

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Ökologischen Landbau und Pflanzenbausysteme

Pflanzenbauliche Untersuchungen zum Einfluss von Genotyp und Anbauverfahren
auf die Ertragsbildung und das Methanbildungspotenzial von Mais (*Zea mays* L.)

Barbara Eder

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für
Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München zur Erlangung
des akademischen Grades eines

Doktors der Agrarwissenschaften

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.Dr.h.c. A. Heißenhuber

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr. K.-J. Hülsbergen
2. Univ.-Prof. Dr. O. Christen (Martin-Luther-Universität
Halle-Wittenberg)

Die Dissertation wurde am 23.09.2009 bei der Technischen Universität München eingereicht
und durch die Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung
und Umwelt am 19.04.2010 angenommen.

I Inhaltsverzeichnis

I Inhaltsverzeichnis

II Abkürzungsverzeichnis

III Abbildungsverzeichnis

IV Tabellenverzeichnis

		Seite
1	Einleitung und Zielsetzung	1
2	Stand der Forschung – Literaturübersicht	5
2.1	Eignung von Mais zur Biogaserzeugung	5
2.2	Einfluss des Genotyps und des Reifetyps auf die Ertragsleistung	6
2.3	Einfluss des Reifetyps auf den TS-Gehalt	8
2.4	Einfluss des Reifetyps auf die Inhaltsstoffzusammensetzung	9
2.5	Einfluss des Erntetermins auf die Inhaltsstoffzusammensetzung.....	12
2.6	Methanausbeute	14
2.7	Methanausbeuten von Mais	16
2.8	Einfluss der Inhaltsstoffe auf die Methanausbeute	17
2.9	Einfluss des Erntetermins und der Sorte auf die Methanausbeute.....	20
2.10	Messmethoden - Vergleichbarkeit der Methanausbeuten.....	21
	Einfluss der Probenvorbereitung und -konservierung auf die Methanausbeute.....	22
2.11	Einfluss der Bestandesdichte auf Ertrag und Qualität.....	24
2.12	Anforderung an die Düngung	27
2.12.1	Eigenschaften und Zusammensetzung von Gärresten	28
2.12.2	Ertragsbeeinflussende Wirkung von Gärresten	30
2.13	Energie- und CO ₂ -Bilanzierung	30
2.13.1	Energiesituation	30
2.13.2	Klimawandel.....	31
2.13.3	Energie- und CO ₂ -Bilanz-Methode der Ökobilanzierung.....	32
2.13.4	Energie- und CO ₂ -Emissionen der Stromerzeugung aus Silomais.....	33
2.13.5	Energie- und Emissionsminderungspotenziale durch Biogas	44

3	Material und Methoden	46
3.1	Standorte und Vegetationsverlauf	46
3.2	Auswahl der Genotypen	48
3.3	Versuchsdurchführung	49
3.4	Beschreibung der Feldversuche	50
3.4.1	Ernteterminversuche	50
3.4.2	Düngungsversuche	51
3.4.3	Bestandesdichteverversuche	52
3.4.4	Energie- und CO ₂ -Bilanzierung des Silomaisanbaus	52
3.4.4.1	Bilanzierungsmodell REPRO und Dateneingabe	53
3.4.4.2	Methode der Energiebilanzierung	56
3.4.4.3	Methode der CO ₂ -Bilanzierung	60
3.5	Versuchsanlage und Statistik	62
3.6	Merkmalerfassung	62
4	Ergebnisse	65
4.1	Ernteterminversuche	65
4.1.1	Schwankungsbreite der untersuchten Parameter	65
4.1.2	Einfluss des Reifetyps auf die Methanausbeute	67
4.1.3	Einfluss des Erntetermins auf die Methanausbeute	76
4.1.4	Einfluss der Inhaltsstoffe und Verdaulichkeitsparameter auf die Methanausbeute.	78
4.1.5	Einfluss des Erntetermins und Reifetyps auf TS - Gehalt, TS - Ertrag und Methanertrag	89
4.2	Düngeversuch	101
4.2.1	Einfluss der Düngerart und Düngeintensität auf den TS-Ertrag	101
4.2.2	Einfluss des Reifetyps auf den TS-Ertrag	102
4.2.3	N _{min} -Gehalte nach der Maisernte	103
4.3	Bestandesdichteverversuch	105
4.3.1	Einfluss der Bestandesdichte auf TS-Ertrag, TS-Gehalt und Qualität	105
4.4	Energiebilanzierung	111
4.4.1	Energiebindung	111
4.4.2	Energieeinsatz	111
4.4.3	Stromerzeugung	113
4.4.4	Energieoutput, Energieintensität und Output/Input-Verhältnis	113
4.4.5	Einfluss des Genotyps	115
4.5	CO ₂ -Bilanzierung	116

4.5.1	Vermiedene CO ₂ - Emissionen durch Stromeinspeisung.....	116
4.5.2	CO ₂ -Emissionen der Maisproduktion.....	116
4.5.3	CO ₂ -Emissionen beim Bau und Betrieb der Biogasanlage	117
4.5.4	Saldo der CO ₂ -Emissionen aus Produktion, Konversion und Substitution	118
4.5.5	Einfluss des Genotyps.....	118
5	Diskussion	119
5.1	Ernteterminversuch	119
5.1.1	Qualität der Daten	119
5.1.2	Einfluss des Erntetermins auf die Methanausbeute	120
5.1.3	Einfluss des Reifetyps auf die Methanausbeute	125
5.1.4	Einfluss der Inhaltsstoffe und Qualitätsparameter	127
5.1.5	Optimaler Erntetermin und Reifetyp	133
5.2	Düngeversuch.....	137
5.3	Bestandesdichteversuch	140
5.3.1	Einfluss auf den Ertrag	140
5.3.2	Einfluss auf die Inhaltsstoffzusammensetzung	142
5.4	Energiebilanzierung.....	144
5.5	CO ₂ -Bilanzierung.....	150
6	Schlussfolgerungen und Ausblick	154
7	Zusammenfassung	156
8	Literaturverzeichnis	162
9	Anhang	194

II Abkürzungsverzeichnis

ADF	ADF- (acid <i>detergent fibre</i>) Gehalt [%] [‡] nach VAN SOEST (1963)
BHKW	Blockheizkraftwerk
CCM	Corn Cob Mix
DINAG	Zellulaseverdaulichkeit der Nicht-Stärke und nicht-wasserlöslichen Kohlenhydratfraktion der Ganzpflanze [%]
DINIG	Pansensaftverdaulichkeit der Nicht-Stärke und nicht-wasserlöslichen Kohlenhydratfraktion der Ganzpflanze [%]
DNDF-R	Verdaulichkeit der NDF [%] nach VAN SOEST (1963) und TILLEY & TERRY (1963) der Restpflanze
EJ	Exajoule
ELOS	Enzymlösliche organische Substanz [%] nach DE BOEVER <i>et al.</i> (1986), auch als Zellulaseverdaulichkeit bezeichnet
EM	Energiemaissorte
FAO	Beschreibung des Reifetyps bei Mais
FM	Frischmasse
FNR	Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe
GD_{5%}	Grenzdifferenz bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5%
GPS	Ganzpflanzensilage
HBT	Hohenheimer Biogasertragstest
IVDOM	<i>In vitro</i> -Verdaulichkeit der organischen Masse [%] nach TILLEY & TERRY (1963), auch als Pansensaftverdaulichkeit bezeichnet
IPCC	International Panel for Climate Change
KA	Kolbenanteil [% der TS]
KTBL	Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft
MA	Methanausbeute [NI (kg OTS) ⁻¹]

MD	Mineralische Düngung
ME	Mengeneinheit
MHE	Methanertrag pro Hektar [m ³ ha ⁻¹]
MJ	Megajoule
MW	Mittelwert
n.b.	nicht bestimmt
NDF, NDF-R	NDF- (<i>neutral detergent fibre</i>) Gehalt [%] nach VAN SOEST (1963), -R: der Restpflanze
N ges.	N gesamt
NI	Normliter
N_{min}	N-Gehalt mineralisch
OD	Organische Düngung mit Gärrest
ODM	Organic dry matter
OTS	Organische Trockensubstanz
RF	Rohfasergehalt [%] nach Weender Futtermittelanalyse
RP	Rohproteingehalt [%] nach KJELDAHL (1883)
STÄRKE	Stärkegehalt in der Ganzpflanze [%] [‡] nach EWERS (1908)
TS	Trockensubstanz
TS-G, TS-R, TS-K	Trockensubstanzgehalt [%] –G: der Ganzpflanze, -R: der Restpflanze, -K: des Kolbens
WLK, WLK-R	Gehalt an wasserlöslichen Kohlenhydraten [%] nach LUFF SCHOORL (1929), -R: der Restpflanze

‡ Alle Prozentwerte beziehen sich auf die Trockensubstanz.

III **Abbildungsverzeichnis**

Abb.

- 2.1 Gesamt-TS-Bildung (GTM-Ertrag) bei einer Silomais- (SM) und bei einer Energiemaissorte (EM), (SCHMIDT 2006)
- 2.2 Veränderungen der Kohlenhydrat- und Proteinanteile während der Abreife von Mais (JERCHOW et al. 1993)
- 2.3 Bestandteile einer Maispflanze mit ca. 30 % TS-Gehalt zur Ernte (STRUİK 1984, ZSCHEISCHLER 1990)
- 2.4 Inhaltsstoffzusammensetzung von Silomais mit ca. 30 % TS (nach ZSCHEISCHLER 1990)
- 2.5 Anteile der Energieträger am Primärenergieeinsatz in Deutschland (BMELV 2007)
- 2.6 Veränderung der C-Gehalte in der Bodenschicht von 0-17 cm in Abhängigkeit der Fruchtfolge (SCHACHTSCHABEL et al. 1989)
- 2.7 Anteil fossiler, nuklearer und erneuerbarer Energieträger am deutschen Strommix (MACHAT & WERNER 2007)
- 3.1 Struktur des Modells REPRO und Vernetzung der Module (nach HÜLSBERGEN, 2003)
- 3.2 Energiebilanzierung des Silomaisanbaus zur Stromerzeugung in Biogasanlagen
- 3.3 Klimabilanzierung des Silomaisanbaus zur Stromerzeugung in Biogasanlagen
- 4.1 Einfluss des Reifetyps auf den RP-Gehalt (2003-2006, Mittel der Erntetermine, Jahre und Orte)
- 4.2 Einfluss des Erntetermins auf die Methanausbeute (NI (kg OTS)⁻¹) unterschiedlicher Reifetypen (FAO 250 - 800), (Freising 2003, Saat April)
- 4.3 Einfluss des Erntetermins auf die Methanausbeute (NI (kg OTS)⁻¹) unterschiedlicher Reifetypen (FAO 250 - 800), (Freising 2003, Saat Mai)
- 4.4 Einfluss des Erntetermins auf die Methanausbeute (NI (kg OTS)⁻¹) unterschiedlicher Reifetypen (FAO 250 - 600), (Ingolstadt 2004)
- 4.5 Einfluss des Erntetermins auf die Methanausbeute (NI (kg OTS)⁻¹) unterschiedlicher Reifetypen (FAO 250 - 700), (Ismaning 2004)
- 4.6 Einfluss des Erntetermins auf die Methanausbeute (NI (kg OTS)⁻¹) unterschiedlicher Reifetypen (FAO 250 - 600), (Grucking 2006)
- 4.7 Einfluss des Erntetermins auf die Methanausbeute (2003-2006, Mittel der Sorten)

Abb.

- 4.8 Einfluss des Stärkegehalts auf die Methanausbeute (2003-2006, Korrelationskoeffizient, $P < 0,001$)
- 4.9 Einfluss des Gehaltes an wasserlöslichen Kohlenhydraten auf die Methanausbeute (2003-2006, Korrelationskoeffizient, nicht signifikant, * signifikant $P < 0,05$)
- 4.10 Einfluss der Zellwandbestandteile ADF, NDF und NDF-R auf die Methanausbeute (2003-2006, Korrelationskoeffizient, n.s. nicht signifikant, * signifikant bei $P = 0,05$, ** signifikant bei $P < 0,01$)
- 4.11 Einfluss der Verdaulichkeitsparameter IVDOM und ELOS auf die Methanausbeute (2003-2006, Korrelationskoeffizient, nicht signifikant, ** signifikant bei $P < 0,001$)
- 4.12 Einfluss der Zellwandverdaulichkeit auf die Methanausbeute (2003-2006, Korrelationskoeffizient, n.s. nicht signifikant, * signifikant bei $P < 0,05$)
- 4.13 Einfluss des Erntetermins auf den TS-Gehalt (2003-2006, Mittel der Sorte und Orte), gestrichelte Linien markieren den optimalen Bereich zur Silagebereitung
- 4.14 Einfluss des Erntetermins auf den TS-Ertrag (2003-2006, Mittel der Jahre)
- 4.15 Einfluss des Reifetyps auf den TS-Ertrag in Abhängigkeit vom Erntetermin (2003-2006)
- 4.16 Einfluss des Erntetermins auf den Methanertrag (2003-2006, Mittel der Sorten)
- 4.17 Einfluss des TS-Ertrags auf den Methanertrag (2003-2006)
- 4.18 Einfluss der Bestandesdichte auf den TS-Ertrag (Mittel der Sorten und Orte, 2002-2005, Balken zeigen die $GD_{5\%}$ der einzelnen Jahre)
- 5.1 Einfluss des Kolbenanteils auf die Methanausbeute bei Mischungen von Restpflanze und Kolben verschiedener Reifetypen. Restpflanze und Kolben wurden an einem Erntetermin getrennt geerntet und nachträglich je nach Kolbenanteil wieder zusammengemischt (Ingolstadt 2004)

IV Tabellenverzeichnis

Tab.

- 2.1 Abhängigkeit der für den Anbau empfohlenen Reifegruppe bei Mais von der Durchschnittstemperatur (ZSCHEISCHLER 1990)
- 2.2 Theoretische Methanausbeuten ($\text{l CH}_4 (\text{kg OTS})^{-1}$) der Fraktionen Kohlenhydrate, Proteine und Fette berechnet nach der Formel von BUSWELL (1936)
- 2.3 Richtwerte für die Methanausbeuten $\text{NI} (\text{kg OTS})^{-1}$ von Gärsubstraten (KTBL 2005)
- 2.4 Methanausbeuten ($\text{l} (\text{kg OTS})^{-1}$) von Silomais
- 2.5 Bestandesdichte (Pflanzen je m^2) für Silomais in Abhängigkeit von der Reifegruppe und Wasserversorgung (HEPTING 1982)
- 2.6 Zusammensetzung von Gärresten im Vergleich zu unbehandelter Rindergülle (WENDLAND 2008, VETTER 1977)
- 2.7 Energieeinsatz von Betriebsmittel und Technikeinsatz (HÜLSBERGEN 2003, 2008)
- 2.8 Energieeinsatz (GJ ha^{-1}) und Output/Input-Verhältnis nach Fruchtarten (HÜLSBERGEN 2003)
- 2.9 Direkte und indirekte N_2O -Emissionen (Mio. t. $\text{CO}_{2\text{äq}}$) aus landwirtschaftlich genutzten Böden in Deutschland, 2004 (DÄMMGEN 2006, HIRSCHFELD et al. 2008)
- 2.10 N_2O -Emissionen (g ha^{-1}) nach unterschiedlicher Behandlung (AMON et al. 2002)
- 2.11 Wurzelrückstände zum Zeitpunkt der Ernte
- 2.12 Methanemissionen (g ha^{-1}) nach unterschiedlicher Behandlung von Gülle (AMON et al. 2002)
- 2.14 Energieinput ($\text{kWh kWh}_{\text{el}}^{-1}$) und Emissionen ($\text{CO}_{2\text{äq}} \text{ kg kWh}_{\text{el}}^{-1}$) durch Bau und Betrieb verschiedener Biogasanlagen (BMELV 2007)
- 3.1 Übersicht der durchgeführten Versuche
- 3.2 Beschreibung der Versuchsstandorte
- 3.3 Übersicht der Ernteterminversuche (2003-2006)
- 3.4 Gärrestzusammensetzung und auszubringende Gärrestmenge
- 3.5 Übersicht der Bestandesdichteversuche (2002-2005)
- 3.6 Verfahrensschritte der organischen Düngervariante (Stufe III) und Energieeinsatz nach KTBL
- 3.7 Beschreibung der mit NIRS gemessenen Qualitätsmerkmale und der dafür verwendeten Bezeichnungen, Angabe in Gewichtsprozent der TS

Tab.

- 4.1 Ergebnisse der Ernteterminversuche (Ernteterminversuche 2003-2006)
- 4.2 Inhaltsstoffe unterschiedlicher Genotypen (2003 - 2006, Mittel der Erntetermine)
- 4.3 Verdaulichkeitsparameter und Methanausbeute unterschiedlicher Genotypen (2003 - 2006, Mittel der Erntetermine)
- 4.4 Methanausbeute (NI (kg OTS)⁻¹) in Abhängigkeit von Erntetermin und Reifetyp (2003-2006, Mittel der Erntetermine, Jahre und Orte)
- 4.5 Methanausbeute (NI (kg OTS)⁻¹) in Abhängigkeit vom Erntetermin (2003-2006, Mittel der Sorten)
- 4.6 Stärkegehalt (% TS) in Abhängigkeit vom Erntetermin (2003-2006, Mittel der Sorten)
- 4.7 Wasserlösliche Kohlenhydrate (% TS) in Ganz- und Restpflanze in Abhängigkeit vom Erntetermin (2003-2006, Mittel der Sorten)
- 4.8 RP-Gehalt (% TS) in Abhängigkeit vom Erntetermin (2003-2006, Mittel der Sorten)
- 4.9 Zellwandbestandteile (% TS) der Ganz- (ADF, NDF) und Restpflanze (NDF-R) in Abhängigkeit vom Erntetermin (2003-2006, Mittel der Sorten)
- 4.10 Verdaulichkeitsparameter (% TS) der Ganz- (IVDOM, ELOS) und Restpflanze (IVDOM-R) in Abhängigkeit vom Erntetermin (2003-2006, Mittel der Sorten)
- 4.11 Zellwandverdaulichkeit (% TS) der Ganz- (DINAG, DINIG) und Restpflanze (DNDF-R) in Abhängigkeit vom Erntetermin (2003-2006, Mittel der Sorten)
- 4.12 TS-Gehalt (% FM) in Abhängigkeit von Reifetyp und Erntetermin (2003-2006, Mittel der Orte)
- 4.13 TS-Ertrag (dt ha⁻¹) in Abhängigkeit vom Erntetermin (2003-2006, Mittel der Sorten)
- 4.14 TS-Ertrag (dt ha⁻¹) in Abhängigkeit von Reifetyp und Ort (2003-2006)
- 4.15 Methanertrag (m³ ha⁻¹) Freising 2003
- 4.16 Methanertrag (m³ ha⁻¹) Ingolstadt 2004
- 4.17 Methanertrag (m³ ha⁻¹) Ismaning 2004
- 4.18 Methanertrag (m³ ha⁻¹) Grucking 2006
- 4.19 TS-Ertrag (dt ha⁻¹) in Abhängigkeit von Düngerart und Düngeintensität (Mittel aus 2 Sorten, 2 Orte, 2 Jahre)
- 4.20 TS-Ertrag (dt ha⁻¹) in Abhängigkeit von Düngerart, Düngeintensität und Reifetyp (Mittel aus 2 Orte, 2 Jahre)

Tab.

- 4.21 N_{\min} -Gehalt (kg N ha^{-1}) im Boden (0-90 cm) nach der Maisernte in Abhängigkeit von Düngerart und Düngeintensität (Mittel der Sorten, Freising, Grucking, 2005-2006)
- 4.22 Ertragsveränderung ($\Delta \text{ TS dt ha}^{-1}$) durch Erhöhung der Bestandesdichte in Abhängigkeit vom Reifetyp (Mittel über Orte, 2002-2005)
- 4.23 TS-Gehalt (% FM) in Abhängigkeit der Bestandesdichte (Pflanzen m^{-2}) (Mittel der Sorten und Orte)
- 4.24 Signifikanz des Bestandesdichteeinflusses auf Ertrag und Qualitätsmerkmale (Mittel der Sorten und Orte)
- 4.25 Wechselwirkung zwischen Reifetyp und Bestandesdichte auf Ertrag und Qualitätsmerkmale (Mittel über Orte)
- 4.26 Einfluss von Reifetyp und Bestandesdichte auf die Methanausbeute (2002, 2 Orte)
- 4.27 Energiebilanz von Silomais zur Stromerzeugung aus Biogas in Abhängigkeit von Düngerart und Düngeintensität (Mittel über Sorte, Orte und Jahre)
- 4.28 CO_2 -Bilanz von Silomais zur Stromerzeugung aus Biogas in Abhängigkeit von Düngerart und Düngeintensität (Mittel der Sorten, Orte und Jahre)
- 5.1 Korrelationsmatrix Sortenversuch (2002 2 Orte, 12 Sorten) und Ernteterminversuch (2004, 1 Ort, 8 Sorten)
- 5.2 Methanausbeute (NI (kg OTS)^{-1}) von Mais unterschiedlicher TS-Gehalte (% FM) berechnet nach Amon et al. (2006a) und Kaiser (2008) mit Werten aus Kirchgessner (1987)
- 5.3 Sensitivitätsanalyse des Stromertrags und Output/Input-Verhältnis in Abhängigkeit vom elektrischen Motorwirkungsgrad
- 5.4 Sensitivitätsanalyse des Output/Input-Verhältnisses in Abhängigkeit von Düngerart, Düngeintensität und Wärmenutzung
- 5.5 CO_2 -Bilanz verschiedener Zwischenfrüchte

1 Einleitung und Zielsetzung

Die fossilen Energiereserven nehmen ab und führen weltweit zu Engpässen bei der Versorgung der Weltbevölkerung. Die Abnahme hat unweigerlich negative Folgen auf die Weltwirtschaftsentwicklung. Zudem führt die regional unterschiedliche Verfügbarkeit der Rohstoffe zur Zunahme von Konflikten (ARNOLD 2008). Des Weiteren hat die Nutzung der fossilen Energiereserven einen Anstieg der Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre zur Folge. Dadurch steigt die Temperatur in der Atmosphäre und damit verbunden kommt es weltweit zur Klimaveränderung, welche zu schwerwiegenden ökologischen und ökonomischen Folgen führt, wie z.B.

- Anstieg des Meeresspiegels und dadurch Bedrohung der an Küsten und auf Inseln lebenden Menschen
- Erhöhung der Sturmhäufigkeit und -intensität (IPCC 2007).

Eine klimaneutrale und regenerative Energieversorgung ist deshalb unabdingbar für ein zukünftig friedliches und nachhaltiges Leben auf der Erde. Die Nutzung von Biomasse zur Energieerzeugung erfüllt diese Forderungen einer zukunftsweisenden Energieversorgung:

1. Biogene Energieträger sind bei ihrer energetischen Nutzung CO₂-neutral. Im Gegensatz zu fossilen Energieträgern setzen biogene Energieträger bei ihrer Nutzung (Verbrennung, Verstromung, Vergasung) nur CO₂ frei, das sie während ihres Wachstums aus der Atmosphäre entzogen haben. Die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre erhöht sich nicht, denn das freiwerdende Kohlendioxid bewegt sich in einem Kreislauf zwischen Festlegung und Freisetzung. Demgegenüber erfolgte die CO₂-Festlegung der fossilen Energieträger im Paläozoikum (vor ca. 400 Mio. Jahren), einem anderen Erdzeitalter. Das CO₂, das damals der Atmosphäre entzogen wurde, wird heute der jetzigen Atmosphäre zugeführt. Dies führt zu einer Erhöhung der CO₂-Konzentration. Allerdings können bei der Erzeugung und Nutzung von biogenen Energieträgern CO₂-Emissionen auftreten, die durchaus relevante Dimensionen einnehmen. Eine CO₂-Bilanz für die Herstellung und Nutzung von biogenen Energieträgern ist daher für eine ganzheitliche Betrachtung sinnvoll (BMLEV 2007).
2. Biomasse ist regenerativ und kann bei nachhaltiger Wirtschaftsweise den zukünftigen Generationen als Energieträger zur Verfügung stehen (MÖLLER et al. 2005). Fossile Energiereserven sind nach verschiedenen Schätzungen in etwa 100-150 erschöpft. Hingegen kann Biomasse in vergleichsweise kurzen Zeiträumen und mit einfacher und gefahrloser Technik hergestellt werden. Im Gegensatz zu fossilen Ener-

gieträgern, deren Förderung stark regional begrenzt ist, ist die Biomasseproduktion abgesehen von Nährstoffen und Wasser nicht durch das geologische Vorkommen bestimmter Rohstoffe regional eingeschränkt. Sie kann bei sorgfältiger Wirtschaftsweise nahezu in jedem Land der Erde erzeugt werden. Ein großer Vorteil gegenüber den fossilen Energiereserven (einschließlich Uran) vor allem hinsichtlich der Friedenssicherung ist daher die weltweite Verfügbarkeit und Regenerierbarkeit von Biomasse (Extremstandorte ausgenommen). Auf der anderen Seite kann ein verstärkter Biomasseanbau zur Energieerzeugung, insbesondere durch die begrenzte Flächenverfügbarkeit zu einer möglichen Konkurrenz zur Nahrungsmittelerzeugung führen, sodass eine Ausweitung durchaus kritisch betrachtet werden kann (BMLEV 2007).

Eine mögliche energetische Nutzungsform von Biomasse ist Biogas. Dazu wird Biomasse (beispielsweise Energiepflanzen) in Biogasanlagen unter Luftabschluss mikrobiell abgebaut. Bei diesem Abbauprozess von organischer Substanz entsteht Biogas, ein Gasgemisch, das zu überwiegenden Anteilen aus Methan (> 50 %), dem eigentlichen Energieträger, besteht. Das Gasgemisch wird in der Regel in Blockheizkraftwerken zu Strom und Wärme umgewandelt, wobei nur das Methan zur Energieerzeugung beiträgt. Ein m³ Methan hat einen Energieinhalt von 10 kWh, was dem Heizwert von einem Liter Heizöl entspricht. Einen detaillierten Einblick zur Biogastechnik geben EDER & SCHULZ (2007).

Das Interesse an der Biogaserzeugung aus landwirtschaftlichen Nutzpflanzen in Deutschland ist groß. Die rasante Entwicklung in dieser Branche hat die Zahl der landwirtschaftlichen Biogasanlagen im Laufe der letzten fünf Jahre auf etwa 4000 ansteigen lassen.

Bundesweit verfügen die Biogasanlagen über eine elektrische Leistung von 1,27 MWh Strom und versorgen 2,5 Mio. Haushalte. Damit vermeiden sie eine CO₂-Emission von ca. 8,5 Millionen Tonnen jährlich (FACHVERBAND BIOGAS E.V. 2006).

2007 wurde mit Biomasse etwa zehn Prozent der durch erneuerbare Energien produzierten Strommenge erzeugt. Davon stellte Biogas einen Anteil von 55 %.

Des Weiteren führt die energetische Nutzung von Biomasse zu mehr Versorgungssicherheit durch Reduzierung der Importabhängigkeit und zur Erhöhung der regionalen Wertschöpfung und Beschäftigung. Die Neuinvestitionen der Branche beliefen sich 2007 auf 650 Mio. Euro. Es wurden in etwa 10.000 Arbeitsplätze alleine in der Biogasbranche geschaffen.

Der FACHVERBAND BIOGAS E.V. 2006 prognostiziert bis 2020 für Deutschland eine Steigerung der Anlagenzahl auf ca. 40.000 Biogasanlagen.

Diese große Nachfrage nach Biogas brachte nicht nur technisch viele Neuerungen, sondern auch hinsichtlich der Substratwahl. Während noch vor 10 Jahren das Hauptsubstrat einer

Biogasanlage tierische Exkremente und außerlandwirtschaftliche Cosubstrate waren, werden heute nahezu in allen Biogasanlagen eigens angebaute Energiepflanzen vergoren (EDER & SCHULZ 2007). Die Nachfrage nach geeigneten Energiepflanzen ist dementsprechend hoch. Diese neue Nutzungsrichtung stellt auch neue Anforderungen an die Sorten und die Pflanzenzüchtung. Grundsätzlich kommen als Rohstoffe für die Biogasanlage Kulturarten in Frage, die folgende Kriterien erfüllen:

- gute Lagerfähigkeit, denn Biogasanlagen müssen über das Jahr hinweg mit einer konstanten Substratmenge und -zusammensetzung betrieben werden
- hohe Methanausbeute (NI (kg OTS)^{-1})
- hoher TS-Ertrag (dt ha^{-1})
- geringe Kosten für die Biomasseproduktion und Vergärung pro erzeugter Kilowattstunde Strom ($\text{€ kW}_{\text{el}}^{-1}$).

Da Silomais diese Anforderungen gut erfüllt, wird er heute bereits in großem Umfang für die Nutzung in Biogasanlagen angebaut. In 85 % der mit nachwachsenden Rohstoffen betriebenen Biogasanlagen wird er als Energielieferant eingesetzt (WEILAND et al. 2004, STROBL & KEYMER 2006).

Bislang kommen als Sorten die für die Tierernährung zur Verfügung stehenden Genotypen zum Anbau. Das sind in aller Regel kolbenbetonte Sorten. Allerdings ist zu prüfen, ob sich diese Sorten auch für die speziellen Anforderungen der Biogaserzeugung optimal eignen. Die Bedeutung des Kolbenanteils bei der Biogaserzeugung ist bisher nicht ausreichend geklärt. Sollten hohe Kolbenanteile kein Hauptkriterium für die Biogaserzeugung sein, so könnte durch die Verschiebung der Reife (spätreife Sorten) und die Verwendung eines anderen Sortentyps (restpflanzenbetont) ein weit höheres Biomassepotenzial (im Vergleich zu kolbenbetonten Sorten) erreicht werden. Die Frage des optimalen Maisgenotyps für die Nutzung im Biogasprozess wurde bislang noch nicht wissenschaftlich bearbeitet.

Neben der Sortenfrage sind auch grundlegende produktionstechnische Fragestellungen insbesondere zur Bestandesdichte, zur Düngung und zum Erntetermin zu untersuchen.

Zur Beantwortung dieser Fragestellungen wurden in den Jahren 2002 bis 2006 umfangreiche Versuche mit unterschiedlichen Maisgenotypen in klimatisch unterschiedlichen Regionen in Bayern und Niedersachsen durchgeführt.

Die Versuche waren Teil eines Forschungsverbundprojektes, das zusammen mit der Universität Hohenheim und der KWS Saat AG Einbeck durchgeführt wurde. Aufgabe des Partners aus der Züchtung (KWS) war die Bereitstellung von Maisgenotypen für die Biomasse-

produktion. Dieses Sortenmaterial wurde in Feldexperimenten hinsichtlich der Eignung zur Erzeugung von Biomasse für die energetische Verwertung in Biogasanlagen geprüft. Die dafür benötigten Gasanalysen wurden vom Partner an der Universität Hohenheim durchgeführt, der darüber hinaus noch weitere Fragestellungen, wie die Übertragung der Laborwerte in die Praxis und die Einflüsse der Substratkonservierung, bearbeitet hat.

