

Daniela Stoffel und Karlheinz Köller

Qualität von Biogasmais – Berechnung des Methanertrages von Silomais

Für die Entwicklung eines Modells zur Vorhersage des spezifischen Methanertrages von Silomais wurden 258 Silomaisproben auf ihre Rohnährstoffe sowie ihren spezifischen Methanertrag untersucht. Es wurde ein exponentielles Modell zur Vorhersage des Methanertrages von Silomais entwickelt. Dieses konnte 50 % der Varianz des Methanertrages erklären. Das vorgestellte exponentielle Modell bietet einen neuen Ansatz zur Berechnung des Methanbildungspotentials von Silomais. Es unterscheidet sich grundlegend von bisher bekannten Modellen, die häufig durch multiple lineare Regressionen bestimmt wurden. Jedoch kann auch dieses Modell den Prozess der Methanerzeugung nicht vollständig erklären.

Schlüsselwörter

Mais, Biogasproduktion, Methanertrag

Keywords

Corn, biogas production, methane yield

Abstract

Stoffel, Daniela and Köller, Karlheinz

Quality from corn for biogas
production – calculation of
specific methane yields

Landtechnik 67 (2012), no. 5, pp. 354–357, 2 figures,
3 tables, 23 references

To develop a model for the prediction of specific methane yields of corn 258 corn samples were taken and analysed for their raw nutrients and their specific methane yields. An exponential model for the prediction of the methane yield of corn has been developed. The model was able to explain 50 % of the variance in the methane yields of corn samples. The model delivers a new approach for the prediction of the specific methane yield of corn. It differs totally from available models using mainly the method of multiple linear regression. However the new model is also not able to explain the specific methane yield completely.

■ Unter den Energiepflanzen nimmt der Silomais (*Zea mays* L.) wegen seiner hohen Trockenmasseerträge und der etablierten Bestandesführung eine herausragende Stellung ein. Aufgrund des hohen Rohstoffbedarfes der Biogasanlagen wird dieser zwischenzeitlich auch gehandelt. Dabei wird häufig auf Trockenmassebasis abgerechnet. Andere Parameter, die die Qualität des Silomaises beeinflussen, werden häufig nicht berücksichtigt, nicht zuletzt, weil deren Einfluss auf den Methanertrag nicht vollständig geklärt ist. Aus diesem Grund wurde in der vorliegenden Arbeit untersucht, ob sich der spezifische Methanertrag von Silomais aus den Rohnährstoffen berechnen lässt. Mehrere Autoren haben sich in den vergangenen Jahren mit der Berechnung des spezifischen Methanertrages von Biogassubstraten anhand der Rohnährstoffe beschäftigt. Amon et al. [1–4] und Kaiser [5] verwenden hierzu eine lineare Regression, bei der aus den Nährstoffen der Methanertrag ermittelt werden soll, während Weißbach [6] den erzielbaren Methanertrag auf Basis der fermentierbaren organischen Trockensubstanz ermittelt, indem er die Rohfaser als schwer umsetzbare Fraktion von der organischen Trockensubstanz abzieht und annimmt, dass nur der Rest zu Methan umgesetzt wird. Keines der Modelle kann den tatsächlich erzielbaren Methanertrag vorhersagen; Weißbach [6] erzielt mit der Berechnung bisher die zuverlässigsten und plausibelsten Ergebnisse. Die vorhandenen Modelle wurden anhand des vorliegenden Datenmaterials überprüft. Anschließend wurde auf Basis der vorliegenden Analysen ein neues Modell zur Berechnung des spezifischen Methanertrages aufgestellt.

