

Methanbildungspotenziale verschiedener Pflanzenarten aus Energiefruchtfolgen

Christiane Herrmann, Vincent Plogsties, Matthias Willms, Frank Hengelhaupt, Veronika Eberl, Jens Eckner, Christoph Strauß, Christine Idler, Monika Heiermann

Das Methanbildungspotenzial ist ein entscheidendes Qualitätsmerkmal von Biomassen bei ihrer Nutzung als Einsatzstoff für die Biogasproduktion. Von 769 unter einheitlichen Bedingungen silierten Erntegütern aus Energiefruchtfolgen wurden mittels Batch-Gärtests in zwei verschiedenen Versuchsanlagen spezifische Methanausbeuten ermittelt. Daraus konnten Richtwerte für mittlere Methanausbeuten je Fruchtart und Fruchtfolgestellung, Schnitt bzw. Trockenmassebereich oder Entwicklungsstadium zur Ernte für 93 verschiedene pflanzliche Biomassen abgeleitet werden. Die Ergebnisse stellen eine umfassende Datengrundlage dar, die in Verbindung mit Biomasseerträgen für die Abschätzung von Methanhektarerträgen zur ökonomischen und ökologischen Bewertung von Energiefruchtfolgen, zur Planung und Auslegung von Biogasanlagen sowie zur Entscheidung hinsichtlich des Anbaus alternativer pflanzlicher Kosubstrate und der Konzeption nachhaltiger Biogasfruchtfolgen genutzt werden können.

Schlüsselwörter

Biogas, Methanausbeute, Fruchtfolgen, Silage, Richtwerte

Die erneuerbaren Energien sollen bereits um 2050 in Deutschland den Großteil der heimischen Energieversorgung übernehmen. Aufgrund vorteilhafter Eigenschaften, wie der Speicherbarkeit und Flexibilität in der Erzeugung und Nutzung der Bioenergie, kommt auch der Energie aus Biomasse eine bedeutende Rolle in der Energieversorgung der Zukunft zu (BMEL 2015). Die wichtigste Energiepflanze für die anaerobe Vergärung in Biogasanlagen ist derzeit der Silomais. Er zeichnet sich als C4-Pflanze durch eine optimale Wassereffizienz und hervorragende Nutzung der Solarstrahlung aus, die zu hohen Biomasseerträgen je Hektar führen. Mais ist gut zu ernten und zu konservieren, und erlaubt aufgrund guter biologischer Umsetzung hohe Methanerträge bei vergleichsweise günstigen Produktionskosten. Für eine nachhaltige Landwirtschaft sind jedoch abwechslungsreiche Fruchtfolgen erforderlich. Aber was sind leistungsfähige Anbausysteme oder Kulturen, die in Kombination mit Mais angebaut werden können? Seit dem Jahr 2005 hat sich der EVA-Forschungsverbund („Entwicklung und Vergleich von optimierten Anbausystemen für die landwirtschaftliche Produktion von Energiepflanzen unter den verschiedenen Standortbedingungen Deutschlands“; www.eva-verbund.de) dieser Fragestellung angenommen. Das Projekt hat zum Ziel, praxisorientiert regionale Entscheidungshilfen zu erarbeiten und durch Aussagen zu vielfältigen Anbausystemen zu einer Diversifizierung von Produktionsmustern und Fruchtfolgen beizutragen.

Die Einschätzung der Anbauwürdigkeit und Vorzüglichkeit von einzelnen Fruchtarten bzw. von Energiefruchtfolgen umfasst die Bewertung energetischer, ökonomischer und ökologischer Effekte (ECKNER et al. 2015, GLEMNITZ et al. 2015). Hierzu sind neben Biomasseerträgen auch Kenntnisse zur Qualität der pflanzlichen Biomasse hinsichtlich der Methanbildung notwendig. Es ist von Interesse, wie viel Methan unter geeigneten Prozessbedingungen je Masseinheit des Pflanzenmaterials gewonnen werden kann.

Zur Abschätzung von Methanausbeuten existieren eine Reihe verschiedener Ansätze. Eine Möglichkeit ist die Verwendung von Schätzgleichungen, die auf eine Vorhersage der spezifischen Methanausbeuten des Erntegutes, üblicherweise basierend auf Inhaltsstoffanalysen, abzielen (RATH et al. 2015). Entsprechende Gleichungen, basierend auf umfangreichen Grunddaten, sind vor allem spezifisch für einzelne Fruchtarten, insbesondere für Mais, entwickelt worden (RATH et al. 2015, STOFFEL und KÖLLER 2012). Bisher existieren jedoch keine Schätzgleichungen, mit deren Hilfe die Methanausbeuten allgemeingültig und für eine große Vielfalt an pflanzlichen Einsatzstoffen, vor allem von neuen, bislang wenig etablierten Pflanzenarten oder Artenmischungen, mit hinreichender Genauigkeit kalkuliert werden können. Ein weiterer Nachteil ist, dass häufig umfangreiche Inhaltsstoffanalysen für die Berechnung erforderlich sind. Zudem sollte eine Validierung von Schätzgleichungen erfolgen, um deren Aussagekraft zu prüfen. Verschiedene Studien haben gezeigt, dass Unterschiede in den spezifischen Methanausbeuten durch Schätzgleichungen oft nur begrenzt abgebildet werden (CZEPUCK et al. 2006, RATH et al. 2015, STOFFEL und KÖLLER 2012).

Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung von Literaturwerten oder Richtwerten für die Methanbildung aus unterschiedlichen Einsatzstoffen. Für eine Vielzahl von Fruchtarten, die in Energiefruchtfolgen zum Anbau kommen können, existieren bereits Literaturangaben bzw. Richtwerte (KTBL 2015, LfL 2016). Diese basieren zum Teil auf Laborergebnissen verschiedener Institute (KTBL 2015) und zum Teil auf einer Schätzgleichung nach BASERGA (1998) (LfL 2016), wobei gezeigt wurde, dass mit diesem Rechenmodell keine zuverlässige Aussage zu der erzielbaren Methanausbeute gewonnen werden kann (CZEPUCK et al. 2006, RATH et al. 2015). Die Anwendbarkeit und Aussagekraft von Richtwerten ist wesentlich von der zugrunde liegenden Datenbasis abhängig. Für die Konzeption und Bewertung von Biogasfruchtfolgen fehlen zur Abschätzung der Methanausbeuten einer großen Auswahl an Fruchtarten bisher umfassende Daten, bei denen der Einfluss von Fruchtfolgestellung oder Anbaubedingungen berücksichtigt wird.

Das Ziel der vorliegenden Untersuchungen ist daher

- die Charakterisierung einer großen Bandbreite von Pflanzenarten aus Energiefruchtfolgen hinsichtlich im Mittel erzielbarer Methanbildungspotenziale basierend auf umfangreichen experimentellen Untersuchungen
- mit weiterer Spezifizierung bezüglich Anbaubedingungen und Erntezeitpunkten, d. h. Fruchtfolgestellung oder Reife zur Ernte, und
- die Information zur Anwendbarkeit dieser Richtwerte.

Die Untersuchungen umfassen Silagen von 59 Fruchtarten, wobei Richtwerte für 93 verschiedene pflanzliche Biomassen abgeleitet werden.

Material und Methoden

Beschreibung des Ausgangsmaterials

Gegenstand der Untersuchungen sind Pflanzenbiomassen von 59 verschiedenen Fruchtarten bzw. Mischungen, die in den Anbaujahren 2005 bis 2015 in Parzellenversuchen gewonnen wurden. An acht verschiedenen Standorten in Deutschland wurden Energiefruchtfolgen und in ergänzenden Versuchen auch alternative Kulturen untersucht (Abbildung 1, a). Eine detaillierte Beschreibung der Standortcharakteristiken sowie eine Übersicht über die Energiefruchtfolgen ist ECKNER et al. (2013) und HERRMANN et al. (2016) zu entnehmen. Direkt nach der Ernte wurde das Erntegut auf eine Partikelgröße von < 20 bis 30 mm zerkleinert und mittels Silierung konserviert. Die Silierung erfolgte einheitlich in 1,5-Liter-Laborsilos in dreifacher Wiederholung (Abbildung 1, b). Das Pflanzenmaterial wurde manuell in die Laborsilos gefüllt und verdichtet, sodass kein Kopfraum verblieb. Anschließend wurden die Silos gasdicht verschlossen, wobei Gas aus dem Laborsilo entweichen, jedoch nicht in das Silo eindringen kann. Die Lagerung der Laborsilos erfolgte über einen Zeitraum von 90 Tagen bei 25 °C. Nach der Entnahme aus den Laborsilos wurden die Silagen eingefroren und bei -18 °C bis zur Analyse der Inhaltsstoffe und der Methanbildung gelagert.