Folgende Feldversuche wurden an mehreren Versuchsstandorten mit unterschiedlichen Boden- und Klimabedingungen durchgeführt:

In **Ernteterminversuchen** wurde das Verhalten von spätreifen Sorten hinsichtlich der Ertrags- und Gasbildungsleistungen in Abhängigkeit vom Erntetermin geprüft. Im Vordergrund der Untersuchung stand der Einfluss der Qualitätsparameter von Silomais auf die Methan- ausbeute und den Methanertrag pro Hektar. Darüber hinaus sollte der optimale Erntezeitpunkt in Abhängigkeit vom TS-Gehalt und TS-Ertrag ermittelt werden.

In **Düngeversuchen** wurde die Wirkung von Gärrestsubstraten im Maisanbau im Vergleich zur Mineraldüngung analysiert. Da bei der Vergärung von Mais große Mengen nährstoffreicher Gärreste als organischer Dünger anfallen und die enthaltenen Mineralstoffe möglichst verlustarm verwertet werden sollten, ist die Nährstoffeffizienz ein wichtiges Beurteilungskriterium von Biogassystemen. In den Versuchen wird geprüft, inwieweit die Düngung mit Gärresten ausreicht, das hohe Ertragspotenzial von späten Sorten auszuschöpfen.

Die **Bestandesdichtever suche** sollten zeigen, inwieweit späte und biomassereiche Sorten andere Ansprüche an die Bestandesdichte stellen als frühreife Sorten.

Auf der Grundlage der Versuchsergebnisse wurden modellgestützt **Energie- und Klimabilanzen** des Silomaisanbaus zur Stromerzeugung in Biogasanlagen unter dem Einfluss differenzierter Düngung untersucht. Die Bestimmung des Energieinputs der Energieerzeugung aus Maisbiomasse sollte Aufschluss über die Effizienz eines solchen Anbau- und Produktionssystems geben. Darüber hinaus sollte die CO₂-Bilanzierung eine Bewertung der Klimawirkung der Maisproduktion zur Stromerzeugung aus Biogas ermöglichen. Analysiert wurde die gesamte Produktionskette von der Biomasseproduktion bis zur Stromerzeugung.

2 Stand der Forschung – Literaturübersicht

2.1 Eignung von Mais zur Biogaserzeugung

Silomais nimmt aufgrund seiner hohen Ertragsfähigkeit und leichten Konservierbarkeit eine wichtige Rolle im Energiepflanzenanbau ein. Über 80 % der Biogasanlagenbetreiber verwenden Mais als Substrat (WEILAND et al. 2004, Strobl & KEYMER 2006).

Auch hinsichtlich seiner physiologischen Eigenschaften ist er im Vergleich mit anderen Kulturarten vorteilhaft zu bewerten. Mais als C4-Pflanze kann Sonnenenergie besonders gut nutzen, da er ein sehr effektives System zur CO₂-Fixierung aufweist. Mais kann noch bei CO₂-Konzentration von 5-10 ppm assimilieren, während C3-Pflanzen bei einer Unterschreitung von 40-50 ppm bereits zum Abbau der gebildeten Stoffe übergehen (ZSCHEISCHLER 1990). Zudem kann Mais Stickstoff aus organischer Düngung gut verwerten und ist aus stoffwechselfysiologischer Sicht als N-effizient zu bewerten (DIEPENBROCK 1989). So entzieht Silomais für eine Biomasseleistung von 150 kg TS ha⁻¹ nur etwa 200 kg N ha⁻¹, im Gegensatz zu beispielsweise Welschem Weidelgras, das zur Bildung der gleichen Menge Biomasse 350 kg N ha⁻¹ benötigt (LAURENZ 1987). Des Weiteren begünstigt die besondere Anordnung der Blätter einen geringen Wasserverbrauch durch Transpiration. Mais benötigt zur Erzeugung von 1 kg TS 300-400 l Wasser, wogegen beispielsweise die anderen Getreidearten 500 bis 600 l verbrauchen (WALTHER 1947).

Mais ist mit sich selbst weitgehend verträglich. Dauerversuche mit Körnermaisbau in Monokultur zeigten keinen relevanten Ertragsrückgang (ZSCHEISCHLER 1990). Stärkeres Auftreten von Maisschädlingen wie Drahtwurm, Diabrotica und Maiszünsler als Folge hoher Maisanbaukonzentrationen können durch pflanzenbauliche Maßnahmen (Sortenwahl und Bodenbearbeitung) abgeschwächt werden (PAPST 2004).

Ungünstige Effekte, die der Maisanbau mit sich bringen kann, sind die späte Bodenbedeckung im Juni und dadurch die erhöhte Erosionsanfälligkeit sowie die Gefahr von Struktur Schäden bei nicht angepasster Bodenbearbeitung und intensiver Gülledüngung (ZSCHEISCHLER 1990, LÜTKE-ENTRUP et al. 1993, FINKE et al. 1999, CAI et al. 2002, DE BIE 2005). Minimalbodenbearbeitung, vielgliedrige Fruchtfolgen und eine dem Bedarf angepasste Düngung können diese negativen Effekte minimieren (LAURENZ 1984, STEINHAUSER & HEISSENHUBER 1985, AUERSWALD 1989, MIHELIC 2004, DE BIE 2005, FIENER & AUERSWALD 2007).

Die wichtigsten Kriterien für die Wahl einer Silomaisorte zur Biogasproduktion sind neben den allgemeinen pflanzenbaulichen Aspekten wie Standfestigkeit, Krankheitsanfälligkeit u.a. der TS-Ertrag pro Hektar und die Höhe der Methanausbeute bezogen auf die organische Trockensubstanz (AMON et al. 2006a,b). Sind beide im Optimum, so ist auch die Zielgröße der Substratproduktion „Methanertrag pro ha“ optimiert. RODE et al. (2005) nennen die Erhöhung des TS-Ertrags einen wichtigen Beitrag zur Ökonomie der landwirtschaftlichen Produktion.

2.2 Einfluss des Genotyps und des Reifetyps auf die Ertragsleistung

Für den TS-Ertrag von Silomais ist die Wahl der richtigen Sorte von wesentlicher Bedeutung. Allein die Umstellung auf Hybridsorten konnte den Ertrag um etwa 30 % steigern (ZSCHEISCHLER 1990). Und selbst bei ausschließlicher Verwendung hochwertiger Hybridsorten zeigen sich genotypspezifische Ertragsunterschiede in der TS-Leistung, die bei den bayerischen Landessortenversuchen bis zu 20 % betragen (ANONYMUS 2006a).

Grundsätzlich werden bei der Sortenwahl folgende Kriterien berücksichtigt:

- Nutzungsrichtung (Silo- oder Körnermais)
- sichere Ausreife
- hohe Ertragsleistung
- gute Standfestigkeit
- Resistenz gegen Wurzel- und Stängelfäule
- Kältetoleranz während der Jugendentwicklung
- geringe Bestockungsneigung.

Die sichere Ausreife einer Sorte ist ein wichtiges Kriterium, um standortspezifisch hohe TS-Erträge zu erhalten. Die Reifebestimmung einer Maissorte wird durch die FAO-Zahl beschrieben. Dabei wird das weltweite Maissortiment durch eine dreistellige Zahl in neun Reifegruppen von 100 bis 900 untergliedert. Die Hunderterstelle kennzeichnet die Reifegruppen, während die Zehnerziffer zur weiteren Unterteilung innerhalb der Reifegruppe herangezogen wird. Die in Deutschland stets mit einer 0 ausgefüllte Einerstelle steht für ein gelbschaliges Korn. Die Differenz von 10 Reife-Einheiten gibt unter mitteleuropäischen Verhältnissen im Allgemeinen einen Reifeunterschied von 1-2 Tagen oder 1-2 % im TS-Gehalt der Körner zum Zeitpunkt der Ernte wieder.

In Deutschland wird seit 1998 zur besseren Erfassung der Reife zwischen Silo- und Körnermais in einer nutzungsspezifischen Reifebeschreibung unterschieden. Für Silomais wird zusätzlich die Abreife der Restpflanze über den TS-Gehalt der Gesamtpflanze berücksichtigt. Das Maissortiment wird in vier Reifegruppen früh, mittelfrüh, mittelspät und spät unterteilt (Tab. 2.1). Die Wahl der Reifegruppe ist im Wesentlichen von der täglichen Durchschnittstemperatur und der Wärmesumme während des Wachstums von Mais abhängig. So werden in kühleren Regionen Deutschlands Sorten aus dem frühen Reifesortiment empfohlen, während in wärmeren, klimatisch begünstigten Anbaugebieten Sorten aus dem mittelfrühen und mittelspäten Sortiment zum Einsatz kommen.

Tab. 2.1: Abhängigkeit der für den Anbau empfohlenen Reifegruppe bei Mais von der Durchschnittstemperatur (ZSCHEISCHLER 1990)

Reifegruppe	Reifezahl	tägl. Durchschnittstemperaturen	Wärmesumme
		°C	1. Mai – 30. September
früh	S 170-220	13,5 - 14,4	2.070-2.210
mittelfrüh	S 230-250	14,5 - 15,5	2.210-2.370
mittelspät	S 260-290	15,6 - 16,4	2.370-2.520
spät	S 300-350	16,5 - 17,4	2.520-2.670

Zusätzlich zur FAO-Zahl können die Maisgenotypen weiter unterteilt werden. Kriterien sind dabei das Abreifeverhalten von Korn bzw. Kolben und der Restpflanze, Stängelfestigkeit und die Anzahl der Körner und Kornreihen.

Die Erhöhung der Ertragsleistung von Silomais ist durch die Verschiebung des Blütezeitpunktes möglich (LANDBECK & SCHMIDT 2005, SCHMIDT 2006, CAPRISTO et al. 2007, SCHITTENHELM 2008). Spät blühender Mais bildet durch eine längere vegetative Entwicklungsphase mehr Blattmasse aus und erzielt daher höhere TS-Erträge (Abb. 2.1). Nach SCHNELL & UDZ (1981) besteht zwischen Ertrag und Frühreife eine negative Beziehung. Es steht vor allem die Zahl der Blätter in einem engen Zusammenhang mit der Reifezeit einer Sorte. Frühe Sorten haben nur 6 – 8 Blätter. Sehr späte Sorten können bis zu 48 Blätter aufweisen. Bei den in Deutschland angebauten Sorten liegt die Blattzahl zwischen 8 und 16 Blättern (ZSCHEISCHLER 1990).

CAPRISTO et al. (2007) stellen in ihren Untersuchungen an 11 verschiedenen Maishybriden unterschiedlicher Reifezahl fest, dass der Masseertrag bei später reifenden Hybriden zu-

nahm. Späte Sorten zeichnen sich dabei durch die höchste Lichtaufnahme bei geringster Lichtnutzungseffizienz aus.

Nach SCHMIDT (2006) ist durch die Verschiebung der Reife eine Verdoppelung der Ertragszuwächse auf bis zu 300 dt TS ha⁻¹ möglich.

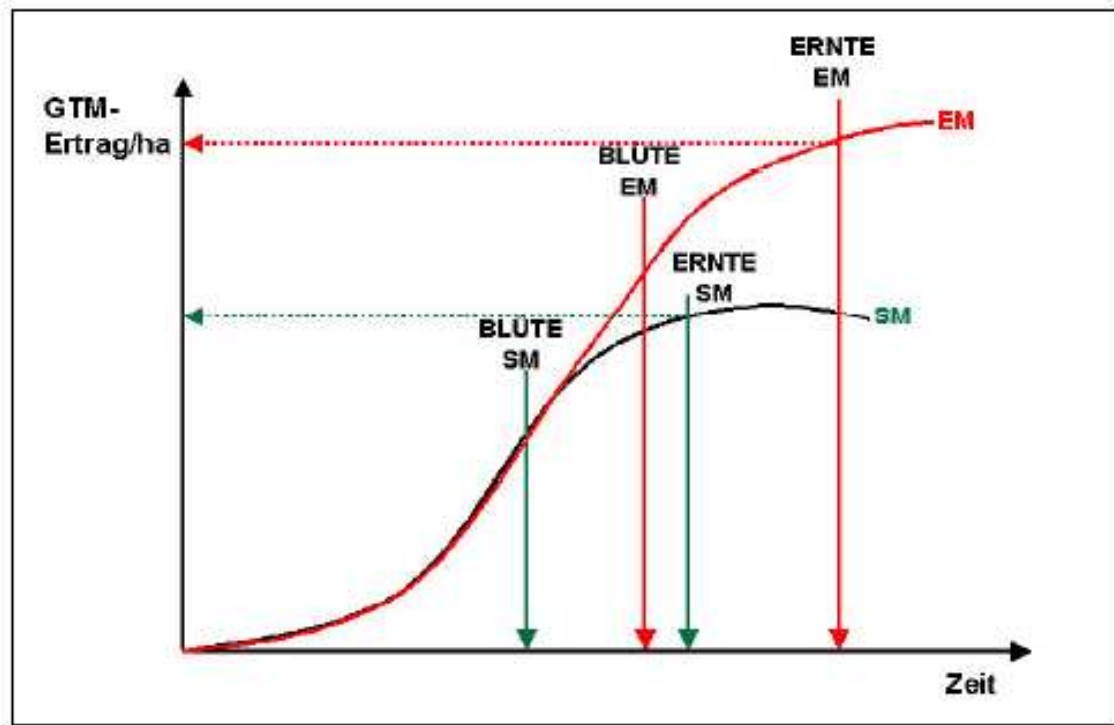


Abb. 2.1: Gesamt-TS-Bildung (GTM-Ertrag) bei einer Silomais- (SM) und bei einer Energie- (EM) maissorte, (SCHMIDT 2006).

Allerdings ist unter hiesigen Anbaubedingungen eine Verlängerung der vegetativen Entwicklungsphase durch Verschiebung des Blütezeitpunktes mit geringeren TS-Gehalten und mit geringeren Kolbenanteilen zum Erntezeitpunkt verbunden.

2.3 Einfluss des Reifetyps auf den TS-Gehalt

Mais zur Biogasproduktion muss ganzjährig mit möglichst gleichbleibender Qualität zur Verfügung stehen. Als Konservierungsform kommt ausschließlich die Silierung in Betracht. Für eine optimale Silagebereitung sind nach SPIEKERS (2008) TS-Gehalte von mindestens 28 % bis maximal 35 % notwendig. Während die untere Grenze Sickersaftbildung und Sickerverluste vermeiden soll, erlaubt das Einhalten der oberen Grenze eine gute Verdichtung.

NÖSBERGER & OPITZ V. BOBERFELD (1986) und HUSSEN (1983) definieren den optimalen Erntetermin für Silomais etwas früher, bei TS-Gehalten zwischen 27 % und 33 %. Ergebnisse der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen zeigen aber auch, dass Silagen mit einem höheren TS-Gehalt über 38 % noch eine gute Qualität liefern können (ANONYMUS 2006b).

Der TS-Gehalt der Maisganzpflanze liegt bis zur Blüte und Bestäubung bei etwa 17 %, danach steigt er kontinuierlich an, wobei allein in den Stadien der Milch- und Teigreife bis 85 % der Korn-TS gebildet werden (ZSCHEISCHLER 1990). Demnach ist für eine ausreichende TS-Bildung die Kornbildung ausschlaggebend. Dies bestätigen auch Untersuchungen von EDER & KRÜTZFELDT (2000), welche die TS-Entwicklung verschiedener Maisgenotypen bei acht Ernteterminen beobachteten. Die Untersuchung ergab, dass um einen silierfähigen TS-Gehalt von mindestens 28 % zu erzielen, Genotypen benötigt werden, die einen ausreichenden Kolbenanteil aufweisen. Die Auswahl der Sorte hinsichtlich der Reifegruppe muss danach abgestimmt werden. In den Untersuchungen von EDER & KRÜTZFELDT (2000) erzielten die Genotypen aus dem mittelfrühen und mittelspäten Reifebereich in etwa die geforderten TS-Gehalte in der Ganzpflanze. Auch ZSCHEISCHLER 1990 empfiehlt für Deutschland anhand der Temperatursumme Sorten aus dem frühen bis mittelspäten Reifebereich. Sorten aus dem späten Reifebereich (FAO > 300) erreichen genügend hohe TS-Gehalte erst spät, so dass eine ausreichend lange Vegetationsdauer notwendig wird. Für den Silomaisanbau sehr günstige Lagen sind in Deutschland selten, entsprechend wenig Bedeutung haben späte Sorten.

2.4 Einfluss des Reifetyps auf die Inhaltsstoffzusammensetzung

Die Verlängerung des vegetativen Wachstums durch die Verschiebung des Blütezeitpunktes hat auch einen wesentlichen Einfluss auf die Zusammensetzung der Inhaltsstoffe der Maispflanzen zum Erntezeitpunkt. Insbesondere die Zusammensetzung der Kohlenhydrate verändert sich während des Wachstums und der Abreife (Abb. 2.2). 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 Phase über, so beginnt die Kornfüllungsphase und aus dem Zucker in der Restpflanze wird vermehrt Stärke gebildet und in den Kolben eingelagert. Die Stärkebildung beginnt mit der Kolbenbildung und nimmt mit fortschreitender Kolbenentwicklung zu (STÄHLIN 1968). Es besteht daher eine enge positive Beziehung zwischen dem Stärkegehalt und dem Kolbenanteil. Die anderen Kohlenhyd-

ratbestandteile (Nicht-Stärke) nehmen relativ zur Stärke ab (GROSS & AVERDUNK 1974). Außerdem besteht eine enge positive Beziehung zwischen Stärkegehalt und TS-Gehalt (GROSS & AVERDUNK 1974).

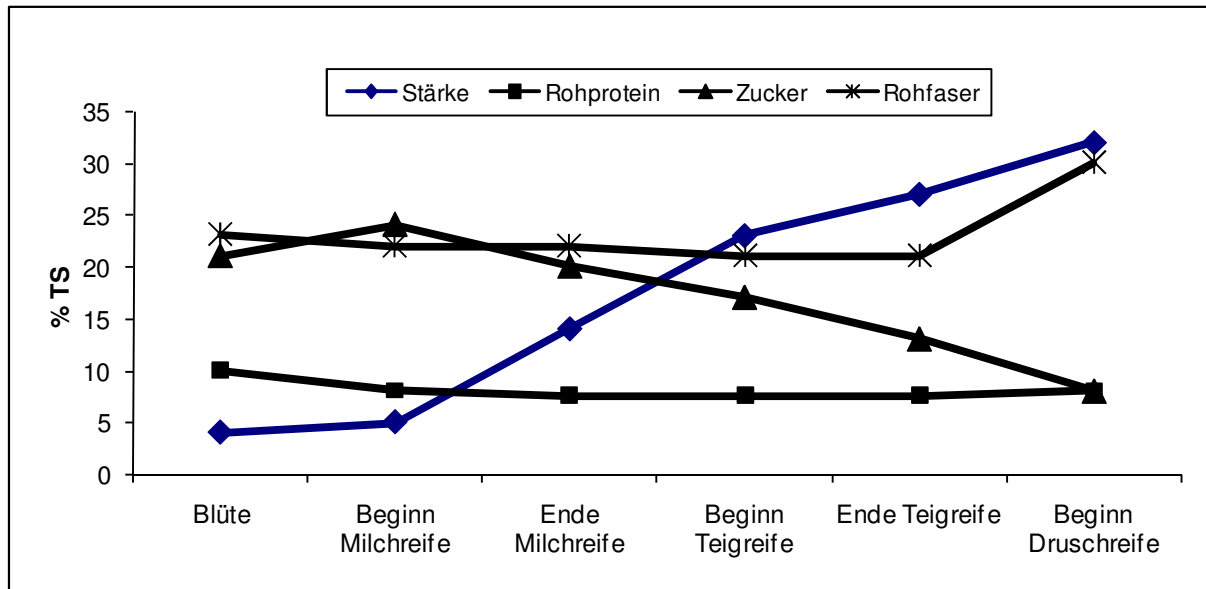


Abb. 2.2: Veränderungen der Kohlenhydrat- und Proteinanteile während der Abreife von Mais (JERCHOW et al. 1993).

Bei der Ernte setzt sich die Maispflanze aus dem Zellinhalt, der in der Tierernährung als nahezu vollständig verdaulich gilt, und aus den Zellwänden, deren Bestandteile eine unterschiedliche Verdaulichkeit aufweisen, zusammen (vgl. Abb. 2.3 und 2.4.). Der Zellinhalt der Ganzpflanze besteht zur Siloreife vor allem aus Stärke im Korn und zu geringeren Anteilen aus wasserlöslichen Kohlenhydraten und Proteinen. Außerdem sind Vitamine, organische Säuren, Chlorophyll und sekundäre Inhaltsstoffe in geringer Menge in den Zellen vorhanden. Die Zellwand, die zum Zeitpunkt der Siloreife etwa die Hälfte der TS ausmacht (ANDRIEU et al. 1999), wird zum größten Teil aus Zellulosefibrillen gebildet, die in eine Matrix aus phenolischen Bestandteilen (Lignin) und Hemizellulose eingebettet sind. Hemizellulose und Zellulose sind unterschiedlich verdaulich und damit abbaubar, Lignin hingegen ist nahezu unverdaulich.

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 (JUNG & FAHEY 1983a,b, SÜDEKUM et al. 1995, EL BASSAM 1998), mindert es die mögliche Methanausbeute.

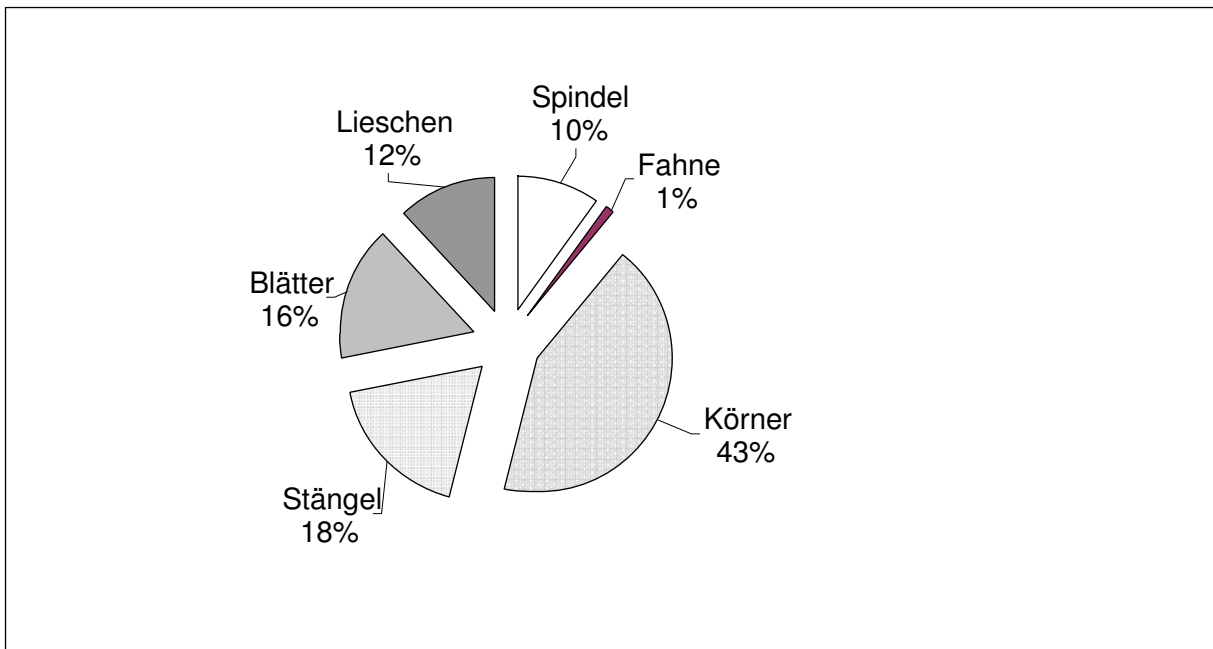


Abb. 2.3: Bestandteile einer Maispflanze mit ca. 30 % TS-Gehalt zur Ernte
(nach STRUIK 1984, ZSCHEISCHLER 1990).

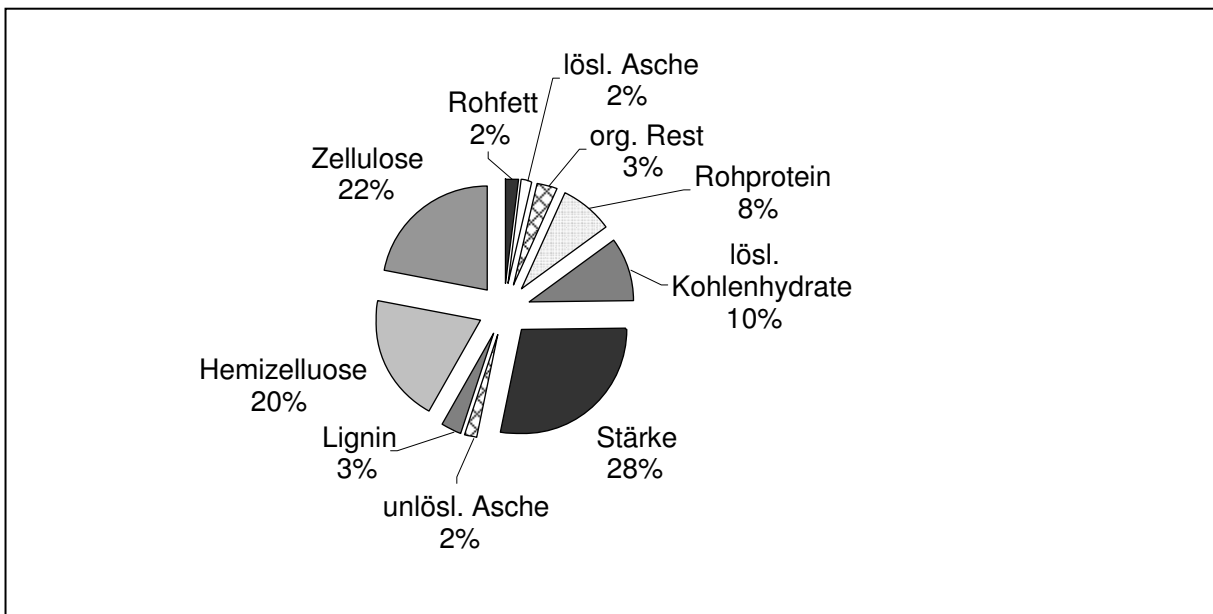


Abb. 2.4: Inhaltsstoffzusammensetzung von Silomais mit ca. 30 % TS
(nach ZSCHEISCHLER 1990).

In der Tierernährung wird der Ligningehalt als ein sehr wichtiger Faktor genannt, der die Zellwandverdaulichkeit (Abbaubarkeit) limitiert (WOLF et al. 1993, LUNDVALL et al. 1994, ARGILLIER et al. 1995a, MÉCHIN et al. 1998, 2000). Allerdings scheint die Abbaubarkeit von Maiszellwänden weniger vom Ligningehalt, sondern mehr vom Grad der Lignifizierung abzu-

hängen (ANDRIEU et al. 1993, CONE & ENGELS 1993). Durch die Bildung sogenannter Lignozellulosekomplexe oder auch durch andere spezifische molekulare Interaktionen der Ligninbestandteile kann der Zellwandabbau behindert werden (GRABBER et al. 1997, 1998, JUNG et al. 1998a,b, BARRIÈRE et al. 2003). KEATING et al. (2006) zeigen in ihren Untersuchungen, dass Lignin hydrolytische Enzyme binden kann und so der Abbau behindert wird. JUNG & BUXTON (1994) berichten, dass zwischen Hybriden Unterschiede im Futterwert auftraten, die sowohl auf Abweichungen im Ligningehalt als auch der Ligninzusammensetzung beruhten. Bereits in den achtziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts wurde von WERMKE (1985) und ZIMMER & WERMKE (1986) darauf hingewiesen, dass eine ähnliche chemische Komposition der Zellwände nicht notwendigerweise auch mit der entsprechenden Verdaulichkeit verbunden ist. Vergleichbare Beobachtungen an Maisstängeln zur *in vitro*-Abbaubarkeit wurden einige Jahre später auch von BARRIÈRE et al. (1998b) gemacht. Somit muss ein hoher Ligningehalt nicht zwangsweise zu einer geringeren Biogasausbeute führen.

2.5 Einfluss des Erntetermins auf die Inhaltsstoffzusammensetzung

HEPTING (1988) stellte fest, dass mit zunehmender Abreife von Mais, ab einem bestimmten Zeitpunkt, der Ertrag insgesamt, der Kolbenenertrag, besonders stark aber der Ertrag der Restpflanze zurückgeht. Höhere Atmungsverluste und das Absterben der unteren Blätter führt kontinuierlich zum Ertragsrückgang.

Der Erntetermin hat einen deutlichen Einfluss auf die Substratzusammensetzung (ZSCHEISCHLER 1990). Werden spätreife Sorten zum selben Erntetermin wie frühreife Sorten geerntet, so haben sie im Vergleich einen geringeren Kolbenanteil, weniger Stärke, mehr Zucker und einen höheren Gehalt an faserigen Bestandteilen. Gleichzeitig ist anzunehmen, dass der Grad der Lignifizierung noch nicht so weit fortgeschritten ist wie bei frühreifen Sorten. Von Bedeutung ist in diesem Zusammenhang der Einfluss des Kolbens auf die Gasbildung, da durch einen Verzicht auf hohe Kolbenanteile züchterisch ein großer Zuwachs in der Ertragsleistung an Gesamt-TS pro Hektar zu realisieren wäre. In der landwirtschaftlichen Praxis herrscht bislang die Meinung vor, dass hohe Kolbenanteile zu hohen Biogaserträgen führen. Wäre aber nur ein Mindestkolbenanteil zur Erreichung eines silierfähigen TS-Gehaltes notwendig, könnten durch die Nutzung von spätreifen Sorten insgesamt höhere TS-Erträge erzielt werden.

In der Tierernährung wird der optimale Erntetermin für Silomais durch die tierphysiologischen Anforderungen bestimmt (KIRCHGESSNER 1987). Um hohe Milchleistungen und Zunahmen, bei gleichzeitig begrenzter täglicher Futteraufnahmekapazität zu erzielen, müssen

energiereiche Futtermittel bereitgestellt werden. Für Silomais zur Tierernährung ist deshalb der optimale Erntetermin erreicht, wenn eine hohe Energiedichte und Verdaulichkeit vorliegt und Ertragszuwächse nicht mehr oder nur noch in geringem Umfang zu erwarten sind (EDER & KRÜTZFELDT 2000). Zu diesem Zeitpunkt sollte die größtmögliche Stärkeeinlagerung in den Körnern erfolgt und die Qualität der Restpflanze noch nicht zu stark abgesunken sein. Wann genau dieser optimale Erntetermin vorliegt, wird in der Literatur gegensätzlich diskutiert (GOERING et al. 1969, GRUBER et al. 1983, PEX et al. 1996). WEISSBACH & AUERBACH (1999) definieren den optimalen Erntetermin, wenn der Saldo aus Zuwachs der verdaulichen Energie im Kolben und Energieverlust durch Austrocknen und steigende Rohfasergehalte der Restpflanze noch nicht negativ ist. Nach GROSS & PESCHKE (1980) sollte ab einem Kolben-TS-Gehalt von 45 % mit der Ernte von Silomais begonnen werden. EDER & KRÜTZFELDT (2000) hingegen fanden einen optimalen Erntetermin bei einem Kolben-TS Gehalt von 60 %.