Material und Methoden

Zur Untersuchung der spezifischen Biogaserträge wurden verschiedene Sorten Silomais (*Zea mays* L.) gewählt, die hinsichtlich

Tab. 1

Anzahl verwendeter Silomaisorten in den verschiedenen Reifegruppen
 Table 1: Number of varieties of each type used

Sortentyp Variety type	Reifegruppe/Ripening group				
	Früh Early	Mittelfrüh Middle early	Mittelspät Middle late	Spät Late	Sehr spät Very late
Dry down Dry down	4	3	6		
Harmonisch Harmonical	8	10	12	4	2
Stay-green Stay-green	1	2	6	1	

der Reifegruppe (früh, mittelfrüh, mittelspät, spät) mit Siloreifezahlen von 160–500 sowie ihres Abreifeverhaltens (dry-down, harmonisch und Stay-green) und der erwarteten Inhaltsstoffzusammensetzung das gesamte Sortenspektrum von Silomais repräsentieren. **Tabelle 1** gibt eine Zusammenfassung der Anzahl verwendeter Sorten in den Reifegruppen, unterteilt nach deren Abreifeverhalten. Insgesamt wurden 76 Maissorten verwendet.

Von allen Sorten wurden zu jeweils drei verschiedenen Ernteterminen Proben genommen, gehäckselt und getrocknet. Die Proben wurden mittels des Hohenheimer Biogas- und Methanertragestests [7] auf ihre Biogas- und Methanerträge untersucht und nach Richtlinien des VDLUFA [8] auf die Inhaltsstoffe Rohasche, Rohfaser, Stärke, Zucker, Rohprotein, ADF, NDF und ADL analysiert. Die Trocknung diente der Bestimmung der Trockensubstanz der jeweiligen Probe.

Ergebnisse

Die Gesamtheit der Daten zur Erstellung eines zuverlässigen Modelles sollte eine möglichst breite Variabilität aufweisen. **Tabelle 2** gibt einen Überblick über die Streuungsmaße der einzelnen Parameter in dem verwendeten Material. Die Tests auf Normalverteilung legen eine sehr gute Verteilung der einzelnen Parameter nahe.

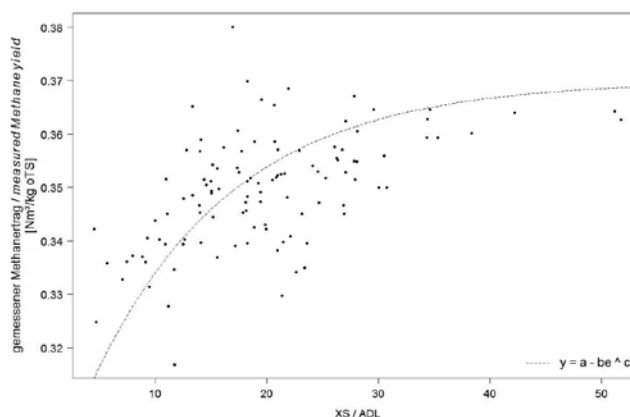
Erstellung eines Modells zur Vorhersage des Methanertrages

Im ersten Schritt wurden anhand der erhobenen Daten die vorhandenen Modelle getestet. Da keines der vorhandenen Modelle ein zufriedenstellendes Ergebnis lieferte, wurden neue lineare Modelle entwickelt, welche sich ebenfalls als untauglich erwiesen. Daher wurden die Daten weiter analysiert, bis sich ein neuer, nicht linearer Zusammenhang zwischen dem spezifischen Methanertrag und den Parametern Stärke und ADL aufzeigte (**Abbildung 1**).

Die Koeffizienten a, b und c wurden anhand der vorliegenden Daten anschließend bestimmt (**Tabelle 3**):

Berechnet man den Methanertrag mit zwei unabhängigen Datensätzen gemäß dem dargestellten Modell, so ergibt sich eine mittlere Korrelation zwischen den beobachteten und be-

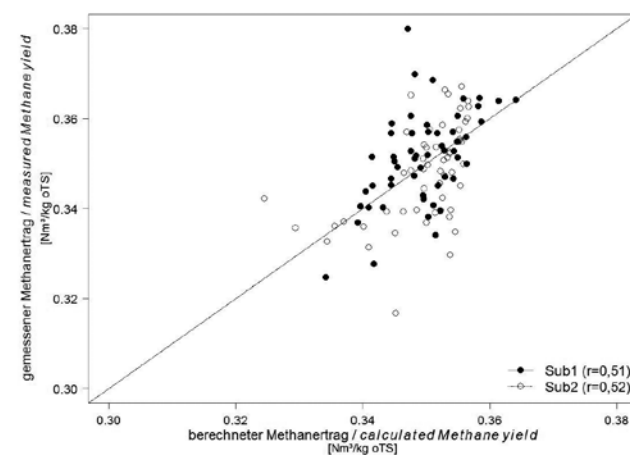
Abb. 1



Zusammenhang zwischen dem Verhältnis XS : ADL und dem gemessenen Methanertrag von Silomais

