

*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)**



ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Thomas Amon (Projektleiter) ¹⁾
Dipl.-Ing. Vitaliy Kryvoruchko ¹⁾
Dr. Barbara Amon ¹⁾
Dipl.-Ing. Gerhard Moitzi ¹⁾
Sevim Buga ¹⁾
ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Werner Zollitsch ²⁾

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

²⁾ Institut für Nutztierwissenschaften (BOKU)

Zusammenfassung

Mais wird zunehmend zur Energieerzeugung in landwirtschaftlichen Biogasanlagen eingesetzt. Für einen wirtschaftlichen Betrieb sind das Methanbildungsvermögen von Mais und der erzielbare Methanhektarertrag von grundlegender Bedeutung. Empfehlungen für geeignete Sorten werden dringend benötigt. Ziel ist es, einen möglichst hohen Methanhektarertrag zu erreichen und die Biogasanlage optimal mit Nährstoffen zu versorgen. Dadurch werden Gärstörungen vermieden. Eine bestmögliche energetische Effizienz im Gesamtsystem von der Biomassebildung am Feld bis hin zur Methanbildung in der Biogasanlage wird erreicht.

In Stoffwechseluntersuchungen zur anaeroben Gärung von Mais wurde die Methanproduktivität der fünf Maissorten PR 39G12, Sandrina, Clarica, Monalisa und Ribera untersucht. Der Einfluss des Erntezeitpunktes bzw. des Vegetationsstadiums der Maispflanzen auf die Methanproduktivität der Biomasse wurde bestimmt. Daraus wurden Empfehlungen zum optimalen Erntezeitpunkt abgeleitet.

Untersuchungen zum anaeroben Stoffwechsel der Maisvergärung wurden bei jeder Sorte mit siliierter Biomasse von Pflanzen verschiedener Wachstumsstadien durchgeführt: nach 118 Wachstumstagen (Milchreife/Teigreife), nach 131 Wachstumstagen (Ende Teigreife) und nach 147 Wachstumstagen (Totreife). Der Einfluss der Silagebereitung auf das Methanbildungsvermögen wurde ebenfalls untersucht. Dazu wurde grüne, nicht silierte Biomasse der Sorte Ribera des ersten Erntezeitpunktes im Vergleich zur silierten Biomasse vergoren. Die Stoffwechselversuche zur Methangärung von Mais wurden unter standardisierten Bedingungen im Labor durchgeführt. Alle Maissorten wurden auf Feldern der Versuchswirtschaft der Universität für Bodenkultur in Gross-Enzersdorf angebaut. Die Anbauversuche umfassten auch die Bestimmung des Biomasseertrages.

Um die Dimensionierung von Biogasanlagen kalkulieren zu können, wurde die optimale substratspezifische hydraulische Verweilzeit von Mais ermittelt, bei der die im Mais enthaltene Energie optimal in Methanenergie im Biogas umgewandelt wird.

Die Sorte PR 39G12 erbrachte von allen untersuchten Sorten die niedrigste spezifische Methanausbeute mit maximal 292 N l Methan pro kg oTS. Die höchste spezifische Methanausbeute wurde bei der Sorte Sandrina gemessen (375 N l Methan pro kg oTS). Die Spanne des spezifischen Methanbildungsvermögens zwischen allen geprüften Sorten lag also bei 83 N l Methan pro kg oTS. Dies entspricht 22,1 % bzw. 28,4 % des maximalen Methanbildungsvermögens dieser Sorten. Die Sorte Clarica zeigte ein maximales spezifisches Methanbildungsvermögen von 329 N l Methan pro kg oTS. Die Sorte Ribera 311 N l Methan pro kg oTS und die Sorte Monalisa 274 N l Methan pro kg oTS. Das spezifische Methanbildungsvermögen der Sorten war von der Reifezahl der Sorten unabhängig.

Jede Sorte zeigte ein charakteristisches, spezifisches Methanbildungsvermögen. Die Methanausbeute ist vom Nährstoffmuster (XP, XL, XF, NFE, Zellulose, Hemizellulose, Lignin) geprägt, welches sortenspezifisch ist. Im Vergleich zur Sorte PR 39G12 weist z.B. die Sorte Sandrina einen höheren Fettgehalt auf. Ebenso weisen die Fraktionen NDF und Zellulose der Sorte Sandrina gegenüber der Sorte PR 39G12 höhere Gehalte auf.

Der Methanhektarertrag von Mais wird in erster Linie von zwei Ertragsfaktoren bestimmt: von der spezifischen Biogasausbeute [$\text{m}^3 \text{CH}_4$ pro kg oTS] und vom flächenbezogenen Biomasseertrag [t oTS pro ha]. Beide Ertragsfaktoren werden primär und maßgeblich von der gewählten Sorte beeinflusst.

Der Erntezeitpunkt hatte vor allem bei den Sorten Sandrina, Monalisa und PR 39G12 einen signifikanten Einfluß auf das spezifische Methanbildungsvermögen. Totreife Pflanzen der

Sorte Sandrina hatten im Vergleich zu Pflanzen im Wachstumsstadium der Teigreife ein um 23 % verringertes spezifisches Methanbildungsvermögen. Bei der Sorte Monalisa verursachte der späte Erntetermin Ertragseinbußen von 9,2 % von der maximal möglichen spezifischen Methanausbeute. Ertragsmindernd wirkte sich der späte Erntetermin auch bei der Sorte PR 39G12 aus. Hier kam es zu einer Ertragseinbuße um 15,1 % bei der Ernte von totreifen Pflanzen. Die Sorte Clarica und Ribera zeigten keinen Einfluß des Wachstumsstadiums auf das spezifische Methanbildungspotenzial.

Bei allen Sorten (mit Ausnahme von Clarica) führten totreife Bestände zu Ertragseinbußen entweder des oTS-Biomassertrages und/oder des spezifischen Methanertrages. Der optimale Erntetermin liegt also bei dem Zeitpunkt, bei dem pro Hektar die maximale Biomasse gebildet worden ist. Das ist in der Regel im Vegetationsstadium „Ende der Teigreife“ der Fall. Zu diesem Zeitpunkt ist auch das spezifische Methanbildungspotenzial der Pflanzen am höchsten. Abweichungen vom optimalen Erntezeitpunkt können je nach Sorte und Standort zu zum Teil erheblichen Einbußen des Methanhektarertrages führen. Der optimale Erntezeitpunkt entscheidet deshalb maßgeblich über die Rentabilität der Biogaserzeugung aus Mais. Totreife Maispflanzen können in der Biogasanlage in der Regel schwerer abgebaut werden als teigreife Pflanzen.

Der Einfluss der Silagebereitung auf die spezifische Methanbildung wurde anhand der Sorte Ribera im ersten, frühen Wachstumsstadium geprüft. Silage zeigte im Vergleich zu nicht siliierter frischer grüner Biomasse eine um 21 % höhere spezifische Methanausbeute. Bei der Silagebereitung führt die Milchsäuregärung zur Bildung von für die Methanogenese essentiellen Vorläufersubstanzen, wie z.B. Milchsäure (Lactat), Essigsäure (Acetat) und verschiedener weiterer Substrate für die Methanogenese wie Methanol, Alkohole, Ameisensäure (Formiat), H^+ und CO_2 . Dies erklärt den ertragssteigernden Effekt der Silagebereitung.

Um die in der Biomasse des Mais enthaltenen Energie möglichst vollständig in Methan umwandeln zu können, ist eine Gärzeit von 40 – 45 Tagen bei rund 37°C erforderlich.

Die im Rahmen des Projekts durchgeführten Untersuchungen geben erste, wertvolle Hinweise zur Optimierung der Methanproduktion aus Mais in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Für eine maximale Nutzung der vorhandenen Potenziale ist eine Ausdehnung der Versuche erforderlich. Zum einen sollte auch das Methanbildungsvermögen von Sonnenblumen in Stoffwechselfersuchen bestimmt werden, denn auch hier liegen vielversprechende Potenziale.

Zum anderen muss die Versorgung der Biogasanlagen mit Nährstoffen weiter optimiert werden. Nur so können unter praktischen Bedingungen hohe Methanerträge und ein sicherer, konstanter Betrieb der Biogasanlagen erreicht werden. Hierfür ist die Entwicklung eines neuen Systems zur energetischen Bewertung des Methanbildungsvermögens von Energiepflanzen erforderlich. Dieses neue System – das Methanenergiewertsystem (MEWS) – ermöglicht die exakte, a priori Berechnung der Methanproduktivität anhand der Rohnährstoffe in der Biomasse der Energiepflanzen. Eine exakte und bedarfsgerechte Versorgung von Biogasanlagen mit Nährstoffen wäre möglich. Das neue Methanenergiewertsystem ermöglicht dann auch exakte Leistungsberechnung von Biogasanlagen in Abhängigkeit der Qualität und Quantität der vorliegenden Biomasse.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung und Problemstellung	4
1.1.	Potenziale der Biogaserzeugung aus Energiepflanzen	4
1.2.	Rahmenbedingungen der Biogaserzeugung	5
2.	Stand des Wissens	7
2.1.	Methanbildungspotenzial von Energiepflanzen	7
2.2.	Einfluß der Konservierung auf das Methanbildungspotenzial von Energiepflanzen	9
3.	Problemstellung	10
3.1.	Bedarfsgerechte Versorgung der Biogasanlagen mit Nährstoffen	10
3.2.	Anforderungen an den Versuchsaufbau	12
4.	Ziele	14
5.	Material & Methoden	15
5.1.	Anbau, Ernte und Probengewinnung von Mais	15
5.2.	Anbautechnik und Kulturführung	15
5.2.1	<i>Feldbestellung – Mais</i>	15
5.2.2	<i>Düngungs- und Pflanzenschutzmassnahmen</i>	16
5.2.3	<i>Ernte</i>	16
5.2.4	<i>Probenaufbereitung für die Silierung</i>	16
5.3.	Gewinnung des Impfmateri als	17
5.4.	Bestimmung der Biogasproduktion unter Verwendung der Eudiometerapparatur	18
5.5.	Versuchsansatz	19
5.6.	Berechnung des kumulierten, spezifischen Biogasertrages	20
5.6.1	<i>Versuchsprotokoll</i>	20
5.6.2	<i>Gasnormvolumen</i>	20
5.6.3	<i>Gasproduktion des Impfmateri als</i>	21
5.6.4	<i>Spezifische Biogasproduktion</i>	21
5.6.5	<i>Kumulierte Biogasproduktion</i>	21
5.7.	Laboranalysen	22
5.8.	Statistische Auswertung	22
6.	Ergebnisse und Diskussion	23
6.1.	Biomassertrag	23
6.2.	Kumulierte spezifische Biogasausbeute	24
6.3.	Methangehalt im Biogas	28
6.4.	Kumulierte spezifische Methanausbeute	29
6.4.1	<i>Einfluss des Erntezeitpunktes und der Konservierung</i>	29
6.4.2	<i>Einfluss der Maissorte</i>	35
6.4.3	<i>Optimale hydraulische Verweilzeit</i>	36
6.5.	Methanhektarertrag	36
7.	Praktische Empfehlungen	39
8.	Forschungsbedarf	40
9.	Literaturverzeichnis	44

1. Einleitung und Problemstellung

1.1. Potenziale 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 vor allem aus Wirtschaftsdüngern wie Fest- und Flüssigmist erzeugt. Nachwachsende Energiepflanzen wie Mais, Wiesen gras, Klee gras, Sudangras, Miscanthus, Futterrüben, Zuckerrübenblätter u.a.m. können für die Biogaserzeugung stark an Bedeutung gewinnen. Sie werden als Cofermentationsstoffe zu Wirtschaftsdüngern oder auch in reiner Form eingesetzt. Biogasanlagen werden so dimensioniert, dass sie den Wirtschaftsdünger von 50 bis 100 GVE und die Biomasse von 20 bis 100 ha oder mehr verarbeiten können.

Die Zahl der Biogasanlagen in Österreich nimmt laufend zu. Derzeit sind 120 Biogasanlagen 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 bzw. dem optimierten Wärmeenergiebedarf von 448.000 Einfamilienhäusern (AMON ET AL. 2001).

Aus der Sicht des Klimaschutzes kommt der Biogaserzeugung aus Wirtschaftsdüngern und Energiepflanzen ein hoher Stellenwert zu. Jährlich können klimarelevante Emissionen um mehr als 5 Mio. t CO₂-Äquivalente vermindert werden (AMON ET AL. 2000a, 2000b, 2001a, 2001b).

Zur Umsetzung dieser Potenziale sind in Österreich ca. 6.000 neue Biogasanlagen erforderlich. Neben den wichtigen ökologischen Wirkungen in den Bereichen des Umwelt- und Klimaschutzes ergeben sich durch die Förderung der Entwicklung ländlicher Räume wesentliche sozioökonomische Vorteile. Für die Betreiber landwirtschaftlicher Biogasanlagen ist außerdem die verbesserte Düngewirkung des vergorenen Düngers und die damit einhergehende Einsparung beim Zukauf mineralischer Düngemittel von Bedeutung. Während und nach der Ausbringung des Gärrückstandes als Dünger ist eine wesentliche Minderung der Geruchsbelastung zu erwarten.

In vielen Fällen können die Potenziale 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 Potenzial der Energiegewinnung aus Energiepflanzen optimal ausnutzen zu können, müssen die Gäreigenschaften der Pflanzen und die optimalen Prozessparameter bekannt sein. Mais hat von allen Energiepflanzen die größte Bedeutung im Anbau und im Biomasseertrag. Es muss herausgefunden werden, welches Reifestadium und welche Konservierungsform von Mais hohe Gasausbeuten und einen sicheren Anlagenbetrieb ermöglicht.

1.2. Rahmenbedingungen der Biogaserzeugung

Der energetischen Nutzung erneuerbarer Energien kommt weltweit eine wachsende Bedeutung zu. Ressourcen an fossilen Energieträgern werden knapper und Umweltbelastungen durch die Energieerzeugung müssen reduziert werden. Es ist deshalb erforderlich, neue Produktionsalternativen durch bedarfsgerechte Bereitstellung von Biomasse zu erschließen. Energietechnik und Energiepolitik sind angewiesen, eine Umgestaltung der Energieversorgung zu forcieren, indem einerseits der Einsatz fossiler Primärenergie reduziert und andererseits eine erhöhte Effizienz und eine wachsende Erschließung erneuerbarer Energiequellen angestrebt werden (SCHURNBERGER 2001). Die Europäische Union setzt zunehmend Zeichen, um die Nutzung erneuerbarer Energien in der Gemeinschaft zu intensivieren.

In Umsetzung der EU-Elektrizitätsbinnenmarkt-Richtlinie vom 19. Februar 1997 zur Liberalisierung des Strommarktes in den Mitgliedstaaten trat am 19. Februar 1999 das Elektrizitätswirtschafts- und -organisationsgesetz (EIWOG) in Österreich in Kraft. Die Förderung erneuerbarer Energie und die schrittweise Liberalisierung sind die Hauptzwecke des neuen EIWOG. Das EIWOG schreibt vor, daß bis zum Jahr 2007 4% des Stromaufkommens aus erneuerbaren Energiequellen (Biomasse, Bio-, Klär-, und Deponiegas, Wind, Sonne) stammen müssen.