Ob diese Anforderungen auch für die Silomaisbewertung zur Biogaserzeugung gelten, ist bislang ungeklärt. Während sich hinsichtlich der Silierfähigkeit und des Ertrages bei Biogasmais vergleichbare Anforderungen bezüglich des optimalen Erntetermins ableiten lassen, ergeben sich für die Qualität andere Maßstäbe. Mit Biogasmais müssen sich hohe Methan- ausbeuten erzielen lassen. Insofern ist nur die hydrolytisch-enzymatische und bakteriologische Abbaubarkeit eines Stoffes von Bedeutung. Dies steht im Gegensatz zur Tierernährung, wo nicht die Abbaubarkeit eines Stoffes, sondern die Verdaulichkeit von Bedeutung ist. Grundsätzlich ist es nahe liegend, anzunehmen, dass Maissorten mit einer hohen Verdaulichkeit, auch hohe Methan- ausbeuten liefern. Allerdings ist nicht geklärt, ob umgekehrt Sorten mit einer niedrigen Verdaulichkeit tatsächlich schlechtere Gas- ausbeuten erzielen. Der wesentliche Unterschied zwischen der Nutzung von Mais in der Tierernährung und zur Biogas- produktion ist die Verweilzeit des Substrates. Während die Aufenthaltszeit der Nahrung im Verdauungstrakt des Tieres physiologisch auf maximal drei Tage begrenzt ist (KIRCH- GESSNER 1987), liegen die durchschnittlichen Verweilzeiten in landwirtschaftlichen Biogasan- lagen bei 60 Tagen und mehr (WEILAND et al. 2004). Es ist anzunehmen, dass in dieser Zeit auch schwerer abbaubare Stoffe wie die Gerüstsubstanzen (ADF, NDF, Hemizellulosen und Zellulosen) abgebaut werden. Daher gilt zu prüfen, ob eine Abhängigkeit der Methan- ausbeute von den verschiedenen Kohlenhydratfraktionen gegeben ist. Von besonderem Interesse ist, ob das Verhältnis der Inhaltsstoffe aus der Fraktion der Kohlenhydrate wie Stärke, Zu- cker, Zellulosen und Hemizellulosen einen relevanten Einfluss auf die Methan- ausbeute hat. Für die Entwicklung von Maissorten für die Biogaserzeugung und die Ableitung des optima- len Erntetermins zur Beratung der landwirtschaftlichen Praxis ist es von entscheidender Be- deutung, die Wirkung dieser Komponenten auf die Gas- ausbeute zu kennen.

2.6 Methanausbeute

Die Höhe der theoretisch möglichen Methanausbeute eines Substrats ist eine Funktion der Substratzusammensetzung. Sie kann anhand der Formel nach BUSWELL (1936) berechnet werden (Tab. 2.2). Demnach bestimmen die Anzahl der Kohlenstoff-, Wasserstoff- und Sauerstoffatome die erzielbare Methanmenge. Kohlenhydrate mit ihrem einfachen Strukturaufbau liefern im Vergleich zu Fetten und Proteinen nach diesem Berechnungsschema eine relativ niedrige Menge von etwa $370 \text{ l CH}_4 (\text{kg OTS})^{-1}$, falls ein vollständiger Abbau stattfindet.

Tab. 2.2 Theoretische Methanausbeuten ($\text{l CH}_4 (\text{kg OTS})^{-1}$) der Fraktionen Kohlenhydrate, Proteine und Fette, berechnet nach der Formel von BUSWELL (1936)

Stofffraktion	Methanausbeute	Methangehalt im Biogas
Kohlenhydrate	373	50
Rohfett	998	71
Rohprotein	477	61

Für Biomasse, die sich aus diesen drei Stofffraktionen (Kohlenhydrate, Rohfett, Rohprotein) zusammensetzt, geben LINKE et al. (2003) ein Methanpotenzial von 480 l CH_4 für 1 kg Biomasse, welche zu 100% abgebaut wird, an. KAISER (2006) kommt bei Biomassen unterschiedlichster Herkunft auf Methanpotenziale bis zu 545 l CH_4 pro kg OTS . SCHMACK (1999) gibt für die theoretisch erzielbaren Gasausbeuten Werte zwischen 400 und 700 Litern Biogas pro kg OTS an.

Die Richtwerte für Gasausbeuten unterschiedlicher Biomassen (KTBL 2005) machen deutlich, dass die Methanbildung verschiedener Biomassen trotz unterschiedlicher Inhaltsstoffzusammensetzung relativ ähnlich sind. Mit Ausnahme von Stroh schwanken sie zwischen knapp 300 und $380 \text{ l CH}_4 (\text{kg OTS})^{-1}$ (vgl. GUNASEELAN 1997, HEIERMANN et al. 2002).

Tab. 2.3: Richtwerte für die Methanausbeuten (NI (kg OTS)⁻¹) von Gärsubstraten
(KTBL 2005)

Gras, frisch	324
Getreide, Korn	371
Kartoffel, mittlerer Stärkegehalt	380
Maissilage, teig-wachsreif	312
Rübenblatt	324
Massenrüben	364
Zuckerrüben	357
Weizenstroh	189
Sudangras/Zuckerhirse	292

Messergebnisse von SCHMACK (1999), OECHSNER & LEMMER (2001), AMON et al. (2003a,b), LINKE et al. (2003), KAISER et al. (2004), CZEPUK et al. (2006) sowie MÄHNERT (2007) treffen die kalkulatorischen Werte der Gasausbeuten für pflanzliche Biomasse relativ gut. Demnach kann angenommen werden, dass die erzielbare Methanausbeute von Mais sich auch in einem Bereich zwischen 300 und 400 l (kg OTS)⁻¹ bewegt.

Die tatsächlich erzielbare Höhe der Methanausbeute ist von weiteren Faktoren wie Fermentertemperatur, Verweilzeit des Substrates im Fermenter und der Faulraumbelastung (kg OTS m⁻³ Fermenter) abhängig (WELLINGER et al. 1991, BADGER et al. 1979).

Auch können hohe Schwefel- und Stickstoffgehalte im Substrat zu einer Hemmung der mikrobiellen Aktivität durch Schwefelwasserstoff und Ammoniak führen (WELLINGER et al. 1991, OECHSNER 2006, WEILAND 2001). Eine ausgewogene Substratzusammensetzung ist deshalb sowohl für die Praxis als auch für Laboruntersuchungen nötig (EDER & SCHULZ 2007, OECHSNER 2006).

Neben der stofflichen Zusammensetzung ist die Struktur eines Stoffes für die Höhe der Methanausbeute von Bedeutung. Substrat wird abgebaut, wenn zum einen die prozessbiologischen Bedingungen für die beteiligten Mikroorganismen (pH, H₂S, NH₄-Gehalt, C:N Verhältnis) gegeben sind (WEILAND 2001, CALLAGHAN et al. 2002), MÄHNERT 2007) und wenn die Substratstruktur den anaeroben Abbau zulässt. Beispielsweise gilt Mais als ein komplexer abbaubares Substrat im Vergleich zu Rapsöl, welches nur aus den Bausteinen Glycerin und Fettsäuren besteht. Auch haben die Zwischenprodukte des anaeroben Abbaus einen Einfluss auf die Abbaubarkeit des Substrates. Beispielsweise ist die Anhäufung von organischen Säuren, vor allem der Essigsäure (z.B. bei siliertem Material) nicht uneingeschränkt

wünschenswert, da nur wenige Bakterien (Methanosarcina, Methanosaeta) Essigsäure, aber viele Formiate (Methanococcus) und H_2 zu Methan umbauen können (HORCINE 2005).

Aus der Tierernährung ist bekannt, dass die substratspezifische Abbaubarkeit auch eng mit dem Gehalt an lignozellulosen Strukturen korreliert. Substanzen, wie beispielsweise Lignin, können von den anaeroben Bakterien kaum abgebaut werden (JUNG et al. 1983, JUNG & FAHEY 1983a,b). Zum einen sind phenolische Verbindungen schwer abzubauen und zum anderen haben diese Verbindungen eine bakterio-statische Wirkung auf die anaeroben Bakterien. Sie bewirken eine Hemmung des Bakterienwachstums, eine Hemmung der Enzymaktivität und der Haftfähigkeit der Bakterien auf Faserbestandteilen (CHESSON & MONRO 1982, SÜDEKUM et al. 1995).

Der Abbaugrad von organischer Substanz in Biogasanlagen wird mit Werten zwischen 40 % und 80 % der zugeführten organischen Masse angegeben (BESSON et al. 1982 in WELLINGER et al. 1991, SCHMACK 1999, VEEKEN & HAMELERS 1999, VOLLMER 2000). In Laborversuchen sind Abbaugrade bis 95 % möglich (CZEPUCK et al. 2006, MÄHNERT 2007).

Dementsprechend kann die tatsächlich erzielbare Methanausbeute von der theoretisch möglichen deutlich abweichen.

2.7 Methanausbeuten von Mais

Mais ist im Wesentlichen ein Kohlenhydratprodukt. Die TS besteht zu ca. 70 % aus Kohlenhydraten, zu ca. 8 % aus Protein und zu ca. 4 % aus Fett. Der Rest setzt sich aus Wasser, Fasern, Zucker und verschiedenen Mineralstoffen zusammen (ZSCHEISCHLER 1990). Unter Berücksichtigung der in Tab. 2.2 dargestellten theoretisch möglichen Ausbeuten der Stofffraktionen kann bei Mais rein rechnerisch mit einer Methanausbeute von ca. $340 \text{ l CH}_4 (\text{kg OTS})^{-1}$ gerechnet werden. In der Literatur finden sich die in Tab. 2.4 dargestellten Werte wieder.

Tab. 2.4: Methanausbeuten ($l \text{ (kg OTS)}^{-1}$) von Silomais

Jahr	Methanausbeute	Quelle
1986	284-304	ZAUNER & KÜNTZEL (1986)
1997	342	NALLATHAMBI (1997)
1998	397	POUECH et al. (1998)
2001	490-550	PLÖCHL et al. (2001)
2001	330-450	OECHSNER & LEMMER(2001)
2002	350-480	JÄKEL (2002)
2002	480-745	HEIERMANN & PLÖCHL (2002)
2003	195-375	AMON et al. (2003a,b)
2003	330-400	OECHSNER et al. (2003)
2004	260-360	KAISER et al. (2004)
2005	330	SPECKMEIER et al. (2005)
2005	362	HORCINE (2005)
2005	350	MØLLER (2005)
2006	310-350	SCHUMACHER et al. (2006)
2006	350-400	AMON et al. (2006a,b)
2006	480-700	HERTWIG & HEIERMANN (2006)
2006	400	MUKENGELE et al. (2006)
2007	350-410	MÄHNERT (2007)
2008	374-574	STICKSEL et al. (2008)
2008	282-419	SCHITTENHELM (2008)

Die höchsten Methanausbeuten von ca. $700 \text{ NI CH}_4 \text{ (kg OTS)}^{-1}$ erzielten HEIERMANN & PLÖCHL (2002) und HERTWIG & HEIERMANN (2006). Die mit $195 \text{ NI CH}_4 \text{ (kg OTS)}^{-1}$ niedrigste Ausbeute berichtete AMON et al. (2003a). Werte zwischen 300 und 400 werden am häufigsten angegeben und treffen damit die rechnerisch mögliche Ausbeute am besten. Erwähnenswert erscheint, dass seit Einführung der VDI-Richtlinie 4630 (VDI 2005) zur Durchführung der Gasanalysen 2005 die Schwankungsbreite nicht deutlich geringer wurde.

2.8 Einfluss der Inhaltsstoffe auf die Methanausbeute

Die Erkenntnisse zum Einfluss der Inhaltsstoffzusammensetzung auf die Methanausbeute stammen überwiegend aus Kulturarten übergreifenden Untersuchungen (HOPFNER-SIXT et al. 2005, AMON et al. 2007, KAISER 2008).

Fettgehalt

Ein hoher Fettgehalt wirkt sich stark positiv auf die Gasausbeute aus (BUSWELL 1936, CZEPUCK et al. 2006). Allerdings ist ihr Gehalt in pflanzlichen Biomassen abgesehen von Ölpflanzen vergleichsweise gering ist, und damit die Relevanz für die Methanausbeute ebenso (AMON et al. 2006a, KAISER 2008).

Rohprotein

Ein hoher RP-Gehalt hat grundsätzlich einen positiven Einfluss auf die Methanausbeute. Eiweiß ist in der Biogasanlage zwar relativ langsam abbaubar, bringt aber eine vergleichsweise hohe Biogasausbeute bei Methangehalten um 63 % (BUSWELL 1936, CZEPUCK et al. 2006). Trotz der durchaus deutlichen Unterschiede in den Gehalten zwischen den verschiedenen Kulturarten (z.B. Gräser ca. 14 % RP, Mais ca. 8 % RP) fanden sowohl AMON et al. (2006a) wie auch KAISER (2008) keinen signifikanten Einfluss auf die Ausbeute. RP wird allerdings auch häufig bei zu hoher Konzentration im Substrat als Ursache für eine Hemmung der Bakterien im Fermenter genannt, was dazu führt, dass ein hoher RP-Gehalt bei gleichzeitig engem C:N Verhältnis die Methanausbeute dann negativ beeinflussen kann (OECHNSER 2006, MÄHNERT 2007). Bei der Bestimmung der Methanausbeute im Labor ist daher die Analyse des RP-Gehaltes im Vorfeld der Substratmischung besonders wichtig.

Rohfaser

Es besteht Übereinstimmung, dass hohe Rohfasergehalte die Methanausbeute negativ beeinflussen (BASERGA 1998). RHEINHOLD & NOACK (1956) und SCHUCHARDT (1983) ermittelten für Substrat von extensiv genutzten Wiesen mit einem hohen Rohfaseranteil weniger Gas als bei jungem Gras. Auch OECHNSER & LEMMER (2001) dokumentieren einen negativen Zusammenhang zwischen dem Rohfasergehalt und der Gasausbeute. AMON et al. (2003a,b) bezeichnen die Rohfaser von geringem Wert für die Methanbildung.

Auch bei Batchversuchen von OECHNSER et al. (2003) an acht verschiedenen Maissorten unterschiedlicher Reifegrade wurde ein negativer Einfluss eines hohen Rohfasergehaltes auf die spezifische Methanausbeute festgestellt. Allerdings waren die Unterschiede mit 10 NI CH₄ (kg OTS)⁻¹ sehr gering und damit kaum relevant. Die Ausbeuten lagen zwischen 330 und 340 NI CH₄ (kg OTS)⁻¹.

Lignin

Lignin wird in der Literatur übereinstimmend als ein Parameter zitiert, der die Abbaubarkeit von Substraten und die Methanausbeute negativ beeinflusst (KAISER et al. 2004, OECHNSER 2006, HOPFNER-SIXT et al. 2005, LI et al. 2008). Sein Anteil an der TS ist bei Mais allerdings so gering (Mais 3 %, GPS 4-6 %, Gras 2-7 %), dass er beispielsweise in der Futtermittelbewertung keine Berücksichtigung findet (vgl. KIRCHGESSNER 1987). Dementsprechend ist es nahe liegend, dass bei Untersuchungen von AMON et al. (2006a,b), KAISER (2008) und SCHITTENHELM (2008) kein signifikanter Einfluss auf die Methanausbeute festgestellt wurde.

Kohlenhydrate

Zum Einfluss der Kohlenhydrate auf die Methanausbeute finden sich widersprüchliche Ergebnisse. Die Fraktion der Kohlenhydrate setzt sich bei Mais zusammen aus dem Stärkegehalt, den wasserlöslichen Kohlenhydraten (Zucker), dem NDF- und ADF-Gehalt. Die Stärke befindet sich ausschließlich im Korn und ist leicht abbaubar. Der NDF- und ADF-Gehalt spiegeln den Anteil der Zellwand in der Maispflanze wieder. Dabei umfasst der NDF-Gehalt die leichter abbaubaren Kohlenhydrate, die in neutraler Detergentienlösung erfasst werden können, während der ADF-Gehalt die schwer abbaubaren Kohlenhydrate und Lignine beinhaltet.

Die wenigen Untersuchungen, die bislang zu Mais vorliegen, lassen keine eindeutige Aussage über die Bedeutung dieser Stoffgruppen zu. KAISER et al. (2004) fanden bei Ernteterminversuchen einen negativen Zusammenhang zwischen TS-Gehalt des Kolbens und Gasausbeute bei Maissilagen. Da mit zunehmendem TS-Gehalt des Kolbens der Stärkegehalt ansteigt, kann auf eine negative Beziehung zwischen Stärke und Gas geschlossen werden.

Ergebnisse von LINKE et al. (2003), HEIERMANN & PLÖCHL (2004) und HERTWIG & HEIERMANN (2006) hingegen zeigten einen positiven Zusammenhang zwischen Stärkegehalt und Methanausbeute. Auffallend waren dabei die für Mais ungewöhnlich hohen Methangehalte im Gas von über 64 %.

AMON et al. (2003a,b) ermittelten bei Untersuchungen der Mais-Restpflanze geringere Methanausbeuten im Vergleich zu Maiskörnern oder CCM. Dies lässt wiederum den Schluss zu, dass Stärke höhere Methanausbeuten liefert als die Kohlenhydrate der Zellwand (Zellulose, Hemizellulose).

Auch KAISER (2008) fand bei Untersuchungen zu verschiedenen landwirtschaftlichen Kulturarten einen Einfluss der unterschiedlichen Kohlenhydratfraktionen auf die Methanausbeute. Während in seinen Ergebnissen allerdings Zellulosen und der organische Rest (Stärke, Zu-

cker u.a.) einen gleich hohen Einfluss auf die Methanbildung haben, erzielen die Hemizellulosen einen um 40 % höheren Beitrag zur Methanbildung.

Demgegenüber stehen die Erkenntnisse von SCHITTENHELM (2008), der bei Untersuchungen zu Mais keine Bedeutung des Erntetermins und der Inhaltsstoffe auf die Methanausbeute feststellt. Weder Änderungen im Stärke-, Zucker-, Zellulose-, Hemizellulose oder ADL-Gehalt führten zu veränderten Gasausbeuten. Sie lagen im Schnitt bei $335 \text{ NI CH}_4 (\text{kg OTS})^{-1}$.

Auch AMON et al. (2006a) fanden nur eine unbedeutende Wirkung des Kolbenanteils bzw. des Stärkegehaltes auf die Methanausbeute bei Mais. Die Autoren fanden die höchsten Ausbeuten noch vor der Kolbenbildung bei TS-Gehalten unter 22 %. Obwohl die Unterschiede wie auch die Gehalte zwischen den Sorten bei Rohprotein und Rohfett im Vergleich zu Stärke und NDF relativ gering sind, schreiben sie diesen beiden Merkmalen den stärksten Einfluss auf die Methanausbeute zu. Rohfett zeigte einen doppelt so hohen Einfluss auf die Methanausbeute im Vergleich zu Rohprotein, Rohfaser nur ein Drittel davon und die stickstofffreien Extraktstoffe, in der die Stärke beinhaltet ist, blieben nahezu unbedeutend. Bei Untersuchungen an Getreide zeigten sich ähnliche Ergebnisse. Noch vor der Kornbildung (Stärkebildung) nahmen die Gasausbeuten ab (AMON et al. 2005).

CZEPUCK et al. (2006) analysierten für die Inhaltsstoffe Zellulose und Stärke unterschiedliche Gasausbeuten. Zellulose erzielte Methanwerte von $392 \text{ NI CH}_4 (\text{kg OTS})^{-1}$ und Stärke von nur $349 \text{ NI CH}_4 (\text{kg OTS})^{-1}$. Darüber hinaus stellten sie sehr große Unterschiede in der Abbaugeschwindigkeit fest. Stärke wird etwa doppelt so schnell abgebaut als Zellulose.

2.9 Einfluss des Erntetermins und der Sorte auf die Methanausbeute

Ähnlich uneinheitliche Versuchsergebnisse wie zur Bedeutung der Kohlenhydrate finden sich auch für den Einfluss des Erntetermins und der Sorte. Da diese Faktoren direkten Einfluss auf die Zusammensetzung der Inhaltsstoffe haben (ein später Erntetermin bei Mais bedeutet hohe Stärkegehalte), lässt sich letztendlich die Bedeutung des Erntetermins und der Sorte ebenso über die unterschiedliche Zusammensetzung der Inhaltsstoffe abbilden.

SCHUMACHER et al. (2006) fanden tendenziell eine Abnahme der Methanausbeute mit einer Verzögerung des Erntetermins. Die Abnahme war bei den ersten drei von vier Ernteterminen allerdings mit weniger als $10 \text{ NI (kg OTS)}^{-1}$ sehr gering und kaum relevant. Die Sorten unterschieden dabei kaum. Innerhalb eines Erntetermins variierte die Methanausbeute der Sorten nur zwischen 3 bis 9 %.

AMON et al. (2003a) und KAISER et al. (2004) ermittelten 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. (2003a) wiesen die höchsten Methanausbeuten bei TS-Gehalten unter 28 %, also noch vor bzw. zur beginnenden Milchreife nach. KAISER et al. (2004) beschrieben eine Abnahme der Methanausbeute bei zunehmender Kolbenreife und Abreife der Pflanze.

MUKENGELE et al. (2006) analysierten eine deutliche Abnahme der Methanausbeute verschiedener Substrate mit zunehmenden Gehalt an ADF, so dass die Autoren eine Abnahme der Methanausbeute mit zunehmender Abreife ableiteten.

HEIERMANN & PLÖCHL (2002), LINKE et al. (2003), HEIERMANN & PLÖCHL (2004) und HERTWIG & HEIERMANN (2006) hingegen zeigten in ihren Untersuchungen eine Zunahme der Methanausbeute mit zunehmender Wachstumsdauer der Pflanzen. HERTWIG & HEIERMANN (2006) leiteten anhand ihrer Ergebnisse einen optimalen Erntetermin hinsichtlich der Methanausbeute für den TS-Bereich von 30 bis 35 % her.

HEIERMANN & PLÖCHL (2002) stellten für mittelfrühe Sorten höhere Methanausbeuten als für frühe fest. OECHSNER et al. (2003) fanden bei Untersuchungen zu einer sehr späten Maisorte (FAO 700) einen positiven Einfluss des Erntetermins auf die Methanausbeute. Dies wiederum deutet auf eine positive Wirkung der Stärke hin.

2.10 Messmethoden - Vergleichbarkeit der Methanausbeuten

Die wissenschaftliche Untersuchung der Methanausbeute landwirtschaftlicher Kulturpflanzen ist relativ neu und wird aufgrund der regional sehr unterschiedlichen Bedeutung von Biogasanlagen nur in wenigen Ländern wie Deutschland, Österreich und Schweiz systematisch durchgeführt (vgl. HOLM-NIELSEN (2005), EDER & SCHULZ 2007).

In Deutschland hat das Stromeinspeisegesetz von 1990 (heute Erneuerbare Energien Gesetz) und der Bonus für die Vergärung von nachwachsenden Rohstoffen zu dem starken Interesse am Einsatz von Energiepflanzen geführt. Die Folge ist eine deutlich höhere Anzahl an Laboren, die Untersuchungen zur Gasausbeute anbieten (MØLLER (2005), EDER & SCHULZ 2007).

Mit der Anzahl der Labore kam die Notwendigkeit einer Übereinkunft hinsichtlich der Messmethodik von Biogas. Seit 2005 gibt es dazu eine Messvorschrift für die Bestimmung von Biogas- und Methanausbeuten (VDI 4630). Im Wesentlichen wurden darin die Methoden

aufgenommen, die zu der damaligen Zeit in der Wissenschaft Anwendung fanden. Trotz dieser Messvorschrift lassen sich die Ergebnisse nicht ungeschränkt vergleichen, da die Mess- und Aufbereitungsmethoden und die verwendeten Startsubstrate (Inokulum) der einzelnen Labors nicht übereinstimmen und vor allem nicht eindeutig dokumentiert werden (MÄHNERT 2007).

Einfluss der Probenvorbereitung und -konservierung auf die Methanausbeute

Hinsichtlich der Konservierung (getrocknet, frisch, siliert, gefroren), der Aufbereitung (gemahlen oder gehäckselt) sowie sonstiger Randbedingungen (Sickersaftbehandlung, Silagequalität uvm.) fehlen in den meisten Untersuchungen eindeutige Angaben (WEISSBACH 2008). Während AMON et al. (2003a), KAISER et al. (2004) und REINHOLD & PEYKER (2007) einen deutlichen Einfluss der Konservierung (frisch, getrocknet, siliert) auf die Methanausbeute feststellten, fanden BASERGA & EGGER (1997) und AMON (2005) keinen Zusammenhang zwischen der Konservierungsform und der Gasausbeute. BASERGA & EGGER (1997) stellten bei Gras einen nicht relevanten Einfluss zwischen siliertem, getrocknetem (Heu) und frischem Gras fest. AMON (2005) fand für Zuckerrübenpressschnitzel keine Unterschiede zwischen frischem und siliertem Material, wohl aber für getrocknetes Material.

Auch bei der Interpretation der Daten wird dieser Einfluss kaum diskutiert (GRAF 1999, OECHSNER & LEMMER 2001, HEIERMANN & PLÖCHL 2002, AMON et al. 2003a,b, 2006a,b, KAISER et al. 2004, MUKENGELE & OECHNSER 2007).

Ähnliches gilt für die Beschreibung der Silagequalität des Probenmaterials und die Dauer der Silierung. NEUREITER et al. (2005) und LOPEZ et al. (2005) stellten einen Einfluss der Silagequalität und einen Einfluss der Dauer der Silierung auf die Methanausbeute fest. Aber im Gegensatz zu allen bisherigen Erkenntnissen (HEIERMANN & PLÖCHL 2002, KAISER et al. 2004, REINHOLD & PEYKER 2007) erbrachten in diesen Untersuchungen die Silagen keine höheren Methanausbeuten im Vergleich zu frischem Material. Es zeigte sich ein deutlich stärkerer Einfluss der Dauer der Silierung als von der Silierung selbst. Außerdem widerlegte diese Untersuchung die allgemein verbreitete Annahme, dass nur hochwertige Silagen hohe Methanausbeute ermöglichen. So erzielten in den Untersuchungen Silagen mit hohen Gehalten an Buttersäuren die höchsten Methanausbeuten.

Ein Problem bei der Bestimmung der Methanausbeute liegt auch in der richtigen Einstellung des RP-Gehaltes der Probenmischung. Denn zu hohe RP-Gehalte führen zu einer Bakteri-

enhemmung und infolge oftmals zu niedrigeren Gasausbeuten (NEUBERG 2002), obwohl das Potenzial höher wäre (vgl. Kap. 2.8.2).

Von großer Bedeutung ist in diesem Zusammenhang auch der Einfluss des Inokulums (GREPMEIER 2002). Bereits 1992 stellte KAISER bei Untersuchungen von inkubierten Futtermitteln signifikante Unterschiede in der Gasbildung in Abhängigkeit der Nährstoffversorgung und Umgebungstemperatur fest. Dies bestätigen aktuelle Untersuchungen von EDELMANN et al. (2000), HOPFNER-SIXT et al. (2005), MUKENGELE et al. (2006) und RAPOSO et al. (2006). In ihren Untersuchungen zu Methanausbeuten stellten sie einen außerordentlichen Einfluss des Impfmateri als sowie Synergieeffekte bei Substratmischungen fest. Dabei ist es von Relevanz, ob die Bakterien im Inokulum gut oder schlecht versorgt sind.

HORCINE (2005) wies in seinen Untersuchungen eine Veränderung der Biozönose bei der Herstellung nach und zeigte, dass sich die Bakterienzusammensetzung in Abhängigkeit vom Testsubstrat ändert. Eine Veränderung der Bakterienzusammensetzung in Abhängigkeit vom Inokulum ermittelten auch KARAKASHEV et al. (2005), GUNASEELAN (1995) und HASHIMOTO (1989). Dagegen fand MÄHNERT (2007) keinen Einfluss des Inokulums auf die Gasausbeute.

Offenbar besteht auch eine Wirkung der Fermentervolumina auf die Gasproduktion (SCHLATTMANN et al. 2004, KAISER et al. 2005). Die Übertragbarkeit der Laborversuche in die Praxis ist nicht abschließend überprüft (GRUBER et al. 2004). MATTHIAS (2002) stellte fest, dass sich die in Exaktversuchen im Labor ermittelte spezifische Gasausbeute nicht in der Praxis reproduzieren lässt.

MÄHNERT (2007) wies in ihrer Arbeit darauf hin, dass in vielen Fällen Angaben zur Normierung, zur Berechnung des Gasbildungspotenzials bei Batchversuchen, zum Kriterium der Festlegung des Maximums der Gasausbeute und Angaben zum Analysenende fehlen. Des Weiteren fehlen bei diskontinuierlichen Versuchen Angaben zu der Raumbelastung (kg OTS m^{-3} Faulraum) und der mittleren Verweilzeit. Ohne diese Angaben ist ein Vergleich der Gasausbeuten nur eingeschränkt möglich.

Bei Untersuchungen zu Energiepflanzen lässt sich selten feststellen, ob die gemessenen Unterschiede der Methanausbeute genotypisch, pflanzenbaulich oder durch die Substratvorbehandlung bedingt sind. Zwar belegen einige Untersuchungen zu Methanausbeuten von Maissorten signifikante Unterschiede, es fehlen aber Angaben dazu, ob sich diese Unterschiede auch durch die sortenspezifisch unterschiedlichen Inhaltsstoffe bestätigen lassen (LINKE & VOLLMER 2002, HEIERMANN & PLÖCHL 2002, NEUBERG 2002, AMON et al. 2003a,b, HEIERMANN & PLÖCHL 2004, AMON et al. 2006a,b, KAISER 2007). Die Darstellung der dazu-

gehörigen Inhaltsstoffe fehlt in den meisten Fällen, so dass eine Erklärung der Methanausbeute über die Zusammensetzung der Biomasse nicht möglich ist. So kann ein hoher TS-Gehalt einen suboptimalen Silageprozess verursachen, und dadurch den Effekt von Sorte und Erntetermin verdecken. Deshalb ist es notwendig, bei Untersuchungen zu Silagen, die Silagequalität zu dokumentieren. In vielen Publikationen ist dies bisher nicht berücksichtigt (HEIERMANN & PLÖCHL 2002, AMON et al. 2003a,b, 2006a,b, KAISER 2007, 2008, MÄHNERT 2007). Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass sich Untersuchungen an frisch getrocknetem Material, wie in der vorliegenden Arbeit, leichter standardisieren lassen als Untersuchungen an Silagen.