Fig. 1: Relationship between ratio XS : ADL and the observed methane yields

Abb. 2



Vergleich von gemessenem spezifischem Methanertrag mit berechnetem Methanertrag von Silomais für zwei unabhängige Datensätze

Fig. 2: Comparison of observed methane yields with calculated methane yields for two sample-sets

rechneten Werten von 0,515. Die Spannweite beträgt hierbei 0,51 bis 0,52. Beispielhaft zeigt **Abbildung 2** das Ergebnis der Kreuzvalidierung bei der Aufteilung in zwei gleich große Datensätze als Testsets.

Diskussion

Das ermittelte Modell berücksichtigt das Verhältnis der Stärke zum ADL, also dem lignifizierten und somit für die Mikroorganismen unverdaulichen Anteil der Maispflanze. Es unterscheidet sich grundsätzlich von den bisher vorhandenen Modellen, die meistens durch lineare Regression ermittelt wurden. Lignin ist der Faktor, der die biologische Abbaubarkeit von lignocellulosehaltigem Material am stärksten beeinflusst [9]. Dieser wird

Tab. 2

Streuungsmaße der für das Maismodell verwendeten Daten

Table 2: Variation of data used for modelling methane yields

	Minimum <i>Minimum</i>	1. Quantil <i>1st Quantile</i>	Median <i>Median</i>	Mittelwert <i>Mean</i>	3. Quantil <i>3rd Quantile</i>	Maximum <i>Maximum</i>
XA	2,82	3,34	3,55	3,72	4,00	6,08
XS	15,99	30,44	33,87	33,71	37,67	43,70
Elos/ <i>Esom</i>	55,05	67,89	70,53	70,38	73,24	78,63
XF	14,49	17,57	18,60	18,86	20,46	27,08
XP	5,40	6,21	6,63	6,91	7,29	9,94
XL	1,31	2,98	3,38	3,24	3,79	4,86
XZ	1,68	4,61	5,32	5,39	6,40	9,85
ADL	0,78	1,45	1,76	1,82	2,21	3,53
NDF	36,09	42,00	43,62	43,92	45,61	54,58
ADF	17,19	21,11	22,36	22,56	24,17	31,24
IVDOM	70,30	74,51	76,15	76,18	78,00	81,58
Methanertrag <i>Methane yield</i>	0,30	0,34	0,35	0,35	0,35	0,38

XA = Rohasche/*crude ash*, XS = Rohstärke/*crude starch*, Elos = Enzymlösliche organische Substanz/*Enzyme soluble organic matter*, XF = Rohfaser/*crude fibre*, XP = Rohprotein/*crude protein*, XL = Rohfett/*Ether extract*, XZ = Rohzucker/*crude sugar*, ADL = Säure-Detergenzien-Lignin/*acid detergent lignin*, NDF = Neutral-Detergenzien-Faser/*neutral detergent fibre*, ADF = Säure-Detergenzien-Faser/*acid detergent fibre*, IVDOM = In-vitro-Verdaulichkeit der organischen Substanz/*In-vitro digestibility of organic matter*

in Relation zu einem gut verdaulichen, und häufig in hoher Konzentration vorhandenem Merkmal gesetzt. Anschließend wird dieses Verhältnis gemäß einer asymptotischen Funktion der Form $y = a - be^{cx}$ angepasst.

