

Welcher Maissortentyp zur Biogaserzeugung?

B. Eder¹, J. Eder¹, C. Papst¹, B. Darnhofer¹, M. Mukengele²,
H. Heuwinkel³ und H. Oechner²

¹ Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung, Am Gereuth 4, 85354 Freising, Deutschland

² Universität Hohenheim, Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie, Garbenstraße 9, 70599 Stuttgart, Deutschland

³ Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Landtechnik und Tierhaltung, Vöttingerstr. 36, 85354 Freising, Deutschland

Zusammenfassung

In Ernteterminversuchen mit Silomais und künstlich hergestellten Mischungen von Silomais Restpflanzen und Kolben wurde der Einfluss des Kolbenanteils, der Inhaltsstoffe und der Qualitätsparameter unterschiedlicher Maisgenotypen auf die Methanausbeute untersucht. Es sollte die Frage geklärt werden, welchen Einfluss der Kolbenanteil einer Maispflanze auf die Methanausbeute hat. Da spätreife Maissorten einen geringeren Kolbenanteil, aber eine höhere Biomasseleistung haben, dienten die Versuche auch zur Klärung der Frage, in wieweit sich spätreife Sorten und allgemein Sorten mit geringerem Kolbenanteil für die Biogasproduktion eignen.

Die Wahl des Genotyps zeigte über die Jahre keinen wesentlichen Einfluss auf die Methanausbeute. Spätreife Sorten erzielten in den Versuchen trotz niedriger Kolbenanteile und Stärkegehalte meist dieselben Methanausbeuten wie frühe. Da späte Sorten ein weit höheres Biomassepotenzial aufweisen, scheinen sie deshalb für die Biogasproduktion besonders geeignet zu sein. Es konnte gezeigt werden, dass der Einfluss des Stärkegehaltes bzw. Kolbenanteils auf die Methanbildung im für eine optimale Silagebereitung relevanten TS-Bereich relativ gering ist. Eine leichte Tendenz zu höheren Methanausbeuten bei Proben mit höheren Stärkegehalten ist auf der Basis der umfangreichen Daten der Feldversuche zwar erkennbar, jedoch statistisch schlecht abzusichern. Bei künstlich hergestellten Mischungen von Kolben und Restpflanzen konnte eine positive Korrelation zwischen dem Stärkegehalt und der Methanausbeute gefunden werden. Diese stieg mit Kolbenanteilen von 0 bis 100 % bei Untersuchung mit dem Hohenheimer Biogastest um etwa $60 \text{ NI} \cdot (\text{kg oTS})^{-1}$ an. Eine getrennte Untersuchung verschiedener Pflanzenfraktionen ergab unterschiedliche Ausbeuten für Kolben (ca. $400 \text{ NI} \cdot (\text{kg oTS})^{-1}$) und Restpflanzen $320 \text{ NI} \cdot (\text{kg oTS})^{-1}$. Daraus können Konsequenzen für die Sortenwahl abgeleitet werden.

Summary

This study was designed to investigate the effect of maize quality on the specific methane yield (NI CH₄ (kg ODM)⁻¹). The share of cobs, and thus starch content, in late maturing maize genotypes is low as compared with early maturing types. Total biomass yield, however, in late types exceeds that of early types. Therefore field trials were conducted to analyse the effect of genotype, harvesting date, and starch content on the specific methane yield in maize.

The maize genotype had no remarkable influence on the methane yield in the field trials. Late maturing genotypes achieved nearly the same methane yield as early maturing genotypes, although the share of maize cob and therefore the starch content was significantly lower. Since late types of silage maize have a higher biomass yield potential, they seem to be more appropriate for biogas production.

Results of extensive field trials showed a slightly increasing methane yield with increasing starch content, but correlation between these two variables was low. Only in laboratory trials, with an extreme variation in starch content, a strong relationship between starch (share of maize cob) and methane yield was found. Investigations conducted with the Hohenheimer Biogastest showed an increase of methane yield of about 60 NI·CH₄ (kg ODM)⁻¹ for the fraction of maize cob ranging from 0 to 100 %. Pure maize cobs achieved a methane yield of about 400 NI CH₄ (kg ODM)⁻¹, and stover had 320 NI CH₄ (kg ODM)⁻¹.

The results show, that the effect of starch content on the specific methane yield of maize was low, when maize plants were the optimum harvesting stage. This implicates consequences for the recommendation of maize genotype for biogas production.

Key words:

biogas, methane yield, maize, genotype, starch content, share of cob

1 Einleitung

Die Biogasproduktion aus landwirtschaftlichen Produkten ist eine europaweit zunehmend interessante Form der Energiebereitstellung. Dabei ist Silomais die den Anbau dominierende Pflanzenart (WEILAND et al. 2004, STROBL & KEYMER 2006). Aktuell werden in großem Umfang speziell für die Tierernährung gezüchtete Maissorten für diesen Zweck verwendet, da die Qualitätsanforderungen für Maissorten mit einer besonderen Eignung für die Biogasproduktion bislang nicht klar definiert sind. Oftmals kommen auch kolbenbetonte Sorten mit hohen Stärkegehalten zum Einsatz. Die Bedeutung des Kolbenanteils einer Maissorte hinsichtlich der Methanproduktion ist bislang nicht ausreichend geklärt. In der Tierernährung spielt die durch die Körner zur Verfügung gestellte Stärke eine wichtige Rolle für die Energieversorgung eines Wiederkäuers und somit ist der Stärkegehalt ein bedeutendes Zuchtziel für die Entwicklung von Silomaisorten. Falls die in der Maissilage enthaltene Stärke jedoch keinen oder nur einen geringen Einfluss auf die Methanproduktion in einer Biogasanlage hat, sollte in der Biogasproduktion aus wirtschaftlichen Gründen ein gänzlich anderer Sortentyp zum Anbau kommen. Durch die Verschiebung der Reife hin zu spätreiferen Sorten und die Verwendung eines restpflanzenbetonten Sortentyps kann ein weit höheres Biomassepotenzial pro Flächeneinheit im Vergleich zu kolbenbetonten Sorten erzeugt werden.

Die wichtigsten Kriterien für die Wahl einer Silomaisorte zur Biogasproduktion müssen neben den allgemeinen pflanzenbaulichen Aspekten der Trockenmasseertrag pro Hektar und die Höhe der Methanausbeute bezogen auf die organische Trockenmasse (oTS) sein.

Die Höhe der theoretisch möglichen Methanausbeute eines Substrats ist eine Funktion der Substratzusammensetzung, die sich anhand der Formel nach BUSWELL (1936) berechnen lässt (Tab. 1). Demnach bestimmen die Anzahl der Kohlenstoff-, Wasserstoff- und Sauerstoffatome die erzielbare Methanmenge. Kohlenhydrate mit ihrem einfachen Struktur Aufbau liefern im Vergleich zu Fetten und Proteinen nach diesem Berechnungsschema eine relativ niedrige Menge von etwa $400 \text{ NI} \cdot (\text{kg oTS})^{-1}$, falls ein vollständiger Abbau stattfindet.