Fehler der Untersuchungen

Um den Einfluss von Sorte und Erntetermin zu bestimmen, ist auch der Messfehler der jeweils verwendeten Methode zu beachten. OECHSNER et al. (2003) gaben für ihre Untersuchungen einen Variationskoeffizienten von 7,1 % an und bezeichneten in biologischen Prozessen solche Schwankungen als normal. MÄHNERT (2007) bestätigte dies; sie fand ähnlich hohe Streuungen (Variationskoeffizient 8,3 %) in ihren Versuchen.

LINKE & MÄHNERT (2005) dagegen stellten keine signifikanten Unterschiede fest, trotz Gasunterschieden von 700 und 900 l Biogas pro kg OTS. Die Streuung der Werte lag demnach sehr hoch. Auch KAISER (2007) gibt bei seinen Untersuchungen hohe Streuungen an. Die Standardabweichung für Methan lag zwischen 20,6 und 40 l (kg OTS)⁻¹ (Variationskoeffizient von 5,8 bis 116 %). Bei NEUREITER et al. (2005) werden signifikante Unterschiede zwischen den Methanausbeuten erst bei einer Differenz von mindestens 97 ml CH₄ (kg OTS)⁻¹ angezeigt. Die Vergleichbarkeit der verschiedenen Ergebnisse und Aussagen ist bei so großen Versuchsfehlern nur eingeschränkt möglich.

2.11 Einfluss der Bestandesdichte auf Ertrag und Qualität

Die Bestandesdichte hat eine große Wirkung auf die vegetative und generative Entwicklung von Mais (WILLIAMS et al. 1965, HEPTING 1982, TETIO-KAGHO & GARDNER 1988). Über die Wahl der Bestandesdichte lassen sich der Ertrag und die Qualität bei Mais beeinflussen. Das zeigen Untersuchungen von NÖSBERGER (1971), SCHLUMBOHM (1975), HEPTING & ZSCHEISCHLER (1975), PEYKER (1994), WERMKE & ROHR (1985), und BOESE (1997). Einen detaillierten Überblick der Einflussparameter, die die optimale Bestandesdichte bei Mais bestimmen, geben SANGOI (2000) und WANG (2001).

Ertrag

Eine höhere Bestandesdichte kann den Ertrag durch die Zunahme von Biomasse steigern (PEYKER, 1994, BOESE, 1997). Dem sind allerdings Grenzen gesetzt. Zu hohe Bestandesdichten bergen die Gefahr eines erhöhten Abbaus der Restpflanzenbiomasse (HEPTING 1988) sowie der größeren Beschattung, der Nährstoff- und Wasserkonkurrenz (GRÖSSMANN 1967, NÖSBERGER 1971, BOESE 1997). Hohe Bestandesdichten und ungünstige Wasserversorgung führen nach HEPTING (1988) zu einer Abnahme der Restpflanzenmasse (Stängel, Blätter und Lieschen) und dadurch zu einem Ertragsrückgang. NÖSBERGER (1971) stellte außerdem fest, dass durch die Zunahme der Beschattung ein erhöhter Blattverlust auftrat. Darüber hinaus kann ein Rückgang des Kolbenanteils durch Wasser- und Nährstoffmangel während der Kolbenbildung auftreten. Dieser Ertragsverlust kann nicht durch noch höhere Bestandesdichten ausgeglichen werden (ANDRADE et al. 1999, VEGA et al. 2001).

Umgekehrt kann Mais bei niedriger Bestandesdichte aufgrund seiner geringen Plastizität der Blattflächen pro Pflanze nicht mit höheren Blattanteilen und Blattmassen reagieren, sodass der Maisertrag niedrig bleibt (WILLIAMS et al. 1965, TETIO-KAGHO & GARDNER 1988, COX 1996). Zusätzlich kann Mais bei geringer Bestandesdichte den Ertragsverlust in der generativen Phase kaum über eine stärkere Kolbenbildung ausgleichen (EDMEADES & DAYNARD 1979, LOOMIS & CONNOR 1996).

Neben der Bestandesdichte nehmen genotypspezifische Eigenschaften wie die Blattstellung über die Lichtausnutzung Einfluss auf Ertrag und Qualität (COLLINS et al. 1965, ANDRADE et al. 1992, COX 1996, WIDDICOMBE & THELEN 2002).

Inhaltsstoffzusammensetzung

Die Bestandesdichte beeinflusst außerdem die Inhaltsstoffzusammensetzung. Hohe Bestandesdichten führen zu einem Rückgang des Kolbenanteils und bewirken eine verzögerte Abreife des Kolbens und der Restpflanze zum Zeitpunkt der Ernte (ZSCHEISCHLER et al. 1974, WERMKE & ROHR 1985, BOHLE & WAGNER 1978, BOESE 1997). Dadurch verändert sich das Nährstoffmuster hin zu einem höheren Rohfaseranteil und geringeren Stärkeanteil (BOHLE & WAGNER 1978). Deshalb ist es notwendig, die optimale Saatstärke in Abhängigkeit des Nährstoff- und Wasserangebots, der Sorte und der Verwertung zu wählen.

Einfluss des Genotyps

Genotypspezifische Eigenschaften wie Blattstellung, Lichtausnutzung und Reifetyp haben ebenso Einfluss auf das Ertrags- und Qualitätsverhalten (COLLINS et al. 1965, COX 1996, WIDDICOMBE & THELEN 2002).

Eine mehr horizontale (planophile) Blattstellung ist aufgrund einer geringen Lichtaufnahme der unteren Blätter ungünstig (GRAHAM et al. 1972, VIDOVIC 1974, TOLLENAAR 1977). Dies ist besonders in der Phase der Kolbenbildung nachteilig (POMMER et al. 1981). Eine erectophile Blattstellung hingegen, verringert zwar die Strahlungsaufnahme der oberen Blätter, ermöglicht aber das Eindringen des Lichtes in den Bestand und erhöht die Ertragsleistung (WILLIAMS et al. 1965, PENDLETON et al. 1968, LOOMIS et al. 1968, MOCK & PEARCE, 1975, FRÖLICH & POLLMER 1978, OTTMAN & WELCH 1989). PENDLETON et al. (1968) stellten einen Ertragsvorteil von 40 % für Sorten mit aufrechter Blattstellung fest. Der Idealtyp sollte oberhalb des Kolbens eine aufrechte und unterhalb des Kolbens eine mehr waagrechte Blattstellung haben (MOCK & PEARCE 1975). Dieser sogenannte pyramidalförmige Wuchstyp zeichnet sich durch ein höheres Ertragspotenzial aus (BÖSE 1998).

Frühreife Genotypen benötigen zur Erreichung eines optimalen Ertrages höhere Bestandesdichten als spätreife Genotypen (BROWN et al. 1970, BEECH & BASINSKI 1975, EDWARDS et al. 2005). Die höhere Bestandesdichte ist nötig, da frühreife Typen aufgrund der kürzeren Wachstumszeit, der geringeren Blattfläche pro Pflanze (TOLLENAAR 1977, DWYER et al. 1994, OTEGUI & MELÓN 1997, EPINAT-LE SIGNOR et al. 2001) weniger Strahlung absorbieren (EDWARDS et al. 2005). Spätreife Typen benötigen demnach niedrigere Bestandesdichten. Untersuchungen von SARLANGUE et al. (2007) ergaben, dass späte Typen bei niedrigen Bestandesdichten gegenüber frühen Reifetypen um nahezu 50 % mehr Masse pro Pflanze bildeten. Bei zu hohen Bestandesdichten hingegen zeigten die späten Typen einen ähnlich niedrigen Ertrag wie die frühen Typen. Sie wiesen nach, dass auch die Biomasseplastizität einer Sorte wichtig ist. So zeigten die untersuchten Sorten in Abhängigkeit der Bestandesdichte Unterschiede im Ertragsverhalten. Bei steigender Bestandesdichte sank der Ertrag der frühen Sorte weniger stark als der Ertrag der späten Sorte. Die frühe Sorte konnte den Einfluss höherer Bestandesdichten besser ausgleichen. Dies bestätigte auch HUGGER (1998), der darauf hinwies, dass für Mehrerträge durch Bestandesdichte und Blattstellung zusätzlich eine hohe genetische Leistungsveranlagung vorhanden sein muss.

Anhand der Zusammenhänge zwischen Bestandesdichte, Ertrags- und Qualitätsparametern haben sich für Silomais in Deutschland die in Tab. 2.5 dargestellten Empfehlungen zur optimalen Bestandesdichte in Abhängigkeit der Wasserversorgung durchgesetzt.

Tab. 2.5: Bestandesdichte (Pflanzen je m²) für Silomais in Abhängigkeit von der Reifegruppe und Wasserversorgung (HEPTING 1982)

FAO-Zahl	Wasserversorgung	
	günstig	Kritisch
170-190	13-12	ca.11
200-220	12-10	11-9
230-250	11-10	10-8
260-290	10- 8	8-7

Für Sorten aus dem mittelspäten und späten Reifebereich sind demnach Bestandesdichten von max. 8 bis 10 Pflanzen pro m² zu empfehlen. Inwieweit diese Empfehlung auch bei Verwendung von Silomaisorten zur Biogasproduktion Gültigkeit hat, ist bislang ungeklärt. Da der Bedeutung des Kolbens und der Inhaltstoffzusammensetzung bei Mais zur Biogasproduktion unter Umständen eine andere Bedeutung als in der Tierernährung zukommt (vgl. Kap. 2.8), kann dies Einfluss auf die optimale Bestandesdichte haben.

2.12 Anforderung an die Düngung

Bei einem durchschnittlichen Silomaisertrag von etwa 175 dt ha⁻¹ TS werden etwa 300 kg K₂O ha⁻¹, 245 kg N ha⁻¹ und 103 kg P₂O₅ ha⁻¹ entzogen (WÜRFEL et al. 2002). Der Nährstoffbedarf bzw. -entzug ist ertragsabhängig. Bei Verwendung von späten Reifetypen mit einem höheren Ertragspotenzial gilt es, einen höheren Nährstoffbedarf im Vergleich zu frühen Typen zu decken. Bei der Nutzung von Silomais zur Biogaserzeugung ist zu prüfen, ob gerade diese massewüchsigen, spätreifen Maistypen ausreichend mit organischem Dünger versorgt werden können.

Eine überhöhte organische Düngung zu Mais, beispielsweise in viehstarken Regionen, wurde in der Vergangenheit stark kritisiert. ZSCHEISCHLER (1990) sprach in diesem Zusammenhang von Entsorgung von wertvollem Dünger. Vor allem die organische Düngung mit Gülle wurde für die Überversorgung verantwortlich gemacht (VETTER & STEFFENS 1986, LÜTKE-ENTRUP 1988, HUGGER 1989, ZSCHEISCHLER 1990). Eine Reaktion darauf war die Novellierung der Düngeverordnung (DÜV 2006), die das Ausbringen von Nährstoffen mengenmäßig und zeitabhängig regelt. Eine Nährstoffbedarfsermittlung ist ab einer Ausbringmenge von 30 kg bei Phosphor und 50 kg bei Stickstoff vorgeschrieben (WENDLAND et al. 2007). Auf Ackerland darf organischer Dünger bis maximal 170 kg N ha⁻¹ ausgebracht werden. Auch bei ei-

nem höheren N-Bedarf dürfen nicht mehr Nährstoffe aus organischer Herkunft appliziert werden. Eine Gefahr der Unterversorgung von Mais durch organische Düngung besteht in konventionellen Anbausystemen hingegen kaum, weil zusätzlich eine mineralische N-Düngung erfolgt. Auswertungen von RUPPERT et al. (1987) zeigen im Maisanbau eine deutliche Überversorgung für Stickstoff von ca. 60 kg ha⁻¹.

Dabei ist vor allem das erhöhte Austragsrisiko in der Jugendentwicklung zu sehen. Mais bildet in einer vergleichsweise kurzen Vegetationsperiode (Mai bis Oktober) sehr viel Biomasse, so dass er hohe Mengen an Nährstoffen in einer relativ kurzen Zeit benötigt (ZSCHEISCHLER 1990). Die Zeit der höchsten Nährstoffaufnahme reicht von ca. 15 Tage vor der Blüte bis zu 30 Tage nach der Blüte (MAIDL & FISCHBECK 1989). Hier werden 70 bis 80 % aller mineralischen Nährstoffe aufgenommen, die der Mais insgesamt benötigt. Zudem ist eine ausreichende Wasserversorgung vor allem in den Monaten Juli bis August von ca. 150 bis 200 mm Voraussetzung für eine optimale Nährstoffversorgung.

Der gesamte Nährstoffbedarf des Maises muss mehr oder weniger am Anfang in dieser kritischen Phase des Austrags appliziert werden, da eine Düngung in den wachsenden Bestand maximal bis zum 6-Blattstadium möglich ist.

Da bei Mais zwischen Saat und dem Zeitpunkt der höchsten Nährstoffaufnahme verhältnismäßig viel Zeit vergeht (30-40 % der Vegetationszeit, ALDRICH et al. 1986, AUFHAMMER et al. 1991) und späte Sorten in ihrer Anfangsentwicklung (Kälteverträglichkeit) den frühen Sorten unterlegen sind, besteht ein größeres Austragsrisiko vor allem für Stickstoff ab der Saat (MAIDL 1990). Dem Düngezeitpunkt kommt eine besondere Bedeutung zu (STICKSEL et al. 1999).

Dennoch bleibt festzuhalten, dass mit der Gärrestapplikation zu Mais Pflanzenährstoffe rezykliert werden und so die externe Nährstoffzufuhr eingeschränkt werden (KAUTZ & RAUBER 2007). Bei der Vergärung von Silomais bleiben die Nährstoffe weitgehend erhalten. Im Wesentlichen wird nur Kohlenstoff ab- und zu Methan umgebaut. Gasanalysen zeigen, dass im Biogas 2 % bis 6 % N₂ (EDER & SCHULZ 2007) enthalten sind und somit kein nennenswerter Nährstoffaustrag über das Gas stattfindet. Die Nährstoffmengen von P und K sowie die Spurenelemente bleiben während des anaeroben Abbauprozesses völlig unverändert und sind in ihrer Wirkung den Mineraldüngern gleichzusetzen.

2.12.1 Eigenschaften und Zusammensetzung von Gärresten

In Tab. 2.6 sind die Stoffkennwerte und Substratveränderungen von Gärresten im Vergleich zu einer unbehandelten Rindergülle dargestellt. Durch die anaerobe Vergärung kommt es zu

einer Reduzierung des TS-Gehaltes. Nach ROSCHKE & PLÖCHL (2006) haben Gärreste unterschiedlichster Herkunft im Mittel einen deutlich niedrigeren TS-Gehalt von 3,9 %, im Vergleich zu unbehandelter Gülle mit 6,1 % TS.

Tab. 2.6: Zusammensetzung von Gärresten im Vergleich zu unbehandelter Rindergülle
(¹ WENDLAND 2008, ² VETTER et al. 1977)

Substrat	TS %	N ges. % TS	NH ₄ % TS	P ₂ O ₅ kg m ⁻³	K ₂ O kg m ⁻³
Gärreste ¹	3-13	2-9	2-7	1-6	2-11
Rindergülle unbehandelt ²	7-17	3,3-9,9		3,8	5,2

Ein Vorteil von niedrigeren TS-Gehalten in organischen Düngern ist das schnellere Eindringen in den Boden (JÄKEL & MAU 1999) und leichtere Abfließen von den Blättern (EDER & SCHULZ 2007, WENDLAND 2008). Auch die geruchsaktiven Stoffe werden reduziert (PÖTSCH et al. 2004, ROSCHKE & PLÖCHL 2006).

Durch den TS-Abbau wird ein Teil des organisch gebundenen Stickstoffs mineralisiert, so dass um 5 bis 10 % höhere NH₄-Gehalte als in unbehandelter Gülle nachgewiesen werden (JÄKEL & MAU 1999, PÖTSCH et al. 2004, KTBL 2005, ROSCHKE & PLÖCHL 2006), in der etwa 50 % des Gesamtstickstoffs in mineralischer Form vorliegt (WENDLAND et al. 2007).

Da der pH-Wert im Verlauf der Vergärung ansteigt und leicht alkalisch ist, erhöht sich das Risiko gasförmiger N-Verluste (JÄKEL & MAU 1999, MAIDL et al. 1999, AMON & DÖHLER 2006, GERICKE et al. 2007). JÄKEL & MAU (1999) stellten aber auch fest, dass durch eine bessere Infiltration bei niedrigen TS-Gehalten der Gülle, die Emission bei Gärresten nicht zwingend höher sein muss im Vergleich zu unvergorenen Wirtschaftsdüngern.

Bezogen auf die TS kommt es durch ihren Abbau während der Vergärung zu einem Anstieg der Mineral- und auch Schadstoffe (ROSCHKE & PLÖCHL 2006). Vor allem für Schwermetalle kann dies zu Grenzwertüberschreitungen für organische Dünger führen (WENDLAND 2008).

Es ist anzunehmen, dass die Humuswirkung der organischen Dünger durch die Vergärung nicht reduziert wird, da die höhermolekularen Kohlenstoffverbindungen weitgehend erhalten bleiben. Lignin als wichtiger Ausgangsstoff der Humusbildung (SCHACHTSCHABEL et al. 1989)

wird im Anaerobprozess nicht abgebaut. LINKE & THIEME (1996) ermittelten für Gärreste aus Schweinegülle dieselbe Humusreproduktionsleistung wie für Rottemist. KORIATH et al. (1985) und GUTSER et al. (1997) fanden bei Gärresten und bei Stallmist vergleichbare Wirkungen.

2.12.2 Ertragsbeeinflussende Wirkung von Gärresten

PÖTSCH et al. (2004) stellten bei ihren Untersuchungen an Dauerwiesen zwischen der Anwendung von mineralischer Düngung, Rinder- und Biogasgülle keine Ertragsunterschiede fest. KAUTZ & RAUBER (2007) fanden bei Düngeversuchen zu Silomais mit Gärresten keine signifikanten Ertragsunterschiede im Vergleich zur mineralischen Variante. Tendenziell brachten Gärreste aus Pflanzenmaterial einen Ertragsanstieg gegenüber Gärresten aus Gülle. JÄKEL & MAU (1999) ermittelten in Gefäßversuchen mit Winterraps eine günstigere TS-Bildung und N-Verwertung bei Biogasgülle gegenüber konventioneller Gülle. BRENNER & CLEMENS (2005) bestätigten diese Ergebnisse. GUTSER et al. (1987), HEGE (1988), MESSNER 1988 und DOSCH & GUTSER (1995, 1996) fanden bei ihren Vergleichen zwischen unbehandelten und vergorenen Güllen keine Differenzierung.

PÖTSCH et al. (2004), BRENNER & CLEMENS (2005), ROSCHKE & PLÖCHL (2006) sowie WENDLAND (2008) kommen zum Schluss, dass Gärreste in gleicher Weise anzuwenden sind wie unbehandelte organische Dünger.

2.13 Energie- und CO₂-Bilanzierung

2.13.1 Energiesituation

Die land- und forstwirtschaftliche Erzeugung von Energie verlor erst im 19. und 20. Jahrhundert, als die Ausbeutung der fossilen Lagerstätten einen rasanten Aufschwung nahm, an Bedeutung (BMELV 2007). Dennoch erscheint die Nutzung dieser lang bekannten Bioenergieformen heute unter einem neuen Licht. Aufgrund der deutlichen und zum Teil dramatischen Klimafolgen müssen Maßnahmen ergriffen werden, die sowohl den Energieeinsatz wie auch die Klimafolgen am stärksten beeinflussen. Auch die Erneuerbaren Energien müssen sich dabei hinsichtlich ihrer Effizienz beurteilen lassen. Dafür ist allerdings eine Erfassung des Energieeinsatzes im gesamten Produktionsprozess notwendig.

Nach Angaben der Internationalen Energieagentur lag 2005 der weltweite Energieeinsatz bei 479 Exajoule (EJ). Deutschland hat mit ca. 14,4 EJ einen Anteil von 3 % (IEA 2007). 14 % des weltweiten Energieeinsatzes werden bereits durch Erneuerbare Energien gedeckt,

wobei 10 % aus nicht-kommerzieller Brennstoffnutzung überwiegend in Entwicklungsländern stammt (BMELV 2007). In Europa liegt der Anteil der Erneuerbaren Energien am Primärenergieeinsatz bei 6 %; dies entspricht etwa der Situation in Deutschland (Abb. 2.5). Während sich der weltweite Energieeinsatz in den letzten 25 Jahren ungefähr verdoppelt hat, ist der Anteil der Erneuerbare Energien gleich geblieben. Die Internationale Energieagentur geht davon aus, dass der Zuwachs des Energieeinsatzes weiter steigen wird und rechnet mit einem Energieeinsatz für das Jahr 2030 in Höhe von 680 EJ.

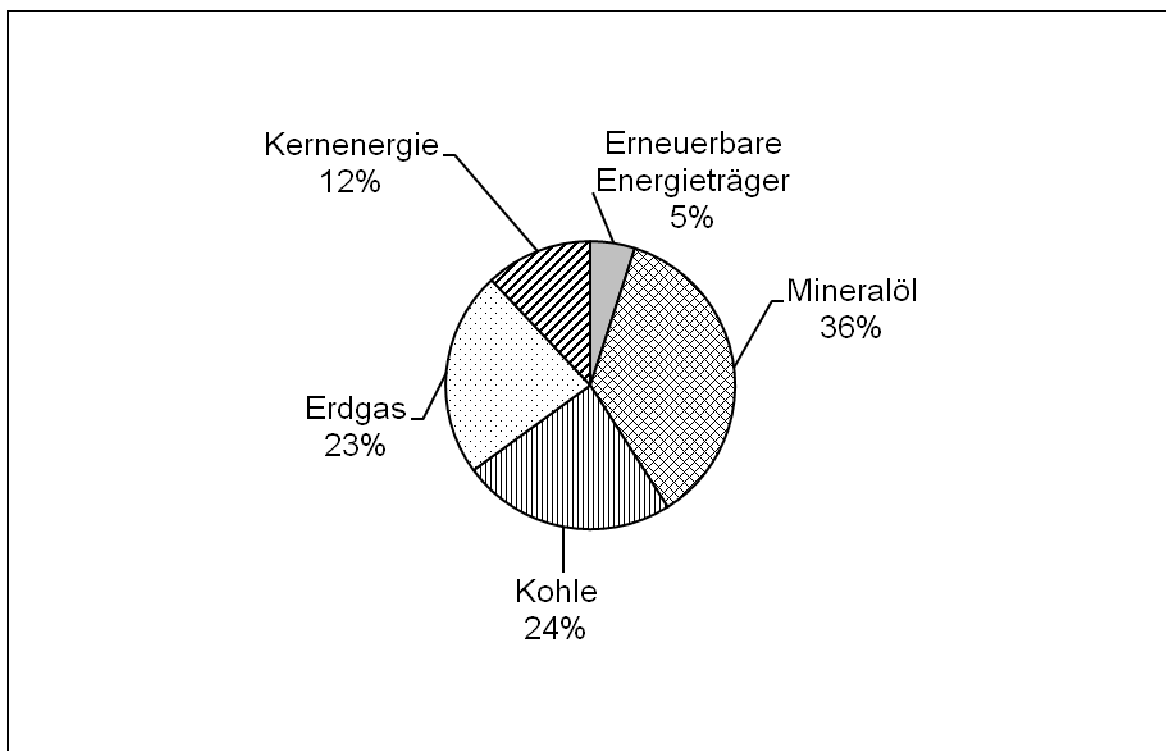


Abb. 2.5: Anteile der Energieträger am Primärenergieeinsatz in Deutschland (BMELV 2007).

2.13.2 Klimawandel

In den vergangenen Jahrzehnten hat eine deutliche Veränderung des Klimas stattgefunden (IPCC 2007), die sich im Anstieg der globalen mittleren Oberflächentemperatur um 0,74 °C, im beschleunigten Anstieg des Meeresspiegels um 3,1 mm/a und durch das starke Abschmelzen der Gletscher und der Schneebedeckung der Erde bemerkbar macht.

Als wesentliche Ursache für diese Klimaveränderungen wird der Anstieg der Treibhausgas-Konzentration in der Atmosphäre gesehen (IPCC 2007). Mit 61 % die wichtigste Ursache der Treibhausgasemissionen sind die energiebedingten Emissionen, gefolgt von 32 % der Emissionen aus der Landwirtschaft, Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft. Industrieprozesse und Abfallwirtschaft tragen mit jeweils nur 3 % bei (EPA 2006). Energiewirtschaft und Landwirtschaft sind somit hauptverantwortlich für den globalen Klimawandel.

In Deutschland trägt die Landwirtschaft mit über 13 % an den gesamten Treibhausgasemissionen bei. Das waren 2006 ca. 133 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalente (Deutscher Bundestag 2006). Zum Vergleich dazu verursachte die Eisen- und Stahlindustrie Emissionen in Höhe von 43 Mio. t CO₂-Äquivalente, der Brennstoffverbrauch der privaten Haushalte 113 Mio. t, der Straßenverkehr 152 Mio. t und die öffentliche Elektrizitäts- und Wärmeversorgung 325 Mio. t (UBA 2007). Die Landwirtschaft ist somit ein relevanter Verursacher von Emissionen.

Größter Anteil unter den Treibhausgasemissionen sind die CO₂-Emissionen, gefolgt von den Lachgasemissionen. Methan steht mit 17 % an dritter Stelle der aus landwirtschaftlicher Quelle stammenden Treibhausgase (Deutscher Bundestag 2006). Während 71 % der Treibhausgasemissionen der tierischen Produktion (inkl. Futtermittel 94,9 Mio. t) zugeordnet werden, sind es für die pflanzliche Erzeugung (ohne Futtermittel, 38,1 Mio. t) nur 29 %.

2.13.3 Energie- und CO₂-Bilanz-Methode der Ökobilanzierung

Zur Beurteilung der Energie- und Klimawirkung dient die Methodik der Ökobilanzierung. Sie ist eine normierte Methode zur Erfassung und Bewertung der mit einem Produkt (z.B. Strom aus Biogas) verbundenen Umweltwirkungen. In die Bilanzierung gehen alle Umweltwirkungen des Produktionsprozesses sowie der vorgelagerten Produktionsschritte (z.B. Energieerzeugung, Produktion von Hilfs- und Betriebsstoffen) mit ein. Nach EN ISO 14040 besteht eine Ökobilanz aus der Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens, der Sachbilanz (Erhebung der Energie- und Klimawirkung der Produkte, Datenzusammenstellung) und der Wirkungsabschätzung.

Die Klimawirkung oder das Treibhauspotenzial wird mit Hilfe des Global Warming Potentials, welches als Bezugsgröße die Wirkung von Kohlendioxid hat, dargestellt. Die Wirkung der Treibhausgase wird in CO₂-Äquivalenten angegeben. Das IPCC gibt für einen Betrachtungs-

tungszeitraum von 100 Jahren als Äquivalenzfaktoren für Methan 23 und für N₂O 296 an (HIRSCHFELD et al. 2008).

HÜLSBERGEN (2003, 2008) und BREITSCHUH (2003) stellen fest, dass Bilanzen geeignete Methoden sind, um die Energieeffizienz und die Klimawirkung verschiedener Anbau- und Nutzungssysteme zu erfassen und zu beurteilen. Sie können überdies als Nachhaltigkeitsindikatoren zur Bewertung herangezogen werden und sind notwendig, um beispielsweise die gravierenden Unterschiede im Energieeinsatz pro Hektar global darstellen zu können.

HÜLSBERGEN 2003 und FAIDLEY 1992 fanden Unterschiede im Energieinput pro ha mit dem Faktor 30. Energieintensive Systeme in Westeuropa arbeiteten mit Energieinputs von mehr als 30 GJ ha⁻¹ und energieextensive Systeme in weiten Teilen Afrikas mit Energieinputs unter 1 GJ ha⁻¹.

2.13.4 Energie- und CO₂-Emissionen der Stromerzeugung aus Silomais

Beim Anbau von Silomais zur Biogaserzeugung wird Energie, die aus fossiler Herkunft stammt, verbraucht und gleichzeitig Energie erzeugt. Der Verbrauch von fossiler Energie führt zur Emission klimarelevanter Treibhausgase. Aber nicht nur der Energieeinsatz, sondern auch der Anbau von Rohstoffen und die Lagerung von Gärresten verursachen Emissionen. Der Energieeinsatz und die klimarelevanten Emissionen lassen sich drei Bereichen zuordnen:

1. Anbau und Lagerung von Silomais
2. Bau & Betrieb der Biogasanlage
3. Energienutzung (Strom und Wärme)

2.13.4.1 Emissionen beim Anbau und Lagerung von Silomais

Beim Anbauverfahren Mais zur Biogaserzeugung entstehen energiebedingte Emissionen beispielsweise durch die Nutzung von Schlepper und Kraftstoff. Des Weiteren entstehen Lachgasemissionen und klimarelevante Emissionen durch den Humusabbau.

Energiebedingte Emissionen

Der Energieeinsatz im Pflanzenbau umfasst den direkten und indirekten Einsatz fossiler Energie (HÜLSBERGEN & KALK 2001, HÜLSBERGEN et al. 2001, HÜLSBERGEN 2003). Der indirekte Energieeinsatz berücksichtigt den Energieeinsatz für die Produktion von:

- Saatgut
- Mineraldüngern
- Organischen Düngern (Substitutionswert)
- Pflanzenschutzmitteln
- Maschinen und Geräten.

Tab 2.7 gibt einen allgemeinen Überblick über die Energieverbräuche von Betriebsmitteln und Technikeinsatz (HÜLSBERGEN 2003, 2008). Die Herstellung von Pflanzenschutzmitteln zeigt mit Abstand den höchsten Energieeinsatz, Kraftstoff und Mineraldüngereinsatz verursachen eine ähnlich hohe Energiekonsumption von ca. 35 MJ pro Einheit. Beim Saatgut zeigt sich die unterschiedlich aufwendige Saatguterzeugung in der weiten Spanne von 1,3 bis 98 MJ kg⁻¹.

Tab. 2.7: Energieeinsatz von Betriebsmittel und Technikeinsatz (HÜLSBERGEN 2003, 2008)

Betriebsmittel- und Technikeinsatz	Einheit	Energiebedarf
Dieselmotorkraftstoff	MJ l ⁻¹	36
Mineraldünger	MJ kg ⁻¹	
Stickstoff		35,3
Phosphor		36,2
Kalium		11,2
Pflanzenschutzmittel, aktive Wirksubstanz	MJ kg ⁻¹	196 – 288
Saatgut je nach Fruchtart	MJ kg ⁻¹	1,3 – 98
Maschinen und Geräte	MJ km ⁻¹	108
innerbetriebliche Transporte	MJ t ⁻¹	6,3

Anhand der Zahlen wird deutlich, dass ökologisch verfahrenende Anbausysteme einen geringeren Energieinput im Vergleich zu konventionellen Anbausystemen haben. Es ist dabei vor allem der Dünger- und der Pflanzenschutzmitteleinsatz, der die systembedingten Unterschiede bewirkt.