Bei der gegebenen Funktion nähert sich der maximale Methanertrag für die vorliegenden Daten asymptotisch einem Grenzwert von ca. 0,38 Nm³/kg oTS. Das Minimum beträgt in dem Modell ca. 0,32 Nm³/kg oTS, was bedeutet, dass der Methanertrag theoretisch Werte zwischen 0,32 und 0,38 annehmen kann. Dies ist ein wesentlicher Unterschied zu den linearen Modellen. Definiert man für diese kein Intervall keinen Gültigkeitsbereich, kann die Funktion theoretisch jeden Wert annehmen. Auch bei Fehlen von Stärke und Lignin wird aus anderen Komponenten Methan gebildet. Dies entspricht dem

minimalen Wert und deckt sich weitgehend mit anderen Untersuchungen. So bewegen sich die gemessenen Methanerträge von Silomais in einem Intervall von 0,25 bis ca. 0,40 Nm³/kg oTS [10–17]. Daraus folgt, dass dem Gärprozess in diesem Intervall biologische und chemische Grenzen gesetzt sind.

Weiterhin kann nicht ein einzelner Parameter oder die Summe der Inhaltsstoffe, wie die linearen Modelle nahe legen, für den Methanertrag verantwortlich sein. Die einzelnen Parameter stehen in Wechselwirkung miteinander, sodass das Methanbildungspotenzial eher durch deren Verhältnis zueinander ermittelt werden kann.

Darnhofer et al. [18] kommen zu dem Ergebnis, dass die Stärke als Kriterium für die Qualität von Silomais und dessen Methanbildungspotenzial nicht von Bedeutung ist. Jedoch gibt es auch Untersuchungen, die der Stärke einen signifikanten Einfluss auf den Biogasertrag zuschreiben. So zeigen beispielsweise Versuche, in denen die einzelnen Komponenten der Maispflanzen, also Kolben und Restpflanze, getrennt fermentiert wurden, für die Kolbenfraktion den höchsten Methanertrag. Der Methanertrag der Restpflanze lag deutlich unter dem des Kolbens [19]. Auch in Untersuchungen von Eder et al. [20] konnte dieser Sachverhalt nachgewiesen werden. Jedoch kommen diese Autoren bei Untersuchungen an Maisganzpflanzen zu dem Ergebnis, dass kolbenbetonte und somit stärkehaltige Typen keinen signifikant höheren Methanertrag aufweisen. Die Autoren schlussfolgern, dass die Sortenwahl bei Mais keinen Einfluss auf die Methanausbeute hat [20]. Jedoch weisen Eder et al. [20] auch auf Ergebnisse von Heiermann und Plöchl [21], Hertwig und Heiermann [22] und von Linke et al. [23] hin. Die-

Tab. 3

Eigenschaften des Modells für Methan ~ XS/ADL nach der Funktion $y = a - be^{cx}$

Table 3: coefficients of the model Methane ~ XS/ADL according to the function $y = a - be^{cx}$

	Schätzwert <i>Estimate</i>	Standardfehler <i>SE</i>	t-Wert <i>t-value</i>	Pr (> t)	
a	0.36459	0.00706	51.643	2e-16	***
b	0.04001	0.00554	7.221	7.09e-11	***
c	-0.05348	0.02595	-2.061	0.0417	*

Signif. codes: 0 = ***, 0.01 = *
Standardfehler der Residuen/RSE: 0,0084

se Autoren stellten einen positiven Zusammenhang zwischen der Methanausbeute und dem Stärkegehalt fest, wobei die Stärke allein nicht die Methanausbeute erklären konnte. Linke et al. [23] führen dies auf den höheren Fettgehalt und den im Vergleich höheren Anteil leicht umsetzbarer Kohlenhydrate im Kolben zurück. Auch hier wird der Einfluss des höheren Ligninanteils in der Restpflanze als Ursache für den reduzierten Methanertrag vermutet.

Schlussfolgerungen

Grundsätzlich scheinen multiple lineare Modelle dem komplexen Prozess der Methanferzeugung nicht gerecht zu werden. Ein Ansatz zur Verbesserung der Berechnung des Methanertrages liefert das hier vorgestellte nicht-lineare Modell. Die Strukturgültigkeit scheint in diesem Modell gegeben zu sein, da durch das Verhältnis von leicht und schwer abbaubaren Inhaltsstoffen anhand einer asymptotischen Funktion der Methanertrag bestimmt wird. Durch das Modell wird 50 % der Varianz der spezifischen Methanerträge von Silomais erklärt. Durch die Erweiterung der Datengrundlage könnte das Modell weiter verfeinert und verbessert werden. Auch sollte dem Einfluss anderer Faktoren, wie beispielsweise der Mikroorganismen, zukünftig mehr Beachtung geschenkt werden. Ohne die Berücksichtigung solcher Faktoren wird es schwierig bleiben, erzielbare Methanerträge hinreichend genau zu berechnen.