Tab. 1: Theoretische Methanausbeuten der Fraktionen Kohlenhydrate, Proteine, und Fette, berechnet nach der Formel nach BUSWELL (1936)

Stofffraktion	Strukturformel	Methanausbeute l (kg oTS)^{-1}	Methangehalt %
Kohlenhydrate	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$	373	50
Fette	$\text{C}_{16}\text{H}_{32}\text{O}_2$	998	71,2
Proteine	$\text{C}_{13}\text{H}_{25}\text{O}_7(\text{N}_3\text{S})$	477	60,7

Mais ist im Wesentlichen ein Kohlenhydratprodukt. Die Kohlenhydratzusammensetzung der Maispflanze verändert sich aber während des Wachstums und der Reife. Da in der vegetativen Phase vor allem der Aufbau des Wurzelsystems und des Blattapparates im Vordergrund stehen, findet sich in dieser Phase ein hoher Gehalt an Rohfaser und wasserlöslichen Kohlenhydraten (Zucker) in der Pflanze. Geht die Pflanze in die generative Pha-

se über, so wird aus dem Zucker in der Restpflanze vermehrt Stärke gebildet und in den Kolben eingelagert. Dadurch steigt der Stärkegehalt stetig an, während die anderen Kohlenhydratbestandteile (relativ zur Stärke) abnehmen. Folglich haben spätreife Sorten im Vergleich zu frühreifen Sorten zum gleichen Erntetermin weniger Stärke, mehr Zucker und einen höheren Gehalt an faserigen Bestandteilen (Abb. 1). Mit zunehmender Abreife nimmt auch die Lignifizierung bei den Pflanzen zu (FLACHOWSKY et al. 1992, FLACHOWSKY 1994). Da Lignin für die anaeroben Bakterien nicht abbaubar ist (SÜDEKUM et al. 1995, El BASSAM 1998, JUNG et al. 1983, a, b), wäre eventuell zu erwarten, dass sich die mögliche Methanausbeute bei späteren Ernteterminen reduziert.

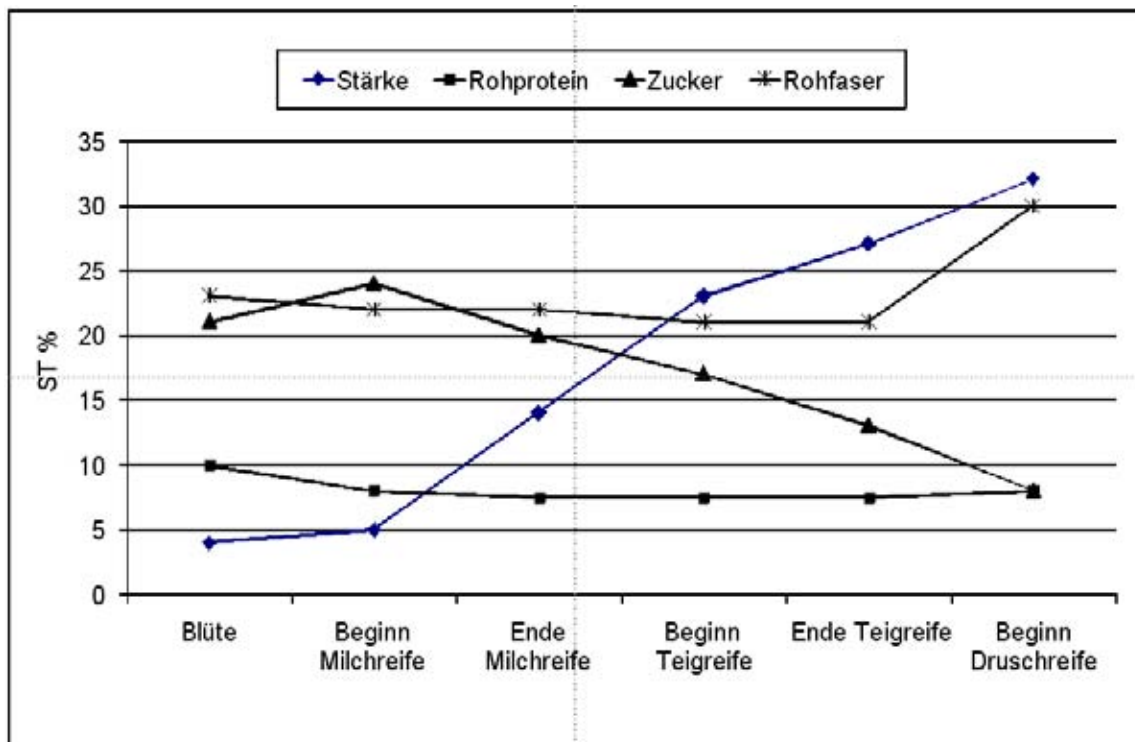


Abb. 1: Veränderungen der Kohlenhydrat- und Proteinanteile während der Abreife von Mais (JERCHOW et al. 1993)

Ungeklärt ist für die Silomaisbewertung zur Biogaserzeugung bisher, inwieweit das Verhältnis der Inhaltsstoffe aus der Fraktion der Kohlenhydrate wie Stärke, Zucker, Cellulosen und Hemicellulosen einen relevanten Einfluss auf die Methanausbeute hat. Für die Entwicklung von Maissorten für die Biogaserzeugung und die Beratung der landwirtschaftlichen Praxis ist es aber von entscheidender Bedeutung, die Wirkung dieser Komponenten auf die Gasausbeute zu kennen. Besonders wichtig ist in diesem Zusammenhang der Einfluss des Kolbens - also der Stärke - auf die Gasbildung, da durch einen Verzicht auf hohe Kolbenanteile züchterisch ein großer Zuwachs in der Ertragsleistung an Gesamttrockenmasse pro Hektar zu realisieren wäre. Ziel der vorliegenden Studie war es, zu klären, welcher Einfluss dem Kolbenanteil im Hinblick auf die Gasausbeute der Maispflanze zukommt und ob Sorten mit einem geringeren Kolbenanteil bzw. Stärkegehalt vergleichbare Methanausbeuten wie kolbenbetonte Sorten erzielen und sie sich somit auch für die speziellen Anforderungen der Biogaserzeugung eignen. Aus den Ergebnissen sollen Empfehlungen für die Sortenwahl in der landwirtschaftlichen Praxis abgeleitet werden.

2 Material und Methoden

In den Jahren 2003 bis 2008 wurden an der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Freising Versuche mit ausgewählten Silomaisorten unterschiedlicher Reife und gestaffelten Ernteterminen durchgeführt.

In diesem mehrjährigen Feldversuch mit mehreren Genotypen konnte der Einfluss des Erntetermins und somit deutlich unterschiedliche Gehalte an Stärke und anderen Inhaltsstoffen an mehreren Standorten in Bayern und Niedersachsen auf das Methanbildungspotenzial geprüft werden. Es wurden Sorten aus dem mittelfrühen (S250) bis späten Reifebereich (S800) eingesetzt. An mindestens vier Ernteterminen in dreiwöchigem Abstand, beginnend mit einer sehr frühen Ernte Ende August wurden Ertrags- und Qualitätsparameter erhoben. Dadurch konnte im Versuch ein breites Reife- und Qualitätsspektrum abgedeckt werden.

Sortenwahl

Von verschiedenen Züchtern (KWS Saat AG, Einbeck, Syngenta Seeds, Bad Salzflen) wurden Sorten verschiedenen Typs und unterschiedlicher Reifegruppen für die Versuche zur Verfügung gestellt. Als Vergleichssorte dienten in den verschiedenen Versuchen jeweils eine adaptierte Sorte aus dem mittelfrühen Reifebereich (Gavott S250, NK Magitop S250), die zum üblichen Silomaiserntetermin voll ausgereift sein sollte.

Feldversuch und statistische Auswertung

Die Feldprüfung erfolgte als zweifaktorielle Spaltanlage (Faktor 1 Erntetermin, Faktor 2 Sorte) in vierreihigen Parzellen mit einer Größe von 18 m², bei einer Bestandesdichte von 10 Pflanzen je m² und einem Reihenabstand von 0,75 m. Alle Prüfungen wurden auf Endabstand ausgesät. Um Randeffekte zu minimieren, wurden nur die mittleren zwei Reihen der Parzellen beerntet. Die pflanzenbaulichen Maßnahmen wie Bodenbearbeitung, Pflanzenschutz und Düngung erfolgten ortsüblich.