Einen detaillierten Überblick und Angaben zur Höhe der energiebedingten Emissionen im Pflanzenbau gibt HÜLSBERGEN (2003). Ebenso finden sich detaillierte Angaben zum Energieeinsatz und daraus resultierenden Emissionen auch in SCHOLWIN et al. (2007).

HÜLSBERGEN & KÜSTERMANN (2007) stellten bei der Untersuchung von 28 Praxisbetrieben einen Unterschied von $6,5 \text{ GJ ha}^{-1}$ zwischen dem Energieinput von Low-Input (ökologischer Anbau) und High-Input Systemen (konventioneller Anbau) fest. Allerdings zeigte sich hinsichtlich der Energieeffizienz (Output/Input-Verhältnis) keine Vorzüglichkeit der Low-Input Systeme. Durch ihren niedrigeren Ertrag (TS-Ertrag ca. $3,6 \text{ t ha}^{-1}$) erzielen sie in etwa dieselben Effizienzen wie konventionelle Systeme (TS-Ertrag ca. $7,5 \text{ t ha}^{-1}$). Sie nutzen die eingesetzte Energie nicht effizienter, aber in geringerem Umfang, so dass sie dadurch zur Ressourcenschonung beitragen.

Der Energieeinsatz für den Anbau einer Fruchtart ist sehr unterschiedlich. HÜLSBERGEN 2003 und TENTSCHER 2004 finden deutliche Unterschiede im Energieinput und Output/Input-verhältnis zwischen den verschiedenen Fruchtarten. Nach TENTSCHER 2004 unterscheiden sich Energiepflanzen im Output/Input-Verhältnis um den Faktor 3. Außerdem lieferte Mais 23mal mehr Energie als sein Anbau verursachte, Roggen und Triticale 20 und Grassilage 7mal mehr.

HÜLSBERGEN (2003) fand für die in Tab. 2.8 dargestellten Fruchtarten Unterschiede im Energieinput bis zu 10 GJ ha^{-1} , das Output/Input-Verhältnis lag zwischen 4 und 14.

Tab. 2.8: Energieeinsatz (GJ ha^{-1}) und Output/Input-Verhältnis nach Fruchtarten
(HÜLSBERGEN 2003)

	Kartoffel	Winterweizen	Wintergerste	Zuckerrüben	Sommergerste
Energieeinsatz	24	19	17	30	15
Output/Input- Verhältnis	4	14	9	11	10

N₂O-Emissionen

Weltweit stammen die N₂O-Emissionen überwiegend aus Böden. Mit einem Anteil von etwa 81 % sind es überwiegend die landwirtschaftliche Nutzung von Böden und die Stickstoffdüngung, die die N₂O-Emission verursachen (FLESSA et al. 1998, ISERMANN 1994). Dabei kann zwischen direkten Emissionen, die beispielsweise durch die Anwendung von Düngern entstehen und indirekten Emissionen durch Deposition und Auswaschung unterschieden werden (Tab. 2.9).

Tab. 2.9: Direkte und indirekte N₂O-Emissionen (Mio. t. CO_{2äq}) aus landwirtschaftlich genutzten Böden in Deutschland, 2004 (DÄMMGEN 2006, HIRSCHFELD et al. 2008)

direkte Bodenemissionen	
durch Mineraldüngeranwendung	10.626
durch Wirtschaftsdüngeranwendung	5.950
Bewirtschaftung organischer Böden	5.269
Ausbringung Klärschlamm	169
durch Leguminosenanbau	503
Tierexkremete Weidehaltung	1.184
Summe	25.033
indirekte Bodenemissionen	
Deposition	2.427
Auswaschung	8.850
Summe	11.277
Gesamt	36.310

Nahezu die Hälfte der direkten Emissionen stammt aus der Mineraldüngeranwendung. Ein nicht unerheblicher Anteil entsteht durch Auswaschung.

Die Höhe der N₂O-Emission ist von vielen Parametern abhängig (CRUTZEN et al. 2007). Einfluss haben die Düngerart und -menge, Bodenparameter (pH, Bodenfeuchte, C-Gehalt etc.) (DÄMMGEN 2006, UBA 2007), Ausbringung auf Acker oder Grünland (HOFFMANN et al. 2001, LEICK 2003), Temperatur (LEICK 2003), Art der chemischen Verbindungen (Ammonium, Nitrat) (CLAYTON et al. 1997, LEICK 2003), Technik der Ausbringung (Prallteller, Injektion) (KUIKMAN et al. 2006).

Daraus ergeben sich unterschiedliche Abschätzungen für Emissionsfaktoren in Abhängigkeit der N-Menge, die zwischen ca. 0,3 und 4 angegeben werden. Nach IPCC entsteht pro ausgebrachtem kg N Lachgas in Höhe von etwa 0,0125 kg, das entspricht 1,25 % der ausgebrachten N-Menge (UBA 2007).

KEHRES (2007) stellte in seinen Untersuchungen fest, dass die N_2O -Emissionen von $450 \text{ g N}_2\text{O-N ha}^{-1}$ auf $370 \text{ g N}_2\text{O-N ha}^{-1}$ durch die Vergärung reduziert wurden. AMON et al. (2002) fanden für Biogasgülle und separierte Gülle ebenso niedrigere Emissionen wie bei unbehandelte und frischer Biogasgülle (Tab. 2.10).

Tab. 2.10: N_2O -Emissionen (g ha^{-1}) nach unterschiedlicher Behandlung (AMON et al. 2002)

Biogas gelagert	Unbehandelt gelagert	Belüftet	Separiert frisch	Biogas frisch	Stroh Abdeckung	Unbehandelt frisch
106	124	214	246	453	459	658

Die Werte zeigen einen deutlichen Einfluss der Lagerdauer. Je länger die Gülle gelagert wurde, desto niedriger war die N_2O -Emission nach der Ausbringung. Offenbar emittierte das Lachgas während der Lagerung.

FLESSA et al. (1998) zeigten, dass die N_2O -Emissionen hauptsächlich von der Nitratkonzentration im Boden abhing. Stickstoffdüngerapplikation spielte hinsichtlich der Emissionsrate nur eine untergeordnete Rolle.

Die Mehrheit der indirekten N_2O -Emissionen stammt aus der Luft. Ammoniak wird in der Luft zu Ammonium umgewandelt und fällt an Partikel gebunden mit dem Regen auf den Boden. Durch unvollständige Nitrifikation entsteht N_2O . SCHÖN et al. (1993) und das BMLF (2003) gehen davon aus, dass etwa 1 % bis 2 % des Ammoniaks der Gülle zu Lachgas konvertiert.

BACHMEIER et al. (2008) gab für die Produktion von nachwachsenden Rohstoffen eine Emission von $91 \text{ g CO}_{2\text{äq}} \text{ kWh}_{\text{el}}^{-1} \text{ an}$.

Emissionen durch Humusabbau

Der Humusgehalt im Boden wird durch die Anlieferungsrate von organischer Substanz, den Lebensbedingungen der Bodenorganismen und dem Wechsel zwischen Austrocknen und Befeuchten des Bodens bestimmt (SCHACHTSCHABEL et al. 1989). Daneben haben pflanzenbauliche Aspekte wie der Anbau von „Humuszehrern“, bei deren Anbau eine Abnahme, und „Humusmehrern“ bei deren Anbau eine Zunahme der Humusvorräte wahrscheinlich ist, Einfluss auf den Humusgehalt. Der Fruchtarteneinfluss ist die Summe direkter Wirkungen (Menge, Qualität der zugeführten organischen Substanz), der Dauer der Bodenbedeckung

sowie indirekter Wirkungen der Produktionsverfahren (Bodenbearbeitung, Mineral-N-Düngung, etc.) (HÜLSBERGEN 2008).

Anbausysteme zur Biomasseerzeugung, die keine ausgeglichene Humusbilanz und zu hohe Humuszehreranteile aufweisen, führen zum Verlust von organischer Bodensubstanz. Die organische Bodensubstanz wird mineralisiert und dabei wird CO₂ freigesetzt. Humus ist damit eine CO₂-Quelle; Humus kann allerdings auch langfristig als CO₂-Senke fungieren (LAL 2004). Beim Abbau von einem kg Humus-C werden etwa 3,67 kg CO₂-Äquivalente emittiert. Einen großen Einfluss auf den Humusgehalt der Böden hat die Menge an Ernterückständen, die am Feld verbleiben (Tab. 2.11).

Tab. 2.11: Wurzelrückstände zum Zeitpunkt der Ernte

Fruchtart	Wurzelrückstände (Krume) TS dt ha ⁻¹	
	SCHACHTSCHABEL et al. 1989	SCHMID et al. 1997
Luzerne	36	
1-jähriges Klee gras	19	16
Landsberger G./Acker gras	18	23
Roggen/Wicken	14	
Rotklee	13	10
Wintergerste	11	11
Mais	11	11
Winterweizen	8,5	12,5
Winterroggen	7	9
Futtermüben	5,5	6 [†]
Kartoffeln	3,5	3,5 ^{††}
Sommerraps	3	3,5
Sommerweizen		12
Sonnenblume		8,5
Sommergerste		9

[†] Zuckerrüben

^{††} Damm

Obwohl die Menge an Wurzelrückständen beim Mais vergleichbar mit der von Weizen ist (vergl. Tab. 2.11), führt der Anbau von nur Mais dennoch zu einer stärkeren Abnahme des Humus-C als bei Weizen (Abb. 2.7). Bei einer Versuchsdauer von 30 Jahren führte der Anbau von Monokultur Mais zu einer Abnahme des C-Gehaltes im Boden um ca. 40 %. Im Vergleich dazu lagen nach Monokultur Weizen die C-Gehalte bei 65 % des Ausgangswertes (SCHACHTSCHABEL et al. 1989).

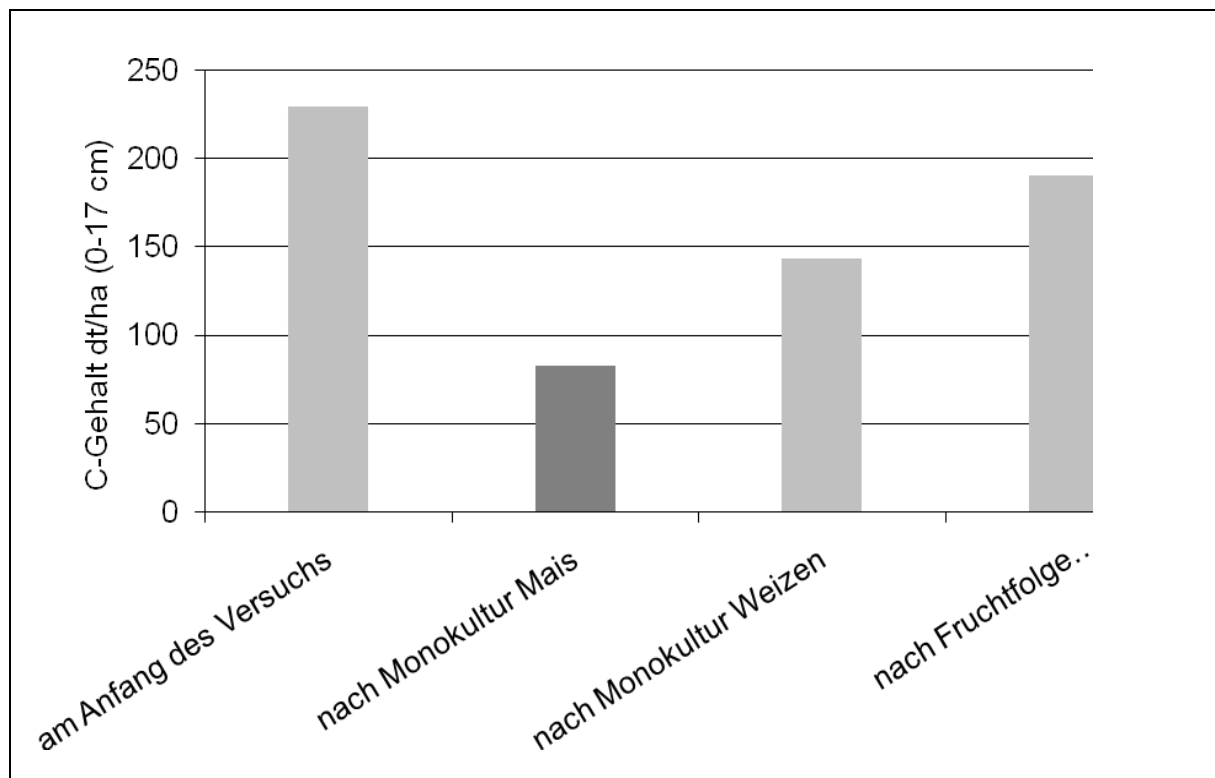


Abb. 2.6: Veränderung der C-Gehalte in der Bodenschicht von 0-17 cm in Abhängigkeit der Fruchtfolge (SCHACHTSCHABEL et al. 1989).

Der Anbau von ausschließlich Mais ist daher kritisch zu betrachten. Allerdings haben noch weitere Faktoren Einfluss auf den Humusgehalt. Düngerart und -intensität, Bodenbearbeitung und Anbauverfahren, Bodenruhe und Vegetationsdauer beeinflussen den Humusgehalt im Boden (SCHMID, H. et al. 1997, HÜLSBERGEN 2003).

Mit Humusbilanzen wird die Ab- oder Zunahme des Humusgehaltes geschätzt. Dabei werden dem durch den Anbau humuszehrender Fruchtarten (Hackfrüchte, etc.) verursachten Humusbedarf die Zufuhren durch den Anbau humusmehrender Fruchtarten (Leguminosen, Feldfutter, etc.) und organische Dünger (Stroh, Stallmist etc.) gegenübergestellt.

Es gibt verschiedene Ansätze der Humusbilanzierung:

- Humusbilanz nach LEITHOLD et al. (1997): Es werden ertragsunabhängige Koeffizienten verwendet (statischer Ansatz). Die Koeffizienten sind an die Bedingungen des konventionellen und des ökologischen Landbaus angepasst. Als Standortparameter werden die Ackerzahl und die Niederschlagshöhe berücksichtigt.
- Humusbilanz nach HÜLSBERGEN et al. (2000). Der Humusbedarf wird mit ertrags-, standort- und bewirtschaftungsabhängigen Koeffizienten berechnet (dynamischer

Ansatz). Die Bewirtschaftungsweise und Standortparameter (Ackerzahl, Niederschlagshöhe) werden berücksichtigt.

- Humusbilanz nach VDLUFA (2004): Verwendung unterer und oberer Richtwerte zum Bedarf an organischer Substanz.
- Humusbilanz nach der Cross Compliance Richtlinie (BStMLF & BStMUGV 2005).

Die höchste Aussagegenauigkeit hat die HE-Methode in der dynamischen Betrachtung. Eine Humusbilanzierung für Einzeljahre auf Schlagenebene hat nur geringe Aussagekraft, da erst die Analyse der Anbaufolge humuszehrender und -mehrender Fruchtarten eine Beurteilung zulässt.

2.13.4.2 Emissionen beim Bau und Betrieb der Biogasanlage

Methanemissionen beim Betrieb

Methan entsteht überwiegend durch die tierische Produktion, zum Beispiel bei der Lagerung von Gülle. Durch die Verwertung in Biogasanlagen können diese Emissionen verhindert werden (RAMESHOL et al. 2006, BMELV 2007). AMON & DÖHLER (2006) ermittelten eine Reduzierung der Methanemissionen durch die Vergärung bei der Lagerung aus Gülle um 20 % (Schweinegülle) und 60 % (Rindergülle). Nach GRONAUER et al. (2009) liegen die Methanminderemissionen bei der Verwertung von Gülle und Stallmist in Biogasanlagen nur bei etwa $0,02 \text{ kg CO}_{2\text{äq}} \text{ kWh}_{\text{el}}^{-1}$. Dagegen rechnet das BMELV (2007) mit einer Minderemission durch die Vergärung zwischen $0,3$ und $0,7 \text{ kg CO}_{2\text{äq}} \text{ kWh}_{\text{el}}^{-1}$.

Allerdings besteht auch die Gefahr einer höheren Methanemission aus den Gärlagern, vor allem dann, wenn das Material nicht ausreichend im Fermenter abgebaut wurde und im Gärrestlager noch weiter ausgasst. Gärrestlager müssen daher abgedeckt werden, damit die Emissionen minimiert werden können (EEG 2009).

SCHUHMACHER (1999), KTBL (2002) & AMON et al. (2002) haben in ihren Untersuchungen zu klimarelevanten Emissionen bei Biogasanlagen einen deutlichen Einfluss der Güllelagerung und -aufbereitung gefunden.

Tab. 2.12: Methanemissionen (g ha^{-1}) nach unterschiedlicher Behandlung von Gülle
(AMON et al. 2002)

Biogas gelagert	unbehandelt gelagert	belüftet	separiert frisch	Biogas frisch	Stroh Abdeckung	unbehandelt frisch
30	52	176	786	98	798	1.362

AMON et al. (2002) zeigten, dass die Vergärung zu einer Reduktion von Methanemissionen im Vergleich zu anderen Güllebehandlungs- und Lagermethoden von über 93 % führte (Tab.2.12).

Bei der Verbrennung von Biogas in Motoren kann ein Teil unverbrannt in die Atmosphäre gelangen. BACHMEIER et al. (2007) geben den Methanschlupf mit 10 bis 40 $\text{g CO}_{2\text{äq}} \text{kWh}_{\text{el}}^{-1}$ an. Im Mittel kann für die gesamte Biogasanlage mit einer diffusen Methanemission von 1 % gerechnet werden (BACHMEIER et al. 2007, BLMEV 2007).

Energiebedingte Emissionen

Biogasanlagen benötigen Strom für Rührwerke, Feststoffeintrag, Pumpen, BHKW, etc. Die Ergebnisse des Biogasmessprogramms der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FNR 2005) ergaben für eine 500 kW Anlage einen Eigenstrombedarf von ca. 6 % der gesamten Stromproduktion. DACHS & REHM (2006) kamen bei ihren Recherchen auf einen ähnlichen Wert von 5,8 bis 6,5 %. Dagegen geben GRONAUER et al. (2009), EDELMANN et al. (2001) und DBU (2003) für den Eigenstrombedarf der Anlagen 10 % der Stromproduktion an.

Da die Bakterientätigkeit deutlich positiv von der Temperatur beeinflusst wird (EDER & SCHULZ 2007) wird auch Energie für das Anwärmen des Substrates benötigt. Verweilzeit, Dämmung des Fermenters und Jahreszeit sind wichtige Einflussgrößen auf den Wärmebedarf der Anlage. Im Schnitt werden pro m^3 Substrat und Tag etwa 6,5 kWh Wärme benötigt, durchschnittlich wird mit 30 % Prozesswärme kalkuliert (Biogasmessprogramm, LEHNER et al. 2008). Aktuelle Untersuchungen an 10 bayerischen Pilotanlagen von LEHNER et al. (2008) zeigen, dass die Schwankungen in der Prozesswärme enorm sind. Bei geschickter Fermentier-Dimensionierung (geringe spezifische Oberfläche) ist ein weitaus niedriger Prozesswärmebedarf von ca. 3 % aber auch höherer bis zu 24 % möglich. Da diese Wärme mit der Abwärme aus der Verstromung gedeckt wird, fallen hier keine klimarelevanten Emissionen an.

Der überschüssige Strom und die überschüssige Wärme können anderweitig genutzt werden und ersetzen dabei in der Regel fossile Energieträger. Die dadurch vermiedenen Emissionen werden in Anrechnung gebracht.

Der Ressourcenverbrauch, detailliert beschrieben von HARTMANN (2007) verursacht Emissionen, die ebenso wie der Energieinput beim Bau und Betrieb von Biogasanlagen berücksichtigt werden müssen.

Nach den Analysen vom BMELV (2007) an drei Biogasanlagen unterschiedlicher Größe (150 kW Gülleanlage mit 30 % Wärmenutzung; 500 kW, Einsatz nachwachsender Rohstoffe, ohne und mit 30 % Wärmenutzung) entstehen für alle drei Anlagen ähnlich hohe Energieverbräuche von ca. 0,18 kWh pro erzeugter kWh Strom (Tab. 2.14). Dementsprechend sind die daraus resultierenden Emissionen ähnlich hoch und liegen bei etwa 109 g CO₂-Äquivalente pro kWh Strom. Die größten Unterschiede machen die Gutschriften durch Wärmeerzeugung und Vermeidung von Methanemissionen bei der Lagerung von Substraten.

Tab. 2.14: Energieinput (kWh kWh_{el}⁻¹) und Emissionen (CO_{2äq} kg kWh_{el}⁻¹) durch Bau und Betrieb verschiedener Biogasanlagen (BMELV 2007)

Biogasanlage	Input	Energie	Emissionen	
		Gutschrift ¹	Energiebedingt	Gutschrift ²
500 kW NawaRo	0,184		0,108	0,01
500 kW + 30 % NawaRo	0,188	0,3131	0,109	0,101
150 kW Gülle	0,197	0,1161	0,109	0,719

¹ 30 % der Abwärme kann fossile Wärmeträger ersetzen (Basis Erdgas 0,291 kg CO_{2äq} kWh_{th}⁻¹), daraus resultiert eine Gutschrift in Höhe von 0,034 kg CO_{2äq} kWh_{el}⁻¹

² die abgedeckte Lagerung führt zu einer Reduktion der Methanemissionen, je t Gülle werden ca. 36,5 kg CO_{2äq}-Emissionen vermieden, daraus resultiert eine Gutschrift von 0,7 kg CO_{2äq} kWh_{el}⁻¹.

JILEK & PUCHAS (2007) finden ähnliche Werte. Sie geben an, dass für den Anbau, die Ernte und Silierung ein Energieeinsatz von 5.750 kWh ha⁻¹ notwendig ist, die Konversion zu Biogas verursacht nochmals 6.000 kWh ha⁻¹. Demgegenüber steht nach ihren Schätzungen ein Primärenergieinhalt von 59.400 kWh pro ha. Das entspricht in etwa einem Energieinput von 0,177 kWh kWh_{el}⁻¹.

Dagegen fanden BACHMEIER et al. (2007) bei ihren Untersuchungen einen viel geringeren Wert für den „ökologischen Rucksack bei der Errichtung der Biogasanlage“, nämlich von nur 0,009 kg CO_{2äq} kWh_{el}⁻¹. Als Gutschrift für die Wärmeverwertung geben sie 0,193 kg CO_{2äq} kWh_{el}⁻¹, und für die Vergärung von Wirtschaftsdüngern 0,191 kg CO_{2äq} kWh_{el}⁻¹.

Die großen Unterschiede in den Angaben für den Energieinput der einzelnen Verfahrensschritte machen die verschiedenen Herangehensweisen der Abschätzungen und die unterschiedlichen Annahmen deutlich. Erschwerend kommt hinzu, dass sich die Angaben zu Energieinput und Emissionen oftmals nicht vergleichen lassen, da sie nicht dieselbe Bezugsgröße (z.B. kWh_{el}, ha⁻¹) aufweisen (JILEK & PUCHAS, 2007, BACHMEIER et al. 2007, BLMEV, 2007).

2.13.4.3 Emissionsminderung durch Stromeinspeisung und Wärmenutzung

Zur Erzeugung von Strom werden in Deutschland die in Abb. 2.8 dargestellten Energieträger verwendet. Daraus ergibt sich eine CO_2 -Last des durchschnittlichen Strommixes von $616 \text{ g CO}_{2\text{äq}} \text{ kWh}_{\text{el}}^{-1}$ (MACHAT & WERNER 2007). Wird dieser Strom durch anderen ersetzt, so können die vermiedenen CO_2 -Emissionen in Anrechnung gebracht werden.

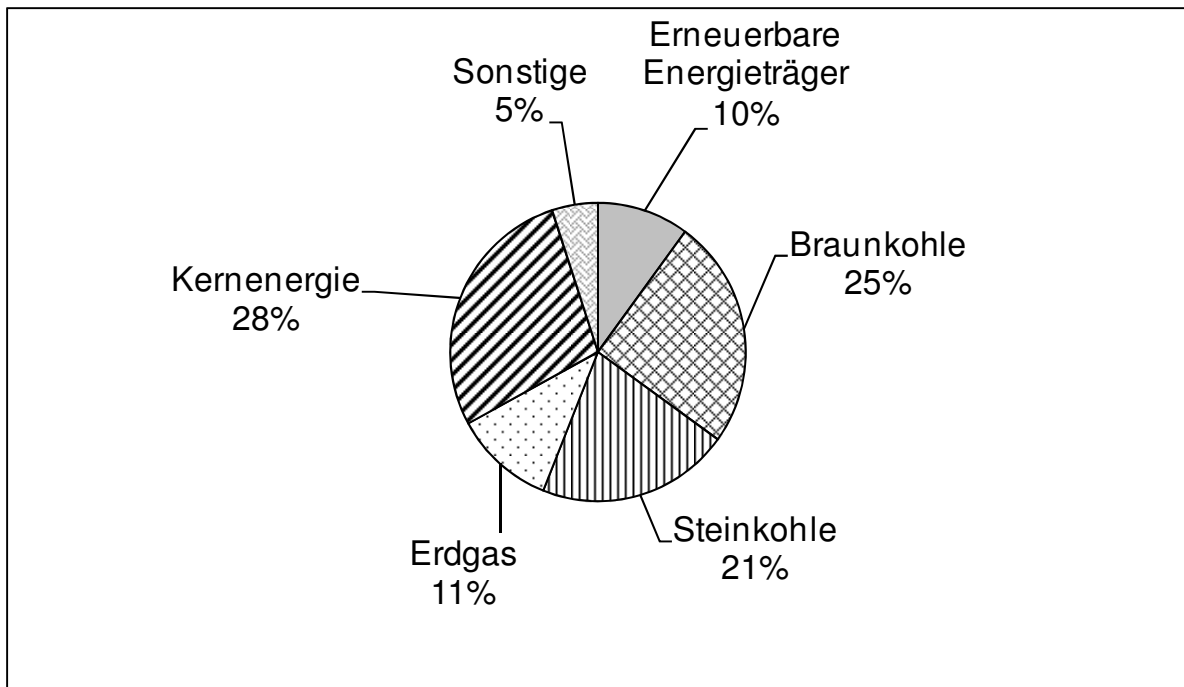


Abb. 2.7: Anteil fossiler, nuklearer und erneuerbarer Energieträger am deutschen Strommix (MACHAT & WERNER 2007).

Ähnliches gilt für die Nutzung der Abwärme aus den BHKW. Pro kWh Wärme aus Erdgas werden beispielsweise $291 \text{ g CO}_{2\text{äq}}$ emittiert (BMELV 2007) und bei Ersatz durch Abwärme aus Biogasanlagen eingespart. Wird analog zum Strommix der deutsche Wärmemix verwendet, so liegt die Gutschrift nach BACHMEIER et al. (2007) bei ca. $326 \text{ g CO}_{2\text{äq}} \text{ kWh}_{\text{th}}^{-1}$.

2.13.5 Energie- und Emissionsminderungspotenziale durch Biogas

Die Landwirtschaft ist durch die Bereitstellung von Bioenergie in der Lage, fossile Energieträger einzusparen und Treibhausgasemissionen zu vermindern. Um eine Bewertung vornehmen und eine Aussage hinsichtlich ihrer Effizienz machen zu können, ist es notwendig, Kenntnis über das Energieinput/Outputverhältnis und Treibhausminderungspotenzial der

einzelnen Bioenergiepfade zu erlangen. Verschiedene Autoren haben eine Ökobilanzierung des Energiepflanzenanbaus und Nutzung in Biogasanlagen vorgenommen (HANEGRAAF et al. 1998, EDELMANN et al. 2001, SCHOLWIN et al. 2006, JILEK & PUCHAS 2007, HARTMANN 2007, BACHMEIER et al. 2008)

KELM & TAUBE (2007) fanden eine Energieeffizienz (kWh pro eingesetzter kWh fossil) für Silomais ohne Wärmenutzung (500 kW) zwischen 3,5 und 4,5 bei moderater Düngeintensität und mittleren Transportentfernungen. Zum Vergleich für Grassilage lag die Energieeffizienz nur zwischen 1 und 2. Mit Wärmenutzung stieg die Energieeffizienz von Silomais auf 5,5 bis 7,5. Bei einer mittleren Transportentfernung von 15 km sank die Energieeffizienz von Silomais ohne Wärmenutzung auf 3 bis 4 und mit Wärmenutzung auf ca. 5 bis 6. Dies unterstreicht die Bedeutung der Schlagentfernung und Wärmenutzung.

WEILAND et al. (2004) und WEILAND (2006) gaben ein Input/Output-Verhältnis für Biogas von 1:5 an, FELDE (2007) von 1:7,5 an. Im Vergleich dazu haben die Erzeugung von Ethanol ein Verhältnis von 1:2 und RME 1:3 (WEILAND et al. 2004, WEILAND 2006).

Durch die Nutzung der Biogastechnologie bei der Milch- und Fleischproduktion kann sich nach HIRSCHFELD et al. (2008) die Klimabilanz um 10 – 13 %, bei der Rindermast sogar um 25 % verbessern. GRONAUER et al. (2009) stellen für Bayern eine Reduktion der CO₂-Belastung durch Biogas von 4 % fest.

EDELMANN et al. (2001) fanden dagegen, dass die landwirtschaftliche Biogasgewinnung die Emissionen verstärkt, vor allem beim Ammoniak. Allerdings kann durch eine Optimierung vor allem durch Abdeckung der Endlager und emissionsverringerte Ausbringung der Gärreste, die treibhausrelevanten Emissionen so stark verringert werden, dass eine Reduktion der Treibhausgasemissionen möglich ist. Bei EDELMANN et al. (2001) hatten die Umweltbelastungen durch die Bereitstellung der Infrastruktur, die Substratart, und auch die Bauweise (Stahl und Beton) nur untergeordneten Einfluss auf die Klimabilanz.

Einen weit größeren Beitrag zur Reduzierung der Treibhausgase fanden HARTMANN & NELLES (2006) und HARTMANN (2007). Nach ihren Berechnungen trägt die anaerobe Vergärung deutlich zur Reduzierung des Treibhauseffektes bei. Durch die vollständige Wärmenutzung können der fossile Energieinput und die daraus bedingten Treibhausgasemissionen reduziert werden. 50 % der Umweltwirkungen, die die Biogasnutzung von Energiepflanzen mit sich bringt (einschließlich Landnutzung, etc.), konnten dadurch reduziert werden (HARTMANN & NELLES 2006).

3 Material und Methoden

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden in den Jahren 2002 bis 2006 an mehreren Standorten in Deutschland mit unterschiedlichen Boden- und Klimabedingungen Feldversuche mit Silomais durchgeführt. Eine Übersicht der Versuche, der Orte und Jahre gibt Tab. 3.1.

Tab. 3.1: Übersicht der durchgeführten Versuche

Versuche	Jahre	Orte
Bestandesdichte	2002-05	Grucking, Freising, Ingolstadt (BY [†]); Bersenbrück (NI [†]);
Erntetermin	2003-06	Grucking, Freising, Ingolstadt, Ismaning (BY); Wehnen (NI);
Düngung	2003-06	Grucking, Freising (BY);

[†] BY Bayern, NI Niedersachsen

Die Versuche in Wehnen (Erntetermin) und Bersenbrück (Bestandesdichte) wurden nach vorgegebenem Versuchsplan von der Landwirtschaftskammer Weser Ems durchgeführt. Das geerntete Material wurde gehäckselt und getrocknet nach Freising übersandt, die Rohdaten der Ertragsermittlung bereitgestellt.

3.1 Standorte und Vegetationsverlauf

Die verschiedenen Standorte sind in der Tab. 3.2 beschrieben. Ingolstadt (Bayern) und Wehnen (Niedersachsen) weisen im Vergleich zu den Versuchsorten Freising, Grucking, Ismaning (Bayern) und Bersenbrück (Niedersachsen) eine geringere Bodengüte auf. Allerdings erreichen Wehnen und Bersenbrück höhere Durchschnittstemperaturen. Grucking eignet sich von allen Standorten aufgrund der guten Bodenqualität und der hohen Niederschläge am besten für die Silomaisproduktion. Mit der Wahl der Orte sollte eine größtmögliche Differenzierung der Anbaubedingungen erzielt werden, um eine hohe Allgemeingültigkeit der Ergebnisse zu erzielen.

Tab. 3.2: Beschreibung der Versuchsstandorte

Orte	Lage [†] m	Bodenart	Bodenzahl	Temperatur ^{††} °C	Niederschläge ^{††} mm
Ismaning	485	humoser Sand	40	9,8	800
Freising I ^{†††}	454	schluffiger Lehm	68	7,5	750
Freising II [†]	454	humos toniger Lehm	68	7,5	750
Freising III [†]	454	kiesiger Schotter	54	7,5	750
Grucking	450	sandiger Lehm, Löß	80	7,5	850
Ingolstadt	365	humoser Sand	26-29	7,6	700
Wehnen	9	humoser Sand	20	9,0	750
Bersenbrück	34	lehmgiger Sand	45	9,1	850

[†] Lage = Höhe über NN

^{††} Temperatur, Niederschläge = langjähriges Mittel

^{†††} Freising I: 2003; II: 2004; III: 2005 und 2006

Temperatur

Die Monatsmittelwerte von Temperatur und Niederschlag im Vergleich zum langjährigen Mittel sind in den Abb. 9.1.- 9.12 im Anhang dargestellt. Die Temperaturen im Mittel über die Vegetationsperiode lagen in der gesamten Untersuchungsperiode mit Ausnahme von 2004 (Ismaning) und 2005 (Grucking) über dem langjährigen Mittel. Die Durchschnittstemperaturen der Jahre 2002 (Freising) und 2006 (Grucking, Bersenbrück) waren um 2°C höher als im langjährigen Mittel. Bundesweit war vor allem das Jahr 2003 durch sehr hohe Temperaturen in den Monaten Juni und August gekennzeichnet. Die Monatstemperaturen überstiegen das langjährige Mittel zum Teil bis zu 5°C (z.B. Freising 2003). In Freising war dies gleichzeitig mit deutlich niedrigeren Niederschlägen als im langjährigen Mittel gekoppelt. Der Düngeversuch aus diesem Jahr zeigte extreme Trockenschäden und konnte deshalb nicht ausgewertet werden.

Im Jahr 2006 waren die Sommermonate äußerst wechselhaft. Der Juli zeigte Monatsdurchschnittstemperaturen von zum Teil über 20°C (langjährige Mittel bei ca. 17°C). Geringe Niederschläge führten zu einer ausgeprägten Trockenheit. Allerdings konnten in 2006 alle Versuche ausgewertet werden. Im August war es deutlich kühler und die Temperaturen sanken

von etwa 20°C auf 15°C, worauf im Anschluss die Temperaturen wieder stiegen und an allen Orten über dem langjährigen Mittel im September, Oktober und November blieben.

Niederschläge

Sehr regenreich war das Jahr 2002, besonderes trocken das Jahr 2003. Auch in den Jahren 2004 und 2006 lagen die Niederschläge in Freising, Grucking, Ismaning, Ingolstadt und Bersenbrück im Mittel unterhalb des langjährigen Mittels. In Bersenbrück regnete es auch im Jahr 2005 verhältnismäßig wenig.

Starke Schwankungen zeigten sich im Jahr 2006. An allen Orten kam es im August zu extrem hohen und im Juli und September zu extrem niedrigen Niederschlägen. Nicht so stark schwankten die Niederschläge in den Jahren 2002, 2003 und 2005. Die Niederschlagsverteilung war im Jahr 2004 am ausgeglichensten. Besonders wechselhaft war der Witterungsverlauf an den Standorten Freising, Grucking und Bersenbrück.

Am 12. August 2004 führte ein Sturm mit extrem hohen Tagesniederschlägen an den Standorten Freising und Grucking zum Totalausfall der Versuchsanlagen (Erntetermin, Bestandesdichte, Düngung, Fruchtfolge). Durch den hohen Niederschlag und starken Wind wurden die meisten Pflanzen umgedrückt oder abgebrochen und konnten daher für die Versuchsauswertung nicht mehr verwendet werden. Als Ersatz für den Ernteterminversuch wurde der Standort Ismaning in die Auswertung mit aufgenommen.

3.2 Auswahl der Genotypen

Das Auswahlkriterium für die Wahl des Genotyps war die Einstufung der Reifezahl (FAO-Zahl) einer Sorte (Sortenliste Anhang, Tab. 9.1). Es wurden ausschließlich Sorten mit einer FAO Klassifizierung größer als 250 verwendet. Als Vergleichssorte diente die Sorte *Gavott*, eine leistungsstarke adaptierte Silomaisorte aus dem mittelfrühen Reifebereich (FAO 250), die in Deutschland zur vollen Siloreife gelangt. Die Sorten stammten vorwiegend aus südfranzösischem, ungarischem und italienischem Zuchtmaterial. Da während des Untersuchungszeitraums keine speziellen Biogas-Maissorten zur Verfügung standen, wurde aktuelles Sortenmaterial mit hohem Ertragspotenzial verwendet. Die Sorten wurden in Abstimmung mit dem Projektpartner KWS Saat AG Einbeck an den Zuchtfortschritt angepasst. Dadurch sollte eine hohe Praxisrelevanz der Versuchsergebnisse gesichert werden.

3.3 Versuchsdurchführung

Die Feldversuche wurden als vierreihige Parzellen mit 0,75 m Reihenabstand und dreimaliger Wiederholung angelegt. Die Parzellengröße betrug 18 m². Mit Ausnahme vom Bestandesdichteversuch wurde eine Saatstärke von 10 Pflanzen je m² angestrebt. In den Versuchen wurde auf Endabstand ausgesät; nur in den Bestandesdichteversuchen (vgl. Punkt 3.4.3) erfolgte eine Vereinzelnung.

Die pflanzenbaulichen Maßnahmen wie Bodenbearbeitung, Pflanzenschutz und Düngung erfolgten ortsüblich (Ausnahme Düngeversuch). Zur Deckung des standortangepassten N-Bedarfs wurde Kalkammonsalpeter verwendet, wovon unter Berücksichtigung des N_{min}-Gehaltes im Boden 50 % vor der Saat und 50 % nach der Saat, in etwa nach Erreichen des 4-5 Blattstadiums verabreicht wurde. Eine Unterfußdüngung mit 30 kg N ha⁻¹ (NP Dünger) zur Saat erfolgte bei allen Prüfgliedern. Eine Herbizidanwendung aus einer Mischung von Callisto (1 l ha⁻¹) und Gardo Gold (3 l ha⁻¹) wurde im 3-4 Blattstadium durchgeführt. Die Sä- und Erntetermine sind im Anhang in der Tab. 9.2 zusammengefasst.

Mit Ausnahme vom Standort Ismaning wurden die mittleren zwei Reihen mit einem Versuchshäcksler, der mit einer Probeentnahmestelle kontinuierlich aus dem Häckselstrom und einer automatischen Wiegeeinrichtung (Gewicht der Probe wurde berücksichtigt) ausgestattet war, geerntet. Das Frischgewicht der geernteten Reihen wurde vom Bordcomputer am Versuchshäcksler erfasst.

In Ismaning erfolgte die Ernte mit einem praxisüblichen Feldhäcksler und einem parallel mitfahrenden Anhängergespann. Der Frischertrag wurde über eine Anhängerwiegeeinrichtung (fest installiert am Gut Karlshof) festgestellt. Daraus ergab sich eine größere Messunsicherheit bei der Erfassung des Erntegewichtes. Die Probenentnahme erfolgte per Hand in perforierte Plastikbeutel direkt aus dem Anhänger. Außerdem wurden die Parzellen nicht wiederholt, so dass für den TS-Ertrag keine statistische Auswertung möglich war.

Bei dem Ernteterminversuch wurden vor der Häckslernernte bei einer der mittleren Reihe die Kolben ohne Lieschen per Hand geerntet und das Frischgewicht erfasst. Die Ernte der Restpflanzen- und Ganzpflanzenreihe erfolgte dann getrennt mit dem Häcksler.

Zur Bestimmung des TS-Gehaltes und der Qualitätsparameter wurde eine repräsentative Probe von etwa 1-1,5 kg Frischmasse kontinuierlich aus dem Häckselstrom entnommen. Das Frischmaterial (Rest- und Ganzpflanze, Kolben) wurde in perforierten Plastikbeutel bei maximal 60°C auf einer Flachbett Trocknung bis zur Gewichtskonstanz getrocknet.

Die Bestimmung des TS-Gehaltes erfolgte in zwei Schritten. Vier Referenzproben aus den Randreihen der Versuchsanlage, ebenso aus dem Häckselstrom entnommen, wurden bei

105°C bis zur Gewichtskonstanz (absolut trocken) getrocknet. Aus dem Wasserverlust der Proben bei 60°C getrocknet (Mittelwert aller Proben) und dem Wasserverlust der Referenzproben bei 105 °C getrocknet (Mittelwert der Referenzproben) wurde ein Faktor ermittelt, mit dem alle bei 60°C ermittelten TS-Gehalte verrechnet wurden.

Alle TS-Erträge wurden über die Parzellengröße in dt ha⁻¹ umgerechnet.

Für die Analyse der Qualitätsmerkmale wurden die getrockneten Proben unter Verwendung eines Siebes mit 4 mm Lochgröße vorgemahlen. Mit Hilfe eines Probenteilers wurde eine Teilprobe genommen und diese auf 1 mm Partikelgröße gemahlen. Die Aufbereitung aus dem gehäckselten und getrockneten Material für die nachfolgende Untersuchung mit NIRS (Nahinfrarot-Reflexions-Spektroskopie) erfolgte nach DEGENHARDT (1986).

3.4 Beschreibung der Feldversuche

3.4.1 Ernteterminversuche

Die Versuche wurden von 2003 bis 2006 an vier Standorten in Bayern und an einem Versuchsort in Niedersachsen durchgeführt (Tab. 3.3). Die Sä- und Erntetermine, die Beschreibung der Sorten und der Orte sind im Anhang in den Tab. 9.1 und 9.2 aufgeführt. Um deutliche Unterschiede im Ertrags- und Qualitätsverhalten der Prüfglieder zu erhalten, wurden die Erntetermine in etwa drei Wochenabständen festgelegt, beginnend mit einer sehr frühen Ernte Ende August. Die letzte Ernte war Ende Oktober/Anfang November (Versuchsplan Abb. 8.13). In Freising 2003 wurde der Ernteterminversuch mit zwei unterschiedlichen Säterminen (Saat April und Saat Mai) durchgeführt, so dass sich dadurch eine weitere Differenzierung der Wachstumsdauer ergab.

Tab. 3.3: Übersicht der Ernteterminversuche (2003 - 2006)

Jahre	Sorten	Erntetermine	Orte [†]
2003	4	4	FS, WE
2004	4	4-5	IS, IN, WE
2005	5	4	FS, IN, WE
2006	3	4	FS, GRU, WE

[†] Bayern: FS Freising, IS Ismaning, IN Ingolstadt, GRU Grucking; Niedersachsen: WE Wehnen

Neben den agronomischen und qualitätsbestimmenden Merkmalen wurden für die Versuche Freising 2003, Ingolstadt 2004, Ismaning 2004 und Grucking 2006 Analysen zur Bestim-

mung der Methanausbeute vom Institut für Landtechnik in Hohenheim durchgeführt. Dementsprechend beziehen sich die Ergebnisse des Methanertrages pro Hektar nur auf diese Standorte, während sich in den Ergebnissen der TS-Gehalte und TS-Erträge alle Orte wiederfinden.

3.4.2 Düngungsversuche

In den Jahren 2005 und 2006 wurden an zwei Standorten in Bayern (Freising, Grucking) Düngerversuche mit zwei Sorten unterschiedlicher Reife durchgeführt. Neben einer Nullparzelle wurden eine mineralische und eine organische Düngervariante mit vier Intensitätsstufen (0, 90, 150, und 210 kg N ha⁻¹) angelegt (Versuchsplan Anhang Abb. 9.14). Alle Varianten erhielten, weil technisch nicht anders lösbar, eine Unterfußdüngung mit 30 kg N ha⁻¹ zur Saat. Diese Menge wurde auf die noch auszubringende Düngermenge angerechnet.

Der organische Dünger, ein Gärrest aus einer Biogasanlage, die mit einem hohen Maisanteil (70 %) betrieben wird, stammte vom Gut Karlshof der Stadt München in Ismaning. Zur Bestimmung der auszubringenden Gärrestmenge wurde eine Probe zur N-Analyse zwei Wochen vor dem festgesetzten Düngetermin aus dem Güllebehälter und eine Kontrollprobe zusätzlich aus dem Güllefass am Tag der Ausbringung gezogen. Nach dem NH₄-N-Gehalt der Gärrestprobe richtete sich die Ausbringmenge (Tab. 3.4). Die Stufen I und II der organischen Variante wurden in einer einmaligen Gabe vor der Saat sofort eingearbeitet. Die Stufe III wurde gesplittet. ²/₃ der Menge wurde vor der Saat in den Boden ausgebracht und ¹/₃ wurde im 4-5-Blattstadium des Maises zwischen die Reihen ausgebracht. Zum Einsatz kam ein Güllefass mit 12 m breitem Schleppschlauchgespann.

Tab. 3.4: Gärrestzusammensetzung und auszubringende Gärrestmenge

Jahre	Gärrest			auszubringende Gärrestmenge		
	TS %	N ges. kg m ³	NH ₄ -N kg m ³	Stufe I	Stufe II m ³ ha ⁻¹	Stufe III
2005	5,6	3,9	2,3 (2,3) [†]	26	52	78
2006	8,6	5,7	2,7 (2,7)	22	44	66

[†]Werte in Klammern: Kontrollprobe

Ebenso wurden die mineralischen Düngergaben geteilt. Abzüglich der 30 kg N ha⁻¹ zur Saat wurden 50 % der N-Menge vor der Saat und 50 % nach der Saat (4-5 Blattstadium) ausgebracht.

In jeder Stufe wurden die Sorten *Gavott* (FAO 250) und *Kursus* (FAO 400) dreimal geprüft. Vor der Saat sowie nach der Ernte wurden N_{min}-Proben gezogen. Die nach der Ernte wurden in Abhängigkeit der Düngerart und Intensitätsstufe gezogen.

3.4.3 Bestandesdichteversuche

Im Jahr 2002 und 2003 wurden die Versuche mit Bestandesdichten von 6, 8, 10 Pfl. m⁻² angelegt. In den Jahren 2004 und 2005 wurden sie auf 12 und 14 Pfl. m⁻² erweitert. Die Versuche wurden mit einer Saatstärke von 16 Pfl. m⁻² gesät und nach Aufgang auf die entsprechende Pflanzenzahl (6, 8, 10, 12, 14 Pfl. m⁻²) per Hand vereinzelt (Versuchsplan Abb. 8.15). Eine Übersicht der Versuche zeigt Tab. 3.5. In den Jahren 2002 und 2003 wurden 12 Sorten geprüft; in den Jahren 2004 und 2005 waren es vier Sorten.

Tab. 3.5: Übersicht der Bestandesdichteversuche (2002 – 2005)

Jahre	Sorten	Bestandesdichte Pfl. m ⁻²	Orte [†]
2002	12	6,8,10	FS, BSB
2003	12	6,8,10	FS, BSB
2004	4	6,8,10,12,14	IN, BSB
2005	4	6,8,10,12,14	FS, IN, BSB

[†] Bayern: FS Freising, IN Ingolstadt; Niedersachsen: BSB Bersenbrück

3.4.4 Energie- und CO₂-Bilanzierung des Silomaisanbaus

Für die Bilanzierungen wurden die Ergebnisse und Daten des Düngerversuchs herangezogen. Mit Hilfe des Bilanzierungsmodells REPRO (**R**eproduktion der Bodenfruchtbarkeit, HÜLSBERGEN (2003)) wurden die Energieein- und outputs sowie die klimawirksamen Emissionen der Silomaisproduktion bis zur Einlagerung auf Schlagebene ausgewertet. Für die Ermittlung des Energieeinsatzes und der CO_{2äq}-Emissionen der Verfahrensschritte Befüllung

des Fermenters bis zur Stromproduktion wurden aktuelle Kennzahlen aus BMELV (2007) verwendet.

3.4.4.1 Bilanzierungsmodell REPRO und Dateneingabe

REPRO ist ein Modell zur Bewertung der Nachhaltigkeit landwirtschaftlicher Systeme (HÜLSBERGEN 2003). Die Bewertung der Umweltwirkungen der Landwirtschaft erfolgt über eine enge Kopplung betrieblicher Daten mit den Standorteigenschaften. Die Datenerfassung und auch die Bewertung erfolgt im Modell auf der Ebene des Teilschlages, als kleinster Einheit gleicher Bewirtschaftung. REPRO ist modular aufgebaut. Die einzelnen Module und ihre Vernetzung untereinander sind in Abb. 3.1 dargestellt.

Die Datenerfassung in REPRO erfolgt auf Ebene des Schlages bzw. Teilschlages in den nachfolgend aufgelisteten Bereichen. In die vorliegende Energie- und CO₂-Bilanzierung gingen folgende Daten ein:

- Fruchtarten (Hauptfrucht, Nutzungsjahr, Sorte)
- Saatguteinsatz (Menge, Herkunft)
- Düngung (Art, Menge, Termin, Inhaltsstoffe)
- Pflanzenschutz (Mittel, Menge, Termin)
- Erträge (Hauptprodukt, Inhaltsstoffe, Anzahl der Ernten)
- Verfahren (Maschinen und Geräte, Arbeitsbreite und -tiefe, Bereifung, Termin)
- Produktverwendung und -verarbeitung
- Lagerhaltung (Lagerort, Verwendung).

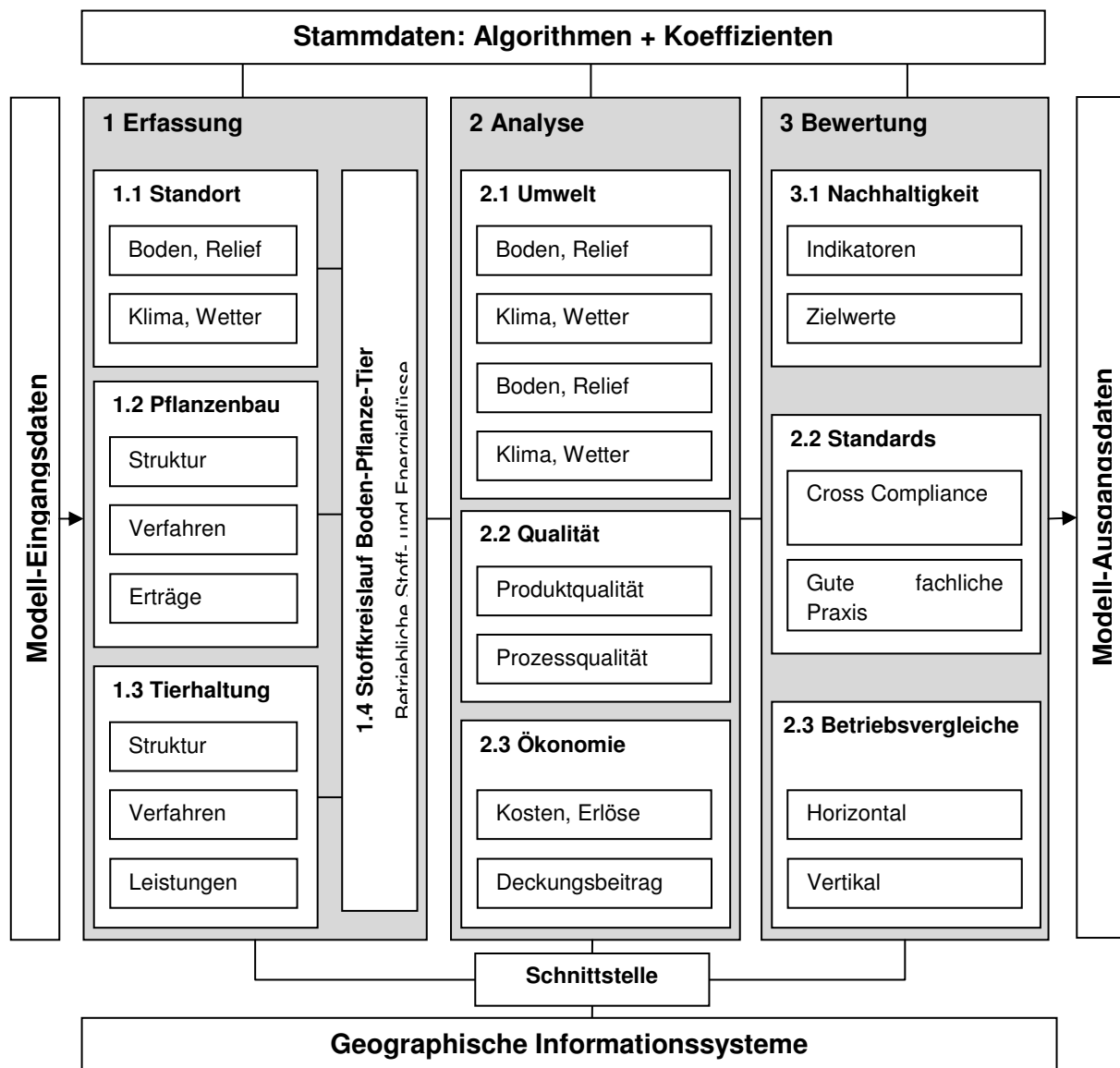


Abb. 3.1: Struktur des Modells REPRO und Vernetzung der Module (nach HÜLSBERGEN, 2003).

Da die Daten schlagbezogen sind, erfolgte die Eingabe in Abhängigkeit von den Orten (Grucking, Freising), nach Sorten getrennt. Die Ergebnisse wurden dann über die Orte und Sorten gemittelt.

Für die Auswahl der Maschinen und Geräte wurden die Standardverfahren nach KTBL (Auswahlmöglichkeit im Programm) verwendet. Jedem einzelnen Verfahren (Bodenbearbeitung, Bestellung, etc.) werden in REPRO praxisübliche Maschinen und Geräte zugeordnet. Tab. 3.6 gibt ein Beispiel für die notwendigen Verfahrensschritte, die ausgewählten Maschi-

nen und der daraus resultierende direkte und indirekte Energieeinsatz der organischen Düngervariante (Stufe III) nach KTBL.

Tab. 3.6: Verfahrensschritte der organischen Düngervariante (Stufe III) und Energieeinsatz nach KTBL

Datum	Verfahrensabschnitt	Geräte/Bedingungen	Dieseleinsatz (l/ha)	Direkter Energieeinsatz (MJ/ha)	Indirekter Energieeinsatz (MJ/ha)	Gesamtenergieeinsatz (MJ/ha)
01.10.2005	Bodenbearbeitung	Pflügen mit Aufsatteldrehpflug, 7 Schare, 2,45 m, 120 kW	26,4	1.046,3	103,1	1.149,4
04.05.2006	Organische Düngung	Gülle / Jauche ausbringen, ab Hof mit PTW [†] , Schleppschlauch, 12 m, 83 kW	6,6	261,5	257,7	519,3
04.05.2006	Bodenbearbeitung	Eggen mit Kreiselegge, 4,0 m, 120 kW	16,5	652,5	57,8	710,3
04.05.2006	Bestellung	Mais legen ,8 Reihen, 6,0 m, 45 kW	2,2	88,3	61,6	149,9
30.05.2006	Organische Düngung	Gülle / Jauche ausbringen, ab Hof mit PTW [†] , Schleppschlauch, 12 m, 83 kW	6,6	261,5	25,5	287,0
01.06.2006	Pflanzenschutz	Pflanzenschutz ab Feld, Anhängerpflanzenschutzspritze, 21 m, 3.000 l, 67 kW	1,8	69,7	15,9	85,6
30.10.2006	Hauptproduktternte	Silomais häckseln mit Selbstfahrer, vierreihig, 250 kW, Selbstfahrer, Doppelzug je 10 (5) t, Dreiseitenkippanhänger, 67 kW	30,3	1.198,2	350,8	1.549,1
30.10.2006	Transport des Hauptproduktes	Transport, 18 (13,5) t, Dreiseitenkippanhänger, 67 kW	0,1	2,0	0,2	2,3

[†] Pumptankwagen

Im Modell wird nur der Einsatz fossiler Energie in das landwirtschaftliche System erfasst. Unberücksichtigt bleibt die Sonnenenergie als auch die menschliche Arbeitskraft.

3.4.4.2 Methode der Energiebilanzierung

Zur Erstellung der Energiebilanz wurden dem Energieinput des Silomaisanbaus und dem Energieinput durch den Bau und Betrieb einer Biogasanlage die Energieerzeugung in der Biogasanlage gegenübergestellt (Abb. 3.2). Der Einfluss der Wärmenutzung auf die Energiebilanz wird mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse in der Diskussion dargestellt.

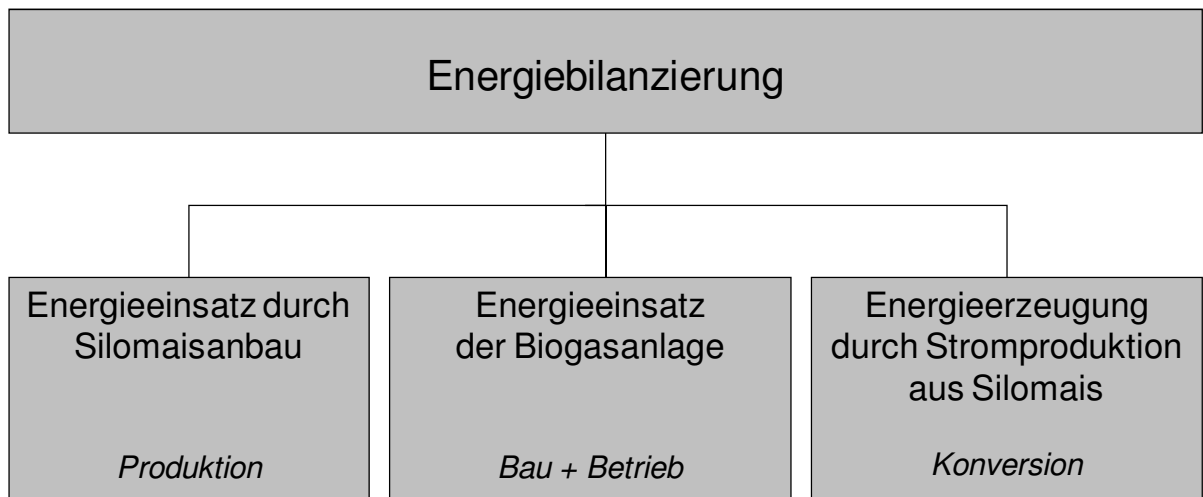


Abb. 3.2: Energiebilanzierung des Silomaisanbaus zur Stromerzeugung in Biogasanlagen.

Energieeinsatz in der Maisproduktion

Der Energieeinsatz umfasst den direkten (Diesel) und indirekten Einsatz fossiler Energie. Energetische Aufwendungen für Trocknung, Lagerung und Weitertransport ab Hof wurden nicht mit einbezogen. Der indirekte Energieeinsatz umfasst den Energieaufwand für die Produktion von:

- Saatgut
- Mineraldüngern
- organischen Düngern (Substitutionswert)
- Pflanzenschutzmitteln
- Maschinen und Geräten.

Die organischen Dünger (z.B. die Gärreste) werden energetisch nach ihrem Substitutionswert bewertet (HEYLAND & SOLANSKY 1979). Ausgehend vom Mineralstoffgehalt (NPK) wird die Nährstoffwirkung im Vergleich zu Mineraldüngern (Mineraldüngeräquivalent) ermittelt.

Vom Mineraldüngeräquivalent wird auf die notwendige fossile Energie bei der Herstellung der wirksamen Nährstoffe geschlossen (Substitutionswert).

In der vorliegenden Energiebilanzierung wird der Substitutionswert der organischen Dünger allerdings nicht berücksichtigt, da vereinfachend die Gärreste als Nebenprodukt der Biogas-erzeugung betrachtet werden, die keinen zusätzlichen Energieinput erfordern und die innerbetrieblich eingesetzt werden (Schließung von Stoffkreisläufen). Fände jedoch ein Export der Gärreste in andere Betriebe statt, so wäre eine energetische Bewertung des Düngers sinnvoll.

Beim Saatgut wird für Herstellung, Lagerung und Transport notwendige fossile Energieeinsatz in Ansatz gebracht. Die im Saatgut gebundene Bruttoenergie wird von der Brutto-Energiebindung der Biomasse subtrahiert.

Der Betriebsmitteleinsatz (Mineraldünger, Pflanzenschutzmittel) sowie der Maschinen- und Geräteeinsatz wird über Energieäquivalente in den fossilen Energieeinsatz umgerechnet, wobei die Energieäquivalente der technischen Entwicklung angepasst sind, und sich jeweils auf moderne Produktionsanlagen beziehen.

Die Kalkulation des indirekten Energieeinsatzes für die Herstellung und Instandhaltung von Maschinen und Geräten beruht auf dem Materialverbrauch bei Unterstellung von praxisüblichen Einsatzzeiten und Abschreibungszeiträumen (KALK & HÜLSBERGEN 1996). Bei der Berechnung des Energieeinsatzes werden zudem externe Einflussfaktoren berücksichtigt (Bodenart und Bearbeitungstiefe beim Pflügen, Applikationsmenge bei der Düngerausbringung, Ertrag beim Ernteverfahren etc.).