Literatur

- [1] Amon, T.; Kryvoruchko, V.; Amon, B. et al. (2003): Optimierung der Biogaserzeugung aus den Energiepflanzen Mais und Klee gras. Final Report 77. July 2003. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt- und Wasserwirtschaft (Ed.). Research Project No. 1249. <http://www.nas.boku.ac.at/4536.html>, Zugriff am 19.07.2012
- [2] Amon, T.; Amon, B.; Kryvoruchko, V. et al. (2007): Methane production through anaerobic digestion of various energy crops grown in sustainable crop rotations. *Bioresource Technology* 98 (17), pp. 3204-3212
- [3] Amon, T.; Amon, B.; Zollitsch, W. et al. (2007). Biogas production from maize and dairy cattle manure – influence of biomass composition on the methane yield. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 118 (1-4), pp. 173-182
- [4] Amon, T.; Kryvoruchko, V.; Machmüller, A. et al. (2006): Optimierung der Methanausbeute aus Zuckerrüben, Silomais, Körnermais, Sonnenblumen, Ackerfutter, Getreide, Wirtschaftsdünger und Rohglyzerin unter den Standortbedingungen der Steiermark. Zwischenbericht zum Forschungsprojekt Nr. 1421, BMLFUW, GZ LE.1.3.2/0050-II/1/2005, FA13B-80.26-1/04-G2
- [5] Kaiser, F. L. (2007): Einfluss der stofflichen Zusammensetzung auf die Verdaulichkeit nachwachsender Rohstoffe beim anaeroben Abbau in Biogasreaktoren. Dissertation. TU München, Lehrstuhl für Agrarsystemtechnik
- [6] Weißbach, F. (2008): Zur Bewertung des Gasbildungspotenzials von nachwachsenden Rohstoffen. *Landtechnik*, 63(6), S. 356-358
- [7] VDI-Richtlinie VDI 4630 (2006): Vergärung organischer Stoffe. Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche
- [8] Naumann, C.; Bassler, R. (Hrsg.) (1997) Band 3: Die chemische Untersuchung von Futtermitteln. In: *Handbuch der landwirtschaftlichen Versuchs- und Untersuchungsmethodik: (Methodenbuch) / im Auftrag d. Verbandes Dt. Landwirtschaftlicher Untersuchungs- u. Forschungsanstalten*. 3. Aufl. - Darmstadt : VDLUFA-Verlag, Darmstadt
- [9] Gunaseelan, V. N. (2007): Regression models of ultimate methane yields of fruits and vegetable solid wastes, sorghum and napiergrass on chemical composition. *Bioresource Technology* 98 (6), pp. 1270-1277
- [10] Amon, Th.; Kryvoruchko, V.; Amon, B. et al. (2003): Biogaserzeugung aus Mais - Einfluss der Inhaltsstoffe auf das spezifische Methanbildungsvormögen von früh- bis spätreifen Maissorten. Bericht über die 54. Tagung der Vereinigung der Pflanzenzüchter und Saatgutkaufleute Österreichs, BAL Gumpenstein, 25.-27. November 2003
- [11] Amon, T. et al. (2006): Optimierung der Methanferzeugung aus Energiepflanzen mit dem Methanenergieerwertungssystem. *Berichte aus Energie- und Umweltforschung* 80/2006. Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Radetzkystraße 2, 1030 Wien
- [12] Amon, T.; Kryvoruchko, V.; Amon, B. et al. (2002): Methanbildungsvormögen von Mais, Einfluss der Sorte, der Konservierung und des Erntezeitpunktes. Endbericht Oktober 2002, im Auftrag von Pioneer Saaten Ges.m.b.H. Parndorf, Austria
- [13] Kaiser, F.; Gronauer, A. (2007): Methanproduktivität von nachwachsenden Rohstoffen in Biogasanlagen. *LfL-Information Juli / 2007*. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)
