und Mischung 8)

Schlag	Kultur	Anteil in der FF (%)	Schlaggröße (ha)	Humusbedarf (kg Humus-C/Schlag)
1a	Körnermais (M1)	22	0,9	-493
1b	Silomais (M1)	3	0,1	-67
	ZF als US	25	1,0	+200
2a	Silomais (M1)	8	0,3	-179
2b	Silomais (M8)	2	0,1	-45
2c	Sonnenblume (M8)	4	0,2	-45
2d	Zuckerrübe (M8)	6	0,2	-182
2e	Kleegras (M8)	5	0,2	+120
3a	Kleegras (M8)	25	1,0	+600
4a	Grünroggen (M8)	25	1,0	-280
	ZF	25	1,0	+120
Summe Humusbedarf				-251

ZF = Zwischenfrucht, US = Untersaat, M1 = Kulturarten, die anteilmäßig zur Mischung M1 gehören, M8 = Kulturarten, die anteilmäßig zur Mischung M8 gehören, FF = Fruchtfolge

Tabelle 65: Humusreproduktion der zugeführten organischen Dünger der Energiefruchtfolge 2C für Marktfruchtbetriebe (ehemaliger Maisanteil über 75%: Kombination aus Mischung 1 und Mischung 8)

Schlag				Organische Dünger		Humusreproduktion	
Schlag	Kultur	Anteil FF (%)	Schlag (ha)	Art	Menge (t FM/ha)	kg Humus-C/ t Substrat	kg Humus-C/ Schlag
1a	Körnermais (M1)	22	0,9	Gülle	36,8	6	194
1b	Silomais (M1)	3	0,1	Gülle	42,1	6	30
	ZF als US	25	1,0	Gründüng.	15,0	8	120
2a	Silomais (M1)	8	0,3	Gülle	42,1	6	81
2b	Silomais (M8)	2	0,1	Gülle	42,1	6	20
2c	Sonnenblume (M8)	4	0,2	Gülle	15,8	6	15
2d	Zuckerrübe (M8)	6	0,2	Gülle	29,0	6	42
2e	Kleegrass (M8)	5	0,2				0
3a	Kleegrass (M8)	25	1,0				0
4a	Grünroggen (M8)	25	1,0	Gülle	26,4	6	158
	ZF	25	1,0	Gründüng.	15,0	8	120
Summe Humusreproduktion							+781

ZF = Zwischenfrucht, US = Untersaat, M1 = Kulturarten, die anteilmäßig zur Mischung M1 gehören, M8 = Kulturarten, die anteilmäßig zur Mischung M8 gehören, FF = Fruchtfolge, Gründüng. = Gründüngung, FM = Frischmasse

Tabelle 66: Humussaldo der Energiefruchtfolge 2C für Marktfruchtbetriebe (ehemaliger Maisanteil über 75 %: Kombination aus Mischung 1 und Mischung 8) in Humusäquivalenten

Humusbedarf	Humusreproduktion	Humussaldo (kg Humus-C/ha)	
		je Fruchtfolge	je Jahr
-251	+781	+530	+132

Tabelle 67: Humusbedarf der Energiefruchtfolge 3C für Marktfruchtbetriebe (ehemaliger Maisanteil über 75 %: Kombination aus Mischung 1 und Mischung 10)

Schlag	Kultur	Anteil in der FF (%)	Schlaggröße (ha)	Humusbedarf (kg Humus-C/Schlag)
1a	Körnermais (M1)	22	0,9	-493
1b	Silomais (M1)	3	0,1	-67
	ZF als US	25	1,0	+200
2a	Silomais (M1)	8	0,3	-179
2b	Silomais (M10)	11	0,4	-246
2c	Zuckerrübe (M10)	6	0,2	-182
	ZF	25	1,0	+120
3a	Sonnenblume (M10)	19	0,8	-213
3b	Zuckerrübe (M10)	6	0,2	-182
4a	Klee gras (M10)	11	0,4	+264
4b	Klee gras	5	0,2	+120
4c	Grünroggen (M10)	9	0,4	-101
	ZF nach 4c	9	0,4	+43
Summe Humusbedarf				-917

ZF = Zwischenfrucht, US = Untersaat, M1 = Kulturarten, die anteilmäßig zur Mischung M1 gehören, M10 = Kulturarten, die anteilmäßig zur Mischung M10 gehören, FF = Fruchtfolge

Tabelle 68: Humusreproduktion der zugeführten organischen Dünger der Energiefruchtfolge 3C für Marktfruchtbetriebe (ehemaliger Maisanteil über 75%: Kombination aus Mischung 1 und Mischung 10)

Schlag				Organische Dünger		Humusreproduktion	
Schlag	Kultur	Anteil FF (%)	Schlag (ha)	Art	Menge (t FM/ha)	kg Humus-C/ t Substrat	kg Humus-C/ Schlag
1a	Körnermais (M1)	22	0,9	Gülle	36,8	6	194
1b	Silomais (M1)	3	0,1	Gülle	42,1	6	30
	ZF als US	25	1,0	Gründüng.	15,0	8	120
2a	Silomais (M1)	8	0,3	Gülle	42,1	6	81
2b	Silomais (M10)	11	0,4	Gülle	42,1	6	111
2c	Zuckerrübe (M10)	6	0,2	Gülle	29,0	6	42
	ZF	25	1,0	Gründüng.	15,0	8	120
3a	Sonnenblume (M10)	19	0,8	Gülle	15,8	6	72
3b	Zuckerrübe (M10)	6	0,2	Gülle	29,0	6	42
4a	Klee gras (M10)	11	0,4				0
4b	Klee gras	5	0,2				0
4c	Grünroggen (M10)	9	0,4	Gülle	26,4	6	57
	ZF nach 4c	9	0,4	Gründüng.	15,0	8	43
Summe Humusreproduktion							+912

ZF = Zwischenfrucht, US = Untersaat, M1 = Kulturarten, die anteilmäßig zur Mischung M1 gehören, M10 = Kulturarten, die anteilmäßig zur Mischung M10 gehören, FF = Fruchtfolge, Gründüng. = Gründüngung, FM = Frischmasse

Tabelle 69: Humussaldo der Energiefruchtfolge 3C für Marktfruchtbetriebe (ehemaliger Maisanteil über 75%: Kombination aus Mischung 1 und Mischung 10) in Humusäquivalenten

Humusbedarf	Humusreproduktion	Humussaldo (kg Humus-C/ha)	
		je Fruchtfolge	je Jahr
-917	+912	-4	-1

8.2 Anhang Wirtschaftlichkeitsberechnungen

8.2.1 Gesamtdeckungsbeitragsberechnungen für die regionstypischen Ausgangsfruchtfolgen

Tabelle 70: Gesamtdeckungsbeitrag für die regionstypische Ausgangsfruchtfolge A

Schlag	Kultur	Fruchtfolge- anteil (%)	Biogas- substrat	DB/vK (€)
1a	Silomais	25	Ja	-253
2a	Silomais	15	Ja	-152
2b	Sommergerste	10		-3
3a	Ölkürbis	20		130
3b	Körnerleguminosen	5		-11
4a	Winterweizen	15		0
4b	Klee gras	10	Ja	-69
Begrünung				-8
Prämie Begrünung				80
Methan		4094 m ³ N		696
Summe				411

DB = Deckungsbeitrag, vK = variable Kosten, m³N = Normkubikmeter

Tabelle 71: Gesamtdeckungsbeitrag für die regionstypische Ausgangsfruchtfolge B

Schlag	Kultur	Fruchtfolge- anteil (%)	Biogas- substrat	DB/vK (€)
1a	Silomais	25	Ja	-253
2a	Silomais	25	Ja	-253
3a	Silomais	15	Ja	-152
3b	Ölkürbis	10		65
4a	Klee gras	15	Ja	-104
4b	Winterweizen	10		0
Methan		6619 m ³ N		1125
Summe				430

DB = Deckungsbeitrag, vK = variable Kosten, m³N = Normkubikmeter

Tabelle 72: Gesamtdeckungsbeitrag für die regionstypische Ausgangsfruchtfolge C

Schlag	Kultur	Fruchtfolge- anteil (%)	Biogas- substrat	DB/vK (€)
1a	Silomais	25	Ja	-253
2a	Silomais	25	Ja	-253
3a	Silomais	25	Ja	-253
4a	Silomais	15	Ja	-152
4b	Klee gras	5	Ja	-35
4c	Ölkürbis	5		33
Methan		8742 m ³ N		1486
Summe				575

DB = Deckungsbeitrag, vK = variable Kosten, m³N = Normkubikmeter

8.2.2 Gesamtdeckungsbeitragsberechnungen für die Energiefruchtfolgen

Tabelle 73: Gesamtdeckungsbeitrag für die Energiefruchtfolge A (Mischung 13)

Schlag	Kultur	Fruchtfolge- anteil (%)	Biogas- substrat	DB/vK (€)
1a	Silomais	25	Ja	-253
2a	Silomais	3	Ja	-30
2b	Sonnenblumen	17	Ja	-128
2c	Körnerleguminosen	5		-11
3a	Grünroggen	11	Ja	-84
3b	Klee gras	14	Ja	-97
4a	Zuckerrübe	11	Ja	-169
4b	Ölkürbis	14		91
Begrünung				-14
	Gülle	12 m ³		-29
	Prämie Begrünung			80
	Methan	5854 m ³ N		995
Summe				352

DB = Deckungsbeitrag, vK = variable Kosten, m³N = Normkubikmeter

Tabelle 74: Gesamtdeckungsbeitrag für die Energiefruchtfolge B (Mischung 8)

Schlag	Kultur	Fruchtfolge- anteil (%)	Biogas- substrat	DB/vK (€)
1a	Klee gras	10	Ja	-69
1b	Klee gras	15	Ja	-104
2a	Silomais	25	Ja	-253
3a	Klee gras	4	Ja	-28
3b	Zuckerrübe	6	Ja	-92
3c	Silomais	2	Ja	-20
3d	Sonnenblume	4	Ja	-30
3e	Ölkürbis	9		59
4b	Grünroggen	25	Ja	-190
Begrünung				-11
	Gülle	11 m ³		-29
	Prämie Begrünung			80
	Methan	5481 m ³ N		932
Summe				245

DB = Deckungsbeitrag, vK = variable Kosten, m³N = Normkubikmeter

Tabelle 75: Gesamtdeckungsbeitrag für die Energiefruchtfolge 1C (Mischung 1)

Schlag	Kultur	Fruchtfolge- anteil (%)	Biogas- substrat	DB/vK (€)
1a	CCM	22	Ja	-167
1b	Silomais	11	Ja	-111
2a	Silomais	17	Ja	-172
2b	Klee gras	16	Ja	-110
3a	Sommergerste	25		-8
3b	Ölkürbis	9		59
Begrünung				-11
	Gülle	37 m ³		-93
	Prämie Begrünung			80
	Methan	4512 m ³ N		767
Summe				234

DB = Deckungsbeitrag, vK = variable Kosten, m³N = Normkubikmeter

Tabelle 76: Gesamtdeckungsbeitrag für die Energiefruchtfolge 2C (Mischung 1 und 8)

Schlag	Kultur	Fruchtfolge- anteil (%)	Biogas- substrat	DB/vK (€)
1a	CCM	22	Ja	-167
1b	Silomais	3	Ja	-30
2a	Silomais	8	Ja	-81
2b	Silomais	2	Ja	-20
2c	Sonnenblume	4	Ja	-30
2d	Zuckerrübe	6	Ja	-92
2e	Klee gras	5	Ja	-35
3a	Klee gras	25	Ja	-173
4a	Grünroggen	25	Ja	-190
Begrünung				-22
Gülle		18 m ³		-46
Prämie Begrünung				80
Methan		5585 m ³ N		949
Summe				144

DB = Deckungsbeitrag, vK = variable Kosten, m³N = Normkubikmeter

Tabelle 77: Gesamtdeckungsbeitrag für die Energiefruchtfolge 3C (Mischung 1 und 10)

Schlag	Kultur	Fruchtfolge- anteil (%)	Biogas- substrat	DB/vK (€)
1a	CCM	22	Ja	-167
1b	Silomais	3	Ja	-30
2a	Silomais	8	Ja	-81
2b	Silomais	11	Ja	-111
2c	Zuckerrübe	6	Ja	-92
3a	Sonnenblume	19	Ja	-143
3b	Zuckerrübe	6	Ja	-92
4a	Klee gras	11	Ja	-76
4b	Klee gras	5	Ja	-35
4c	Grünroggen	9	Ja	-68
Begrünung				-26
Gülle		21 m ³		-53
Prämie Begrünung				80
Methan		5962 m ³ N		1014
Summe				119

DB = Deckungsbeitrag, vK = variable Kosten, m³N = Normkubikmeter