Nach der neuen Richtlinie 2001/77/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 27. September 2001 zur Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen im Elektrizitätsbinnenmarkt ist die Steigerung des Anteils erneuerbarer Energieträger an der Stromerzeugung im Elektrizitätsbinnenmarkt zu fördern. Die einzelnen Ziele der Richtlinie sind:

Erneuerbare Energiequellen prioritär zu fördern, da deren Nutzung zum Umweltschutz und zur nachhaltigen Entwicklung beiträgt
Die Zielvorhaben von Kyoto rascher zu erreichen
Eine Sicherung und Diversifizierung der Energieversorgung zu erreichen
Beschäftigungsmöglichkeiten auf lokaler Ebene zu fördern
Zur Versorgungssicherheit beizutragen

Die Mitgliedstaaten werden verpflichtet, nationale Richtziele für den Verbrauch von Strom aus erneuerbaren Energieträgern festzulegen und einen Rechtsrahmen für den Markt erneuerbarer Energiequellen zu schaffen. Um diesen Forderungen Stand halten zu können, ist es notwendig, Forschung, Entwicklung und Umsetzung neuer Technologien im Bereich erneuerbarer Energieträger zu intensivieren und effiziente Wege zum Einsatz regenerativer Energiequellen zu finden.

In Berichten des ACCC und des IPCC werden die Notwendigkeit des Klimaschutzes und der Senkung von Emissionen klimarelevanter Spurengase betont. Durch die Unterzeichnung des Kyoto-Vertrages hat sich Österreich völkerrechtlich verpflichtet, die CO₂-Emissionen bis zum Jahr 2008–2012 um 13% zu senken. Der europäische und österreichische Biomasseverband sowie das „Weißbuch der EU“ über erneuerbare Energieträger weisen auf die vielschichtigen praktischen, ökologischen und sozioökonomischen Auswirkungen der dezentralen landwirtschaftlichen Biogaserzeugung und auf die Notwendigkeit von Maßnahmen für deren Förderung, Entwicklung und weiteren Umsetzung hin. In der „Puchberger Erklärung“ zur

Zukunft der Bioenergie fordern die Teilnehmer des 9. Österreichischen Biomassetages in Puchberg am Schneeberg eine stärkere Entwicklung der Biogaserzeugung (KOPETZ 2000).

In der Würzburg Charta, die im Jahr 1998 im Rahmen der 10. Internationalen Tagung „Biomass für Energy and Industry“ in Würzburg erstellt und von europäischen Parlamentsmitgliedern unterzeichnet wurde, wird von der EU Kommission und von den Mitgliedsländern die verstärkte Förderung der Biomassetechnologie gefordert. Das Ziel ist die Substitution von 8,5 % des Primärenergieverbrauches durch Biomasseenergie.

2. Stand des Wissens

2.1. Methanbildungspotenzial 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 wurden bislang zur Biogaserzeugung genutzt (NORDBERG 1996, BORJESSON 1998, KAPARAJU ET AL. 2001, BASERGA & EGGER 1998, CHYNOWETH ET AL. 1993, LINKE ET AL. 1999, POUECH ET AL. 1998A/B, AMON ET AL. 2002, Tabelle 1).

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. $0,15 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 (\text{kg oTS})^{-1}$. Die Untersuchungen wurden in Batchfermentern mit einer Größe von einem bis 30 m^3 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 ($p_0 = 1,0133 \text{ bar}$, $t_0 = 0^\circ\text{C}$) beziehen oder nicht.

KAPARAJU ET AL. (2001) untersuchten die Cofermentation 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 $0,35 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 (\text{kg oTS})^{-1}$ bei Grasheu und $0,26 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 (\text{kg oTS})^{-1}$ bei Hafer. Klee im vegetativen Wachstumsstadium zeigte eine spezifische Methanausbeute von $0,21 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 (\text{kg oTS})^{-1}$. Im Wachstumsstadium der Blüte hatte der Klee lediglich noch einen spezifischen Methanertrag von $0,14 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 (\text{kg oTS})^{-1}$. Das Wachstumsstadium der 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, Futtorsorghum, Korn sorghum und Zuckersorghum verwendet. Bei drei Pflanzenarten Weizen, Klee und Weidelgras wurde die Methanproduktion bei unterschiedlichem 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 $0,397 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 (\text{kg oTS})^{-1}$. 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 Methanbildungsvermögen bestimmenden Nährstoffen wie dem Fett- oder Kohlenhydratgehalt der Pflanzen.

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

Tabelle 1. Methanertrag von Wirtschaftsdüngern und organischen Reststoffen nach Literaturangaben.

Stoffgruppe	Methanertrag [l CH ₄ /kg oTS]	Quelle
Getreide/Ausputz	282	BASERGA & EGGER 1998
	152 – 184	POUECH ET AL. 1998a
Gras	342 – 420	CHYNOWETH ET AL. 1993, TONG ET AL. 1990, WEILAND 1998
	281 ¹⁾	POUECH ET AL. 1998b
Schweineflüssigmist 40%, Klee 40%, Bioabfall 20%	312 ¹⁾	POUECH ET AL. 1998b
Bioabfall 20%, Schweineflüssigmist 40%, Weizen 40%		
Futterrüben	500 – 1050	SEDLMEIER 2000
Extensogras	500 – 600 ¹⁾	WELLINGER 2000
Wiesengras	600 – 700 ¹⁾	WELLINGER 2000

¹⁾ Liter Biogas/kg oTS

Die Biogasausbeute von zur Verfügung stehenden Energiepflanzenarten und -sorten bei der Cofermentation mit Wirtschaftsdüngern von Rindern und Schweinen ist noch nicht optimiert worden. Angaben zu den wichtigen Inhaltsstoffen (Rohfaser, Zellulose, Hemizellulose, Rohfett, Rohprotein, NH₄), die den Verlauf der Methangärung prägen, sind nur vereinzelt zu finden. Die Untersuchungen wurden unter verschiedenen methodischen Rahmenbedingungen durchgeführt, meist als Batchversuche im Labormaßstab, aber auch unter praktischen Bedingungen mit unterschiedlichen technischen Systemen. Sie sind deswegen nur eingeschränkt vergleichbar und insgesamt nicht ohne weiteres auf praktische Verhältnisse übertragbar.

Versuchsergebnisse sind nur vergleichbar, wenn der Methanertrag im Normzustand (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.

Die Bakterien der Methangärung sind nicht in der Lage, Rohfaser in nennenswertem Umfang abzubauen. Der Rohfasergehalt ist wesentlich vom Reifestadium bzw. vom Erntezeitpunkt der Energiepflanzen abhängig. Sorteneinflüsse können ebenfalls eine Rolle spielen. Die tatsächliche Abbaubarkeit der organischen Substanz und das Methanbildungsvermögen werden außerdem maßgeblich von der jeweils vorherrschenden Bakterienpopulation im Gärbehälter bestimmt, die sich substrat- und temperaturspezifisch einstellt (SCHNÜRER ET AL. 1999).

Eigene Untersuchungen zum Methanbildungspotenzial 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 wesentlich 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. 2002).

2.2. Einfluß der Konservierung auf das Methanbildungspotenzial von 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 die Konservierung als 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 Wiesen gras 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 Biogaspotenziale bei der Vergärung von Wiesen gras. 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

3.1 Bedarfsgerechte Versorgung der Biogasanlagen mit Nährstoffen

Erforderlich sind die gezielte und bedarfsgerechte Versorgung von Biogasanlagen mit Nährstoffen, eine kalkulierbar hohe Methanausbeute aus der Biomasse und die Berechnung der Leistung von Biogasanlagen in Abhängigkeit der verfügbaren Gärgüter. 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 (Tab. 2). Erforderlich sind Gärtests, die eine prinzipielle Aussage und verlässliche Daten über die Methanausbeute von Energiepflanzen, die Abbaubarkeit der organischen Substanz, den Gärverlauf und über eventuell auftretende Störungen des Abbauprozesses erlauben.

Der Biogaserzeugung aus Mais kommt in naher Zukunft eine zentrale Bedeutung zu. Sie bietet aus innerbetrieblicher Sicht und auch im Hinblick auf die Erfordernisse des Klimaschutzes und der Ressourcenschonung große Vorteile. Die Bereitstellung des Maises 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. 2001).

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 Energiepflanzen.

BUSWELL (1936) und BOYLE (1977) haben eine Formel entwickelt, mit der die Gaszusammensetzung (CH_4 , CO_2 , H_2S und NH_3) aus der chemischen Grundstruktur der Biomasse Kohlenstoff, Wasserstoff, 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 zeigten, nehmen bei der Cofermentation von Sudangras mit Rinder-

festmist die spezifische Methanausbeute und der Wirkungsgrad der anaerob umsetzbaren Energie mit zunehmendem Ligningehalt im Gärgut ab (AMON ET AL. 2002).

Die Anwendung der „Busswellformel“ 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. Bislang liegen kaum Untersuchungen zum Nährstoffbedarf anaerober Mikroorganismen für die Methangärung von Energiepflanzen und Wirtschaftsdünger vor. Für eine bedarfsgerechte Ernährung der Mikroorganismen mit Nährstoffen müssen Grundlagen zur Entwicklung von Nährstoffbedarfsnormen erstellt werden.

Tabelle 2: In der Literatur bisher vorliegende Daten zum Gärverhalten von Energiepflanzen.
k.A. = keine Angabe.

Energiepflanze	Biogasertrag [l (kg oTS) ⁻¹]	Methanertrag [l (kg oTS) ⁻¹]	Methode	Quelle
Alfalfa		340	Batch-Versuch	POUECH ET AL. 1989a
Alfalfa-Silage		240*	Batch-Versuch	ZAUNER UND KÜNTZEL 1986
Alfalfa-Silage		181-209*	Laborflusdigestor	ZAUNER UND KÜNTZEL 1986
Extensogras	500-600		Biogasanlage	KRAMPL 2000
Futtergras	600-700		Biogasanlage	KRAMPL 2000
Futterroggen-Grüingut		431	Berechnung	LINKE ET AL. 1999
Futerrüben		411-430	Berechnung	LINKE ET AL. 1999
Futerrüben	750		Biogasanlage	SEDLMEIER 2000
Futerrüben	900		k.A.	KTBL 1996
Getreide Ganzpflanzen	780		k.A.	KTBL 1996
Getreidestroh	250-350		k.A.	BASERGA 2000
Grasmischung-Silage		199-244*	Laborflusdigestor	ZAUNER UND KÜNTZEL 1986
Grasmischung-Silage		298-315*	Batch-Versuch	ZAUNER UND KÜNTZEL 1986
Grassilage	500-600		k.A.	BASERGA 2000
Gras-Welksilage		433	Berechnung	LINKE ET AL. 1999
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-Grüingut		432	Berechnung	LINKE ET AL. 1999
Mais		397	Batch-Versuch	POUECH ET AL. 1989a
Maissilage		181-184*	Laborflusdigestor	ZAUNER UND KÜNTZEL 1986
Maissilage		270-289*	Batch-Versuch	ZAUNER UND KÜNTZEL 1986
Maissilage	800		k.A.	KTBL 1996
Maisstroh	500		k.A.	BASERGA 2000

Energiepflanze	Biogasertrag [l (kg oTS) ⁻¹]	Methanertrag [l (kg oTS) ⁻¹]	Methode	Quelle
Parthenium		152±15	Batch-Versuch	GUNASEELAN 1995
Pferdebohnen-Silage		356*	Batch-Versuch	ZAUNER UND KÜNTZEL 1986
Pferdebohnen-Silage		226*	Laborflusdigestor	ZAUNER UND 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 UND KÜNTZEL 1986
Wintergerste		420	Berechnung	LINKE ET AL. 1999
Winterroggen		419	Berechnung	LINKE ET AL. 1999
Zuckerrübenblattsilage		294*	Batch-Versuch	ZAUNER UND KÜNTZEL 1986
Zuckerrübenblattsilage		174*	Laborflusdigestor	ZAUNER UND KÜNTZEL 1986

* l (kg TS)⁻¹

3.2 Anforderungen an den Versuchsaufbau

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. 2001, 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 lang dauert und dabei alle wesentlichen Einflußparameter konstant gehalten werden. Dies würde einen hohen Versuchsaufwand erfordern.

Voraussetzung für genaue, reproduzierbare und vergleichbare Versuchsergebnisse über den Stoffwechsel der Methangärung sind konstante, kontrollierbare, und genormte Versuchsbedingungen. Sie können im Labor gut hergestellt werden. Gleichzeitig kann der Versuchsaufwand in begrenztem Rahmen gehalten werden. Die Übertragbarkeit von Ergebnissen des Stoffwechselversuches im Labor in die Praxis kann durch vergleichende Praxisversuche überprüft werden.

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. Einflussparameter der Gärbiologie und der Substrate sind vielfältig. Zu deren Quantifizierung ist ein entsprechend umfangreiches Versuchsdesign erforderlich. Zeit-, Personal- und Sachaufwendungen sollen aber trotzdem im vertretbarem Rahmen bleiben. Diskontinuierliche Gärtests ermöglichen eine weitgehend vollständige Vergärung des anaerob abbaubaren Anteils biogener Stoffe (LANGHANS 2002, MERRETING-BRUNS & KABASCI 2002, BECKER & HAMS 2002).

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. Die Untersuchung des Gärverhaltens und des Energiestoffwechsels sind bei umfangreich angelegtem Versuchsdesign mit vertretbarem Versuchsaufwand möglich. Die Wirkung der Vielzahl an Energiepflanzenarten, deren Nährstoffzusammensetzung, die Konservierungsform der Gärgüter und gärbiologische Faktoren 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.

4. Ziele

Es werden die gärtechnischen Eigenschaften und die Methanproduktivität von Mais der Sorten PR39G12, Sandrina, Clarica, Monalisa und Ribera untersucht.

Der Einfluss des Erntezeitpunktes und der Konservierung (Silage, Frischpflanzen) auf das Methanbildungspotenzial wird bestimmt.

Die Untersuchungen werden mit Inoculum von neuen ÖKL-Biogasanlagen durchgeführt, die Wirtschaftsdünger und Energiepflanzen im praxisüblichen Temperaturbereich von 37 °C vergären.

Die optimale substratspezifische hydraulische Verweilzeit von Silomais wird bestimmt. Sie gewährleistet, dass die im Substrat enthaltene Energie optimal in Methanenergie im Biogas umgewandelt und gleichzeitig der Bauaufwand durch eine optimale Grösse des/der Gärbehälters optimiert wird.

Auf der Basis der durchgeführten Stoff- und Energiewechselmessungen zur Methangärung verschiedener Silomaisorten werden Sortenempfehlungen abgeleitet. Das Ziel ist, den Methanhektarertrag von Silomais bei gegebenen Standort- und Ertragslagen zu optimieren.