- [14] Braun, J.; Brudel, H.; Hanff, H. et al. (2001): Datensammlung für die Betriebsplanung und die betriebswirtschaftliche Bewertung landwirtschaftlicher Produktionsverfahren im Land Brandenburg: Ackerbau, Grünlandwirtschaft, Tierproduktion, Binnenfischerei. Landesanstalt für Landwirtschaft des Landes Brandenburg, p. 134
- [15] Heiermann, H.; Schelle, H.; Plöchl, M. (2002): Biogaspotenziale pflanzlicher Kosubstrate. In: *Tagungsband: Biogas und Energielandwirtschaft - Potenzial, Nutzung, Grünes Gras TM, Ökologie und Ökonomie*. 18.-19. November 2002, Potsdam. (eds. M. Heiermann & M. Plöchl), *Bornimer Agrartechnische Berichte Vol. 32, ATB, Potsdam-Bornim*
- [16] Grundmann, P.; Plöchl, M.; Heiermann, M. (2002): Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen zum Einsatz landwirtschaftlicher Kosubstrate in Biogasanlagen. 18.-19. November 2002, Potsdam. (eds. M. Heiermann & M. Plöchl), *Bornimer Agrartechnische Berichte Vol. 32, ATB, Potsdam-Bornim*
- [17] Hengelhaupt, F.; Nehring, A.; Gödeke, K. (2008): Biogas- und Methanerträge alternativer Fruchtarten. *VDLUFA-Schriftenreihe Bd. 64/2008*, S. 361-368, VDLUFA-Verlag, Darmstadt
- [18] Darnhofer, B.; Eder, B. (2009): Schlussbericht zu dem Verbundprojekt Erschließung des biosynthetischen Potenzials einheimischer Nutzpflanzen als nachwachsende Rohstoffe zur Erzeugung erneuerbarer Energien Teilvorhaben 1: Entwicklung eines Anbausystems für Biomassemais. FKZ 22 000 303. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)
- [19] Darnhofer, B.; Eder, J.; Heuwinkel, H. et al. (2010): Der Einfluss der Kolben- und Restpflanzenfraktion auf die Biogaserzeugung aus Silomais. *Landtechnik* 65 (5), S. 360-363
- [20] Eder, B.; Eder, J.; Papst, C. et al. (2009): Welcher Maissortentyp zur Biogaserzeugung? In: *Internationale Wissenschaftstagung Biogas Science 2009*, Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Band 1 - Vorträge, S. 57-72
- [21] Heiermann M.; Plöchl, M. (2004): Biogas aus Pflanzen - Ergebnisse von Gärversuchen. 10. Internationale Tagung „Energetische Nutzung nachwachsender Rohstoffe“ an der TU Bergakademie Freiberg, 9. und 10. September 2004, S. 79-84
- [22] Hertwig, F.; Heiermann, M. (2006): Energetischer Futterwert und Biogausbeute unterschiedlicher Maissortentypen. Landesamt für Verbraucherschutz, Landwirtschaft und Flurneuordnung, Referat Grünland und Futterwirtschaft, 14641 Paulinenaue, Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim
- [23] Linke, B.; Heiermann, M.; Grundmann, P. et al. (2003): Grundlagen, Verfahren und Potenzial der Biogasgewinnung im Land Brandenburg. In: *Biogas in der Landwirtschaft - Leitfaden für Landwirte und Investoren im Land Brandenburg*. Herausgeber: Ministerium für Landwirtschaft, Umweltschutz und Raumordnung des Landes Brandenburg, Potsdam, S.10-23

Autoren

Daniela Stoffel ist wissenschaftliche Mitarbeiterin im Fachgebiet Verfahrenstechnik in der Pflanzenproduktion am Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim, Garbenstraße 9, 70593 Stuttgart, E-Mail: daniela.stoffel@uni-hohenheim.de

Prof. Dr. Dr. hc. mult. Karlheinz Köller ist Leiter des Fachgebietes Verfahrenstechnik in der Pflanzenproduktion am Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim.