



Institut für Land-, Umwelt-
und Energietechnik
Universität für Bodenkultur Wien
A-1190 Wien, Nussdorfer Lände 29-31
Tel: +43 1 3189877-92
e-mail: amon@boku.ac.at

Optimierung der Biogaserzeugung aus den Energiepflanzen Mais und Klee gras

Biogas production from the energy crops maize and clover grass

Endbericht Juli 2003

Forschungsprojekt Nr. 1249 GZ 24.002/59-IIA1/01

Im Auftrag des Bundesministeriums
für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt- und Wasserwirtschaft

ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Thomas Amon (Projektleiter) ¹⁾
Dipl.-Ing. Vitaliy Kryvoruchko ¹⁾
Dr. Barbara Amon ¹⁾
Dr. Gerhard Moitzi ¹⁾
Sevim Buga ¹⁾
Dipl.-Ing. Débora Fistarol Lyson ¹⁾
Dr. Evelyn Hackl ¹⁾
Dr. Dragomir Jeremic ¹⁾
ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Werner Zollitsch ²⁾
ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Erich Pötsch ³⁾

¹⁾ Institut für Land-, Umwelt- und Energietechnik (BOKU)

²⁾ Institut für Nutztierwissenschaften (BOKU)

³⁾ Institut für Pflanzenbau und Kulturlandschaft, Abt. Grünland (BAL Gumpenstein)

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	1
1.1.	Potentiale der Biogaserzeugung aus Energiepflanzen	1
1.2.	Neue Rahmenbedingungen der Biogaserzeugung	2
1.2.1.	<i>Richtlinie 2001/77/EG des Europäischen Parlamentes und Rates</i>	3
1.2.2.	<i>Richtlinie Ökostromgesetz</i>	3
1.2.3.	<i>Verordnung BGBl. II Nr. 508/2002</i>	4
1.2.4.	<i>Erlass des Bundesministers für Wirtschaft und Arbeit betreffend der Anerkennung von Biogasanlagen gemäß § 7 Ökostromgesetz</i>	4
2.	Stand des Wissens	6
2.1.	Methanbildungspotential von Energiepflanzen	6
2.2.	Einfluss der Konservierung auf die Methanbildung aus Energiepflanzen	8
3.	Problemstellung	9
4.	Ziele	11
5.	Methoden	13
5.1.	Anbau, Ernte und Probengewinnung von Mais	13
5.2.	Anbau, Ernte und Probengewinnung von Kleegrasmischungen	14
5.3.	Gewinnung des Impfmaterials	18
5.4.	Messen der Biogasproduktion unter Verwendung der Eudiometerapparatur	20
5.5.	Laboranalysen	21
5.6.	Berechnung des spezifischen und des kumulativen Biogasertrages	22
5.6.1.	<i>Versuchsprotokoll</i>	22
5.6.2.	<i>Gasnormvolumen</i>	23
5.6.3.	<i>Gasproduktion des Impfmaterials und korrigiertes Gasnormvolumen</i>	23
5.6.4.	<i>Spezifische Biogasproduktion</i>	24
5.6.5.	<i>Kumulative Biogasproduktion</i>	24
5.7.	Bestimmung der in-Vitro-Verdaulichkeit der Gärrohstoffe beim Einsatz als Grundfutter für Wiederkäuer	24
5.8.	Energetische Bewertung von Gärrohstoffen zur Methanbildung – Methanenergiewert	25
5.9.	Statistische Auswertung	28
5.10.	Versuchsansatz	29
5.10.1.	<i>Kleegrasmischungen</i>	29
5.10.2.	<i>Mais</i>	30
5.11.	Versuchsablauf und - durchführung (Zeittafel)	32
6.	Ergebnisse und Diskussion – Kleegrasmischungen	35
6.1.	Kumulative spezifische Biogausbeute	35
6.2.	Methangehalt im Biogas	38
6.3.	Kumulative spezifische Methanausbeute	38
6.3.1.	<i>Einfluss des Erntezeitpunktes</i>	38
6.3.2.	<i>Einfluss der Konservierung</i>	40
6.4.	Methanenergiewert von Kleegrasmischungen	41
6.4.1.	<i>Inhaltsstoffe der Kleegrasmischungen vor der Vergärung</i>	41
6.4.2.	<i>Methanenergiewert von Kleegrasmischungen</i>	42
6.4.3.	<i>Zusammenhang zwischen Wirkungsgrad der Methangärung (η) und Methanenergiewert von Kleegrasmischungen</i>	44
6.4.4.	<i>Zusammenhang zwischen Kohlenstofftransferfaktor (η_c) und Methanenergiewert von Kleegrasmischungen</i>	45
6.5.	Methanhektarertrag von Kleegrasmischungen	46
7.	Ergebnisse und Diskussion – Silomais	48
7.1.	Frischmasse und Trockenmasseerträge von Silomais	48
7.2.	Kumulative spezifische Biogausbeute	49
7.3.	Methangehalt im Biogas	53
7.4.	Kumulative spezifische Methanausbeute	53

7.4.1.	<i>Einfluss des Erntezeitpunktes</i>	53
7.4.2.	<i>Einfluss der Sorte</i>	58
7.5.	Methanenergiewert von Silomais	62
7.5.1.	<i>Inhaltsstoffe des Silomais vor der Vergärung</i>	62
7.5.2.	<i>Berechnung des Methanenergiewertes von Silomais anhand der Rohnährstoffe</i>	64
7.5.3.	<i>Zusammenhang zwischen Wirkungsgrad der Methangärung (η) und Methanenergiewert von Silomais</i>	65
7.5.4.	<i>Zusammenhang zwischen Kohlenstofftransferfaktor (η_c) und Methanenergiewert von Silomais</i>	66
7.6.	Methanhektarertrag von Silomais	68
8.	Praktische Empfehlungen	70
9.	Literaturverzeichnis	73

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand unter Leitung des Institutes für Land-, Umwelt- und Energietechnik der Universität für Bodenkultur. Das breite Themenspektrum wurde in einer interdisziplinären Forschungsk Kooperation bearbeitet, an der folgende Partner beteiligt waren: Institut für Pflanzenbau und Kulturlandschaft der Bundesanstalt für Alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein, die Abteilungen Landtechnik und Pflanzenbau der Landeskammer für Land- und Forstwirtschaft Steiermark, das Institut für Nutztierwissenschaften und die Versuchswirtschaft Groß-Enzersdorf der Universität für Bodenkultur Wien.

Dank gilt dem Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, der Firma Pioneer Saaten Ges.m.b.H. Parndorf und der Landeskammer für Land- und Forstwirtschaft Steiermark für die finanzielle Unterstützung des Forschungsvorhabens.

Umfangreiche Sortenanbauversuche wurden von der Landeskammer für Land- und Forstwirtschaft Steiermark und der Versuchswirtschaft Groß-Enzersdorf unter Leitung von Dr. Karl Mayer und Dr. Helmut Wagentristl durchgeführt. Sie waren die Basis für die Gewinnung der Silomaisproben. Allen Mitarbeitern sei an dieser Stelle herzlich für Ihren zuverlässigen Einsatz gedankt.

Die BAL Gumpenstein hat unter Leitung von Univ.Doiz. Dipl.-Ing. Dr. Erich Pötsch umfangreiche Untersuchungen verschiedener Sortenmischungen für Grünland und Ackerfutter durchgeführt. Die Gärrohstoffproben wurden gewonnen, aufbereitet und konserviert und dem ILUET zur Verfügung gestellt. Die In-vitro-Verdaulichkeit der Gärrohstoffproben beim Wiederkäuer wurde unter Leitung von Ing. Reinhard Resch untersucht.

Im Projektverlauf hat sich ein fachlich intensives und angenehmes Diskussionsklima in pflanzenbaulichen Fragestellungen zu Dipl.-Ing. Günther Reichenberger, Dr. Joachim Kramer und Dr. Felix Rudolph (Pioneer Saaten Ges.m.b.H.) und zu Dr. Karl Mayer (Landeskammer für Land- und Forstwirtschaft Steiermark) entwickelt.

Durch das Engagement und die Hilfsbereitschaft von Herrn Alfred Weihs und Frau Beatrix Widhalm (Institut für Nutztierwissenschaften) wurde die Analyse großer Probemengen in kurzer Zeit möglich. Herr Ing. Thomas Ebner (Institut für Wasserversorgung, Gewässerökologie und Abfallwirtschaft der BOKU) unterstützte uns tatkräftig bei der Analyse des CH₄-Gehaltes im Biogas.

Für die angenehme fachliche Begleitung in allen Belangen der Praxis sind wir Herrn Dipl.-Ing. Josef Plank (Landeskammer für Land- und Forstwirtschaft Steiermark) sehr verbunden.

Wien, im Juli 2003

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

Zusammenfassung

Das neue Ökostromgesetz schafft in der österreichischen Energiepolitik erstmals den rechtlichen Rahmen für eine zukunftsweisende Biogaserzeugung aus Energiepflanzen. 180 bis 240 landwirtschaftliche Biogasanlagen stehen zur Errichtung an. Diese Anlagen müssen bis zum 31.12.2004 genehmigt sein und bis zum 30.06.2006 in Betrieb gehen, um als Ökostromanlagen zu gelten.

Mais und Klee gras haben als Gärrohstoffe für die Biogaserzeugung eine zentrale Bedeutung. Die Wirtschaftlichkeit der Biogasproduktion wird von mehreren Faktoren bestimmt: Methanausbeute aus den Gärrohstoffen, Methanertrag pro Hektar, vollwertige und rationelle Nährstoffversorgung der Mikroorganismen im Fermenter und richtige Fermentergröße. Die genaue Kenntnis über den spezifischen Methanertrag und den Methanhektarertrag von Klee grasmischungen und Mais sind daher für Investitionsentscheidungen und für die Leistungsauslegung von Biogasanlagen vordringlich wichtig. Das Methanbildungsvermögen – der Methanenergiewert (MEW) – der Gärrohstoffe Mais und Klee gras muss genau berechnet werden können.

Der Stoff- und Energieumsatz bei der anaeroben Vergärung von Klee grasmischungen und Mais wurde im Eudiometer-Batch-Experiment bei 40 °C untersucht. Die verwendeten Gärrohstoffe wurden aus Sortenversuchen verschiedener Standorte gewonnen. Zum Einsatz kamen früh bis spätreife Silomaisorten vom Trockenstandort Groß-Enzersdorf (PR 39 G12, Sandrina, Clarica, Monalisa, Ribera) und vom Standort Ludersdorf/Steiermark, einem Gunstandort für den Maisanbau (Benicia, Ribera, Phönix, Atalante, Saxxo). Bei Klee gras wurden die Mischungen Feldfutter-Intensivmischung (IM), Dauerwiesenmischung (DM) und Klee grasmischung (KM) vom Standort Gumpenstein/Ennstal verwendet. Ernte und Ertragsermittlung der Gärrohstoffe erfolgten im Verlauf der Vegetation jeweils zu drei verschiedenen Zeitpunkten. Der Einfluss der Silage- und Heubereitung auf das Methanbildungsvermögen der Gärrohstoffe wurde ebenfalls untersucht. Dazu wurde die Methanbildung von grünen, nicht silierten Gärrohstoffen und von Silage und Heu des selben Erntezeitpunktes verglichen.

Zur praktischen Kalkulation des Methanbildungsvermögens und des Energiestoffwechsels der Gärrohstoffe wurde ein neues System – das Methanenergiewertsystem (MEWS) – entwickelt. Es basiert auf der Kenntnis des Methanbildungsvermögens von Biomasse bei bekannten Gehalten der Inhaltsstoffe Rohprotein (XP), Rohfett (XF), Rohfaser (XL) und N-freie Extraktstoffe (XX). Mit dieser, für die Biogaserzeugung neuen Methode wird die Bewertung des Methanbildungsvermögens von Gärrohstoffen anhand der Konzentration ihrer Inhaltsstoffe möglich. Der Methanenergiewert (MEW) von Gärrohstoffen zeigt das Methanbildungsvermögen einzelner Rohnährstoffe, wenn diese in Form eines natürlichen Gärrohstoffes den Mikroorganismen im Fermenter verabreicht werden. Das neue Methanenergiewertsystem (MEWS) kann als Instrument für die optimale Biogaserzeugung in folgenden wichtigen Bereichen eingesetzt werden:

- zur Kalkulation des spezifischen Methanbildungsvermögens von Gärrohstoffen anhand ihrer Rohnährstoffe;
- zur Nährstoffbedarfskalkulation für die Biogaserzeugung;
- zur Berechnung der energetischen Leistung von Biogasanlagen abhängig von Art, Menge und Zusammensetzung von Gärrohstoffen;
- für Sortenempfehlungen und für die Bestimmung des optimalen Erntezeitpunktes für Energiepflanzen;
- für die Kalkulation von Methanhektarerträgen von Energiepflanzenarten, -sorten und Fruchtfolgen.

Die Maissorten zeigten ein charakteristisches spezifisches Methanbildungsvermögen, welches wesentlich vom Gehalt und dem Verhältnis der Nährstoffkomponenten zueinander abhängig war. Nährstoffmuster und -gehalt werden am stärksten vom Stadium der Vegetationsentwicklung der Pflanzen beeinflusst. Darüber hinaus besteht eine Standort- und Sortenabhängigkeit.

Besonders gut eignen sind Sorten mit hohem Eiweiß- und Fettgehalt und hohem standortspezifischem Biomassebildungsvermögen. Die Rohfaser ist für die Methanbildung von geringem Wert. Die N-freien Extraktstoffe mindern das Methanbildungsvermögen von Silomaissilage leicht. Die Silomaissorten des Standortes Ludersdorf zeigten in Bezug auf die Ertragsfaktoren Biomasseertrag, spezifisches Methanbildungsvermögen und Methanhektarertrag zum optimalen Erntezeitpunkt folgende Kennwerte: *Benicia* 34,57 t oTS/ha; 247,45 NI CH₄/kg oTS; 8.529 Nm³ CH₄/ha; *Ribera*: 24,71 t oTS/ha; 261,05 NI CH₄/kg oTS; 6.451 Nm³ CH₄/ha; *Phönix*: 20,76 t oTS/ha; 286,49 NI CH₄/kg oTS; 5.946 Nm³ CH₄/ha; *Atalante*: 25,69 t oTS/ha; 205,83 NI CH₄/kg oTS; 5.288 Nm³ CH₄/ha; *Saxxo*: 34,20 t oTS/ha; 231,80 NI CH₄/kg oTS; 7.927 Nm³ CH₄/ha. Der optimale Erntetermin war für die Sorten Benicia, Saxxo und Atalante im Vegetationsstadium „Teigreife der Körner“ erreicht. Für die Sorten Ribera und Phönix lag der optimale Erntetermin schon im Vegetationsstadium der „Milchreife der Körner“. Die Sorten des Standortes Groß-Enzersdorf (PR 39 G12, Sandrina, Clarica, Monalisa und Ribera) erreichten alle den optimalen Erntezeitpunkt im Vegetationsstadium „Teigreife der Körner“. Auf guten bis sehr guten Standorten eignen sich späte Sorten besser als frühe, da auf guten Standorten spätreife Sorten ihr Biomassebildungsvermögen besser ausnutzen können als frühreife Sorten. Bis zum Vegetationsstadium „Vollreife der Pflanzen“ nahm der Methanhektarertrag im Vergleich zum Optimum durch Bruchverluste und Rückgang der spezifischen Methanbildung um bis zu 40 % ab. Bei Mais bewirkte die Silagebereitung im Vergleich zur Nutzung frischer, nicht konservierter Biomasse einen Mehrertrag an Methan von 15 %.

Nach 39 – 42 Gärtagen waren 95 % der maximal erreichbaren Methanmenge aus den Silomaissilagen gebildet worden. Daraus ergibt sich für die Praxis unter Berücksichtigung eines Sicherheitszuschlages von 10 % eine erforderliche hydraulische Verweilzeit von 41 – 44 Gärtagen, bei einer Gärtemperatur von 40°C.

Bei Klee gras zeigten die untersuchten Mischungen zum jeweiligen Erntezeitpunkt ein ähnlich spezifisches Methanbildungsvermögen. Die Rohnährstoffgehalte und das Nährstoffmuster der Klee grasmischungen waren zum jeweiligen Vegetationsstadium der Bestände ebenfalls ähnlich.

Das spezifische Methanbildungsvermögen der Klee grasmischungen wurde am stärksten von der Vegetationsentwicklung der Pflanzenbestände zum Zeitpunkt der Ernte bestimmt.

Besonders gut geeignet sind Sortenmischungen, die einen hohen Rohprotein- und Rohfettgehalt in der Silage aufweisen. Rohfaser und N-freie Extraktstoffe trugen wenig zur Methanbildung der Klee grassilagen bei. Die Klee grasmischungen des Standortes Gumpenstein zeigten bei einer Dreischnittnutzung einen Biomasseertrag von 5,5 bis 6,4 t oTS pro Hektar. In Bezug auf die Ertragsfaktoren spezifisches Methanbildungsvermögen und Methanhektarertrag wurden im optimalen Erntezeitpunkt folgende Kennwerte erreicht: *Feldfutter-Intensivmischung (IM)*: 369,67 NI CH₄/kg oTS; 2.033 – 2.366 bis Nm³ CH₄/ha; *Klee grasmischung (KM)*: 390,40 NI CH₄/kg oTS; 2.147 – 2.499 bis Nm³ CH₄/ha. Für die Silagebereitung war unter den Wachstumsbedingungen und Standortverhältnissen des Ennstals bei allen Sortenmischungen das Vegetationsstadium „im Ähren-/Rispen schieben“ optimal. Abweichungen vom optimalen Erntetermin durch zu späte Ernte verursachten Ertragsminderungen der Methanmenge pro Hektar um bis zu 25 %. Die Heubereitung bewirkte im Vergleich zu grüner, nicht konservierter Biomasse einen Mehrertrag an Methan von 12 %. Durch die Silagebereitung wurde ein Mehrertrag vom 26 % erreicht.

Nach 41 – 44 Gärtagen waren 95 % der möglichen Methanmenge aus den Kleegrassilagen und dem Heu gebildet worden. Für die Praxis ergibt sich daraus bei einem Sicherheitszuschlag von 10 % für Klee gras eine erforderliche hydraulische Verweilzeit von 45 – 47 Gärtagen bei einer Gärtemperatur von 40°C.

Executive Summary

A recently issued law on green electricity production forms the legal frame for a forward-looking biogas production from energy crops. 180 to 240 new agricultural biogas plants will be built in Austria in the near future. They must be authorised until 2004-12-31 and go on line until 2006-06-30 to be acknowledged as installations that are covered by the new law on green electricity production.

Maize and clover grass are of vital importance for biogas production from energy crops. Economic efficiency is influenced by the following factors: methane yield from maize and clover grass, methane yield per hectare, adequate and efficient nutrient supply to micro-organisms in the digester and optimum digester size. Decisions on the investment in agricultural biogas production and calculation of the size of the biogas plant are only possible if reliable data are available on specific methane yield and on methane yield per hectare that can be expected from anaerobic digestion of maize and clover grass. The potential to produce methane – the methane energy value – of maize and clover grass must be exactly calculable. Substance and energy turnover during anaerobic digestion of clover grass and maize were measured in eudiometer batch experiments at 40 °C. Raw materials were grown in several trials with different varieties at various locations. Early to late ripening maize varieties were grown in the dry region of Groß-Enzersdorf/Lower Austria (PR 39 G12, Sandrina, Clarica, Monalisa, Ribera) and at Ludersdorf/Styria, which is a favourable region for maize production (Benicia, Ribera, Phönix, Atalante, Saxxo). Clover grass was grown in an Alpine region (Gumpenstein/Styria) as intensive forage mixture, as permanent grassland mixture and as clover grass mixture. Maize and clover grass were harvested at three different stages of vegetation to find the optimum harvesting time. Influence of silaging and drying on methane yield was investigated, as well.

A new system – the methane energy value system – was developed. It enables the calculation of the methane production potential and of the energy metabolism of anaerobic digestion of maize and clover grass. If the nutrient content of organic substrates is known, then their methane production potential can be estimated. Methane production is estimated from raw protein, raw fat, crude fibre and from nitrogen free extracts. The methane energy value gives

the methane production potential of nutrients if these are fed as natural organic substrates. The new methane energy value system helps to optimise biogas production by the following capabilities:

- estimation of the methane production of organic substrates from their nutrient composition;
- estimation of the nutrient requirement of micro-organisms that are responsible for anaerobic digestion;
- estimation of the power of agricultural biogas plants in dependency of amount and composition of organic substrates that are digested;
- recommendations on varieties and optimum harvesting time of energy crops;
- estimation of methane yield per hectare of energy crops, varieties and crop rotations.

The maize varieties that were included in the experiments showed a characteristic methane production potential that was strongly dependent on their nutrient content and on the nutrient composition. The latter was mainly determined by the stage of vegetation. Location of maize production and variety also influenced the nutrient composition of maize silage.

Varieties with a high protein and fat content and with a high potential for biomass production were especially suitable for anaerobic digestion. Crude fibre did not give much methane. Nitrogen free extracts slightly reduced methane formation during anaerobic digestion of maize silage. Maize grown at Ludersdorf/Styria gave the following values on biomass yield, specific methane production and methane yield per hectare: *Benicia* 34.57 t oTS ha⁻¹; 247.45 Nl CH₄ (kg oTS)⁻¹; 8,529 Nm³ CH₄ ha⁻¹; *Ribera*: 24.71 t oTS ha⁻¹; 261.05 Nl CH₄ (kg oTS)⁻¹; 6,451 Nm³ CH₄ ha⁻¹; *Phönix*: 20.76 t oTS ha⁻¹; 286.49 Nl CH₄ (kg oTS)⁻¹; 5,946 Nm³ CH₄ ha⁻¹; *Atalante*: 25.69 t oTS ha⁻¹; 205.83 Nl CH₄ (kg oTS)⁻¹; 5,288 Nm³ CH₄ ha⁻¹; *Saxxo*: 34.20 t oTS ha⁻¹; 231.80 Nl CH₄ (kg oTS)⁻¹; 7,927 Nm³ CH₄ ha⁻¹. Optimum harvesting time of *Benicia*, *Saxxo* and *Atalante* was in the vegetation stage “wax ripeness”, and of *Ribera* and *Phönix* in the vegetation stage of “milk ripeness”. At Groß-Enzersdorf, all varieties (PR 39 G12, *Sandrina*, *Clarica*, *Monalisa* and *Ribera*) were to be best harvested at “wax ripeness”. On good or very good locations, late ripening varieties should be grown as these make better use of their potential of biomass production. Due a reduction in specific methane production, methane yield per hectare declined at the vegetation stage “full ripeness”. Up to 40 % less methane was produced compared to the optimum harvesting time. Silaging of maize resulted in an 15 % increase in methane production compared to green, unconserved maize. 95 % of maximum methane production was reached after 39 – 42 days of anaerobic digestion. For commercial biogas plants, a 10 % excess charge is added to this value. This results in a hydraulic residence time of 41 – 44 days at 40 °C.

The three clover grass mixtures did not significantly differ in their nutrient composition and in their specific methane production potential. Harvesting time was the key factor that determined methane production from anaerobic digestion of clover grass mixtures. Protein and fat content increased methane yield. Crude fibre and nitrogen free extracts contributed only little to net total methane yield. Clover grass mixtures grown in an Alpine region (Gumpenstein/Styria) yielded 5.5 to 6.4 t oTS per hectare with three crops. The following specific methane productions and methane yields per hectare were measured: *intensive forage mixture*: 369.67 Nl CH₄ (kg oTS)⁻¹, 2,033 – 2,366 Nm³ CH₄ ha⁻¹; *clover grass mixture*: 390.40 Nl CH₄ (kg oTS)⁻¹, 2,147 – 2,499 Nm³ CH₄ ha⁻¹. Harvesting at the vegetation stage „ear emergence“ resulted in the highest methane yield. Harvesting at a later stage reduced methane yield up to 25 %. Drying increased methane yield by 12 % compared to non conserved, green clover grass. When clover grass mixtures were conserved by silaging, 26 % more methane were produced.

95 % of maximum methane production was reached after 41 – 44 days of anaerobic digestion of clover grass silage. For commercial biogas plants, a 10 % excess charge is added to this value. This results in a hydraulic residence time of 45 – 47 days at 40 °C.

Verzeichnis der Größen, Einheiten und Abkürzungen

<i>Größe</i>	<i>Formelzeichen / Abkürzung</i>	<i>Einheit</i>	<i>Zeichen</i>
Abbaubarkeit der Energie	D _E		
Abbaubare Energie	DE		
Acid detergent fiber	ADF	% i.d.TM	
Acid detergent lignin	ADL	% i.d. TM	
Ammoniumstickstoff	NH ₄ -N	g / l FM	
Bruttoenergie	GE	Megajoule	CAL / MJ
Cellulose	ZEL	% i.d. TM	
Dauerwiesenmischung	DM		
Druck	P	Pa	Bar
Feldfutterintensivmischung	IM		
Frischmasse	FM		
Gesamtstickstoff	N _t	g / l FM	
Hemicellulose	H-ZEL	% i.d. TM	
Kleegrasmischung	KM		
Kohlenstoff	C		
Kohlenstofftransferfaktor	η _c	%	
Masse	m	Gramm/ Kilogramm / Dezitonne/Tonne	g / kg / dt/ t
Methanergie	CH ₄ -E	MJ / kg oTS	
Methanenergiewert	MEW	NI CH ₄ / kg oTS ⁻¹	
Methanenergiewertsystem	MEWS		
Nachwachsende Rohstoffe	NAWAROS		
Nettoenergie-Laktation	NEL	MJ	
Neutral detergent fiber	NDF	% i.d. TM	
Normliter / Normkubikmeter		NI / Nm ³	
Organische Trockensubstanz	oTS	% i.d. FM	
Rohprotein	XP	% i.d. TM	
Rohfett	XL	% i.d. TM	
Rohfaser	XF	% i.d. TM	
Temperatur	T	Grad Celsius	°C
Trockensubstanz	TS	% i.d.FM	
Umsetzbarkeit der Energie	q		
Umsetzbare Energie	ME	MJ / kg oTS	
N-freie Extraktstoffe	XX	% i.d. TM	
Verdaulichkeit der organischen Masse (in vitro)	dOM	%	
Verwertung der umsetzbaren Energie für die Methanbildung	k		
Volumen	V	Liter / Milliliter	ml / l
Wirkungsgrad d. Methangärung	η	%	

1. Einleitung und Problemstellung

1.1. Potentiale der Biogaserzeugung aus Energiepflanzen

Biogas ist ein regenerativer Energieträger, der bei der anaeroben Vergärung organischer Materialien entsteht. In Österreich wird Biogas heute in modernen landwirtschaftlichen ÖKL-EU-ALTENER Biogasanlagen erzeugt. Als Substrate dienen vor allem Wirtschaftsdünger wie Fest- und Flüssigmist. Nachwachsende Energiepflanzen können für die Biogaserzeugung stark an Bedeutung gewinnen. Mais, Wiesengras, Klee gras, Sudangras, Miscanthus, Futterrüben, Zuckerrübenblätter u.a.m. eignen sich zur Energieerzeugung in landwirtschaftlichen Biogasanlagen.

Die Zahl der Biogasanlagen in Österreich nimmt laufend zu. Derzeit sind ca. 150 Anlagen in Betrieb. In den vergangenen vier Jahren hat sich die Zahl der Biogasanlagen verdoppelt. Seit 1999 stieg die installierte elektrische Leistung von 5,2 MW auf heute 7,2 bis 8,0 MW. Die installierte elektrische Leistung neuer Biogasanlagen liegt in der Regel über 100 kW.

Bei der gemeinsamen Vergärung von Wirtschaftsdüngern und Energiepflanzen in Biogasanlagen könnten in Österreich jährlich etwa 4.900 GWh elektrischer Strom und 6.700 GWh Wärme erzeugt werden. Das entspricht ca. 10 % der inländischen Stromerzeugung oder dem optimierten Wärmeenergiebedarf von 448.000 Einfamilienhäusern (AMON ET AL. 2001b).

Die Biogaserzeugung aus Wirtschaftsdüngern und Energiepflanzen kann auch einen wesentlichen Beitrag zum Klimaschutz leisten. Jährlich können klimarelevante Emissionen um mehr als 5 Mio. t CO₂-Äquivalente vermindert werden (AMON ET AL. 2000a, 2000b, 2001a, 2001b).

Neben den wichtigen ökologischen Wirkungen in den Bereichen des Umwelt- und Klimaschutzes ergeben sich wesentliche sozioökonomische Vorteile durch den Bau und Betrieb der Biogasanlagen. Die Entwicklung ländlicher Räume wird gefördert. Neue Arbeitsplätze in ländlichen Regionen werden geschaffen. Für die Betreiber landwirtschaftlicher Biogasanlagen ist außerdem die verbesserte Düngewirkung des vergorenen Düngers und die damit einhergehende Einsparung beim Düngerzukauf von Bedeutung. Während und nach der Ausbringung des Gärrückstandes als Dünger ist eine wesentliche Minderung der Geruchsbelastung zu erwarten.

In vielen Fällen können die Potentiale der Biogaserzeugung aus Energiepflanzen jedoch nicht oder nur sehr eingeschränkt genutzt werden. Ein wesentlicher Grund dafür ist, dass bei der Vergärung von Energiepflanzen häufig Gärstörungen auftreten, die zum völligen Erliegen der Biogasproduktion führen können. Außerdem sind die Methanerträge ertragsoptimierter Energiepflanzenarten und -sorten noch wenig bekannt, weshalb eine zuverlässige Kalkulation der Wirtschaftlichkeit der Biogaserzeugung oft nicht möglich ist. Um das Potential der Energiegewinnung aus Energiepflanzen optimal ausnutzen zu können, müssen die Gäreigenschaften der Pflanzen und die optimalen Prozessparameter bekannt sein. Es muss herausgefunden werden, welches Reifestadium und welche Konservierungsform von Energiepflanzen hohe Gasausbeuten und einen sicheren Anlagenbetrieb ermöglichen.

Wie bedeutend die wissenschaftliche Untersuchung und Optimierung der Methangärung ist, zeigt eine Umfrage unter 100 bayerischen Biogaserzeugern (KÖTTNER 2000). Bei 70 der 100 befragten Biogaserzeuger kam es im Laufe des Betriebes durchschnittlich 1,8mal zum völligen Erliegen des Biogasprozesses und zum Stillstand der Biogasanlagen. Als Ursachen

für die Störungen und Betriebsausfälle wurden Fehler im Verfahrensablauf und Störungen der Biologie des Gärprozesses genannt. Solche Ausfälle bedeuten neben einer erheblichen Arbeitsbelastung auch große wirtschaftliche Einbußen. Sie können durch Richtlinien zum optimalen Management der Biogasanlage vermieden werden. Durch eine optimale Versorgung der Biogasanlagen mit Nährstoffen wird die Betriebssicherheit der Anlagen erhöht und gleichzeitig die Methanausbeute aus den Gärsubstraten maximiert.

1.2 Neue Rahmenbedingungen der Biogaserzeugung

Das neue Ökostromgesetz schafft in der österreichischen Energiepolitik erstmals den rechtlichen Rahmen für eine zukunftsweisende Biogaserzeugung aus Wirtschaftsdüngern, nachwachsenden Rohstoffen und organischen Abfällen. Aus diesen landwirtschaftlichen Rohstoffen können ca. 2.000 MW Gesamtleistung in Form von Strom und Wärme erzeugt werden. Damit liegen die wesentlichen Potentiale der Biogaserzeugung in der Landwirtschaft. Um dieses Potential umsetzen zu können, sind 4.000 bis 6.000 Biogasanlagen erforderlich. Das landwirtschaftliche Potential wird derzeit nur zu rund 5 % (ca. 150 Biogasanlagen) ausgenutzt. Ausgelöst durch die Zielvorgaben des Ökostromgesetzes stehen in Österreich unmittelbar 180 bis 240 Biogasanlagen von landwirtschaftlichen Betrieben zur Errichtung an, deren Leistung zwischen 75 kW und 1 MW liegen wird. Diese Anlagen müssen bis zum 31.12.2004 genehmigt sein und bis zum 30.06.2006 in Betrieb gehen, damit sie als Ökostromanlagen gelten.

Die Biogaserzeugung stellt einen relativ neuen Genehmigungsgegenstand dar, für den bislang erst wenige Erfahrungen vorliegen. Verschiedenste Rechtsbereiche können berührt werden, innerhalb derer zum Teil neue Rechtslagen bestehen. Die Biogaserzeugung ist derzeit von einer starken technischen Entwicklung gekennzeichnet. Biogasanlagen sollen kostengünstig errichtet und wirtschaftlich betrieben werden. Die Planung und das Bewilligungsverfahren sollen erheblichen technischen und sicherheitstechnischen Anforderungen genügen und zeitökonomisch durchgeführt werden. Für Projektwerber, Planer und zuständige Behörden sind deshalb verbindliche, klare, transparente und möglichst einheitliche Genehmigungserfordernisse mit aktuellen technischen Kennwerten für anstehende Bewilligungsverfahren hilfreich (AMON ET AL. 2003b)

Seit Jahresanfang gelten neue Einspeisetarife für Ökostrom aus Biomasseanlagen. Die Ökostromverordnung als Folge des Ökostromgesetzes regelt die Preise für die Abnahme elektrischer Energie aus Ökostromanlagen. Durch diese nationale gesetzliche Maßnahme soll auch landwirtschaftlichen Biogasanlagen ein wirtschaftlicher Betrieb durch langfristig abgesicherte Tarife ermöglicht werden. Diese nationale Offensive stellt einen Meilenstein in der österreichischen Energiepolitik dar und findet ihre Grundlage in der Richtlinie 2001/77/EG des Europäischen Parlamentes und Rates, die der Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen im Elektrizitätsbinnenmarkt dient. Die Europäische Union setzt durch den Erlass dieser Richtlinie wiederum die weltweiten Anstrengungen zur Bekämpfung der globalen Erwärmung in ihrem Wirkungsbereich um, die im Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen festgesetzt wurden (Abb. 1).

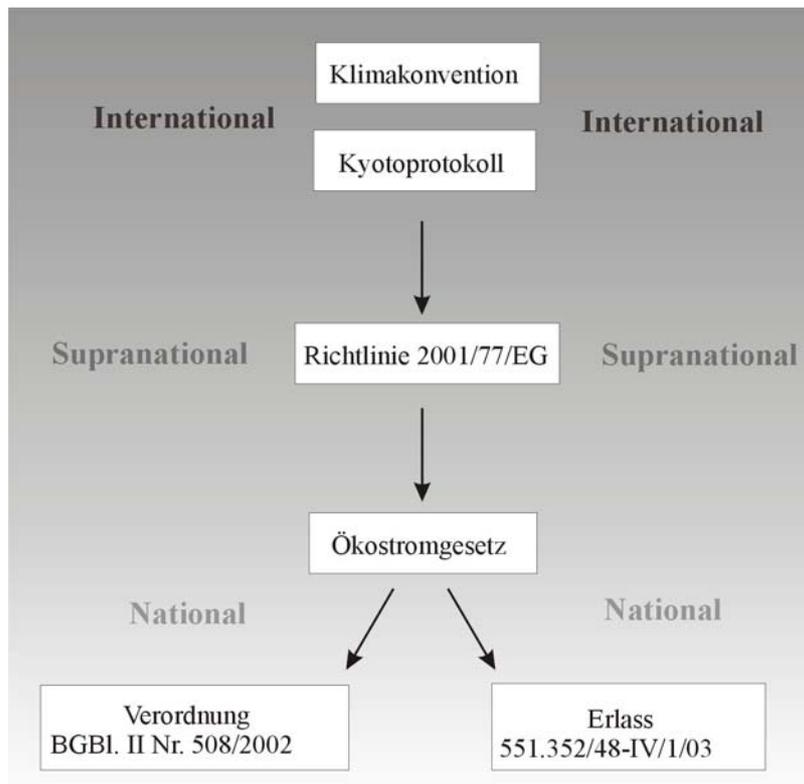


Abbildung 1. Maßnahmen auf nationaler, supranationaler und internationaler Ebene zur Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen

1.2.1. Richtlinie 2001/77/EG des Europäischen Parlamentes und Rates

Die Richtlinie 2001/77/EG des Europäischen Parlamentes und Rates zur Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen im Elektrizitätsbinnenmarkt ist am 27.09.2001 in Kraft getreten und muss von den Mitgliedstaaten bis zum 27.10.2003 in nationales Recht umgesetzt werden. Sie sieht die Erhöhung des Anteils der erneuerbaren Energiequellen am Gesamtstromverbrauch der EU von 13,9 % (1997) auf 22 % im Jahr 2010 vor. Im Falle Österreichs bedeutet dies – durch den relativ hohen Anteil an Wasserkraft – eine Steigerung des Anteils der erneuerbaren Energiequellen am Bruttoinlandsstromverbrauch von 70 % (1997) auf 78,1 % im Jahr 2010.

1.2.2. Ökostromgesetz

Die Umsetzung der Vorgaben der EU-Richtlinie 2001/77/EG in österreichisches Recht erfolgte durch den Beschluss des Ökostromgesetzes am 03.07.2002 im Wirtschaftsausschuss und am 10.07.2002 im Plenum des Nationalrates. Dieses Gesetz sieht unter anderem – in Weiterführung des bereits mit dem Elektrizitätswirtschafts- und -organisationsgesetz (ELWOG) begonnenen Weges – die langfristige Erreichung eines Anteils von 4 % an „Ökostrom“ an der Stromversorgung Österreichs vor. Das Ökostromgesetz regelt eine einheitliche *Abnahmepflicht* für Strom aus bestimmten erneuerbaren Energiequellen zu festen Einspeisetarifen (*Vergütungspflichten*), um im Jahr 2010 gemäß § 4 Abs. 1 das Richtlinienziel von 78,1 % Stromerzeugung aus erneuerbaren Energieträgern zu erreichen. Wesentliche Grundlagen des Ökostromgesetzes sind:

- Interesse an Klima- und Umweltschutz
- Erreichen des Zielwertes von 78,1 % bis 2010
- Bundeseinheitliche Regelung und bundesweiter Ausgleich der Lasten der Förderung

- Steigern der Kosteneffizienz
- Fördern neuer Technologien (Schwerpunktsetzung)
- Investitionssicherheit für künftige Anlagen (13 Jahre Garantie für Einspeisetarife)

1.2.3. Verordnung BGBl. II Nr. 508/2002

In der Verordnung BGBl. II Nr. 508/2002 des Bundesministers für Wirtschaft und Arbeit werden die Preise für die Abnahme elektrischer Energie aus als Ökostromanlagen anerkannten Kleinwasserkraftanlagen (§ 5 Abs. 1 Z 19 Ökostromgesetz) und aus sonstigen Anlagen (§ 5 Abs. 1 Z 12 Ökostromgesetz), denen nach dem 31.12.2002 die für die Errichtung notwendigen Genehmigungen erteilt worden sind, festgesetzt. Diese Verordnung gilt ausschließlich für Neuanlagen, die bis 31.12.2004 genehmigt sind und bis 30.06.2006 in Betrieb gehen. Die in der Verordnung enthaltenen Tarife gelten für die Abnahme elektrischer Energie ab Inbetriebnahme der Anlage für einen Zeitraum von 13 Jahren. Für Ökostrom aus Biogasanlagen wurden die in Tabelle 1 angeführten Tarife festgelegt.

Tabelle 1. Tarife für Ökostrom aus Biogasanlagen

Anlagen mit einer Engpassleistung bis einschließlich 100 kW	16,50 Cent/kWh
Anlagen mit einer Engpassleistung von mehr als 100 kW bis 500 kW	14,50 Cent/kWh
Anlagen mit einer Engpassleistung von mehr als 500 kW bis einschl. 1 MW	12,50 Cent/kWh
Anlagen mit einer Engpassleistung von mehr als 1 MW	10,30 Cent/kWh
Bei Einsatz von Biogas bei Kofermentation werden diese festgesetzten Tarife um 25 % reduziert.	

Die Höhe des Tarifes wird durch die Engpassleistung und durch die stoffliche Zusammensetzung des Gärsubstrates bestimmt. Bei Kofermentation werden die festgesetzten Preise um 25 % reduziert. Zur genauen Definition, wann eine Biogasanlage als „Kofermentationsanlage“ zu bezeichnen ist und welche organischen Stoffe eingesetzt werden können, wurde am 20.03.2003 vom Bundesminister für Wirtschaft und Arbeit ein entsprechender Erlass („Stoffstromerlass“) verabschiedet.

1.2.4. Erlass des Bundesministers für Wirtschaft und Arbeit betreffend der Anerkennung von Biogasanlagen gemäß § 7 Ökostromgesetz (551.352/48-IV/1/03)

§ 7 Abs. 1 Ökostromgesetz BGBl. I Nr. 149/2002 sieht vor, dass Anlagen zur Erzeugung elektrischer Energie, die ausschließlich auf Basis erneuerbarer Energieträger betrieben werden, vom Landeshauptmann des Landes, in dem sich die Anlage befindet, bescheidmäßig als Ökostromanlagen anzuerkennen sind („Stoffstromerlass“). Der Antrag muss u.a. Unterlagen über den rechtmäßigen Betrieb der Anlage, die eingesetzten Primärenergieträger, die technischen Größen und die Ausführung der Anlage beinhalten und vom Anlagenbetreiber eingereicht werden. In Abbildung 2 wird die stoffliche Differenzierung, entsprechend dem Erlass in „Biomasse der land- und forstwirtschaftlichen Urproduktion“ und in „Sonstige Stoffe“, dargestellt. Werden in einer Biogasanlage Stoffe aus der Gruppe „sonstige Stoffe“ verwertet, sind diese Anlagen als „Ökostromanlagen unter Einsatz von Biogas bei Kofermentation“ anzuerkennen. Es sind nur jene „sonstigen Stoffe“ zulässig, die den einschlägigen Bestimmungen im Bereich des Bodenschutzes, des Gewässerschutzes und relevanter Hygieneanforderungen entsprechen. Klärschlamm gilt nicht als zulässiger „sonstiger Stoff“ für Biogasanlagen.

Im Ökostromgesetz (BGBl. I Nr. 149/2002) werden im Anhang, zugehörig zum § 5 Abs. 1, „Abfälle mit hohem biogenen Anteil“ sowie „Abfälle mit über 90 % organischem

Kohlenstoffgehalt“ durch die zugeordnete fünfstellige Schlüsselnummer des österreichischen Abfallkataloges (ÖNORM S 2100) definiert. Im beigeordneten Erlass wurde eine Einteilung dieser Stoffe in „aus der landwirtschaftlichen Urproduktion stammende Stoffe“ und „sonstige Stoffe“ vorgenommen, um Biogasanlagen durch einen höheren Strompreis zu stützen, die keine Entsorgungsgebühren einheben oder bei denen Erzeugungskosten wie im Falle der Nutzung von Energiepflanzen entstehen. Aus diesem Grund erhalten Kofermentationsanlagen einen Einspeisetarifabschlag von 25 %.

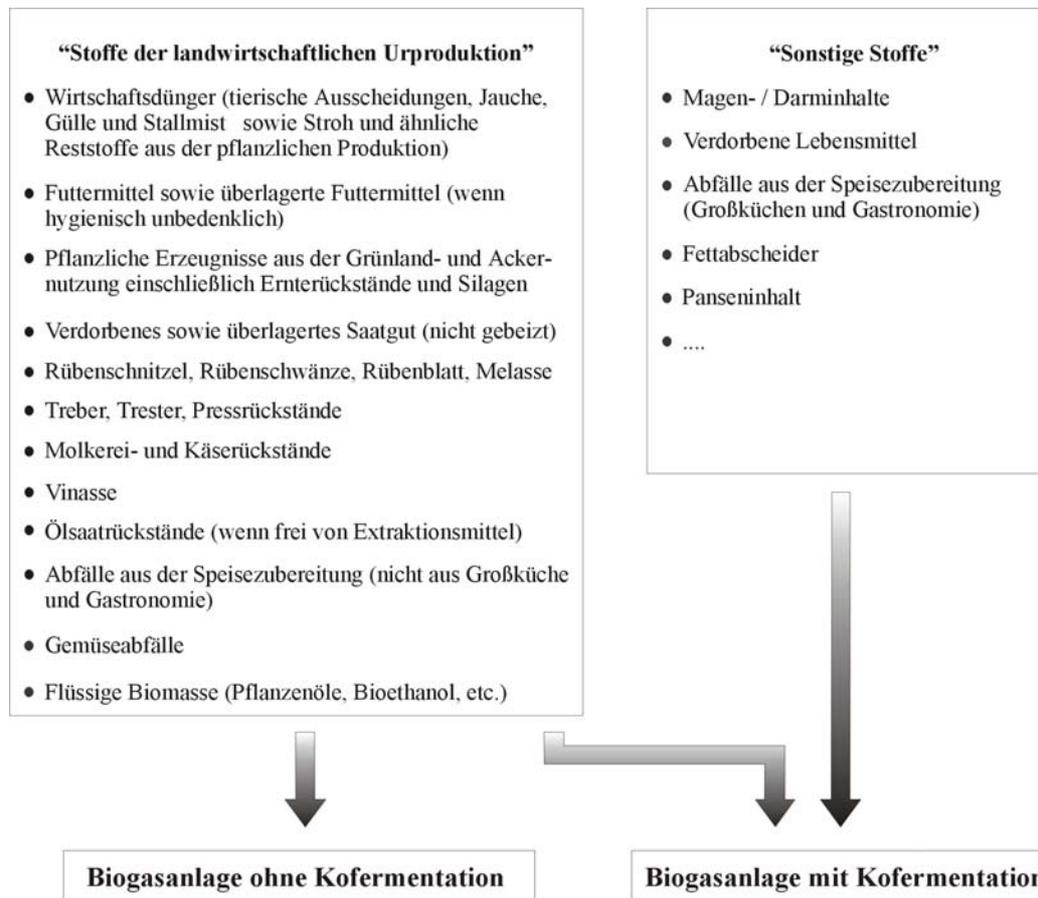


Abbildung 2. Stoffe für die Biogaserzeugung mit und ohne Kofermentation nach dem Erlass gem. § 7 Ökostromgesetz (551.352/48-IV/1/03)

2. Stand des Wissens

2.1. Methanbildungspotential von Energiepflanzen

Verschiedene Energiepflanzenarten wie z.B. Wiesen gras, Luzerne, Klee und Klee gras, Getreide wie Weizen, Gerste, Roggen, Hafer, Triticale, Futterrüben, Mais und Zuckerhirse werden seit kurzem als Rohstoffe zur Biogaserzeugung in praktischen Anlagen eingesetzt. Vorliegende Praxis- und Laboruntersuchungen dienen der Ermittlung des Biogasbildungs vermögen dieser Rohstoffe (NORDBERG 1996, BORJESSION 1998, KAPARAJU ET AL. 2001, BASERGA & EGGER 1998, CHYNOWETH ET AL. 1993, LINKE ET AL. 1999, POUECH ET AL. 1998a/b, AMON ET AL. 2002b).

Untersuchungen von BJÖRNSSON ET AL. (2001) zur Vergärung von Ernterückständen zeigen eine spezifische Methanausbeute von Zuckerrübenblättern, Gras und Weizenstroh von 0,37, 0,23 bzw. 0,15 m³ CH₄ (kg oTS)⁻¹. Die Untersuchungen wurden in Batchfermentern mit einer Größe von einem bis 30 m³ bei einer Gärtemperatur von 37°C durchgeführt. Die hydraulische Verweilzeit betrug 30 – 55 Tage. Die Untersuchungen enthalten keine Information darüber, ob sich die Methanausbeuten auf Normbedingungen (p₀ = 1,0133 bar, t₀ = 0°C) beziehen 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. Batchversuche mit mesophil vergorenem Rindermist als Inoculum zeigten eine spezifische Methanausbeute von 0,35 m³ CH₄ (kg oTS)⁻¹ bei Grasheu und 0,26 m³ CH₄ (kg oTS)⁻¹ bei Hafer. Klee im vegetativen Wachstumsstadium zeigte eine spezifische Methanausbeute von 0,21 m³ CH₄ (kg oTS)⁻¹. Im Wachstumsstadium der Blüte hatte Klee lediglich noch einen spezifischen Methanertrag von 0,14 m³ CH₄ (kg oTS)⁻¹. Das Wachstumsstadium der von KAPARAJU ET AL. (2001) untersuchten Pflanzen beeinflusste den Methanertrag wesentlich.

POUECH ET AL. (1998a) untersuchten die Methanproduktion verschiedener landwirtschaftlicher Kulturpflanzen in Langzeit-Batch-Gärversuchen. Es wurden die Pflanzenarten Weizen, Gerste, Alfalfa, Klee, Weidelgras, Mais, Futtersorghum, Korn sorghum und Zuckersorghum verwendet. Bei drei Pflanzenarten 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 0,295 und 0,397 m³ CH₄ (kg oTS)⁻¹. 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. Angaben zur biochemischen Zusammensetzung der Pflanzen werden in Bezug auf die Qualität und den Gehalt der Rohfaser, sowie den Gesamtstickstoffgehalt der Pflanzen gemacht, nicht aber zu den übrigen, das Methanbildungs vermögen bestimmenden Nährstoffen wie dem Fett- oder Kohlenhydratgehalt der Pflanzen.

Die Biogasausbeute aus nachwachsenden Rohstoffen (NAWAROS), Energiepflanzenarten und -sorten bei der Kofermentation mit Wirtschaftsdüngern von Rindern und Schweinen ist noch nicht optimiert worden. Angaben zu den wichtigen Inhaltsstoffen der eingesetzten Rohstoffe sind nur vereinzelt zu finden. Rohfaser, Zellulose, Hemizellulose, Rohfett, Rohprotein, NH₄ - Gehalt und pH-Wert prägen den Verlauf der Methangärung.

Tabelle 2 zeigt den Stand des Wissens zur Vergärung von Energiepflanzen im Überblick.

Tabelle 2. Spezifische Methan- und Biogasausbeuten aus Energiepflanzen nach Literaturangaben

<i>Energiepflanze</i>	<i>Biogasertrag</i> [l (kg oTS) ⁻¹]	<i>Methanertrag</i> [l (kg oTS) ⁻¹]	<i>Methode</i>	<i>Quelle</i>
Alfalfa		340	Batch-Versuch	POUECH ET AL. 1989a
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	750		Biogasanlage	SEDLMEIER 2000
Getreide Ganzpflanzen	780		k.A.	KTBL 1996
Getreidestroh	250-350		k.A.	BASERGA 2000
Grasmischung-Silage		199-244*	Laborflusdigestor	ZAUNER & KÜNTZEL 1986
Grasmischung-Silage		298-315*	Batch-Versuch	ZAUNER & KÜNTZEL 1986
Grassilage	500-600		k.A.	BASERGA 2000
Gras-Welksilage		433	Berechnung	LINKE ET AL. 1999
Gras (verschiedene Arten)	678-929		Batch-Versuch	MÄHNERT ET AL. 2002
Grünschnitt	780		k.A.	KTBL 1996
Hafer		365	Batch-Versuch	POUECH ET AL. 1989a
Hanf-Silage		409	Berechnung	LINKE ET AL. 1999
Heu	500		k.A.	BASERGA 2000
Kartoffelkraut	500-600		k.A.	BASERGA 2000
Klee		350	Batch-Versuch	POUECH ET AL. 1989a
Klee	500-650		k.A.	BASERGA 2000
Klee	264	152	Laborflusdigestor	POUECH ET AL. 1989b
Laub	400		k.A.	BASERGA 2000
Luzerne-Grüngut		432	Berechnung	LINKE ET AL. 1999
Mais		397	Batch-Versuch	POUECH ET AL. 1989a
Maissilage		181-184*	Laborflusdigestor	ZAUNER & KÜNTZEL 1986
Maissilage		270-289*	Batch-Versuch	ZAUNER & KÜNTZEL 1986
Maissilage	800		k.A.	KTBL 1996
Maisstroh	500		k.A.	BASERGA 2000
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. 1989a
Raygras		390-409	Batch-Versuch	POUECH ET AL. 1989a
Reisstroh	380-471	188-240	Laborflusdigestor	ZHANG UND ZHANG 1999
Roggenstroh		409	Berechnung	LINKE ET AL. 1999
Rübenblatt	400-500		k.A.	BASERGA 2000
Silomais		422	Berechnung	LINKE ET AL. 1999
Sorghum		295-372	Batch-Versuch	POUECH ET AL. 1989a
Weizen		384	Batch-Versuch	POUECH ET AL. 1989a
Weizen	332	184	Laborflusdigestor	POUECH ET AL. 1989b
Wicken-Silage		323*	Batch-Versuch	ZAUNER & KÜNTZEL 1986
Wintergerste		420	Berechnung	LINKE ET AL. 1999
Winterroggen		419	Berechnung	LINKE ET AL. 1999
Zuckerrübenblattsilage		294*	Batch-Versuch	ZAUNER & KÜNTZEL 1986
Zuckerrübenblattsilage		174*	Laborflusdigestor	ZAUNER & KÜNTZEL 1986

* l (kg TS)⁻¹; k.A. = keine Angabe

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 sind nur vergleichbar, wenn der Methanertrag unter Normbedingungen (0 °C, 1013 mbar) angegeben wird. Dazu werden in den meisten Fällen keine Angaben gemacht. Oftmals ist auch nur der Biogasertrag angegeben. Für die Energiegewinnung entscheidend ist aber der Methangehalt im Biogas und somit der Methanertrag. Der Methangehalt unterliegt je nach Gärbedingungen starken Schwankungen.

Verschiedene Autoren weisen darauf hin, dass der „Cellulose-Lignin-Komplex“ die Abbaubarkeit der Substrate ungünstig beeinflusst (GALLERT & WINTER 1998, KRIEG & FISCHER 2002). So wirkt sich insbesondere die Inkrustierung von abbaubaren Komponenten, z.B. von Cellulose durch Lignin nachteilig auf den anaeroben Abbau und die Biogasproduktion aus, da nur die frei liegenden Anteile dem mikrobiellen Abbau zugänglich sind (WEILAND 2001, JÄGER 2002). Nach EDELMANN (2000) ist die generelle Abbaubarkeit der organischen Substanz von Gehalt an Nährstoffen und Gerüstsubstanzen wie z.B. Cellulose und Lignin abhängig. Der Gehalt an Gerüstsubstanzen bestimmt nicht nur die Abbaufähigkeit sondern auch die Geschwindigkeit mit der organische Substanz abgebaut wird. 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). Sie kann auch sortenspezifischen Charakter haben (SCHNÜRER ET AL. 1999). Der Zeitpunkt, an dem die eingesetzten pflanzlichen Rohstoffe geerntet werden, und Sorteneigenschaften sind deshalb in Bezug auf die Methanausbeute aus der Biomasse und auf die Methanmenge, die pro Hektar geerntet werden kann, von wesentlicher Bedeutung.

Eigene Untersuchungen zum Methanbildungspotential von Sudangras zeigen einen spezifischen Methanertrag von 0,213 bis 0,239 N m³ CH₄ (kg oTS)⁻¹. Die Untersuchungen zeigen, dass der Ligningehalt im Gärgut die Methanproduktivität bestimmt und dass der Biomassehektarertrag stark sortenabhängig ist. Inhaltsstoffe und Sortenwahl stellen also die wesentlichsten Ertragsfaktoren für die Methanproduktivität pro Flächeneinheit dar (AMON ET AL. 2002a).

2.2. Einfluss der Konservierung auf die Methanbildung aus Energiepflanzen

Die Biomassebildung der Energiepflanzen unterliegt starken saisonalen Schwankungen. Die Biogasanlage muss jedoch kontinuierlich mit Nährstoffen versorgt werden. Aus diesem Grund ist eine Konservierung der Energiepflanzen erforderlich. Es stellt sich die Frage, welchen Einfluss Silage- oder Heubereitung auf das Methanbildungsvermögen von Energiepflanzen hat und welche Konservierungsform aus gärtechnischer Sicht günstig ist.

Bislang stellte lediglich WELLINGER (2000) zu dieser Frage Untersuchungen an. Er fand keine Unterschiede im spezifischen Biogasertrag von Wiesengras aus dem ersten und zweiten Schnitt. Die Aufbereitung hingegen beeinflusste den Biogasertrag deutlich. Heumehl hatte im Vergleich zu Frischgras einen um 20 % höheren spezifischen Biogasertrag. Diese Untersuchungen geben einen ersten Hinweis auf die Biogaspotentiale bei der Vergärung von Wiesengras. Angaben zum Nährstoffgehalt des Gärgutes werden nicht gemacht. Für eine exakte quantitative Bewertung und für die Ableitung von Empfehlungen zur Nährstoffversorgung der Mikroorganismen muss jedoch neben dem absoluten Biogasertrag auch der Methangehalt im Biogas bekannt sein. Entscheidend ist auch die Kenntnis des Nährstoffgehaltes im Gärgut.

3. Problemstellung

Die Bedeutung der Biogaserzeugung aus Energiepflanzen und nachwachsenden Rohstoffen nimmt ständig zu. Sie bietet aus innerbetrieblicher Sicht und auch im Hinblick auf die Erfordernisse des Klimaschutzes und der Ressourcenschonung große Vorteile. Die Bereitstellung der Energiepflanzen ist aber mit Kostenaufwendungen für Anbau, Ernte, Lagerung und Konservierung verbunden. Die Wirtschaftlichkeit der Biogasgewinnung hängt damit in weit stärkerem Maße vom erzielbaren Methanertrag ab, als dies bei der Vergärung von Wirtschaftsdüngern und organischen Abfällen der Fall ist, die teilweise sogar zusätzliche Entsorgungserlöse einbringen. Die genaue Kenntnis über den Methanertrag von Energiepflanzen ist daher für die Investitionsentscheidung und die Leistungsauslegung von Biogasanlagen von dringender Notwendigkeit. Berechnungen zur Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen zeigen, dass für eine kostendeckende Biogaserzeugung bei derzeitigen Preis-Kosten-Verhältnissen ein spezifischer Methanertrag aus Energiepflanzen von mindestens bei $300 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 (\text{t oTS})^{-1}$ erreicht werden muss (AMON ET AL. 2003a).

Erforderlich sind:

- die gezielte und bedarfsgerechte Versorgung von Biogasanlagen mit Nährstoffen,
- eine kalkulierbar hohe Methanausbeute aus den Gärrohstoffen
- die genaue Berechnung der Leistung von Biogasanlagen in Abhängigkeit von Art, Menge und Qualität der verfügbaren Gärrohstoffe,
- eine genaue Kalkulation des Methanhektarertrages ökologisch ausgewogener Fruchtfolgesysteme,
- Empfehlungen zur Kalkulation der Methanbildungsvermögens von Kleegrasmischungen und Mais anhand der Inhaltsstoffe
- Empfehlungen zum Nährstoffbedarf der Methangärung von Kleegrasmischungen und Mais
- Empfehlungen über standortspezifisch geeignete Sorten
- Empfehlungen zum richtigen Zeitpunkt der Ernte von Energiepflanzen
- Empfehlungen zum Konservierungsverfahren für die Gärrohstoffe
- Empfehlungen zur erforderlichen hydraulischen Verweilzeit der Gärrohstoffe im Fermenter und zur optimalen Größe des Fermenters

Diese Forderungen können erfüllt werden, wenn Verfahren zur Anwendung kommen, die eine energetische und stoffliche Bewertung der Methangärung in Abhängigkeit der in den pflanzlichen Rohstoffen vorliegenden Inhaltsstoffen ermöglichen.

Insgesamt ist festzustellen, dass die in der Literatur bisher vorliegenden Daten zum Gärverhalten von Energiepflanzen überwiegend nur von begrenzter Aussagekraft sind, da über die eingesetzten Testverfahren in der Regel unvollständige Angaben gemacht werden. Erforderlich sind Stoff- und Energiewechselmessungen bei der anaeroben Vergärung pflanzlicher Rohstoffe. Sie sollen prinzipielle Aussagen und verlässliche, vergleichbare Daten über die Methanausbeuten aus nachwachsenden Rohstoffen, abhängig von deren Inhaltsstoffe, liefern und Aussagen über die Abbaubarkeit der organischen Substanz, den Gärverlauf und über eventuell auftretende Störungen des Gärprozesses ermöglichen.

Mit den vorliegenden Modellen zur anaeroben Gärung (BATSTONE ET AL. 2001, BATSTONE ET AL. 2000, ANGELIDAKI ET AL. 1993, HENZE ET AL. 1986, PAVLOSTATHIS & GOSSETT 1986, MC CARTY & MOSEY 1991, ZATARI ET AL. 2001) kann eine gezielte und bedarfsgerechte Versorgung der Mikroorganismen im Fermenter mit Nährstoffen nicht berechnet werden. Die Modelle sind meist sehr spezifisch und beziehen sich hauptsächlich auf die Modellierung der Kinetik der Gärung wie z.B. zur theoretischen Darstellung und Optimierung wichtiger Prozessgrößen der Gärbiologie wie dem pH-Wert, dem

Ammoniumgehalt oder dem Gehalt an flüchtigen Fettsäuren im Gärgut. Weitere Anwendungsbereiche liegen hauptsächlich in der theoretisch 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 Wirtschaftsdüngern und nachwachsender Rohstoffe.

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, Stickstoff und Schwefel berechnet werden kann. Dieses Modell berechnet die Biogasqualität, nicht aber die Methanmenge aus der Biomasse.

Es ist bekannt, dass Gerüstsubstanzen wie Lignin, Zellulose und Hemizellulose unter anaeroben Bedingungen nur schwer und verzögert abgebaut werden können (WELLINGER 1984). Von den Gerüstsubstanzen geht damit ein maßgeblicher Einfluss für die Verfügbarkeit von Nährstoffen in der Biomasse für den anaeroben Stoffwechsel und letztendlich für den Methanbildungsprozess aus. Dieser Sachverhalt wird in der „Buswellformel“ nicht berücksichtigt. Wie Untersuchungen zeigen, nehmen bei der Kofermentation von Sudangras mit Rinderfestmist die spezifische Methanausbeute und der Wirkungsgrad der Methangärung mit zunehmendem Ligningehalt im Gärgut ab (AMON ET AL. 2002b).

Die Anwendung der „Buswellformel“ für die Berechnung des Methangehaltes im Biogas setzt voraus, dass die Elementarstoffe Kohlenstoff, Wasserstoff, 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 ermittelt werden.

Das Hauptproblem des anaeroben Abbaus liegt in der Vergärung des „Ligno-Zellulose-Komplexes“ in der Biomasse und in der optimalen Versorgung der Mikroorganismen mit Nährstoffen. Bisher liegen kaum Untersuchungen zum Nährstoffbedarf anaerober Mikroorganismen für die Methangärung von Energiepflanzen und Wirtschaftsdüngern vor. Für eine bedarfsgerechte Ernährung der Mikroorganismen mit Nährstoffen müssen Grundlagen zur Entwicklung von Nährstoffbedarfsnormen erstellt werden.

4. Ziele

Das Forschungsprojekt hat zum Ziel, die Biogaserzeugung aus den Gärrohstoffen Mais und Klee gras zu verbessern. Dazu wird das Methanbildungs vermögen von Mais und Klee gras untersucht, um eine hohe Methanausbeute aus diesen Kulturpflanzen zu erreichen. Der richtige Zeitpunkt für die Ernte der Pflanzen und geeignete Sorten müssen gefunden werden. Der Einfluss der Konservierung – Silage- und Heubereitung – auf das Methanbildungs vermögen von Mais und Klee gras soll untersucht werden. Eine rationelle Biogaserzeugung setzt eine vollwertige Nährstoffversorgung der Mikroorganismen im Fermenter nach angestrebter energetischer Erzeugungsleistung der Biogasanlage voraus. Dafür muss das Methanbildungs vermögen – der Methanenergiewert (MEW) – einzelner Gärrohstoffe bekannt sein. Eine vollwertige Nährstoffversorgung der Mikroorganismen im Fermenter der Biogasanlage gewährleistet einen sicheren Verlauf der Gärung, vermeidet Gärstörungen und ermöglicht eine hohe spezifische Methanausbeute aus den Gärrohstoffen. Die Bestimmung der für den weitgehenden Abbau der organischen Substanz von Mais und Klee gras erforderlichen hydraulischen Verweilzeit soll die richtige Anpassung der Größe des Fermenters an die Ansprüche der Gärrohstoffe ermöglichen. Die Untersuchungen werden mit folgenden Teilzielen durchgeführt.

1. Die gärtechnischen Eigenschaften Abbaugeschwindigkeit, Biogas- und Methanproduktivität von Mais und Klee gras typischer Sorten bzw. Arten- und Sortenmischungen werden untersucht.
2. Der Einfluss des Erntezeitpunktes und der Konservierungsform auf das Biogas- und Methanbildungs vermögen der Rohstoffe wird ermittelt.
3. Der Stoff- und Energieumsatz bei Methangärung von Mais und Klee gras wird untersucht. Bestimmt werden die Bruttoenergie (GE) der Gärgüter, die Energie im nicht abgebauten Gärrückstand (EGR) und die Methanenergie im Biogas (CH₄-E) sowie die Inhaltsstoffe Rohprotein (XP), Rohfett (XL), Rohfaser (XF) und N-freie Extraktstoffe (XX), Lignin-, Cellulose- und Hemizellulosegehalt der Gärrohstoffe und der Gärrückstände (Dünger).
4. Für die allgemeine praktische Kalkulation des Methanbildungs vermögens der Gärrohstoffe wird ein neues Bewertungssystem, das Methanenergiewertsystem (MEWS) entwickelt. Die Berechnung des Methanenergiewertes (MEW) von Klee gras und Mais erfolgt mit Hilfe einer Regressionsgleichung anhand der Rohnährstoffe Rohprotein (XP), Rohfett (XL), Rohfaser (XF) und N-freie Extraktstoffe (XX). Das Methanbildungs vermögen der Rohnährstoffe wird nicht mit reinen Nährstoffen geprüft werden, sondern es wird festgestellt welches tatsächliche Methanbildungs vermögen die einzelnen Rohnährstoffe aufweisen, wenn diese in Form eines natürlichen Gärrohstoffes den Mikroorganismen im Fermenter zugesetzt werden. Der Gesamtbedarf an Nährstoffen und Energie für die Biogaserzeugung aus Mais und Klee gras wird untersucht und der energetische Wert dieser Rohstoffe für die Methanbildung ermittelt. Der Nährstoffbedarf für die Methangärung wird über einen Vergleich von Nährstoffangebot in den Gärrohstoffen und der daraus erzeugten Methanmenge abgeleitet.
5. Das Methanenergiewertsystem soll darüber hinaus eine genaue a priori Berechnung der energetischen Leistung von Biogasanlagen in Abhängigkeit der Qualität verfügbarer Gärrohstoffe ermöglichen und es soll die vollwertige Nährstoffversorgung der Mikroorganismen im Fermenter gewährleisten.
6. Der energetische Wirkungsgrad der Methangärung von Mais und Klee gras wird dargestellt. Der substratspezifische Zusammenhang vom Methanenergiewert zum energetischen Wirkungsgrad der Methangärung wird hergestellt.

7. Der substratspezifische Kohlenstofftransferfaktor von den Rohstoffen in das Biogas wird dargestellt.
8. Der Methanertrag pro Hektar wird aus dem Methanbildungsvermögen der verschiedenen Maissorten und Kleegrasmischungen und deren standortspezifischem Biomassebildungsvermögen bestimmt.
9. Die Verdaulichkeit der Gärrohstoffe Mais und Klee gras wird zusätzlich beim Einsatz als Grundfutter in der Milchviehfütterung untersucht. Ein Vergleich der anaeroben Abbaubarkeit der Gärrohstoffe im Fermenter von Biogasanlagen mit der Verdaulichkeit beim Einsatz als Grundfutter in der Milchviehfütterung wird durchgeführt. Mit dem Vergleich soll geprüft werden, ob Rückschlüsse über das Methanbildungsvermögen von Gärrohstoffen gezogen werden können, die auch als Futtermittel für Wiederkäuer eingesetzt werden.
10. Die substratspezifische hydraulische Verweilzeit zum weitgehenden Abbau der organischen Substanz von Mais und Klee gras wird bestimmt. Sie muss bekannt sein, um den Fermenter richtig dimensionieren zu können.
11. Praktische Empfehlungen zur Kalkulation des Methanbildungsvermögens von Klee grasmischungen und Mais anhand der Inhaltsstoffe, zum Nährstoffbedarf der Methangärung von Klee grasmischungen und Mais, zur Berechnung der Leistung von Biogasanlagen, zur Berechnung des Methanhektarertrages von Fruchtfolgen, zum optimalen Erntezeitpunkt für die Gärrohstoffe Mais und Klee gras, für die Wahl geeigneter Sorten und Sortenmischungen, die Konservierung, und die erforderliche Abbauezeit werden aus den Untersuchungsergebnissen für Mais und Klee grasmischungen abgeleitet.

5. Methoden

5.1. Anbau, Ernte und Probengewinnung von Mais

Die Versuche umfassten folgende Maissorten: Phönix (FAO 290), Ribera (FAO 390), Benicia (FAO 300), Atalante (FAO 290) und Saxxo (FAO 380). Die Aussaat erfolgte am 30. April 2002 in Ludersdorf bei Gleisdorf (Steiermark). Die Parzellengröße betrug 14 m², der Reihenabstand war 70 cm mit 17 cm Abstand in der Reihe. Der Anbau erfolgte in dreifacher Wiederholung. Vorfrucht war ebenfalls Mais. Es wurden 600 kg/ha Vollkorn gelb und 250 kg/ha Nitramoncal gedüngt. Die Beikrautregulierung erfolgte zum Voraufbau mit Stomp + Dual.

Die erste Ernte des Mais erfolgte nach 100 Wachstumstagen, am 08. August 2002 im Kornbildungsstadium der Milchreife. Der zweite Erntetermin war nach 143 Wachstumstagen am 12. September 2002 im Stadium der Teigreife. Die letzte Ernte wurde nach 190 Wachstumstagen am 29. Oktober 2002 im Stadium der Vollreife durchgeführt. Tabelle 3 zeigt die TS und oTS-Gehalte der verschiedenen Maissorten zu drei Ernteterminen.

Tabelle 3. TS- und oTS-Gehalte der untersuchten Maissorten bei verschiedenen Ernteterminen (Standort Ludersdorf bei Gleisdorf, Steiermark)

Sorte	1. Ernte		2. Ernte		3. Ernte	
	TS [% FM]	oTS [% FM]	TS [% FM]	oTS [% FM]	TS [% FM]	oTS [% FM]
Benicia	22,28	21,56	37,63	36,49	49,99	48,60
Ribera	22,45	21,55	34,80	33,83	47,73	46,25
Phönix	23,75	22,87	36,25	34,90	46,88	45,46
Atalante	22,85	22,31	40,23	39,01	40,78	39,35
Saxxo	19,24	18,46	35,08	33,95	50,99	49,76

Zur Entwicklung des Methanenergiewertsystems für Mais (vergl. Kap. 5.8) wurden zusätzlich die Daten umfangreicher Maisanbau- und -sortenversuche und die sich daran anschließenden Untersuchungen zum Methanbildungsvermögen des Mais herangezogen. Diese Untersuchungen wurden vom ILUET im Auftrag der Fa. Pioneer Saaten Ges.m.b.H. Parndorf (Austria) durchgeführt (AMON ET AL. 2002b). Sortenanbauversuche wurden auf dem Standort der Versuchswirtschaft Groß-Enzersdorf durchgeführt.

An drei Ernteterminen wurden repräsentative Pflanzen händisch mit der Sichel geerntet. Die erste Ernte erfolgte nach 118 Wachstumstagen am 21. August 2001 im Kornbildungsstadium Ende Teigreife. Der zweite Erntetermin war nach 131 Wachstumstagen am 3. September 2001 im Stadium Beginn physiologische Reife. Der letzte Erntetermin wurde am 19. September 2001 nach 147 Wachstumstagen im Stadium der Physiologischen Reife durchgeführt. Tabelle 4 zeigt die TS und oTS-Gehalte der verschiedenen Maissorten an den drei Ernteterminen.

Tabelle 4. TS- und oTS-Gehalte der untersuchten Maissorten bei verschiedenen Ernteterminen (Standort Groß Enzersdorf, Niederösterreich)

Sorte	1. Ernte		2. Ernte		3. Ernte	
	TS [% FM]	oTS [% FM]	TS [% FM]	oTS [% FM]	TS [% FM]	oTS [% FM]
PR 39G12	34,95	33,75	47,14	45,94	54,65	52,45
Sandrina	30,55	29,41	46,31 ¹⁾	44,67 ¹⁾	41,00	39,43
Clarica	34,10	32,91	43,50	42,20	47,96	46,5
Monalisa	31,94	30,75	44,25	43,04	44,49	42,75
Ribera	31,84	30,87	56,84 ¹⁾	45,60 ¹⁾	40,37	38,84
Ribera frisch	31,47	30,54				

¹⁾ möglicher Abfall der trockenen Blätter oder Tauwassereinfluss

Unmittelbar nach der Ernte wurde in beiden Sortenanbauversuchen das Gewicht der Frischmasse der Ganzpflanzen, der Kolben und der Pflanzen ohne Kolben bestimmt, und die Zahl der Pflanzen pro m² bestimmt. Die durchschnittliche Kolbenzahl pro Pflanze wurde ermittelt. Repräsentatives Probenmaterial wurde von jeder Sorte jeweils in den Varianten Ganzpflanze, Restpflanze, und Kolben/Körner gewonnen. Die frisch geerntete Biomasse wurde mit Hilfe einer Schlagmühle fein vermahlen, um eine möglichst große innere Oberfläche des Probematerials zu erhalten (vergleiche Abbildungen A3/A4 im Anhang). Frisch aufbereitetes Probenmaterial wurde eingefroren (Probenmenge ca. 1,0 kg).

Zur Silagekonservierung wurde die fein vermahlene Biomasse in 2 l Polyflaschen eingefüllt und mit Schraubverschluss gasdicht verschlossen. Beim Einfüllen wurde auf eine hohe Verdichtung der Biomasse großer Wert gelegt. Die freie Oberfläche wurde mit Propionsäure behandelt um den Start der Milchsäuregärung zu beschleunigen.

5.2. Anbau, Ernte und Probengewinnung von Kleegrasmischungen

Es wurden gräserreiche (IM, DW) und kleereiche (KM) Grünlandmischungen untersucht (Tabellen 5, 6, 7). Die Mischung IM ist eine Feldfutter-Intensivmischung für milde und mittlere Lagen. Diese Mischung eignet sich sowohl für die Grünfütterung als auch für die Silierung. Sie hat einen relativ hohen Anteil an Raygräsern, der für ein intensives Wachstum, für beste Futterqualität und hohe Zuckergehalte sorgt. Bei nicht allzu langer Schneelage überdauert diese Mischung in milden Lagen zwei Winterperioden.

Die Dauerwiesenmischung DW wird für eine mittelintensive Bewirtschaftung mit bis zu drei Nutzungen pro Jahr in mittleren Lagen eingesetzt. Sie eignet sich für gut mit Wasser versorgte, gründige Wiesenstandorte im Alpenvorland, in Tal- und Beckenlagen und in klimatisch begünstigten Lagen bis zu einer Höhenstufe von 800 m.

Die Mischung KM ist eine Kleegrasmischung für zwei Hauptnutzungsjahre. Sie hat einen höheren Anteil an ausdauernden Arten wie Weißklee, Knautgras, Timothee und Wiesenschwingel und gewährleistet dadurch eine gute Überwinterungsbeständigkeit für mindestens zwei Winter. Die hohen Erträge und die hervorragende Futterqualität dieser Mischung empfehlen deren Einsatz in milden und mittleren Lagen.

In den nachfolgenden Tabellen 5 bis 7 sind die Mischungsrezepturen und die Aussaatmengen der im Versuch verwendeten Grünlandmischungen enthalten (BUCHGRABER ET AL. 1998).

Die Klee grasproben stammten vom jeweils ersten Aufwuchs. Sie wurden in Sortenversuchen an der BAL Gumpenstein gewonnen und eigens für den vorliegenden Zweck angebaut, geerntet und in verschiedenen Formen (frisches Material, Heu und Silage) konserviert. Die so gewonnenen Proben wurden dem ILUET zur Verfügung gestellt.

Tabelle 5. Mischungsrezeptur der Feldfutter-Intensivmischung IM.

Arten	Ausgewählte ÖAG-Sorten	Mischungsrahmen in Flächenprozent (Fl.%) und Gewichtsprozent (Gew.%)	
		Oberösterreich, Tirol, Vorarlberg	
		Fl.%	Gew.%
Rotklee	Gumpensteiner, Reichersberger Neu, Renova, Temara, Tempus, Vanessa, Vesna, (Kvarta), (Start), (Vulkan)	10	8,8
Weißklee	50% von den Sorten: Hebe, Klondike, Riesling, Sonja, (Donna), (Milkanova) 50% von den Sorten: Alice, (Merwi), (NFG Gigant), (Radi)	10	4,3 4,3
Bastardraygras	Gumpensteiner, Antilope, Pilot	20	21,8
Engl. Raygras	75% von den Sorten: Barylou, Cavia, Fantoom, Heraut, Pimpernel, Prana 25% von den Sorten: Guru, Tivoli, Trani, (Vigor)	20	16,3 5,4
Knaulgras	Tandem, Lidaglo, Baraula	20	17,4
Wiesenschwingel	Bartran, Cosmolit, Darimo, Laura, Leopard, Lifara, (Cosmos 11)	10	13,0
Timothe	Bart, Kampe II, Lischka, Tiller, (Lirocco), (Rasant)	10	8,7
	Saatmenge in kg/ha	23,0	

Tabelle 6. Mischungsrezeptur der Dauerwiesenmischung DW.

Arten	Ausgewählte ÖAG-Sorten	Mischungsrahmen in Flächenprozent (Fl.%) und Gewichtsprozent (Gew.%)			
		Bgd, Niederösterreich, Stmk, Kärnten, Tirol		Oberösterreich, Salzburg	
		Fl.%	Gew.%	Fl.	Gew.%

				%	
Weißklee	Hebe, Klondike, Riesling, Sonja, (Donna), (Milkanova)	10	7,6	8	5,8
Hornklee	Oberhaunstädter, Odenwälder	5	5,7	7	7,5
Engl. Raygras	Guru, Tivoli, Trani, (Vigor)	10	9,4	5	4,5
Glatthafer	Arone, Median	10	15,1	13	18,5
Knaulgras	Tandem, Lidaglo, Baraula	15	11,3	7	5,0
Timothe	Bart, Kampe II, Lischka, Tiller, (Lirocco), (Rasant)	10	7,5	10	7,1
Wiesenschwingel	Bartran, Cosmolit, Darimo, Laura, Leopard, Lifara, (Cosmos 11)	10	11,3	15	16,0
Goldhafer	Gunther, Gusto, (Trisett)	5	3,8	5	3,6
Rotschwingel	Condor, Echo, Gondolin, (Rubina Roskilde)	5	5,7	5	5,3
Wiesenrispe	50% von den Sorten: Balin, Compact, Lato, Pegasus 50% von den Sorten: Limagie, Monopoly, Oxford, Primo, (Newport)	20	11,3	20	10,7
Wiesenfuchsschwanz	Alko, Vulpera	-	-	5	5,3
	Saatmenge in kg/ha		26,5		28,1

Tabelle 7. Mischungsrezeptur der Kleegrasmischung KM.

Arten	Ausgewählte ÖAG-Sorten	Mischungsrahmen in Flächenprozent (Fl.%) und Gewichtsprozent (Gew.%)	
		Fl.%	Gew.%
Rotklee	Gumpensteiner, Reichersberger Neu, Renova, Temara, Tempus, Vanessa, Vesna, (Kvarta), (Start), (Vulkan)	35	31,5
Weißklee	50 % von den Sorten: Hebe, Klondike, Riesling, Sonja, (Donna), (Milkanova) 50 % von den Sorten: Alice, (Merwi), (NFG Gigant), (Radi)	10	4,5
Bastardraygras	Gumpensteiner, Antilope, Pilot	10	11,2
Engl. Raygras	Barylou, Cavia, Fantoom, Heraut, Pimpernel, Prana	15	16,8
Knaulgras	Tandem, Lidaglo, Baraula	10	9,0
Timothe	Bart, Kampe II, Lischka, Tiller, (Lirocco), (Rasant)	10	9,0
Wiesenschwingel	Bartran, Cosmolit, Darimo, Laura, Leopard, Lifara, (Cosmos 11)	10	13,5
	Saatmenge in kg/ha	22,3	

Abbildung 3 zeigt den Bestand der verwendeten Kleegrasmischungen vor der Ernte am 17. Mai 2001.



Abbildung 3. Demonstrationsversuch mit den verwendeten Klee-grasmischungen vor der ersten Ernte am 17. Mai 2001, Standort BAL Gumpenstein

Die Ernte erfolgte in einer dynamischen Beprobungsreihe im Abstand von je ca. 12 Tagen beim 1. Aufwuchs, wobei neben einer Frischprobe auch eine Silage und eine Heuprobe gewonnen wurden. Tabelle 8 enthält die Erntezeitpunkte, das Artengruppenverhältnis in Gew.-% und Ertragskennwerte. Die Frischmasse und der Trockenmasseertrag wurden nur am ersten Nutzungstermin gemessen. Für die beiden späteren Nutzungstermine kann im langjährigem Mittel des Versuchsstandortes der BAL Gumpenstein mit Ertragszuwächsen von bis zu 50% (zweiter Schnittermin) und weiteren 30% (dritter Schnittermin) auf Basis des TS-Gehaltes gerechnet werden.

Tabelle 8. Bonitierungs- und Ertragsdaten der Grünlandmischungen im Jahr 2001.

<i>Variante</i>	<i>Erntedatum</i>	<i>Gew.-% Gräser</i>	<i>Gew.-% Kräuter</i>	<i>Gew.-% Klee</i>	<i>Ertrag [dt FM/ha]</i>	<i>Ertrag [dt TM/ha]</i>
DW	17.05	56	1	43	241,0	33,0
DW	28.05	62	0	38		
DW	12.06	58	0	42		
IM	17.05	50	0	50	265,2	36,1
IM	28.05	48	0	52		
IM	12.06	54	0	46		
KM	17.05	42	0	58	232,8	31,5
KM	28.05	35	0	65		
KM	12.06	42	0	58		

Die Erntezeitpunkte der Pflanzen wurden so gewählt, dass eine Differenzierung im Nährstoffmuster der Kleegrasmischungen zu erwarten war. Der erste Erntetermin am 17.05.2001 wurde zum Vegetationsstadium „vor der Blüte“, der zweite Erntetermin am 28.05.2001 zum Vegetationsstadium „während der Blüte“ und der dritte Erntetermin am 12.06.2001 zum Vegetationsstadium „nach der Blüte“ durchgeführt.

Die Gärgutproben wurden als Frischpflanzen (tiefgefroren), und jeweils als Silage und Heu dem ILUET zur weiteren Verarbeitung zur Verfügung gestellt. Unmittelbar vor dem Einsetzen der Proben in das Eudiometer wurden die grob zerkleinerten Pflanzen mit einer Schlagmühle zu einer Partikelgröße von kleiner 1 mm fein vermahlen. Ein hoher Vermahlungsgrad der Biomasse ist Voraussetzung für einen vollständigen Abbau der abbaubaren organischen Substanz im Fermenter.

5.3. Gewinnung des Impfmaterials

Als Impfmateriale wurde aktives Gärgut aus der Biogasanlage von Herrn Dipl.-Ing. Hermann Jöchl in Mettmach bei Ried i. I. eingesetzt. Die Inputmaterialien dieser Anlage setzen sich aus 15 ha Energiepflanzen (hauptsächlich Maissilage), 5 ha Grünland, 300 m³ Grünschnitt und Flüssigmist von 72 Mastriender GVE zusammen. Die Betriebsparameter der Biogasanlage sind in Tabelle 9 angeführt. Die Biogasanlage ist seit Dezember 2000 in Betrieb.

Das Impfmateriale wurde jeweils am Überflussrohr aus dem ersten Fermenter gewonnen und in 2l Gefäße gefüllt, in die zuvor zur Anaerobisierung Argon eingeleitet worden war. Die Gefäße mit dem Impfmateriale wurden sofort in einen Transportbehälter gestellt, der 40 °C temperiertes Wasser enthielt. Dies ermöglichte den Transport der Inocula zum Labor des ILUET bei konstanter Temperatur. Ein Vergleich des Trockensubstanzgehaltes der Inocula vor und nach der Gärung (Tab. 10) zeigt, dass die eingesetzten Inocula weitgehend abgebaut waren.

Tabelle 9. Betriebsparameter der Biogasanlage, von der das Impfmateriale für die Versuche gewonnen wurde.

Fermentertyp	Durchflussfermenter
Größe des Gärbehälters	560 m ³ (erster Fermenter) 900 m ³ (zweiter Fermenter) 35 m ³ (Pumpschacht)
Verwendete Gärgüter	Energiepflanzen 15 ha, Grünland 5 ha, 300 m ³ Grünschnitt, Flüssigmist von 72 Rinder GVE
Temperatur im Gärbehälter	37 °C
Ø hydraul. Verweilzeit des Gärgutes	70 Tage
Energieerzeugung	ca. 502.000 kWh/a
Wärmeerzeugung	ca. 1.022.000 kWh/a

Tabelle 10. Inhaltsstoffe- und Energiegehalt und pH-Wert der Inocula als Zusatz zu Mais und Klee gras vor und nach der Gärung

Inhaltsstoff	Gehalt im Inoculum
--------------	--------------------

	<i>Vor der Gärung bei Verwendung zu...</i>		<i>Nach der Gärung bei Verwendung zu...</i>	
	<i>Klee gras</i>	<i>Mais</i>	<i>Klee gras</i>	<i>Mais</i>
Rohprotein (XP) [% i.d. TM]	22,94	24,35	19,97	24,76
Rohfett (XL) [% i.d. TM]	2,88	3,16	2,53	2,93
Rohfaser (XF) [% i.d. TM]	13,19	15,83	11,35	12,13
Rohasche (XA) [% i.d. TM]	27,83	33,83	38,16	30,02
N-freie Extraktstoffe (XX)	33,16	22,83	27,99	30,17
NDF [% i.d. TM]	45,91	39,09	38,05	43,34
ADF [% i.d. TM]	47,12	31,77	38,07	42,72
ADL [% i.d. TM]	23,86	15,08	22,65	33,30
Energie [MJ/kg TS]	16,00	18,21	18,51	16,47
Zellulose [% i.d. TM]	46,72	16,69	37,68	9,43
Hemizellulose [% der TM]	n.n.	7,32	n.n.	0,62
C [% i.d. TM]	41,44	40,89	34,81	39,45
N _t [g /l FM]	5,92	7,39	5,54	7,10
NH ₄ -N [g /l FM]	3,82	4,45	3,05	4,68
C/N	4,95	3,38	4,29	3,34
TS [% i.d. FM]	6,66	6,12	6,71	6,01
oTS [% i.d. FM]	4,82	4,05	4,15	4,21
pH- Wert	7,7	7,9	8,1	8,4

n.n. = nicht nachweisbar

5.4. Messen der Biogasproduktion unter Verwendung der Eudiometerapparatur

Die spezifische Methanausbeute von Gärgütern hängt für jede Pflanzenart vom Erntezeitpunkt, dem Gehalt an Inhaltsstoffen, dem Zerkleinerungsgrad der Biomasse, dem Konservierungsverfahren und von den gärobiologischen Verhältnissen ab.

Praxisversuche zum Methanbildungsvermögen von Biomasse aus der landwirtschaftlichen Urproduktion, im wesentlichen Wirtschaftsdünger und Energiepflanzen, zeigen, dass die spezifische Methanausbeute aus den Gärgütern nicht konstant ist, sondern zum Teil sogar erheblichen Schwankungen unterliegt (AMON ET AL. 2001a/b, BASERGA 1988). Die wesentlichste Ursache dafür liegt in der Tatsache begründet, dass unter praktischen Bedingungen die anaerobe Gärung vielfältigen Einflüssen unterworfen ist. Als wichtige Einflüsse sind dabei zu nennen:

- Art und Menge von Gärgütern
- Inhaltsstoffe der Gärgüter
- Gärtemperatur
- pH-Wert im Gärgut
- Mikroorganismenpopulation und anaerober Stoffwechselweg
- Luftdruck und Umgebungstemperatur
- Anlagenbauarten und Betriebsmanagement.

In Praxisuntersuchungen können repräsentative Informationen über den Stoffwechsel der Methangärung und die Methanausbeute aus Gärgütern nur erreicht werden, wenn der Untersuchungszeitraum mindestens ein halbes Jahr beträgt und dabei alle wesentlichen

Einflussparameter konstant gehalten werden. Dies würde einen hohen Versuchsaufwand erfordern.

Entscheidende Voraussetzung für reproduzierbare und repräsentative Kennwerte des Methanbildungsvermögens von Biomasse ist, dass die wichtigsten gärbiologischen Parameter, unter denen das Methanbildungsvermögen von Biomasse bestimmt wird, bekannt sind und im Versuch im Optimalbereich konstant gehalten werden können. Für die Vergleichbarkeit von Versuchsergebnissen ist der Bezug der spezifischen Methanmenge auf Normbedingungen wichtig. Angaben zur Herkunft und zur Vorbehandlung des Inoculums, Angaben zu den Inhaltsstoffen und zur Aufbereitung der Gärgüter, Angaben zum genauen Versuchsaufbau und zur Versuchsdurchführung sind notwendig. Für vergleichende Untersuchungen zum Gärverhalten von Biomasse muss sichergestellt werden, dass der anaerob abbaubare Anteil der Biomasse auch tatsächlich vollständig im Versuch abgebaut werden kann. Diskontinuierliche Gärtests ermöglichen eine weitgehend vollständige Vergärung des anaerob abbaubaren Anteils biogener Stoffe (LANGHANS 2002, MERRETING-BRUNS & KABASCI 2002, BECKER & HAMS 2002).

Einflussparameter der Gärbiologie und der Substrate sind vielfältig. Zu deren Quantifizierung ist ein entsprechend umfangreiches Versuchsdesign erforderlich. Zeit-, Personal- und Sachaufwendungen sollen aber trotzdem in vertretbarem Rahmen bleiben. Die Parameter der Gärbiologie wie z.B. der pH-Wert der Gärung, die Gärtemperatur, das Nährstoffangebot für die Vergärung u.a.m. können im Labor mit relativ einfachen Mitteln konstant gehalten werden. Daher ist die Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse von Batch-Gärverfahren hoch. Gärverhalten und Energiestoffwechsel können bei umfangreich angelegtem Versuchsdesign mit vertretbarem Versuchsaufwand untersucht werden. Eine Vielzahl an Energiepflanzenarten, deren Nährstoffzusammensetzung, die Konservierungsform der Gärgüter und gärbiologische Einflüsse auf das Methanbildungsvermögen von Biomasse können im Batch-Gärversuch mit vertretbarem Aufwand systematisch quantifiziert werden. Für eine weitgehende Übertragbarkeit der Batch-Labor-Versuchsergebnisse in die Praxis ist eine Validierung der Laborversuchsergebnisse unter praktischen Bedingungen erforderlich.

Die spezifische Methanproduktion von Mais und Kleegras wurde in Eudiometer-Messzellen unter kontrollierten Gärbedingungen gemessen. Die Untersuchung erfolgte nach DIN-Norm 38414. Im Anhang findet sich eine Abbildung (A6) der Apparatur.

Die Eudiometer-Messapparatur umfasst sechs Messzellen. Jede Messzelle besteht aus einer Glassäule, die mit Sperrflüssigkeit (NaCl-Lösung, angesäuert mit Zitronensäure) gefüllt ist. Die Säule ist am unteren Ende mit einem Ausgleichsgefäß verbunden und steht am oberen Ende mit dem Reaktionsgefäß in Verbindung, in dem sich das Probenmaterial und das Impfmateriale befinden. Die Reaktionsgefäße werden in einem Wasserbad temperiert (Gärtemperatur 37-39 °C). Mittels eines Magnetrührers wird das Gärgut in Intervallen von 10 Minuten jeweils 10 Sekunden lang durchmischt. Das in den Reaktionsgefäßen gebildete Biogas verdrängt die Sperrflüssigkeit aus der Säule in die Ausweichgefäße. Die spezifische Biogasproduktion wird an der Säulenskalierung abgelesen und als Gasnormvolumen angegeben.

Um zu verhindern, dass beim Ansetzen des Gärversuches das Inoculum mit Luftsauerstoff in Berührung kommt, werden die leeren Gärgefäße mit Argon gefüllt und dann Impfmateriale und Probenmaterial in die anaeroben Gärgefäße eingewogen. Das Impfmateriale wird zuvor homogenisiert, indem es durch eine Siebplatte (3 mm Lochweite) geleitet wurde.

Die Proben wurden im Parallelansatz bzw. im Dreifachansatz untersucht. Zeitgleich wurde – ebenfalls im Parallelansatz – die Biogasproduktion aus reinem Impfmateriale

gemessen. Zu Beginn und am Ende jedes Versuches wurden Trockengewicht und Glühverlust von Probe und Impfmateriale erfasst. Außerdem wurden Inhaltsstoffanalysen der Gärstoffe durchgeführt (vergleiche Tabellen A1-A6 im Anhang). Eine genaue Beschreibung der Vorgangsweise findet sich im Kapitel „Laboranalysen“. Im Verlauf der Gärung wurde der pH-Wert im Gärmedium kontrolliert und gegebenenfalls durch Zugabe von 2 N NaOH reguliert. Alle 4 bis 7 Tage wurden Proben des gebildeten Biogases zur gaschromatographischen Analyse des Methangehaltes entnommen.

5.5. Laboranalysen

Vor und nach der Vergärung der Substrate in der Eudiometereinheit wurden Inhaltsstoffanalysen durchgeführt. Außerdem wurden das Trockengewicht und der Gehalt der Gärgüter an organischer Trockensubstanz (oTS) ermittelt.

Die Bestimmung des Trockengewichts erfolgte durch Differenzwägung nach Trocknung der Gärgüter bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz. Der Gehalt der Proben an organischer Trockensubstanz (oTS) wurde durch Veraschung im Muffelofen bei 550 °C ermittelt.

Die Gehalte an organischem Stickstoff (N_{org}) und Kohlenstoff (C_{org}) in den Gärgütern wurden mit Hilfe eines Elementaranalysators bestimmt. Ammonium-Stickstoff wurde zu Versuchsende mittels Ammonium-Elektrode (WTW NH 500/2) gemessen. Mit Hilfe der Weender-Rohnährstoffanalyse wurden die Gehalte der Proben an den Inhaltsstoffgruppen Rohprotein, Rohfett und Rohfaser quantifiziert. Die Gehalte an Rohfaser wurden weiters in die Menge der gesamten Zellwandbestandteile (neutral detergent fibre, NDF) und in den Zellulose-Lignin-SiO₂-Komplex (acid detergent fibre, ADF) aufgetrennt. Aus der ADF wurde der Gehalt an Rohlignin (acid detergent lignin, ADL) bestimmt. Zellulose wurde aus der Differenz von ADF und ADL berechnet, Hemizellulose aus der Differenz von NDF und ADF (VAN SOEST 1991).

Zur Kontrolle des Gärprozesses wurde der pH-Wert mittels Glaselektrode gemessen. Diese Messungen erfolgten in der ersten Phase des Versuches in periodischen Abständen von zwei bis drei Tagen sowie zu Versuchsbeginn und Versuchsende. Wurde ein Abfallen des pH-Wertes unter einen kritischen Wert von pH = 6,8 beobachtet, so wurden zwischen 2 und 10 ml 2N NaOH zugegeben, um auf diese Weise den pH-Wert der Gärgüter zu regulieren.

In Intervallen von 4 bis 7 Tagen wurden aus dem Gassammelrohr der Eudiometer jeweils 20 ml Gasprobe für die Analyse entnommen, in gasdichte, evakuierte Serumfläschchen gefüllt und bis zur Analyse in Wasser bei 4 °C gelagert. Der Methangehalt in den Gasproben wurde an einem Gaschromatographen (Shimadzu 14B, Säule: HP-Plot molecular sieve 5A, 0,32 mm i.D., 12 µm Filmdicke) mittels Wärmeleitfähigkeitsdetektor (TCD) im isothermen Modus gemessen. Es wurde ein Probenvolumen von 50 µl injiziert. Die Ofen-, Detektor- und Injektortemperaturen betragen 40, 150 und 105 °C, als Trägergas diente Helium. Die Kalibrierung erfolgte mit reinem Methangas.

Der Energiegehalt der Gärgüter sowie des ausgegorenen Materials wurde mit Hilfe eines Bombenkalorimeters bestimmt und in MJ * kg TS⁻¹ angegeben. Die Energiemenge von Methan im Biogas wurde mit dem oberen Heizwert von Methan $H_o = 55,497 \text{ MJ/kg CH}_4$ und der Dichte $\rho = 0,717 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (bei 0°C und 1,0132 bar) berechnet (BEITZ & KÜTTNER 1987).

5.6. Berechnung des spezifischen und des kumulativen Biogasertrages

Der kumulative Biogas- und Methanertrag der Pflanzenbiomasse wurde nach DIN 38414 ermittelt.

5.6.1. Versuchsprotokoll

Um die Gasbildung in den Eudiometerzellen aufzuzeichnen, wurde für jedes Eudiometergerät ein Protokoll angelegt. Darin wurden auch die Messgrößen Temperatur und Luftdruck vermerkt. Ein Beispiel für ein Versuchsprotokoll ist in Tabelle 11 dargestellt. Bei der Berechnung der Gaserträge wurde die Temperatur in der Umgebungsluft und im wärmegeprägten Bereich über dem Wasserbad berücksichtigt.

Tabelle 11: Protokoll zur Durchführung der Eudiometerversuche.

PROTOKOLL EUDIOMETER																	
			Versuch														
Nr.	Datum	Uhrzeit	Luftdruck mbar	Temperatur °C		Säule 1		Säule 2		Säule 3		Säule 4		Säule 5		Säule 6	
				Luft	Wasser	Beginn	Ende										
0																	
1																	
2																	
3																	
4																	
5																	
6																	
7																	
8																	
9																	

*) „Beginn“ und „Ende“ bedeuten Gasvolumen in der Säule am Beginn und am Ende jedes Ablesintervalls

5.6.2. Gasnormvolumen

Zuerst wurde für jede Eudiometerzelle das Normvolumen des in den einzelnen Zeitabschnitten entwickelten Biogases berechnet:

$$V_0 = \frac{V_{\text{neu}} * (P_{\text{neu}} - P_W) * 273}{1013 * T_{\text{neu}}} - \frac{V_{\text{alt}} * (P_{\text{alt}} - P_W) * 273}{1013 * T_{\text{alt}}}$$

V_0 Gasnormvolumen des neu gebildeten Biogases in Nml

V_{neu} Volumen des Biogases bei der aktuellen Ablesung in ml

V_{alt} Volumen des Biogases bei der letzten Ablesung in ml

P_{neu} Luftdruck zur Zeit der aktuellen Ablesung in mbar

P_{alt} Luftdruck zur Zeit der letzten Ablesung in mbar

P_W Dampfdruck des Wassers in Abhängigkeit von der Temperatur des umgebenden Raumes, in mbar

273 Normtemperatur = 273 K

1013 Normdruck = 1013 mbar

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

T_{alt} Temperatur des Biogases (= Temperatur des umgebenden Raumes) zur Zeit der letzten Ablesung in K

5.6.3. Gasproduktion des Impfmaterials und korrigiertes Gasnormvolumen

Um die Gasproduktion der Probe zu erhalten, muss die Gasproduktion des Impfmaterials vom Gasnormvolumen abgezogen werden.

$$V_X = V_I * m_M / m_I$$

V_X Gasnormvolumen, das in der Probenzelle aus dem Impfmateriale gebildet wurde, in Nml

V_IGasnormvolumen, das in der Impfmateriale-Zelle gebildet wurde, in Nml

m_MMenge des in der Probenzelle benutzten Impfmateriale in g

m_IMenge des in der Impfmateriale-Zelle benutzten Impfmateriale in g

Durch Abzug der Gasproduktion aus dem Impfmateriale erhält man das korrigierte Gasnormvolumen:

$$V_{\text{kor}} = V_0 - V_X$$

V_{kor}korrigiertes Gasnormvolumen in Nml

V_0Gasnormvolumen in Nml

V_XGasnormvolumen, das aus dem Impfmateriale gebildet wurde, in Nml

5.6.4. Spezifische Biogasproduktion

Die in einem bestimmten Zeitabschnitt erfolgte Biogasproduktion wird auf die organische Trockensubstanz (oTS) der Probe bezogen und in $l * kg \text{ oTS}^{-1}$ angegeben.

$$V_S = \frac{V_{\text{kor}} * 10^4}{m * TS * \text{oTS}}$$

V_Sspezifische Biogasproduktion in $l * kg \text{ oTS}^{-1}$

V_{kor}korrigiertes Gasnormvolumen in Nml

mMasse der eingewogenen Substratprobe in g

TSTrockensubstanzgehalt der Probe in % der Frischmasse

oTSGehalt an organischer Trockensubstanz in der Probe in %TS

5.6.5. Kumulative Biogasproduktion

Die für die einzelnen Zeitabschnitte berechnete spezifische Biogasproduktion der Proben wird kumulativ addiert. Zur graphischen Darstellung werden diese Werte gegen die Versuchsdauer aufgetragen.

5.7. Bestimmung der in-Vitro-Verdaulichkeit der Gärrohstoffe beim Einsatz als Grundfutter für Wiederkäuer

Für die eingesetzten Gärrohstoffe wurde zusätzlich die in-vitro-Verdaulichkeit zur Verwendung als Grundfutter für Wiederkäuer bestimmt. Die Untersuchungen wurden an der BAL Gumpenstein durchgeführt. Für die Bestimmung der Verdaulichkeit der organischen Masse von Futtermitteln wurde die Methode von TILLEY & TERRY (1968) in modifizierter Form nach RESCH (1991) angewendet.

Der Verdauungsprozess im Labor läuft in einem Zweistufenprinzip ab, ähnlich wie die Verdauung im Wiederkäuermagensystem. In der ersten Stufe, welche eine Dauer von 48 Stunden aufweist, wird die Futterprobe mit dem Rinderpansensaft und einer anorganischen Pufferlösung versetzt. In dieser Zeit bauen die Mikroorganismen des Pansens einen Teil der Nährstoffe (Proteine, Kohlehydrate) der Futterprobe ab.

Die zweite Stufe der Prozedur bezeichnen TILLEY & TERRY (1963) als Verdauung mit Pepsin in einer Säurelösung, bzw. BARNES (1967) als HCl-Pepsin-Hydrolyse. Diese 48-stündige Phase der Verdauung wird beim Wiederkäuer im Labmagen vollzogen, indem Salzsäure den pH-Wert auf ein ideales Maß von 1,5 absenkt, um dem Enzym Pepsin den optimalen Proteinabbau zu ermöglichen.

5.8. Energetische Bewertung von Gärrohstoffen zur Methanbildung – Methanenergiewert (MEW)

Für eine sichere Methangärung der eingesetzten Rohstoffe mit hohem energetischen Wirkungsgrad ist die richtige Versorgung der Mikroorganismen im Fermenter der Biogasanlage mit Nährstoffen erforderlich. Eine rationelle und vollwertige Nährstoffversorgung der Mikroorganismen im Fermenter nach der angestrebten energetischen Erzeugungsleistung von Biogasanlage setzt voraus, dass das Methanbildungsvermögen – der Methanenergiewert – der Gärrohstoffe bekannt ist.

Für die praktische Kalkulation des Energiestoffwechsels der anaeroben Umsetzung von der Bruttoenergie in der Biomasse der Gärrohstoffe in Methanenergie des Biogases sind Messungen zur Energieverwertung im Stoffwechselversuch erforderlich.

Das **Methanenergiewertsystem (MEWS)** basiert auf der Kenntnis des Methanbildungsvermögens von Biomasse bei bekannten Inhaltsstoffen Rohprotein (XP), Rohfett (XL), Rohfaser (XF → NDF, ADF, ADL) und N-freie Extraktstoffe (XX). Mit diesem neuen Bewertungssystem wird die energetische Bewertung der Vielzahl geeigneter Gärrohstoffe wie Energiepflanzenarten und -sorten und verschiedener Wirtschaftsdüngerarten und -formen anhand ihrer Inhaltsstoffe möglich.

Für nahezu alle Pflanzenarten, die sich für die Biogaserzeugung eignen, liegen bereits umfangreiche Datenbanken zum Gehalt an Rohprotein (XP), Rohfett (XL), Rohfaser (XF → NDF, ADF, ADL) und N-freien Extraktstoffen (XX) vor. Die Daten werden zur Optimierung der Nährstoffversorgung von Nutztieren bereits umfangreich verwendet. Sie können in vollem Umfang auch zur Bestimmung des Methanenergiewertes bei der anaeroben Vergärung der Pflanzen herangezogen werden.

Darüber hinaus wird mit Hilfe eines neuen Methanenergiewertsystems eine exakte Berechnung der energetischen Leistung von Biogasanlagen in Abhängigkeit der verfügbaren Biomasse möglich.

Milieubedingungen der anaeroben Stoffwechselversuche können mit Hilfe vorliegender kinetischer Modelle optimal gestaltet werden. Derzeit ist die Fähigkeit von Biomasserohstoffen zur Methanbildung nicht näher bekannt.

In der Tierernährung wird die energetische Bewertung von Futtermitteln als Standardmethode bereits weltweit zur bedarfsgerechten Fütterung landwirtschaftlicher Nutztiere angewendet (KELLNER ET AL. 1984, KIRCHGESSNER 1985, MOE ET AL. 1987, NEHRING 1972, SCHIEMANN 1971, SCHNEIDER & FLATT 1975, VAN ES ET AL. 1980). Das mikrobielle Ökosystem im Pansen von Wiederkäuern ist der Ökologie des anaeroben Stoffwechsels in Biogasanlagen sehr ähnlich (MADIGAN ET AL. 2000). Es ist deshalb sinnvoll und erforderlich, die Methode der energetischen Bewertung von Futtermitteln zur Erzeugung von Milch und Fleisch etc. auch auf biogene Rohstoffe zur Methanerzeugung zu übertragen.

Der Energieumsatz von Biomasse wird im Stoffwechselversuch bei anaerober Gärung im Batch-Experiment (Eudiometer) gemessen. Für die Energiewechsellmessung wird folgende Gliederung der Bilanzstufen verwendet (Abb. 4).

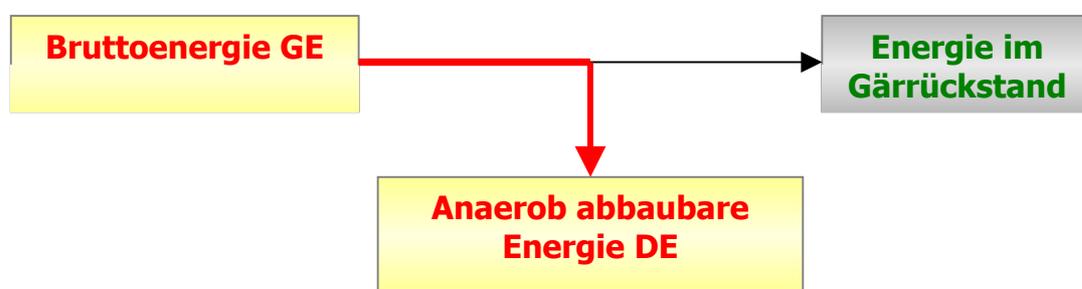


Abbildung 4: Schema des Energiestoffwechsels.

Die mit dem Gärgut der Biogasanlage zugeführte Energie wird im Fermenter durch einen mehrstufigen Abbau für die Erhaltung der Lebens- und Stoffwechselfunktionen der Mikroorganismen und für die Erzeugung der gasförmigen Verbindungen, vorwiegend CH₄ und CO₂, verwendet. Hierbei treten an verschiedenen Stellen Verluste auf, die im Gesamtstoffwechselversuch erfasst werden können (Abb. 4).

Bilanzstufen des anaeroben Energiwechsels:

Die **Bruttoenergie (GE)** ist die in Biomasserohstoffen enthaltene chemische Energie. Sie wird im Bombenkalorimeter durch Verbrennung als freigesetzte Wärme erfasst. Der je nach Zusammensetzung der Gärrohstoffe im Fermenter mikrobiell nicht abbaubare Anteil der organischen Substanz und der in Bakterienbiomasse fixierte Energieanteil – ca. 7 % des Energiegehaltes der abbaubaren Biomasse (EDELMAHN 2001) – verbleiben im Gärrückstand, der aus dem Fermenter wieder ausgetragen wird. Zieht man diese im Gärrückstand enthaltene Energie – sie wird ebenfalls durch Verbrennung des Gärrückstandes im Bombenkalorimeter bestimmt – von der Bruttoenergie ab, so erhält man die **anaerob abbaubare Energie (DE)**. Beim Gärungsvorgang entsteht in geringerem Umfang auch Wärme (Fermentationswärme). Nach EDELMAHN (2001) haben die Bakterien beim anaeroben Abbau organischer Substanz weniger als 5 % der Energie zu ihrer freien Verfügung. Beim anaeroben Abbau wird deshalb nur sehr wenig Wärme frei. Die Fermentationswärme (FW) kann theoretisch berechnet werden, indem man von der Bruttoenergie des Gärgutes die Energie des nicht abgebauten Gärrückstandes (EGR) und die Methanenergie des Biogases abzieht. Wenn man die Fermentationswärme (FW) von der abbaubaren Energie (DE) abzieht, erhält man die **umsetzbare Energie (ME)**. Diese umsetzbare Energie ist die Höchstmenge an Energie, die dem System zur Bildung von Methan zur Verfügung steht. Die im Biogas enthaltene Methanmenge wird im Stoffwechselversuch direkt gemessen. Aus diesem Sachverhalt ergibt sich das Schema des Energiwechsels der anaeroben Gärung wie folgt:

Methanenergie im Biogas (CH₄-E) =

$$\begin{aligned} & \text{Bruttoenergie im Gärgut (GE)} \\ & - \text{Energie im Gärrückstand (EGR)} - \text{Fermentationswärme (FW)} \end{aligned}$$

Der Energiegehalt der Spurengase (H^+ , NH_3 , org. Säuren) wird derzeit nicht gesondert erfasst, weil diese Gase im Vergleich zum Methan nur in Spuren < 300 ppm im Biogas enthalten sind. Er ist deshalb rechnerisch in der Fermentationswärme enthalten.

Entsprechend dem Schema des Energiewechsels lassen sich verschiedene Quotienten der Energieausnutzung beschreiben.

(1) Der **Wirkungsgrad der Methanbildung** (η) ergibt sich aus:

$\eta = \text{Methanenergie im Biogas (CH}_4\text{-E)} / \text{Bruttoenergie (GE) im Gärgut}$

(2) Die **Abbaubarkeit der Energie** d_E ergibt sich aus:

$d_E = \text{Abbaubare Energie (DE)} / \text{Bruttoenergie (GE)}$

Das energetische Leistungsvermögen eines Gärrohstoffes wird im anaeroben mikrobiellen Ökosystem auf das Methanbildungsvermögen des Gärrohstoffes bezogen. Grundlage für die energetische Bewertung der Gärrohstoffe ist seine Wirkung zur Bildung von Methan bei der Verwendung von Mikroorganismenpopulationen aus landwirtschaftlichen Biogasanlagen mit flüssiger Vergärung in mesophilen und thermophilen Temperaturbereichen.

Das Methanbildungsvermögen der verschiedenen Nährstoffe in den Gärrohstoffen wird mittels multipler Regressionsanalyse berechnet.

Das Methanbildungsvermögen der Nährstoffe wird also nicht mit reinen Nährstoffen geprüft, sondern es wird festgestellt, welches tatsächliche Produktionsvermögen die einzelnen (Roh)-Nährstoffe aufweisen, wenn diese in Form eines natürlichen Gärrohstoffes den Mikroorganismen im Fermenter verabreicht werden. Der Stoffwechsel der Methangärung wird durch Zulage zu prüfenden Gärrohstoffe zum Inoculum im Batch-System experimentell untersucht.

Das neue Bewertungssystem baut auf folgenden Prämissen auf:

- 1 Stoffwechselexperimente zum Gesamtprozess der anaeroben Zersetzung organischer Substanz in Methan werden im Labor (Batch-Verfahren) durchgeführt. Als Inoculum wird Material aus Biogasanlagen mit Energiepflanzenvergärung verwendet, die nach dem neuesten Stand der Technik gebaut wurden und betrieben werden (ÖKL-Biogasanlagen).
- 2 Im Stoffwechselexperiment wird der transformierbare Anteil der Bruttoenergie des Gärgutes in Methanenergie des Biogases überführt.
- 3 Das Bewertungssystem beruht auf der Verwendung der Rohnährstoffe von Gärrohstoffen. Der „Methanenergiewert“ eines Gärrohstoffes (MEW) wird nach einer multiplen Regressionsgleichung aus den Rohnährstoffgehalten der Gärrohstoffe: Rohprotein (XP), Rohfett (XL), Rohfaser (XF) und N-freien Extraktstoffen (XX) (in % der TS) berechnet und in l CH_4 /kg oTS angegeben.

$$\text{MEW [l CH}_4\text{/kg oTS]} = \begin{aligned} & x_1 * \text{Rohprotein (XP) (Gehalt i. \% d. TS)} \\ & + x_2 * \text{Rohfett (XL)} \\ & + x_3 * \text{Rohfaser (XF)} \\ & + x_4 * \text{N-freie Extraktstoffe (XX)} \end{aligned}$$

- 4 Die Bruttoenergie (GE) und die Energie im Gärrückstand (EGR) werden im Bombenkalorimeter bestimmt.
- 5 Der Wirkungsgrad für die Methanbildung (η) ergibt sich aus dem Quotienten Methanenergie im Biogas / Bruttoenergie des Gärgutes. Dem unmittelbaren

- Zusammenhang zwischen Methanerzeugung und dafür erforderlichem Bruttoenergiebedarf wird dadurch Rechnung getragen.
- 6 Der gärgutspezifische Zusammenhang zwischen dem Wirkungsgrad der Methanbildung (η) und dem Methanenergiewert (MEW) von Gärgütern wird dargestellt. Damit kann bei Kenntnis des Methanenergiewertes für verschiedene Rohstoffe direkt auf den energetischen Wirkungsgrad bei der Methangärung verschiedener Gärgüter geschlossen werden.
 - 7 Es wird geprüft, in wieweit der C-Transferfaktor (Kohlenstoff im Biogas / Kohlenstoff im Gärgut) vom Methanenergiewert (MEW) des Gärgutes abhängt.
 - 8 Im Methan-Energiewert-System erfolgt die Zusammenstellung einer Gärgutmischung durch anteilige Addition der Methanenergiewerte der einzelnen Gärrohstoffkomponenten. Die für die Kalkulation von Gärrohstoffmischungen vorteilhafte Bewertung von Einzelgärgütern ermöglicht die Kalkulation des Methanenergiewertes (MEW) der Gesamtgärrohstoffmischung. Das Methan-Energiewert-System ermöglicht durch die Verwendung der Summe der Rohnährstoffe die optimale Versorgung der Mikroorganismen mit Nährstoffen. Für eine angestrebte Leistung der Biogasanlage kann der erforderliche Nährstoffbedarf berechnet werden. Daraus ergeben sich erstmals grundlegende neue Möglichkeiten, von der Seite der Gärrohstoffe den anaeroben Zersetzungsprozess der organischen Substanz in praktischen Biogasanlagen zu optimieren und die Methanproduktionskapazität von Gärgütern in der Praxis maximal auszunutzen.

5.9. Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung der Ergebnisse erfolgte mit Hilfe des Statistikprogramms SPSS Version 9. Unterschiede in den spezifischen Biogasausbeuten zwischen den untersuchten Varianten (frisch/siliert, Erntezeitpunkte, Sorten) wurden mittels des nichtparametrischen Kruskal-Wallis-Tests und des Mann-Whitney-U-Tests auf Signifikanz geprüft ($p < 0,05$). Der zeitliche Verlauf der spezifischen Methanausbeute wurde mittels einer Kurvenanpassung beschrieben. Unterschiede zwischen den Regressionsfunktionen wurden mit Hilfe des Konfidenzintervalles der Regressionskoeffizienten ($p < 0,05$) analysiert. Die Modelle zur Berechnung der Methanenergiewerte wurden mit Hilfe einer multiplen, linearen Regressionsanalyse (Methode: Einschluss) ermittelt. Die Inhaltsstoffe der Gärgüter wurden als Regressorvariablen verwendet, die spezifische Methanausbeute war die Zielvariable. Die Güte der Regressionsmodelle wird durch den Regressionskoeffizienten „b“ und das Bestimmtheitsmaß „ r^2 “ sowie durch das Signifikanzniveau (p) des Gesamtmodells angegeben. Die Normalverteilung der Residuen wurde grafisch geprüft. Die Residuen wurden mit dem Durbin-Watson-Test auf Autokorrelation getestet. Die Methangehalte im Biogas wurden mit dem Scheffé-Test auf Unterschiedlichkeit geprüft.

5.10. Versuchsansatz

5.10.1. Kleegrasmischungen

Die Versuche zu Biogas- und Methanerträgen aus Kleegrasmischungen umfassten die gräserreiche Mischung IM und die kleereiche Mischung KM, die jeweils zu drei verschiedenen Zeitpunkten geschnitten worden waren. Für den Vergleich der Mischungen und der drei Schnittzeitpunkte wurde siliertes Klee gras eingesetzt. Außerdem wurden

verschiedene Konservierungsformen verglichen. Dazu wurden die Kleegrasmischungen der zweiten, mittleren Erntetermine auch als frisches Material und als Heu untersucht. Da von der Mischung „KM“ kein frisches Material verfügbar war, wurde in diesem Versuch die in der Zusammensetzung ähnliche Variante „Dauerwiese“ (DW) verwendet. Das Methanbildungsvermögen des Impfmaterials (Inoculum) wurde in eigenen Fermentern gesondert ermittelt.

Aus der Fragestellung ergaben sich 10 Testvarianten, die im Parallel- bzw. dreifachen Ansatz untersucht wurden. Mit Hilfe von 5 Eudiometeranlagen konnten die 10 Varianten gleichzeitig eingesetzt werden. Tabelle 12 zeigt den Versuchsansatz mit den Einwaagen und den Gehalten an organischer Trockensubstanz in den einzelnen Varianten. Die Mengenanteile der Kleegraszusätze zum Inoculum wurden so gewählt, dass die Pufferkapazität des Gärmediums gerade ausgeschöpft wurde.

Als Impfmateriale (Inoculum) wurde Gärgut aus dem Fermenter der Biogasanlage von Herrn Hermann Jöchtl verwendet. Dieses Inoculum hatte einen pH-Wert von 7,70 und eine Temperatur von 37,3°C. Der Trockensubstanzgehalt betrug 6,66 % TS i.d. FM bzw. 4,82 % oTS i.d. FM. Das Inoculum enthielt 5,92 g Gesamtstickstoff je kg FM, davon waren 3,82 g NH₄-N. Bei alleiniger Vergärung des Inoculums wurde ein spezifischer Methanertrag von 50 Nl Methan * kg oTS⁻¹ gemessen. Dies wurde bei der Berechnung des spezifischen Methanertrages aus Kleegrass berücksichtigt. (vergleiche Kap. 5.6)

Tabelle 12: Versuchsansatz zur Bestimmung der Biogasbildung aus Kleegrasmischungen: Einwaagen und oTS-Gehalte der Pflanzen und des Impfmaterials. FM = Frischmasse, oTS = organische Trockensubstanz [% TS].

Variante	Kleegrass		Impfmateriale		oTS in Mischung [% i. FM]
	Einwaage [g]	oTS [% i. FS]	Einwaage [g]	oTS [% i. FS]	
IM 1. Erntetermin siliert	80	8,84	150	4,82	6,2
IM 2. Erntetermin siliert	70	11,08	180	4,82	6,6
IM 3. Erntetermin siliert	60	14,39	220	4,82	6,8
KM 1. Erntetermin siliert	85	8,11	140	4,82	6,1
KM 2. Erntetermin siliert	70	10,95	180	4,82	6,5
KM 3. Erntetermin siliert	60	15,54	240	4,82	7,0
IM 2. Erntetermin frisch	55	17,49	245	4,82	7,1
IM 2. Erntetermin Heu	10	79,74	240	4,82	7,8
DW 2. Erntetermin frisch	75	8,80	150	4,82	6,1
KM 2. Erntetermin Heu	10	81,40	240	4,82	7,9

5.10.2. Mais

Biogas- und Methanerträge wurden von fünf Maissorten und jeweils drei Ernteterminen gemessen (Tab. 13). Als Impfmateriale wurde Biogasgülle aus der Biogasanlage von Herrn Hermann Jöchtl verwendet. Diese Biogasgülle hatte einen pH-Wert von 7,89 und eine Temperatur von 39,3°C. Der Trockensubstanzgehalt betrug 6,12 % TS i.d. FM und bzw. 4,0 % oTS i.d. FM. Das Inoculum enthielt 5,49 g Gesamtstickstoff je kg FM, davon waren 3,48 g NH₄-N.

Beim vorliegenden pH-Wert und der Gärtemperatur ergibt sich für das Ammonium-Ammoniakgleichgewicht eine Ammoniakkonzentration von 0,35 g NH₃-N pro Liter. An diese Konzentration waren die Kulturen im verwendeten Inoculum gewöhnt. Verschiedene Autoren (EDELMANN 2000, ANGELIDAKI & AHRING 1993, SPROTT & PATEL 1988) zeigen dass, bei nicht adaptierten Kulturen Ammoniak bereits ab einer Konzentration von 0,15 g NH₃-N/l die Methangärung hemmen kann, Kulturen sich aber an höhere Konzentrationen gewöhnen, ohne dass eine Hemmwirkung eintritt. SUNG & TAO (2001) zeigen, dass die Hemmwirkung in Bezug auf die spezifische Methanbildung aus den Gärrohstoffen bei an 0,4 g NH₃-N/l adaptierten Kulturen ab einer Konzentration von 0,5 NH₃-N/l begann. Kulturen, die an eine Ammoniakkonzentration von 1,4 g NH₃-N/l adaptiert waren, zeigten Hemmwirkungen ab 2,0 g NH₃-N/l. Die für die Methanbakterien letale Ammoniakkonzentration lag bei 10,0 g NH₃-N/l. Der optimale pH-Wert für die Methangärung lag bei pH 7,0 bis pH 7,8.

Die verwendeten Inocula waren weitgehend ausgegoren. Die alleinige Vergärung von Inoculum brachte einen spezifischen Methanertrag von 56 NI Methan * kg oTS⁻¹. Dies wurde bei der Berechnung des spezifischen Methanertrages aus Mais berücksichtigt (vergl. Kap. 5.6).

Tabelle 13 zeigt den Versuchsansatz mit den Einwaagen und den Gehalten an organischer Trockensubstanz in den einzelnen Varianten.

Aus der Fragestellung ergaben sich 16 Testvarianten, die im Parallelansatz untersucht wurden. Mit Hilfe von 38 Fermentern konnten die 16 Testvarianten in Doppelbestimmung und 6 Inoculavarianten gleichzeitig eingesetzt werden.

Tabelle 13. Versuchsansatz zur Bestimmung der Biogasbildung aus Silomais: Einwaagen und oTS-Gehalte der Pflanzen und des Impfmaterials. FM = Frischmasse, oTS = organische Trockensubstanz (% TS).

Variante	<i>Maissilage</i>		<i>Impfmateriale</i>		<i>oTS i. Mischung</i> [% oTS i. FM]
	<i>Einwaage</i> [g]	<i>oTS</i> [% i. FM]	<i>Einwaage</i> [g]	<i>oTS</i> [% i. FM]	
Benicia; 1. Ernte	50	21,56	400	4,05	6,00
Benicia; 2. Ernte	40	36,49	400	4,05	7,00
Benicia; 3. Ernte	35	48,59	400	4,05	7,63
Ribera; 1. Ernte	50	21,55	400	4,05	5,99
Ribera; 2. Ernte	40	33,83	400	4,05	6,76
Ribera; 3. Ernte	35	46,25	400	4,05	7,45
Phönix; 1. Ernte	50	22,85	400	4,05	6,14
Phönix; 2. Ernte	40	34,89	400	4,05	6,85
Phönix; 3. Ernte	35	45,46	400	4,05	7,38
Atalante; 1. Ernte	50	22,31	400	4,05	6,08
Atalante; 2. Ernte	40	39,03	400	4,05	7,23
Atalante; 3. Ernte	35	39,35	400	4,05	6,89
Saxxo; 1. Ernte	50	18,46	400	4,05	5,65
Saxxo; 2. Ernte	40	33,95	400	4,05	6,77
Saxxo; 3. Ernte	35	49,76	400	4,05	7,73
Ribera; 1. Ernte (Silage)	40	30,87	360	4,82 ¹⁾	7,43
Ribera; 1. Ernte (frisch)	40	30,54	360	4,82 ¹⁾	7,39

¹⁾Inoculum der Versuchsreihe "Pioneer" nach AMON ET AL. 2002b

5.11. Versuchsablauf und - durchführung (Zeittafel)

Nachfolgend ist die zeitliche und inhaltliche Abfolge der Versuchs- und Projektdurchführung dargestellt. Wesentlichen Arbeitsschritte werden in chronologischer Reihenfolge aufgelistet (Tab. 14).

Anbau Ernte und Konservierung der Kleegrasmischungen wurden bereits im Frühjahr bis Frühsommer 2001 vom Institut für Pflanzenbau und Kulturlandschaft, Abteilung Grünland der BAL Gumpenstein unter Leitung von Univ.Doz.DI.Dr. Erich Pötsch durchgeführt, sodass zum Projektstart Gärrohstoffproben aus gezieltem Anbau und Ernte zur Verfügung standen. (Arbeitsschritt 2).

Im Jänner 2002 wurde mit dem weiteren Ausbau der teilweise schon vorhandenen Versuchseinrichtungen und der Eudiometeranlage begonnen (Arbeitsschritt 3).

Ab Februar 2002 wurden Inocula verschiedener Herkünfte im Hinblick auf ihre Eignung für den Einsatz in Stoffwechsel-Bilanz-Versuchen zur anaeroben Vergärung von Kleegrasmischungen geprüft. Kriterien waren Homogenität, pH-Wert, mikrobielle Aktivität und Ammoniumgehalt, sowie die technischen Verhältnisse bei der Gewinnung des Impfmateri als unter anaeroben Bedingungen vor Ort (Arbeitsschritt 4).

Vorversuche des Arbeitsschrittes 5 im Februar bis März 2002 dienten dem Funktionstest der Versuchsanlage und der Optimierung aller Arbeitsschritte zur Durchführung der Stoffwechseluntersuchungen beim Einsatz von Kleegrasmischungen. Dabei wurde auch das später verwendete Inoculum-Gärrohstoff-Verhältnis optimiert, um bestmögliche Milieubedingungen (pH-Wert, Ammoniumgehalt, Homogenität) im Gärmedium zu erhalten. Um ein möglichst homogenes Gärmedium während der gesamten Gärzeit zu erreichen, wurden auch verschiedene Rührreinrichtungen auf den Magnetrührern getestet und optimiert. Das Rührintervall und die Rührintensität, mit dem das Gärmedium gemischt wurde, wurden ebenfalls optimiert. Für die Inhaltstoffanalytik wurde die erforderliche Probemenge ermittelt und festgelegt.

Die eigentlichen Untersuchungen zur Stoffwechselbilanz bei der Vergärung von Klee gras wurden am ILUET Anfang April 2002 begonnen. Sie dauerten bis Ende Mai 2002 (Arbeitsabschnitt 6). 10 Varianten wurden jeweils im 60 Tage dauernden Stoff- und Energie wechselfmessungen untersucht.

Im April 2002 wurde mit der Vorbereitung, Planung und Durchführung der Maissortenversuche begonnen. Eigens für den vorliegenden Zweck wurden Sortenversuche von der Landeskammer für Land- und Forstwirtschaft Steiermark unter Leitung von Dr. Karl Mayer am Standort Ludersdorf angelegt. Im Vergleichsversuch standen die Sorten „Phönix“, „Ribera“, „Benicia“, „Atalante“ und „Saxxo“. Im Feldversuch wurden die Wachstumsentwicklung der Pflanzenbestände, die Ertragsleistung der Ganzpflanzen, der Kornertrag, der CCM- Ertrag und der Ertrag an Restpflanzen (Ganzpflanzen ohne Kolben) ermittelt.

Ab Mai 2002 wurden die Inhaltstoffe (Weender- und Van Soest-Analytik) und der Energiegehalt der Gärrohstoffe und der Gärrückstände der Klee grasmischungen unter Leitung von Ao.Univ.Prof.DI.Dr. Werner Zollitsch am Institut für Nutztierwissenschaften der Universität für Bodenkultur Wien durchgeführt. Im Labor des ILUET wurden neben den Stoffwechseluntersuchungen der anaeroben Gärung die Parameter Trockensubstanz, Asche, Gesamtstickstoff und pH-Wert der Gärgüter bestimmt. Die Bestimmung des Kohlenstoffgehaltes der Gärmedien wurden am Institut für Bodenforschung der Universität für Bodenkultur Wien durchgeführt.

Tabelle 14. Zeittafel mit Arbeitsschritten

<i>Arbeitsschritt</i>	<i>Jahr</i>	<i>Monat</i>	
1	Literaturrecherche	ständig	ständig
2	Ernte und Konservierung der Kleegrasmischungen	2001	Mai – Juni
3	Aufbau der Versuchseinrichtungen	2002	Jänner
4	Beschaffung und Test Inoculum (mikrobiol. Aktivität, pH-Wert, NH ₄ -N-Gehalt) für Stoffwechsel-Bilanz-Versuch „Klee gras“	2002	Februar
5	Vorversuche Wiesengras: Inoculum – Rohstoff – Mengen – Verhältnis; GC-Adaptierungen; Test und Genauigkeitsprüfung, sämtlicher Messparameter (pH-Wert, CH ₄ -Gehalt, Nt, NH ₄ -N, TS, oTS; Weender-Analytik; Van Soest-Analytik)	2002	Februar – März
6	Untersuchung der anaeroben Stoffwechsel-Bilanz bei der Vergärung verschiedener Wiesengrasmischungen: Einfluss der Sortenmischung, des Erntezeitpunktes und der Konservierung auf das Methanbildungsvermögen; 10 Varianten jeweils in Doppel- bzw. Dreifachbestimmung	2002	April – Mai
7	Vorbereitung und Planung der Maisanbauversuche	2002	April
8	Anlage der Maissortenversuche Phönix, Ribera, Benicia, Atalante, Saxxo in der Steiermark	2002	April
9	Analyse der Inhaltsstoffe (XP, XL, XF, XA, XX, NDF, ADF, ADL, C, Nt, NH ₄ -N, TS, oTS) und des Energiegehaltes der Biomasse von Klee gras (Gärrohstoff), des Inoculums und des Gärrückstandes; drei Sortenmischungen, drei Erntezeitpunkte, zwei Konservierungsformen	2002	Mai – Juni
10	Auswertung und Darstellung der Untersuchungsergebnisse des Stoffwechsel-Bilanz-Versuches „Klee gras“	2002	Juni – Juli
11	Entwicklung des Methan-Energiewert-Systems „Klee gras“	2002	Juli – August
12	Zwischenbericht	2002	August
13	Ernte, Aufbereitung und Silierung des Maises	2002	Aug. – Oktober
14	Beschaffung und Test Inoculum (mikrobiol. Aktivität, pH-Wert, NH ₄ -N-Gehalt) für Stoffwechsel-Bilanz-Versuch „Silomais“	2002	Oktober
15	Vorversuche Silomais: Inoculum – Rohstoff – Mengen – Verhältnis;	2002	Okt.-November
16	Analyse der Inhaltsstoffe (XP, XL, XF, XA, XX, NDF, ADF, ADL, C, Nt, NH ₄ -N, TS, oTS) und des Energiegehaltes der Biomasse von Silomaisganzpflanzensilage (Rohstoff); fünf Sorten: Phönix, Ribera, Benicia, Atalante, Saxxo, drei Erntezeitpunkte, eine Konservierungsformen und des Inoculums	2002	Dezember
17	Untersuchung der anaeroben Stoffwechsel-Bilanz bei der Vergärung von Silomaisganzpflanzensilage: Einfluss der Sorte, des Erntezeitpunktes und der Konservierung auf das Methanbildungsvermögen; 16 Varianten jeweils in Doppelbestimmung	2003	Jänner – März
18	Analyse der Inhaltsstoffe (XP, XL, XF, XA, XX, NDF, ADF, ADL, C, Nt, NH ₄ -N, TS, oTS) und des Energiegehaltes der Biomasse des Silomaises (Gärrückstand)	2003	März – April
19	Bestimmung der In-vitro-Verdaulichkeit von Klee grassilage (zwei Mischungen), -heu und grünem Wiesengras, drei Erntezeitpunkten, sowie Silomaissilage (fünf Sorten), drei Erntezeitpunkte	2003	Juni
20	Auswertung und Darstellung der Untersuchungsergebnisse des Stoffwechsel-Bilanz-Versuches „Silomais“	2003	Mai – Juni
21	Entwicklung des Methan-Energiewert-Systems „Silomais“	2003	Mai – Juni
22	Endbericht	2003	Juni – Juli

Im Arbeitsschritt 10, der im Juni 2002 begann, erfolgte die Auswertung und Darstellung der Untersuchungsergebnisse des Stoffwechselbilanzversuches „Klee grasmischungen“. An diese Auswertung schloss sich die Entwicklung des Methan-Energiewert-Systems für Klee grasmischungen an. Dieser Arbeitsschritt 11 war Ende Juli 2002 abgeschlossen. Der

Zwischenbericht zum gegenständlichen Forschungsprojekt wurde Ende August 2002 vorgelegt.

Arbeitsschritt 13 beinhaltet Ertragsmessungen, Ernte, Aufbereitung und Konservierung der Gärrohstoffproben des Maises vom Standort Ludersdorf. Er wurde von Mitarbeitern des ILUET durchgeführt. Von allen 5 Sorten wurden jeweils an drei genau festgelegten Ernteterminen Proben von Ganzpflanzen, Restpflanzen, Körnern und Kolben gewonnen und jeweils Ertragsmessungen durchgeführt. Die Proben wurden anschließend in das Labor der Versuchswirtschaft Groß-Enzersdorf gebracht, dort aufbereitet, fein zerkleinert und für die Silagebereitung luftdicht in 2 Litergefäßen zur Milchsäuregärung verschlossen. Sämtliche Maisproben wurden zusätzlich als grüne, nicht silierte Proben eingefroren. Um eine hohe Qualität der erzeugten Silageproben zu erhalten, wurden diese nach Abschluss der Milchsäuregärung ebenfalls eingefroren und so bis zur Verwendung im Stoffwechselversuch zwischengelagert. Insgesamt konnten auf diese Weise 120 Proben gewonnen werden, sodass für weiterführende Fragestellungen wie zum Beispiel der Frage nach der Methanproduktivität verschiedener Pflanzenteile des Maises entsprechende Proben von sehr hoher Qualität vom selben Pflanzenbauversuch zur Verfügung stehen. Die Arbeiten zur Maisernte waren Ende Oktober 2002 abgeschlossen.

Für den anstehenden Stoffwechselbilanzversuch mit Silomais wurden Anfang Oktober 2002 im Arbeitsschritt 14 analog zum Arbeitsschritt 4 verschiedene Inocula beschafft, getestet und das für Silomais optimal geeignete Impfsubstrat ausgewählt. Es hat sich das Impfsubstrat der Biogasanlage von Herrn Jöchtl wieder als bestmöglich geeignet herausgestellt. Auch aus Gründen der Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse wurde wieder Impfsubstrat der Biogasanlage von Herrn Jöchtl verwendet.

Vorversuche zum Silomaisversuch wurden im Arbeitsschritt 15 im Oktober und November 2002 analog dem Arbeitsschritt 5 durchgeführt. Die Inhaltsstoffe der Gärrohstoffe des Silomais wurden im Dezember 2002 analog dem Arbeitsschritt 9 analysiert. Von Jänner bis März 2003 fanden im Arbeitsschritt 17 am ILUET die Stoffwechselbilanzmessungen mit Silomaisganzpflanzensilage analog dem Arbeitsschritt 6 statt. Insgesamt wurden 16 Varianten jeweils in Doppelbestimmung untersucht. Inhaltsstoffanalysen der Gärrückstände des Silomais wurden im Zeitraum von Ende März bis Ende April 2003 analog den Arbeitsschritten 9 und 16 durchgeführt.

Zusätzlich wurden im Arbeitsschritt 19 vergleichende Untersuchungen aller eingesetzten Gärgüter zur In-vitro-Verdaulichkeit beim Einsatz als Grundfutter für Rinder durchgeführt. Die Untersuchungen fanden im Juni 2003 am Institut für Pflanzenbau und Kulturlandschaft, Abteilung Grünland der BAL Gumpenstein unter Leitung von Univ.Doz.DI.Dr. Erich Pötsch statt.

Die Auswertung und Darstellung der Untersuchungsergebnisse des Stoffwechselbilanzversuches Silomaissilage fand im Mai und Juni 2003 statt. Daran schloss sich die Entwicklung des Methan-Energiewert-Systems für Silomais an. Im abschließenden Arbeitsschritt 22 erfolgte die Erstellung und Vorlage des Endberichtes.

Durch eine sehr effiziente Durchführung des Projektes und die Unterstützung zahlreicher Kooperationspartner konnten die Arbeitsschritte 11 und 21 über die im Vertrag vereinbarten Leistungen hinaus erbracht werden. Sie betreffen die Entwicklung des Methanenergiewertsystems, dem wesentlichsten Fortschritt für die Biogaserzeugung aus Energiepflanzen.

6. Ergebnisse und Diskussion – Kleegrasmischungen

Zunächst werden die Ergebnisse der Versuche zur Biogaserzeugung aus Kleegrasmischungen dargestellt und diskutiert. Im nachfolgenden Kapitel sind die Ergebnisse der Untersuchungen zur Biogaserzeugung aus Mais aufgezeigt.

6.1. Kumulative spezifische Biogasausbeute

In Abbildung 5 sind der kumulative Biogasertrag sowie der Verlauf des pH-Wertes bei Vergärung der Silagen der gräserreichen (IM) und kleereichen (KM) Kleegrasmischungen aus drei verschiedenen Schnittzeitpunkten dargestellt.

Die beiden Mischungen IM und KM unterschieden sich hinsichtlich des Biogasertrages nicht signifikant. Zwischen den Silagen aus verschiedenen Schnittzeitpunkten wurden jedoch signifikante Unterschiede in der Biogasbildung festgestellt. Silagen aus dem ersten Schnittzeitpunkt ergaben die höchsten Biogaserträge von durchschnittlich 532 (IM) und 547 (KM) $\text{NI Biogas} \cdot \text{kg oTS}^{-1}$. Die Biogaserträge der Silagen des zweiten Erntezeitpunktes waren mit 474 (IM) und 473 (KM) $\text{NI Biogas} \cdot \text{kg oTS}^{-1}$ signifikant geringer. Die Erträge der Silagen vom dritten, am weitesten fortgeschrittenen Erntezeitpunkt waren mit 427 $\text{NI Biogas} \cdot \text{kg oTS}^{-1}$ (IM und KM) signifikant geringer als die aus dem ersten, frühen Erntezeitpunkt, unterschieden sich jedoch nicht signifikant von denen der Silagen aus dem zweiten, mittleren Erntezeitpunkt.

Die kumulative Biogasbildung der Kleegrasmischungen in verschiedenen Konservierungsformen ist in Abbildung 6 graphisch dargestellt. Zusätzlich ist der Verlauf des pH-Wertes während der Gärung angegeben. Es wurde die Biogasbildung von jeweils frischem, siliertem und getrocknetem Pflanzenmaterial der gräser- und kleereichen Mischungen aus dem zweiten Erntetermin untersucht. Für Silage und Heu wurde die gräserreiche Intensivmischung IM eingesetzt. Frisches Material stammte aus der kleereichen Mischung „Dauerwiese“ (DW). Auch hier waren zwischen den gräser- und kleereichen Mischungen keine signifikanten Unterschiede im Biogasertrag festzustellen. Durchwegs zeigten jedoch die Silagen gegenüber dem frischen und getrockneten Material signifikant höhere Biogaserträge. Die getrockneten Mischungen ergaben mit 399 und 414 $\text{NI Biogas} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ oTS}$ höhere Erträge als die frischen Pflanzen mit 335 und 349 $\text{l Biogas kg}^{-1} \text{ oTS}$, jedoch waren diese Unterschiede nicht signifikant.

Bedingt durch intensive Abbauprozesse, im Zuge derer organische Säuren gebildet werden, war der pH-Wert des Gärgutes bei allen Varianten zu Beginn der Methangärung instabil, d.h. es kam zu Absenkungen des pH-Wertes. Einer eventuell auftretenden Hemmung der Methangärung, die durch den absinkenden pH-Wert hervorgerufen werden könnte, wurde durch rechtzeitige Zugaben von 2 N NaOH- Lösung zum Gärsubstrat des Fermenters entgegengewirkt. Die NaOH-Lösung wurde nach Bedarf in 1 – 2 ml Portionen im zwei bis dreitägigen Abstand höchstens dreimal verabreicht. Ab etwa dem siebenten Gärtag war der pH-Wert in der Regel stabil.

Abbildung 5. Kumulative Biogasbildung aus den Silagen der gräserreichen (IM) und kleereichen (KM)

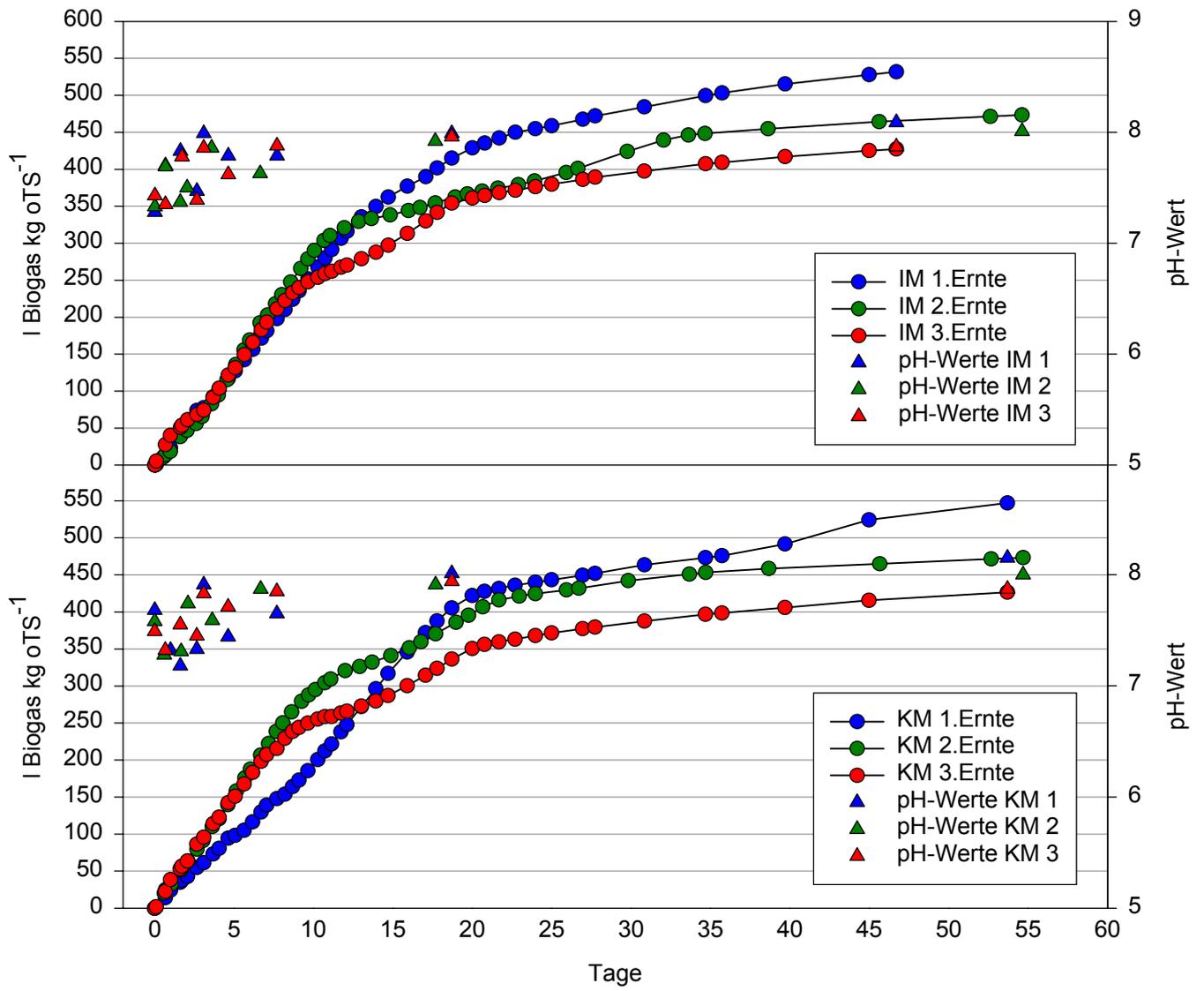


Abbildung 5. Kumulative Biogasbildung aus den Silagen der gräserreichen (IM) und kleereichen (KM) Klee-grasmischungen sowie Verlauf des pH-Wertes während der Gärung.

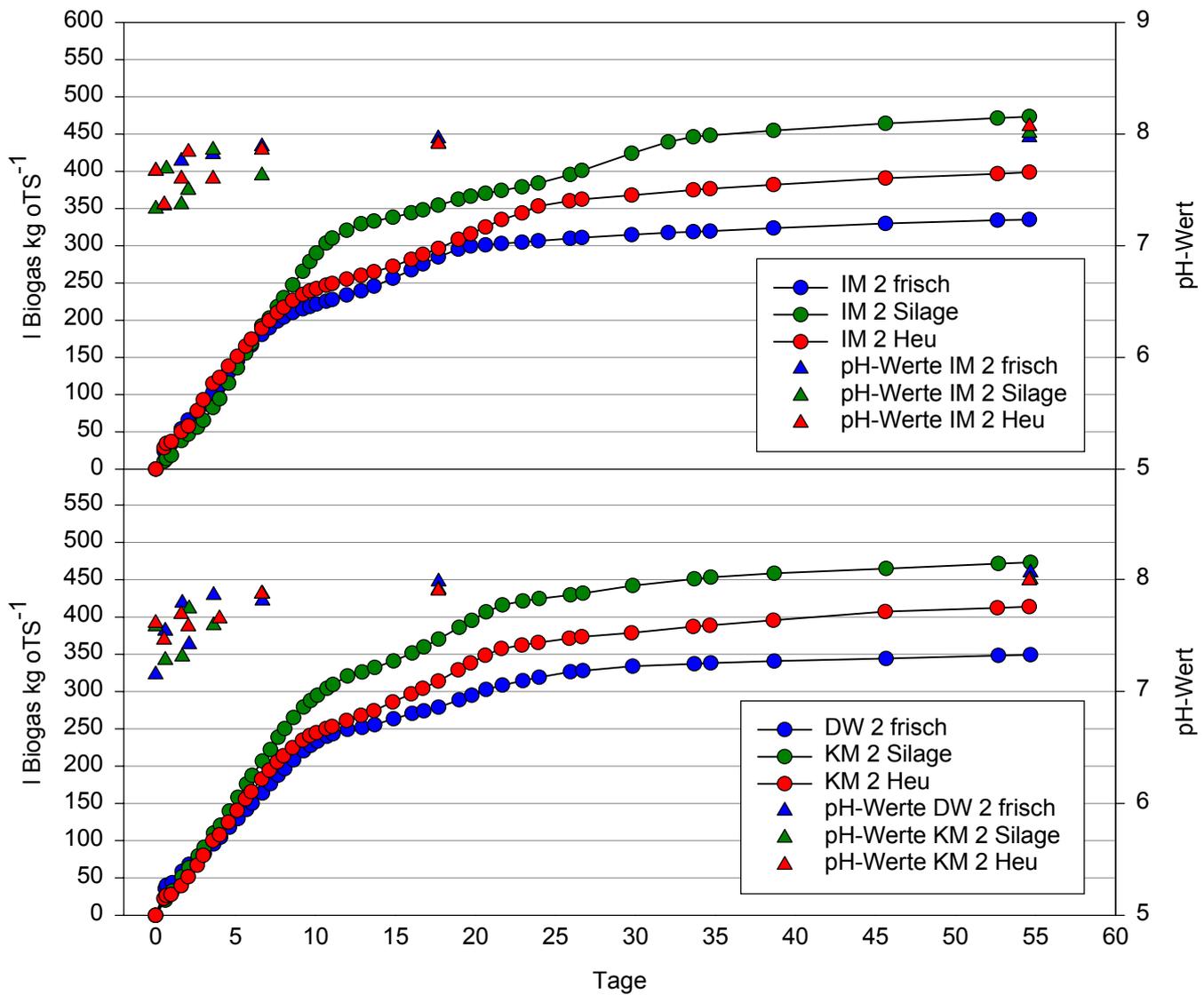


Abbildung 6. Kumulative Biogasbildung aus silierten, frischen und getrockneten Pflanzen der gräserreichen (IM, DW) und kleereichen (KM) Kleegrasmischungen sowie Verlauf des pH-Wertes während der Gärung.

6.2. Methangehalt im Biogas

Der eigentliche Energieträger im Biogas ist das Methan. Für die Wirtschaftlichkeit der Biogaserzeugung ist daher der Methangehalt im Biogas entscheidend. Der Methangehalt des Biogases der untersuchten Klee grasvarianten bewegte sich zwischen 67,1 und 71,4 %. Es war kein signifikanter Unterschied (Scheffé-Test) im Methangehalt zwischen den einzelnen Varianten gegeben (Tab. 15).

Tabelle 15. Mittlere Methangehalte im Biogas der untersuchten Varianten.

<i>Variante</i>	<i>n</i>	<i>Methan</i> [Vol. %]	<i>Stabw.</i>
IM 1. Ernte	3	69,6	0,21
IM 2. Ernte	5	68,8	3,95
IM 3. Ernte	4	69,4	1,95
KM 1. Ernte	5	71,4	3,46
KM 2. Ernte	4	68,8	3,48
KM 3. Ernte	5	68,0	4,65
IM 2 frisch	5	70,7	2,89
DW 2 frisch	5	70,3	5,57
IM 2 Heu	3	67,1	1,62
KM 2 Heu	4	67,5	2,93

Im Vergleich zu Literaturangaben sind diese gemessenen Methangehalte als hoch einzustufen. ZAUNER & KÜNTZEL (1986) erhielten bei der Vergärung von Grasmischungen Methangehalte von 53 bis 55 Vol. %. POUÉCH ET AL. (1998) geben Methangehalte von 63,9 Vol. % bei der Vergärung von Klee an. MÄHNERT ET AL. (2002) fanden bei der Vergärung verschiedener Gräserarten einen durchschnittlichen Methangehalt im Biogas von 68 Vol. %.

6.3. Kumulative spezifische Methanausbeute

6.3.1. Einfluss des Erntezeitpunktes

Wie bei der kumulativen Biogasbildung waren auch in der kumulativen Methanbildung keine signifikanten Unterschiede zwischen den gräser- und kleereichen Klee grasmischungen gegeben. Jedoch waren die spezifischen Methanausbeuten aus der Vergärung der Klee grasmischungen des dritten Schnittzeitpunktes gegenüber denen des ersten und zweiten Schnittes signifikant geringer (Tab. 16 und Abb. 5).

In Tabelle 16 sind die logarithmischen Modelle der kumulierten spezifischen Methanausbeute der Klee grasmischungen vom ersten, zweiten und dritten Erntezeitpunkt dargestellt. Da zwischen den Mischungen IM und KM kein signifikanter Unterschied bestand, wurden die Regressionsfunktionen jeweils aus den Daten beider Mischungen ermittelt. Weiterhin dargestellt sind die geschätzten Regressionskoeffizienten (b) mit dem Bestimmtheitsmaß der Funktion (r^2). Für die Regressionskoeffizienten (b) sind die oberen und unteren Grenzen des Vertrauensbereiches angegeben. Gekennzeichnet sind ebenfalls Unterschiede der Regressionskoeffizienten. Unterschiede im Verlauf der kumulierten spezifischen Methanausbeute liegen dann vor, wenn die Vertrauensbereiche der Regressionskoeffizienten keine gemeinsamen Bereiche aufweisen.

Tabelle 16. Regressionsmodelle der kumulierten spezifischen Methanausbeute aus Kleegrassilage verschiedener Sortenmischungen und Einfluss des Schnittzeitpunktes auf die spezifische Methanausbeute; Parameterschätzung und Signifikanztest

Modell: spezifische Methanausbeute [$\text{NI CH}_4 \cdot \text{kg oTS}^{-1}$] = $b \cdot \lg(\text{Tag})$						
Sorte	Erntezeitpunkt	b	r^2	Konfidenz-Intervall		Sig.
				Unten	Oben	
IM, KM	Erster	198,39	0,81	188,76	208,01	A
KM, IM	Zweiter	192,99	0,95	189,15	197,66	A
IM, KM	Dritter	172,16	0,87	166,44	177,88	B

Der Regressionskoeffizient (b) der Funktion des dritten und späten Erntezeitpunktes zeigt im Vergleich zum ersten und zweiten Erntezeitpunkt eine signifikant geringere Methanbildung. Beim ersten Erntezeitpunkt kam es zu Beginn der anaeroben Gärung vermutlich zu einer Ammoniakhemmung auf Grund des hohen Eiweißgehaltes. Die Methanbildung kam verzögert in Gang, was eine exakte Anpassung der logarithmischen Kurve erschwerte. Trotz des verzögerten Beginns wurde beim frühen Erntetermin die höchste Methanausbeute erreicht.

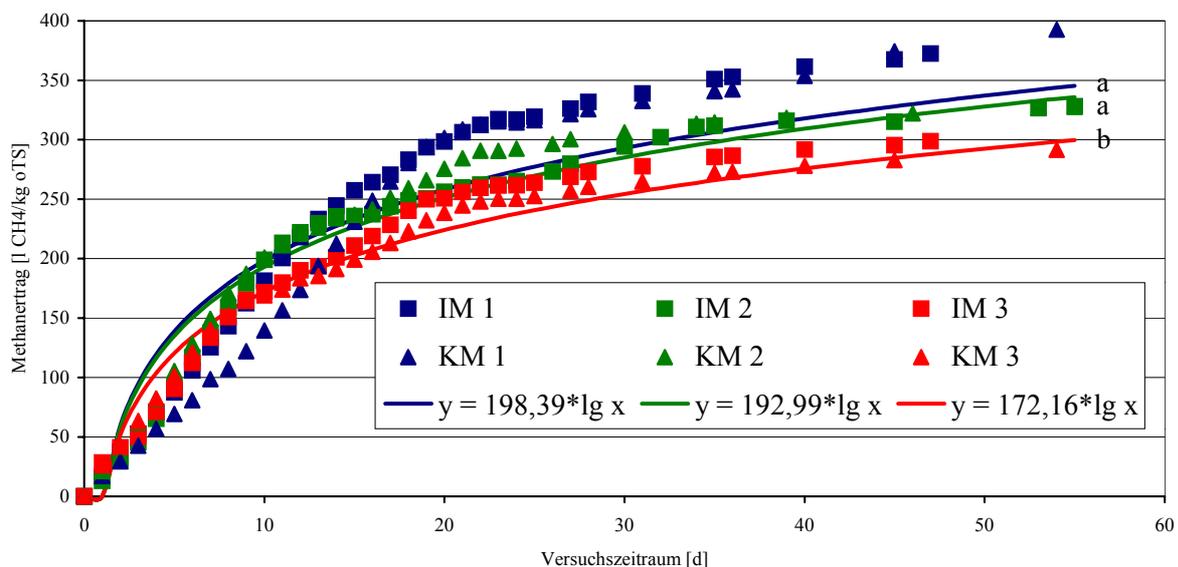


Abbildung 7. Kumulative Methanbildung aus Silagen der gräserreichen (IM) und kleereichen (KM) Kleegrassmischungen des ersten, zweiten und dritten Erntezeitpunktes. Dargestellt sind die gemessenen Werte sowie die auf diesen basierenden Kurvenanpassungen mit dazugehörigen Funktionen. Mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnete Kurvenverläufe bedeuten einen signifikanten Unterschied bei $p < 0,05$.

Abbildung 7 zeigt den nach dem obigen Modell berechneten kumulierten Verlauf der spezifischen Methanausbeuten der Kleegrassmischungen jedes Erntezeitpunktes. Während aus den Kleegrassmischungen des ersten Schnittes nach 58 Gärtagen Methanerträge von 370 (IM) und 390 (KM) $\text{NI CH}_4 \cdot \text{kg oTS}^{-1}$ und aus den Mischungen des zweiten Schnittes jeweils 326 $\text{NI CH}_4 \cdot \text{kg oTS}^{-1}$ (IM und KM) gewonnen wurden, ergaben die Mischungen des dritten Schnittes nur 297 (IM) und 290 (KM) $\text{NI CH}_4 \cdot \text{kg oTS}^{-1}$. Signifikante Unterschiede der spezifischen Methanausbeute aus den Kleegrassmischungen der frühen und späten Ernte

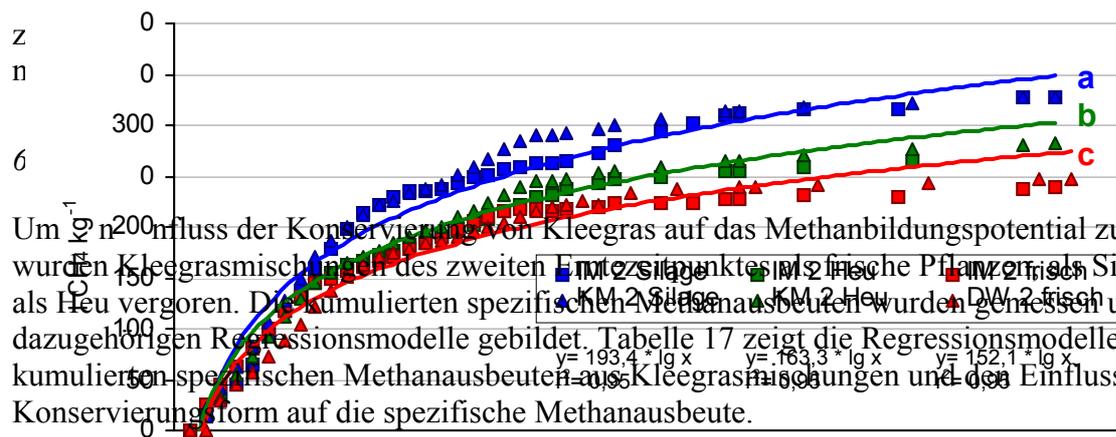


Tabelle 17. Regressionsmodelle der kumulierten spezifischen Methanausbeuten bei unterschiedlicher Konservierung der Kleegrasmischung. Parameter schätzung und Signifikanztest

Modell: spezifische Methanausbeute [NI CH ₄ * kg oTS ⁻¹] = b * lg(Tag)						
Sorte	Konservierung	b	r ²	Konfidenz-Intervall		Sig.
				Unten	Oben	
DW, IM	Frisch	152,09	0,95	149,12	155,05	A
IM, KM	Heu	163,31	0,95	160,12	166,50	B
IM, KM	Silage	192,99	0,95	189,15	197,66	C

Die Regressionskoeffizienten (b) aller Funktion sind unterschiedlich. Das geringste Methanbildungspotential wurde bei nicht konserviertem Klee gras gemessen. Die Heuvariante wies ein mittleres Methanbildungspotential auf. Der Regressionskoeffizient des silierten Klee grasses zeigt ein deutlich erhöhtes Methanbildungspotential. Wahrscheinlich fördert die Milchsäuregärung bereits die Bildung von für die Methanogenese wichtige Vorläufersubstanzen wie z.B. Milchsäure und Essigsäure und anderer niedermolekulare organische Verbindungen.

Abbildung 8 zeigt die gemessenen und nach dem Regressionsmodell (Tab. 17) berechneten Verläufe der kumulierten spezifischen Methanausbeuten der Klee grasmischungen IM, KM und DW des zweiten Erntetermins. Dargestellt ist der Einfluss der Konservierung auf das Methanbildungspotential der Klee grassorten im Verlauf von 58 Gärtagen. Die Vergärung von siliertem Pflanzenmaterial erbrachte eine spezifische Methanausbeute von 326 NI CH₄ * kg oTS⁻¹. Bei Vergärung von frischen Pflanzen wurden demgegenüber nur 240 NI CH₄ * kg oTS⁻¹ gemessen. Das Methanbildungspotential von Heu lag mit 275 NI CH₄ * kg oTS⁻¹ zwischen dem von Silage und Heu. Es ist daher nicht wahrscheinlich, dass während des Trocknungsvorganges bei der Heubereitung nennenswerte Mengen der für die Methanbildung wichtigen flüchtigen organischen Verbindungen schon vor der Gärung aus dem Gärrohstoff – Klee grassheu – verdampft sind.

Abbildung 8. Kumulative spezifische Methanbildung aus silierten, frischen und getrockneten Pflanzen der gräserreichen (IM, DW) und kleereichen (KM) Kleegrasmischungen. Dargestellt sind die gemessenen Werte sowie die auf diesen basierenden Kurvenanpassungen mit dazugehörigen Formeln. Mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnete Kurvenverläufe bedeuten einen signifikanten Unterschied bei $p < 0,05$.

Aus den Abbildungen 7 und 8 ist weiterhin ersichtlich, dass etwa ab dem 40-ten Gärtag kein nennenswerter Zuwachs der Methanausbeuten mehr gemessen wurde. Aus dem Regressionsmodell geht hervor, dass bis zu diesem Zeitpunkt etwa 90 % des Methanpotentials bereits gebildet wurden.

6.4. Methanenergiewert von Kleegrasmischungen

Während bislang Fragen des Einflusses der Sortenwahl, des Erntezeitpunktes und der Konservierungsform auf das Methanbildungspotential von Kleegrasmischungen geklärt wurden, soll im Folgenden das Methan-Energiewert System für die allgemeine Bestimmung des Methanbildungspotentials von Kleegrasmischungen in Abhängigkeit von den maßgeblichen Inhaltsstoffen XP, XL, XF und XX dargestellt werden. Abschließend wird auf die Frage des Wirkungsgrades der Methangärung von Klee gras eingegangen.

6.4.1. Inhaltsstoffe der Klee grasmischungen vor der Vergärung

Tabelle 18 zeigt die Gehalte von Inhaltsstoffen der verwendeten Gärrohstoffe der Klee grasmischungen. Neben anderen Parametern sind die Inhaltsstoffe Rohprotein (XP), Rohfett (XL), Rohfaser (XF), Rohasche (XA), N-freie Extraktstoffe (XX), Lignin (ADL), Zellulose (ZEL), Hemizellulose (H-Zell), Kohlenstoff (C), Gesamtstickstoff (N_t), Ammoniumstickstoff (NH_4-N) und der Bruttoenergie (GE) bezogen auf die Trockensubstanz der Gärrohstoffe angegeben. Ebenso ersichtlich ist die spezifische Methanausbeute in $NI CH_4$ pro kg oTS aus den Klee grasproben. Wie zu erkennen ist, nehmen der Rohprotein- (XP), der Rohfett- (XL) und der Aschegehalt (XA) mit zunehmender Vegetationsentwicklung der Pflanzen ab. Umgekehrt steigen die Gehalte an N-freien Extraktstoffen (XX), Lignin (ADL), Trockensubstanz (TS) organischer Trockensubstanz (oTS) mit zunehmender Vegetationsentwicklung der Pflanzen an. Weiterhin zeigt sich eine Abnahme der spezifischen Methanausbeute aus den Klee grasmischungen mit fortschreitender Vegetationsentwicklung der Pflanzenbestände.

Tabelle 18. Inhaltsstoffe, Bruttoenergiegehalt und spezifische Methanausbeute der Klee grasmischungen verschiedener Reifestadien und Konservierungsformen

Varianten	XP	XL	XF	XA	XX	ADL	GE	ZEL	H-ZEL	C	C/N	TS	OTS	CH ₄ -Ertrag
-----------	----	----	----	----	----	-----	----	-----	-------	---	-----	----	-----	-------------------------

	% TM	% TM	% TM	% TM	% TM	% TM	MJ * KgTS ⁻¹	% TM	% TM	% TM		% FM	% FM	NI CH ₄ * kg oTS ⁻¹
IM 1 ¹⁾ Silage	17,93	7,54	33,08	13,51	27,94	36,35	16,28	43,38	6,40	46,42	8,9	10,06	8,70	369,67
IM 2 ²⁾ Silage	13,70	4,59	34,36	10,73	36,63	37,43	15,81	39,30	14,69	44,47	12,0	12,30	10,98	325,85
IM 3 ³⁾ Silage	13,61	3,87	32,41	8,65	41,47	36,61	15,94	40,51	13,87	46,39	14,1	15,64	14,29	296,61
KM 1 Silage	18,09	6,62	32,52	12,43	30,34	33,09	15,96	36,16	15,50	45,33	9,9	9,08	7,95	390,40
KM 2 Silage	14,22	3,40	35,79	9,88	36,71	38,33	16,04	43,06	17,07	45,05	11,1	12,08	10,89	325,52
KM 3 Silage	14,35	3,86	33,92	8,55	39,32	37,35	16,03	43,63	16,22	46,17	17,6	16,78	15,35	289,98
IM 2 Frisch	15,94	3,80	24,20	8,12	47,94	27,63	15,83	29,52	18,90	45,17	18,4	19,34	17,77	236,92
DW 2 Frisch	18,92	3,12	26,34	11,88	39,74	31,97	15,78	35,67	12,41	44,69	9,3	9,78	8,62	245,61
IM 2 Heu	12,53	2,46	27,84	7,39	49,77	30,24	16,14	34,29	16,85	45,16	79,1	87,6	81,14	267,47
KM 2 Heu	11,59	2,07	32,13	6,94	47,28	35,59	12,99	40,77	13,77	45,00	82,2	89,5	83,28	279,56

¹⁾Vegetationsstadium: vor dem Ähren-/Rispschieben; ²⁾ in der Blüte; ³⁾ Ende der Blüte

Ein Vergleich der futterwertbestimmenden Inhaltsstoffe der vorliegenden Klee grasproben mit Literaturwerten (KIRCHGESSNER 1992, RIEDER 1983, DLG-FUTTERWERTTABELLEN FÜR WIEDERKÄUER 1997) zeigt, dass die Inhaltsstoffe der vorliegenden Proben und die Änderung des Nährstoffmusters mit zunehmendem Alter der Pflanzen repräsentativen Charakter für Standorte des österreichischen Alpenraumes aufweisen.

Die Methanausbeuten bei der anaeroben Vergärung der Klee grasproben wurden mit der in-vitro-Verdaulichkeit und den NEL-Gehalten der Gärgüter beim Einsatz als Grundfutter für Milchvieh verglichen. Die Methanausbeuten sinken mit zunehmender Vegetationsentwicklung. Die Verdaulichkeit und der NEL-Gehalt hingegen steigen im Vegetationsverlauf an (vgl. Tabellen A1/A2 im Anhang). Verdaulichkeit und Methanausbeute zeigen eine gegenläufige Entwicklung. Aus diesem Grund kann aus Werten der in-vitro-Verdaulichkeit nicht auf die Methanausbeute von Klee grassmischungen bei anaerober Vergärung in Biogasanlagen geschlossen werden.

6.4.2. Methanenergiewert von Klee grassmischungen

Die Schätzgleichung zur energetischen Bewertung von Klee grassmischungen für die Methanbildung in Biogasanlagen wird auf der Basis der Rohnährstoffgehalte Rohprotein (XP), Rohfett (XL), Rohfaser (XF) und N-freie Extraktstoffe (XX) (in % der TS) und des spezifischen Methanbildungsvermögens in NI CH₄/kg oTS der Klee grassilagen erstellt. Es liegt folgendes lineares multiples Regressionsmodell zugrunde.

$$\text{MEW [l CH}_4\text{/kg oTS]} = \begin{array}{l} x_1 * \text{ Rohprotein (XP) (Gehalt \% i.d. TS)} \\ + x_2 * \text{ Rohfett (XL)} \\ + x_3 * \text{ Rohfaser (XF)} \\ + x_4 * \text{ N-freie Extraktstoffe (XX)} \end{array}$$

Diese Inhaltsstoffe sind sowohl für den Stoffwechsel der Wiederkäuer als auch für die Methangärung in Biogasanlagen essentiell. Die meisten Futterpflanzen eignen sich auch als Gärrohstoffe für die Biogaserzeugung. Für Futterpflanzen liegen bereits umfangreiche

Datensammlungen über die genannten Inhaltsstoffe vor, z.B. als DLG-Futterwerttabellen für Wiederkäuer. Sie können zur praktischen Kalkulation des Methanenergiewertes (MEW) der Gärrohstoffe in vollem Umfang verwendet werden.

Tabelle 19 zeigt die Regressionsgleichung zur Berechnung des Methanenergiewertes von Kleegrasmischungen anhand der Rohnährstoffe. Dargestellt sind die Regressionskoeffizienten der Rohnährstoffe für die Methanbildung, das Bestimmtheitsmaß, der F-Wert, die Durbin-Watson-Statistik und die Signifikanzniveaus der Gesamtgleichung und der einzelnen Regressionskoeffizienten.

Tabelle 19. Parameter der Regressionsgleichung zur Berechnung des Methanenergiewertes von Kleegrasmischungen anhand der Rohnährstoffe

<i>Inhaltsstoff</i>	<i>Regressionskoeffizient</i>	<i>Einheit</i>	<i>Signifikanzniveau</i>
Rohprotein (XP)	11,77	% TS	0,47
Rohfett (XL)	4,46	% TS	0,84
N-freie Extraktstoffe (NFE)	-1,60	% TS	0,66
Rohfaser (XF)	5,56	% TS	0,42
Qualitätsparameter der Gesamtgleichung: R ² = 0,998; F-Wert = 305,036; Durbin-Watson-Wert = 1,447; Signifikanzniveau = 0,003; n = 6			

Wie Tabelle 19 zeigt, kann der Methanenergiewert (in NI CH₄ * kg oTS⁻¹) von Kleegrassilage anhand der geschätzten Parameter (Regressionskoeffizienten) für die Methanbildung aus den Rohnährstoffen mit Hilfe einer multiplen linearen Regressionsgleichung berechnet werden. Das Gesamtmodell ist genau (r² = 0,998) und signifikant (p = 0,003). Die Gleichung gibt weiterhin den Wert der einzelnen Rohnährstoffkomponenten des Kleegrases zu seinem Methanenergiewert an. Zum Beispiel zeigt Rohprotein (XP) mit dem Regressionskoeffizienten 11,77 den höchsten Beitrag zum Methanenergiewert. Die Regressionskoeffizienten von Rohfett (XL) (4,46) und Rohfaser (XF) (5,56) zeigen mittlere Beiträge zum Methanenergiewert. Der Regressionskoeffizient für die N-freien Extraktstoffe (XX) (-1,60) weist eine leicht mindernde Wirkung dieser Stoffgruppe für den Methanenergiewert von Kleegrassilage auf.

Die Berechnung des Methanenergiewertes von Kleegrassilage wird an zwei nachfolgenden Beispielen für Kleegrassilage des ersten Schnittes im Vegetationsstadium „im Ähren-/Rispschieben und für Kleegrassilage des ersten Schnittes im Vegetationsstadium „Ende der Blüte“ demonstriert (Tab. 20 und 21). Der Methanenergiewert von Kleegrassilage gibt an, welche Methanmenge in NI CH₄ bei der Vergärung von einem kg oTS Kleegrassilage im Biogas erscheint, abhängig vom Rohnährstoffgehalt der Silage.

Tabelle 20. Beispiel für die Berechnung des Methanenergiewertes von Kleegrassilage 1. Schnitt im Ähren-/Rispschieben

<i>Inhaltsstoff</i>	<i>Rohnährstoffgehalt</i> [% TS]	<i>Faktor für MEW</i>	<i>MEW</i> [NI CH ₄ /kg oTS]
Rohprotein (XP)	17,9	11,77	210,7
Rohfett (XL)	7,5	4,46	33,5
N-freie Extraktstoffe (XX)	27,9	-1,60	-44,6
Rohfaser (XF)	33,8	5,56	187,9
			387,5

Tabelle 21. Beispiel für die Berechnung des Methanenergiewertes von Kleegrassilage 1. Schnitt Ende der Blüte

<i>Inhaltsstoff</i>	<i>Rohnährstoffgehalt</i> [% TS]	<i>Faktor für MEW</i>	<i>MEW</i> [NI CH ₄ /kg oTS]
Rohprotein (XP)	13,6	11,77	160,1
Rohfett (XL)	3,9	4,46	17,4
N-freie Extraktstoffe (XX)	41,5	-1,60	-66,4
Rohfaser (XF)	32,4	5,56	180,1
			291,2

Die Berechnungsbeispiele zeigen den Einfluss der Rohnährstoffzusammensetzung des Kleeegrases auf seinen Methanenergiewert. Während Kleegrassilage des Vegetationsstadiums „im Ähren-/Rispschieben“ einen MEW von 386,5 NI CH₄/kg oTS hat, liegt der MEW von Kleegrassilage im Vegetationsstadium „Ende der Blüte“ nur mehr bei 291,8 NI CH₄/kg oTS und damit um 24,6 % niedriger. Der Erntezeitpunkt bestimmt den Methanenergiewert von Kleegrassilage wesentlich.

6.4.3. Zusammenhang zwischen Wirkungsgrad der Methangärung (η) und Methanenergiewert von Kleeegrasmischungen

Der Wirkungsgrad der Methangärung (η) gibt Auskunft darüber, welcher Anteil der Bruttoenergie in der Biomasse durch die anaerobe Methangärung in Methan des Biogases transferiert wurde. Abbildung 9 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Methanenergiewert von Kleeegrasmischungen in NI CH₄/kg oTS und dem Wirkungsgrad der Methangärung (η).

$$\text{Wirkungsgrad der Methangärung } (\eta) = 8,580 + 0,195 * \text{Methanenergiewert (NI CH}_4\text{/kg oTS)}$$

Der Zusammenhang hat ein Bestimmtheitsmaß von $r^2 = 0,977$ und ist hoch signifikant ($p < 0,000$; F-Wert = 444,748).

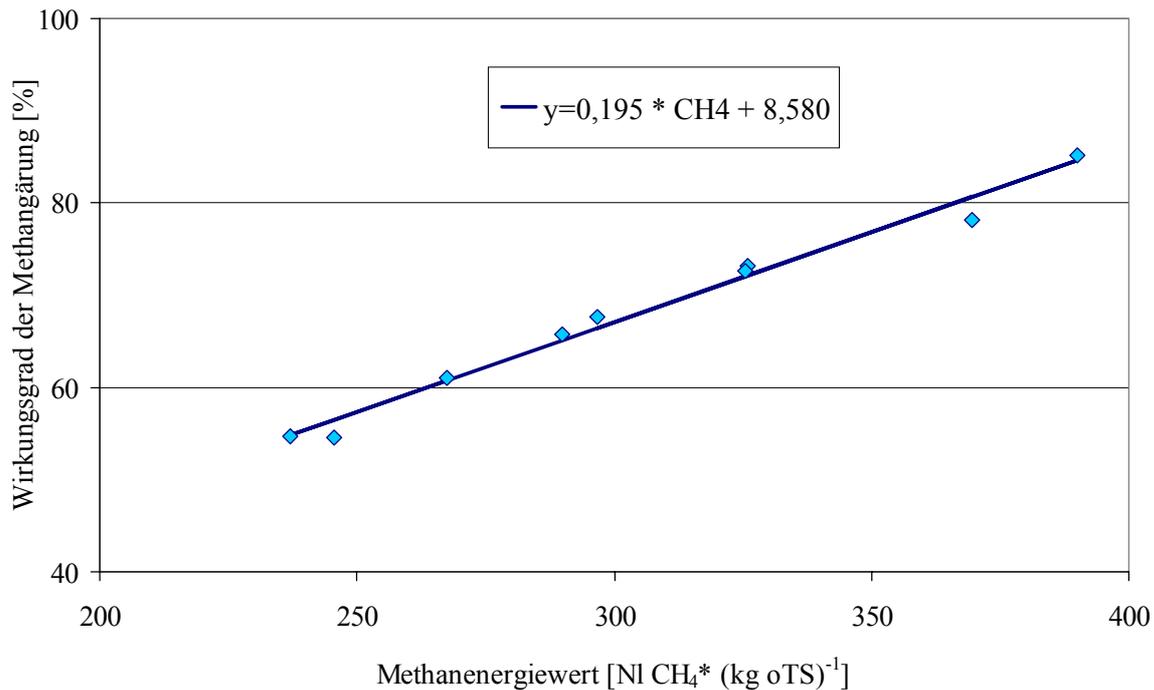


Abbildung 9. Abhängigkeit des Wirkungsgrades der Methangärung (η) vom Methanenergiewert (MEW) der Kleegrasmischungen

Bei einem unteren Methanenergiewert von 240 NI CH₄/kg oTS weist die Methangärung einen energetischen Wirkungsgrad von 55,4 % auf. Steigt der Methanenergiewert auf einen oberen Wert von 380 NI CH₄/kg oTS, so erhöht sich der Wirkungsgrad auf 82,7 %.

6.4.4. Zusammenhang zwischen Kohlenstofftransferfaktor (η_c) und Methanenergiewert von Kleegrasmischungen

Der Kohlenstofftransferfaktor (η_c) eines Gärgutes gibt Auskunft darüber, welcher Anteil des aus der Trockenmasse bestimmten Kohlenstoffes durch die anaerobe Methangärung in das Methan im Biogas transferiert worden ist.

Abbildung 10 zeigt die Abhängigkeit zwischen dem Methanenergiewert von Kleegrasmischungen in NI CH₄/kg oTS und dem Kohlenstofftransferfaktor der Methangärung (η_c).

$$\text{Kohlenstofftransferfaktor } (\eta_c) = 3,888 + 0,093 * \text{Methanenergiewert (NI CH}_4\text{/kg oTS)}$$

Der Zusammenhang hat ein Bestimmtheitsmaß von $r^2 = 97,7 \%$ und ist hoch signifikant ($p < 0,000$; F-Wert = 302,726).

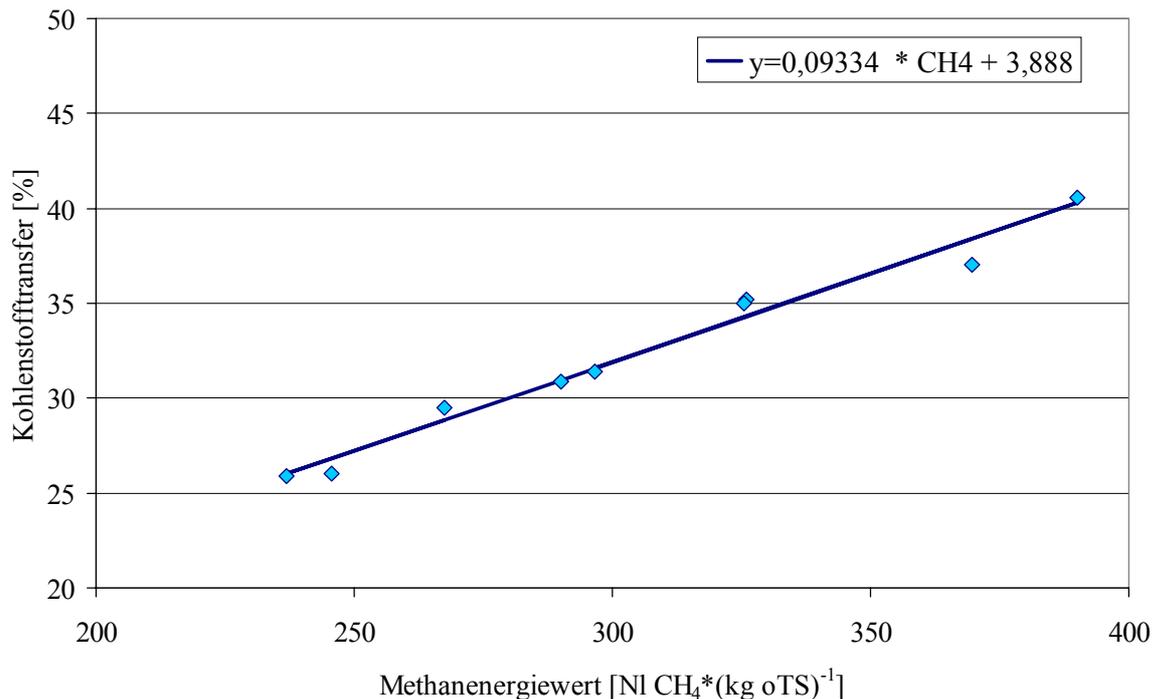


Abbildung 10. Abhängigkeit des Kohlenstofftransferfaktors (η_c) vom Methanenergiewert der Kleegrasmischungen

Bei einem unteren Methanenergiewert von 240 NI CH₄/kg oTS ergibt sich ein Kohlenstofftransferfaktor (η_c) von 26,3 %. Steigt der Methanenergiewert auf 380 NI CH₄/kg oTS, so erhöht sich der Kohlenstofftransferfaktor auf 39,3 %. D.h. dass 26,3 bis 39,3 % des im Klee gras enthaltenen Kohlenstoffes in das Methan des Biogases transferiert worden sind.

Sowohl der Wirkungsgrad der Methangärung (η) als auch der Kohlenstofftransferfaktor (η_c) sind Effizienzmaße für die Vergärbarkeit von Biomasse .

6.5. Methanhektarertrag von Klee grasmischungen

Der Hektarertrag für Methan ergibt sich aus den Faktoren:

- oTS –Ertrag pro Hektar und
- spezifische Methanausbeute je kg oTS im Gärrohstoff

Wie die Untersuchungen zeigen, ist die spezifische Methanausbeute pro kg oTS der Klee grasmischungen vom Nährstoffmuster des Gärrohstoffes abhängig (vgl. Tab. 19). Zum jeweiligen Erntezeitpunkt war das Nährstoffmuster der Sortenmischungen: „IM“, „KM“ und „DW“ ähnlich ausgeprägt. Folglich waren auch die spezifischen Methanausbeuten aus den Gärrohstoffen des jeweiligen Erntezeitpunktes ähnlich hoch. Demgegenüber wurden in Bezug auf das Nährstoffmuster der Klee grasmischungen und folglich auf deren spezifisches Methanbildungsvermögen deutliche Unterschiede durch den Erntezeitpunkt und die Art der Konservierung bewirkt.

Nachfolgend wird der Methanhektarertrag anhand des spezifischen Methanbildungsvermögens der Klee grasmischungen verschiedener Erntezeitpunkte und verschiedener Szenarien standortspezifischer Ertragslagen kalkuliert (Tab. 22).

Der Erntezeitpunkt hatte bei allen Sortenmischungen einen signifikanten Einfluss auf das spezifische Methanbildungsvermögen aus den Gärrohstoffen. Bei der Sortenmischen „IM“ und „KM“ beispielsweise wurden im Vegetationsstadium „vor Ähren-/Rispschieben“ 370 Nl CH₄ * kg oTS⁻¹ (IM) und 390 Nl CH₄ * kg oTS⁻¹ (KM) gebildet. Bis zum Vegetationsstadium „Ende der Blüte“ betrug die spezifische Methanausbeute nur noch 296 bzw. 290 Nl CH₄ * kg oTS⁻¹. Damit lag das spezifische Methanbildungsvermögen der Sortenmischungen im Stadium „Ende der Blüte“ im Vergleich zum Stadium „Ähren-/Rispschieben“ 19,8 bzw. 25,6 % niedriger.

Die Kalkulation des Methanhektarertrages basiert auf den ermittelten spezifischen Methanausbeuten von Silagen der Sortenmischungen „IM“ und „KM“ in den Vegetationsstadien „vor dem Ähren-/Rispschieben“ „in der Blüte“ und „Ende der Blüte“. Ausgehend von den natürlichen Standortverhältnissen (Boden, Klima, Höhenlage) werden vier Ertragsklassen zugrundegelegt. Ertragsklasse „extensiv“ bis 2,5 t oTS pro ha, „mittelintensiv“ bis 6,0 t oTS pro ha, „intensiv“ bis 10 t oTS pro ha und sehr intensiv bis 14 t oTS pro ha.

Tabelle 22. Methanhektarertrag (in m³ CH₄ pro ha) der Kleegrasmischungen „IM“ und „KM“ bei unterschiedlichen Vegetationsstadien der Bestände und Ertragsklassen des Standortes

Silage von ...	Methanausbeute ¹ [Nl CH ₄ *kg oTS ⁻¹]	Methanhektarertrag bei Biomasseertrag von ...t oTS pro ha			
		2,5	6,0	10,0	14,0
IM 1	370	920	2.220	3.700	5.180
KM 1	390	975	2.340	3.900	5.460
IM 2	326	815	1.956	3.260	4.564
KM 2	326	815	1.956	3.260	4.560
IM 3	297	743	1.782	2.970	4.158
KM 3	290	725	1.740	2.900	4.060

¹⁾ Vegetationsstadium: vor dem Ähren-/Rispschieben; ²⁾ in der Blüte; ³⁾ Ende der Blüte

Die Kalkulation zeigt die Spannweite der möglichen hektarbezogenen Methanerträge von Kleegrasmischungen. So können auf extensiven Standorten bei einer spezifischen Methanausbeute von 390 Nl CH₄ je kg oTS und einem oTS-Biomasseertrag von 2,5 t pro ha lediglich 975 m³ Methan pro Hektar erzeugt werden. Bei später Ernte sinkt der Methanhektarertrag entsprechend. Auf mittleren bis guten Standorten können bis zu 3.900 m³ Methan pro Hektar erzeugt werden. Auf sehr guten Standorten sind bei 4 – 5 Schnittnutzungen Methanhektarerträge von nahe 5.500 m³ Methan pro Hektar möglich. Neben dem hohen Aufwand für die Ernte und die Konservierung ist dafür auch ein hoher Düngemiteleinsetz erforderlich. Die Kalkulation zeigt die überragende Bedeutung des richtigen Erntezeitpunktes für die Wirtschaftlichkeit der Biogaserzeugung aus Kleegrassilage. Auf guten Standorten für Klee gras kann ein Methanhektarertrag erreicht werden, der mit dem von mittleren Silomaisstandorten vergleichbar ist (vergl. Kap. 7.6). Im konkreten Fall können bei einer Dreischnittnutzung 5,5 bis 6,4 t oTS pro ha geerntet werden. Daraus errechnet sich eine Spanne möglicher Methanhektarerträge von 1.595 bis 2.368 Nm³ CH₄ pro Hektar.

7. Ergebnisse und Diskussion – Silomais

7.1. Frischmasse und Trockenmasseerträge von Silomais

Die Versuche zum Methanbildungspotential von Silomais umfassten fünf Silomaissorten, die in Zusammenarbeit mit der Landeslandwirtschaftskammer der Steiermark in Ludersdorf bei Gleisdorf angebaut wurden. Wie in Kapitel „Methoden“ beschrieben, wurde der Silomais zu drei verschiedenen Zeitpunkten geerntet: nach 100, 143 und 190 Wuchstagen. Abbildungen 11 und 12 zeigen die Erträge an Frischmasse und organischer Trockensubstanz zum jeweiligen Erntezeitpunkt. Nach 100 Wuchstagen - gerechnet ab dem Tag der Aussaat - war das Vegetationsstadium „in der Milchreife der Körner“, nach 143 Wuchstagen das Wachstumsstadium „in der Teigreife der Körner“ und nach 190 Wuchstagen die Vollreife der Pflanzen erreicht.

Die Frischmasseerträge sanken mit zunehmender Wuchsdauer bei allen Sorten deutlich ab. Wurden beispielsweise nach 100 Tagen bei der Sorte Benicia noch rund 120 t Frischmasse je Hektar geerntet, so sank der Ertrag nach 190 Wuchstagen auf unter 60 t/ha ab. Das Ertragspotential der untersuchten Sorten unterschied sich deutlich. Die höchsten Erträge wurden von Benicia (FAO 300) und Saxxo (FAO 380) erreicht. Ribera (FAO 390) erbrachte mittlere Erträge. Die niedrigsten Erträge wurden bei Phönix (FAO 290) und Atalante (FAO 290) gemessen.

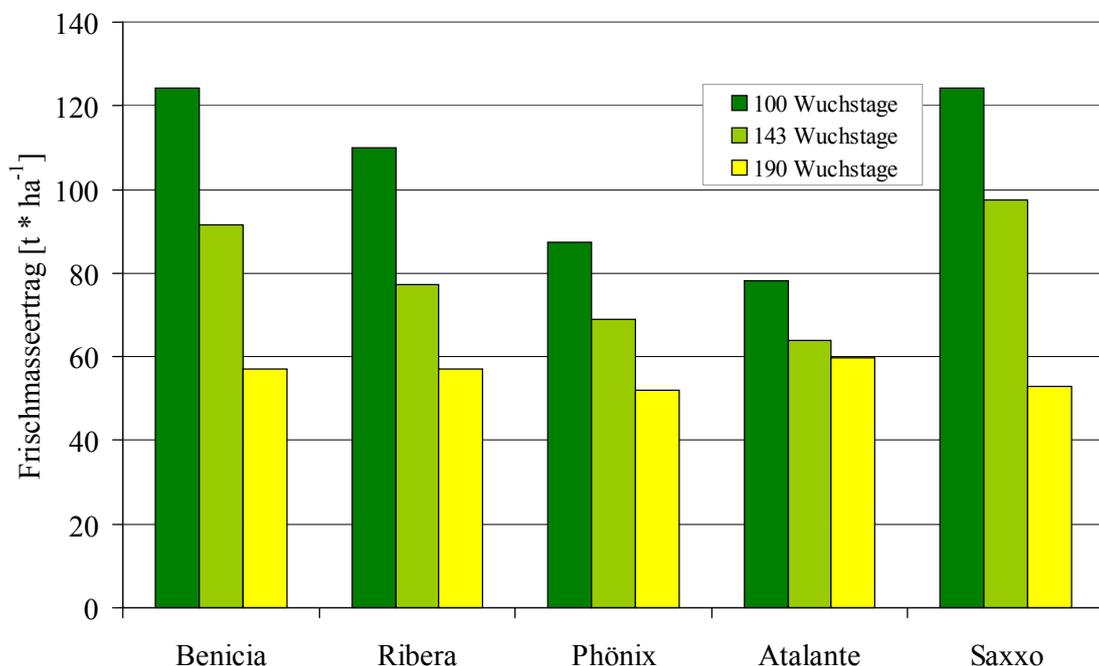


Abbildung 11. Frischmasseerträge von Silomais in Abhängigkeit vom Erntezeitpunkt; Anbau in Ludersdorf/Steiermark.

Abbildung 12 zeigt die Erträge an organischer Trockensubstanz in Abhängigkeit vom Erntezeitpunkt. Die höchsten oTS-Erträge wurden meist beim zweiten Erntetermin, nach 143 Wuchstagen erreicht. Bei den Sorten Benicia und Saxxo sanken die oTS-Erträge beim

späteren Erntetermin ab, bei den anderen Sorten blieb der Ertrag in etwa konstant. Die Sorten Benicia (FAO 300) und Saxxo (FAO 380) hatten mit knapp 35 t oTS/ha den höchsten oTS-Ertrag. Ribera, Phönix und Atalante erbrachten rund 25 t oTS/ha.

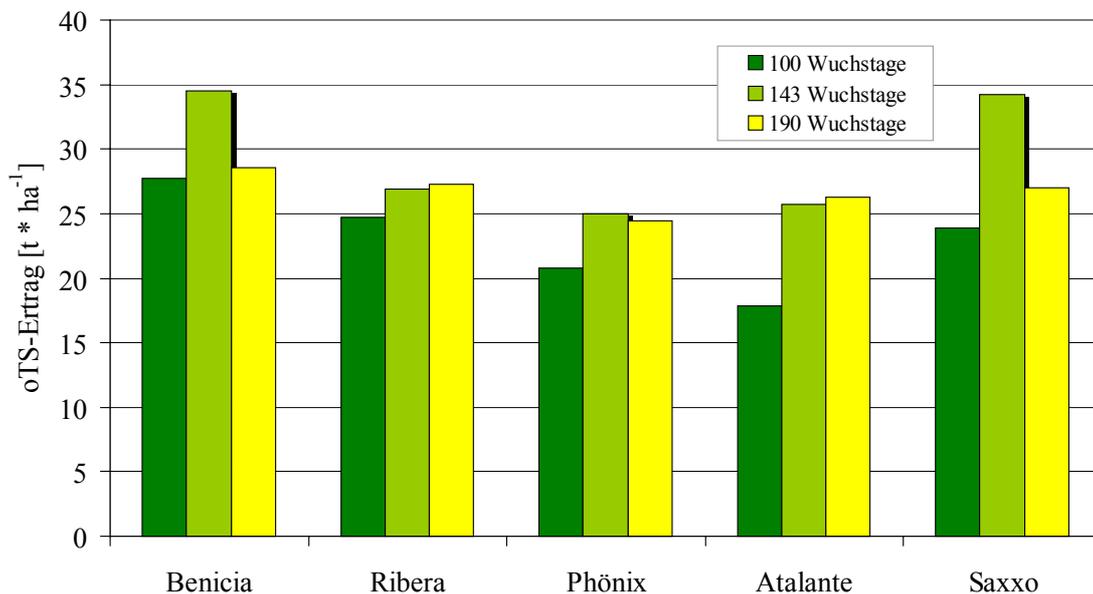


Abbildung 12. oTS-Erträge von Silomais in Abhängigkeit vom Erntezeitpunkt; Anbau in Ludersdorf/Steiermark.

7.2. Kumulative spezifische Biogasausbeute

Abbildungen 13 bis 17 zeigen den kumulativen Biogasertrag und den Verlauf des pH-Wertes bei der Vergärung der fünf Silomaissilagen bei jeweils drei Ernteterminen. Tabelle 23 gibt einen Überblick über die in Summe gebildete Biogasmenge nach 60 Tagen Gärdauer.

Bei der Sorte Ribera wurde zusätzlich zu drei Silagen auch frischer, nicht konservierter Mais vergoren. Dieser war zum ersten, frühen Erntetermin geerntet worden (Abb. 14). Frisches Gärgut der Sorte Ribera erbrachte einen Biogasertrag von 346,2 NI Biogas je kg oTS. Dies war deutlich geringer als der Biogasertrag aus Silage des gleichen Erntetermins (492,0 NI Biogas je kg oTS).

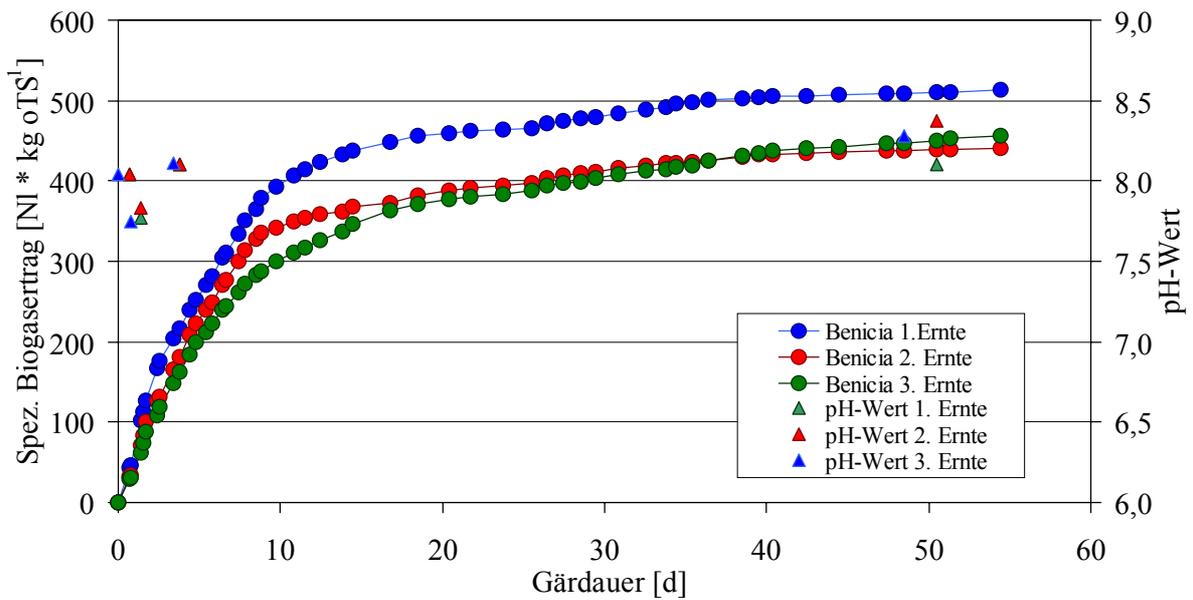


Abbildung 13. Kumulative Biogasbildung aus Silomais der Sorte Benicia bei früher, mittelfrüher und später Ernte und Verlauf des pH-Wertes während der Gärung.

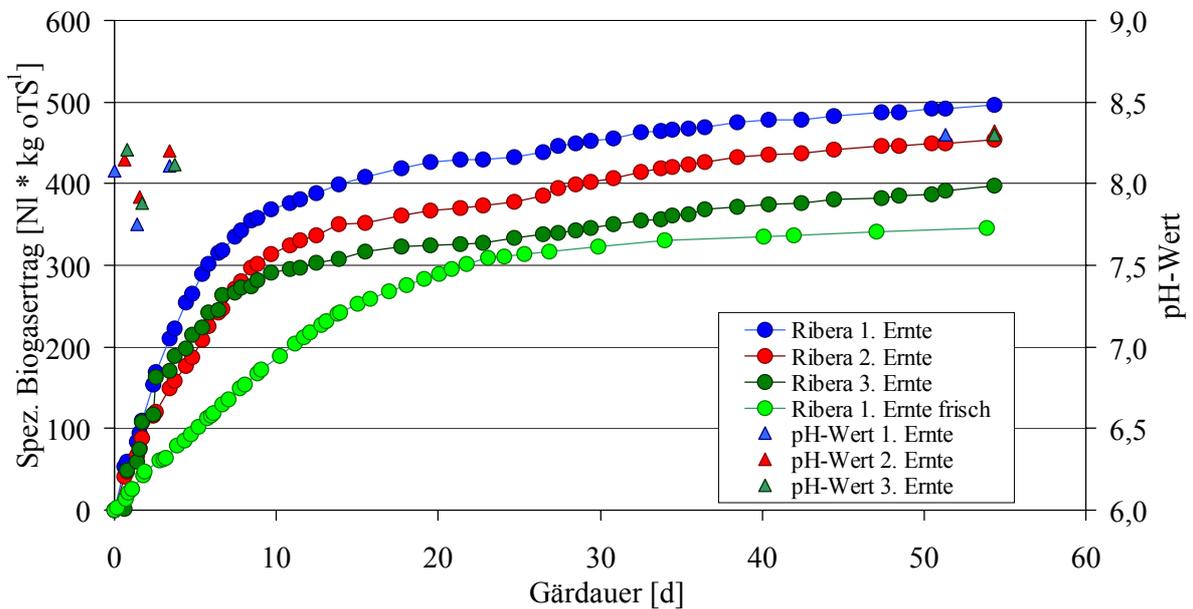


Abbildung 14. Kumulative Biogasbildung aus Silomais der Sorte Ribera bei früher, mittelfrüher und später Ernte und Verlauf des pH-Wertes während der Gärung.

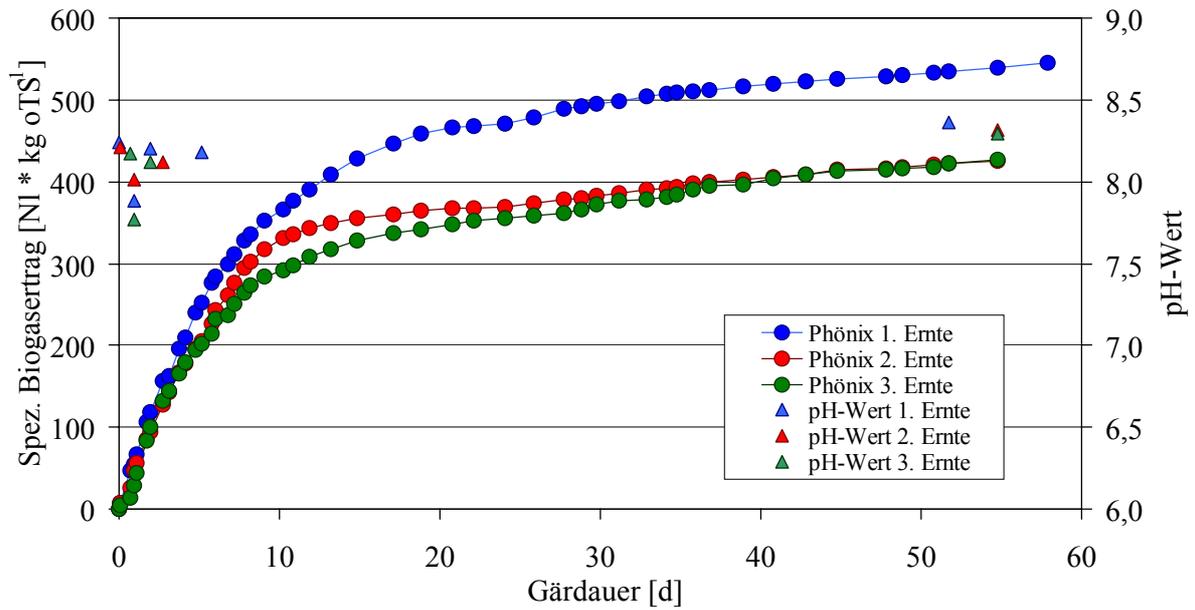


Abbildung 15. Kumulative Biogasbildung aus Silomais der Sorte Phönix bei früher, mittelfrüher und später Ernte und Verlauf des pH-Wertes während der Gärung.

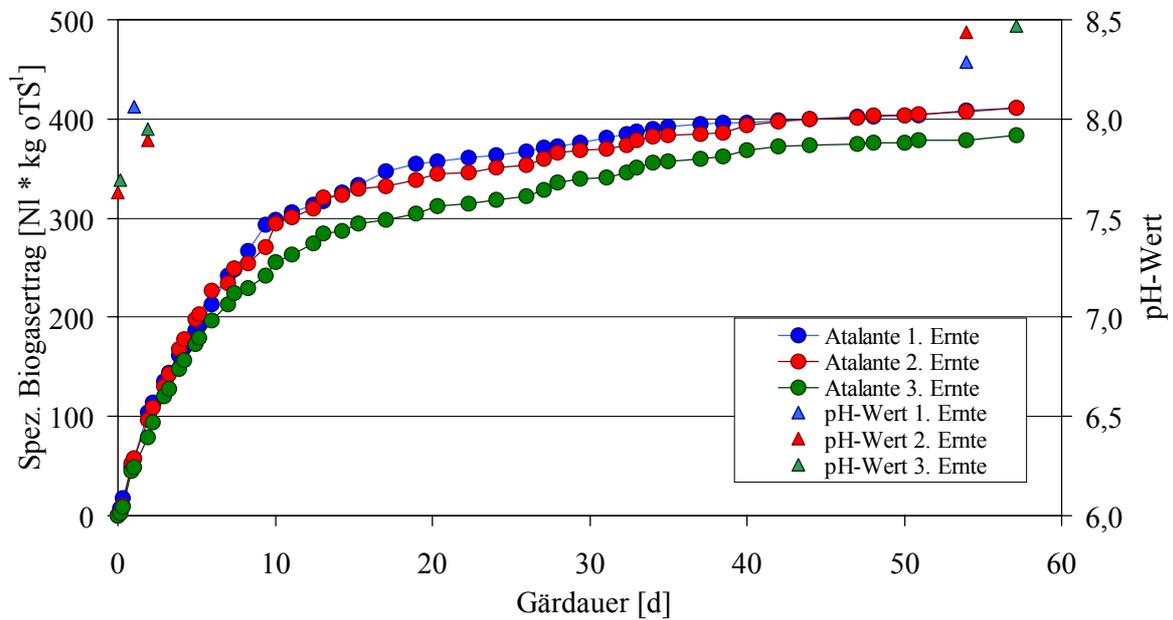


Abbildung 16. Kumulative Biogasbildung aus Silomais der Sorte Atalante bei früher, mittelfrüher und später Ernte und Verlauf des pH-Wertes während der Gärung.

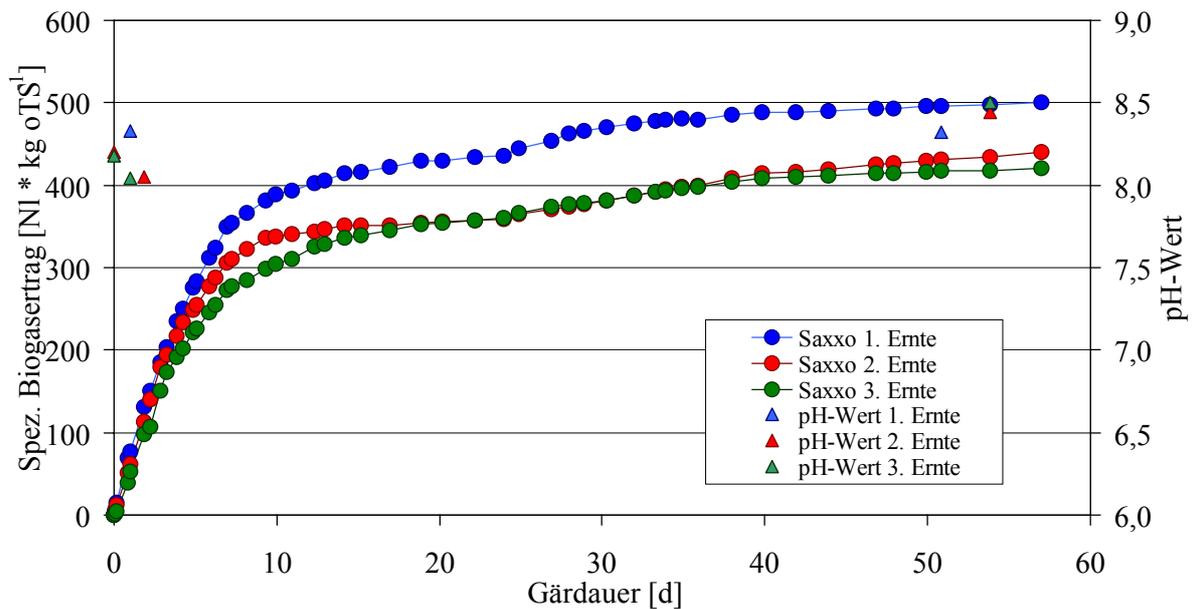


Abbildung 17. Kumulative Biogasbildung aus Silomais der Sorte Saxxo bei früher, mittelfrüher und später Ernte und Verlauf des pH-Wertes während der Gärung.

Der erste, frühe Erntetermin erbrachte durchwegs die höchsten spezifischen Biogasausbeuten. Zwischen den Sorten traten deutliche Unterschiede auf. Phönix erbrachte mit 539,1 Nl Biogas je kg oTS die höchste spezifische Biogasausbeute. Der niedrigste Ertrag wurde bei Atalante gemessen (410,4 Nl Biogas je kg oTS). Beim zweiten Erntetermin wurden deutlich geringere Biogaserträge erreicht. Lediglich bei der Sorte Atalante änderte sich der Biogasertrag zwischen erstem und zweitem Erntetermin nicht. Der dritte, späte Erntetermin führte bei Benicia, Phönix und Saxxo lediglich zu geringen Veränderungen im kumulativen Biogasertrag. Bei Ribera und Atalante sank der Biogasertrag nochmals deutlich ab (Tab. 23).

Tabelle 23. Spezifischer Biogasertrag von Silomais nach 60 Tagen Gärdauer.

Sorte	spezifischer Biogasertrag [Nl Biogas / kg oTS]			
	1. Ernte	2. Ernte	3. Ernte	1. Ernte frisch
Benicia (FAO 300)	512,7	440,4	456,3	
Ribera (FAO 390)	492,0	449,3	391,0	346,2
Phönix (FAO 290)	539,1	425,8	426,2	
Atalante (FAO 290)	410,4	410,6	383,7	
Saxxo (FAO 380)	500,8	439,7	420,9	

7.3. Methangehalt im Biogas

Der eigentliche Energieträger im Biogas ist das Methan. Für die Wirtschaftlichkeit der Biogaserzeugung ist daher der Methanertrag entscheidend. Ein hoher Biogasertrag muss nicht notwendigerweise mit einem hohen Methanertrag einher gehen. Während des Versuches wurden wöchentlich Proben für die GC-Analyse genommen und innerhalb von zwei Wochen nach der Probenahme analysiert. Der Methangehalt im Biogas der untersuchten Varianten bewegte sich zwischen 48,71 % bei Phönix, 3. Ernte und 56,19 % bei Benicia 2. Ernte. Es war kein signifikanter Unterschied im Methangehalt zwischen den einzelnen Varianten gegeben (Scheffé-Test) (Tab. 24).

Tabelle 24. Mittlere Methangehalte im Biogas der untersuchten Silomais-Varianten.

<i>Variante</i>	<i>n</i>	<i>Methan [%]</i>	<i>Stabw.</i>
Benicia 1. Ernte	7	55,33	3,31
Benicia 2. Ernte	7	56,19	6,88
Benicia 3. Ernte	7	52,86	4,66
Ribera 1. Ernte	7	50,76	2,76
Ribera 2. Ernte	7	53,13	4,43
Ribera 3. Ernte	7	51,52	7,64
Phönix 1. Ernte	7	52,60	1,60
Phönix 2. Ernte	7	52,52	4,99
Phönix 3. Ernte	7	48,71	3,13
Atalante 1. Ernte	7	51,07	5,44
Atalante 2. Ernte	7	49,80	1,66
Atalante 3. Ernte	7	50,43	1,57
Saxxo 1. Ernte	7	51,04	0,40
Saxxo 2. Ernte	7	52,72	3,44
Saxxo 3. Ernte	7	51,29	5,88

Die im Versuch gemessenen Methangehalte im Biogas entsprechen den aus der Literatur bekannten Werten (ZAUNER & KÜNTZEL 1986). Erfahrungen aus der Praxis zeigen bei Verwendung von Silomais und anderen Energiepflanzen Methangehalte im Biogas von 50 bis 55 Vol.%.

7.4. Kumulative spezifische Methanausbeute

7.4.1. Einfluss des Erntezeitpunktes

Abbildungen 18 bis 22 zeigen den kumulierten Methanertrag der untersuchten Silomaissorten bei früher, mittelfrüher und später Ernte. Die Abbildungen enthalten auch die logarithmischen Regressionsfunktionen, die sich aus den gemessenen Methanerträgen ergeben. An jede Abbildung schließt sich eine Tabelle an, in der die logarithmischen Modelle der kumulierten spezifischen Methanausbeuten angeführt sind. Weiterhin dargestellt sind die geschätzten Regressionskoeffizienten (b) mit dem Bestimmtheitsmaß der Funktion (r^2). Für die Regressionskoeffizienten (b) sind die oberen und unteren Grenzen des Vertrauensbereiches angegeben. Gekennzeichnet sind ebenfalls Unterschiede der Regressionskoeffizienten.

Unterschiede im Verlauf der kumulierten spezifischen Methanausbeute liegen dann vor, wenn die Vertrauensbereiche der Regressionskoeffizienten keine gemeinsamen Bereiche aufweisen.

Bei der Sorte Benicia erbrachte der erste, frühe Erntetermin signifikant höhere Methanerträge als der zweite und dritte Erntetermin (Abb. 18 und Tab. 25). Auch die Unterschiede zwischen

zweitem und drittem Termin waren signifikant. Der Methanertrag sank von 283,7 NI CH₄/kg oTS beim ersten Erntetermin auf 241,2 NI CH₄/kg oTS beim dritten Erntetermin ab. Die Regressionsfunktionen weisen ein sehr hohes Bestimmtheitsmaß zwischen 0,91 und 0,98 auf.

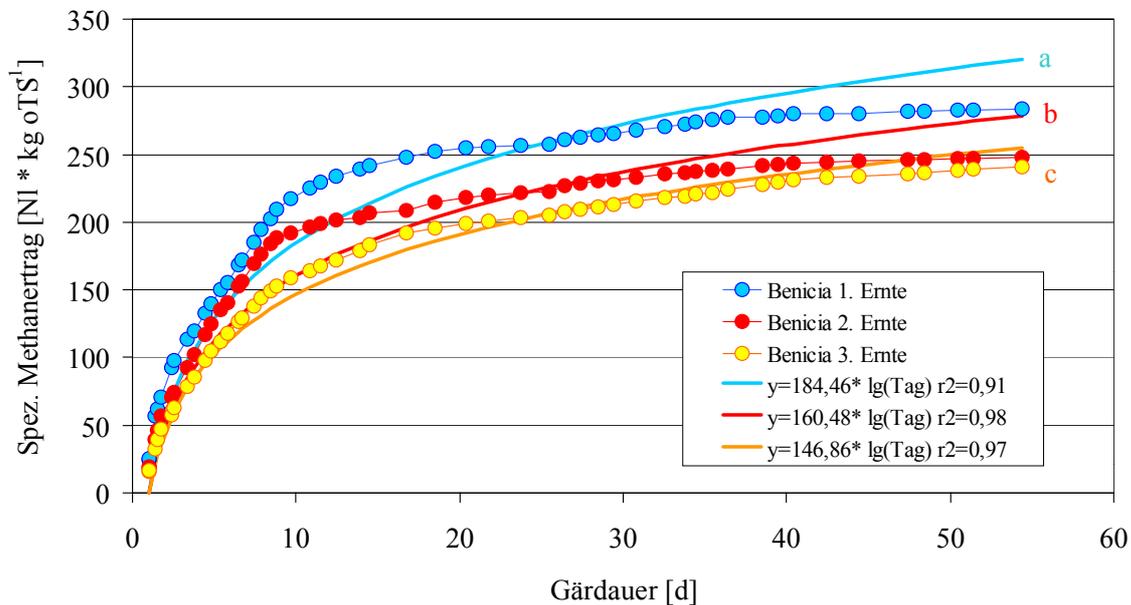


Abbildung 18. Kumulative Methanbildung aus Silomais der Sorte Benicia (FAO 300) in Abhängigkeit vom Erntezeitpunkt

Tabelle 25. Regressionsmodelle und kumulierte spezifische Methanausbeute aus Silomaissilage der Sorte Benicia (FAO 300); Einfluss des Erntezeitpunktes auf die spezifische Methanausbeute; Parameterschätzung und Signifikanztest

Modell: spezifische Methanausbeute [NI CH ₄ * kg oTS ⁻¹] = b * lg(Tag)						Methanertrag [NI CH ₄ /kg oTS]
Sorte	b	r ²	Konfidenz-Intervall		Sig.	
			Unten	Oben		
Benicia 1. Ernte	184,46	0,91	179,28	189,63	A	283,7
Benicia 2. Ernte	160,48	0,92	156,01	164,95	B	247,5
Benicia 3. Ernte	146,86	0,98	144,79	148,92	C	241,2

Auch bei Ribera hatte der Erntetermin einen signifikanten Einfluss auf den Methanertrag (Abb. 19 und Tab. 26). Beim ersten, frühen Erntetermin wurde mit 261,0 NI CH₄/kg oTS der höchste Methanertrag erreicht. Der dritte, späte Termin erbrachte den geringsten Methanertrag (205,0 NI CH₄/kg oTS). Frisch vergorener Mais der Sorte Ribera lieferte mit 222,2 NI CH₄/kg oTS signifikant weniger Methan als die Vergärung von Maissilage beim gleichen Erntetermin.

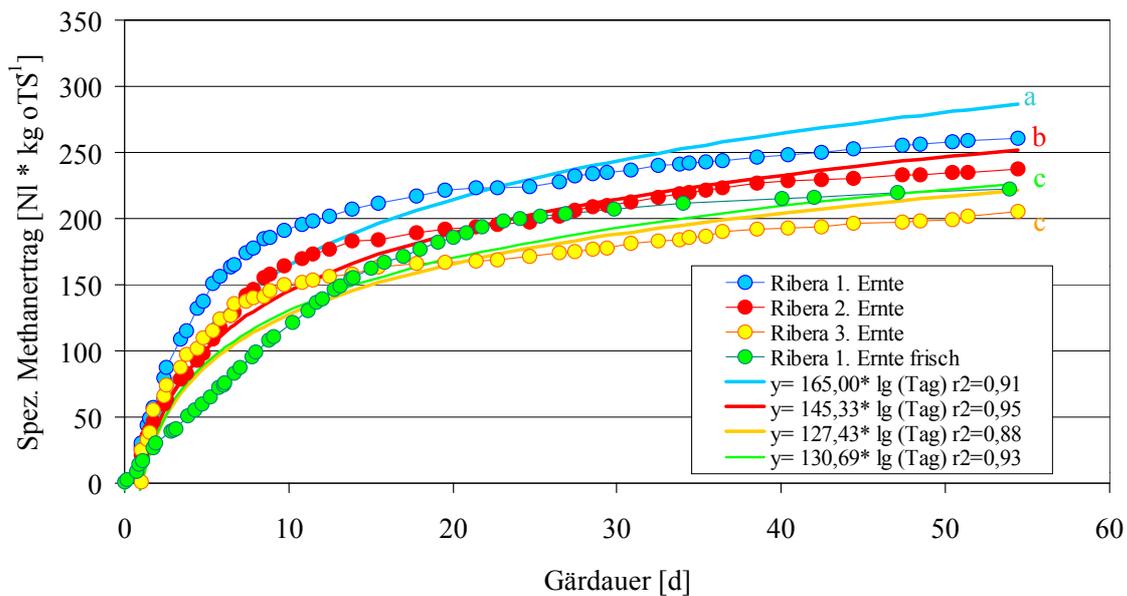


Abbildung 19. Kumulative Methanbildung aus Silomais der Sorte Ribera (FAO 390) in Abhängigkeit vom Erntezeitpunkt

Tabelle 26. Regressionsmodelle und kumulierte spezifische Methanausbeute aus Silomaissilage der Sorte Ribera (FAO 390); Einfluss des Erntezeitpunktes auf die spezifische Methanausbeute; Parameterschätzung und Signifikanztest

Modell: spezifische Methanausbeute [$\text{NI CH}_4 \cdot \text{kg oTS}^{-1}$] = $b \cdot \lg(\text{Tag})$						Methanertrag [$\text{NI CH}_4/\text{kg oTS}$]
Sorte	b	r^2	Konfidenz-Intervall		Sig.	
			Unten	Oben		
Ribera 1. Ernte	165,00	0,91	159,99	170,00	A	261,0
Ribera 2. Ernte	145,33	0,95	141,88	148,80	B	237,3
Ribera 3. Ernte	127,43	0,88	123,23	131,64	C	205,0
Ribera 1. Ernte frisch	130,69	0,93	126,19	135,20	C	222,2

Bei der Sorte Phönix wurden zwischen allen Ernteterminen signifikante Unterschiede im Methanertrag gemessen (Abb. 20 und Tab. 27). Der deutlichste Unterschied wurde zwischen erstem und zweitem Erntetermin gemessen. Hier sank der Methanertrag von 286,5 $\text{NI CH}_4/\text{kg oTS}$ auf 223,6 $\text{NI CH}_4/\text{kg oTS}$ ab. Beim späten Erntetermin wurden in Summe 207,6 $\text{NI CH}_4/\text{kg oTS}$ gemessen. Das Bestimmtheitsmaß der logarithmischen Regressionsfunktionen war mit 0,93 bis 0,97 sehr hoch.

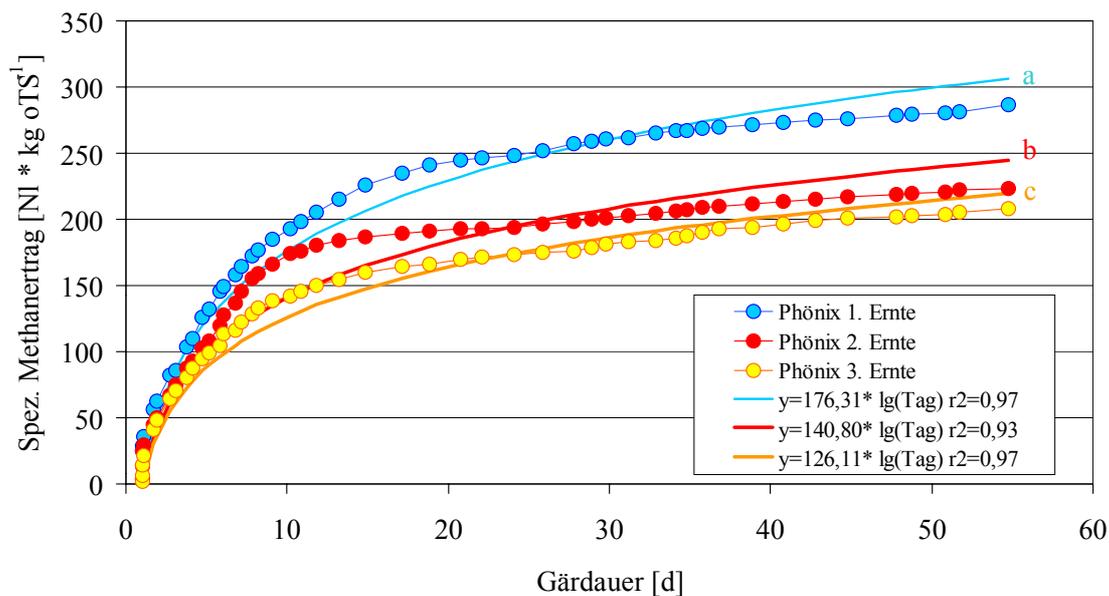


Abbildung 20. Kumulative Methanbildung aus Silomais der Sorte Phönix (FAO 290) in Abhängigkeit vom Erntezeitpunkt

Tabelle 27. Regressionsmodelle und kumulierte spezifische Methanausbeute aus Silomaissilage der Sorte Phönix (FAO 290); Einfluss des Erntezeitpunktes auf die spezifische Methanausbeute; Parameterschätzung und Signifikanztest

Modell: spezifische Methanausbeute [NI CH ₄ * kg oTS ⁻¹] = b * lg(Tag)						Methanertrag [NI CH ₄ /kg oTS]
Sorte	b	r ²	Konfidenz-Intervall		Sig.	
			Unten	Oben		
Phönix 1. Ernte	176,31	0,97	172,89	179,74	A	286,5
Phönix 2. Ernte	140,80	0,93	136,62	144,99	B	223,6
Phönix 3. Ernte	126,11	0,97	123,62	128,60	C	207,6

Die Sorte Atalante erbrachte beim ersten und zweiten Erntetermin nahezu gleich hohe Methanerträge (Abb. 21 und Tab. 28). Es wurden 209,6 und 205,8 NI CH₄/kg oTS gemessen. Der Methanertrag beim dritten, späten Erntetermin war mit 194,9 NI CH₄/kg oTS signifikant geringer. Das Bestimmtheitsmaß der logarithmischen Funktionen beim ersten und dritten Erntetermin war sehr hoch (0,96 und 0,97). Die Regressionsfunktion des zweiten Erntetermins hatte ein Bestimmtheitsmaß von 0,86.

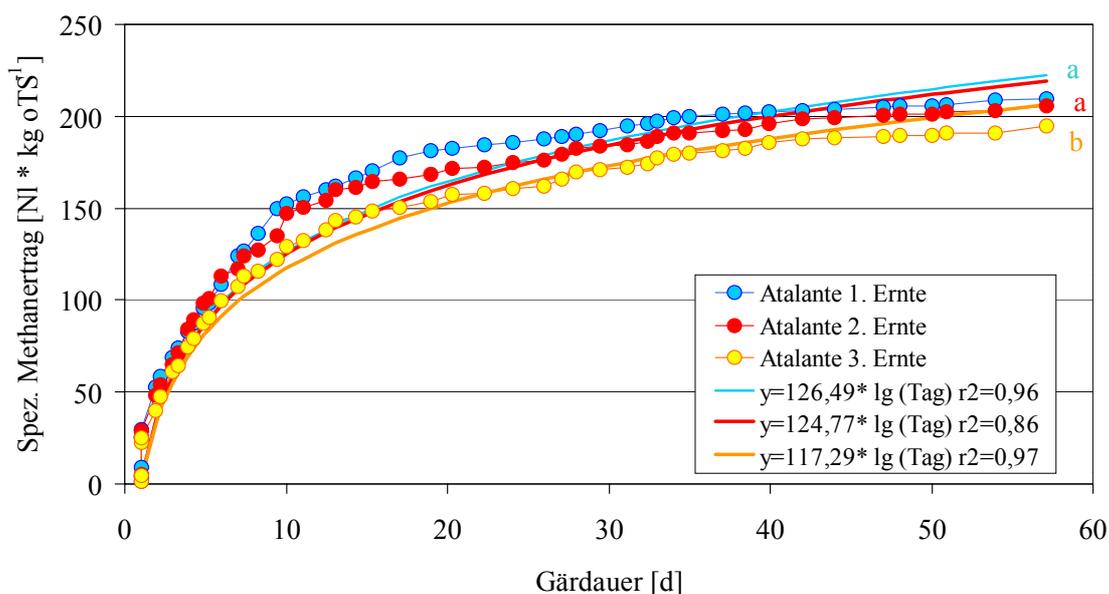


Abbildung 21. Kumulative Methanbildung aus Silomais der Sorte Atalante (FAO 290) in Abhängigkeit vom Erntezeitpunkt

Tabelle 28. Regressionsmodelle und kumulierte spezifische Methanausbeute aus Silomaissilage der Sorte Atalante (FAO 290); Einfluss des Erntezeitpunktes auf die spezifische Methanausbeute; Parameterschätzung und Signifikanztest

Modell: spezifische Methanausbeute [$\text{NI CH}_4 \cdot \text{kg oTS}^{-1}$] = $b \cdot \lg(\text{Tag})$						Methanertrag [$\text{NI CH}_4/\text{kg oTS}$]
Sorte	b	r^2	Konfidenz-Intervall		Sig.	
			Unten	Oben		
Atalante 1. Ernte	126,49	0,96	123,73	129,24	A	209,6
Atalante 2. Ernte	124,77	0,86	119,60	129,94	A	205,8
Atalante 3. Ernte	117,29	0,97	115,38	119,21	B	194,9

Die anaerobe Vergärung der früh geernteten Sorte Saxxo lieferte signifikant höhere Methanerträge als bei mittelfrüher oder später Ernte (Abb. 22 und Tab. 29). Bei früher Ernte wurde in Summe ein Methanertrag von 255,6 $\text{NI CH}_4/\text{kg oTS}$ erreicht. Zwischen zweitem und drittem Erntetermin traten hier keine statistisch gesicherten Unterschiede auf. Hier wurde ein Methanertrag von 231,8 und 215,9 $\text{NI CH}_4/\text{kg oTS}$ gemessen.

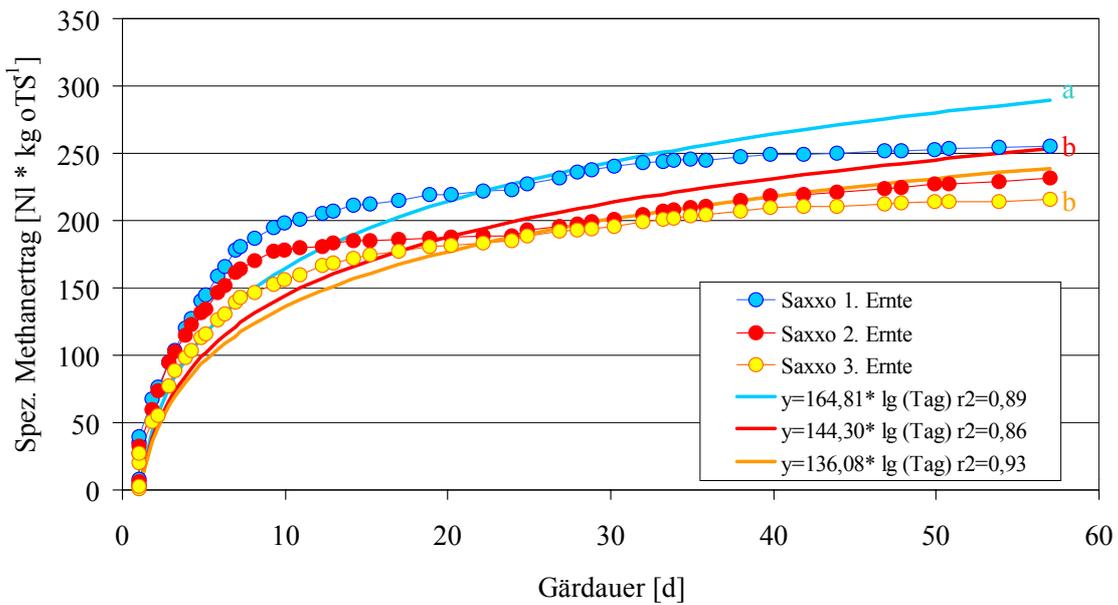


Abbildung 22. Kumulative Methanbildung aus Silomais der Sorte Saxxo (FAO 380) in Abhängigkeit vom Erntezeitpunkt

Tabelle 29. Regressionsmodelle und kumulierte spezifische Methanausbeute aus Silomaissilage der Sorte Saxxo (FAO 380); Einfluss des Erntezeitpunktes auf die spezifische Methanausbeute; Parameterschätzung und Signifikanztest

Modell: spezifische Methanausbeute [$\text{NI CH}_4 \cdot \text{kg oTS}^{-1}$] = $b \cdot \lg(\text{Tag})$						Methanertrag [$\text{NI CH}_4/\text{kg oTS}$]
Sorte	b	r^2	Konfidenz-Intervall		Sig.	
			Unten	Oben		
Saxxo 1. Ernte	164,81	0,89	159,34	170,27	A	255,6
Saxxo 2. Ernte	144,30	0,86	138,87	149,74	B	231,8
Saxxo 3. Ernte	136,08	0,93	132,45	139,71	B	215,9

7.4.2. Einfluss der Sorte

Die untersuchten Silomaissorten zeigten deutliche Unterschiede in der spezifischen Methanausbeute. Beim ersten, frühen Erntetermin erbrachten die Sorten Benicia und Phönix mit 283,7 und 286,5 $\text{NI CH}_4/\text{kg oTS}$ den höchsten Methanertrag (Abb. 23 und Tab. 30). Mittlere Methanerträge wurden bei Ribera und Saxxo gemessen (261,0 und 255,6 $\text{NI CH}_4/\text{kg oTS}$). Bei der anaeroben Vergärung von Atalante wurde mit 209,6 $\text{NI CH}_4/\text{kg oTS}$ die geringste Menge an Methan gebildet.

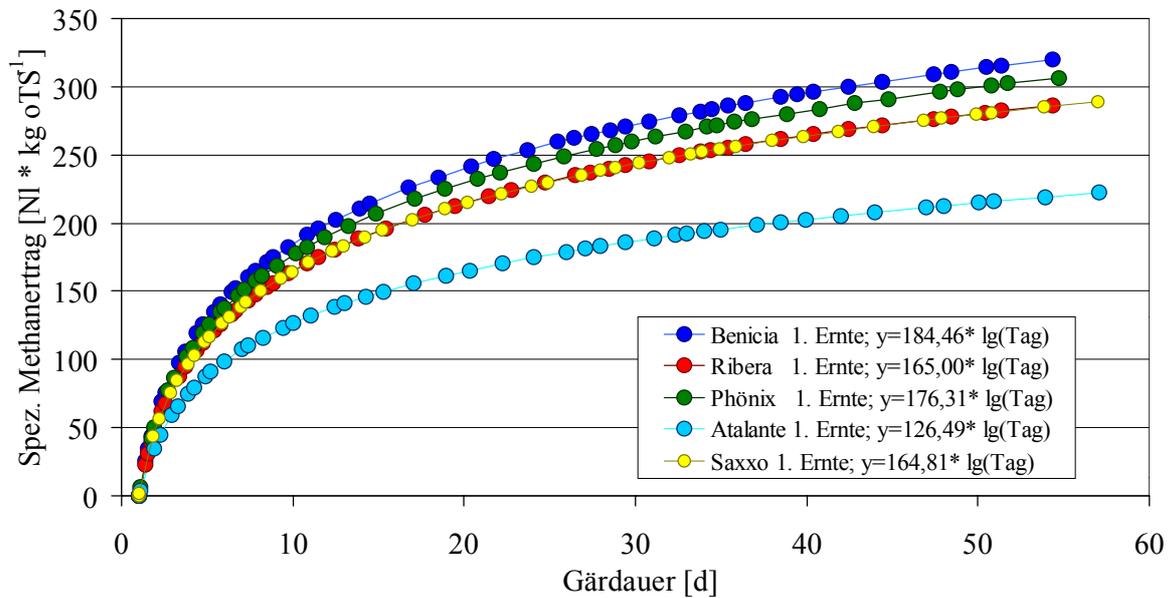


Abbildung 23. Kumulative Methanbildung der untersuchten Silomaissorten beim ersten, frühen Erntetermin.

Tabelle 30. Regressionsmodelle und kumulierte spezifische Methanausbeute aus Silomaissilage; Einfluss der Sorte; früher Erntetermin; Parameterschätzung und Signifikanztest.

Modell: spezifische Methanausbeute [NI CH ₄ * kg oTS ⁻¹] = b * lg(Tag)						Methanertrag [NI CH ₄ /kg oTS]
Sorte	b	r ²	Konfidenz-Intervall		Sig.	
			Unten	Oben		
Benicia 1. Ernte	184,46	0,91	179,28	189,63	A	283,7
Ribera 1. Ernte	165,00	0,91	159,99	170,00	B	261,0
Phönix 1. Ernte	176,31	0,97	172,89	179,74	A	286,5
Atalante 1. Ernte	126,49	0,96	123,73	129,24	C	209,6
Saxxo 1. Ernte	164,81	0,89	159,34	170,27	B	255,6

Auch beim zweiten, mittelfrühen Erntetermin erbrachte die Sorte Benicia mit 247,5 NI CH₄/kg oTS den höchsten Methanertrag (Abb. 24 und Tab. 31). Die Methanerträge der Sorten Ribera, Phönix und Saxxo unterschieden sich kaum. Sie reichten von 223,6 bis 237,3 NI CH₄/kg oTS. Atalante hatte auch beim mittelfrühen Erntetermin den geringsten Methanertrag (205,8 NI CH₄/kg oTS).

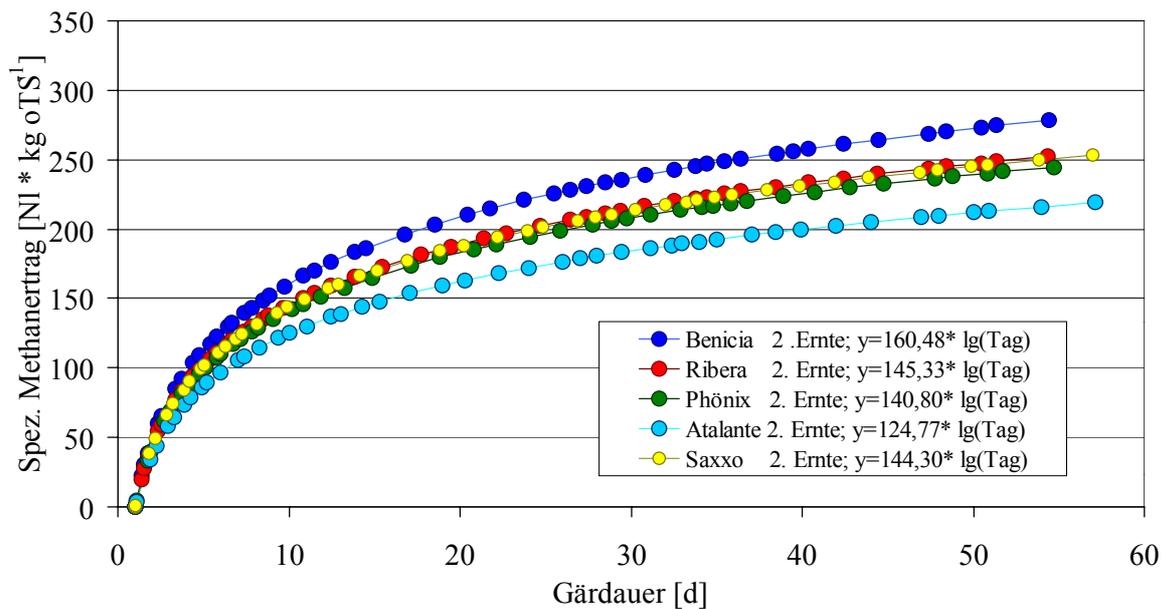


Abbildung 24. Kumulative Methanbildung der untersuchten Silomaissorten beim zweiten, mittelfrühen Erntetermin.

Tabelle 31. Regressionsmodelle und kumulierte spezifische Methanausbeute aus Silomaissilage; Einfluss der Sorte; mittelfrüher Erntetermin; Parameterschätzung und Signifikanztest.

Modell: spezifische Methanausbeute [NI CH ₄ * kg oTS ⁻¹] = b * lg(Tag)						Methanertrag [NI CH ₄ /kg oTS]
Sorte	b	r ²	Konfidenz-Intervall		Sig.	
			Unten	Oben		
Benicia 2. Ernte	160,48	0,92	156,01	164,95	A	247,5
Ribera 2. Ernte	145,33	0,95	141,88	148,80	B	237,3
Phönix 2. Ernte	140,80	0,93	136,62	144,99	B	223,6
Atalante 2. Ernte	124,77	0,86	119,60	129,94	C	205,8
Saxxo 2. Ernte	144,30	0,86	138,87	149,74	B	231,8

Beim dritten, späten Erntetermin lieferte wiederum Benicia den höchsten Methanertrag (241,2 NI CH₄/kg oTS, Abb. 25 und Tab. 32). Der zweithöchste Methanertrag wurde von der Sorte Saxxo erreicht (215,9 NI CH₄/kg oTS). Zwischen den Sorten Ribera und Phönix trat kein statistisch gesicherter Unterschied im Methanertrag auf. Dieser belief sich auf 205,0 und 207,6 NI CH₄/kg oTS. Von der Sorte Atalante wurde bei später Ernte ein Methanertrag von 194,9 NI CH₄/kg oTS gemessen.

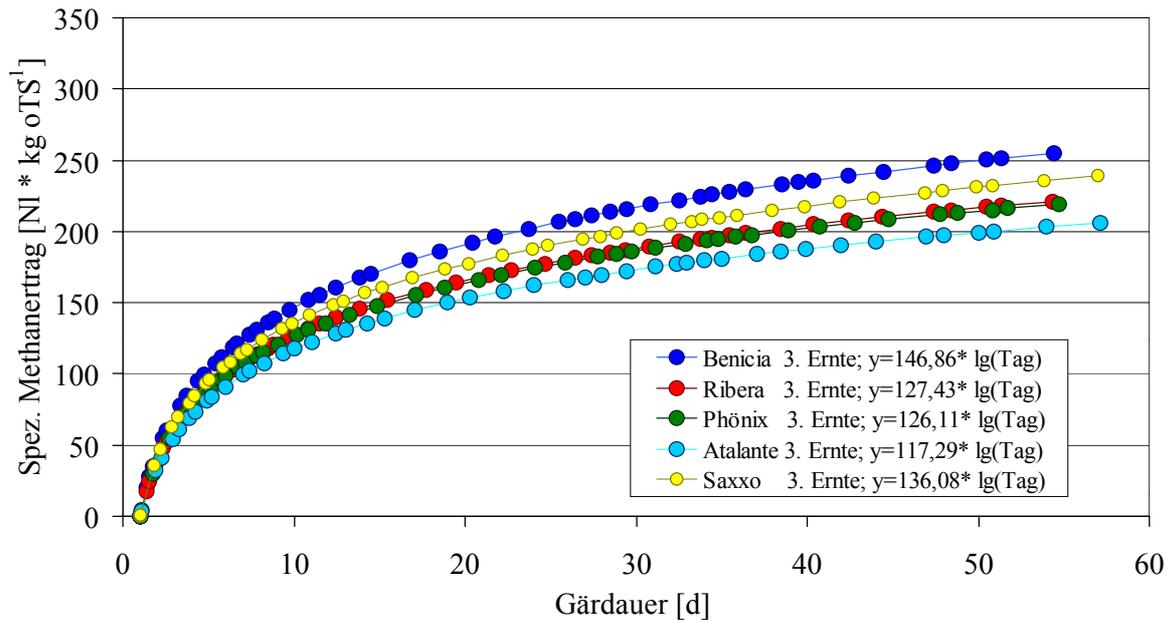


Abbildung 25. Kumulative Methanbildung der untersuchten Silomaissorten beim dritten, späten Erntetermin.

Tabelle 32. Regressionsmodelle und kumulierte spezifische Methanausbeute aus Silomaissilage; Einfluss der Sorte; später Erntetermin; Parameterschätzung und Signifikanztest.

Modell: spezifische Methanausbeute [NI CH ₄ * kg oTS ⁻¹] = b * lg(Tag)						Methanertrag [NI CH ₄ /kg oTS]
Sorte	b	r ²	Konfidenz-Intervall		Sig.	
			Unten	Oben		
Benicia 3. Ernte	146,86	0,98	144,79	148,92	A	241,2
Ribera 3. Ernte	127,43	0,88	123,23	131,64	C	205,0
Phönix 3. Ernte	126,11	0,97	123,62	128,60	C	207,6
Atalante 3. Ernte	117,29	0,97	115,38	119,21	D	194,9
Saxxo 3. Ernte	136,08	0,93	132,45	139,71	B	215,9

7.5. Methanenergiewert von Silomais

7.5.1. Inhaltsstoffe des Silomaises vor der Vergärung

In den Tabellen 33 und 34 sind die Inhaltsstoffe aller als Gärrohstoffe verwendeten Silomaisganzpflanzensilagen dargestellt. Die Gärrohstoffe wurden aus Sortenanbauversuchen der Standorte Groß-Enzersdorf/Niederösterreich (Tab. 33) und Ludersdorf/Steiermark (Tab. 34) gewonnen.

Neben den Inhaltsstoffen Rohprotein (XP), Rohfett (XL), Rohfaser (XF), Rohasche (XA), N-freie Extraktstoffe (XX), Lignin (ADL), Zellulose (Zell), Hemizellulose (H-Zell), Kohlenstoff (C), Gesamtstickstoff (Nt), Ammoniumstickstoff (NH₄-N) sind die Gehalte an Trockensubstanz (TS) und an organischer Trockensubstanz (oTS) der Gärrohstoffe angegeben. Zudem ist die Bruttoenergie (GE) der Ganzpflanzensilage aller verwendeten Maissorten angeführt und die spezifische Methanausbeute in NI CH₄ pro kg oTS aus der Silomaissilage gezeigt.

Tabelle 33. Inhaltsstoffe, Bruttoenergiegehalt und spezifische Methanausbeute von Silomais verschiedener Sorten und Reifestadien; Sortenanbauversuch Groß-Enzersdorf (nach AMON ET AL. 2002b)

Varianten	XP % TM	XL % TM	XF % TM	XA % TM	XX % TM	ADL % TM	GE MJ * kgTS ⁻¹	ZEL % TM	H-ZEL % TM	C % TM	C/N	TS % FM	oTS % FM	CH ₄ -Ertrag NI CH ₄ * kg oTS ⁻¹
PR 39 1. E	8,70	3,40	20,22	3,89	63,79	23,55	18,42	0,79	38,22	46,57	36,10	35,00	33,64	292,86
PR 39 2. E	7,71	2,99	20,30	3,62	65,38	21,75	18,18	0,15	32,51	47,09	36,79	47,10	45,39	272,34
PR 39 3. E	9,18	3,46	19,87	3,26	64,23	21,32	17,39	0,41	29,10	47,14	37,38	54,70	52,92	257,69
Ribera 1. E	8,81	2,19	20,15	4,02	64,83	23,96	18,61	2,54	36,69	47,27	25,72	31,84	30,56	288,68
Ribera 2. E	8,88	2,56	21,11	3,34	64,11	22,26	17,45	1,60	21,96	45,69	28,36	47,15	45,58	311,20
Ribera 3. E	9,48	2,36	18,72	3,55	65,89	20,31	17,42	0,20	28,84	47,12	24,39	40,37	38,94*	279,84
Sandria 1. E	9,12	3,42	23,67	3,78	60,01	25,38	17,74	4,27	35,57	47,14	32,96	30,60	29,44	375,16
Sandria 2. E	8,77	3,10	20,20	3,31	64,62	22,97	17,23	3,75	26,36	46,94	36,70	46,30	44,77	362,20
Sandria 3. E	7,69	2,39	19,74	3,74	66,44	23,92	17,49	3,72	29,57	47,08	37,76	41,00	39,47*	299,10
Clarica 1. E	9,33	2,68	19,05	3,79	65,14	22,44	18,61	2,89	36,07	47,27	35,08	34,10	32,81	332,08
Clarica 2. E	9,57	2,74	16,00	3,39	68,30	20,67	17,57	1,75	32,44	47,58	32,95	43,50	42,02	322,45
Clarica 3. E	9,92	2,88	16,29	3,13	67,78	21,49	18,27	3,87	21,72	46,26	29,03	48,00	46,50	335,26
Monalisa 1. E	9,79	2,57	21,76	4,02	61,87	24,65	18,14	3,49	30,54	46,57	31,96	31,90	30,62	274,91
Monalisa 2. E	8,95	3,31	18,38	3,05	66,31	20,94	18,26	3,15	21,70	47,09	41,39	44,30	42,95	285,06
Monalisa 3. E	9,35	3,82	19,37	4,04	63,42	24,71	17,83	4,25	19,94	46,76	31,30	44,50	42,70	246,55

1. E - Ernte nach 118 Wachstumstagen im Vegetationsstadium „in der Teigreife der Körner“;

2. E - Ernte nach 131 Wachstumstage im Vegetationsstadium „Ende der Teigreife der Körner“;

3. E - Ernte nach 147 Wachstumstagen im Vegetationsstadium „Vollreife“ der Pflanzen

* Bruchverluste, eventl. höherer Wassergehalt durch Taubildung

Tabelle 34. Inhaltsstoffe, Bruttoenergiegehalt und spezifische Methanausbeute von Silomais verschiedener Sorten und Reifestadien; Sortenanbauversuch Ludersdorf/Steiermark

Varianten	XP % TM	XL % TM	XF % TM	XA % TM	XX % TM	ADL % TM	GE MJ * kgTS ⁻¹	ZEL % TM	H-ZEL % TM	C % TM	C/N	TS % FM	OTS % FM	CH ₄ -Ertrag NI CH ₄ * kg oTS ⁻¹
Benicia 1E.	7,49	1,53	22,73	3,15	65,10	9,62	18,56	19,78	40,30	44,07	33,86	22,28	21,58	283,69
Benicia 2E.	8,24	1,53	17,40	3,03	69,80	10,16	17,74	13,69	45,29	44,75	31,18	37,63	36,49	247,45
Benicia 3E.	7,09	1,76	16,42	3,13	71,60	14,50	18,51	12,44	43,91	43,87	41,38	49,99	48,43	241,20
Ribera 1E.	8,60	1,13	30,25	4,43	55,59	9,39	18,73	28,43	31,38	46,02	33,33	22,45	21,46	261,05
Ribera 2E.	7,53	1,98	19,49	3,09	67,91	10,67	18,52	9,47	46,56	44,58	38,73	34,75	33,68	237,33
Ribera 3E.	7,46	1,67	19,50	3,32	68,06	5,42	18,33	19,23	42,87	44,00	37,50	47,73	46,15	205,04
Phönix 1E.	9,06	1,36	21,95	4,34	63,28	12,84	18,86	25,34	28,62	45,06	32,43	23,75	22,72	286,49
Phönix 2E.	8,06	2,54	22,82	3,67	62,91	11,71	18,78	11,77	39,18	44,77	35,29	36,25	34,92	223,64
Phönix 3E.	8,27	2,35	19,48	3,27	66,62	10,86	18,99	12,06	46,78	43,30	33,83	46,88	45,35	207,61
Atalante 1E.	7,74	1,22	26,47	3,88	60,70	9,56	18,39	27,00	32,57	44,70	32,95	22,85	21,97	209,61
Atalante 2E.	6,54	2,57	16,18	3,10	71,61	7,75	17,85	15,04	46,53	44,66	43,81	40,23	38,98	205,83
Atalante 3E.	7,29	2,08	20,37	3,49	66,77	12,74	18,91	22,69	33,57	45,28	40,14	40,78	39,35	194,92
Saxxo 1E.	8,89	0,92	28,89	4,67	56,63	12,45	18,64	28,55	27,47	46,13	32,88	19,24	18,34	255,59
Saxxo 2E.	7,78	1,54	21,33	3,78	65,56	9,56	17,97	20,35	38,55	45,76	39,15	35,08	33,75	231,80
Saxxo 3E.	6,78	1,95	19,17	2,95	69,15	9,03	18,38	13,60	49,51	42,78	41,15	50,99	49,49	215,86

1. E - Ernte nach 100 Wachstumstagen im Vegetationsstadium „in der Teigreife der Körner“;
2. E - Ernte nach 143 Wachstumstage im Vegetationsstadium „Ende der Teigreife der Körner“;
3. E - Ernte nach 190 Wachstumstagen im Vegetationsstadium „Vollreife“ der Pflanzen

In Bezug auf die für den Methanenergiewert relevanten Inhaltsstoffe zeigen die Sorten beider Standorte zum Teil deutliche Unterschiede. Wie der Vergleich der Inhaltsstoffe des Silomaises beider Standorte zeigt, weisen die Silomaisganzpflanzensilagen aus Groß Enzersdorf um durchschnittlich 1,3 % i.d.TS höhere Gehalte an Rohprotein (XP), um 1,4 % i.d. TS höhere Gehalte an Rohfett (XL) und einen wesentlich höheren Gehalt an Lignin (um durchschnittlich 12,3 % i.d. TS) auf. Die Silomaisorten aus Ludersdorf zeigen um durchschnittlich 2,5 % i.d. TS höhere Rohfasergehalte (XF) und um 1 % i.d. TS höhere XX-Gehalte. Auch zwischen den Sorten bestehen zum Teil deutliche Unterschiede im Nährstoffmuster.

Vor allem aber wird das Nährstoffmuster der Silomaisganzpflanzensilagen vom Zeitpunkt der Ernte bestimmt. So nimmt beispielsweise der Rohfasergehalt (XF) in der TS mit zunehmender Wachstumsentwicklung der Maispflanzen deutlich ab, wohingegen der Gehalt an XX i.d.R. zunimmt. Der Rohfettgehalt nimmt mit zunehmender Reifeentwicklung der Pflanzen leicht zu. In Bezug auf den Rohproteingehalt verhalten sich die Sorten mit zunehmender Reifeentwicklung von konstant bis leicht zunehmend. Ein Vergleich mit den in den DLG-Futterwerttabellen für Wiederkäuer ausgewiesenen relevanten Inhaltsstoffen zeigt, dass mit dem verwendeten Silomaisproben das Spektrum der in der Praxis vorkommenden Inhaltsstoffgehalte von Silomaisganzpflanzensilage abgedeckt wird.

Die Methanausbeuten bei der anaeroben Vergärung der Silomaisproben wurden mit der in-vitro-Verdaulichkeit und den NEL-Gehalten der Gärgüter beim Einsatz als Grundfutter für Milchvieh verglichen. Wie auch bei Klee gras sinken die Methanausbeuten mit zunehmender

Vegetationsentwicklung. Die Verdaulichkeit und der NEL-Gehalt hingegen steigen im Vegetationsverlauf an (vgl. Tabellen A3). Verdaulichkeit und Methanausbeute zeigen eine gegenläufige Entwicklung. Aus diesem Grund kann aus Werten der in-vitro-Verdaulichkeit nicht auf die Methanausbeute von Silomais bei anaerober Vergärung in Biogasanlagen geschlossen werden.

7.5.2. Berechnung des Methanenergiewertes von Silomais anhand der Rohnährstoffe

Die Schätzgleichung zur Berechnung des Methanenergiewertes von Silomaisganzpflanzensilage wird analog zur Vorgehensweise in den Kapiteln 5.8 und 6.4 bestimmt. In die multiple Regressionsanalyse fließen die Ergebnisse aller 30 Stoff- und Energiewechselmessungen von Silomaisganzpflanzensilage aller untersuchter Sorten, Erntezeitpunkte und Standorte (Tab. 33 und 34) ein. Tabelle 35 zeigt die Regressionskoeffizient der Gesamtgleichung zur Berechnung des Methanenergiewertes von Silomaisganzpflanzensilage anhand der Rohnährstoffgehalte Rohprotein (XP), Rohfett (XL), Rohfaser (XF) und N-freie Extraktstoffe (XX). Für die Beurteilung der Qualität der Schätzgleichung sind das Bestimmtheitsmaß, der F-Wert und die Durbin-Watson-Statistik der Gesamtgleichung und das Signifikanzniveau der Regressionskoeffizienten der Gleichung angegeben. Die praktische Kalkulation des Methanbildungsvermögens von Silomaisganzpflanzensilage und die energetische Bewertung von Silomaisganzpflanzensilage für die Methanbildung in Biogasanlagen kann mit dieser Berechnungsgleichung durchgeführt werden.

Tabelle 35. Parameter der Regressionsgleichung zur Berechnung des Methanenergiewertes von Silomaisganzpflanzensilage anhand der Rohnährstoffe

Inhaltsstoff	Regressionskoeffizient	Einheit	Signifikanzniveau
Rohprotein (XP)	28,66	% TS	0,001
Rohfett (XL)	13,63	% TS	0,237
N-freie Extraktstoffe (XX)	-0,10	% TS	0,661
Rohfaser (XF)	0,10	% TS	0,895
Qualitätsparameter der Gesamtgleichung: $R^2 = 0,984$; F-Wert = 405,179; Durbin-Watson-Wert = 1,483; Signifikanzniveau = 0,000; n = 30			

Wie Tabelle 35 zeigt, kann der Methanenergiewert (in $l \text{ CH}_4 \cdot \text{kg oTS}^{-1}$) von Silomaissilage anhand der geschätzten Parameter für die Methanbildung aus den Rohnährstoffe in Form einer multiplen linearen Regressionsgleichung berechnet werden. Das Gesamtmodell ist genau ($r^2 = 0,984$) und hoch signifikant ($p = 0,000$). Die Gleichung gibt weiterhin den Beitrag der einzelnen Rohnährstoffkomponenten der Silomaisganzpflanzensilage zum Methanenergiewert an. Zum Beispiel zeigt Rohprotein (XP) mit dem Regressionskoeffizienten 28,66 den höchsten Beitrag zum Methanenergiewert. Der Regressionskoeffizient von Rohfett (13,63) zeigt einen mittleren Beitrag zur Methanbildung. Rohfaser hat nahezu keine methanogene Wirkung. Die N-freien Extraktstoffe (XX) zeigen ebenfalls eine sehr geringe, leicht negative Wirkung für die Methanbildung.

Die Berechnung des Methanenergiewertes von Silomaisganzpflanzensilage wird an zwei nachfolgenden Beispielen für Silage von Pflanzen des Vegetationsstadiums „in der Milchreife der Körner“ (erste Ernte) und des Vegetationsstadiums „Vollreife“ der Pflanzen (dritte Ernte) durchgeführt (Tab. 36 und 37). Der Methanenergiewert von Silomaisganzpflanzensilage gibt an, welche Methanmenge in $l \text{ CH}_4$ pro kg oTS des Gärrohstoffes in Abhängigkeit von den

Rohnährstoffgehalten bei der Biogaserzeugung unter optimalen Bedingungen gebildet werden kann.

Tabelle 36. Beispiel für die Berechnung des Methanenergiewertes von Silomaisganzpflanzensilage; Vegetationsstadium der Pflanzen: „in der Milchreife der Körner“

<i>Inhaltsstoff</i>	<i>Rohnährstoffgehalt</i> [% TS]	<i>Faktor für MEW</i>	<i>MEW</i> [NI CH ₄ /kg oTS]
Rohprotein (XP)	9,12	28,66	261,4
Rohfett (XL)	3,42	13,62	46,6
N-freie Extraktstoffe (XX)	60,1	-0,10	-6,0
Rohfaser (XF)	23,7	0,10	2,4
			304,4

Tabelle 37. Beispiel für die Berechnung des Methanenergiewertes von Silomaisganzpflanzensilage; Vegetationsstadium: „Vollreife der Pflanzen“

<i>Inhaltsstoff</i>	<i>Rohnährstoffgehalt</i> [% TS]	<i>Faktor für MEW</i>	<i>MEW</i> [NI CH ₄ /kg oTS]
Rohprotein (XP)	6,78	28,66	194,3
Rohfett (XL)	1,95	13,62	26,6
N-freie Extraktstoffe (XX)	69,2	-0,10	-6,9
Rohfaser (XF)	19,2	0,10	1,9
			215,9

Die Berechnungsbeispiele zeigen den Einfluss der Rohnährstoffzusammensetzung von Silomaisganzpflanzensilage auf ihren Methanenergiewert. Während Silomaissilage des Vegetationsstadiums „in der Milchreife der Körner“ einen MEW von 304,4 NI CH₄/kg oTS hat, liegt der MEW von Silomaissilage im Vegetationsstadium „Vollreife der Pflanzen“ nur mehr bei 215,9 NI CH₄/kg oTS und damit um 29,1 % niedriger. Der Erntezeitpunkt bestimmt den Methanenergiewert von Silomaisganzpflanzensilage wesentlich.

7.5.3. Zusammenhang zwischen Wirkungsgrad der Methangärung (η) und Methanenergiewert von Silomais

Der Wirkungsgrad der Methangärung (η) gibt Auskunft über den Anteil der Bruttoenergie im Gärrohstoff „Silomaisganzpflanzensilage“, der durch die anaerobe Methangärung in Methan des Biogases transferiert wird. Abbildung 26 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Methanenergiewert von Silomaisganzpflanzensilage und dem Wirkungsgrad der Methangärung (η).

$$\text{Wirkungsgrad der Methangärung } (\eta) = - 3,787 + 0,226 * \text{Methanenergiewert (NI CH}_4\text{/kg oTS)}$$

Der Zusammenhang hat ein Bestimmtheitsmaß von $r^2 = 97,8 \%$ und ist hoch signifikant ($p < 0,000$; F-Wert = 1270).

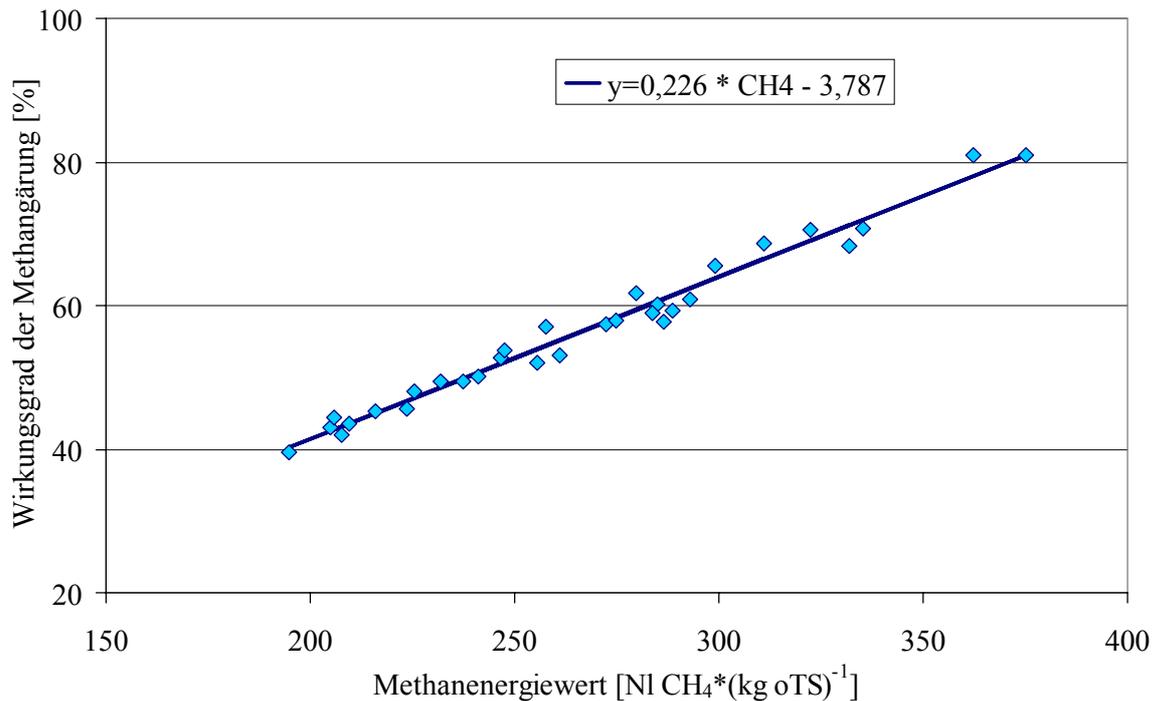


Abbildung 26. Abhängigkeit des Wirkungsgrades der Methangärung (η) vom Methanenergiewert (MEW) der Silomaisganzpflanzensilage

Bei einem unteren Methanenergiewert von 200 NI CH₄/kg oTS weist die Methangärung von Silomaisganzpflanzensilage einen energetischen Wirkungsgrad von 41,4 % auf. Steigt der Methanenergiewert auf einen oberen Wert von 370 NI CH₄/kg oTS, so erhöht sich der Wirkungsgrad auf 79,8 %. Der Berechnung liegen die Daten der Stoff- und Energiemessungen aller Silagen aus den Sortenversuchen der Standorte Ludersdorf und Groß-Enzersdorf zugrunde. Der Zusammenhang ist dem der anaeroben Vergärung von Kleegrassilage sehr ähnlich.

7.5.4. Zusammenhang zwischen Kohlenstofftransferfaktor (η_c) und Methanenergiewert von Silomais

Der Kohlenstofftransferfaktor (η_c) der Silomaisganzpflanzensilage gibt Auskunft darüber, welcher Anteil der in der Trockenmasse enthaltenen Kohlenstoffmenge durch die anaerobe Methangärung in das Methan im Biogas transferiert worden ist.

Abbildung 27 zeigt die Abhängigkeit zwischen dem Methanenergiewert von Silomaisganzpflanzensilage und dem Kohlenstofftransferfaktor der Methangärung (η_c).

$$\text{Kohlenstofftransferfaktor } (\eta_c) = 3,729 + 0,099 * \text{Methanenergiewert (NI CH}_4\text{/kg oTS)}$$

Der Zusammenhang hat ein Bestimmtheitsmaß von $r^2 = 0,977$ und ist hoch signifikant ($p < 0,000$; F-Wert = 1223,118).

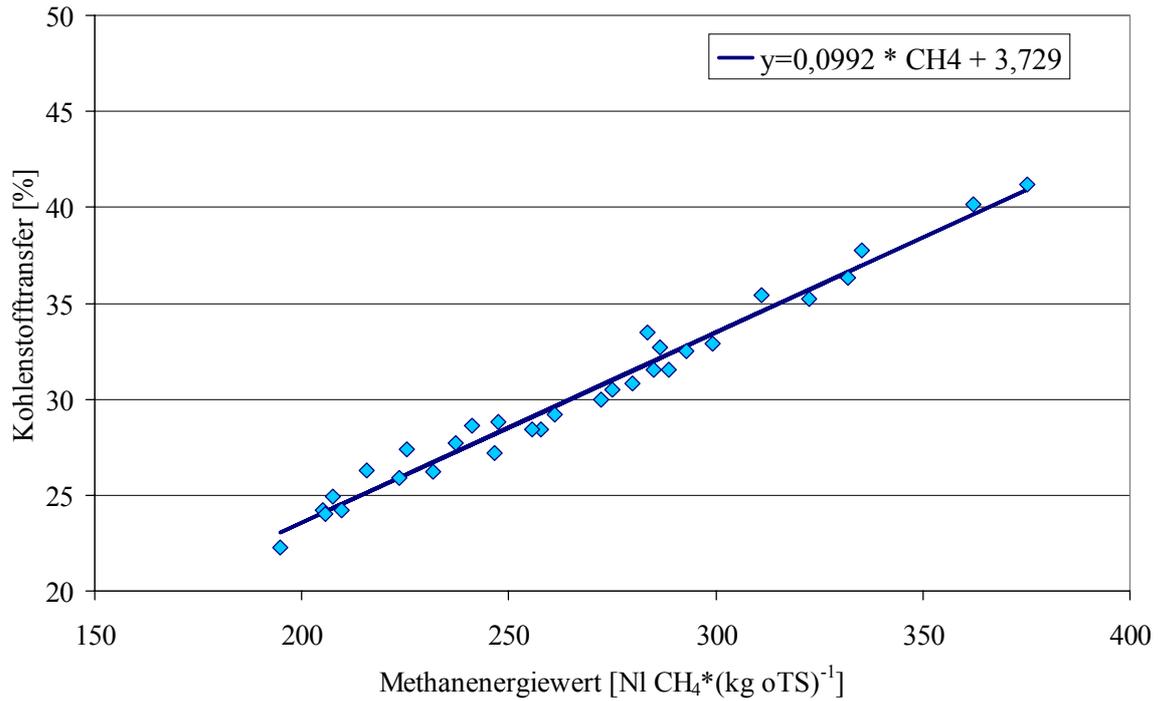


Abbildung 27. Abhängigkeit des Kohlenstofftransferfaktors (η_c) vom Methanenergiewert der Silomaisganzpflanzensilage

Bei einem unteren Methanenergiewert von 200 Nl CH₄/kg oTS ergibt sich ein Kohlenstofftransferfaktor (η_c) von 23,5 %. Steigt der Methanenergiewert auf 380 Nl CH₄/kg oTS, so ergibt sich ein Kohlenstofftransferfaktor 41,4 %.

Sowohl der Wirkungsgrad der Methangärung (η) als auch der Kohlenstofftransferfaktor (η_c) sind Effizienzmaße für die Vergärbarkeit von Gärrohstoffen.

7.6. Methanhektarertrag von Silomais

Tabelle 38 zeigt die Erträge an organischer Trockensubstanz zu jeweiligen Erntezeitpunkt der fünf Silomaisorten des Standortes Ludersdorf/Steiermark. Bei allen Sorten waren die oTS-Ertragszuwächse zwischen erster und zweiter Ernte am größten. Die höchsten oTS-Erträge wurden meist beim zweiten Erntetermin nach 143 Wuchstagen im Vegetationsstadium „Teigreife der Körner“ erreicht. Die Sorten Benicia und Saxxo hatten beim zweiten Erntetermin mit 34,47 t oTS pro ha bzw. 34,20 t oTS pro ha von allen Sorten die höchsten oTS-Erträge. Demgegenüber erreichten die Sorten Ribera, Phönix und Atalante beim zweiten Erntetermin oTS-Erträge von 26,60, 24,98 und 25,69 t pro ha. Bei diesen Sorten führte die Ernte vollreifer Pflanzen zu keinen nennenswerten Ertragszuwächsen mehr. Bei den Sorten Benicia und Saxxo nahmen die oTS-Erträge vollreifer Pflanzen aufgrund von Bruchverlusten sogar wieder ab.

Tabelle 38 und Abbildung 28 zeigen weiterhin die erzielten spezifischen Methanausbeuten der Silomaisorten des jeweiligen Erntestadiums. Die Gärrohstoffe aller Sorten zeigten zum ersten Erntezeitpunkt die höchste spezifische Methanausbeute. Mit zunehmender Reifeentwicklung der Pflanzen nahm die spezifischen Methanausbeute ab.

Im Verlauf der Vegetation entwickeln sich also die Ertragsfaktoren für Methan:

1. oTS – Ertrag pro Hektar und
2. spezifische Methanausbeute aus der Biomasse

gegenläufig. Dieser generelle Sachverhalt wurde von AMON ET AL. 2002B auch in umfangreichen Silomaisortenversuchen unter Wachstumsbedingungen des Standortes Groß Enzersdorf /Niederösterreich gefunden.

Neben der Sorte kommt damit dem Zeitpunkt der Ernte des Silomais eine sehr wesentliche Bedeutung für den erzielten Methanhektarertrag zu. Der richtige Zeitpunkt für die Ernte des Silomais ist dann gegeben, wenn der Methanhektarertrag am höchsten ist. Wie Tabelle 38 und Abbildung 27 zeigen, ist neben dem Ertragspotential auch der optimale Erntetermin für Silomais des Standortes Ludersdorf/Steiermark sortenspezifisch unterschiedlich. Während die Sorten Benicia (FAO 300) mit 8.529 Nm³ CH₄/ha, Saxxo (FAO 380) mit 7.927 Nm³ CH₄/ha und Atalante mit 5.288 Nm³ CH₄/ha zur zweiten Ernte nach 143 Wachstumstagen im Vegetationsstadium „Teigreife der Körner“ den höchsten Methanhektarertrag erreichten, zeigten die Sorten Ribera (FAO 390) mit 6.451 Nm³ CH₄/ha und Phönix (FAO 290) mit 5.946 Nm³ CH₄/ha den höchsten Methanertrag schon zum Zeitpunkt der ersten Ernte nach 100 Wachstumstagen im Vegetationsstadium „Milchreife der Körner“.

Ertragsminderungen von 668 (7,8 %) bis 1.811 Nm³ CH₄/ha (22,8 %) können im Falle der Sorten Benicia und Saxxo durch eine zu frühe Ernte entstehen. In diesem Falle ist das Biomassebildungspotential der Sorten nicht ausgeschöpft. Ertragseinbußen können aber auch durch Minderung der spezifischen Methanausbeute und Bruchverluste entstehen, wenn die Ernte zu spät erfolgt. Eine zu späte Ernte führt vor allem bei Sorten mit hohem Methanertragspotential zu deutlichen Mindererträgen von bis zu 1.639 Nm³ CH₄/ha (19,2 %) (Benicia) bzw. 2.055 Nm³ CH₄/ha (25,9 %) (Saxxo).

Der optimale Erntetermin zur Bereitung von Silomaisganzpflanzensilage liegt unter den Wachstumsverhältnissen des Standortes Ludersdorf/Steiermark für die Sorten Benicia, Saxxo und Atalante im Vegetationsstadium „Teigreife der Körner“. Für die Sorten Ribera und Phönix liegt der optimale Erntetermin schon im Vegetationsstadium der „Milchreife der Körner“.

Tabelle 38. oTS-Ertrag, spezifischer Methanertrag und Methanhektarertrag der fünf untersuchten Silomaissorten.

Sorte/Ernte ¹⁾	oTS-Ertrag [t oTS/ha]	Spez. Methanertrag [Nm ³ CH ₄ /t oTS]	Methanhektarertrag [m ³ CH ₄ /ha]
Benicia 1. Ernte	27,71	283,69	7.861
Benicia 2. Ernte	34,47	247,45	8.529
Benicia 3. Ernte	28,57	241,19	6.890
Ribera 1. Ernte	24,71	261,05	6.451
Ribera 2. Ernte	26,90	237,33	6.385
Ribera 3. Ernte	27,27	205,04	5.592
Phönix 1. Ernte	20,76	286,49	5.946
Phönix 2. Ernte	24,98	223,64	5.586
Phönix 3. Ernte	24,42	207,61	5.071
Atalante 1. Ernte	17,86	209,61	3.743
Atalante 2. Ernte	25,69	205,83	5.288
Atalante 3. Ernte	26,30	194,92	5.126
Saxxo 1. Ernte	23,93	255,57	6.116
Saxxo 2. Ernte	34,20	231,80	7.927
Saxxo 3. Ernte	26,99	215,86	5.827

¹⁾Ernte nach 100 Wachstumstagen im Vegetationsstadium „in der Milchreife der Körner“;

²⁾Ernte nach 143 Wachstumstagen im Vegetationsstadium „in der Teigreife der Körner“;

³⁾Ernte nach 190 Wachstumstagen im Vegetationsstadium „Vollreife“ der Pflanzen

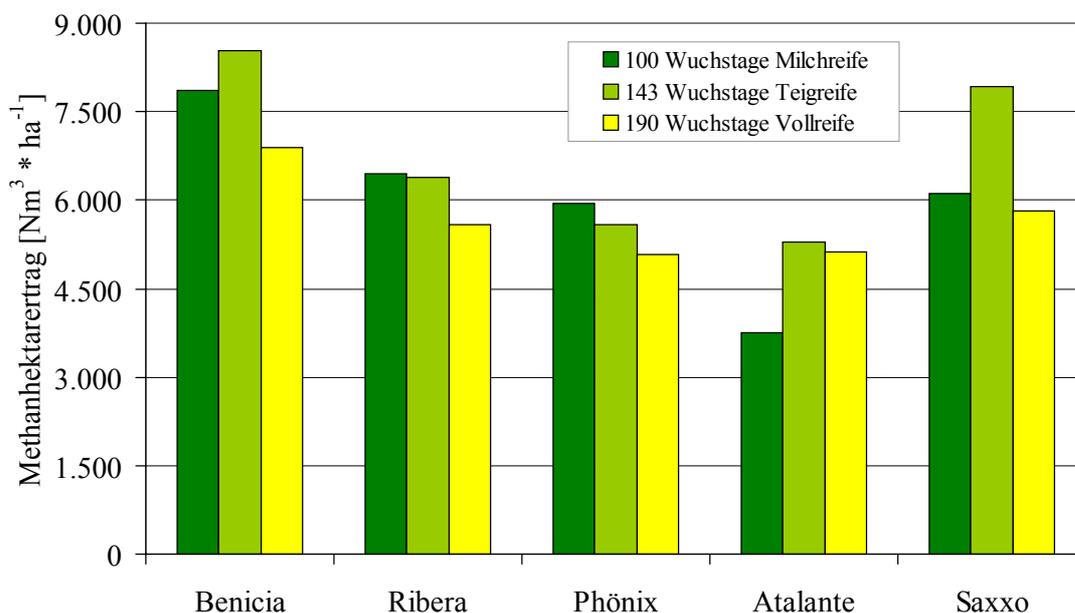


Abbildung 28. Methanhektarertrag der fünf untersuchten Maissorten in Abhängigkeit vom Erntezeitpunkt.

Zur Methanerzeugung in Biogasanlagen sind für den Standortraum Ludersdorf/Steiermark die Sorten Benicia (FAO 300) und Saxxo (FAO 380) besonders gut geeignet. Allgemein eignen sich Silomaissorten mit hohem Eiweiß- und Fettgehalt und hohem Biomassebildungsvermögen gut zur Biogaserzeugung.

8. Praktische Empfehlungen

Auf der Basis der nun vorliegenden Untersuchungsergebnisse können für die Biogasproduktion aus Kleegrasmischungen und Mais folgende Empfehlungen abgeleitet werden:

Kalkulation des Methanbildungsvermögens von Kleegrasmischungen und Mais anhand der Inhaltsstoffe:

Für die Kalkulation des spezifischen Methanbildungsvermögens von Klee- und Silomaisganzpflanzensilagen steht nun ein neues Bewertungssystem, das Methanenergiesystem, zur Verfügung. Es ermöglicht die genaue Berechnung des Methanenergieswertes von Ganzpflanzensilagen von Klee-Grasmischungen und Mais. Die Berechnung erfolgt mit Hilfe von Regressionsgleichungen anhand der Rohstoffe Rohprotein (XP), Rohfett (XL), Rohfaser (XF) und N-freie Extraktstoffe (XX) nach den in Tabelle 36 und 37 gezeigten Beispielen. Für die praktische Berechnung des MEW wird empfohlen, die im konkreten Fall vorliegenden Inhaltsstoffe der Gärrohstoffe zu verwenden. Falls Inhaltsstoffanalysen im Einzelfall nicht vorliegen, können auch die in den DLG Futterwerttabellen für Rinder angegebenen Inhaltsstoffe verwendet werden.

Der Methanenergieswert (MEW) drückt das tatsächliche spezifische Methanbildungsvermögen der einzelnen Rohstoffe aus, wenn diese in Form eines natürlichen Gärrohstoffes als Klee-Gras- oder Silomaisilage dem Mikroorganismen im Fermenter zugesetzt werden.

Nährstoffbedarf der Methangärung von Klee-Grasmischungen und Mais:

Der Nährstoffbedarf für die Methangärung von Klee-Gras- und Silomaisilage wird aus dem Vergleich von Nährstoffangebot in den Gärrohstoffen und der daraus erzeugten Methanmenge abgeleitet. Beispielsweise ist für die Erzeugung von 387,5 NI Methan 1 kg oTS Klee-Grassilage erforderlich. 1,0 kg oTS entspricht ungefähr 1,12 kg TS. Die Methanmenge von 387,5 NI pro kg oTS entspricht demnach etwa 346,0 NI Methan pro kg TS. Für die Erzeugung von 346,0 NI Methan sind nach der Methanenergieswertberechnung in Tabelle 36 179 g Rohprotein (XP), 7,5 g Rohfett (XL), 279 g N-freie Extraktstoffe (XX) und 55,6 g Rohfaser erforderlich. Bezogen auf einen Nm^3 erzeugtes Methan ergibt sich daraus ein Nährstoffbedarf von 517 g Rohprotein (XP), 22 g Rohfett (XL), 806 g N-freie Extraktstoffe (XX) und 161 g Rohfaser (XF).

Bei der Erzeugung von Biogas aus Silomaisilage erzeugt 1 kg oTS 304,4 NI Methan. 1,0 kg oTS entspricht etwa 1,036 kg TS. Die Methanmenge von 304,4 NI pro kg oTS entspricht demnach etwa 293,8 NI Methan pro kg TS. Für die Erzeugung von 293,8 NI Methan sind nach der Methanenergieswertberechnung in Tabelle 37 91,2 g Rohprotein (XP), 34,2 g Rohfett (XL), 601 g N-freie Extraktstoffe (XX) und 237 g Rohfaser erforderlich. Bezogen auf einen Nm^3 erzeugtes Methan ergibt sich daraus ein Nährstoffbedarf von 310 g Rohprotein (XP), 116 g Rohfett (XL), 2046 g N-freie Extraktstoffe (XX) und 807 g Rohfaser (XF).

Berechnung der Leistung von Biogasanlagen:

Für die Nutzung von Klee-Gras- und Maisilage wird empfohlen, a priori die Bruttoleistung von Biogasanlagen auf der Basis des Methanenergieswertsystems anhand der Inhaltsstoffe der Gärrohstoffe nach folgendem Beispiel zu berechnen.

Tabelle 39. Beispiel für die Berechnung der Bruttoleistung einer Biogasanlage bei Verwendung von 2000 t Frischmasse Klee-Grassilage pro Jahr vom 1. Schnitt im Ähren-/Rispschieben mit 15 % oTS i.d.FM; MEW = 387,5 NI CH_4 /kg oTS

Gärrohstoffmenge (Frischmasse)	2000 t Frischmasse pro Jahr mit 15 % oTS i. d. FM
Gährrohstoffmenge (org. Trockenmasse)	300 t oTS pro Jahr
MEW von Kleegrassilage des ersten Schnittes im Ähren/Rispenschieben	387, 5 Nl CH ₄ /kg oTS (Berechnung vergl. Tabelle 20)
Jährlich erzeugte Methanmenge	116.250 Nm ³ Methan pro Jahr; 1 Nm ³ CH ₄ ≈ 10 kWh
Jährliche Vollaststunden des BHKW	7.000 h/a
Bruttoleistung der Biogasanlage	166 kW
Erforderliche instl. el. Leistung bei $\eta_{el} = 30\%$	≈ 50 kW

Wie das Berechnungsergebnis zeigt, ergibt sich bei Verwendung von 2000 Jahrestonnen Kleegrassilage des ersten Schnittes im Vegetationsstadium Ähren-/Rispenschieben, mit einem MEW von 387, 5 Nl CH₄/kg oTS, eine Bruttoleistung der Biogasanlage von 166 kW. Die zu installierende elektrische Leistung liegt dann bei 50 kW_{el}.

Berechnung des Methanhektarertrages von Fruchtfolgen:

Es wird empfohlen, nicht Methanertragsspitzenleistungen für Wirtschaftlichkeitsrechnungen von Biogasanlagen zu verwenden, sondern Methanhektarerträge ökologisch ausgewogener Fruchtfolgesysteme zu Grunde zu legen. Mit Hilfe des MEWS können solche Berechnungen standortspezifisch exakt durchgeführt werden. Die weitere Entwicklung des MEWS für zusätzliche Gärgüter ist dafür notwendig.

Standortspezifisch geeignete Sorten und optimaler Erntezeitpunkt:

Kleegras- und Silomaisorten mit hohem Eiweiß- und Fettgehalt und hohem standortspezifischem Biomassebildungsvermögen eignen sich besonders gut zur Biogaserzeugung. Rohfaser ist bei Silomais für die Methanbildung von geringem Wert. Die N-freien Extraktstoffe mindern das Methanbildungsvermögen von Kleegrassilagen leicht.

Für den Standortraum Ludersdorf/Steiermark eignen sich die Silomaisorten Benicia (FAO 300) und Saxxo (FAO 380) besonders gut. Auf guten bis sehr guten Standorten eignen sich späte Sorten besser als frühe, weil diese ihr Biomassebildungsvermögen besser ausnutzen können.

In Anbauversuchen des Trockenstandortes Groß-Enzersdorf zeigten die Sorten Ribera (FAO 390) und PR39G12 (FAO 240) auf der Basis der Ertragsdaten von 2001 die höchsten Methanhektarerträge. Der optimale Erntetermin war im Vegetationsstadium „Ende der Teigreife“. Bis zur Vollreife der Pflanzen nahmen die Methanhektarerträge um bis zu 40 % ab.

Beim Kleegras eignen sich die Sortenmischungen IM, KM und DM gleichermaßen gut. Die Mischungen wachsen in milden, mittleren bis klimatisch begünstigten Lagen des Alpenvorlandes, Tal- und Beckenlagen und Standorten bis zu 800 m Höhenlage.

Auf der Basis der vorliegenden Untersuchungsergebnisse können Strategien abgeleitet werden, für die Vorgehensweise bei der Beurteilung der Ertragsleistung von Sorten und des optimalen Erntezeitpunktes. Folgende Vorgehensweise wird empfohlen:

Standorttypische Sortenanbauversuche dienen der Ermittlung des oTS-Ertrags im Vegetationsverlauf.

Inhaltsstoffanalysen dienen der Bestimmung des Verlaufes der Gehalte von Rohprotein (XP), Rohfett (XL), N-freien Extraktstoffen (XX) und Rohfaser (XL) in den Gärrohstoffen. Die spezifische Methanausbeute der Gärrohstoffe wird im Vegetationsverlauf mit dem nun vorliegenden Methanenergiewertsystem anhand der Inhaltsstoffe berechnet.

Die Entwicklung des Methanhektarertrages verschiedener Sorten im Vegetationsverlauf wird angegeben.

Aus dem Verlauf der Ertragsentwicklung lassen sich standortspezifisch geeignete Sorten und der optimale Zeitpunkt für die Ernte ableiten. Der bei optimalem Erntezeitpunkt mögliche Methanhektarertrag wird angegeben. Dieser ist dann erreicht, wenn der Methanhektarertrag am größten ist.

Bei Silomais lag der optimale Erntetermin zur Bereitung von Silomaisganzpflanzensilage unter den Wachstumsverhältnissen des Standortes Ludersdorf/Steiermark für die Sorten Benicia, Saxxo und Atalante im Vegetationsstadium „Teigreife der Körner“. Für die Sorten Ribera und Phönix lag der optimale Erntetermin schon im Vegetationsstadium der „Milchreife der Körner“.

Bei Kleegrasmischungen lag der optimale Erntetermin unter den Wachstumsbedingungen des Alpenraumes für die Silagebereitung für alle Sortenmischungen im Vegetationsstadium „im Ähren-/Rispschieben“.

Abweichungen vom optimalen Erntetermin durch zu frühe oder zu späte Ernte können bei Klee gras und Silomais Verluste im Methanertrag pro Hektar von bis zu 25 % verursachen. Besonders hohe Verluste treten bei zu später Ernte auf.

Erforderliche Hydraulische Verweilzeit der Gärgüter im Fermenter:

Die erforderliche hydraulische Verweilzeit für die Gärgüter im Fermenter wird aus der zeitlichen Entwicklung der kumulierten spezifischen Methanausbeute abgeleitet. Die Gärung wird ab dem Zeitpunkt als vollständig betrachtet, ab dem 95 % der maximal möglichen Methanmenge gebildet worden sind. Bei Silomaissilage war das i.d.R. nach 39 - 42 Gärtagen der Fall. Klee grassilage erreichte diesen Prozentsatz nach 41 bis 44 Gärtagen. Für die praktische Empfehlung wird ein Sicherheitszuschlag von 10 % addiert. Für Silomaissilage wird demnach eine hydraulische Verweilzeit im Hauptfermenter bei 40 °C von 45 Gärtagen empfohlen. Für Klee grassilage liegt der empfohlene Wert bei 47 Gärtagen. Die erforderliche hydraulische Verweilzeit ist die Basis zur Kalkulation der Größe des Fermenters.

Konservierung:

Bei der Biogaserzeugung aus Klee grasmischungen wird durch die Heubereitung im Vergleich zu grüner, nicht konservierter Biomasse ein Mehrertrag von 12 % erreicht. Die Silagebereitung bewirkt im Vergleich zu frischer, nicht konservierter Biomasse eine Ertragssteigerung um 26 %. Beim Klee gras wirken sich beide Konservierungsverfahren deutlich ertragssteigernd auf das Methanbildungsvermögen aus. Aus praktischer Sicht kann vor allem die Silagebereitung als geeignete Konservierungsform empfohlen werden.

Bei der Biogaserzeugung aus Mais bewirkt die Silagebereitung im Vergleich zur frischen, nicht konservierten Biomasse eine Ertragssteigerung von 15 %.

9. Literaturverzeichnis

- AMON, TH.; BOXBERGER J.; JEREMIC, D. (2000a) Neue Entwicklungen der Biogaserzeugung aus Wirtschaftsdüngern, Energiepflanzen und organischen Reststoffen. Referat beim 9. Österreichischer Biomassetag „Biomasse – national und international“ des Österreichischen Biomasse-Verbandes in Puchberg am Schneeberg, 17 Oktober 2000.
- AMON, TH.; BOXBERGER J. (2000b) Biogas Produktion from Farmyard Manure. In: Recycling of Agricultural, Municipal and Industrial Residues in Agriculture, FAO European Cooperative Research, RAMIRAN, Gargnano/Italy, 6-9 September 2000.
- AMON, TH.; JEREMIC, D.; BOXBERGER J. (2001a) Neue Entwicklungen der landwirtschaftlichen Biogaserzeugung in Österreich. In: 5. Internationale Tagung „Bau, Technik und Umwelt in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung“, 6.- 7. März 2001 in Hohenheim/Deutschland.
- AMON, TH.; JEREMIC, D.; BOXBERGER J. (2001b) Biogaserzeugung aus Wirtschaftsdüngern, Energiepflanzen und organischen Reststoffen: Potenziale und Technik. 6. Wissenschaftstagung zum ökologischen Land- und Gartenbau, 6.-8. März 2001 Technische Universität München Freising-Weihenstephan.
- AMON, TH.; HACKL, E.; JEREMIC, D.; AMON, B. (2002a) Kofermentation von Wirtschaftsdüngern mit Energiegräsern in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Optimierung der Gärgutmischungen und des Biogasertrages; Endbericht an die Kammer der Wiener Wirtschaft
- AMON, TH.; KRYVORUCHKO, V.; AMON, B.; MOITZI, G.; LYSON D.; HACKL, E.; JEREMIC, D.; ZOLLITSCH, W.; PÖTSCH, E.; MAYER, K.; PLANK, J. (2002b): Methanbildungsvermögen von Mais – Einfluss der Sorte, der Konservierung und des Erntezeitpunktes. Endbericht Oktober 2002. Im Auftrag von Pioneer Saaten Ges.m.b.H. Parndorf (Austria)
- AMON, TH.; AMON, B.; KRYVORUCHKO, V.; HOPFNER-SIXT, K.; BUGA, S.; PÖTSCH, E.; ZOLLITSCH, W.; PLANK, J.; MAYER, K.; (2003a): Nutzung der Grünlandbiomasse, sowie anderer Feldkulturen für die Biogasproduktion. In: Schriftreihe des Ökosozialen Forums Österreich. Im Druck
- AMON, TH.; HOPFNER-SIXT, K.; KRYVORUCHKO, V.; AMON, B.; PLANK, J. (2003b): Genehmigungserfordernisse für Biogasanlagen. In: BAL-Bericht über die Gumpensteiner Bautagung „Stallbau-Stallklima-Tierhaltung in biologischen Betrieben- Genehmigungsverfahren vom 17.-18. Juni 2003; S. 41 - 48
- ANGELIDAKI, I.; AHRING B.K. (1993): Thermophilic anaerobic digestion of livestock waste – the effect of ammonia, Appl. Microbiol Biotechn., 38, p. 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
- BASERGA U. (2000) Vergärung organischer Reststoffe in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. FAT-Berichte 546.
- BASERGA, U.; EGGER K. (1998) Vergärung von Energiegras zur Biogasgewinnung. Biogas-Forum <http://www.biogas.ch/f+e/grasbasi.htm>
- 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 (1), p 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, Antwerpen – Belgium, September 2-6
- BEITZ, W.; KÜTTNER, K.-H. (1987): *Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau*, 16. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokio
- BECKER, G.; HAMS, S. (2002): Erfahrungen mit unterschiedlichen Systemen für Gärtests. VDI WS „Vergärung organischer Stoffe“ Düsseldorf 18./19. April 2002
- BJÖRNSSON, L.; BATSTONE, D.; CHRISTENSSON, K.; MATTIASSON, B. (2001): Agrigas – Biogas production from crop residues. Proceedings of 9th World Congress Anaerobic Digestion, Antwerpen – Belgium, September 2-6, p. 561 – 567
- BORJESSON, P. (1998) Environmental effects of energy crop cultivation. In: Proceedings of the International Conference Würzburg, Germany 8 – 11 June 1998, S. 163 – 165
- BOYLE, W.C. (1977): Energy recovery from sanitary landfills. In: A.G. Schlegel, J. Barnea, eds) *Microbial Energy Conversion*, pp. 119 – 138
- BUCHGRABER, K., KRAUTZER, B., LUFTENSTEINER, H., GIRSCH, L., HOLAUS, K. (1998): Grünland braucht bestes Saatgut. *Der Fortschrittliche Landwirt*, ÖAG-Sonderbeilage 3/98
- BUSWELL, A.M. (1936): Anaerobic fermentations. *Bull. No.32, Div. State Water Survey, Univ. of Illinois* p. 193.
- DLG - DEUTSCHE LANDWIRTSCHAFTSGESELLSCHAFT (1997): *Ergänzungen zu den DLG-Futterwerttabellen für Wiederkäuer Wiesen- und Weidefutter aus dem österreichischen Alpenraum (Datengrundlage aus Österreich); 7. erweiterte und überarbeitete Auflage, DLG-Verlag, Frankfurt/Main, 1997, S. 203-212*
- DIN 38 414 (1985): Bestimmung des Faulverhaltens „Schlamm und Sedimente“
- 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*, 1993, 5, 95 - 111
- EDELMANN, W. (2001) *Biogaserzeugung und Nutzung. In: Energie aus Biomasse – Grundlagen, Technik und Verfahren. S. 641 – 692. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York. Kaltschmitt & Hartmann (Hrsg.). ISBN 3-540-64853-4*
- GALLERT, C. & WINTER, J. (1998) *Mikrobiologie anaerober Gärprozesse, In: Technik anaerober Prozesse, S. 19 – 34, 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, H. Märkl & R. Stegmann (Hrsg.), ISBN 3-926959-95-9*
- HENZE, M.; GRADY, C.P.L.; GUJER, W.; MARAIS, G.V.R. AND MATSUO, T. (1986): *Activated Sludge Model No. 1. IAWQPRC, London*
- JÄGER, F. (2002): *Mais als Energiepflanze für die Biogasproduktion, KWS Mais GmbH, Fachberatung Mais*
- 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 scale evaluation. Proceedings of 9th World Congress Anaerobic Digestion, Antwerpen – Belgium, September 2-6, p. 363 – 368

- KELLNER, O.J.; DREPPER, K.; ROHR, K. (1984) Grundzüge der Fütterungslehre. Parey Hamburg, p. 143.
- KIRCHGESSNER, M. (1992) Tierernährung, 8. Auflage, DLG-Verlag, Frankfurt am Main.
- KÖTTNER, M. (2000) Wenn die Biogasanlage plötzlich streikt. Biogas Top-Agrar extra S. 64 – 65
- KOPETZ, H. (2000) Buchberger Erklärung: Mit Bioenergie in das neue Jahrhundert. Österreichischer Biomasse-Verband, Franz Josefs - Kai 13, 1010 Wien, 2000
- KRIEG & FISCHER (2002) Grasvergärung aus Wissenschaftlicher Sicht.
<http://www.KriegFischer.de>
- KTBL 1996 KTBL-Arbeitspapier 235 „Energieversorgung und Landwirtschaft“. In:
<http://www.inaro.de/Deutsch/ROHSTOFF/ENERGIE/Biomasse/BIOMUMW1.HTM>
- LANGHANS, G. (2002): Probeaufbereitung für Gärversuche; VDI WS „Vergärung organischer Stoffe“ Düsseldorf 18./19. April 2002
- LINKE, B.; BAGANZ, K.; SCHLAUDERER, R. (1999) Nutzung von Feldfrüchten zur Biogasgewinnung. Agrartechnische Forschung 5 (1999) H.2, S. 82–90
- MÄHNERT, P.; HEIERMANN, M.; PLÖCHL, M.; SCHELLE, H.; LINKE, B. (2002) Verwertungsalternativen für Grünlandbestände – Futtergräser als Kosubstrat für die Biomethanisierung, Landtechnik 5/2002, S. 260 - 261
- MADIGAN, M.T.; MARTINKO, J.M.; PARKER, J. (2000): Brock Mikrobiologie, Hrsg. W. Goebel, Spektrum Akademischer Verlag GmbH Heidelberg, Berlin
- MCCARTY, P.L.; MOSEY, F.E. (1991): Modelling of anaerobic digestion process (a discussion of concepts). Water Sci. Technol. 24: p 17 – 33
- MERRETING-BRUNS, U.; KABASCI, S. (2002): Vergleich diskontinuierlicher Gärtests mit kontinuierlicher Laborfermentation. VDI WS „Vergärung organischer Stoffe“ Düsseldorf 18./19. April 2002
- MOE, P.W.; TYRRELL, H.F.; REYNOLDS, P.J. (1987) Energy metabolism of farm animals: proceedings of the 10th symposium held at Airlie, Virginia. September 1985.
- NEHRING, K.; BEYER, M.; HOFFMANN, B. (1972) Futtermitteltabellenwerk. VEB Berlin, p. 452.
- 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
- 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, S. 163 –165
- POUECH, P.; FRUTEAU, H.; BEWA, H. (1998b) Biomass Co-fermentation in a Full-scale anaerobic Digester influence of running Parameters. In Biomass for Energy and Industry, C.A.R.E.N., Proceeding of the International Conference Würzburg, Germany, 8 – 11 June 1998, S. 714 –717
- RESCH, R. (1991): In vitro-Verdaulichkeitsuntersuchung nach Tilley und Terry; Bericht über die Tagung der ALVA Fachgruppe Versuchswesen, Innsbruck 22-23. Mai 1991

- RIEDER, J. (1985) Dauergrünland. BLV Verlagsgesellschaft; Frankfurt (Main) ISBN 3-40512737-8
- SEDLMEIER J. (2000) Futterrüben als Kraftwerk. In: <http://www.gruene-niedersachsen.de/ltf/themen/landwirt/biogas/bgatrueb.htm>
- SCHIEHMANN R. (1971) Energetische Futterbewertung und Energienormen. VEB, Deutscher Landwirtschaftsverlag, Berlin.
- SCHNEIDER B.H., FLATT W.P. (1975) The evaluation of feeds through digestibility experiments. University of Georgia Press Athens, p.423.
- SCHNÜRER, A.; ZELLNER, G.; SVENSSON, H. (1999) Mesophilic syntrophic acetate oxidation during methane formation in biogas reactors. FEMS Microbiology Ecology 29 (1999) 249 – 261
- SCHURNBERGER, WERNER (2001) Stationäre Brennstoffzellensysteme im Vergleich: Entwicklungspotentiale, Wirtschaftlichkeit und Markteinführung. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für technische Thermodynamik, Stuttgart. Vortrag beim Fachkongress „Brennstoffzellensysteme im stationären Einsatz“ Energieagentur Sachsen-Anhalt, Leipzig 14.März 2001
- SPROTT G.D.; PATEL G.B. (1986): Ammonia toxicity in pure culture of 10 methanogenic bacteria. Syst. Appl. Microb., No. 7, p. 358-363
- TILLEY, J.M.A; TERRY, R.A. (1963): A two stage technique for the in vitro digestion of forage crops. J. Brit. Grassl. Soc. 18, 104 – 111
- TILLEY, J.M.A; TERRY, R.A. (1968): Procedure for the in vitro digestion of herbage samples. The Grassland Research Institute, Hurley, Nr.Maidenhead, Berkshire. 29th April 1968
- VAN SOEST, P. (1991): Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. Journal of dairy science p. 3583-3597
- VAN ES A.J.H.; VAN DER MEER J.M. (1980) Methods of analysis for predicting the energy and protein value of feeds for farm animals. Institute for livestock feeding and nutrition research, Lelystad, Netherlands, p. 106.
- WEILAND, P. (1998) Cofermentation of Biomass-Technical, Organizing and legal Possibilities for Energy Produktion. In Biomass for Energy and Industry, C.A.R.E.N., Proceeding of the International Conference Würzburg, Germany, 8 – 11 June 1998, S. 698 –701
- WEILAND, P. (2001) Grundlagen der Methangärung – Biologie der Substrate. In Biogas als regenerative Energie – Stand und Perspektiven. Tagung Hanover, 19./20. Juni 2001, VDI-Gesellschaft Energietechnik, Düsseldorf, VDI-Berichte Nr. 1620. ISBN 3-18-091620-6, S. 19 - 33
- WELLINGER, A. (2000) Strom aus Gras ? Kein Problem! In: Blick ins Land 7/2000, S. 25
- 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.