Für Mais und Sonnenblumen wird die Entwicklung eines neuen Systems, dem „Methanenergiesystem“ (MEWS), zur Bestimmung des Methanbildungspotenzials dieser Pflanzenarten und Sorten auf der Basis der Inhaltsstoffe der Pflanzen (Rohnährstoffe) und Messungen des anaeroben Stoffwechsels der Gärung vorgeschlagen.

5. Material und Methoden

5.1 Anbau, Ernte und Probengewinnung von Mais

Standortbeschreibung der Versuchswirtschaft der Universität für Bodenkultur in Gross-Enzersdorf (NÖ)

Der Standort an dem die Silomaisarten angebaut wurden, befindet sich im Marchfeld, ca. 5 km östlich von Wien. Die dort herrschenden Klima- und Bodenverhältnisse sind für das pannonische Produktionsgebiet repräsentativ (STORCHSCHNABEL 1974).

Die Versuchswirtschaft der Universität für Bodenkultur liegt im pannonischen Klimagebiet, im Kleinproduktionsgebiet Marchfeld. Die Felder liegen in offener, windiger Lage 156 m über dem Meeresniveau. Das Klima ist besonders im Sommer durch geringe Luftfeuchtigkeit und wenig Taubildung gekennzeichnet. Der Klimaraum ist durch heiße, trockene Sommer und kalte, schneearme Winter geprägt. Die mittlere Jahrestemperatur (1960 – 2000) beträgt 9,8 °C, die mittlere Niederschlagssumme 547 mm und die durchschnittliche relative Luftfeuchte 75 %.

Die Vegetationsperiode von Mai bis September 2001 lässt sich durch einen sehr niederschlagsreichen Juli (93 mm) und September (115 mm) charakterisieren während es im Mai nur durchschnittlich 19 mm regnet. Die durchschnittliche Monatstemperatur in Mai beträgt 17,8 °C (vergleichbar mit dem Jahr 2000). Die Temperatur in den Monaten Juni bis September waren niedriger als im Jahr zuvor. Der relativ trockene Mai hat die Jugendentwicklung des Mais verzögert. Die relativ gute Wasserversorgung in den Monaten Juli bis August hat sich positiv in der Biomasseproduktion niedergeschlagen.

Bodenbedingungen

Der Boden ist tiefgründig, mittelschwer und besteht aus schluffigem Lehm, wobei der Schluffgehalt im Unterboden stark zunimmt. Aufgrund des hohen Schluffanteils neigt der Boden sehr leicht zur Verschlammung.

Es handelt sich um einen Tschernosem der Praterterrasse. Der Ap-Horizont reicht von 0 – 25 cm und hat eine graubraune Farbe. Der Oberboden ist humos und stark lehmig. Der Humusgehalt in der 0 – 25 cm starken Krume beträgt nach der Methode Walkey–Armstrong 1,2 % bis 3,8 %. Im Unterboden schwankt er zwischen 1,8 % und 2,2 %.

Die Versuchspartellen für den Anbau der Maisarten befanden sich in der Nähe von Raasdorf. Die Langpartellen waren 3 m breit und 50 m lang, wodurch eine praxisübliche Feldbestellung mit einer Einzelkornsämaschine (Mais) gewährleistet war.

5.2 Anbautechnik und Kulturführung

5.2.1 Feldbestellung - Mais

Im Vorjahr wurde auf den Versuchspartellen Triticale angebaut. Nach der Grundbodenbearbeitung im Herbst und der Sekundärbodenbearbeitung im Frühjahr wurden am 26. April 2001 die Maissorten in Einzelkornsäat ausgesät. Aus dem Reihenabstand von 75 cm und dem Abstand in der Reihe von 15,7 cm ergab sich eine Kornzahl von 85.000/ha. Folgende sieben Maissorten wurden angebaut (Tab. 3):

Tabelle 3: Angebaute Maissorten am Standort Raasdorf (Versuchswirtschaft der Universität für Bodenkultur in Gross-Enzersdorf)

<i>Sorte</i>	<i>Kornotyp</i> ^{*)}	<i>FAO-Reifezahl</i>
PR39G12	H	240
Sandrina	Z	ca. 270
Benicia	Hz	300
Clarica	Z	310
Monalisa	Z	360
Suarta	Z	380
Ribera	Z	390

*) H: Hartmais, Z: Zahnmais

Die Auswahl der Maissorten erfolgte so, daß das Spektrum bedeutungsvoller früh-, mittel und spätreifer Sorten vertreten war.

5.2.2 Düngungs- und Pflanzenschutzmassnahmen

Am 3. Mai 2001 wurden 179 kg N/ha Harnstoff appliziert. Gegen zweikeimblättrige Unkräuter wurden am 30. Mai 2001 Herbizide (Banvel, Titus und Neowett) gespritzt.

5.2.3 Ernte

An drei Ernteterminen wurden repräsentative Pflanzen händisch mit der Sichel geerntet. Tabelle 4 zeigt die Erntetage, das Wachstumsstadium sowie das Reifestadium der Maispflanzen zum Erntezeitpunkt. Die Ernte wurde für alle Sorten an jeweils drei Zeitpunkten durchgeführt.

Tabelle 4: Erntezeiten, Wachstumstage und Reifestadium (Mais)

<i>Datum der Ernte</i>	<i>Wuchstage</i>	<i>Reifestadium (Mais)</i>
21. August 2001	118	Teigreife/Ende Teigreife
3. September 2001	131	Ende Teigreife/Beginn physiologische Reife
19. September 2001	147	Physiologische Reife

5.2.4 Probenaufbereitung für die Silierung

Die frisch geernteten Pflanzen wurden in einem Axialhäcksler zerkleinert. Um einen hohen Zerkleinerungsgrad zu erreichen, wurde das gehäckselte Material nochmals durch einen Radialhäcksler geführt. Anschließend wurde das Material gut durchgemischt und in 2-Liter Plastikbehälter eingefüllt. Auf eine gute Verdichtung wurde großer Wert gelegt. Diese Form der Silagebereitung wurde für jede Sorte und zu jedem Erntezeitpunkt durchgeführt. Insgesamt wurden von drei Versuchsvarianten 9 Silagen erzeugt. Die Varianten wurden dann im Eudiometer auf ihre spezifischen Gasbildungen untersucht.

5.3. Gewinnung des Impfmateriails

Als Impfmateriale wurde aktives Gärgut aus der Biogasanlage von Herrn Dipl.-Ing. Hermann Jöchtl 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 Rinder GVE zusammen. Die Betriebsparameter der Biogasanlage sind in Tabelle 5 angeführt. Die Biogasanlage ist seit Dezember 2000 in Betrieb.

Das Impfmateriale wurde durch ein 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 mit temperiertem Wasser (40 °C) versehenen Transportbehälter gestellt und auf diese Weise bei konstanter Temperatur ins Labor gebracht.

Tabelle 5: Betriebsparameter der Biogasanlage, von der das Impfmateriale für die Versuche gewonnen wurde.

Parameter	
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	502.056 kWh/a
Wärmeerzeugung	1.022.042 kWh/a

5.4. Bestimmung der Biogasproduktion unter Verwendung der Eudiometerapparatur

Die spezifische Methanproduktion von Mais wurde in Eudiometer-Messzellen unter kontrollierten Gärbedingungen gemessen. Die Untersuchung erfolgte nach DIN-Norm 38414. Im Anhang findet sich eine Abbildung 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 Ausgleichsgefäße. 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, wurden die leeren Gärgefäße mit Argon gefüllt und dann Impfmateriale und Probenmateriale in die anaeroben Gärgefäße eingewogen. Das Impfmateriale wurde zuvor homogenisiert, indem es durch eine gelochte 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 im Anhang). Im Verlauf der Gärung wurde der pH-Wert im Gärmedium kontrolliert und gegebenenfalls durch Zugabe von 2 N NaOH reguliert. Im Abstand von mehreren Tagen wurden Proben des gebildeten Biogases zur gaschromatographischen Analyse entnommen.

5.5. Versuchsansatz

Die Biogas- und Methanerträge der Maissorten PR 39G12 (FAO 240), Sandrina (FAO 270), Clarica (FAO 310), Monalisa (FAO 360) und Ribera (FAO 390) wurden für jeden Erntezeitpunkt aus den Silagen bestimmt. Außerdem wurden mit der Sorte Ribera ein Vergleich des Biogas- und Methanertrages von Grünpflanzen und Silage durchgeführt.

Aus der Fragestellung ergaben sich 16 Testvarianten, die im Parallelansatz untersucht wurden. Mit Hilfe von 6 Eudiometeranlagen konnten die 16 Varianten gleichzeitig eingesetzt werden. Tabelle 6 zeigt den Versuchsansatz mit den Einwaagen und den Gehalten an organischer Trockensubstanz in den einzelnen Varianten.

Tabelle 6: Versuchsansatz zur Bestimmung der Biogasbildung aus Silomais: Einwaagen und oTS-Gehalte der Pflanzen und des Impfmaterials. FM = Frischmasse, oTS = organische Trockensubstanz (% TS).

<i>Variante</i>	<i>Maissilage</i>		<i>Impfmateriäl</i>		<i>Mischung</i> [% oTS i. d. FM]
	Einwaage [g]	[% oTS i. d. FM]	Einwaage [g]	[% oTS i. d. FM]	
PR 39G12, 1.Ernte	40	33,75	360	4,82	7,71
PR 39G12, 2.Ernte	40	45,94	391	4,82	7,76
PR 39G12, 3.Ernte	25	52,45	390	4,82	7,69
Sandrina, 1. Ernte	40	29,41	360	4,82	7,28
Sandrina, 2. Ernte	30	44,67	390	4,82	7,67
Sandrina, 3. Ernte	35	39,43	381	4,82	7,74
Clarica, 1. Ernte	40	32,91	360	4,82	7,63
Clarica, 2. Ernte	32	42,20	380	4,82	7,54
Clarica, 3. Ernte	28	46,50	395	4,82	7,61
Monalisa, 1. Ernte	40	30,75	360	4,82	7,41
Monalisa, 2. Ernte	30	43,04	390	4,82	7,55
Monalisa, 3. Ernte	30	42,75	390	4,82	7,53
Ribera, 1. Ernte	40	30,87	360	4,82	7,43
Ribera, 2. Ernte	30	45,60	390	4,82	7,73
Ribera, 3. Ernte	35	38,84	365	4,82	7,80
Ribera, 1. Ernte frisch	40	30,54	360	4,82	7,39

5.6. Berechnung des kumulierten, spezifischen Biogasertrages

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 7 dargestellt. Bei der Berechnung der Gaserträge wurden die Temperaturverhältnisse in der Umgebungsluft sowie im wärmegeämmten Bereich über dem Wasserbad berücksichtigt.

Tabelle 7: 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:

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

V_0 Gasnormvolumen in ml

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 bzw. des umgebenden Raumes zur Zeit der aktuellen Ablesung in K

T_{alt}Temperatur des Biogases bzw. des umgebenden Raumes zur Zeit der letzten Ablesung in K

5.6.3. Gasproduktion des Impfmaterials

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 aus dem Impfmateriale gebildet wurde, in ml

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

m_MMasse des in der Mischung benutzten Impfmaterials in g

m_IMasse des in der Impfmateriale-Zelle benutzten Impfmaterials in g

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

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

V_{korr}korrigiertes Gasnormvolumen in ml

V_0Gasnormvolumen in ml

V_XGasnormvolumen, das aus dem Impfmateriale gebildet wurde, in ml

5.6.4. Spezifische Biogasproduktion

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

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

V_Sspezifische Biogasproduktion in $\text{Nl} \cdot \text{kg oTS}$

V_{korr}korrigiertes Gasnormvolumen in Nml

mMasse der eingewogenen Probe in g

TSTrockensubstanzfaktor der Probe in %

oTSorganische Trockensubstanz der Probe in %TS

5.6.5. Kumulierte 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. 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 von 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 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.

5.8. Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung der Messwerte zum Methangehalt im Biogas erfolgte mit Hilfe eines einfaktoriellen Mittelwertvergleiches (Scheffé-Test; Prozedur ANOVA) mit dem Statistikprogramm SPSS, Version 9. Unterschiede in den spezifischen Methanausbeuten zwischen den untersuchten Varianten (frisch/siliert, Erntezeitpunkte, Sorten) wurden mittels einer Regressionsanalyse ermittelt. Der zeitliche Verlauf der spezifischen Methanausbeute wurde mittels einer Kurvenanpassung (logarithmisches Modell) beschrieben. Unterschiede zwischen den Regressionsfunktionen wurden mit Hilfe des Konfidenzintervalles der Regressionskoeffizienten ($p < 0,05$) analysiert. Die Güte der Regressionsmodelle wurde mit dem Regressionskoeffizienten „r“ und dem Bestimmtheitsmaß „r²“ angegeben. Die Normalverteilung der Residuen wurde grafisch geprüft. Die Residuen wurden mit dem Durbin-Watson-Test auf Autokorrelation getestet.

6. Ergebnisse und Diskussion

6.1 Biomasseertrag

In Abbildung 1 sind die Frischmasseerträge der Maissorten der jeweiligen Erntezeitpunkte dargestellt. Zusätzlich sind die Wuchstage zu jedem Erntezeitpunkt angegeben.

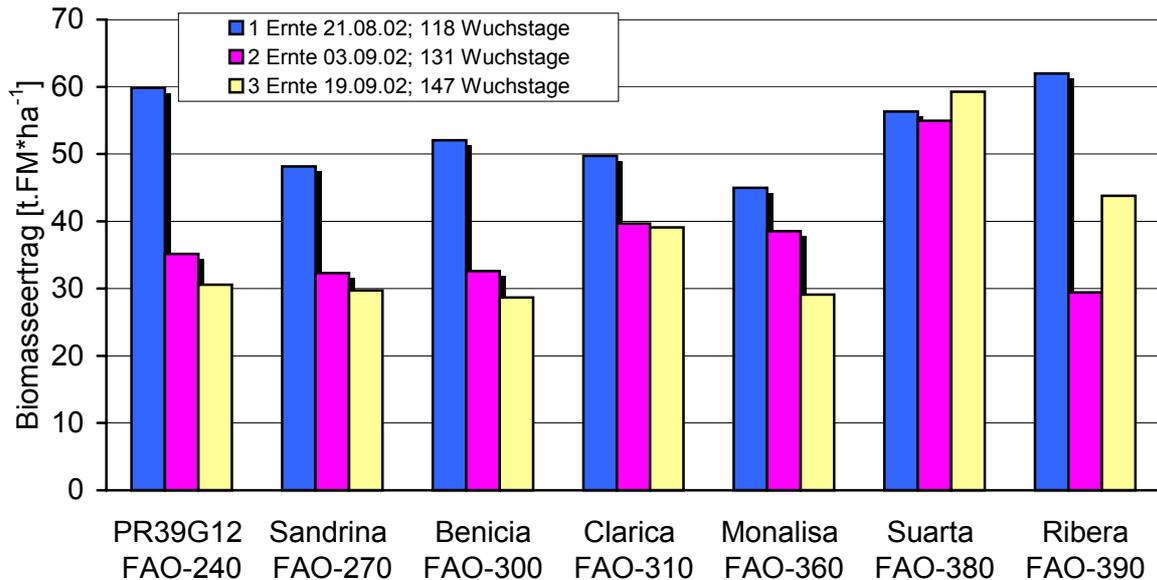


Abbildung 1: Frischmasseerträge der Maissorten mit fortschreitender Vegetationsentwicklung

Mit fortschreitender Vegetationsentwicklung nahmen die Frischmasseerträge der Maissorten vom 21. August bis 19. September 2001 ab. Eine Ausnahme stellte die Sorte „Suarta“ dar. Hier blieb der Frischmasseertrag mit zunehmender Vegetationsentwicklung nahezu konstant.

Beim jeweiligen Gehalt an organischer Trockensubstanz der Pflanzen (Tab. 6) ergeben sich die in Abbildung 2 dargestellten oTS-Hektarerträge an organischer Trockensubstanz der Maissorten.

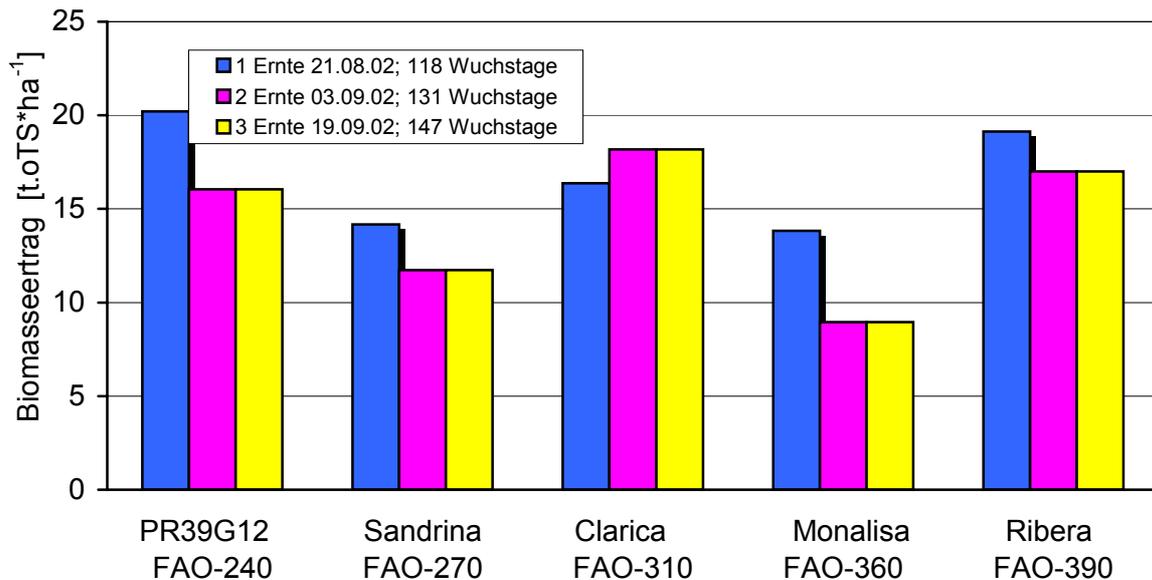


Abbildung 2: oTS –Hektarerträge der Maissorten mit fortschreitender Vegetationsentwicklung

Wie die Abbildung 2 zeigt, lag die Biomasseproduktivität der Sorten, mit denen die Stoffwechselfersuche zur anaeroben Gärung durchgeführt wurden, zwischen 10 und 20 t oTS pro ha. Fortschreitendes Vegetationsstadium hatte in der Regel die Verringerung des oTS Biomasseertrages zur Folge. Der Standort Gross-Enzersdorf — ein typischer Standort für das pannonische Trockengebiet — stellt keine Gunstlage für den Maisanbau dar.

Nachfolgend werden das Gärverhalten als gemessene, kumulierte spezifische Biogasausbeuten der fünf Sorten PR 39G12 (FAO 240), Sandrina (FAO 270), Clarica (FAO 310), Monalisa (FAO 360) und Ribera (FAO 390) und der Verlauf des pH-Wertes während der Gärung dargestellt. Anschließend wird der Methangehalt im Biogas aufgezeigt. Zuletzt ist die Abhängigkeit der spezifischen Methanausbeute vom Vegetationsstadium der Maissorten aufgeführt.

6.2 Kumulierte spezifische Biogasausbeute

In Abbildung 3 sind die kumulierten Biogasausbeuten der Sorte PR 39G12 im Verlauf der Vegetationsentwicklung aus der Biomasse des ersten Erntezeitpunktes (21. August), des zweiten Erntezeitpunktes (03. September) und des dritten Erntezeitpunktes (19. September) aufgezeigt. Ebenfalls dargestellt ist der Verlauf des pH-Wertes im Gärgut während der Gärung. Der pH-Wert im Gärgut lag zu Beginn der Gärung bei pH 7,1. Vom dritten bis ca. zum zehnten Gärtag erhöhte sich der pH-Wert auf pH 7,9. Im weiteren Verlauf der Gärung blieb dieser Wert konstant.

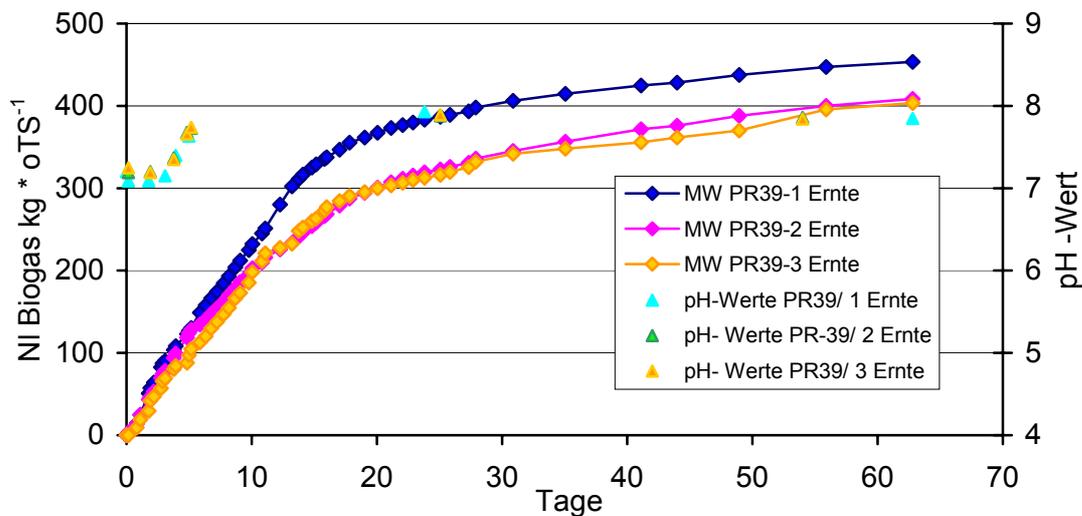


Abbildung 3: Verlauf der kumulierten spezifischen Biogasausbeute aus Silomaissilage der Sorte PR39G12 (FAO 240) und Verlauf des pH-Wertes während der Gärung.

Nach 63 Gärtagen wurde aus der Biomasse des ersten Erntezeitpunktes 454 N l Biogas pro kg oTS gebildet. Demgegenüber lag die Biogasausbeute aus der Biomasse des zweiten und dritten Erntezeitpunktes nach 63 Gärtagen bei 408 N l Biogas pro kg oTS. Mit fortschreitender Vegetationsentwicklung wurde um ca. 50 N l Biogas pro kg oTS weniger Biogas gebildet.

Die Entwicklung der spezifischen Biogasausbeute der silierten Ganzpflanzenbiomasse des ersten und zweiten Erntezeitpunktes der Sorte Sandrina (FAO 270) zeigte nach 63 Gärtagen 535 N l Biogas pro kg oTS. Die Biomasse des dritten Schnittes erreichte im Gärzeitraum eine spezifische Biogasausbeute von 467 N l Biogas pro kg oTS (Abb. 4).

In den Gärgütern sank der pH –Wert unmittelbar nach Beginn der Gärung von pH 7,7 auf pH 7,0. Bedingt durch intensive Abbauprozesse, im Zuge derer Säuren gebildet werden, war der pH-Wert des Gärgutes bei allen Varianten zu Beginn der Methangärung instabil, d.h. es kam zu einer schnellen Absenkungen im pH-Wert um 0,7 bis 1,0 pH Einheiten innerhalb von zwei Tagen. Die hemmende Wirkung der pH-Wert-Absenkung auf die methanogenen Bakterien konnte durch die Zugabe von 2 N NaOH verhindert werden. Ab etwa dem fünften bis siebenten Tag des Versuches war ein stabiler pH-Wert erreicht.

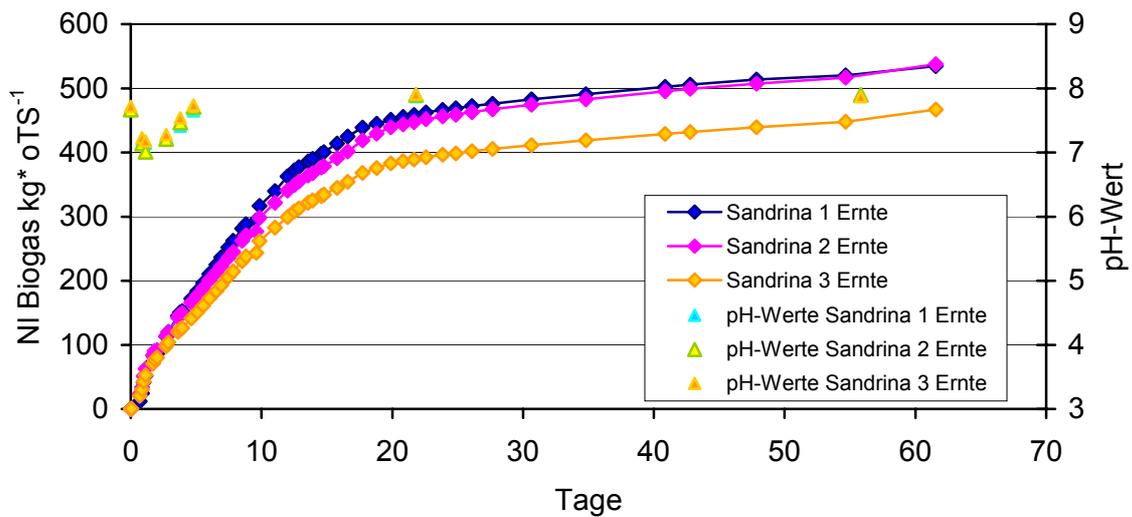


Abbildung 4: Verlauf der kumulierten spezifischen Biogausausbeute aus Silomaissilage der Sorte Sandrina (FAO 270) und Verlauf des pH-Wertes während der Gärung.

Die Biomasseerganzpflanzensilage der Sorte Clarica (FAO 310) zeigte für alle Erntezeitpunkte einen ähnlichen Verlauf mit gleicher Höhe der kumulierten spezifischen Biogausausbeute. Ein Einfluss der Vegetationsentwicklung auf die spezifische Biogausausbeute lag bei der gewählten Spreizung der Erntetermine nicht vor. Nach 63 Gärtagen war für die Biomasse aller Erntezeitpunkte Sorte Clarica ein mittlerer spezifischer Biogasertrag von 490 N l Biogas pro kg oTS erreicht. Ab dem siebten Gärtag war der pH-Wert stabil bei pH 7,8 bis pH 8,0 stabil (Abb. 5).

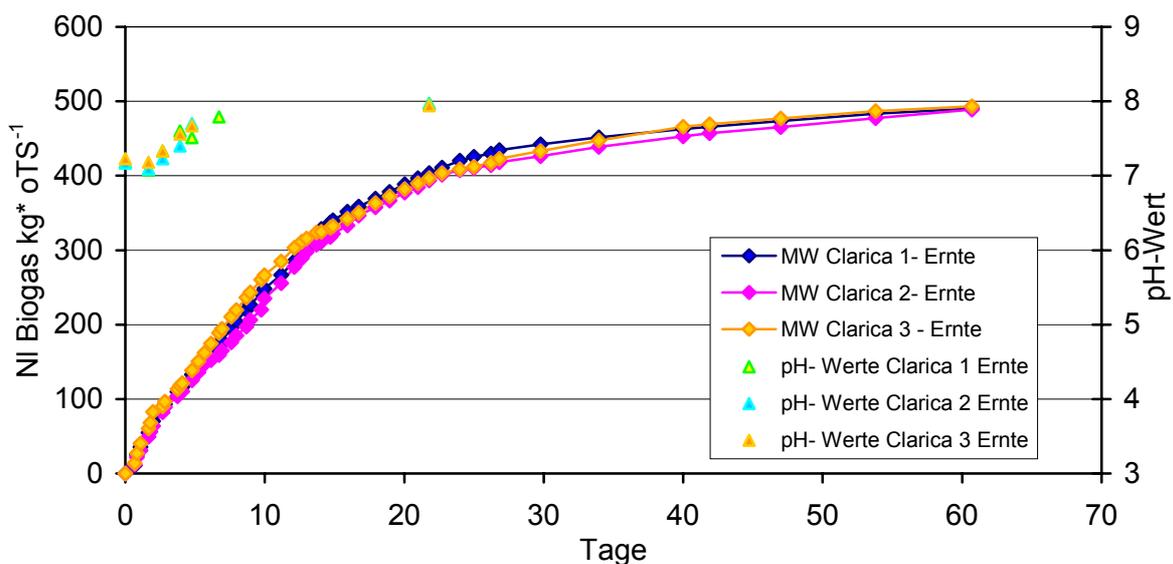


Abbildung 5: Verlauf der kumulierten spezifischen Biogausausbeute aus Silomaissilage der Sorte Clarica (FAO 310) und Verlauf des pH-Wertes während der Gärung.

Die Methangärung der silierten Ganzpflanzenbiomasse der Sorte Monalisa (FAO 360) zeigte nach 60 Gärtagen eine spezifische Biogasausbeute von 420 N l Biogas pro kg oTS für die Biomasse der ersten und zweite Ernte. Der spezifische Biogasertrag der silierten Biomasse der Ganzpflanzen des dritten Erntezeitpunktes war gegenüber denen der ersten beiden Erntezeitpunkte leicht verringert und erreichte 393 N l Biogas pro kg oTS. Nach Stabilisierung lag der pH-Wert ab dem zehnten Gärtag bei pH 7,9 (Abb. 6).

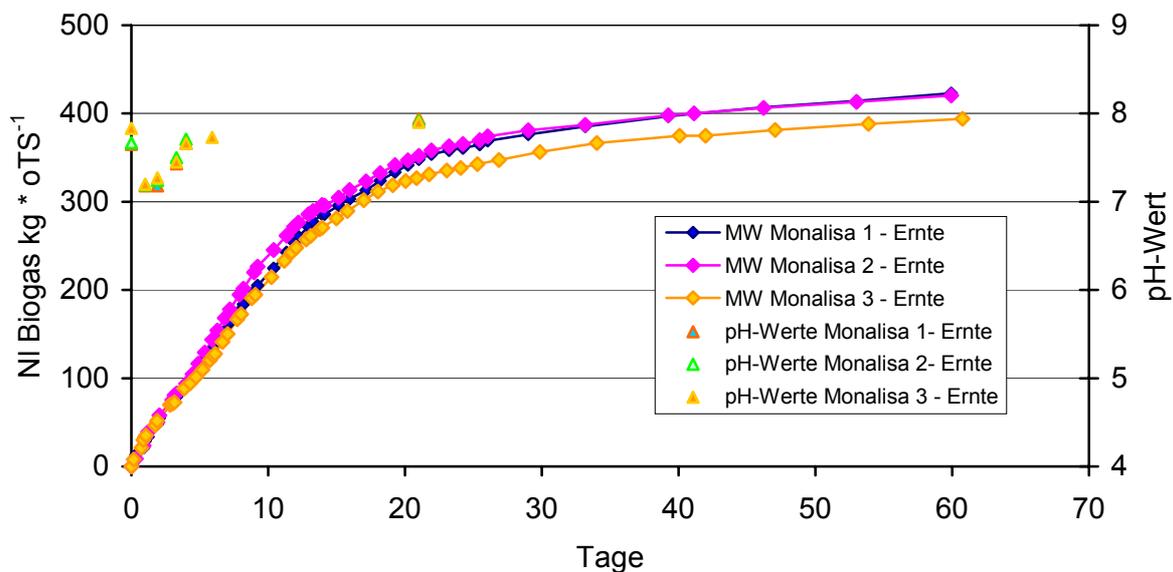


Abbildung 6: Verlauf der kumulierten spezifischen Biogasausbeute aus Silomaissilage der Sorte Monalisa (FAO 360) und Verlauf des pH-Wertes während der Gärung.

Der Verlauf der kumulierten Biogasausbeute aus den Ganzpflanzensilage der Sorte Ribera (FAO 390) des ersten Erntezeitpunktes zeigt 463 N l Biogas pro kg oTS für den zweiten, mittleren Erntezeitpunkt und eine geringere spezifische Biogasausbeute aus der Ganzpflanzensilage des ersten, frühen Erntezeitpunktes von 488 N l Biogas pro kg oTS. Die Biogasausbeute der Biomasse des dritten, späten Erntezeitpunktes erreichte 432 N l Biogas pro kg oTS. Im Vergleich zur Silage wurde aus der frischen, nicht silierten Biomasse der Ganzpflanzen der ersten Ernte 351 N l Biogas erzeugt. Die frische, nicht silierte Biomasse zeigte demnach eine um 110 N l Biogas pro kg oTS verringerte spezifische Biogasausbeute. Während der Gärung des Mais der Sorte Ribera stabilisierte sich der pH-Wert nach etwa 15 Gärtagen auf einen pH-Wert von 7,9 (Abb. 7).

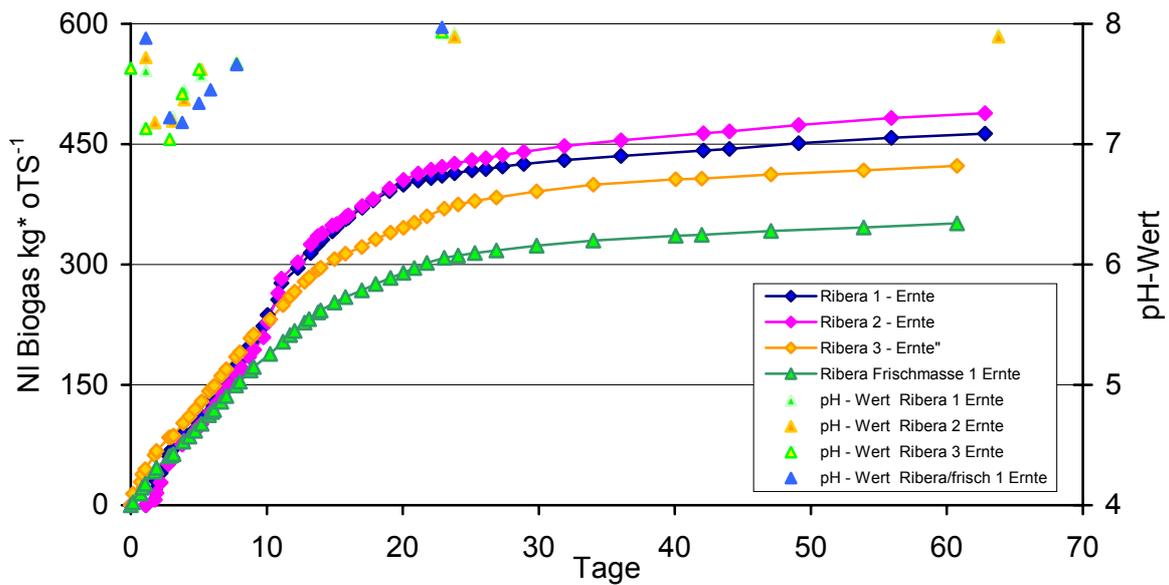


Abbildung 7: Verlauf der kumulierten spezifischen Biogasausbeute aus Silomaissilage und frischer Biomasse der Sorte Ribera (FAO 390) und Verlauf des pH-Wertes während der Gärung.

6.3 Methangehalt im Biogas

Der eigentliche Energieträger im Biogas ist das Methan. Für die Wirtschaftlichkeit der Biogaserzeugung ist daher der Methangehalt entscheidend. Der mittlere Methangehalt im Biogas der untersuchten Varianten bewegte sich zwischen 62,2 und 69,3 Vol. %. Es war kein signifikanter Unterschied im Methangehalt der einzelnen Varianten gegeben (Scheffé-Test) (Tab. 8).

Im Vergleich zu Literaturwerten sind diese Methangehalte als hoch einzustufen. ZAUNER UND KÜNTZEL (1986) erhielten bei der Vergärung von Grasmischungen Methangehalte von 53 bis 55 %. POUÉCH ET AL. (1998) geben Methangehalte von 63,9 % bei der Vergärung von Klee an. MÄHNERT ET AL. 2002 fanden bei der Vergärung ausgewählter Futtergräser einen Methangehalt von rund 68 %.

Tabelle 8: Mittlere Methangehalte im Biogas aus der Biomasse der untersuchten Maissorten und der Vegetationsstadien

<i>Variante</i>	<i>N</i>	<i>Methan [%]</i>	<i>Stabw.</i>
PR 39 1. Ernte	7	64,58	6,10
PR 39 2. Ernte	6	66,69	7,15
PR 39 3. Ernte	4	64,04	6,75
Sandrina 1. Ernte	3	69,29	5,69
Sandrina 2. Ernte	7	66,58	4,72
Sandrina 3. Ernte	6	63,29	9,41
Clarica 1. Ernte	5	67,74	5,65
Clarica 2. Ernte	5	65,96	6,78
Clarica 3. Ernte	5	67,98	5,05
Monalisa 1. Ernte	5	65,02	5,63
Monalisa 2. Ernte	5	67,83	7,03
Monalisa 3. Ernte	6	62,60	8,44
Ribera 1. Ernte	7	62,16	7,44
Ribera 2. Ernte	7	63,32	10,00
Ribera 3. Ernte	6	64,26	6,74
Ribera 1, Ernte frisch	8	64,18	6,26

6.4 Kumulierte spezifische Methanausbeute

6.4.1 Einfluss des Erntezeitpunktes und der Konservierung

Der Einfluss des Erntezeitpunktes und damit der Einfluss der Vegetationsentwicklung der Pflanzen auf ihr spezifisches Methanbildungsvermögen wird für jede Sorte einzeln dargestellt. Innerhalb jeder Sorte wird zusätzlich der zeitliche Verlauf des mittleren spezifischen Methanbildungsvermögens aus der Biomasse der drei Erntezeitpunkte einer Sorte mit Hilfe einer Regressionsanalyse (logarithmisches Modell) dargestellt. Die so ermittelte sortentypische Regressionsfunktion dient der Prüfung sortentypischer Unterschiede der kumulierten spezifischen Methanausbeuten. Eine Übersicht des Vergleiches des spezifischen Methanbildungsvermögens der Sorten ist in Tabelle 14 dargestellt.

Abbildung 8 bis 12 zeigen den Verlauf der kumulierten spezifischen Methanausbeuten bei der Vergärung der Ganzpflanzensilage der Maissorten PR 39G12 (FAO 240), Sandrina (FAO 270), Clarica (FAO 310), Monalisa (FAO 360) und Ribera (FAO 390). Das Methanbildungsvermögen wurde jeweils von siliierter Biomasse der ersten (frühen), zweiten (mittelfrühen) und dritten (späten) Ernte ermittelt. Weiterhin dargestellt ist die geschätzte Regressionsfunktion (y) der kumulierten spezifischen Methanausbeute mit dem Bestimmtheitsmaß der Funktion. Die Funktion (y) charakterisiert das Gärverhalten der Sorte. Sie dient auch für den Test auf Unterschiede der kumulierten spezifischen Methanausbeute aus der Biomasse der verschiedenen Erntezeitpunkte. Liegen statistisch gesicherte Unterschiede vor, so werden die Mess- und Funktionsverläufe mit verschiedenen Buchstaben gekennzeichnet (Abb. 8 bis 12). Unterschiede im Verlauf der kumulierten spezifischen Methanausbeute liegen vor, wenn die Vertrauensbereiche der Regressionskoeffizienten keine gemeinsamen Bereiche aufweisen.

Abbildung 8 zeigt den Verlauf des spezifische Methanbildungsvermögen von Silomais der Sorte PR 39G12 (FAO 240) mit der sortenspezifischen Regressionsfunktion und die Verläufe der kumulierten spezifischen Methanausbeuten der Biomassen der einzelnen Erntezeitpunkte.

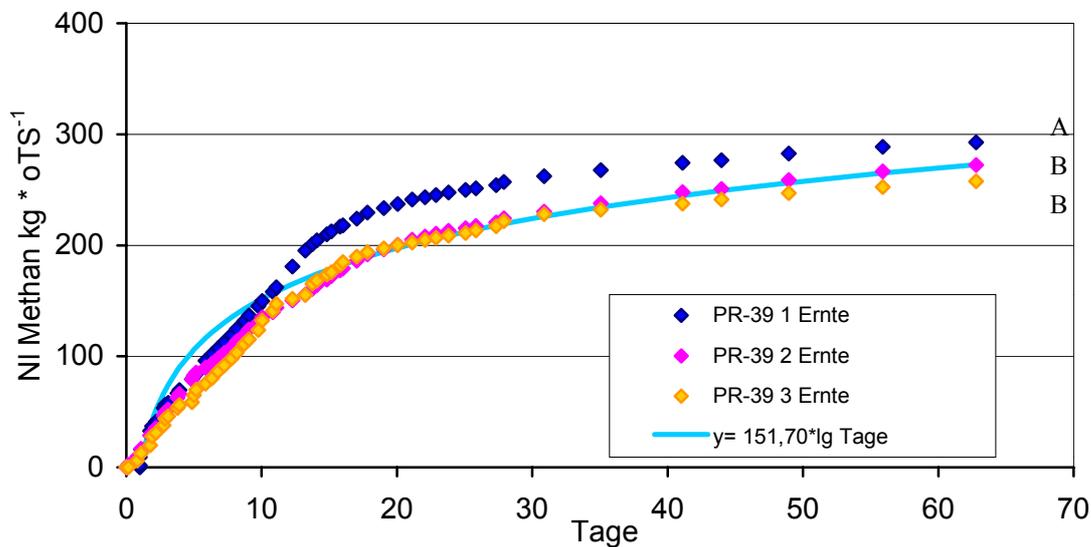


Abbildung 8: Verlauf der kumulierten spezifischen Methanausbeute aus Ganzpflanzensilagen der Maissorte PR 39G12 (FAO 240) der ersten, zweiten und dritten Ernte mit der resultierenden, sortenspezifischen Regressionsfunktion. Mit verschiedenen Buchstaben gekennzeichnete Messwertverläufe kennzeichnen einen signifikanten Unterschied bei $p < 0,05$.

Wie zu erkennen ist, bildete der Silomais des ersten, frühen Erntezeitpunktes der Sorte PR 39G12 nach 63 Gärtagen 292 N I Methan pro kg oTS. Der Silomais der zweiten, mittelfrühen Ernte zeigte ein mittleres Niveau der spezifischen Methanausbeute von 272 N I Methan pro kg oTS. Die spezifische Methanausbeute aus der Biomasse des dritten, späten Erntezeitpunktes lag bei 258 N I Methan pro kg oTS. Der Kurvenverlauf des ersten Erntezeitpunktes war von denen der zweiten und dritten Ernte signifikant verschieden. Vergleiche hierzu auch nachfolgende Tabelle 9.

Tabelle 9: Regressionsmodelle der kumulierten spezifischen Methanausbeute aus Ganzpflanzensilagen der Maissorte PR 39G12 (FAO 240) der ersten, zweiten und dritten Ernte. Parameterschätzung und Signifikanztest ($p < 0,05$)

Modell: spezifische Methanausbeute $[\text{Nl CH}_4 * \text{kg oTS}^{-1}] = b * \lg(\text{Tag})$							
Variante	Sorte/Ernte	Konservierung	b	r^2	Konfidenz-Intervall		Sig.
					Unten	Oben	
23	PR-39 1. Ernte	Silage	167,23	0,94	162,15	172,31	A
24	PR-39 2. Ernte	Silage	145,94	0,96	142,39	149,49	B
25	PR-39 3. Ernte	Silage	141,95	0,93	137,18	146,71	B

Die Regressionskoeffizienten (b) der kumulierten, spezifischen Methanausbeuten aus den Biomassen des zweiten (mittleren) und dritten (späten) Erntezeitpunktes zeigen im Vergleich zum Regressionskoeffizienten aus der Biomasse des ersten (frühen) Erntezeitpunktes eine signifikant geringere Methanbildung an. D.h. dass die Biomasse der Sorte PR 39G12 (FAO 240) bei frühem Vegetationsstadium ein signifikant höheres Methanbildungspotenzial gegenüber der Biomasse der zweite und dritten Ernte aufweist.

Abbildung 9 zeigt die Verläufe der spezifischen Methanausbeuten der Silomaisganzpflanzensilagen verschiedener Erntezeitpunkte der Sorte Sandrina (FAO 240) mit der resultierenden sortentypischen Regressionsfunktion.

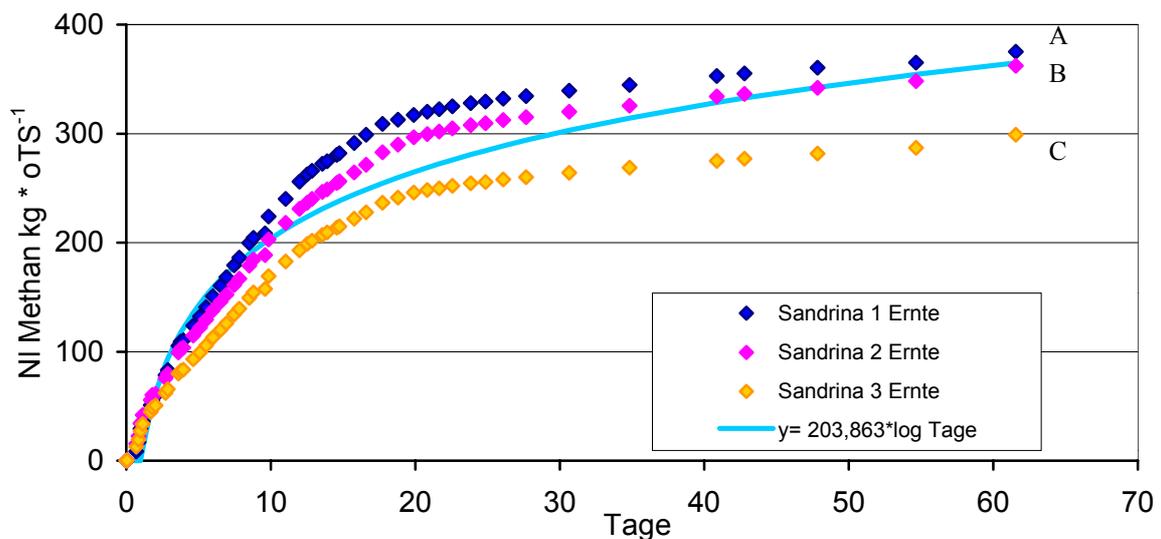


Abbildung 9: Verlauf der kumulierten spezifischen Methanausbeute aus Ganzpflanzensilagen der Maissorte Sandrina (FAO 270) der ersten, zweiten und dritten Ernte mit der resultierenden, sortenspezifischen Regressionsfunktion. Mit verschiedenen Buchstaben gekennzeichnete Messwertverläufe kennzeichnen einen signifikanten Unterschied bei $p < 0,05$.

Ganzpflanzensilage des ersten und zweiten Erntezeitpunktes der Sorte Sandrina (FAO 270) zeigte spezifische Methanausbeuten von 375 bzw. 362 N I Methan pro kg oTS. Demgegenüber war das Methanbildungsvermögen des Silomaises vom dritten Erntezeitpunkt mit 299 N I Methan pro kg oTS deutlich verringert (vergleiche auch Tab. 10).

Tabelle 10: Regressionsmodelle der kumulierten spezifischen Methanausbeute aus Ganzpflanzensilagen der Maissorte Sandrina (FAO 270) der ersten, zweiten und dritten Ernte. Parameterschätzung und Signifikanztest ($p < 0,05$)

Modell: spezifische Methanausbeute $[\text{Nl CH}_4 * \text{kg oTS}^{-1}] = b * \lg(\text{Tag})$							
Variante	Sorte/Ernte	Konservierung	b	r^2	Konfidenz-Intervall		Sig.
					Unten	Oben	
26	Sandrina 1. Ernte	Silage	226,42	0,97	221,54	231,30	A
27	Sandrina 2. Ernte	Silage	210,57	0,97	206,13	215,02	B
28	Sandrina 3. Ernte	Silage	174,60	0,96	170,73	178,46	C

Die Regressionskoeffizienten (b) der Funktionen der kumulierten spezifischen Methanausbeute aus der Bioasse aller Erntezeitpunkte waren signifikant voneinander verschieden. Mit zunehmendem Reifestadium der Pflanzen nahm der Regressionskoeffizient der Funktionen der kumulierten spezifischen Methanausbeute aus den Biomassen kontinuierlich ab. Daraus kann abgeleitet werden, dass bei der Sorte Sandrina (FAO 270) die Methanproduktivität aus den Biomassen mit zunehmendem Reifestadium der Pflanzen abnimmt.

Abbildung 10 stellt die Methanproduktivität aus den Biomassen der verschiedenen Erntetermine der Maissorte Clarica (FAO 310) dar. Die Verläufe der kumulierten spezifischen Methanausbeuten zeigen unabhängig vom Erntezeitpunkt ein einheitliches homogenes Bild. Die spezifische kumulierte Methanproduktivität erreichte nach 60 Gärtagen 335 bis 322 N l Methan pro kg oTS.

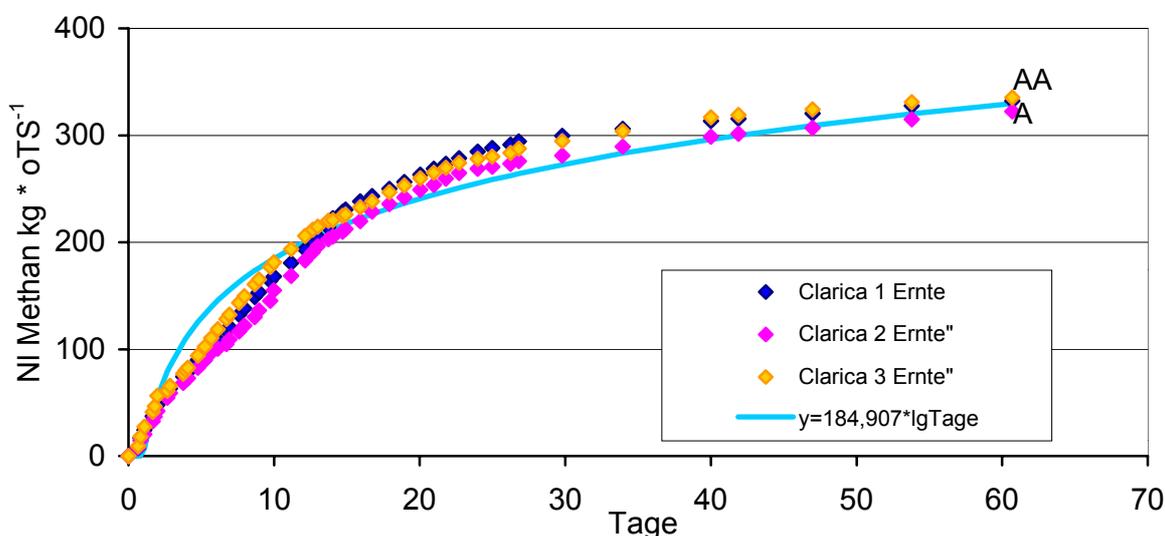


Abbildung 10: Verlauf der kumulierten spezifischen Methanausbeute aus Ganzpflanzensilagen der Maissorte Clarica (FAO 310) der ersten, zweiten und dritten Ernte mit der resultierenden, sortenspezifischen Regressionsfunktion. Mit verschiedenen Buchstaben gekennzeichnete Messwertverläufe kennzeichnen einen signifikanten Unterschied bei $p < 0,05$

Bei der mittelfrühen Sorte Clarica (FAO 310) hatten die gewählten Erntetermine offensichtlich wenig Einfluss auf die Differenzierung des Nährstoffmusters der Pflanzen bzw. der daraus erzeugten Ganzpflanzensilage. Es ist wahrscheinlich, daß die Vegetationsentwicklung der Pflanzen bei der vorliegenden Spanne der Erntetermine nur einen unwesentlichen Einfluss auf die Ausprägung des Nährstoffmusters der Pflanzen hatte (Tab. A1 Anhang), so dass das Methanbildungspotenzial der Biomassen dieser Sorte vom Erntezeitpunkt weitgehend unbeeinflusst blieb.

Tabelle 11: Regressionsmodelle der kumulierten spezifischen Methanausbeute aus Ganzpflanzensilagen der Maissorte Clarica (FAO 310) der ersten, zweiten und dritten Ernte. Parameterschätzung und Signifikanztest ($p < 0,05$)

Modell: spezifische Methanausbeute [$\text{Nl CH}_4 \cdot \text{kg oTS}^{-1}$] = $b \cdot \lg(\text{Tag})$							
Variante	Sorte/Ernte	Konservierung	b	r^2	Konfidenz-Intervall		Sig.
					Unten	Oben	
29	Clarica 1. Ernte	Silage	188,11	0,94	182,11	194,10	A
30	Clarica 2. Ernte	Silage	176,82	0,93	170,62	183,00	A
31	Clarica 3. Ernte	Silage	189,80	0,96	185,16	194,44	A

Bei der Sorte Clarica (FAO 310) sind die Regressionskoeffizienten (b) der Funktion zur Bestimmung des kumulierten spezifischen Methanbildungsvermögens statistisch gleich (Tab. 11). Das Methanbildungsvermögen der Maissilagen der Sorte Clarica (FAO 310) war bei den gewählten Ernteterminen gleich hoch. Ein Einfluss des Erntezeitpunktes auf das Methanbildungsvermögen der Pflanzen lag nicht vor.

Die Sorte Monalisa (FAO 360) zeigte bei insgesamt verminderter Methanproduktivität ebenfalls einen Einfluss des Vegetationsstadiums der Pflanzen auf das Methanbildungsvermögen (Abb. 11). Die Biomasse des zweiten, mittleren Erntetermines hatte gegenüber der Biomasse der ersten, frühen Ernte ein signifikant erhöhtes Methanbildungsvermögen. Es wurden nach 60 Gärtagen 285 N l Methan pro kg oTS aus der Biomasse des zweiten Erntetermines gebildet. Aus der Biomasse des ersten Erntetermines wurden 274 N l Methan pro kg oTS gebildet. Die Biomasse der dritten, späten Ernte zeigte ein signifikant verringertes Methanbildungsvermögen. Es wurden 247 N l Methan pro kg oTS gebildet.

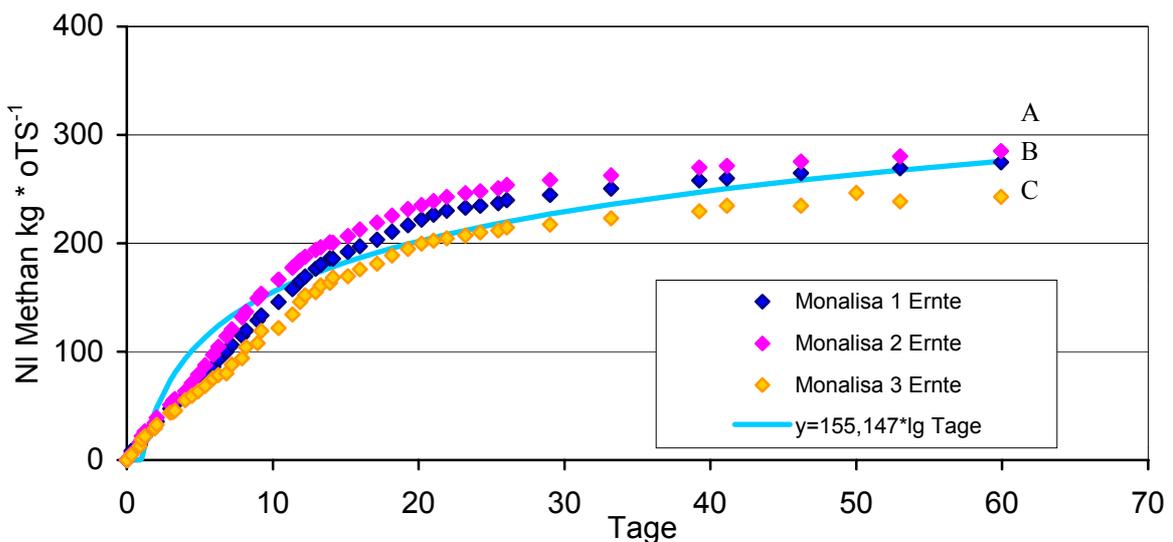


Abbildung 11: Verlauf der kumulierten spezifischen Methanausbeute aus Ganzpflanzensilagen der Maissorte Monalisa (FAO 360) der ersten, zweiten und dritten Ernte mit der resultierenden, sortenspezifischen

schen Regressionsfunktion. Mit verschiedenen Buchstaben gekennzeichnete Messwertverläufe kennzeichnen einen signifikanten Unterschied bei $p < 0,05$.

Die Regressionskoeffizienten (b) der Funktionen zur Bestimmung des kumulierten spezifischen Methanbildungsvermögens aus verschiedenen Biomassen der Maissorte Monalisa (FAO 360) waren statistisch verschieden (Tab. 12). Der Regressionskoeffizient (b) der Variante „späte Ernte“ war signifikant niedriger, als der der Varianten „frühe“ und „mittlere“ Ernte. Der Regressionskoeffizient (b) des Funktionsverlaufes der spezifischen Methanproduktivität aus der Biomasse des zweiten Erntetermines zeigte mit $b = 167,40$ das höchste Methanbildungspotenzial aus der silierten Biomasse der Sorte Monalisa an.

Tabelle 12: Regressionsmodelle der kumulierten spezifischen Methanausbeute aus Ganzpflanzensilagen der Maissorte Monalisa (FAO 360) der ersten, zweiten und dritten Ernte. Parameterschätzung und Signifikanztest ($p < 0,05$)

Modell: spezifische Methanausbeute [$\text{NI CH}_4 \cdot \text{kg oTS}^{-1}$] = $b \cdot \lg(\text{Tag})$							
Variante	Sorte/Ernte	Konservierung	b	R^2	Konfidenz-Intervall		Sig.
					Unten	Oben	
32	Monalisa 1. Ernte	Silage	156,23	0,94	150,92	161,55	A
33	Monalisa 2. Ernte	Silage	167,40	0,95	162,34	172,45	B
34	Monalisa 3. Ernte	Silage	141,88	0,93	137,00	146,76	C

Abbildung 12 zeigt den Verlauf der Methanproduktivität aus den Biomassen der verschiedenen Vegetationsstadien des Silomaises der spätreifen Sorte Ribera (FAO 390). Um den Einfluss der Konservierung (Silierung) von Mais auf das Methanbildungspotenzial zu prüfen, ist den silierten Varianten die kumulierte spezifische Methanausbeute von nicht silierten grüner Biomasse des ersten Schnittzeitpunktes gegenübergestellt. Tabelle 13 zeigt die Regressionsmodelle der verschiedenen Varianten der Sorte Ribera (FAO 390). Augenscheinlich ist die signifikant verringerte Methanproduktivität der Biomasse der grünen, nicht silierten Ganzpflanzen gegenüber der silierten Biomassen.

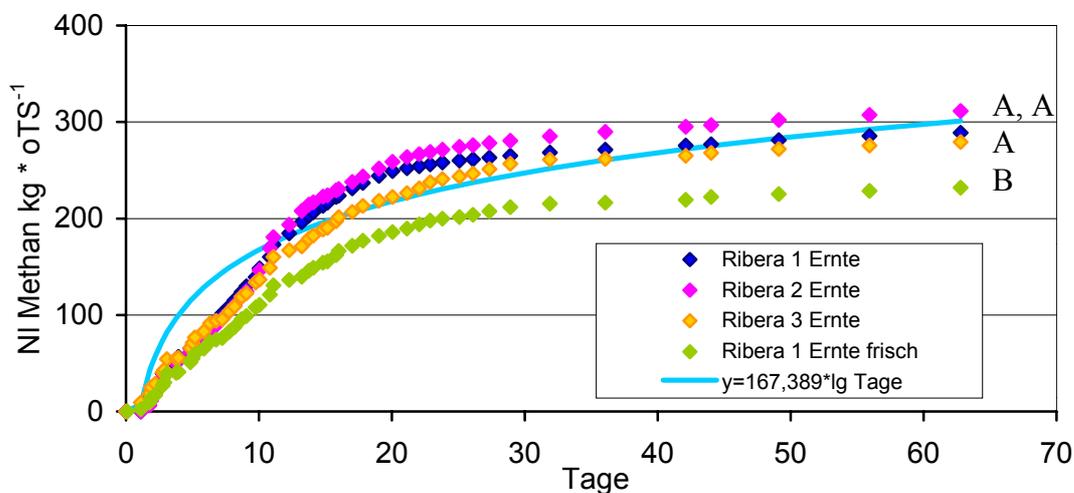


Abbildung 12: Verlauf der kumulierten spezifischen Methanausbeute aus Ganzpflanzensilagen der Maissorte Ribera (FAO 390) der ersten, zweiten und dritten Ernte mit der resultierenden, sortenspezifischen Regressionsfunktion. Mit verschiedenen Buchstaben gekennzeichnete Messwertverläufe kennzeichnen einen signifikanten Unterschied bei $p < 0,05$.

Innerhalb der silierten Varianten hatte die Vegetationsentwicklung keinen signifikanten Einfluss auf das Methanbildungspotenzial der Biomassen. Die Biomasse der zweiten Ernte zeigte nach 60 Gärtagen eine Methanbildung von 311 N l Methan pro kg oTS. Das Methanbildungsvermögen der Biomasse des ersten, frühen Erntetermines war mit 289 N l Methan pro kg oTS mittel ausgeprägt. Demgegenüber noch etwas verringert war die Methanproduktivität der Silage des dritten, späten Erntezeitpunktes. Hier wurde eine spezifische Methanausbeute von 279 N l Methan pro kg oTS erreicht.

Tabelle 13: Regressionsmodelle der kumulierten spezifischen Methanausbeute aus Ganzpflanzensilagen der Maissorte Ribera (FAO 390) der ersten, zweiten und dritten Ernte. Parameterschätzung und Signifikanztest ($p < 0,05$)

Modell: spezifische Methanausbeute $[Nl CH_4 * kg oTS^{-1}] = b * lg(Tag)$							
Variante	Sorte/Ernte	Konservierung	b	r^2	Konfidenz-Intervall		Sig.
					Unten	Oben	
35	Ribera 1. Ernte	Silage	167,64	0,90	160,29	174,98	A
36	Ribera 2. Ernte	Silage	174,67	0,88	165,82	183,51	A
37	Ribera 3. Ernte	Silage	158,93	0,94	154,07	163,80	A
38	Ribera 1. Ernte	Frisch	130,69	0,93	126,19	135,20	B

Der Vergleich der Regressionskoeffizienten zeigt keinen signifikanten Einfluss der Vegetationsentwicklung der Pflanzen der Sorte Ribera (FAO 390) auf das Methanbildungsvermögen der Biomasse dieser Sorte (Tab. 13).

Im Vergleich zu grünen, nicht silierten Ganzpflanzen war das Methanbildungspotenzial der silierten Varianten signifikant höher. Es ist wahrscheinlich, dass während des Siliervorganges durch den anaeroben Stoffwechselprozess der Milchsäuregärung für die Methanogenese wichtige Vorläufersubstrate wie z.B. Milchsäure (Lactat), Essigsäure (Acetat) und verschiedene weitere Substrate für die Methanogenese wie Methanol, Alkohole, Ameisensäure (Formiat), H^+ und CO_2 in nennenswerten Mengen gebildet werden und in der Silage vorliegen. Es könnte auch sein, dass durch die Milchsäuregärung Zellulose und Hemizellulose der Rohfaserfraktion teilweise aufgeschlossen werden. Dadurch verbessert sich der Rohfaserabbau und in der Folge die Verfügbarkeit aller anderen Nährstoffe für die Methanogenese. Ein positiver Effekt der Silierung (Milchsäuregärung) auf das Methanbildungsvermögen von Biomasse wurde auch in Untersuchungen anaerober Stoffwechselprozesse bei der Methangärung von Klee gras festgestellt (AMON 2002).

6.4.2 Einfluss der Maissorte

Um den Einfluss der Maissorte auf das spezifische Methanbildungsvermögen der Maissilage zu untersuchen, wurden die sortenspezifischen Regressionsfunktionen der Sorten PR 39 (FAO 240), Sandrina (FAO 270), Clarica (FAO 310), Monalisa (FAO 360) und Ribera (FAO 390) aus den Verläufen der kumulierten spezifischen Methanausbeuten der Biomassen aller drei Erntezeitpunkte ermittelt (vergleiche Abb. 8 bis 12). Die so berechneten Funktionen sind in Tabelle 14 vergleichend dargestellt. Ein Unterschied zwischen Sorten liegt vor, wenn die

Vertrauensbereiche der geschätzten Regressionskoeffizienten (b) keine gemeinsamen Bereiche aufweisen. Die Auswahl der Sorten wurde primär nach der Reifezahl durchgeführt. Es wurde Wert darauf gelegt, dass das Spektrum von früh- bis spätreifen Sorten im Versuch repräsentiert war.

Tabelle 14: Regressionsmodelle der kumulierten spezifischen Methanausbeute aus Ganzpflanzensilagen der Maissorten PR 39 (FAO 240), Sandrina (FAO 270), Clarica (FAO 310), Monalisa (FAO 360) und Ribera (FAO 390). Parameterschätzung und Signifikanztest ($p < 0,05$)

Modell: spezifische Methanausbeute [$\text{Nl CH}_4 * \text{kg oTS}^{-1}$] = $b * \lg(\text{Tag})$							
Variante	Sorte	Reifezahl (FAO)	b	r^2	Konfidenz-Intervall		Sig.
					Unten	Oben	
23 – 25	PR 39	240	151,70	0,92	148,60	154,81	A
26 – 28	Sandrina	270	203,62	0,90	199,50	208,23	B
29 – 31	Clarica	310	184,91	0,94	181,58	188,23	C
32 – 34	Monalisa	360	155,15	0,92	151,79	158,51	A
35 – 37	Ribera	390	167,39	0,89	163,11	171,66	D

Die Methanbildungspotenziale der Sorten PR39, Sandrina, Clarica und Ribera sind signifikant voneinander verschieden ($p < 0,05$). Die Methanproduktivität der Sorten PR 39 (FAO 240) und Monalisa (FAO 360) unterscheidet sich nicht statistisch signifikant. Ein Zusammenhang zwischen Reifezahl der Maissorte und der spezifischen Methanproduktivität besteht nicht. Vielmehr ist davon auszugehen, dass die Sorten aufgrund ihres spezifischen Nährstoffmusters (XP, XL, XF, NFE) (vergleiche Tabelle A1 im Anhang) ein charakteristisches Methanbildungsvermögen besitzen, das unabhängig von der Reifezahl der Sorten ist. Nach Tabelle 14 ergibt sich folgende Reihung nach abnehmender Methanproduktivität:

- Sandrina $b = 203,62$
- Clarica $b = 184,91$
- Ribera $b = 167,39$
- Monalisa $b = 155,15$
- PR 39 $b = 151,70$.

6.4.3 Optimale hydraulische Verweilzeit

Aus den Verläufen der gemessenen spezifischen Methanproduktivität der Biomassen aller Maissorten und Erntezeitpunkte geht hervor, dass nach 30 bis 35 Gärtagen 90 bis 93 % der nach 60 Gärtagen ermittelten kumulierten Gesamtmethanmenge gebildet worden war. Auf der Basis der vorliegenden Untersuchungen kann, sonst optimale Gärbedingungen vorausgesetzt, eine hydraulische Verweilzeit von ca. 40 bis 45 Tagen empfohlen werden, um zu gewährleisten, dass das Methanbildungspotenzial von Mais unter praktischen Gärbedingungen weitgehend ausgenutzt werden kann.

6.5 Methanhektarertrag

Der Hektarertrag für Methan ergibt sich aus den Faktoren:

- oTS –Ertrag pro Hektar
- spezifische Methanausbeute Einheit kg oTS im Gärgut.

Wie die Untersuchungen zeigen, sind beide Ertragsfaktoren primär sortenabhängig. Im vorliegenden Projekt wurde das spezifische Methanbildungsvermögen verschiedener Maissorten untersucht. Daraus kann – in Verbindung mit der standort- und sortenspezifischen Ertragslage – der Methanhektarertrag kalkuliert werden (Tab. 15). Beide Ertragsfaktoren werden von der Sorte und vom Erntezeitpunkt bestimmt.

Der Erntezeitpunkt hatte bei den Sorten Sandrina, Monalisa und PR 39 einen signifikanten Einfluss auf das spezifische Methanbildungsvermögen aus der Biomasse. Bei der Sorte Sandrina beispielsweise wurden im Stadium der Teigreife $375 \text{ N l CH}_4 \cdot \text{kg oTS}^{-1}$ gebildet. Zum Zeitpunkt der physiologischen Reife waren es nur mehr $299 \text{ N l CH}_4 \cdot \text{kg oTS}^{-1}$. Damit lag das spezifische Methanbildungsvermögen der Sorte Sandrina im Stadium der physiologischen Reife 23 % unter dem im Stadium Ende Teigreife. Bei der Sorte Monalisa verursachte der späte Erntetermin einen Minderertrag von 9,2 % bezogen auf den maximal möglichen spezifischen Methanertrag am Beginn der physiologischen Reife. Ertragsmindernd wirkte sich der späte Erntetermin auch bei der Sorte PR 39 aus. Hier kam es zu einer Ertragseinbuße um 15,1 % bezogen auf das mögliche spezifische Methanbildungsvermögen. Die Sorten Clarica und Ribera zeigten keinen Einfluß des Wachstumsstadiums auf das spezifische Methanbildungspotenzial.

Der oTS-Biomasseertrag nahm mit Ausnahme der Sorte Clarica bei allen Sorten vom Stadium Teigreife bis physiologische Reife der Pflanzen ab.

Die Kalkulation des Methanhektarertrages basiert nachfolgend auf den ermittelten maximalen spezifischen Methanerträgen der Sorten zum optimalen Erntezeitpunkt. Das mögliche Ertragsniveau von Silomais verschiedener Standorten wird berücksichtigt. Es wird davon ausgegangen, daß weniger gute bis mittlere Standorte einen oTS-Ertrag von rund 15 t oTS/ha erreichen. Gute bis sehr gute Standorte erreichen 22 bis 25 t oTS-Ertrag je ha. Auf sehr guten und exzellenten Maisstandorten können u.U. bis zu 30 t oTS je ha erzielt werden.

Tabelle 15: Methanhektarertrag (in $\text{m}^3 \text{ CH}_4$ pro ha) verschiedener Maissorten bei unterschiedlichem Biomasseertrag

Sorte	Methanausbeute ¹⁾ [$\text{l CH}_4 \cdot \text{kg oTS}^{-1}$]	Biomasseertrag pro Hektar [$\text{t oTS} \cdot \text{ha}^{-1}$]				
		12	15	20	25	30
PR 39	292	3.504	4.380	5.840	---	---
Sandrina	375	4.500	5.625	7.500	---	---
Clarica	329	3.948	4.935	6.580	8.225	9.870
Monalisa	274	3.288	4.110	5.480	6.850	8.220
Ribera	311	3.732	4.665	5.220	7.775	9.330

1) ermittelte maximale spezifische Methanausbeute

Die Kalkulation zeigt die Spannweite der möglichen maximalen hektarbezogenen Methanerträge. Unterstellt sind die gemessenen spezifischen Methanerträge der ersten Erntezeitpunkte im Stadium Ende Teigreife bis Beginn physiologische Reife, die den höchsten spezifischen Methanertrag je kg oTS ermöglichten. So können im ungünstigsten Fall bei einer spezifischen Methanausbeute von 292 N l CH_4 je kg oTS und einem oTS-Biomasseertrag von 12 t pro ha lediglich 3.504 m^3 Methan pro Hektar erzeugt werden. Wohingegen im bestmöglichen Fall bei einer spezifischen Methanausbeute von 375 N l CH_4 je kg oTS und einem oTS-Biomasseertrag von 30 t pro ha 11.250 m^3 Methan pro Hektar erzielt werden. Dies macht die

überragende Bedeutung der richtigen Sortenwahl, des Standortes und des Erntezeitpunktes für die Wirtschaftlichkeit der Biogaserzeugung aus Silomais deutlich.

Auf weniger guten bis mittleren Standorten können, einen optimalen Erntezeitpunkt bei 30 bis 35 oTS % in der Frischmasse der Ganzpflanzen unterstellt, im Stadium Ende Teigreife 4.935 bis 5.625 m³ Methan pro ha erzeugt werden, wenn die frühen bis mittelfrühen Sorten Sandrina oder Clarica angebaut werden. Auf guten bis sehr guten Standorten für den Silomaisanbau werden 6.850 m³, 7.775 m³ und 8.225 m³ Methan pro Hektar erzeugt, wenn die mittelfrühen bis späten Sorten Clarica, Monalisa und Ribera angebaut werden. Auf exzellenten Standorten bei optimalen Bedingungen aller Faktoren (Sortenwahl, Erntezeitpunkt, oTS-Ertrag), ist ein Methanertrag um 10.000 m³ pro ha möglich.

7. Praktische Empfehlungen

Auf der Basis bisher vorliegender Untersuchungsergebnisse können folgende Empfehlungen zur Sortenwahl für den Silomaisanbau zur Biogaserzeugung abgeleitet werden. Für weniger gute bis mittlere Standorte des Silomaisanbaues eignen sich für die Methanherzeugung frühe (Sandrina) bis mittelfrühe Sorten (Clarica). Sie zeigen ein hohes spezifisches Methanbildungspotenzial und liefern bei den gegebenen Standortbedingungen gute Biomasserträge. Bei guten bis sehr guten Standortbedingungen eignen sich die mittelspäten (Monalisa) bis späten Sorten (Ribera) für die Methanherzeugung besser als frühe Sorten, weil auf guten Standorten späte Sorten ihr Biomassebildungspotenzial stärker ausnutzen können als das spezifische Methanbildungsvermögen gegenüber der frühen Sorte (Sandrina) geringer ist. Eine exakte Quantifizierung der ertragsbildenden Faktoren (Erntezeitpunkt und Sorte) auf den Methanhektarertrag könnte durch die Entwicklung eines neuen Methanenergiesystems für Mais erreicht werden. Die energetische Bewertung von Mais zur Methanbildung auf Basis der Inhaltsstoffe (XP, XL, XF, XA; NFE, NDF, ADF, ADL, Zellulose, Hemizellulose) würde zudem die optimale Versorgung der Biogasanlagen mit Nährstoffen für die Methangärung ermöglichen. Auch könnten die ertragsbildenden Faktoren aus Pflanzenteilen (Körner, Kolben, Ganzpflanze, Restpflanze) exakt bestimmt werden. Dadurch würden zusätzlich differenzierte Sortenempfehlungen zur Biogaserzeugung aus Ganzpflanzen, Kolben (CCM) und Körnern möglich. Als Basis dient der anhand der Inhaltsstoffe von Pflanzen und Pflanzenteilen verschiedener Sorten mit Hilfe eines neuen Methanenergiesystems a priori berechenbare Methanhektarertrag der Sorten.

Um das spezifische Methanbildungsvermögen der Ganzpflanzensilomaisilage bestmöglichst ausschöpfen zu können, kann als optimaler Erntetermin das Wachstumsstadium Ende Teigreife bis Beginn der physiologischen Reife der Pflanzen empfohlen werden. Der TS-Gehalt der Ganzpflanzensilage liegt dann etwa zwischen 33 und 35 % oTS i.d. Frischmasse. Der optimale Erntetermin liegt bei dem Zeitpunkt, bei dem pro Hektar die maximale Biomasse gebildet worden ist und gleichzeitig die spezifische Methanausbeute des Maises am höchsten ist. Das ist in der Regel im Vegetationsstadium Ende der Teigreife der Fall. In diesem Vegetationsstadium war das spezifische Methanbildungspotenzial des Silomais am höchsten.

Abweichungen vom optimalen Erntezeitpunkt können je nach Sorte und Standort zu zum Teil erheblichen Einbußen des Methanhektarertrages führen. Der optimale Erntezeitpunkt entscheidet deshalb maßgeblich über die Rentabilität der Biogaserzeugung aus Silomais. Die Ernte sollte so früh wie möglich stattfinden, um eine möglichst hohe spezifische Methanausbeute zu erreichen. Die Biomasse von Ganzpflanzen der physiologischen Reife kann in Biogasanlagen unter Umständen etwas schwerer abgebaut werden als Biomasse von Ganzpflanzen in der Milch- oder Teigreife. Die Ernte sollte aber auch so spät wie nötig stattfinden, um das Biomasseertragspotenzial der Sorten auszuschöpfen.

Im Vergleich zu grünen Frischpflanzen zeigt die Ganzpflanzensilage eine deutlich höhere (21 %) spezifische Methanausbeute.

Um die in der Biomasse des Maises enthaltene Energie möglichst vollständig in Methan umwandeln zu können, ist eine Gärzeit von 40 – 45 Tagen bei einer Gärtemperatur von 37 °C erforderlich.

8. Forschungsbedarf

Über die Kenntnis des sortenspezifischen Methanbildungsvermögens von Mais hinaus besteht die dringende Notwendigkeit, Biogasanlagen optimal mit Nährstoffen zu versorgen. Das nun bekannte Methanbildungspotenzial der Maissorten PR-39, Sandrina, Clarica, Monalisa und Ribera muss in der Praxis möglichst vollständig ausgeschöpft werden können. Neben Mais ist auch die Sonnenblume eine weitere Energiepflanzenart, die zur Biogaserzeugung hervorragend geeignet ist. Systematische Untersuchungen zum Stoffwechsel der Methangärung der Biomasse von Ganzpflanzen, der Biomasse des Kolbens (CCM), der Körner und der Biomasse der Restpflanze sind erforderlich. Sie dienen der Entwicklung von Anbau- und Sortenempfehlungen, der Entwicklung verfahrenstechnisch optimierter Systeme des Anbaues, der Ernte, der Konservierung, der Einbringung der Biomasse in den Gärbehälter und zur Festlegung der Art und Größe des Gärbehälters.

Die Kenntnis des Gärverhaltens von Pflanzenteilen und der Ganzpflanze ist die Basis für Empfehlungen geeigneter Sorten und die Optimierung der Anbau-, Ernte- und Gärungstechnologien und damit letztendlich der Wirtschaftlichkeit der Biogaserzeugung aus Energiepflanzen.

Eine optimale Nährstoffversorgung der Biogasanlagen kann durch ein neues Bewertungssystem zum Methanbildungsvermögen von Mais und Sonnenblumen erreicht werden. Das **Methanenergiesystem (MEWS)** wird auf der Kenntnis des Methanbildungsvermögens von Biomasse bei bekannten Inhaltsstoffen Rohprotein (XP), Rohfett (XL), Rohfaser (XF → NDF, ADF, ADL) und N-freie Extraktstoffe (XX) basieren. Mit dem neuen Methanenergiesystem wird die energetische Bewertung von Mais und Sonnenblumen für die Methanerzeugung möglich.

Für Mais und teilweise für Sonnenblumen 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 diesen Sorten herangezogen werden.

Mit diesem neuen System kann die Versorgung von Biogasanlagen mit Nährstoffen optimiert werden. Darüber hinaus könnte mit Hilfe eines neuen Methanenergiesystems eine exakte Berechnung der energetischen Leistung von Biogasanlagen in Abhängigkeit der verfügbaren Biomasse erfolgen. Milieubedingungen der Stoffwechselversuche können mit Hilfe vorliegender kinetischer Modelle (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) optimiert werden.

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 UND 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 Stoffe zur Methanerzeugung zu übertragen.

Der Energieumsatz von Biomasse wird im Stoffwechselversuch bei anaerober Gärung im Batch-Experiment (Eudiometer) gemessen. Für die Energiewechselmessung wird folgende Gliederung der Bilanzstufen verwendet (Abb. 13).

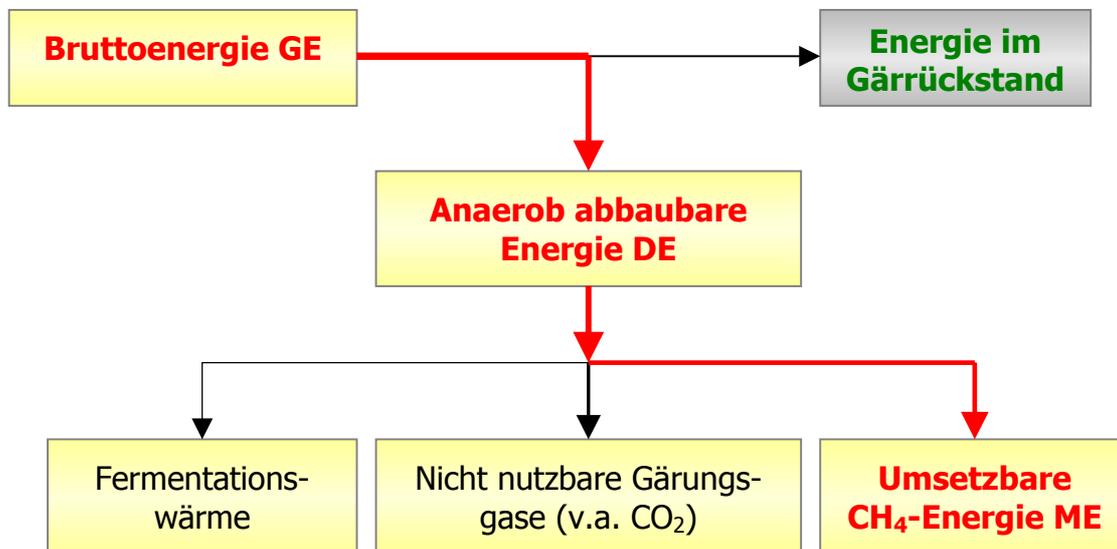


Abbildung 13: Schema des Energiestoffwechsels.

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 CH_4 und CO_2 , verwendet. Hierbei treten an verschiedenen Stellen Verluste auf, die im Gesamtstoffwechselversuch erfaßt werden können.

Bilanzstufen des anaeroben Energiewechsels

Die **Bruttoenergie (GE)** ist die im Gärgut enthaltene chemische Energie. Sie wird im Bombenkalorimeter durch Verbrennung als freigesetzte Wärme erfaßt. Der im Fermenter mikrobiell nicht abbaubare Anteil der organischen Substanz des Gärgutes verbleibt im Gärückstand, der aus dem Fermenter wieder ausgetragen wird. Zieht man diese im Gärückstand enthaltene Energie – sie wird ebenfalls durch Verbrennung des Gärückstandes im Bombenkalorimeter bestimmt – von der Bruttoenergie ab, so erhält man die **anaerob abbaubare Energie (DE)**. Beim Gärungsvorgang entsteht auch Wärme (Fermentationswärme). Die Fermentationswärme (FW) kann theoretisch berechnet werden, indem man von der Bruttoenergie des Gärgutes die Energie des nicht abgebauten Gärückstandes (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 Energiewechsels der anaeroben Gärung wie folgt:

$$\begin{aligned} \text{Methanenergie im Biogas} &= \text{Bruttoenergie im Gärgut} \\ &\quad - \text{Energie im Gärückstand} - \text{Fermentationswärme} \end{aligned}$$

Der Energiegehalt der Spurengase (H^+ , NH_3 , org. Säuren) wird derzeit nicht gesondert erfaßt. Er ist deshalb rechnerisch in der Fermentationswärme enthalten. Die Menge dieser Gase im Biogas ist gering.

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:

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

Die Bruttoenergie (GE) im Gärgut wird je nach der Art und der Zusammensetzung der Gärgüter sowie des vorherrschenden mikrobiellen Ökosystems im Fermenter unterschiedlich stark anaerob abgebaut. Also verbleibt ein unterschiedlich hoher Anteil der Bruttoenergie im nicht abgebauten Gärrückstand. Dieser nicht nutzbare Anteil wird wahrscheinlich vom Rohfasergehalt des Gärgutes bestimmt.

(3) Die **Umsetzbarkeit (q) der Energie für die Methanbildung** ergibt sich aus:

$$q = \text{ME} / \text{GE}$$

Die Umsetzbare Energie (ME) kann aus der Beziehung $\text{ME} = \text{GE} - \text{EGR} - \text{FW}$ berechnet werden.

(4) Die **Verwertung der umsetzbaren Energie für die Methanbildung (k)** ergibt sich aus

$$k = \text{CH}_4\text{-E} / \text{ME}$$

Das energetische Leistungsvermögen eines Gärgutes wird im anaeroben mikrobiellen Ökosystem auf das Methanbildungspotenzial des Gärgutes bezogen. Grundlage für die energetische Bewertung der Gärstoffe ist die Wirkung des Gärgutes auf die 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 Gärgütern 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 Gärgutes den Mikroorganismen im Fermenter verabreicht werden.

Die zu verwendenden Gärgüter werden als Zulage zum Inoculum im Batch-System experimentell geprüft. Das Methanbildungsvermögen und der Wirkungsgrad „ η “ der Methanbildung werden auf Abhängigkeiten zum Rohfasergehalt (XF) (weiter differenziert in Zellulose, Hemizellulose, und Lignin) und zu den Inhaltsstoffen Kohlenstoff (XC), Rohprotein (XP), Rohfett (XL) und Roh-N-freie Extraktstoffe (XX) des Gärgutes überprüft.

Das neue Bewertungssystem baut auf folgenden Prämissen auf (AMON ET AL. 2002):

- 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 (ÖKL-Biogasanlagen).

- 2 Im Stoffwechselexperiment wird der transformierbare Anteil der Bruttoenergie des Gärgutes in Methanenergie des Biogases überführt
- 3 Das Bewertungssystem beruht zunächst auf der Verwendung der Rohnährstoffe von Gärgütern.
- 4 Der „Methanenergiewert“ (MEW) wird nach einer multiplen Regressionsgleichung aus den Rohnährstoffen berechnet und in MJ bzw. l CH₄/kg oTS angegeben.

$$\begin{aligned}
 \text{MEW [l CH}_4\text{/t oTS]} = & \quad x_1 * \text{ Rohprotein (XP)} \\
 & + x_2 * \text{ Rohfett (XL)} \\
 & + x_3 * \text{ Rohfaser (XF) differenziert nach ADF, ADL, NDF} \\
 & + x_4 * \text{ N-freie Extraktstoffe (XX)}
 \end{aligned}$$

- 5 Die Bruttoenergie (GE) und die Energie im Gärrückstand (EGR) werden im Bombenkalorimeter bestimmt.
- 6 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.
- 7 Der gärgutspezifische Zusammenhang zwischen dem Wirkungsgrad der Methanbildung (η) und dem Methanenergiewert (MEW) von Gärgütern wird dargestellt.
- 8 Es wird geprüft, in wie weit der C-Transferfaktor (Kohlenstoff im Biogas / Kohlenstoff im Gärgut) vom Methanenergiewert „ η “ des Gärgutes abhängt.
- 9 Im Methan-Energiewert-System erfolgt die Zusammenstellung einer Gärgutmischung durch anteilige Addition der Methanenergiegehalte der einzelnen Gärgutkomponenten. Die für die Kalkulation von Gärgutmischungen vorteilhafte Bewertung von Einzelgärgütern ermöglicht die Kalkulation der Gesamtgärgutmischung. 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 Biomasse her den anaeroben Zersetzungsprozess der organischen Substanz in praktischen Biogasanlagen zu optimieren und die Methanproduktionskapazität von Gärgütern in der Praxis maximal auszunutzen.

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. (2002) 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. (2002): Optimierung der Biogaserzeugung aus den Energiepflanzen Mais und Klee gras. Erster Zwischenbericht August 2002 Forschungsprojekt Nr. 1249 GZ 24.002/59-IIA1/01 im Auftrag des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt- und Wasserwirtschaft.
- 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+t/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.
- 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
- HENZE, M., GRADY, C.P.L., GUJER, W., MARAIS, G.V.R. AND MATSUO, T. (1986): Activated Sludge Model No. 1. IAWQPRC, London
- 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. (1985) Tierernährung, 6. Auflage, DLG-Verlag, Frankfurt am Main.
- KÖTTNER, M. (2000) Wenn die Biogasanlage plötzlich streikt. Biogas Top-Agrar extra S. 64 – 65
- KOPETZ, H. (2000) Puchberger Erklärung: Mit Bioenergie in das neue Jahrhundert. Österreichischer Biomasse-Verband, Franz Josefs - Kai 13, 1010 Wien, 2000
- KRAMPL R. (2000) Strom aus Gras? Kein Problem! Blick ins Land 7.
- 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.; SCHNELLE, H.; LINKE, B. (2002): Verwertungsalternativen für Grünlandbestände, Futtergräser als Kosubstrat für die Biomethanisierung. In: Landtechnik 5/2002, S. 260 bis 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., Proceedings 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., Proceedings of the International Conference Würzburg, Germany, 8 – 11 June 1998, S. 714 –717
- SEDLMEIER J. (2000) Futterrüben als Kraftwerk. In: <http://www.gruene-niedersachsen.de/ltf/themen/landwirt/biogas/bgatrueb.htm>
- SCHIEMANN R. (1971) Energetische Futterbewertung und Energiennormen. VEB, Deutscher Landwirtschaftsverlag, Berlin.
- SCHNEIDER B.H., FLATT W.P. (1975) The evaluation of feeds through digestibility experiments. University of Gorgia 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
- 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. und 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
- WELLINGER, A. (2000) Strom aus Gras ? Kein Problem! In: Blick ins Land 7/2000, S. 25
- ZAUNER E. und 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. und ZHANG Z. (1999) Biogasification of rice straw with an anaerobic-phased solids digester system. Bioresource Technology 68, 235-245.