Das gehäckselte, bei 60°C getrocknete Material wurde auf 1 mm Partikelgröße vermahlen und bis zur Qualitätsanalyse bei Raumtemperatur abgedunkelt gelagert. Die Versuche wurden mit SAS und der Prozedur Proc Mixed verrechnet (SAS 1999).

Herstellung von Mischungsreihen

Um die Wirkung deutlich unterschiedlicher Stärkegehalte auf die Gasbildung zu untersuchen, wurden zusätzlich aus einem Feldversuch an einem Erntetermin Kolben und Restpflanzenmaterial getrennt geerntet und Mischungsreihen mit verschiedenen Gewichtsanteilen von Kolben und Restpflanze aus dem Material hergestellt. Dadurch war es möglich, die Wirkung der Stärke, ohne eine sonst bei Ernteterminversuchen auftretende Änderung der Zusammensetzung der übrigen Inhaltsstoffe aus der Gruppe der Kohlenhydrate zu beurteilen.

Das Material stammte von drei Sorten aus dem Versuch am Standort Ingolstadt 2004. Aus diesem Material wurden mit den getrennt geernteten Restpflanzen und Kolben Mischproben mit 0 %, 20 %, 40 %, 60 %, 80 % und 100 % Kolben (bezogen auf das Probengewicht) hergestellt. Die Varianten 100 % Restpflanze und 100 % Kolben wurden je Sorte nur einmal hergestellt, die Mischungen je zweimal.

Analyse der Qualitätsparameter

Die Qualitätsparameter aller Prüfglieder wurden durch Nahinfrarot-Reflektionspektroskopie (NIRS) analysiert. Die Bestimmung erfolgte mit der Kalibration für Silo-

maisganzpflanzen der VdLUFA NIRS GmbH. Restpflanzenproben wurden mit einer Kalibration zur Bewertung der Restpflanzenqualität (KRÜTZFELDT 2004) geschätzt. Es wurden die in *Tab. 2* beschriebenen Parameter erfasst.

Tab. 2: Beschreibung der mit NIRS gemessenen Qualitätsmerkmale und der dafür verwendeten Bezeichnungen, Angabe in Gewichtsprozent der TS

Bezeichnung	Erläuterung
Zellinhalt	
Stärke	Stärkegehalt in der Ganzpflanze [%] nach EWERS (1908)
WLK	Gehalt an wasserlöslichen Kohlenhydraten [%] nach LUFF & SCHOORL (1929)
WLK-R	-R: Gehalt in der Restpflanze
RP	Rohproteingehalt [%] nach KJELDAHL (1883)
Zellwand	
NDF	Neutrallöslicher Faseranteil (NDF-Gehalt) nach VAN SOEST (1963)
NDF-R	-R: Gehalt in der Restpflanze
ADF	Säurelöslicher Faseranteil (ADF-Gehalt) nach VAN SOEST (1963)
Verdaulichkeitsparameter	
ELOS	Enzymlösliche organische Substanz [%] nach DE BOEVER et al. (1986), auch als Zellulaseverdaulichkeit bezeichnet
IVDOM	<i>In vitro</i> -Verdaulichkeit der organischen Masse [%] nach TILLEY & TERRY (1963), auch als Pansensaftverdaulichkeit bezeichnet
IVDOM-R	-R: Verdaulichkeit der Restpflanze
DNDF-R	Verdaulichkeit der NDF [%] in der Restpflanze nach VAN SOEST (1963) und TILLEY & TERRY (1963)

Analyse der Methanausbeute

Die Methanausbeute wurde durch das Institut für Landtechnik der Universität Hohenheim mit dem Hohenheimer Biogasertragstest (HBT, HELFFRICH & OECHSNER 2003) und in der Versuchsanlage des Instituts für Landtechnik und Tierhaltung der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft in Freising-Weihenstephan (KAISER 2007) ermittelt. Sie erfüllen die Anforderungen nach DIN 38414 zur Bestimmung des Faulverhaltens

3 Ergebnisse

Sortenunterschiede in der Methanproduktion

Die *Tab. 3* zeigt einen Auszug der Ergebnisse der Versuche 2003 bis 2006 in Abhängigkeit der Reifezahl der Sorte. Dargestellt sind Sortenmittelwerte über die Erntetermine. Die Sorten zeigten in Abhängigkeit von ihrer Reifeeinstufung eine spezifische Inhaltsstoffzusammensetzung. Die Unterschiede in den untersuchten Merkmalen waren in den meisten Fällen hoch signifikant. Die verschiedenen Sorten mit Reifezahlen von S250 bis S800 ließen sich anhand von Gehalten an Zellinhaltsstoffen, Zellwandbestandteilen und der Verdaulichkeitsparameter deutlich voneinander abgrenzen.

Die mittelspät und späten Sorten (Reifezahl höher S250) erzielten erwartungsgemäß aufgrund geringerer Kolbenausbildung niedrigere Stärkegehalte als die ortsübliche Vergleichssorte (S250). Während diese im Schnitt über ca. 30 % Stärke aufwies, blieben die späten Sorten meist deutlich darunter. Den niedrigsten Stärkegehalt von nur 6,6 % der TS hatten die Sorten mit der Reifezahl 700 im Versuch Ismaning 2004.

Tab. 3: Stärkegehalt der Ganzpflanze, Verdaulichkeitsparameter der Restpflanze, Methanausbeute und Methanertrag pro ha (MHE) verschiedener Silomaisgenotypen (Mittel der Erntetermine) aus verschiedenen Versuchen (2003-2006)

Reifezahl	Stärke % TS		IVDOM-R		D-NDF-R		Methan NI k(g oTS) ⁻¹		MHE m ³ ha ⁻¹	
Freising 2003, Saat April										
250	35,7	a [†]	62,5	c	45,6	c	334,9	a	6554,0	n.g. **
280	29,3	b	67,3	b	52,4	b	337,1	a	7193,2	n.g.
400	30,0	c	69,2	a	57,3	a	324,0	b	6979,0	n.g.
800	23,2	d	68,2	ab	53,8	b	324,9	n.g.	6855,9	n.g.
Freising 2003, Saat Mai										
250	33,3	a	66,6	c	49,8	c	332,3	a	5645,7	b
280	28,9	b	68,7	b	53,1	b	334,8	a	6387,8	a
400	27,0	b	73,6	d	58,1	a	327,2	n.g.	5727,4	b
800	16,7	c	70,1	a	53,6	b	310,1	n.g.	4769,3	c
Ingolstadt 2004										
250	29,1	a	65,1	c	49,9	c	336,3	a	5414,9	b
400	23,6	b	72,0	b	53,5	b	335,3	ab	6086,4	ab
600	7,7	d	72,1	b	54,1	b	331,1	b	5674,4	b
600*	12,7	c	74,2	a	57,4	a	321,2	n.g.	6288,3	n.g.
Ismaning 2004										
250	31,0		**		**		327,9	bc	4921,1	n.g.
280	25,0	a	**		**		330,1	bc	4777,0	n.g.
280	24,3	ab	**		**		331,6	ab	4866,1	n.g.
400	25,2	a	**		**		336,0	a	4398,6	n.g.
400	23,4	b	**		**		337,0	a	5268,2	n.g.
600	12,9	c	**		**		324,0	c	4758,6	n.g.
600	11,4	d	**		**		333,4	ab	4410,0	n.g.
700	6,6	e	**		**		336,4	a	4101,0	n.g.
Grucking 2006										
250	29,2	a	68	b	53,2	b	336	ab	6339	b
250	23,6	b	69,3	b	55,1	b	338,3	a	5882,4	b
250	28,2	a	74,3	a	65,5	a	329,4	c	4965	c
400	19,6	c	65,6	c	53,6	b	331,3	bc	6890,4	b
600	12,3	d	66,9	c	54,9	b	333	ab	7257,8	a

* Mikado

** n.g. nicht geschätzt

[†] unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede bei P < 0,05 (F-Test)

In der Methanausbeute waren sortenspezifische Unterschiede zwar messbar, aber so gering, dass sich kein signifikanter Zusammenhang zwischen den Gehalten der untersuchten Inhaltsstoffe und der Methanausbeute nachweisen ließ. Im Mittel wurde eine Methanausbeute von ca. 330 NL (kg oTS)⁻¹ erzielt. Die große Variation der Inhaltsstoff- und Qualitätsparameter durch die Sortenwahl beeinflusste die Methanausbeute nicht. Die Korrelationsanalyse wies für keines der untersuchten Merkmale eine signifikante Beziehung aus. Weder unterschiedliche Gehalte an Zellinhaltsstoffen wie Stärke noch Zellwandbestandteile wie NDF und ihre Verdaulichkeit zeigten einen Einfluss. Die durchgeführte multiple Regressionsanalyse erklärte das Zielmerkmal mit unter 50 % nicht zufriedenstellend.

Methanproduktion und Erntetermin

Die Wahl des Erntetermins zeigte in der Vielzahl der Versuche keinen Einfluss auf die Höhe der Methanausbeute. Trotz großer Unterschiede in den untersuchten Qualitätsmerkmalen, war kein Einfluss des Erntetermins auf die Höhe der Methanausbeuten zu erkennen. Weder die stark unterschiedlichen TS-Gehalte, noch Zellinhaltsstoffe (Stärke, Zucker, RP) und Zellwandbestandteile (ADF, NDF) und die gemessenen Verdaulichkeitsparameter (IVDOM, ELOS, DNDF) zeigten eine Beziehung zur Höhe der Methanausbeute.

AMON et al. (2003) und KAISER et al. (2004) fanden bei Untersuchungen an verschiedenen Silomaisgenotypen einen negativen Einfluss des Erntetermins, d.h. je später die Ernte stattfand, desto niedriger war in ihren Versuchen die Methanausbeute. AMON et al. (2003) wiesen die höchsten Methanausbeuten bei TS-Gehalten unter 28%, also noch vor bzw. zur beginnenden Milchreife nach. Sowohl bei AMON et al. (2003) als auch KAISER et al. (2004) waren die Methanausbeuten bei später Ernte niedriger, KAISER et al. (2004) beschrieben einen negativen Einfluss bei zunehmender Kolbenreife. Eine solche Abnahme der Methanausbeute mit fortschreitender Reife und Wachstumsdauer konnte in den Versuchen allgemein nicht festgestellt werden.

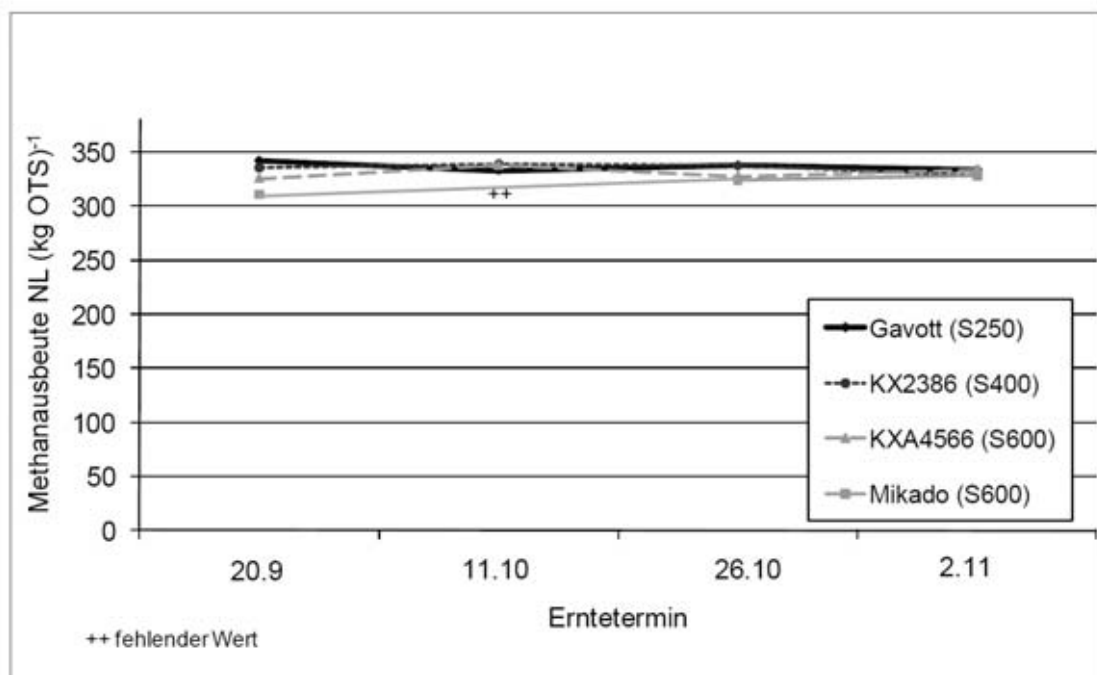


Abb. 2: Entwicklung der Methanausbeuten (NL (kg oTS)⁻¹) vier verschiedener Silomais-sorten unterschiedlicher Reife in Abhängigkeit vom Erntetermin (Ingolstadt, 2004) ++: fehlender Wert

Die *Abb. 2* zeigt als Beispiel die Ergebnisse der Methanbildung von vier Sorten eines Versuchs am Standort Ingolstadt im Jahr 2004. Trotz erheblicher Schwankungen bei den festgestellten Inhaltsstoffen gab es nur minimale, statistisch meist nicht zu sichernde Unterschiede in den Gasausbeuten. Hinsichtlich der Qualitätsparameter unterschieden sich die Sorten deutlich (nicht dargestellt). Die früh- und die spätreife Sortengruppe hoben sich deutlich von einander ab. Aufgrund der späten Kolbenabreife der Sorte KXA4566 (S600) waren auch zum dritten und vierten Erntetermin ein erhöhter Zuckergehalt und niedrige Stärkewerte zu beobachten. Gleichzeitig war die Restpflanzenverdaulichkeit dieser Sorte im Vergleich zu den frühreiferen Sorten (Gavott (S250) und KX2386 (S400)) deutlich erhöht. Die Unterschiede in den Methanausbeuten zwischen den Sorten bei den jeweiligen Ernteterminen waren jedoch relativ gering (*Abb. 2*). Die Sorten erreichten insgesamt trotz des weit gestreuten Reifebereichs von S250 bis S600 eine vergleichbare Methanausbeute.

Nur zum ersten Erntetermin waren höhere Sortendifferenzen (bis zu ca. $30 \text{ NI} \cdot (\text{kg oTS})^{-1}$) zu beobachten, die bis zum vierten Erntetermin kontinuierlich auf einen Unterschied von nur $5 \text{ NI} \cdot (\text{kg oTS})^{-1}$ abnahmen. Abgesicherte Unterschiede ließen sich nur zum ersten Erntetermin zwischen Gavott (S250) und den sehr späten Sorten Mikado und KXA4566 (beide S600) feststellen. Gavott erzielte die höchste Methanausbeute und zeichnete sich beim ersten Erntetermin durch höchste Stärkegehalte und eine hohe Verdaulichkeit der Restpflanze (DNDF, IVDOM-R) aus. Bei den späteren Ernteterminen war ihr Stärkegehalt immer noch hoch, ihre Restpflanzenqualität sank aber deutlich.

Ähnliche Ergebnisse zum Einfluss des Erntetermins und der Sorte fanden SCHUHMACHER et al. (2006), die kaum Unterschiede in den Methanausbeuten zwischen verschiedenen Ernteterminen und Sorten unterschiedlicher Reife feststellen konnten. Tendenziell fanden sie zwar eine Abnahme der Methanausbeute mit späteren Ernteterminen. Die Abnahme bei den ersten drei Ernteterminen war allerdings mit weniger als $10 \text{ NI} (\text{kg oTS})^{-1}$ sehr gering.

Gasbildung und Kolbenanteil, Mischungsreihen

Die *Abb. 3* zeigt den Zusammenhang zwischen dem Stärkegehalt und den gemessenen Gasmengen aus dem HBT für alle in verschiedenen Versuchen geprüften Sorten. Eine Tendenz zu höheren Gasausbeuten bei steigenden Stärkegehalten ist nur schwach ausgebildet. Die Korrelation ist zwar hoch signifikant, das Bestimmtheitsmaß für eine eindeutige Aussage jedoch gering. HEIERMANN & PLÖCHL (2004), HERTWIG & HEIERMANN (2006) und LINKE et al. (2003) berichteten hingegen einen positiven Zusammenhang zwischen Stärkegehalt und Methanausbeute, wenn gleich in ihren Ergebnissen die Methanausbeute sich nicht immer mit dem Stärkegehalt alleine erklären ließen.

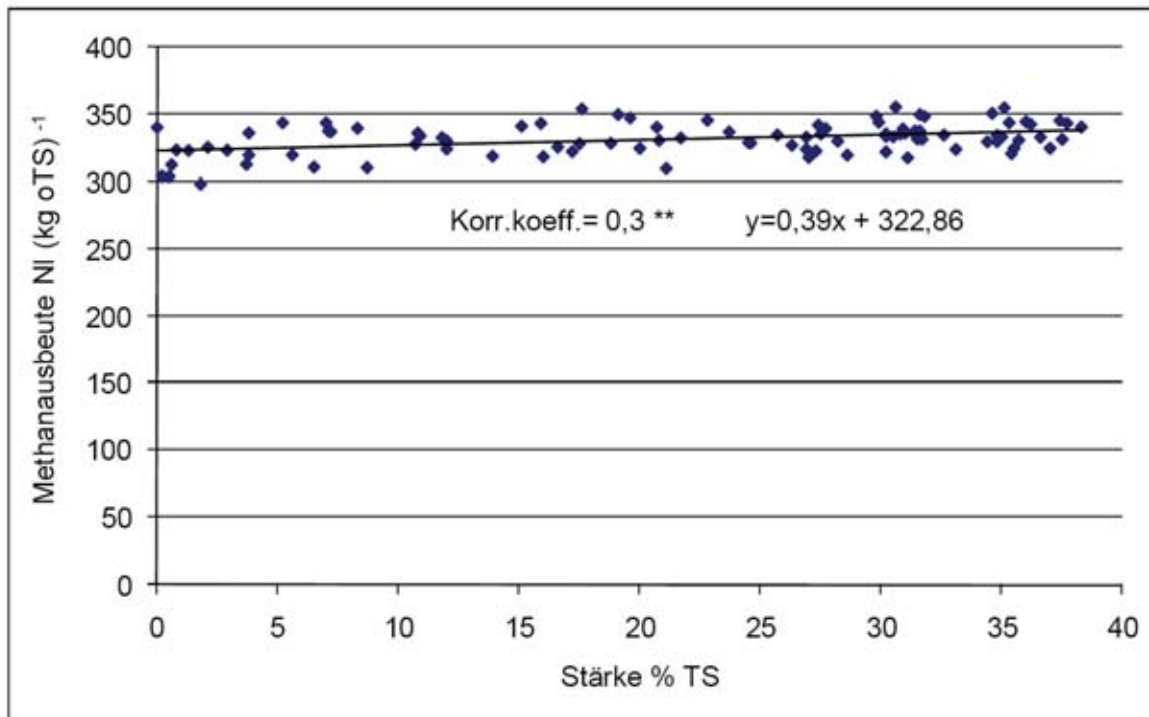


Abb. 3: Einfluss des Stärkegehalts auf die Methanausbeute (2003-2006, Korrelationskoeffizient, $P < 0,001$; ** = hoch signifikant)

Um zur Bedeutung der Stärke unter standardisierten Bedingungen Aussagen treffen zu können, wurden Mischungsreihen mit extremen Kolbenanteilen hergestellt und deren Gasbildungsraten untersucht. Die Ertrags- und Qualitätsmerkmale der für die Mischungen als Ausgangsmaterial verwendeten Sorten sind in *Tab. 4* dargestellt. Die Trockensubstanzgehalte der Ganzpflanze (TS) lagen zwischen 40 % (Gavott) und knapp 28 % (Mikado).

Tab. 4: Qualitätsparameter der künstlich hergestellten Mischungen bei Kolbenanteilen von 0 bis 100 % von drei verschiedenen Genotypen

Sorte	KA [†] %	Qualitätsparameter der Ganzpflanze								Qualitätsparameter der Restpflanze			
		IVDOM	ELOS	Stärke	WLK	RP	RF	ADF	NDF	IVDOM	DNDF	WLK	NDF
% TS								% TS					
Gavott (S250)	0	-	-	-	-	-	-	-	-	62.8	50.6	7.1	69.3
	20	59.4	53.5	10.2	2.7	7.3	28.8	33.2	65.5				
	40	67.9	63.9	25.9	2.9	7.9	21.9	24.4	51.9				
	60	75.9	71.4	36.9	3.0	8.2	17.3	18.9	40.8				
	80	82.4	79.9	49.0	2.9	8.5	11.9	12.7	29.9				
	100	86.9	91.1	65.1	2.9	9.2	4.7	6.7	17.9				
KXA 4171 (S270)	0	-	-	-	-	-	-	-	-	64.3	54.3	6.3	70.2
	20	60.9	55.4	12.8	3.3	5.9	28.2	32.7	63.4				
	40	68.8	64.7	25.7	3.2	6.9	22.4	25.1	52.3				
	60	75.6	72.3	37.2	3.3	7.3	17.3	19.0	40.9				
	80	82.2	80.3	48.9	3.6	7.9	11.9	13.1	30.7				
	100	86.1	90.6	63.3	3.4	8.7	5.7	8.1	19.7				
Mikado (S600)	0	-	-	-	-	-	-	-	-	71.1	60.0	7.5	64.2
	20	66.3	56.8	12.4	6.1	7.9	26.8	31.7	60.9				
	40	73.4	65.2	24.6	6.1	8.1	21.8	25.0	50.3				
	60	78.8	71.3	33.8	6.2	8.1	18.1	20.2	42.6				
	80	83.2	77.2	43.0	6.1	8.2	14.4	16.1	34.4				
	100	86.6	86.7	56.2	5.5	8.9	8.7	10.9	25.7				
GD _{5%} ^{††}		1.1	1.3	1.6	0.2	0.2	0.8	1.2	1.2	0.9	1.1	0.6	0.5
Korrelation zu MA ^{†††}		0.99**	0.99**	0.98**	-0.53	0.98**	-0.98**	-0.99**	-0.99**	0.99**	0.98**	0.99**	-0.98**

[†] KA: Kolbenanteil in Gewichtsprozent der Trockenmasse,

^{††} GD_{5%}: Grenzdifferenz bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5%, ** hoch signifikant

^{†††} MA: Methanausbeute

Die Abb. 4 zeigt das Ergebnis der Untersuchung der Methanausbeute. Die Restpflanzen ohne jeglichen Kolbenanteil erzielten die niedrigsten Methanausbeuten mit etwa 300 NI·(kg oTS)⁻¹. Die Sorte Mikado wies in der reinen Restpflanzenvariante mit 307 NI (kg oTS)⁻¹ die höchste Methanausbeute auf. Es zeigte eindeutig bei allen drei Sorten eine signifikant positive Beziehung zwischen Kolbenanteil und Methanausbeute. Die schrittweise Steigerung des Kolbenanteils von 20 auf 80 % hatte in der Tendenz bei allen Sorten die gleiche Wirkung.

Die Varianten mit reinem Kolben lieferten die höchsten Gasausbeuten mit durchschnittlich 362 NI·(kg oTS)⁻¹, dabei erreichte die Sorte Gavott mit 368 NI·(kg oTS)⁻¹ den höchsten Wert. Der Kolben der Sorte Mikado erbrachte mit 355 NI·(kg oTS)⁻¹ die geringste Ausbeute und ließ sich von den anderen beiden Sorten signifikant unterscheiden. Der Stärkegehalt im Kolben zeigte einen deutlichen positiven Einfluss auf die Gasausbeute, so dass die Sorte mit dem höchsten Stärkegehalt auch die höchste Gasausbeute erreichte. Da mit zunehmendem Kolbenanteil der Anteil der Restpflanze zurückging, nahm auch der Anteil der

für die Restpflanze typischen Inhaltsstoffe ab, und es zeigte sich eine negative Korrelation mit der Methanausbeute.

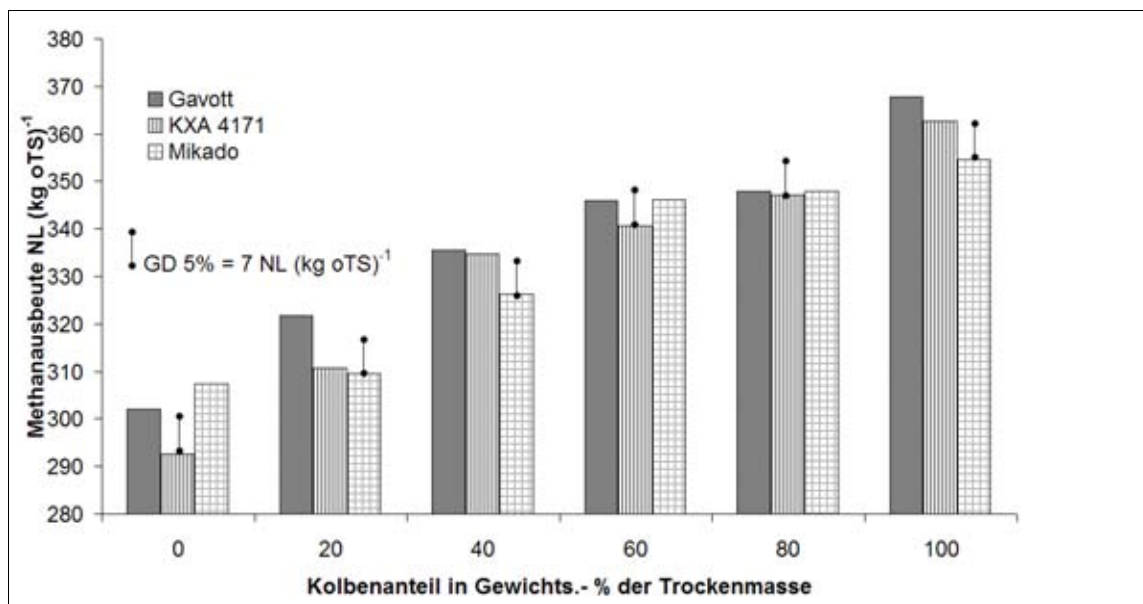


Abb. 4: Methanausbeute (NL (kg oTS)⁻¹) bei verschiedenen Maisgenotypen in Abhängigkeit vom Kolbenanteil in den Mischungen

Der Unterschied in der Methanausbeute zwischen dem reinen Kolben und der reinen Restpflanze betrug bei der Sorte Gavott 65 NL·(kg oTS)⁻¹, bei der Sorte KXA4171 70 NL·(kg oTS)⁻¹ und bei Mikado 47 NL·(kg oTS)⁻¹. Die Methanausbeute war signifikant positiv korreliert mit den Qualitätsparametern Stärke, IVDOM, ELOS sowie RP, signifikant negativ korreliert waren RF, ADF und NDF (Tab. 4), letztere nahmen erwartungsgemäß mit steigendem Kolbenanteil ab.

Im Gegensatz zu dem Ernteterminversuch konnte mit dieser Untersuchung, unter Ausschluss von Abreifeeffekten, ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Kolbenanteil bzw. Stärkegehalt und Methanausbeute festgestellt werden. Ein möglicher Grund für die nach erstem Anschein widersprüchlichen Ergebnisse hinsichtlich des Einflusses des Kolbenanteils auf die Methanausbeute könnte im großen Schwankungsbereich des Stärkegehalts gelegen haben. Unter praxisrelevanten Bedingungen liegen die Stärkegehalte in einem Bereich zwischen 20 und 45 %, je nach Erntetermin und Sorte. Stärkegehalte von 45 % und mehr sind nur in speziellen Futtermitteln wie Corn-Cob-Mix oder einem reinen Kornfutter zu finden. Betrachtet man die Höhe der Gasausbeuten bei den Kolbenanteilen von 40 („Biomassetyphen“) bis 60 % (kolbenbetonte „Körnermaistypen“), was einer praxisüblichen Silomaisnutzung entspräche, so zeigte sich, dass die Unterschiede der Methanausbeuten zwischen den Sorten mit etwa 16 NL·(kg oTS)⁻¹ sehr gering waren und damit der Einfluss der Stärke ähnlich wie im Ernteterminversuch nahezu unbedeutend wurde.

Von den Kolben ist grundsätzlich eine höhere Gasausbeute zu erwarten. Der Ligningehalt im Kolben ist geringer als in der Restpflanze, da der Anteil des ADF abnimmt (KIRCHGESSNER 1987). Da Lignin für die Bakterien nicht abbaubar ist, senkt dies die Methanausbeute (EL BASSAM 1998). Zudem befindet sich im Korn der größere Anteil des Rohfettgehaltes (KIRCHGESSNER 1987), welches höhere Methanausbeuten liefert als Kohlenhydrate oder Proteine (BUSWELL 1936).

Die Restpflanzen erzielten eine durchschnittliche Methanausbeute von etwa 300 NI (kg oTS)⁻¹, was im Vergleich zum Maximalpotenzial (=100 % Kolben) bereits 83% der maximal möglichen Methanausbeute entspricht. Daraus ist zu folgern, dass die Restpflanze bei Silomais für die Biogasnutzung – im Gegensatz zur Tierernährung – wesentlich besser zu bewerten ist.

Die Untersuchung der Gasausbeuten von Varianten reiner Restpflanze zeigten auch, dass es hier deutliche Sortenunterschiede gab, die eventuell durch das unterschiedliche Abreifeverhalten zu erklären sind. So zeichnete sich die sehr späte und deshalb wenig abgereifte Sorte Mikado (S600) durch die höchsten Methanausbeuten der Restpflanze aus. Bei den Qualitätsparametern zeigte sie eine deutlich höhere Verdaulichkeit der organischen Substanz, eine deutlich höhere Zellwandverdaulichkeit der Restpflanze sowie einen höheren Zuckergehalt, welche offenbar zu der hohen Methanausbeute führten.

Um den Alterungseffekt des Kolbens und der Restpflanze hinsichtlich der Gasproduktion separat bewerten zu können, wurden in einem weiteren Ernteterminversuch des Jahres 2008 Kolben und Restpflanzen gesondert geerntet und untersucht. Es standen drei Erntetermine zur Verfügung, die Trockensubstanzwerte der Gesamtpflanze lagen zu den jeweiligen Terminen bei 33, 38 und 41 %. Die Gasbildung wurde in der Versuchsanlage der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft mit der dortigen Versuchsanlage untersucht. Die Abb. 5 zeigt als Beispiel die Ergebnisse für die Sorte NK Magitop (S250). Es ergibt sich ein im Vergleich zum HBT etwas höheres Gesamtniveau in der Gasausbeute. Sie bestätigen jedoch über die einzelnen Erntetermine hinweg uneingeschränkt die des vorhergehenden Versuchs der Mischungsreihen. Die erzielbaren Gasausbeuten der Maiskolben lagen in einem Bereich von knapp 400 NI (kg oTS)⁻¹, die Restpflanze etwa bei 320 NI (kg oTS)⁻¹. Deutliche Tendenzen im Verlauf der Abreife zu steigenden oder fallenden Gasausbeuten gab es nicht. Der Abreifezustand scheint auch bei einzelner Betrachtung der Pflanzenfraktionen so gut wie keinen Einfluss auf die erzielbaren Gasausbeuten zu haben, weder beim Kolben noch bei der Restpflanze.

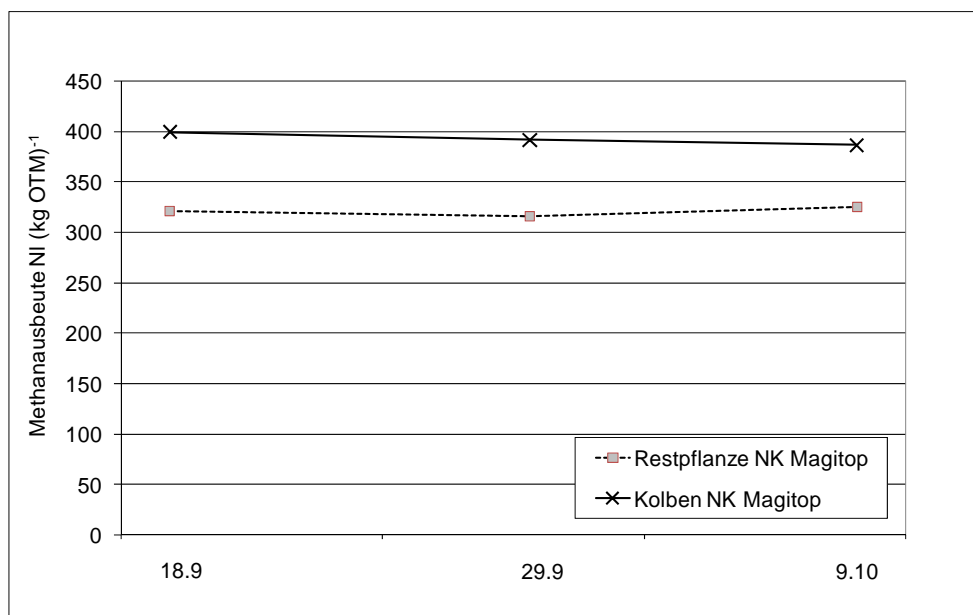


Abb. 5: Entwicklung der Methanausbeuten von Restpflanze und Kolben der Sorte NK Magitop in Abhängigkeit vom Erntetermin, Grafing 2008

Unter Verwendung der in den Versuchen ermittelten Gasmengen ist es möglich die in *Abb. 6* dargestellte kalkulatorische Betrachtung zum optimalen Sortentyp vorzunehmen. Die aus dem Kolben erzielbare Gasmenge wurde dazu mit $390 \text{ NI (kg oTS)}^{-1}$ und die der Restpflanze mit $320 \text{ NI (kg oTS)}^{-1}$ angesetzt und beispielhaft für die Sortentypen „kolbenbetont“ (60 % Kolbenanteil an der TM, ca. 35 % Stärke) und „restpflanzenbetont“ (40 % Kolbenanteil an der TM, etwa 28 % Stärke) berechnet.

Es ergeben sich bei entsprechender prozentualer Verteilung Gasmengen von $362 \text{ NI (kg oTS)}^{-1}$ für den kolbenbetonten Typ und $348 \text{ NI (kg oTS)}^{-1}$ für den restpflanzenbetonten. Die Differenz von $14 \text{ NI (kg oTS)}^{-1}$ entspricht einer Mehrleistung des kolbenbetonten Typs von nur 3,3% mehr Methan pro kg oTS.

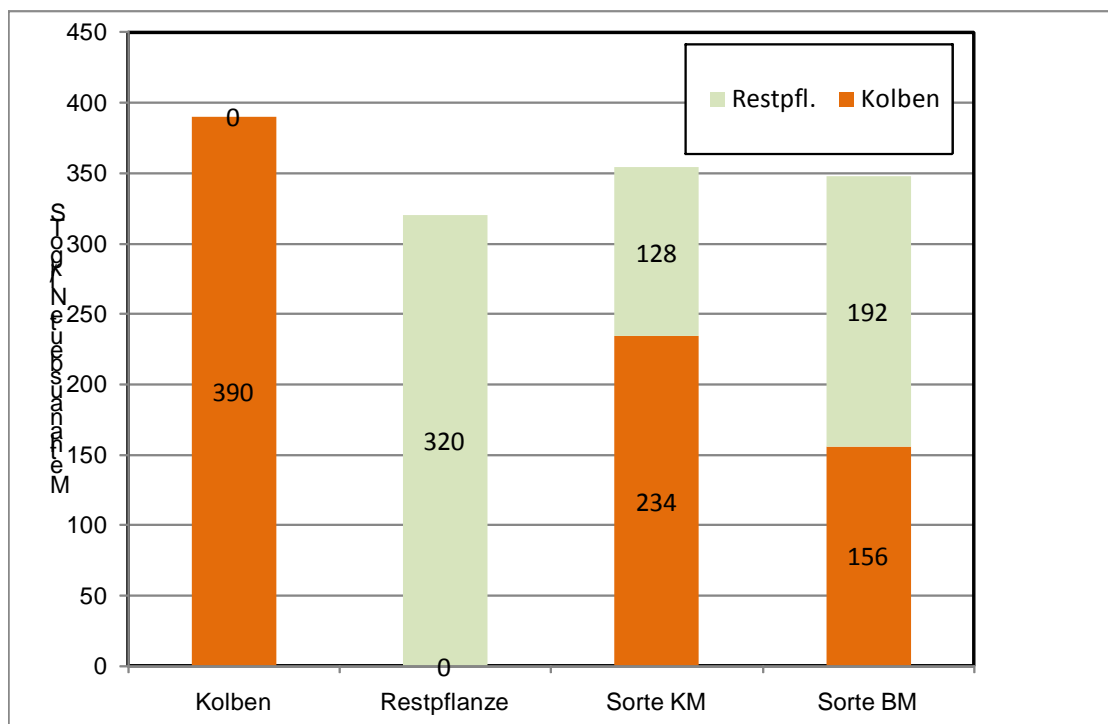


Abb. 6: Theoretische Gasausbeute von Kolben- (60 % Kolbenanteil an der TS; KM) bzw. restpflanzenbetonten (40 % Kolbenanteil an der TS; BM) Silomaisgenotypen

Zusammenfassend lässt sich festhalten:

1. Die Sorten unterschieden sich in der erzielbaren Methanausbeute nur wenig. Sowohl kolben- wie auch restpflanzenbetonte, frühe oder späte Genotypen erzielten ähnlich hohe Methanausbeuten.
2. Der Erntetermin sowie die Inhaltsstoffe zeigten in Sortenversuchen keine Beziehung zur Methanausbeute.
3. Nur in gezielt hergestellten Mischungsreihen und getrennten Untersuchungen von Restpflanzen und Kolben war ein Einfluss des Kolbenanteils bzw. Stärkegehalts auf die Methanausbeute nachweisbar.

Aus den Ergebnissen lässt sich folgende Beratungsaussage zur Sortenwahl ableiten: Der Einfluss des Genotyps und des Erntetermins auf die Höhe der Methanausbeute ist relativ gering und für die Praxis wenig relevant. Ein hoher Kolbenanteil und eine gesicherte Kolbenreife haben für die Biogaserzeugung eine geringere Bedeutung als in der Tierernährung. Zur Biogaserzeugung eignen sich deshalb sowohl kolben- wie restpflanzenbetonte

Genotypen. Der geringfügige Vorteil kolbenbetonter Sorten in der Methanausbeute wird durch höhere Trockenmasseerträge kolbenarmer und spätreiferer Sorten in der Regel ausgeglichen oder sogar überkompensiert. Sorten mit geringem Kolbenanteil und spätreifere Sorten erzielten in den Versuchen im Vergleich zu frühen Sorten aufgrund ihrer höheren Trockenmasseerträge meist höhere Methanhektarerträge. Zur Optimierung der Flächenproduktivität (Methanproduktion pro Hektar Maisfläche) sollten deshalb Genotypen mit einem hohen Biomasseertragspotenzial im Vordergrund stehen. Allerdings muss zur verlustarmen Silagebereitung der optimale TS-Bereich von 28 bis 35 % eingehalten und ein eventuell höherer Transportaufwand aufgrund der Wassergehalte berücksichtigt werden.

Danksagung

Die hier dargestellten Daten sind Teil der Ergebnisse verschiedener Forschungsprojekte gefördert von der Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe, Gülzow, der KWS Saat AG Einbeck und der Fa. Syngenta Seeds, Bad Salzflen. Projektpartner waren die Landwirtschaftskammer Niedersachsen, die Landesanstalt für landwirtschaftliches Maschinen- und Bauwesen der Universität Hohenheim Stuttgart und das Institut für Technik und Tierhaltung der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft.

Literatur

- AMON, T., V. KRYVORUCHKO, B. AMON, W. ZOLLITSCH, K. MAYER, S. BUGA & A. AMID, 2003: Biogaserzeugung aus Mais – Einfluss der Inhaltsstoffe auf das spezifische Methanbildungsvermögen von früh- bis spätreife Maissorten. Bericht über die 54. Tagung 2003 der Vereinigung der Pflanzenzüchter und Saatgutkaufleute Österreichs, BAL Gumpenstein, 25.-27. November 2003. 59-68.
- BUSWELL, A.M., 1936 Anaerobic Fermentations. Bull.No.32. Div. State Water Survey. Univ. of Illinois. 193.
- DE BOEVER, J.L., B.G. COTTYN, F.X. WAINMAN & J.M. VANACKER, 1986: The use of an enzymatic technique to predict digestibility, metabolizable and net energy of compound feedstuffs for ruminants. Anim. Feed Sci. Technol. **14**, 203-214.
- EL BASSAM, N. 1998: Energy plant species – Their use and impact on environment. London, James (Science Publishers) Ltd.
- EWERS, E., 1908. Über die Bestimmung des Stärkegehalts auf polarimetrischem Wege. Z. öffentl. Chem. 14:150-157
- Flachowsky G, 1994: Einsatz von maisstärkehaltigen Futtermitteln. Tierproduktion. Kraftfutter **94**, 224-232.
- FLACHOWSKY, G., BALDEWEG, P. & G. SCHEIN, 1992: A note on the in sacco dry matter degradability of variously processed maize grains and of different maize varieties in sheep. Anim. Feed Sci. Technol. **39**, 173-181.
- HEIERMANN M. & M. PLÖCHL, 2004: Biogas aus Pflanzen – Ergebnisse von Gärversuchen. 10. Internationale Tagung „Energetische Nutzung nachwachsender Rohstoffe“ an der TU Bergakademie Freiberg am 9. 10. September 2004, 79-84.
- HELFFRICH, D. & H. OECHSNER, 2003: Hohenheimer Biogasertragstest. Agrartechnische Forschung (2003) Heft **3**, 27-30.
- HERTWIG, F. & M. HEIERMANN, 2006: Energetischer Futterwert und Biogasausbeute unterschiedlicher Maissortentypen. Landesamt für Verbraucherschutz, Landwirtschaft

- und Flurneuordnung, Referat Grünland und Futterwirtschaft, 14641 Paulinenaue, Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim.
- JEROCH, H., G. FLACHOWSKY & F. WEIBBACH, 1993: Futtermittelkunde. Jena, Stuttgart: Gustav Fischer Verlag, 510 S.
- JUNG, H. G. & G. C. FAHEY, JR, 1983a: Nutritional implications of phenolic monomers and lignin: A review. *J. Anim. Sci.*, 57, 206-219.
- JUNG, H. G. & G. C. FAHEY, JR, 1983b: Interactions among phenolic monomers and in vitro fermentation. *J. Dairy Sci.*, 66, 1255-1265.
- KAISER, F., 2007: Einfluss der stofflichen Zusammensetzung auf die Verdaulichkeit nachwachsender Rohstoffe beim anaeroben Abbau in Biogasreaktoren. Dissertation. Technische Universität München. Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan, Lehrstuhl für Agrarsystemtechnik.
- KAISER, F., M. DIEPOLDER, J. EDER, S. HARTMANN, H. PRESTELE, R. GERLACH, G. ZIEHFREUND & A. GRONAUER, 2004: Ertragspotenziale verschiedener nachwachsender Rohstoffe in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Schriftenreihe Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft 13. 2004. 43-55.
- KIRCHGESSNER, M., 1987: Tierernährung, DLG Verlag, Frankfurt, 7. Auflage.
- KJELDAHL, J., 1883: Neue Methode zur Bestimmung des Stickstoffs in organischen Körpern. *Z. Anal. Chem.* 22,366-382.
- KRÜTZFELDT, B.A.E., 2004: Untersuchungen zur Vererbung von Qualitätseigenschaften bei Silomais (*Zea mays* L.). Dissertation Universität Hohenheim.
- LINKE, B., M. HEIERMANN, P. GRUNDMANN & F. HERTWIG, 2003: Grundlagen, Verfahren und Potenzial der Biogasgewinnung im Land Brandenburg. Leitfaden Biogas 2003.10-16.
- LUFF, G. & W. SCHOORL, (1929). *Chem. Weekbl.* 26, 130.
- SAS, 1999: User's Guide. Statistics, Version 8 Edition, SAS Institute Inc., Gary, NC, USA.
- SCHUMACHER, B., BOEHMEL C. & H. OECHSNER 2006: Welchen Energiemais wann ernten für die Biogasgewinnung? *Landtechnik* 2/2006, 84-85.
- STROBL, M. & U. KEYMER (2006): Technische und ökonomische Kennzahlen landwirtschaftlicher Biogasanlagen. *Landtechnik* 61 (5). 266-268.
- SÜDEKUM, K. H., A. OESTMANN & M. STANGASSINGER 1995: Zur Rolle von Lignin und phenolischen Monomeren in Futtermitteln für Wiederkäuer . II. Einfluss auf die Verdauung pflanzlicher Gerüstsubstanzen. *Übers. Tierernährg.* 23, 229-260.
- TILLEY, J.M.A. & R.A. TERRY, 1963: A two stage technique for the in vitro digestion of forage crops. *J. Brit. Grassl. Soc.* 18, 104-111.
- VAN SOEST, P. J., 1963: Use of detergents in the analysis of fibrous feeds. II. A rapid method for the determination of fiber and lignin. *J. Assoc. Off. Anal. Chem.* 46, 829-835.
- WEILAND P., C. RIEGER, T. EHRMANN, D. HELFFRICH, R. KISSEL & F. MELSCHER, 2004: Ergebnisse des bundesweiten Messprogramms an Biogasanlagen. Biogas zuverlässige Energie von Wiese und Acker. 13. Jahrestagung des Fachverbandes Biogas e.V. und AD-nett-Workshop "Biogas ohne Grenzen", Leipzig 2004.