Abbildung 1: a) Parzellen-Anbauversuche zur Prüfung von Energiefruchtfolgen (Foto: M. Fritz, TFZ) und b) Laborsilos zur Konservierung des Erntegutes (Foto: C. Idler)

Analyse der Methanausbeuten in Batch-Gärtests

Die Methanbildung aus den silierten Proben wurde unter Einsatz von zwei unterschiedlichen Gärtestapparaturen im Batch-Ansatz ermittelt (Abbildung 2). Insgesamt wurden 769 Silagen mit je 2 bis 6 Wiederholungen (vorwiegend mit 3 Wiederholungen) analysiert.

Etwa 80 % der Silagen wurden ohne weitere Vorbehandlung in 2-Liter-Fermentern hinsichtlich ihrer Methanbildung am Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie e.V. (ATB) untersucht und bewertet. Jeder Fermenter wurde dabei mit 1,5 Litern Inokulum, das aus Gärresten abgeschlossener Gärversuche mit pflanzlichen Biomassen im Labor besteht, und 50 g der zu untersuchenden Silage gefüllt. Das Verhältnis der organische Trockenmasse (oTM) des Substrats betrug $oTM_{\text{Substrat}} : oTM_{\text{Inokulum}} = 0,5 \pm 0,2$. Die Versuchsansätze wurden für jeweils 30 Tage im Wasserbad bei einer Temperatur von 35 °C inkubiert. Das gebildete Gasvolumen wurde in Nassgasometern aufgefangen und über Verdrängung einer mit NaCl gesättigten Sperrflüssigkeit gemessen. Die Gas-

zusammensetzung (Methan, Kohlendioxid) wurde mithilfe eines portablen Gasanalysators mit Infrarotsensoren (GA94, Ansyco) analysiert. Eine Kalibrierung der Gassensoren erfolgte vor jedem Gärtestansatz. Die Methodik zur Durchführung der Gärtests ist detailliert durch HERRMANN et al. (2011) beschrieben.

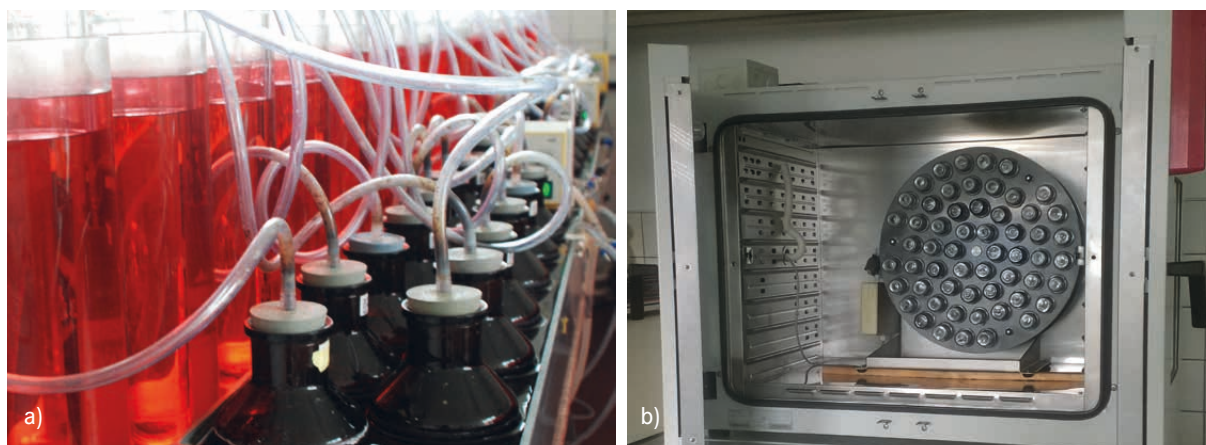


Abbildung 2: Versuchsaufbau der Batch-Gärtests: a) 2-Liter-Fermenter mit Nassgasometer am ATB (Foto: C. Herrmann), b) Hohenheimer Biogastest an der TLL (Foto: F. Hengelhaupt)

Bei etwa 20 % der Silagen erfolgte die Bestimmung der spezifischen Methanausbeuten mit dem Hohenheimer Biogastest (HBT) an der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL). Für die Analyse wurden die Silagen bei 60 °C über 24 Stunden getrocknet und anschließend auf eine Partikelgröße von < 1 mm vermahlen. Je Gärtest wurden etwa 35 g Inokulum und 0,4 g Probenmaterial (Verhältnis $\text{oTM}_{\text{Substrat}} : \text{oTM}_{\text{Inokulum}} = 0,5$) in 100-ml-Glasspritzen gefüllt, die als Fermenter und Gasspeicher dienten. Die Glasspritzen wurden in einen langsam drehenden Rotor eingesteckt, der eine kontinuierliche Durchmischung des Fermenterinhalt bewirkte, und bei 37 °C im Wärmeschrank über 30 Tage temperiert. Das entstehende Gas drückte den Stopfen aus dem Kolben der Spritzen heraus und über die Graduierung der Spritzen konnte der Füllstand bzw. das gebildete Gasvolumen ermittelt werden. Für die Analyse des Methangehaltes wurde ein externes Messgerät mit Infrarotsensor (Sensors Europe GmbH, AGM 10) verwendet. Die Funktion des HBT und die Versuchsdurchführung haben HELFFRICH und OECHSNER (2003) beschrieben.

Die spezifische Methanausbeute wurde entsprechend der VDI-Richtlinie 4630 (VDI 2006) als Summe des über den Versuchszeitraum gebildeten Methanvolumens berechnet – korrigiert um die Gasbildung aus dem Inokulum und bezogen auf die eingesetzte oTM des zugeführten Substrats. Die Gasvolumina wurden grundsätzlich auf Standardbedingungen (trockenes Gas, 273,15 K, 1013 hPa) umgerechnet und im Folgenden als Normliter (L_N) angegeben. Im Versuchsaufbau mit 2-Liter-Fermentern bewirkte das zu Beginn der Gärtests im Kopfraum der Versuchsanlage vorhandene Gas eine Verdünnung der während des Versuches gebildeten Biogaskomponenten. Die im Verlauf der Versuchsdurchführung gemessenen Methangehalte wurden daher einer Kopfraumkorrektur entsprechend der VDI-Richtlinie 4630 unterzogen (VDI 2006). Zur Absicherung der Ergebnisse und der Aktivität des verwendeten Inokulums wurden in allen Versuchsdurchläufen mikrokristalline Cellulose sowie ein laborinterner Standard analysiert, der aus getrocknetem, auf < 1 mm vermahlenem Pflanzenmaterial als Referenzsubstrat besteht. Die Gärtests wurden jeweils nach 30 Versuchstagen been-

det. Zu diesem Zeitpunkt war bei allen untersuchten Proben das Abbruchkriterium nach VDI-Richtlinie (VDI 2006) erreicht und die Gasbildung weitgehend abgeschlossen.

Chemische Analysen

Als Bezugsbasis für die Berechnung der Methanausbeute wurde der Trockenmasse(TM)- und der oTM-Gehalt der Silagen durch Trocknung bei 105 °C und anschließender Veraschung der getrockneten Proben bei 550 °C entsprechend der Standardmethoden nach VDLUFA (2006) analysiert. Zur Bewertung des Siliererfolges wurden zusätzlich der pH-Wert mittels pH-Elektrode sowie Milchsäure, Gärssäuren (Essig-, Propion-, i-Butter-, n-Butter-, i-Valerian-, n-Valerian-, Capronsäure) und Alkohole (Ethanol, Propanol, 1,2-Propandiol, 2,3-Butandiol, z.T. Methanol) der Silagen ermittelt. Die Analyse der Gärssäuren und Alkohole erfolgte gaschromatographisch, während Milchsäure mittels Flüssigchromatographie (HPLC) gemessen wurde (HERRMANN et al. 2016). Bei der Bestimmung des TM-Gehaltes gehen flüchtige organische Bestandteile der Silagen verloren und führen zu einer Unterschätzung der tatsächlich vorhandenen Trockenmasse. Daher erfolgte eine Korrektur der gemessenen TM-Gehalte, um die Verluste an organischen Säuren und Alkoholen in einer Größenordnung von 0,2 bis 2,6 % der FM, wie von WEISSBACH und KUHLA (1995), WEISSBACH und STRUBELT (2008a) sowie WEISSBACH und STRUBELT (2008b) vorgeschlagen. Die in 2-Liter-Fermentern ermittelten Methanausbeuten der frischen Silagen beziehen sich ebenfalls auf die korrigierte organische Trockenmasse (oTM_k). Die im HBT gemessenen Methanausbeuten der getrockneten Einsatzstoffe wurden keiner zusätzlichen Korrektur unterzogen, da die flüchtigen organischen Bestandteile bereits vor Zugabe in den Fermenter verloren gehen (MUKENGELE und OECHSNER 2007).

Berechnung von Richtwerten

Basierend auf den gemessenen spezifischen Methanausbeuten wurden Richtwerte berechnet, die unter günstigen Prozessbedingungen bei der anaeroben Vergärung erzielt werden können. Für die mikrokristalline Cellulose, welche in beiden Versuchslaboren als Referenzsubstrat dient, wurden im Mittel über alle Versuche 96,4 % (ATB-Versuchsstand) und 98,6 % (HBT) des Sollwertes erzielt. Dies deutet auf die Verwendung eines aktiven Inokulums bei den Untersuchungen hin (VDI 2006). Die relative Standardabweichung der Gasausbeuten lag mit 4,5 % (ATB-Versuchsstand) und 4,0 % (HBT) vergleichsweise niedrig (HEUWINKEL et al. 2009). Methanausbeuten, die in unterschiedlichen Laboren bestimmt werden, weisen häufig abweichende Werte auf. Die Vergleichbarkeit von Methanausbeuten aus unterschiedlichen Laboren ist daher begrenzt (RAPOSO et al. 2011). Wesentliche Ursachen hierfür sind der Einsatz verschiedener Versuchsaapparaturen und eine variierende Probenvorbehandlung und Versuchsdurchführung sowie der Einfluss des laborintern genutzten Inokulums (RAPOSO et al. 2011).

In der hier beschriebenen Studie wurden vorab vergleichende Untersuchungen an identischem Probenmaterial in beiden verwendeten Versuchsaapparaturen durchgeführt. In einem Ringversuch wurden geringe Abweichungen von im Mittel 2,6 % zwischen den in beiden Laboren gemessenen Methanausbeuten ermittelt (DÖHLER und WULF 2010). Zudem wurden vergleichende Untersuchungen an weiteren 36 einheitlichen Substratproben (Silagen) durchgeführt. Abweichungen lagen hier im Mittel bei 4,7 % bei einer engen Korrelation der Biogasausbeuten ($R^2 = 0,83$). Um weiterhin versuchsbedingte Variationen zu minimieren, wurden die Richtwerte als Mittelwerte aus den gemessenen Methanausbeuten relativ zu der im jeweiligen Labor ermittelten Methanausbeute von Maissilage aus dem Hauptfruchtanbau berechnet. Dies ist das in landwirtschaftlichen Biogasanlagen am häufigsten

eingesetzte Substrat. Dem Bezugswert „Mais Hauptfrucht (Hf)“ lag dabei eine hohe Anzahl an Messwerten ($n = 71$) und Proben von allen Standorten und aus 8 verschiedenen Untersuchungsjahren zugrunde. Die Maissorten wurden für den Anbau nach den jeweiligen Standortbedingungen ausgewählt. Daher gingen Daten von insgesamt 14 verschiedenen Maissorten mit früher bis sehr später Reifegruppe (Siloreifezahl S220 bis S440) in die Berechnung des Bezugswertes „Mais (Hf)“ ein. Die für die Berechnung des Bezugswertes verwendeten Maisproben wurden ausschließlich in der Teig- bis Gelbreife (BBCH 83-85) geerntet.

Die Richtwerte basieren auf Messungen an siliertem Pflanzenmaterial. Andere Studien haben gezeigt, dass die Gärqualität von Silagen die Methanausbeute signifikant beeinflusst (HERRMANN et al. 2011). Bei der Ermittlung der Richtwerte wurden daher Silagen mit schlechter bis sehr schlechter Gärqualität nach DLG (2006) nicht berücksichtigt. Bei der Silierung treten weiterhin Verluste an oTM auf. Diese sind in den Richtwerten zu den Methanausbeuten nicht enthalten, d. h. die Werte beziehen sich auf die dem Biogasprozess zugeführte oTM. Um eine höhere Genauigkeit zu erreichen, wurden die Richtwerte der Fruchtarten je nach Datengrundlage bezüglich Entwicklungsstadium zur Ernte, Schnitt oder Fruchtfolgestellung weiter präzisiert. Das Reifestadium der Pflanzen zur Ernte wurde nach MEIER (2001) als BBCH-Stadium bonitiert. Unterscheidungen in der Fruchtfolgestellung umfassen Hauptfrucht, Zweitfrucht, Winterzwischenfrucht und Sommerzwischenfrucht. Im Hauptfruchtanbau ist die Fruchtart nicht in ihrer Vegetationszeit beschränkt. Bei Anbau als Zweitfrucht wird die Kultur nach einer Winterzwischenfrucht etabliert. Dabei wird die Winterzwischenfrucht etwas später geerntet, um deren Ertrag zu erhöhen, und die Zweitfrucht später gesät. Der Ertrag der Zweitfrucht ist durch die spätere Aussaat oft etwas reduziert. Bei Winterzwischenfrüchten erfolgt die Aussaat nach der Sommerung im Spätsommer oder Herbst und die Hauptbiomassebildung und Nutzung in der Regel bis zum Rispen- oder Ährenschieben bzw. bis zur Blüte im Folgejahr. Bei der Sommerzwischenfrucht erfolgt die Hauptbiomassebildung hingegen bis zum Vegetationsende und die Ernte und Nutzung von Spätsommer bis Frühwinter.

Ergebnisse und Diskussion

Richtwerte zu Methanausbeuten von Silagen verschiedener Pflanzenarten

Die Ergebnisse der relativen Methanausbeuten bezogen auf Mais in Hauptfruchtstellung sowie der Methangehalte im Biogas für die unterschiedlichen pflanzlichen Biomassen sind in Tabelle 1 dargestellt. Für Mais in Hauptfruchtstellung als Bezugswert werden bei den durchgeführten Untersuchungen mittlere Methanausbeuten von $354,6 \text{ L}_N/\text{kg oTM}_k$ ($n = 47$, ATB) bzw. $363,9 \text{ L}_N/\text{kg oTM}_k$ ($n = 24$, TLL) gemessen. Dies stimmt mit häufig in der Literatur angegebenen Methanausbeuten von Mais gut überein (RATH et al. 2013, STOFFEL und KÖLLER 2012). Die Richtwerte für die Methanausbeuten der untersuchten Fruchtarten und Artenmischungen reichen von 35 bis 114 % der Methanausbeute von Mais (Hf) (Tabelle 1). Für eine Vielzahl der untersuchten Fruchtarten existieren bereits Daten, die in ihrer Größenordnung denen der vorliegenden Studie entsprechen (HAAG et al 2015, MAHMOOD und HONERMEIER 2012, MAST et al. 2014, MOLINUEVO-SALCES et al. 2013, SCHUMACHER 2008). Die Ergebnisse zeigen, dass einige Fruchtarten eine der Maissilage vergleichbare bzw. höhere Methanausbeute erzielen (Tabelle 1). Dies betrifft früh geschnittene Grasarten (BBCH < 55, Mitte des Ähren-/Rispen-schiebens) oder Ackerfuttermischungen, wie Einjähriges Weidelgras, Klee-gras- und Luzernegrasmischungen und Weidelgrasarten, im vegetativen Stadium geerntete Getreideganzpflanzen, wie Wintergerste, Winterroggen und Wintertriticale, und weitere Silagen von vor der Blüte geschnittenem Senf, Gerst-

gras, Topinamburknolle, Zucker- und Futterrübe. Die Methanausbeuten von Ganzpflanzengetreide (Hf) bei Ernte im reproduktiven Stadium zur Milch- bis Teigreife sowie von Sorghum liegen im Bereich von 85 bis 100 % der Methanausbeute von Mais (Hf). Bei den Getreidearten nehmen die Methanausbeuten in der Reihenfolge Wintergerste, Wintertriticale, Winterroggen und Winterweizen ab. Dieser Trend spiegelt sich auch in den Artenmischungen mit den verschiedenen Getreidearten wider. Allgemein nimmt die Methanausbeute mit höheren Gehalten an Faserbestandteilen, vor allem Lignin und Cellulose, tendenziell ab (Ergebnisse nicht gezeigt). Fruchtarten mit hohen Ligninanteilen, wie Igniscum, die überjährige Blümmischung, Miscanthus, Buchweizen (nach der Blüte), Sonnenblume oder Topinamburkraut, weisen daher im Vergleich zu Mais (Hf) niedrige Methanausbeuten (35 bis 75 %) auf.

Tabelle 1: Richtwerte für Methanausbeuten relativ zu Mais (Hf) \pm Standardabweichung und Methangehalte von Silagen verschiedener Fruchtarten bzw. Artenmischungen, Entwicklungsstadien zur Ernte sowie Trockenmasse- und Rohaschegehalte der Silagen (Spannweite der Messwerte in Klammern), alphabetisch sortiert

Fruchtart bzw. Artenmischung	Spezifizierung/ Charakteristik	n	BBCH zur Ernte	oTM-Methanausbeute (relativ zu Mais Hf) ¹⁾		Methangehalt in Vol-%	TM _k -Gehalt in %	Rohasche in % d. TM _k
				100	\pm			
Mais	Hf	71 ^{A,H}	83-87	100	$\pm 5,5$	55,3	31 (25-38)	4 (3-6)
Amarant		2 ^A	75-79	84	$\pm 3,9$	58,8	21 (19-23)	14 (13-14)
Blümmischung	Biogas, einjährig	2 ^A	61-69	69	$\pm 0,6$	59,2	20 (20-21)	11
Blümmischung	Biogas, überjährig	1 ^A	85	56		64,2	44	9
Bokharaklee (Steinklee)	Hf	9 ^A	63-69	78	$\pm 7,8$	58,7	29 (20-35)	7 (5-9)
Buchweizen	BBCH \leq 59	1 ^A	51	89		63,0	12	9
Buchweizen	BBCH 61 - 89	8 ^A	75-87	72	$\pm 2,7$	56,4	30 (25-32)	9 (7-10)
Buchweizen	BBCH \geq 91	6 ^A	91-95	67	$\pm 8,5$	58,1	24 (18-30)	11 (8-15)
Buchweizen/ Phacelia	SZwF	1 ^A	71	71		57,6	26	9
Durchwachsene Silphie		5 ^A	77-85	67	$\pm 5,2$	59,6	28 (24-31)	12 (11-13)
Einjähriges Weidelgras	SZwF, früher Schnitt, BBCH < 55	6 ^A	33-51	103	$\pm 14,9$	57,9	34 (15-58) ³⁾	12 (9-17)
Einjähriges Weidelgras	SZwF, später Schnitt, BBCH \geq 55	13 ^{A,H}	59-71	92	$\pm 9,9$	58,5	26 (16-41) ³⁾	11 (8-14)
Futterrübe	Rübenkörper, geköpft bzw. entblattet	2 ^A	49	112	$\pm 2,4$	57,3	19 (19-20)	6 (5-8)
Gerstgras (Gerste/Weidelgras)	Hf	2 ^A	77-83	100	$\pm 1,5$	54,8	27 (25-30)	9 (7-11)
Hafer	Milch- bis Teigreife	15 ^{A,H}	73-85	92	$\pm 7,2$	57,0	37 (26-54)	7 (6-9)
Hafer/ S.Wicke	Hf	1 ^A	71/65	109		63,7	21	12
Igniscum	1. Schnitt	1 ^A	k.A.	35		66,7	25	7
Igniscum	2. Schnitt	1 ^A	k.A.	41		62,9	19	9
Kleegrasmischung	1. Schnitt, früh ⁴⁾	7 ^A	47-51	108	$\pm 12,1$	57,7	26 (15-35) ³⁾	10 (10-13)
Kleegrasmischung	1. Schnitt, spät ⁵⁾	7 ^A	57-59	97	$\pm 9,3$	57,4	27 (21-37) ³⁾	9 (8-11)

Fortsetzung der Tabelle nächste Seite, Fußnoten am Ende der Tabelle

Fruchtart bzw. Artenmischung	Spezifizierung/ Charakteristik	n	BBCH zur Ernte	oTM-Methan- ausbeute (relativ zu Mais Hf) ¹⁾		Methan- gehalt in Vol-%	TM _k - Gehalt in %	Rohasche in % d. TM _k
					in %			
Kleegrasmischung	Folgeschnitte, früh ⁴⁾	5 ^A	59	94	±12,5	57,6	38 (26-53) ³⁾	11 (9-12)
Kleegrasmischung	Folgeschnitte, spät ⁵⁾	14 ^A	59-67	89	±10,7	58,8	35 (22-53) ³⁾	10 (8-12)
Landsberger Gemeinde	1. Schnitt	3 ^{A,H}	59-61	99	±6,1	59,7	22 (17-28)	11 (10-12)
Leindotter	Hf	5 ^A	80-83	83	±4,6	63,1	30 (29-31)	13 (10-20)
Luzerne	1. Schnitt, früh ⁴⁾	2 ^A	49	98	±1,4	59,9	22 (21-24) ³⁾	11
Luzerne	1. Schnitt, spät ⁵⁾	2 ^A	57-59	87	±2,1	59,2	34 (30-37) ³⁾	10 (9-11)
Luzerne	Folgeschnitte, früh ⁴⁾	3 ^A	49-51	80	±7,8	57,7	49 (42-56) ³⁾	11
Luzerne	Folgeschnitte, spät ⁵⁾	5 ^A	59-67	77	±5,8	58,8	43 (34-52) ³⁾	10 (8-11)
Luzernegras- mischung	1. Schnitt, früh ⁴⁾	5 ^{A,H}	49-55	101	±9,0	58,0	29 (19-42) ³⁾	11 (11-12)
Luzernegras- mischung	1. Schnitt, spät ⁵⁾	14 ^{A,H}	57-61	91	±6,2	60,0	23 (13-44) ³⁾	11 (9-16)
Luzernegras- mischung	Folgeschnitte, früh ⁴⁾	4 ^A	51	82	±8,8	56,9	47 (36-59) ³⁾	11 (10-12)
Luzernegras- mischung	Folgeschnitte, spät ⁵⁾	24 ^{A,H}	55-67	83	±6,5	58,6	33 (16-50) ³⁾	11 (9-15)
Mais	Zf	27 ^{A,H}	83-87	102	±5,4	55,4	31 (22-42)	4 (3-7)
Mais	mangelnde Abreife	11 ^{A,H}	69-79	98	±5,5	55,4	21 (15-28)	5 (4-6)
Markstammkohl	Zf	2 ^A	41-50	98	±0,0	54,8	15 (15-16)	13 (11-14)
Miscanthus		4 ^A	k.A.	64	±8,7	61,1	34 (30-40)	6 (5-7)
Ölrettich	SZwF	5 ^A	59-61	79	±7,0	58,8	13 (9-17)	15 (12-18)
Phacelia	bis Ende Blüte	6 ^{A,H}	51-65	96	±14,6	61,5	13 (9-19)	16 (13-23)
Phacelia	ab Fruchtentwicklung	4 ^A	69-71	87	±8,4	69,8	18 (12-26)	17 (14-18)
Quinoa	Teigreife bis Totreife	7 ^A	85-95	82	±4,3	58,5	21 (19-22)	16 (11-18)
Raps	Hf, Blüte und Frucht- entwicklung	2 ^A	65-73	88	±0,2	57,6	24 (21-26)	8
Raps	Hf, Samenreife	3 ^A	85-86	77	±2,7	60,4	29 (27-32)	9 (8-10)
Riesenweizengras	in der Blüte	8 ^A	61-69	83	±6,8	57,7	30 (19-42)	8 (5-13)
S.Erbse	zur Knospe	1 ^A	55	84		62,1	13	9
S.Erbse	Hf	1 ^A	76	72		60,5	25	10
S.Erbse/ Hafer/ Leindotter	Milch- bis Teigreife	5 ^A	71-83	92	±8,4	56,9	39 (35-43)	6 (5-7)
S.Gerste	Milch- bis Teigreife	8 ^{A,H}	77-85	96	±4,4	55,8	38 (31-59)	6 (3-7)
S.Roggen	Milch- bis Teigreife	7 ^A	71-83	86	±6,0	55,6	40 (20-57)	5 (4-7)
S.Triticale/ Hafer	Milch- bis Teigreife	1 ^A	75	91		56,6	39	5
Sandhafer	Milchreife	2 ^A	72-75	98	±1,5	61,4	27	15 (13-17)
Sandhafer	Teig- bis Totreife	6 ^A	83-91	89	±3,1	59,3	23 (22-24)	9 (8-10)
Senf	bis Ende Knospe	2 ^A	39-51	104	±3,2	58,8	14 (13-15)	14 (13-15)
Senf	ab Blüte	1 ^A	65	83		59,8	22	10

Fortsetzung der Tabelle nächste Seite, Fußnoten am Ende der Tabelle

Fruchtart bzw. Artenmischung	Spezifizierung/ Charakteristik	n	BBCH zur Ernte	oTM-Methan- ausbeute (relativ zu Mais Hf) ¹⁾		Methan- gehalt in Vol-%	TM _k - Gehalt in %	Rohasche in % d. TM _k
				in %	±			
Sonnenblume		11 ^A	71-87	75	±7,8	56,9	24 (17-36)	12 (10-19)
Sorghum <i>bicolor x bicolor</i>	TM < 26 % ⁶⁾	16 ^{A,H}	34-82	94	±6,5	57,2	22 (15-28)	7 (5-10)
Sorghum <i>bicolor x bicolor</i>	TM ≥ 26 % ⁶⁾ + BBCH < 69	5 ^A	59-65	88	±4,4	58,2	27 (24-29)	5 (4-6)
Sorghum <i>bicolor x bicolor</i>	TM ≥ 26 % ⁶⁾ + BBCH ≥ 69	9 ^A	75	86	±5,8	56,0	27 (23-29)	5 (4-6)
Sorghum <i>bicolor x sudanense</i>	TM < 26 % ⁶⁾	35 ^{A,H}	33-83	94	±7,6	58,2	21 (15-25)	7 (5-13)
Sorghum <i>bicolor x sudanense</i>	TM ≥ 26 % ⁶⁾ + BBCH ≥ 69	37 ^{A,H}	69-85	88	±5,8	56,5	29 (24-36)	5 (4-8)
Topinambur	Knolle	1 ^H	47	107		55,1	19	8
Topinambur	Kraut	10 ^{A,H}	39-63	69	±6,2	55,0	28 (14-42)	10 (8-14)
W.Gerste	WZwF, bis Ende Ährenschieben	7 ^{A,H}	29-59	106	±4,6	57,2	23 (17-39) ³⁾	9 (5-13)
W.Gerste	zur Blüte	3 ^{A,H}	63-69	98	±2,8	56,7	26 (24-28)	7 (5-8)
W.Gerste	Hf, Milch- bis Teigreife	37 ^{A,H}	71-85	99	±5,7	56,4	32 (24-52)	6 (4-9)
W.Gerste/ W.Rübsen	bis Ende Ährenschieben	2 ^A	43/65- 51/61	87	±13,5	58,9	33 (18-47)	11 (10-12)
W.Gerste/ W.Triticale/ W.Weizen	Hf, Milch- bis Teigreife	3 ^H	79-83	99	±1,7	56,2	43 (35-47)	6 (5-7)
W.Gerste/ W.Erbse	Gerste: Milch- bis Teigreife	2 ^A	83/67- 83/69	94	±8,3	59,1	27 (25-29)	7
W.Roggen	WZwF, bis Ende Ährenschieben	30 ^{A,H}	41-59	105	±5,4	57,9	22 (14-39) ³⁾	8 (6-11)
W.Roggen	zur Blüte	4 ^{A,H}	61-65	95	±4,9	57,2	29 (27-32)	6 (5-7)
W.Roggen	Hf, Milch- bis Teigreife	19 ^{A,H}	70-87	95	±7,9	56,0	35 (26-53)	5 (4-8)
W.Roggen/ Pannon.Wicke		2 ^A	85/79- 87/78	87	±0,9	58,7	34 (31-36)	6 (6-7)
W.Roggen/ W.Erbse/ Wiesenschwingel	Roggen: Milch- bis Teigreife	1 ^A	65/75/69	86		57,2	28	7
W.Roggen/ W.Triticale/ Wiesenschwingel ²⁾	Milch- bis Teigreife	6 ^A	73-83	91	±6,5	56,1	33 (29-36)	6 (5-8)
W.Roggen/ W.Wicken ²⁾	Hf, Milch- bis Teigreife	13 ^A	71-85	87	±5,4	56,3	31 (19-39)	6 (5-8)
W.Roggen/ Zottelwicke	Roggen: Milch- bis Teigreife	2 ^A	85/75- 87/73	85	±0,9	58,4	33 (31-35)	6 (5-7)
W.Rübsen		2 ^A	65-73	99	±14,2	57,1	16 (14-18)	8 (8-9)
W.Triticale	WZwF, bis Ende Ährenschieben	5 ^{A,H}	29-59	104	±8,8	56,3	26 (16-42) ³⁾	9 (6-10)
W.Triticale	zur Blüte	7 ^{A,H}	65-69	101	±4,8	57,4	33 (27-37)	6 (5-8)
W.Triticale	Hf, Milch- bis Teigreife	38 ^{A,H}	71-85	97	±5,3	55,6	35 (25-55)	5 (3-10)

Fortsetzung der Tabelle nächste Seite, Fußnoten am Ende der Tabelle

Fruchtart bzw. Artenmischung	Spezifizierung/ Charakteristik	n	BBCH zur Ernte	oTM-Methan- ausbeute (relativ zu Mais Hf) ¹⁾		Methan- gehalt in Vol-%	TM _k - Gehalt in %	Rohasche in % d. TM _k
				in %				
W.Triticale/ Pannon. Wicke		2 ^A	85/78- 85/79	91	±2,3	56,8	32 (31-33)	7
W.Triticale/ W.Ackerbohne	W.Triticale: Milch- bis Teigreife	2 ^A	83/78- 85/80	91	±3,9	58,2	31 (30-32)	7 (6-7)
W.Triticale/ W.Erbse ²⁾	W.Triticale: Milch- bis Teigreife	4 ^A	73/88- 85/79	89	±4,1	58,1	29 (20-33)	8 (7-10)
W.Triticale/ W.Weizen	Hf	1 ^H	75	101		57,4	26	7
W.Triticale/ W.Wicken ²⁾	Milch- bis Teigreife	3 ^A	75/55- 83/65	86	±10,0	59,9	29 (19-40)	8 (6-13)
W.Triticale/ Zottelwicke	W.Triticale: Milch- bis Teigreife	2 ^A	k.A.	92	±0,9	57,0	31 (29-33)	7 (7-8)
W.Weizen	Hf, Milch- bis Teigreife	3 ^A	83-85	91	±8,9	54,3	49 (40-58)	4 (4-5)
Weidelgrasarten	1. Schnitt, früh ⁴⁾	19 ^A	25-51	114	±9,6	58,3	24 (11-37)	10 (9-16)
Weidelgrasarten	1. Schnitt, spät ⁵⁾	18 ^A	57-69	105	±9,2	57,2	27 (14-44) ³⁾	9 (7-14)
Weidelgrasarten	Folgeschnitte, früh ⁴⁾	10 ^A	51-60	103	±2,5	57,2	28 (22-33) ³⁾	10 (7-12)
Weidelgrasarten	Folgeschnitte, spät ⁵⁾	28 ^A	57-81	96	±9,7	57,3	33 (19-48) ³⁾	10 (7-15)
Wiesenschwingel	1. Schnitt, spät	2 ^A	65-69	86	±9,0	57,6	36 (27-44) ³⁾	8 (7-8)
Wiesenschwingel	Folgeschnitte, spät	1 ^A	75	87		54,7	21	11
Zuckerrübe	Rübenkörper, geköpft bzw. entblattet	6 ^A	39-49	107	±5,6	53,0	21 (17-25)	6 (3-12)

n: Anzahl der untersuchten Silagen

BBCH: Entwicklungsstadium nach Meier (2001)

oTM: organische Trockenmasse

TM_k: korrigierte Trockenmasse

W.: Winter-; S.: Sommer-; Hf: Hauptfrucht; Zf: Zweitfrucht; WZwF: Winterzwischenfrucht; SZwF: Sommerzwischenfrucht

^A Messwerte aus 2-Liter-Fermentern mit Nassgasometern (Versuchsstand ATB); ^H Messwerte aus dem Hohenheimer Biogastest (Versuchsstand TLL)

¹⁾ Vergleichswert oTM-Methanausbeute Mais Hf: 354,6 L_N/kg oTM (ATB-Versuchsstand), 363,9 L_N/kg oTM (HBT).

²⁾ Teilweise mit Untersaat Weidelgras bzw. Wiesenschwingel.

³⁾ Zum Teil nach der Ernte angewelkt.

⁴⁾ Früher Schnitt: hohe Schnittfrequenz bzw. BBCH < 55.

⁵⁾ Später Schnitt: niedrige Schnittfrequenz bzw. BBCH ≥ 55.

⁶⁾ Einordnung nach TM-Gehalt zur Ernte.

Einfluss von Anbau- und Erntebedingungen auf die Methanbildung

Neben der Fruchtart haben auch die Reife zur Ernte, das Schnittregime bei mehrschnittig genutzten Pflanzenarten sowie die Fruchtfolgestellung einen wesentlichen Einfluss auf die erzielbare spezifische Methanausbeute bei der Biogasproduktion. In Tabelle 1 erfolgt daher für eine Vielzahl der Fruchtarten eine weitere Spezifizierung der Richtwerte der Methanausbeuten, die sich weitgehend am Entwicklungsstadium des Pflanzenbestandes orientiert. Ursache für die Änderung des Methanbildungspotenzials im Verlauf der Vegetation ist eine mit fortschreitender Reife der Pflanzen zunehmende Lignifizierung. Da Lignin oder komplexe Lignocelluloseverbindungen schwer oder gar nicht im Biogasprozess zu Methan umsetzbar sind, mindert eine zunehmende Reife zur Ernte in der Regel die spezifische Methanausbeute bezogen auf die oTM.

Bei Anbau als Zweitfrucht oder Zwischenfrucht erfolgt die Ernte üblicherweise zu einem etwas früheren Entwicklungsstadium verglichen mit dem Hauptfruchtanbau. Dies spiegelt sich in den Methanausbeuten wider (Tabelle 1). Bei den Wintergetreidearten liegen die Methanausbeuten bei Ernte

bis zum Ährenschieben im Mittel um 7 bis 12 % bezogen auf Mais (Hf) höher als bei Ernte zur Milch- bis Teigreife. Früh (BBCH < 55, bis Mitte des Ähren-/Rispschiebens) bzw. mit hoher Frequenz geschnittene Gräser, Klee gras- oder Luzernegrasmischungen und Luzerne weisen im Mittel um 4 bis 19 % höhere Methanausbeuten relativ zu Mais (Hf) auf als bei spätem Schnitt (BBCH > 55) bzw. niedriger Schnitffrequenz. Zudem können aus der Biomasse der ersten Schnitte im Mittel um 7 bis 19 % höhere Methanausbeuten relativ zu Mais (Hf) erzielt werden, verglichen mit den Folgeschnitten. Eine Abnahme der relativen Methanausbeute mit zunehmender Reife zur Ernte wird auch für Buchweizen, Phacelia, Raps, Sandhafer, Sommererbse und Senf ermittelt (Tabelle 1). Eine Ausnahme bildet Sorghum. Bei Sorghum sind erhebliche Unterschiede in der TM-Entwicklung, der Lignifizierung und des Entwicklungsstadiums zur Ernte festzustellen. Es wird daher eine Unterteilung nach TM-Gehalt und Entwicklungsstadium zur Ernte vorgeschlagen (Tabelle 1).

Anwendung der Richtwerte – Möglichkeiten und Grenzen

Die Richtwerte in Tabelle 1 können als approximative Werte in Verbindung mit Biomasseerträgen auf dem Feld zur Berechnung von Methanhektarerträgen und zur Bewertung von Energiefruchtfolgen genutzt werden, z. B. hinsichtlich energetischer, ökonomischer oder ökologischer Effekte. Weiterhin sind die Richtwerte zur Planung und Auslegung von Biogasanlagen bzw. zur Entscheidung hinsichtlich des Anbaus und Einsatzes alternativer pflanzlicher Kosubstrate in bestehenden Biogasanlagen von Nutzen. Die Verwendung der relativen Werte ermöglicht dabei über die Wahl des Referenzwertes „Mais Hf“ – je nach zugrunde liegender Fragestellung – den Bezug zu laboreigenen oder praxisrelevanten Methanausbeuten bzw. den Bezug zu allgemein genutzten Standardwerten, z. B. nach KTBL (2014) (Tabelle 2). Über eigene Messwerte oder die in Tabelle 1 angegebenen mittleren Werte zu Methangehalten und TM- bzw. Rohasche-Gehalten kann auf Biogasausbeuten sowie auf Gasausbeuten mit Bezug auf Trockenmasse oder Frischmasse umgerechnet werden. Generell sind für Bilanzierungen oder die Berechnung von Methanhektarerträgen zusätzlich Verluste bei der Silierung zu berücksichtigen. Verluste, die bei der Ernte und Silierung auftreten, umfassen Feldverluste, Sickersaftverluste, Gärverluste während des Silierprozesses, Randverluste im Silo sowie Entnahmeverluste. Sie können beispielsweise nach JEROCH et al. (1993) abgeschätzt werden.

Die in Tabelle 1 aufgeführten Richtwerte werden im Rahmen des Verbundprojektes „EVA“ zur ganzheitlichen ökonomischen und ökologischen Bewertung von Biogasfruchtfolgen angewendet. Im Folgenden wird beispielhaft die Nutzung der Richtwerte zur Berechnung des Methanhektarertrages und Energieertrages von Wintertriticale näher erläutert (Tabelle 2).

Tabelle 2: Anwendung der Richtwerte zu Methanausbeuten für die Berechnung des Methanhektarertrages und Energieertrages am Beispiel von Wintertriticale, 2007 in Dornburg angebaut

Rechenschritt	Einheit	Werte	Kategorisierung
Fruchtart		W.Triticale, Ganzpflanze	Feldwerte
BBCH		75 (Mitte Milchreife)	Feldwerte, Bonitur
FM-Ertrag	t/ha	38,79	Feldwerte, Messwert
TM-Gehalt	% der FM	31,9	Feldwerte, Messwert
TM-Ertrag	t/ha	12,4	Feldwerte, berechnet
Feldverlust	%	2	Feldwerte, Kennzahl nach (JEROCH 1993)
TM-Ertrag mit Feldverlust	t/ha	12,1	Feldwerte, berechnet
Sickersaftverlust	% der TM	0	Silage, Kennzahl nach (JEROCH 1993)
Gärverlust	% der TM	5	Silage, Kennzahl nach (JEROCH 1993)
Randverlust	% der TM	2	Silage, Kennzahl nach (JEROCH 1993)
TM-Ertrag mit Feld- und Silageverlusten	dt/ha	11,3	Silage, berechnet
Entnahmeverlust	% der TM	1	Silage, Kennzahl nach (JEROCH 1993)
TM-Ertrag Silage	t/ha	11,2	Silage, berechnet
Gesamtverluste Silieren	% der TM	9,8	Silage, berechnet
Rohasche	% der TM	5,0	Methanertrag, Kennzahl nach Tabelle 1
oTM-Ertrag Silage	t/ha	10,6	Methanertrag, berechnet
Mais (Hf) Referenzwert Methanausbeute, nach KTBL	m^3_N/t oTM	338	Methanertrag, Kennzahl nach KTBL (2014) (oder anderer Referenzwert)
W.Triticale, relative Methanausbeute	% von Mais KTBL	97	Methanertrag, Kennzahl nach Tabelle 1
Richtwert Methanausbeute bezogen auf oTM	m^3_N/t oTM	327,9	Methanertrag, berechnet
Methan-Hektarertrag	m^3_N/ha	3475	Methanertrag, berechnet
Heizwert Methan	MJ/m^3_N	35,9	Energieertrag, berechnet
Energieertrag	GJ/ha	124,8	Energieertrag, berechnet

Die in Tabelle 1 gelisteten Richtwerte geben Informationen über die für die aufgeführten Fruchtarten und Eingruppierungen näherungsweise erzielbaren oTM-Methanausbeuten. Das exakte Methanbildungspotenzial einer pflanzlichen Biomasse ist jedoch von der tatsächlichen chemischen Zusammensetzung abhängig, insbesondere von dem Faseranteil bzw. Gehalt an Lignin und Cellulose sowie den Rohnährstoffgehalten (HERRMANN et al. 2016). Diese unterliegen natürlichen Schwankungen und werden von einer Vielzahl weiterer Faktoren, wie der gewählten Sorte, den Standortbedingungen und Witterungsbedingungen im Anbaujahr oder dem Siliiverlauf, beeinflusst. Bei Artenmischungen ist zudem der Anteil der einzelnen Mischungspartner im Gemenge ausschlaggebend. Zur Beantwortung von wissenschaftlichen Fragestellungen, für die eine exakte Kenntnis der spezifischen Methanausbeuten einzelner pflanzlicher Biomassen notwendig ist, sind weiterhin detaillierte Laborversuche zur Ermittlung von Methanausbeuten und zur chemischen Charakterisierung der Einsatzstoffe zu empfehlen.

Bei Übertragung der Richtwerte auf die Praxis ist zu berücksichtigen, dass neben den Substrateigenschaften auch die Prozessbedingungen bei der kontinuierlichen Prozessführung, insbesondere die Verweilzeit in den beheizten Prozessstufen, die Faulraumbelastung, die Gärtemperatur und der Substratmix, d. h. die Verfügbarkeit von Makro- und Mikronährstoffen, die Gasbildung beeinflussen. Auftretende Prozessstörungen können zu einer erheblichen Minderung der Gasausbeute und des Methangehaltes im Biogas führen. Die Verwendung eines praxisrelevanten Referenzwertes für „Mais Hf“ kann diese Einflüsse zum Teil kompensieren. Der Einfluss einzelner Faktoren, beispielsweise der Verweilzeit, ist jedoch auch von der Kinetik des Abbaus der Einsatzstoffe abhängig, was durch Verwendung der relativen Werte nicht berücksichtigt wird. Insbesondere bei kurzer Verweilzeit im Fermenter können sich daher die Relationen der Methanausbeuten unterschiedlicher Silagen zueinander ändern. Allgemein ist davon auszugehen, dass die Richtwerte auf Grunddaten basieren, die unter günstigen Prozessbedingungen gewonnen wurden.

Schlussfolgerungen

Das Methanbildungspotenzial ist ein entscheidendes Qualitätsmerkmal pflanzlicher Biomassen bei ihrer Nutzung als Einsatzstoff für die Biogasproduktion. Ergebnisse der vorliegenden Untersuchungen bestätigen, dass die Wahl der Fruchtart, die Eingliederung in die Fruchtfolge bzw. das Anbausystem und damit verbunden die Reife der Pflanzen zur Ernte die Haupteinflussfaktoren bezüglich der unter günstigen Prozessbedingungen erzielbaren Methanausbeute in der Biogasanlage sind. Die Richtwerte für Methanausbeuten relativ zu Mais (Hf) wurden auf experimenteller Basis für 93 silierete pflanzliche Biomassen aus Energiefruchtfolgen ermittelt. So kann für eine große Bandbreite von Einsatzstoffen die spezifische Methanausbeute abgeschätzt werden, die je Fruchtart und Fruchtfolgestellung, Schnitt bzw. TM-Bereich oder Reifestadium zur Ernte erzielt werden kann. Damit ist eine umfassende Datengrundlage gegeben, die in Verbindung mit Biomasseerträgen für die Konzeption und Bewertung nachhaltiger Biogasfruchtfolgen herangezogen werden kann. Trotz sehr umfangreicher Messdaten ist die Datenbasis der Fermentationsversuche begrenzt. Eine weitere Ergänzung und Erhöhung der Datenbasis kann zukünftig die Aussagekraft der Richtwerte, insbesondere für die mit geringem Stichprobenumfang untersuchten Silagen, weiter verbessern. Zudem ist die Ergänzung um bisher nicht berücksichtigte, vielversprechende Fruchtarten möglich und zu empfehlen.

Literatur

- Baserga, U. (1998): Landwirtschaftliche Co-Vergärungs-Biogasanlagen - Biogas aus organischen Reststoffen und Energiegras. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik (FAT), Tänikon, FAT-Berichte 512, S. 1-11
- BMEL (2015): Nutzen und Bedeutung der Bioenergie. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). https://www.bmel.de/DE/Landwirtschaft/Nachwachsende-Rohstoffe/Bioenergie/_texte/Bioenergie.html, Zugriff am 13.06.2016
- Czepuck, K.; Oechsner, H.; Schumacher, B.; Lemmer, A. (2006): Biogasausbeuten im Labor im Vergleich zur rechnerischen Abschätzung. Landtechnik 61(2), S. 82-83, <http://dx.doi.org/10.15150/lt.2006.1060>
- DLG (2006): DLG-Information 2/2006. Grobfutterbewertung – Teil B: DLG-Schlüssel zur Beurteilung der Gärqualität von Grünfuttersilagen auf der Basis der chemischen Untersuchung.

- Döhler, H.; Wulf, S. (2010): Abschlussbericht des Verbundvorhabens „Bewertung nachwachsender Rohstoffe zur Biogaserzeugung für die Pflanzenzüchtung“ Teilprojekt 3: „Biogaserträge in Laborversuchen – Fragen zur Vergleichbarkeit und Übertragbarkeit.“ Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR), FKZ 22019205, <http://www.fnr-server.de/ftp/pdf/berichte/22019205.pdf>, Zugriff am 11.06.2016
- Eckner, J.; Glemnitz, M.; Aurbacher, J.; Heiermann, M.; Graf, T.; Winter, K. (2015): Ackerbauliche, ökologische und ökonomische Bewertungen von Energiepflanzenfruchtfolgen – Ergebnisse aus dem EVA-Verbund. In: Multifunktionale Agrarlandschaften – Pflanzenbaulicher Anspruch, Biodiversität, Ökosystemdienstleistungen: Kurzfassungen der Vorträge und Poster. Hg. Kage, H.; Sieling, K.; Francke-Weltmann, L., 58. Jahrestagung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften, 22.–24.09.2015, Braunschweig. Halm, Göttingen, S. 17–18
- Eckner, J.; Strauss, C.; Nehring, A.; Vetter, A. (2013): Abschlussbericht zum Teilprojekt 1 „Entwicklung und Optimierung von standortangepassten Anbausystemen für Energiepflanzen im Fruchtfolgeregime“, FKZ: 22013008, Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Jena, www.eva-verbund.de/uploads/media/AbschB_TP1_EVAll.pdf, Zugriff am 23.06.2016
- Glemnitz, M.; Eckner, J.; Aurbacher, J.; Kornatz, P.; Müller, J.; Heiermann, M.; Peter, C. (2015): Crop rotations as “cornerstone” of sustainable energy cropping – Integrative evaluation of their agronomic, ecologic, economic and resource efficiency effects. In: Biomass and energy crops V, Association of Applied Biologists, 20.–22.10.2015, Brussels, Belgium, Wellesbourne, pp. 117–128
- Haag, N.L.; Nägele, H.-J.; Reiss, K.; Biertümpfel, A.; Oechsner, H. (2015): Methane formation potential of cup plant (*Silphium perfoliatum*). Biomass and Bioenergy 75, S. 126–133, <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.02.012>
- Helffrich, D.; Oechsner, H. (2003): Hohenheimer Biogasertragstest. Landtechnik 58(3), S. 148–149, <http://dx.doi.org/10.15150/lt.2003.1461>
- Herrmann, C.; Heiermann, M.; Idler, C. (2011): Effects of ensiling, silage additives and storage period on methane formation of biogas crops. Bioresource Technology 102, pp. 5153–5161, <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2011.01.012>
- Herrmann, C.; Idler, C.; Heiermann, M. (2016): Biogas crops grown in energy crop rotations: Linking chemical composition and methane production characteristics. Bioresource Technology 206, pp. 23–35, <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2016.01.058>
- Heuwinkel, H.; Aschmann, A.; Gerlach, R.; Gronauer, A. (2009). Die Genauigkeit der Messung des Gasertragspotentials von Substraten mit der Batchmethode. In: Internationale Wissenschaftstagung Biogas Science 2009, Band 1, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, 02.–04.12.2009, Erding, S. 95–103
- Jeroch, H.; Flachowsky, G.; Weißbach, F. (1993): Futtermittelkunde. München, Elsevier
- KTBL (2014): Wirtschaftlichkeitsrechner Biogas. <http://daten.ktbl.de/biogas/startseite.do>, Zugriff am 23.06.2016
- KTBL (2015): Gasausbeute in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Darmstadt, 3. Auflage
- LfL (2016): Biogausausbeuten verschiedener Substrate. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), <http://www.lfl.bayern.de/iba/energie/049711/>, Zugriff am 13.06.2016
- Meier, U. (2001): Entwicklungsstadien mono- und dikotyle Pflanzen – BBCH Monografie. Berlin und Braunschweig, Biologische Bundesanstalt für Land und Forstwirtschaft, 2. Auflage
- Mahmood, A.; Honermeier, B. (2012): Chemical composition and methane yield of sorghum cultivars with contrasting row spacing. Field Crops Research 128, pp. 27–33, <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2011.12.010>
- Mast, B.; Lemmer, A.; Oechsner, H.; Reinhardt-Hanisch, A.; Claupein, W.; Graeff-Hönninger, S. (2014): Methane yield potential of novel perennial biogas crops influenced by harvest date. Industrial Crops and Products 58, pp. 194–203, <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.04.017>
- Mukengele, M.; Oechsner, H. (2007): Einfluss der Silierung auf den spezifischen Methanertrag bei Mais. Landtechnik 62(1), S. 20–21, <http://dx.doi.org/10.15150/lt.2007.922>
- Molinuevo-Salces, B.; Larsen, S.B.; Ahring, B.K.; Uellendahl, H. (2013): Biogas production from catch crops: Evaluation of biomass yield and methane potential of catch crops in organic crop rotations. Biomass and Bioenergy 59, pp. 285–292, <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.10.008>

- Raposo, F.; Fernández-Cegrí, V.; De la Rubia, M.A.; Borja, R.; Béline, F.; Cavinato, C.; Demirer, G.; Fernández, B.; Fernández-Polanco, M.; Frigon, J.C.; Ganesh, R.; Kaparaju, P.; Koubova, J.; Méndez, R.; Menin, G.; Peene, A.; Scherer, P.; Torrijos, M.; Uellendahl, H.; Wierinck, I.; de Wilde, V. (2011): Biochemical methane potential (BMP) of solid organic substrates: evaluation of anaerobic biodegradability using data from an international interlaboratory study. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology* 86, pp. 1088–1098, <http://dx.doi.org/10.1002/jctb.2622>
- Rath, J.; Heuwinkel, H.; Herrmann, A. (2013): Specific Biogas Yield of Maize Can Be Predicted by the Interaction of Four Biochemical Constituents. *BioEnergy Research* 6, pp. 939–952, <http://dx.doi.org/10.1007/s12155-013-9318-3>
- Rath, J.; Heuwinkel, H.; Taube, F.; Herrmann, A. (2015): Predicting Specific Biogas Yield of Maize-Validation of Different Model Approaches. *BioEnergy Research* 8, pp. 832–842, <http://dx.doi.org/10.1007/s12155-014-9562-1>
- Schumacher, B. (2008). Untersuchungen zur Aufbereitung und Umwandlung von Energiepflanzen in Biogas und Bioethanol. Dissertation, Universität Hohenheim, <http://opus.uni-hohenheim.de/volltexte/2008/316/>, Zugriff am 05.09.2016
- Stoffel, D.; Köller, K. (2012): Qualität von Biogasmais – Berechnung des Methanertrages von Silomais. *Landtechnik* 67(5), S. 354–357, <http://dx.doi.org/10.1515/lt.2012.335>
- VDI (2006): VDI-Richtlinie 4630: Vergärung organischer Stoffe – Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche. Berlin, Beuth Verlag
- VDLUFA (2006): Die chemische Untersuchung von Futtermitteln. Methodenbuch Band III. 6. Ergänzungslieferung, Darmstadt, 3. Auflage
- Weißbach, F.; Kuhla, S. (1995): Substance losses in determining the dry matter content of silage and green fodder: arising errors and possibilities of correction. *Übersicht Tierernährung* 23, S. 189–214
- Weißbach, F.; Strubelt, C. (2008a): Die Korrektur des Trockensubstanzgehaltes von Maissilagen als Substrat für Biogasanlagen. *Landtechnik* 63(2), S. 82–83, <http://dx.doi.org/10.1515/lt.2008.779>
- Weißbach, F.; Strubelt, C. (2008b): Die Korrektur des Trockensubstanzgehaltes von Zuckerrübensilagen als Substrat für Biogasanlagen. *Landtechnik* 63(6), S. 354–355, <http://dx.doi.org/10.1515/lt.2008.879>

Autoren

Dr. Christiane Herrmann ist wissenschaftliche Mitarbeiterin in der Abteilung Bioverfahrenstechnik am Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie e.V. (ATB), Max-Eyth-Allee 100, 14469 Potsdam. E-Mail: cherrmann@atb-potsdam.de.

Dipl.-Ing. (FH) Vincent Plogsties ist technischer Mitarbeiter in der Abteilung Technikbewertung und Stoffkreisläufe am Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie e.V. (ATB), Max-Eyth-Allee 100, 14469 Potsdam.

Dr. Matthias Willms ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Sozioökonomie im Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung e.V., Eberswalder Straße 84, 15374 Müncheberg.

Dipl.-Ing (FH) Frank Hengelhaupt ist technischer Sachbearbeiter im Referat „Boden- und Düngemitteluntersuchung“ an der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Naumburger Straße 98, 07743 Jena.

Dipl.-Wirtsch.-Ing. (FH) Veronika Eberl ist wissenschaftliche Mitarbeiterin im Sachgebiet für Rohstoffpflanzen und Stoffflüsse am Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), Schulgasse 18, 94315 Straubing.

Jens Eckner ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Referat „Nachwachsende Rohstoffe“ der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Naumburger Straße 98, 07743 Jena.

Dr. Christoph Strauß war wissenschaftlicher Mitarbeiter im Referat „Nachwachsende Rohstoffe“ der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft. Er ist derzeit Post-Doc am Bundesamt für Naturschutz, AS Leipzig, 04277 Leipzig.

Dr. Christine Idler ist wissenschaftliche Mitarbeiterin in der Abteilung Bioverfahrenstechnik am Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie e.V. (ATB), Max-Eyth-Allee 100, 14469 Potsdam.

Dr. Monika Heiermann ist wissenschaftliche Mitarbeiterin in der Abteilung Technikbewertung und Stoffkreisläufe am Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie e.V. (ATB), Max-Eyth-Allee 100, 14469 Potsdam.

Danksagung

Die hier veröffentlichten Daten wurden im Rahmen des EVA-Verbundprojektes „Entwicklung und Vergleich von landwirtschaftlichen Anbausystemen für die landwirtschaftliche Produktion von Energiepflanzen unter den verschiedenen Standortbedingungen Deutschlands“, Phase I bis III, und des Projektes „Bioenergieträger mit Blühaspekt: Leguminosen-Getreide-Gemenge“ gewonnen. Die Projekte wurden gefördert durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) aufgrund des Beschlusses des Deutschen Bundestages über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) (FKZ: 22002305, 22013008, 22006012, 22002405, 22013108, 22006112, 22002505, 22013208, 22006212, 22002605, 22013308, 22006312) und durch das Bayerische Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (FKZ EW/13/51).

Ein großer Dank der Autoren geht an alle Projektpartner im Verbundprojekt EVA für die Bereitstellung des Pflanzenmaterials aus den Fruchtfolgeversuchen und den Beitrag zur Silierung der Erntegüter. Wir danken Giovanna Rehde und ihrer Arbeitsgruppe „Analytik“ am ATB sowie der Abteilung „Untersuchungswesen“ an der TLL für die chemischen Analysen der Silagen. Außerdem danken wir Roland Schneider, Helmuth Carl, Lars Eulenburg, Carsten Ohlhoff, Jutta Venzke, Angelika Krüger und Katja Gödeke für ihre wertvolle Unterstützung bei der Durchführung der Batch-Gärtests.