Die Berechnung des Energieeinsatzes und der Energiebindung erfolgt nach Gleichung 1 - 3.

$$E_i = E_d + E_i \quad (1)$$

$$E_i = E_{SG} + E_{MD} + E_{PSM} + E_M \quad (2)$$

$$E_O = EB - EB_S \quad (3)$$

E_i	= Energieeinsatz	(GJ ha ⁻¹)
E_d	= direkter Energieeinsatz	(GJ ha ⁻¹)
E_i	= indirekter Energieeinsatz	(GJ ha ⁻¹)
E_{SG}	= Energieeinsatz für die Produktion von Saatgut	(GJ ha ⁻¹)
E_{MD}	= Energieeinsatz für die Produktion von Mineraldünger	(GJ ha ⁻¹)
E_{PSM}	= Energieeinsatz für die Produktion von Pflanzenschutzmitteln	(GJ ha ⁻¹)
E_M	= Energieeinsatz für die Produktion von Maschinen	(GJ ha ⁻¹)
E_O	= Energieoutput Biomasse	(GJ ha ⁻¹)
EB	= Energiebindung, physikalischer Brennwert der geernteten Biomasse	(GJ ha ⁻¹)
EB_S	= Energiebindung des eingesetzten Saatguts	(GJ ha ⁻¹)

Energieeinsatz beim Bau und Betrieb von Biogasanlagen

Sowohl beim Bau (Rohstoffe, Maschinen, Kraftstoff) als auch beim Betrieb von Biogasanlagen wird Energie direkt (Eigenenergiebedarf, Kraftstoff) oder indirekt eingesetzt. Zur Berechnung wurde als Beispiel eine Biogasanlage mit 500 kW elektrischer Leistung ohne Wärmenutzung auf Maisbasis herangezogen. Eine Biogasanlage solcher Größenordnung verursacht nach BMLEV (2007) einen Energieeinsatz in Höhe von 0,184 kWh pro erzeugter Kilowattstunde Strom.

Energieerzeugung in Form von Strom aus Biogas

Zur Berechnung der Energieerzeugung wurde der Methanertrag pro Hektar berechnet. Die Höhe der Methanausbeute wurde mit $330 \text{ NI (kg OTS)}^{-1}$ festgelegt (KTBL 2005). Bei einem Bruttoenergieinhalt von 10 kWh pro m^3 Methan (BESGEN 2005) und einem durchschnittlichen elektrischen Wirkungsgrad des Kraftwerks von 35 % (EDER & SCHULZ 2007, KEYMER 2004), werden pro m^3 Methan 3,5 Kilowattstunden Strom erzeugt.

Energiebilanzierung

Aus der Gegenüberstellung der drei Bereiche Substratproduktion, Bau & Betrieb und Strom-einspeisung ergibt sich die Energiebilanzierung für die Nutzung von Mais in Biogasanlagen zur Stromerzeugung.

Zur Bewertung der Energiebilanz werden verschiedene energetische Kennzahlen und Maßstäbe verwendet:

Energiebindung Biomasse (EB)

Sie entspricht dem physikalischen Brennwert der geernteten Biomasse.

Energiebindung Saatgut (EB_s)

Die im Saatgut gebundene Bruttoenergie (Brennwert des Saatgutes).

Energiebindung organischer Dünger - Substitutionswert

Die im organischen Dünger gebundene Energie, welche eingesetzt werden müsste, wenn die Nährstoffgehalte von NPK mineralisch erzeugt werden.

Energieoutput (E_{ON})

Der Energieoutput stellt den Saldo aus der Energiebindung in der Biomasse und dem Energieeinsatz bzw. zwischen der Stromerzeugung und dem Energieeinsatz dar (Gleichung 4).

Der Energieoutput der **Maisproduktion** ist die Energiebindung der Biomasse abzüglich der im Saatgut gebundenen Energie und abzüglich des Energieeinsatzes. Ist der Saldo positiv, wird mehr Energie in der pflanzlichen Biomasse gespeichert als für die Erzeugung der Biomasse notwendig ist.

Der Energieoutput der **Stromproduktion** entspricht der Stromproduktion abzüglich des Energieeinsatzes in der Maisproduktion und beim Bau und Betrieb der Biogasanlage. Ist der Saldo positiv, wird mehr Energie erzeugt als für die gesamte Verfahrenskette von der Maisproduktion bis zur Stromerzeugung eingesetzt wird.

Energieintensität (E_{int})

Mit der Energieintensität wird der produktbezogene Energieeinsatz ausgedrückt. Es wird die eingesetzte Energie mit dem Produkt (Getreideeinheit, Stromertrag) ins Verhältnis gesetzt (Gleichung 5).

Output/Input-Verhältnis

Das Output/Input-Verhältnis der **Maisproduktion** gibt das Verhältnis von physikalischem Brennwert der geernteten Biomasse (abzüglich des Brennwertes des Saatgutes) zu fossilem Energieeinsatz an (Gleichung 6).

Das Output/Input-Verhältnis der **Stromproduktion** gibt das Verhältnis von elektrischem Stromertrag (Stromproduktion) zu fossilem Energieeinsatz der gesamten Verfahrenskette an.

Die Berechnung der Energiebilanz erfolgte nach Gleichung 4 - 6.

$$E_{ON} = EB - EB_s - E_I \quad (4)$$

$$E_{int} = \frac{E_I}{GE} \text{ bzw. } E_{int} = \frac{E_I}{kWh} \quad (5)$$

$$OIV = \frac{E_O}{E_I} \quad (6)$$

E_{ON}	= Energieoutput	(GJ ha ⁻¹)
E_{int}	= Energieintensität	(MJ GE ⁻¹)
E_I	= Energieeinsatz	(GJ ha ⁻¹)
E_O	= Energiebindung Biomasse abzgl. Energiebindung Saatgut	(GJ ha ⁻¹)
GE	= Getreideeinheit	(GE ha ⁻¹)
kWh	= Stromertrag	(kWh _{el} ha ⁻¹)
OIV	= Output/Input-Verhältnis	(Relativzahl)

Der Umrechnungsfaktor von GJ auf kWh beträgt 278.

3.4.4.3 Methode der CO₂-Bilanzierung

Zur Erstellung der Klimabilanz werden den klimarelevanten Emissionen der Maisproduktion und den Emissionen durch den Bau und Betrieb einer Biogasanlage die vermiedenen Emissionen durch die Stromeinspeisung gegenübergestellt (Abb. 3.3). Dabei ersetzt die eingespeiste Strommenge aus der Biogaserzeugung die gleiche Menge an Strom aus dem deutschen Strommix.

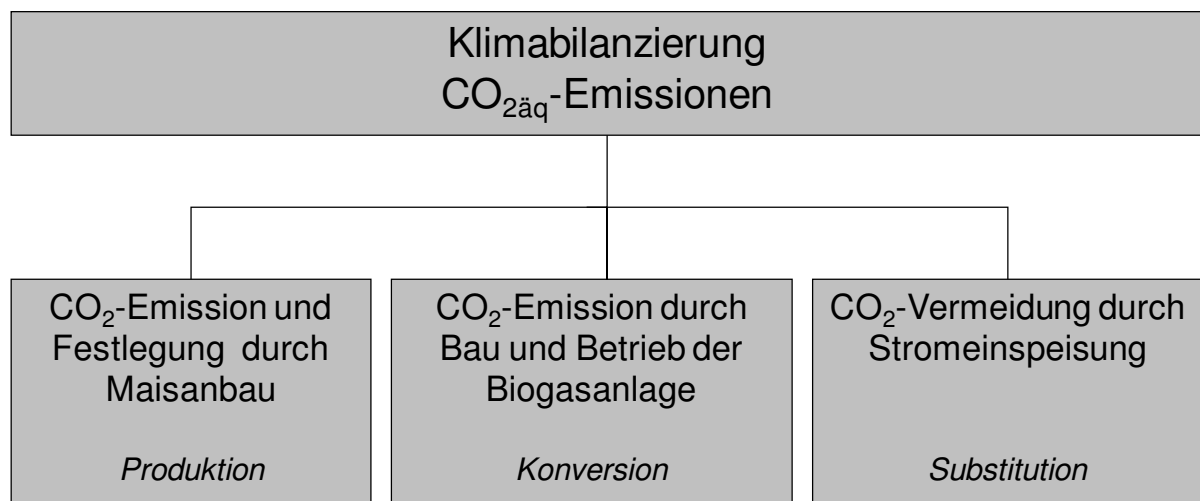


Abb. 3.3: Klimabilanzierung des Silomaisanbaus zur Stromerzeugung in Biogasanlagen.

CO₂-Emissionen der Maisproduktion

Die CO₂-Emissionen der Maisproduktion wurden mithilfe des Modells REPRO erfasst. Klima-relevante Emissionen entstehen in den Bereichen:

- Einsatz fossiler Energie bei der Maisproduktion
- N₂O-Emissionen
- C-Freisetzung im Boden durch Humusabbau.

Die Höhe der Emissionen werden im Modell in Abhängigkeit vom Standort, der Fruchtart und Bearbeitungsintensität abgeschätzt und gemäß ihrem spezifischen Global Warming Potenzial (GWP) in CO₂-Äquivalente ausgegeben. Der Faktor für das GWP bei einem Betrachtungszeitraum von 100 Jahren liegt für CO₂, CH₄ und N₂O bei 1, 23 und 296 (IPCC, 2007).

Die Emissionen aus dem Einsatz fossiler Energie werden wie bei der Energiebilanzierung nach Saatgut, Mineraldünger, Pflanzenschutzmittel, Investitionsgüter und Dieselkraftstoff

differenziert angezeigt. Die für die verschiedenen Energieverbräuche zugrunde liegenden Emissionsfaktoren wurden von KÜSTERMANN et al. (2008) detailliert beschrieben.

Die N₂O-Emissionen werden im Modell nach dem IPCC Ansatz (IPCC 2006) errechnet. Demnach gehen 1,25 % des dem Boden zugeführten Stickstoffs als N₂O verloren. Bei der Bestimmung der N-Zufuhr werden die NH₃-Verluste berücksichtigt. Für die Gärrestdüngung wurde ein NH₃-Verlust in Höhe von 25 % der NH₄-N-Menge im zugeführten organischen Dünger (bei NH₄-N-Gehalten der Gärreste von 60 %) zugrunde gelegt. Für die mineralische N-Düngung wurde mit einem mittleren NH₃-N-Verlust von 5 % der zugeführten Dünger-N-Menge gerechnet.

Die Berechnung der Humusbilanz erfolgte nach dem dynamischen Ansatz mit ertrags-, standort- und bewirtschaftungsabhängigen Koeffizienten (HE-Methode) nach HÜLSBERGEN et al. (2000). Die Bewirtschaftungsweise und Standortparameter (Ackerzahl, Niederschlags-höhe) werden berücksichtigt. Es wird angenommen, dass der Kohlenstoff im Humus, der durch den Anbau einer humuszehrender Frucht, wie beispielsweise Mais, abgebaut wurde, als CO₂ in die Atmosphäre abgegeben wird und dort klimawirksam ist.

CO₂-Emissionen - Bau & Betrieb der Biogasanlage

Beim Bau (Rohstoffe, Maschinen, Kraftstoff) und beim Betrieb einer Biogasanlage (Eigenenergiebedarf, Kraftstoff, Methanverluste im Fermenter) entstehen klimarelevante Emissionen. Nach BMLEV (2007) verursacht eine Biogasanlage mit 500 kW elektrischer Leistung ohne Wärmenutzung Emissionen in Höhe von 0,108 kg CO_{2äq} pro erzeugter Kilowattstunde Strom. Demgegenüber wird eine Gutschrift von 0,010 kg CO_{2äq} kW_{el}⁻¹ durch vermiedene Emissionen durch die Abdeckung bei der Lagerung in Biogasanlagen angerechnet, so dass insgesamt ein Emissionsfaktor von 0,098 kg CO_{2äq} kW_{el}⁻¹ angewandt wurde.

Vermiedene CO₂-Emissionen – Substitution fossiler Energieträger

Zur Berechnung der vermiedenen CO₂-Emissionen wurde pro erzeugter Kilowattstunde Strom die durchschnittliche CO₂-Last des deutschen Strommixes von 0,627 kg CO_{2äq} kW_{el}⁻¹ in Anrechnung gebracht (BMLEV 2007).

CO₂-Bilanzierung

Aus der Gegenüberstellung der drei Bereiche Substratproduktion, Bau & Betrieb der Biogasanlage und Substitution ergibt sich dann der CO₂-Saldo für die Nutzung von Mais in Biogasanlagen zur Stromerzeugung. Ist der Saldo negativ, werden durch die Nutzung von Silomais zur Stromerzeugung in Biogasanlagen CO₂-Emissionen vermieden. Ist das Saldo positiv, entstehen zusätzliche CO₂-Emissionen, die das Klima belasten.

3.5 Versuchsanlage und Statistik

Die Erntetermin-, Bestandesdichte- und Düngeversuche waren als zweifaktorielle Spaltanlagen angelegt. Die Faktoren Sä-/Erntetermin, Bestandesdichte und Düngung waren in Großteilstücken und der Faktor Sorte in Kleinteilstücken angeordnet. Die Versuchsjahre wurden getrennt über die Orte gemittelt ausgewertet. Die Varianzanalysen erfolgten mit PLABSTAT (Plant Breeding Statistical Program, UTZ 2001), einem Programm zur statistischen Analyse von pflanzenzüchterischen Experimenten mit dem Befehl ANOVA für mehrfaktorielle Versuche. Die Parzellenwerte wurden mit dem Ausreißertest nach ANSCOMBE & TUKEY (1963) überprüft. Bei einer größeren Anzahl von fehlenden Werten (z.B. durch den Ausfall mehrerer Parzellenwerte) wurde zusätzlich das Statistikprogramm SAS mit der Prozedur Proc Mixed verwendet (SAS 1999). Hierdurch konnten Schätzwerte für die fehlenden Werte ermittelt werden. Zur Bestimmung der Grenzdifferenz zwischen den Mittelwerten kam der TUKEY-Test zur Anwendung. Die Korrelations- und Regressionsanalyse wurden in SAS mit den Befehlen Proc Corr und Proc Reg durchgeführt.

3.6 Merkmalerfassung

Während der Wachstumsdauer wurden die Unterschiede in der Jugendentwicklung, weibliche und männliche Blüte, Beulenbrand (*Ustilago maidis*), Befall mit Zünsler (*Ostrinia nubilalis*), Lager (liegende Pflanzen) und Anzahl von Nebentrieben erfasst. Kurz vor der jeweiligen Ernte wurden die Pflanzenhöhe ermittelt und die Pflanzenzahl je Reihe gezählt. Diese Daten dienten als Hintergrundinformation und wurden nicht weiter zur Auswertung herangezogen. Neben dem TS-Gehalt der Ganz- und Restpflanze und dem TS-Ertrag wurden die nachfolgend beschriebenen Parameter erfasst.

Qualitätsparameter (NIRS)

Die Inhaltsstoffe aller Prüfglieder wurden mithilfe der Nahinfrarot-Reflektions-Spektroskopie (NIRS) an der Landesanstalt für Landwirtschaft in Freising gemessen. Zur Aufzeichnung der spektroskopischen Daten wurde ein Gerät der Fa. Foss Instruments, Hamburg, Modell NIR Systems 5000 (NIRSystems, Silver Spring, MD, USA) eingesetzt. Zur Auswertung diente ein Statistikprogramm (WIN ISI II) der Fa. Infrasoftware International Inc. (Port Matilda, PA, USA). Es wurden die in Tab. 3.7 beschriebenen Parameter erfasst:

Tab. 3.7: 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 <i>et al.</i> (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)

Die Bestimmung der Inhaltsstoffe erfolgte mit der Kalibration des Deutschen Maiskomitees für Silomais-Ganzpflanzen, die zur routinemäßigen Qualitätsbewertung in den Silomaisprüfungen im bundesweiten NIRS-Netzwerk genutzt wird. Restpflanzenproben wurden mit einer Kalibration zur Bewertung der Restpflanzenqualität (KRÜTZFELDT, 2004) geschätzt.

Verdaulichkeit der Zellwand

Die Verdaulichkeit der Zellwand der Ganzpflanze wurde nach ARGILLIER *et al.* (1995a) sowohl auf Basis der enzymlösaren Verdaulichkeit (DINAG, % TS) als auch für die *in vitro*-Verdaulichkeit (DINIG, % TS) der organischen Substanz mit nachfolgenden Formeln berechnet.

$$\text{DINAG} = 100 \times \frac{\text{ELOS} - \text{Stärke} - \text{WLK}}{100 - \text{Stärke} - \text{WLK}}$$

$$\text{DINIG} = 100 \times \frac{\text{IVDOM} - \text{Stärke} - \text{WLK}}{100 - \text{Stärke} - \text{WLK}}$$

Analyse der Methanausbeute

Die Analyse der Methanausbeute (MA) erfolgte nach der Methode des Hohenheimer Biogasertragstests (HBT, HELFFRICH & OECHSNER, 2003) an der Landesanstalt für landwirtschaftliches Maschinen- und Bauwesen der Universität Hohenheim. Sie erfüllt die Anforderungen nach DIN 38414 zur Bestimmung des Faulverhaltens. Dazu wurden etwa 500 mg der auf 1 mm gemahlene Pflanzenproben in luftdichten Behältnissen für die Untersuchung bereitgestellt. Je Probe wurden drei Wiederholungen angesetzt. Bei einer Abweichung von mehr als 10 % in der Gasproduktion innerhalb der Wiederholungen wurde das Ergebnis verworfen und wiederholt. Nach Normierung der Umgebungstemperatur und des Luftdruckes wurde das Ergebnis in Normliter je kg organischer TS (NI (kg OTS)⁻¹) angegeben.

Methanertrag pro Hektar

Der Methanertrag (m³ ha⁻¹) wurde mit nachfolgender Formel aus der Methanausbeute (NI (kg OTS)⁻¹), der TS (dt ha⁻¹) und dem Anteil der organischen Substanz an der TS errechnet. Der Anteil der organischen Substanz an der TS wurde nach KIRCHGESSNER (1987) mit 95 % für alle Sorten gleich angenommen:

$$\text{MHE} = \text{MA} \times \text{TS} \times \frac{0,95}{1000}$$

4 Ergebnisse

4.1 Ernteterminversuche

Um den Einfluss des Erntetermins auf die Höhe der Methanausbeute bei Mais feststellen zu können, wurden in den Jahren 2003 bis 2006 Versuche mit Silomaisorten unterschiedlicher Reife und Herkunft und gestaffelten Ernteterminen an verschiedenen Orten durchgeführt. Die Reifezahlen reichten dabei von FAO 250 bis FAO 800. Als Vergleichssorte diente in allen Versuchen die Silomaisorte *Gavott* (FAO 250). Um ein breites Qualitätsspektrum zu erhalten, wurden vier Erntetermine in etwa dreiwöchigen Abständen festgelegt, beginnend mit einer sehr frühen Ernte Ende August. Die letzte Ernte war Ende Oktober/Anfang November. Am Standort Ismaning wurden fünf Ernten und in Freising wurden zusätzlich noch zwei Saattermine durchgeführt (siehe auch im Anhang Tab. 9.2). Zur Darstellung der agronomischen Merkmale TS-Gehalt und TS-Ertrag wurden alle durchgeführten Ernteterminversuche herangezogen. Methanausbeuten liegen für die Versuche in Freising 2003, Ingolstadt 2004, Ismaning 2004 und Grucking 2006 vor. Dementsprechend werden für diese Versuche die Inhaltsstoff- und Qualitätsparameter und die Methanhektarerträge dargestellt.

4.1.1 Schwankungsbreite der untersuchten Parameter

Mit den Versuchen wurde eine größtmögliche Differenzierung der zu untersuchenden Parameter angestrebt und wie die Ergebnisse zeigen erreicht, um mögliche Korrelationen mit den Zielgrößen Methanausbeute und Methanertrag zu erfassen. Die gemessene Schwankungsbreite der untersuchten Parameter und die zugehörigen statistischen Maßzahlen sind in Tab. 4.1; die Einzelergebnisse der verschiedenen Sorten an den unterschiedlichen Orten und Jahren sind im Anhang in den Tab. 9.3 bis 9.7 dargestellt.

Die Versuche deckten einen TS-Bereich von etwa 14 bis 50 % in der Ganzpflanze und 15 bis 42 % in der Restpflanze ab. Der Stärkegehalt variierte in einem weiten Bereich von 0 bis 41 %. Der Gehalt an wasserlöslichen Kohlenhydraten (Zucker) in der Ganzpflanze lag zwischen 0 und 22 %, in der Restpflanze zwischen 5 und 29 %. Beim RP-Gehalt konnte ein Bereich von 4 bis 12 % der TS gemessen werden.

Die faserigen Bestandteile von Mais – ADF und NDF - schwankten von 25 bis 40 % der TS. Der Fasergehalt der Restpflanze (NDF-R) erzielte durch die unterschiedlichen Erntetermine Gehalte von 48 bis 78 % der TS.

Auch für die Verdaulichkeitsparameter konnte ein weites Spektrum abgedeckt werden. Die

Parameter der Ganzpflanze (ELOS und IVDOM) sowie die Parameter der Zellwandverdaulichkeit (DINAG und DINIG) lagen zwischen ca. 30 und 80 % der TS. Mit 37 bis 80 % der TS erzielten die Verdaulichkeitsparameter der Restpflanze (IVDOM-R, D NDF-R) ähnliche Werte wie die der Ganzpflanze.

Demgegenüber war die Variation der Gasausbeute mit 10 bis 20 % um den Mittelwert gering. Die Werte lagen in einem Bereich von 287 NI (kg OTS)⁻¹ bis 384 NI (kg OTS)⁻¹.

Bei den TS-Erträgen hingegen wurden Unterschiede von 50 % über und unter dem Mittelwert ermittelt. Sie lagen zwischen ca. 100 dt ha⁻¹ und 288 dt ha⁻¹. Für die Hektarerträge ergab sich ein Schwankungsbereich von 2.900 bis knapp 10.000 m³ Methan.

Tab. 4.1: Ergebnisse der Ernteterminversuche (2003 - 2006)

Merkmal	Einheit	Anzahl Proben	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum	
TS-G	% FM	275	31,0	8,0	13,7	50,0	
TS-R		235	26,6	5,6	14,6	41,6	
Stärke	% TS	354	23,6	11,6	0,0	41,3	
WLK		332	9,5	4,8	0,0	21,6	
RP		354	8,0	1,2	3,8	12,2	
ADF		354	23,7	5,0	15,1	43,6	
NDF		354	44,8	6,9	32,3	70,7	
WLK-R		233	15,8	4,6	4,7	28,6	
NDF-R		233	61,8	5,4	47,9	77,8	
ELOS		354	66,9	6,2	40,9	77,6	
IVDOM		354	72,8	5,0	53,9	81,4	
DINAG		332	51,1	3,7	33,4	59,8	
DINIG		332	60,6	4,6	41,7	71,6	
IVDOM-R		233	68,8	4,6	53,6	80,0	
DNDF-R		233	53,8	5,5	37,3	72,3	
MA		NI (kg OTS) ⁻¹	226	332,0	13,7	287,0	384,2
TS-Ertrag		dt ha ⁻¹	273	189,2	38,6	102,5	288,4
MHE	m ³ ha ⁻¹	195	5.883	1.486	2.930	9.935	

4.1.2 Einfluss des Reifetyps auf die Methanausbeute

Die untersuchten Reifetypen FAO 250 bis FAO 800 ließen sich anhand der Zellinhaltsstoffe, der Zellwandbestandteile und der Verdaulichkeitsparameter voneinander unterscheiden. Die Unterschiede in den untersuchten Merkmalen waren signifikant. Die Unterschiede zwischen den Reifetypen blieben auch in Abhängigkeit vom Erntetermin bestehen, so dass zur Übersicht die Mittelwerte der Erntetermine gewählt wurden (Tab. 4.2). Die Einzelwerte in Abhängigkeit vom Erntetermin sind in den Tab. 9.3 bis Tab. 9.7 aufgeführt.

Stärke

Die späten Sorten (FAO > 250) erzielten niedrigere Stärkegehalte als die Vergleichssorte (*Gavott*). Während die Vergleichssorte im Schnitt über ca. 30 % Stärke aufwies, blieben die späten Sorten zum Teil deutlich unter diesem Wert (Tab. 4.2). Den niedrigsten Stärkegehalt von nur 6,6 % der TS hatte die Sorte *Doge* (FAO 700, Ismaning 2004), den höchsten die Sorte Hybride 13 (FAO 400, Freising 2003 Saat April) mit ca. 30 % der TS.

Wasserlösliche Kohlenhydrate

Alle späten Sorten (FAO > 250) wiesen signifikant höhere Gehalte an wasserlöslichen Kohlenhydraten in der Ganzpflanze auf, während die Vergleichssorte (*Gavott*) immer unterhalb des Mittelwertes lag. Mit Ausnahme von Grucking waren auch die Gehalte an wasserlöslichen Kohlenhydraten in der Restpflanze höher als in der Vergleichssorte. In Grucking hingegen wiesen die späten Sorten geringere Gehalte auf (Tab. 4.2).

Tab. 4.2: Inhaltsstoffe unterschiedlicher Genotypen (2003 - 2006, Mittel der Erntetermine)

FAO	Sorte	Stärke	WLK	RP	ADF	NDF	WLK-R	NDF-R
% TS								
Freising 2003, Saat April								
250	Gavott	35,7 a [†]	5,7 b	8,3 a	18,6 c	39,0 d	12,6 b	64,9 a
280	KXA3191	29,3 b	7,9 a	7,0 bc	21,0 b	42,1 b	14,9 a	63,4 b
400	Hybride13	30,0 c	8,6 a	7,1 c	20,5 b	40,6 c	12,4 b	64,7 b
800	Hybride89	23,2 d	8,7 a	7,0 c	24,5 a	45,5 a	13,5 ab	62,0 c
Freising 2003, Saat Mai								
250	Gavott	33,3 a	8,6 b	8,0 b	19,0 c	38,9 d	14,8 b	61,4 a
280	KXA3191	28,9 b	8,9 b	7,7 c	20,5 b	41,3 c	17,1 a	61,0 a
400	Hybride13	27,0 b	9,6 a	8,1 b	20,4 b	42,2 b	18,0 a	56,8 b
800	Hybride89	16,7 c	8,7 b	8,8 a	25,2 a	50,5 a	17,8 a	57,6 b
Ingolstadt 2004								
250	Gavott	29,1 a	5,4 c	8,4 a	20,5 c	41,4 c	14,4 c	64,6 a
400	KX2386	23,6 b	10,9 b	7,5 b	21,0 c	40,9 c	22,4 a	55,9 b
600	KXA4566	7,7 d	13,8 a	8,2 a	26,4 a	50,4 a	20,9 ab	55,6 b
600	Mikado	12,7 c	14,4 a	8,1 a	24,2 b	47,7 b	19,9 b	55,7 b
Ismaning 2004								
250	Gavott	31,0 a	6,9 d	7,1 bc	21,9 e	38,1 f	n.b. ^{††}	n.b.
280	KXA 4171	25,0 b	8,6 c	7,5 b	24,7 d	42,2 d	n.b.	n.b.
280	Vitalina	24,3 bc	9,4 c	7,0 c	24,1 d	42,2 d	n.b.	n.b.
400	KX2385	25,2 b	9,6 c	7,1 bc	23,6 d	40,8 e	n.b.	n.b.
400	Vic	23,4 c	8,8 c	7,1 bc	26,1 c	43,6 c	n.b.	n.b.
600	Mikado	12,9 d	13,3 b	7,5 b	27,9 b	48,1 b	n.b.	n.b.
600	Kermes	11,4 e	13,0 b	8,5 a	28,4 ab	49,3 b	n.b.	n.b.
700	Doge	6,6 f	14,4 a	8,2 a	29,6 a	51,5 a	n.b.	n.b.
Grucking 2006								
250	Gavott	29,2 a	8,2 d	8,7 b	21,8 d	43,2 d	17,0 a	63,3 b
250	KXA6231b	23,6 b	10,1 b	9,1 a	23,6 c	46,3 c	16,5 a	62,4 b
250	KXA6231br	28,2 a	9,6 c	9,3 a	20,6 d	43,9 d	13,8 b	63,7 b
400	KXA5243	19,6 c	9,2 c	7,7 d	29,4 b	51,5 b	12,6 b	68,8 a
600	Mikado	12,3 d	12,3 a	8,0 cd	30,9 a	53,9 a	13,9 b	67,2 a

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

^{††} nicht bestimmt

Rohprotein

Die Reifetypen unterschieden sich im RP-Gehalt signifikant. Es konnte keine Abhängigkeit vom Reifetyp und Wahl des Erntetermins festgestellt werden. Späte Sorten erzielten dasselbe Spektrum wie die Vergleichssorte (Abb. 4.1).

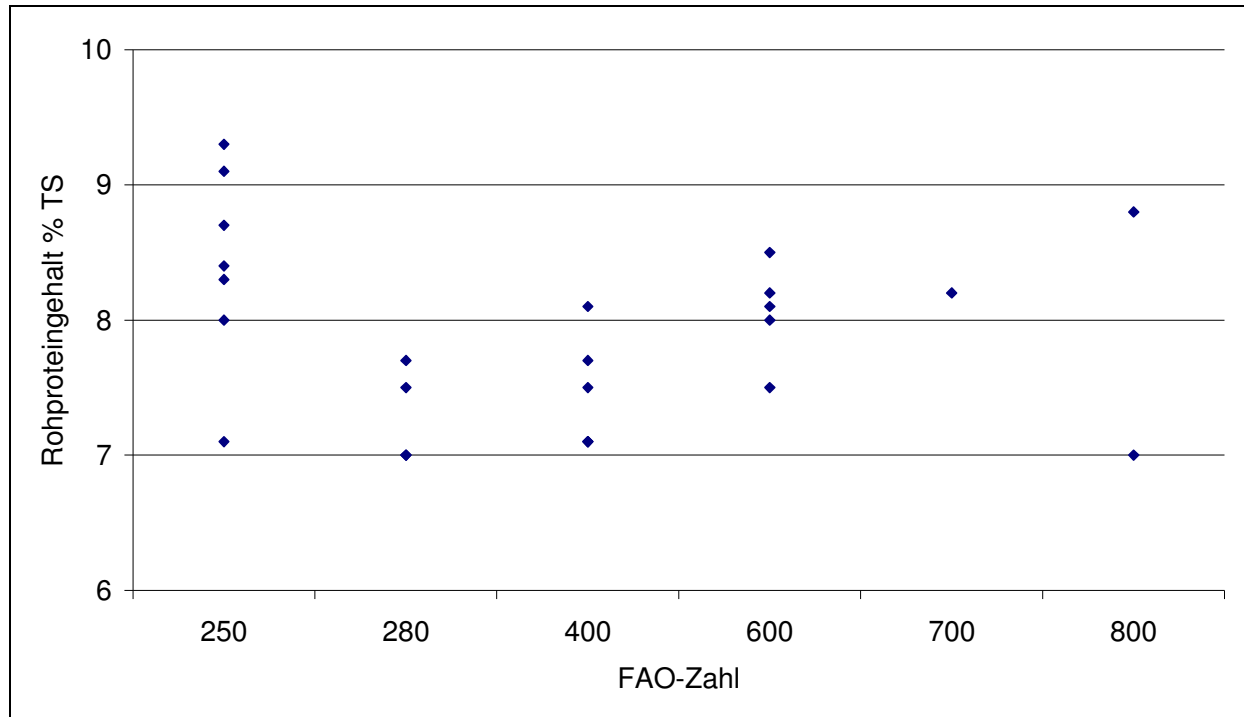


Abb. 4.1: Einfluss des Reifetyps auf den RP-Gehalt (2003-2006, Mittel der Erntetermine, Jahre und Orte).

ADF- und NDF-Gehalt der Ganz- und Restpflanze

Die späten Sorten zeigten gegenüber der Vergleichssorte deutliche Unterschiede im ADF- und NDF-Gehalt der Ganzpflanze. Sie wiesen immer höhere ADF-Gehalte auf. Sie lagen bei den späten Sorten zwischen 20 und 31 % der TS, bei der Vergleichssorte nur zwischen 18 und 22 % (Tab. 4.2). Ähnlich stellten sich die Zusammenhänge beim NDF-Gehalt dar. Die späten Sorten erreichten NDF-Gehalte zwischen 40 und 54 %, demgegenüber wurden bei der Vergleichssorte *Gavott* Gehalte zwischen 38 und 43 % gemessen.

Der Fasergehalt der Restpflanze (NDF-R) war bei den späten Sorten dagegen niedriger als bei der Vergleichssorte *Gavott* (Ausnahme Grucking, Tab. 4.2). Er lag bei der Vergleichssorte zwischen 61 und 65 % der TS und bei den späten Sorten zwischen 55 und 63 %. In Grucking war der Fasergehalt der Restpflanze bei den späten Sorten (FAO 400 und 600) höher als bei der Vergleichssorte *Gavott*.

Für die Parameter ADF, NDF und NDF-R (Ausnahme Grucking) zeigte sich eine deutliche Beziehung zum Reifetyp. Sorten mit hohen FAO-Zahlen (600) zeigten die höchsten ADF-

und NDF-Gehalte in der Ganzpflanze, und umgekehrt in der Restpflanze die niedrigsten Gehalte (Tab. 4.2).

Verdaulichkeitsparameter der Ganz- und Restpflanze

Die späten Sorten zeigten hinsichtlich des Verdaulichkeitsparameter ELOS und IVDOM nahezu immer niedrigere Werte als die Vergleichssorte *Gavott*. Es gab einen klaren Zusammenhang zwischen Reifetyp und Höhe von ELOS und IVDOM. Je höher die FAO-Zahl, um so niedriger waren die Verdaulichkeitsparameter (Tab. 4.3).

Ähnliche Zusammenhänge wurden auch für die enzymlösliche Verdaulichkeit der Zellwand (DINAG) gefunden. Die späten Sorten wiesen tendenziell immer niedrigere Werte auf. Signifikante Unterschiede traten ab FAO > 400 auf. Dagegen reagierten die späten Sorten bei der *in-vitro*-Verdaulichkeit der Zellwand (DINIG) mit höheren Verdaulichkeiten als die Vergleichssorte *Gavott* (Ausnahme Hybride 89).

Bei der Verdaulichkeit der Restpflanzenfaser (IVDOM-R) und der Restpflanzenzellwand (DNDF-R) waren die späten Sorten der Vergleichssorte überlegen. Mit Ausnahme von Grucking erzielten die späten Sorten immer höhere Verdaulichkeiten der Restpflanze. In Grucking dagegen zeigten die späten Sorten eine schlechtere Restpflanzenverdaulichkeit als die Vergleichssorte. Die Zellwandverdaulichkeit der Restpflanze (DNDF-R) war bei den späten Sorten ausnahmslos höher als bei *Gavott*.

Tab. 4.3: Verdaulichkeitsparameter und Methanausbeute unterschiedlicher Genotypen (2003 - 2006, Mittel der Erntetermine)

FAO	Sorte	ELOS	IVDOM	DINAG	DINIG	IVDOM-R	D-NDF-R	Methan
		% TS						Methan
								NI (kg OTS) ⁻¹
Freising 2003, Saat April								
250	Gavott	72,8 a [†]	76,6 a	53,6 a	60,1 a	62,5 c	45,6 c	334,9 a
280	KXA3191	70,0 c	75,2 b	52,2 a	60,6 a	67,3 b	52,4 b	337,1 a
400	Hybride13	71,1 b	76,5 a	52,9 a	61,7 a	69,2 a	57,3 a	324,0 b
800	Hybride89	65,8 d	71,2 c	49,8 b	57,7 b	68,2 ab	53,8 b	324,9 n.b. ^{††}
Freising 2003, Saat Mai								
250	Gavott	72,2 a	77,2 a	52,3 a	60,8 b	66,6 c	49,8 c	332,3 a
280	KXA3191	70,5 bc	76,2 b	52,6 a	61,9 ab	68,7 b	53,1 b	334,8 a
400	Hybride13	70,3 bc	76,3 b	53,2 a	62,8 a	73,6 d	58,1 a	327,2 n.b.
800	Hybride89	63,1 d	67,0 c	50,8 b	56,1 c	70,1 a	53,6 b	310,1 n.b.
Ingolstadt 2004								
250	Gavott	69,7 a	73,0 b	53,8 a	58,8 c	65,1 c	49,9 c	336,3 a
400	KX2386	69,8 a	75,2 a	53,9 a	62,0 a	72,0 b	53,5 b	335,3 ab
600	KXA4566	62,2 c	69,3 d	51,8 b	61,0 b	72,1 b	54,1 b	331,1 b
600	Mikado	64,9 b	71,8 c	51,8 b	61,3 ab	74,2 a	57,4 a	321,2 n.b.
Ismaning 2004								
250	Gavott	70,8 a	75,3 b	52,9 a	60,2 e	n.b.	n.b.	327,9 bc
280	KXA 4171	67,5 b	74,4 bcd	51,7 a	61,4 d	n.b.	n.b.	330,1 bc
280	Vitalina	67,7 b	74,9 bc	51,5 a	61,9 d	n.b.	n.b.	331,6 ab
400	KX2385	68,7 b	76,6 a	52,3 a	63,8 c	n.b.	n.b.	336,0 a
400	Vic	66,1 c	73,2 d	50,1 b	60,1 e	n.b.	n.b.	337,0 a
600	Mikado	62,9 d	74,0 c	49,8 b	64,7 cb	n.b.	n.b.	324,0 c
600	Kermes	62,2 d	73,6 d	50,1 b	65,1 b	n.b.	n.b.	333,4 ab
700	Doge	59,9 e	73,1 d	49,3 b	66,3 a	n.b.	n.b.	336,4 a
Grucking 2006								
250	Gavott	68,3 b	71,5 b	49,8 b	55,0 b	68,0 b	53,2 b	336,0 ab
250	KXA6231b	65,7 c	71,4 b	48,7 b	57,1 a	69,3 b	55,1 b	338,3 a
250	KXA6231br	70,0 a	78,4 a	52,0 a	65,1 c	74,3 a	65,5 a	329,4 c
400	KXA5243	60,0 d	67,7 c	44,5 c	54,8 b	65,6 c	53,6 b	331,3 bc
600	Mikado	58,1 e	68,3 c	44,8 c	58,1 a	66,9 c	54,9 b	333,0 ab

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

^{††} nicht bestimmt

Methanausbeute

In den Abb. 4.2 bis 4.6 ist die Methanausbeute in Abhängigkeit vom Reifetyp und Erntetermin für die Versuchsstandorte dargestellt. Am Versuchsstandort Freising zeigten die Sorten an beiden Saatterminen keine Wechselwirkungen mit dem Erntetermin (siehe Anhang Tab. 9.9, Abb. 4.2 und 4.3). Bei der Variante mit der längeren Wachstumsdauer (Saattermin April) stieg die Methanausbeute zum Erntetermin II an und fiel dann wieder ab. Bei der Variante mit einer kürzeren Wachstumsdauer (Saattermin Mai) blieb die Methanausbeute in Abhängigkeit des Erntetermins unverändert. An den anderen Standorten zeigten die Sorten Wechselwirkungen mit dem Erntetermin (Anhang Tab. 9.9), gleichwohl sie wenig relevant waren (vergl. Abb. 4.3. bis 4.6):

- In Ingolstadt stieg die Methanausbeute bei den späten Sorten vom Erntetermin I auf II tendenziell an, während sie bei der Vergleichssorte sank. Danach blieben die Methanausbeuten konstant (Abb. 4.4).
- Am Standort Ismaning reagierten die Sorten sehr unterschiedlich (Abb. 4.5). Die Methanausbeute stieg und sank je nach Sorte vom Erntetermin I auf II. Danach wurden die Schwankungen in der Gasausbeute geringer. Die Methanausbeute blieb dann bis zum Erntetermin V nahezu konstant. Einen Zusammenhang mit dem Reifetyp ließ sich nicht erkennen. Sowohl die Methanausbeute der Vergleichssorte wie auch der späten Sorten stieg und fiel in Abhängigkeit vom Erntetermin unterschiedlich.
- Auch in Grucking kam es zu Auf- und Abwärtsbewegungen in den Gasausbeuten (Abb. 4.6). Die späten Sorten zeigten einen Anstieg der Methanausbeute zum Erntetermin II. Die früheren Sorten (*Gavott* und *KXA 6231* und *KXA 6231br*) reagierten kaum auf den Erntetermin. Auffallend war allerdings die (mit Abstand) hohe Methanausbeute beim Erntetermin IV der Sorte *KXA 6231*.

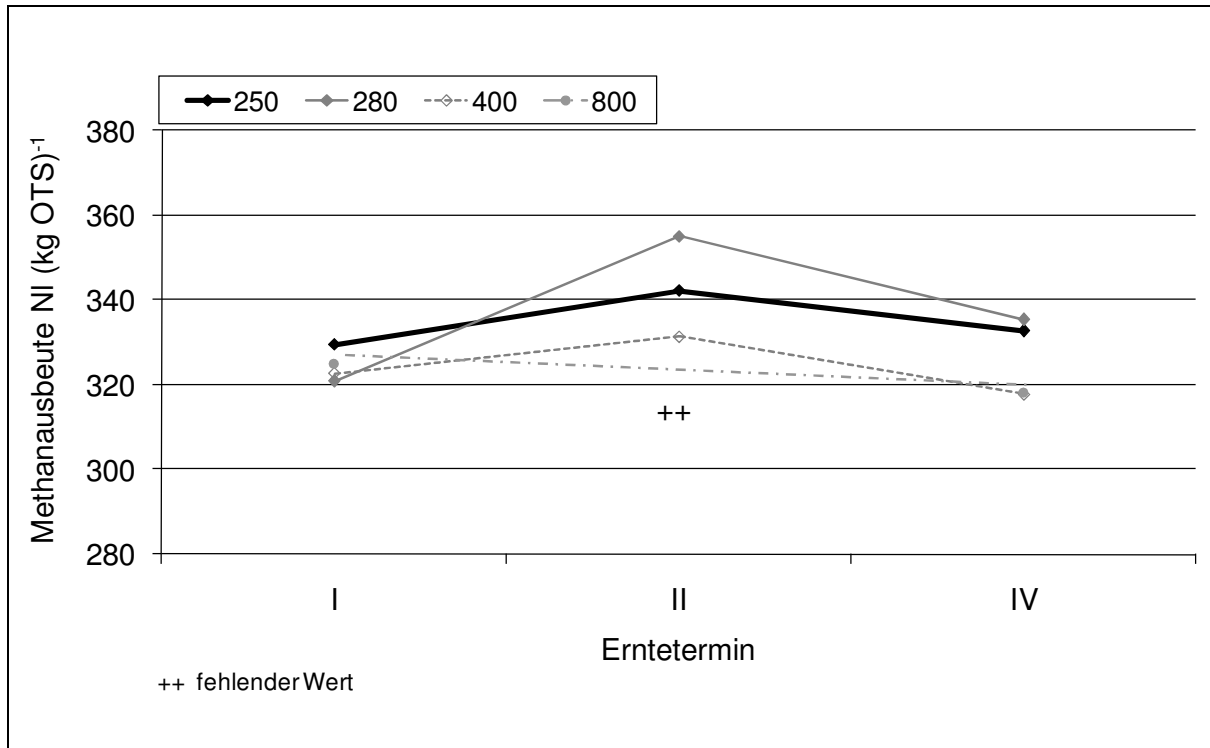


Abb. 4.2: Einfluss des Erntetermins auf die Methanausbeute (NI (kg OTS)⁻¹) unterschiedlicher Reifetypen (FAO 250 - 800), (Freising 2003, Saat April).

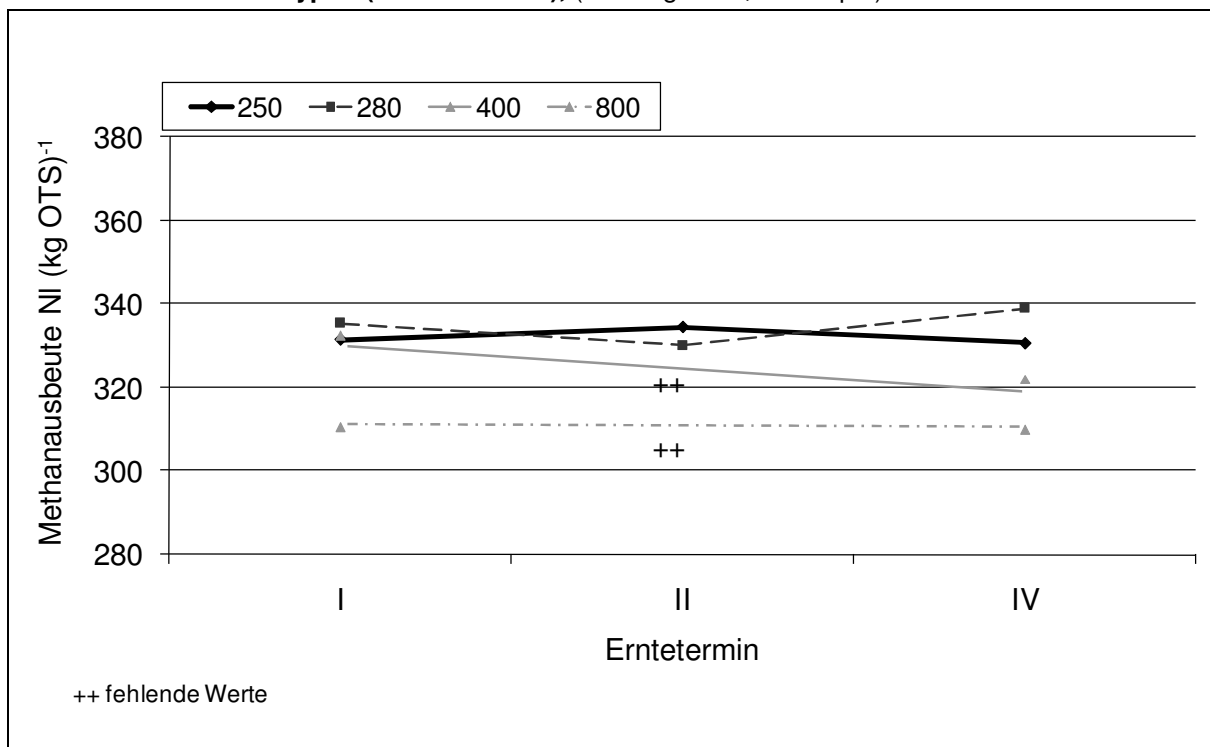


Abb. 4.3: Einfluss des Erntetermins auf die Methanausbeute (NI (kg OTS)⁻¹) unterschiedlicher Reifetypen (FAO 250 - 800), (Freising 2003, Saat Mai).

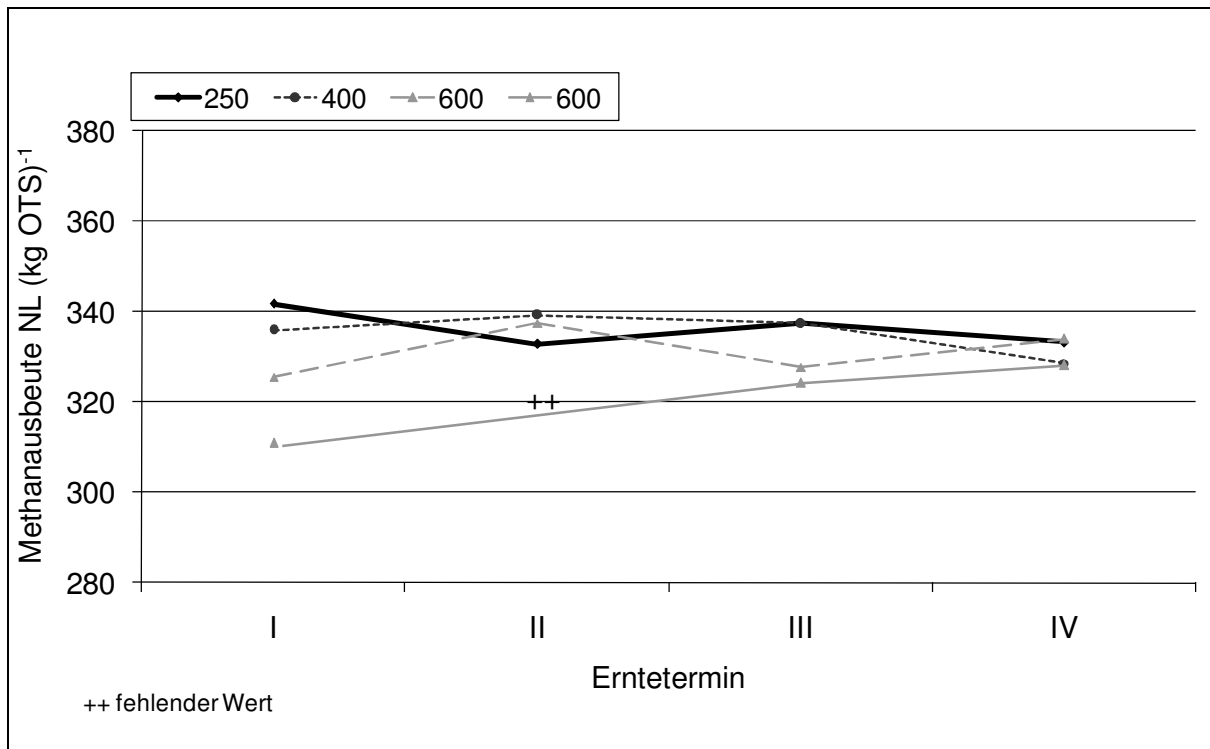


Abb. 4.4: Einfluss des Erntetermins auf die Methanausbeute (NI (kg OTS)⁻¹) unterschiedlicher Reifetypen (FAO 250 - 600), (Ingolstadt 2004).

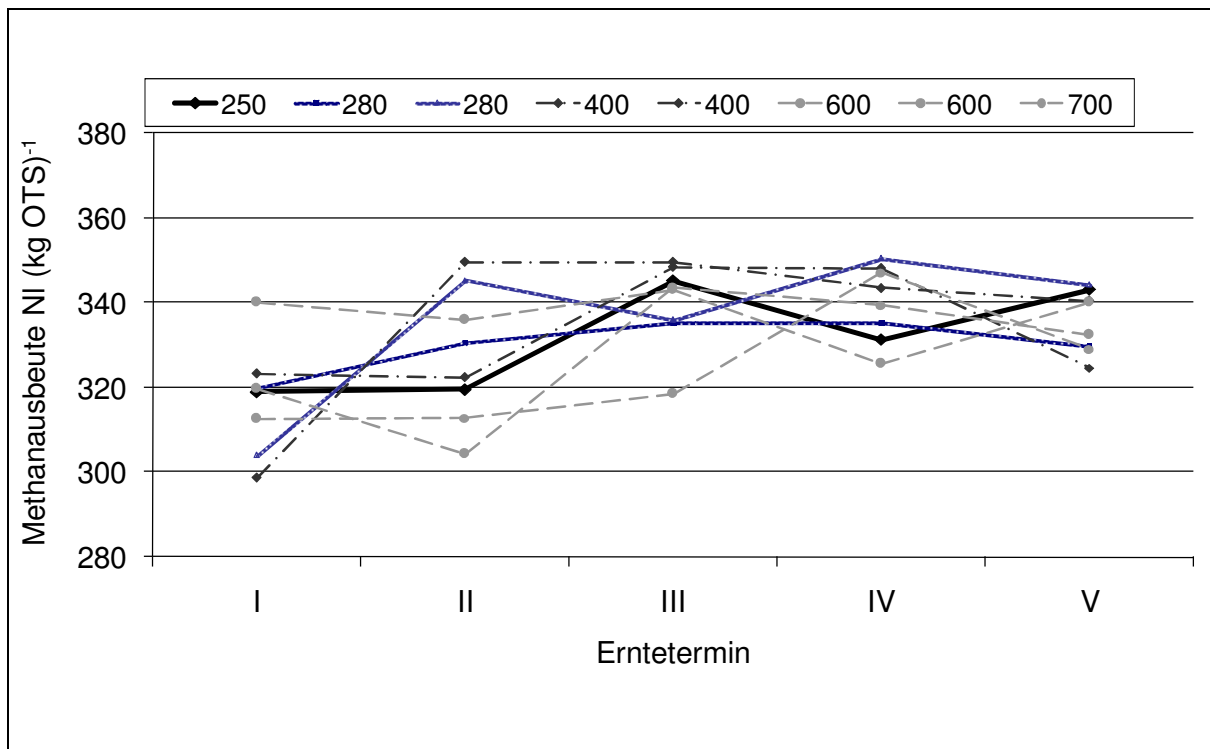


Abb. 4.5: Einfluss des Erntetermins auf die Methanausbeute (NI (kg OTS)⁻¹) unterschiedlicher Reifetypen (FAO 250 - 700), (Ismaning 2004).

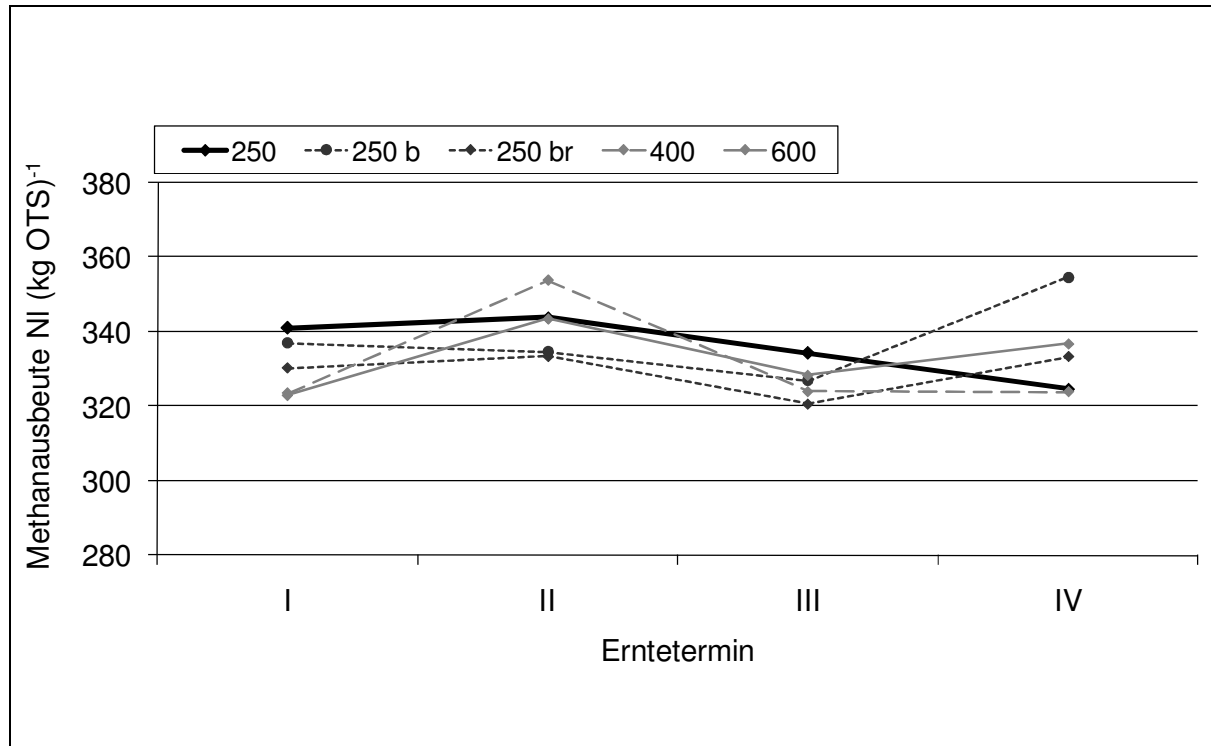


Abb. 4.6: Einfluss des Erntetermins auf die Methanausbeute (NI (kg OTS)⁻¹) unterschiedlicher Reifetypen (FAO 250 - 600), (Grucking 2006).

In Tab. 4.4 wurden die Methanausbeuten der Sorten in Abhängigkeit vom Erntetermin und der FAO-Zahl über die Orte gemittelt. Die Zahlen in Klammer zeigen die Anzahl der Werte, die sich hinter dem gemittelten Wert verbergen. Dementsprechend hat das Ergebnis für den Reifebereich 700 nur eine eingeschränkte Aussagekraft, da aus diesem Reifebereich nur einmal geprüft wurde.

Im Versuchsmittel wurde eine Methanausbeute in Höhe von ca. 330 NI (kg OTS)⁻¹ erreicht. Sorten mit einer FAO-Zahl < 400 lagen über diesem Mittel, Sorten mit einer FAO-Zahl von 700 bis 800 lagen darunter. Sorten mit der FAO-Zahl 600 trafen das Mittel. Tendenziell nahm die Methanausbeute mit zunehmender FAO-Zahl der Sorte ab. Allerdings waren die Unterschiede von FAO 250 bis 800 mit ca. 21 NI (kg OTS)⁻¹ gering. Bis FAO 700 waren die Unterschiede mit ca. 10 NI (kg OTS)⁻¹ wenig relevant. Erst ab FAO 800 ließ sich ein etwas größerer Unterschied von 20 NI (kg OTS)⁻¹ zur Vergleichssorte (FAO 250) feststellen.

Die Unterschiede zwischen den Ernteterminen waren ebenso gering. Im Mittel über die Sorten stiegen die Methanausbeuten vom Erntetermin I auf Erntetermin III an, sanken zum Erntetermin IV und stiegen zum Erntetermin V. Der größte Unterschied war zwischen Erntetermin I und II mit 10 NI (kg OTS)⁻¹ zu verzeichnen.

Beim Erntetermin I lieferte die Vergleichssorte die höchste Methanausbeute von ca. 333 NI (kg OTS)⁻¹, während die anderen Sorten mit ca. 320 NI (kg OTS)⁻¹ darunter lagen. Zum Erntetermin II wiesen die späten Sorten zum Teil höhere Methanausbeute als die Vergleichssorte auf. Die Unterschiede waren allerdings gering (< 3 %). Auffallend niedrig in der Methanausbeute lag die Sorte mit der FAO-Zahl 700. Beim Erntetermin III, IV und V waren die Unterschiede zur Vergleichssorte mit maximal 3 % ebenso nicht relevant. Nur die extrem späte Sorte FAO 800 zeigte zum Erntetermin IV eine niedrigere Methanausbeute (ca. 10 %) die sich allerdings vom Erntetermin I nicht unterschied.

Tab. 4.4: Methanausbeute (NI (kg OTS)⁻¹) in Abhängigkeit von Erntetermin und Reifetyp, (2003-2006, Mittel der Erntetermine, Jahre und Orte)

FAO	Erntetermin					Mittel
	I	II	III	IV	V	
250 [†]	332,5 (5) ^{††}	334,6 (5)	339,0 (3)	330,6 (5)	343,1 (1)	336,0
280	320,0 (4)	340,3 (4)	335,6 (2)	340,1 (4)	337,0 (2)	334,6
400	322,8 (6)	339,3 (5)	339,9 (4)	330,7 (6)	332,5 (2)	333,0
600	322,4 (5)	332,5 (4)	328,4 (5)	334,3 (5)	334,6 (2)	330,4
700	319,8 (1)	304,3 (1)	343,5 (1)	339,5 (1)	332,5 (1)	327,9
800	317,6 (2)			313,9 (2)		315,8
Mittel	322,5	330,2	337,3	331,5	335,9	329,6

[†]Vergleichssorte *Gavott*

^{††} Zahl in Klammer: Anzahl Einzelwerte

Insgesamt lässt sich festhalten, dass ein Unterschied zwischen den Sorten in Abhängigkeit vom Erntetermin zwar messbar, aber nicht relevant war. Die sortenspezifischen Qualitäts- und Inhaltsstoffmerkmale führten nicht zu einer großen Differenzierung der Methanausbeute. Tendenziell ließ sich eine leichte Abnahme der Methanausbeute mit der FAO-Zahl einer Sorte feststellen, die mit 15 bis 30 NI (kg OTS)⁻¹ bei extrem späten Sorten (700, 800) am stärksten ausgeprägt war. Wechselwirkungen zwischen Sorte und Erntetermin waren nicht durchgängig feststellbar und in der Höhe wenig relevant.

4.1.3 Einfluss des Erntetermins auf die Methanausbeute

Da die Wechselwirkung zwischen Sorte und Erntetermin nicht relevant war, wurden zur Darstellung des Erntetermininflusses die Sorten gemittelt. Abb. 4.7 zeigt die Methanausbeuten der einzelnen Versuchsorte (Mittelwerte über die Sorten) in Abhängigkeit vom Erntetermin.

Die Methanausbeuten lagen je nach Versuchsort zwischen 317 und 347 NI (kg OTS)⁻¹ (Tab. 4.5). Der niedrigste Wert von ca. 317 NI (kg OTS)⁻¹ wurde zum Erntetermin I am Standort Ismaning ermittelt, der höchste Wert von ca. 347 NI (kg OTS)⁻¹ in Ingolstadt zum Erntetermin II. Die Unterschiede zwischen den Ernteterminen waren gering. In Freising (Saat April), Ingolstadt und Grucking war der Unterschied zwischen den Ernteterminen ca. 15 NI (kg OTS)⁻¹, in Ismaning ca. 23 NI (kg OTS)⁻¹ und beim Versuch in Freising (Saat Mai) nur ca. 7 NI (kg OTS)⁻¹.

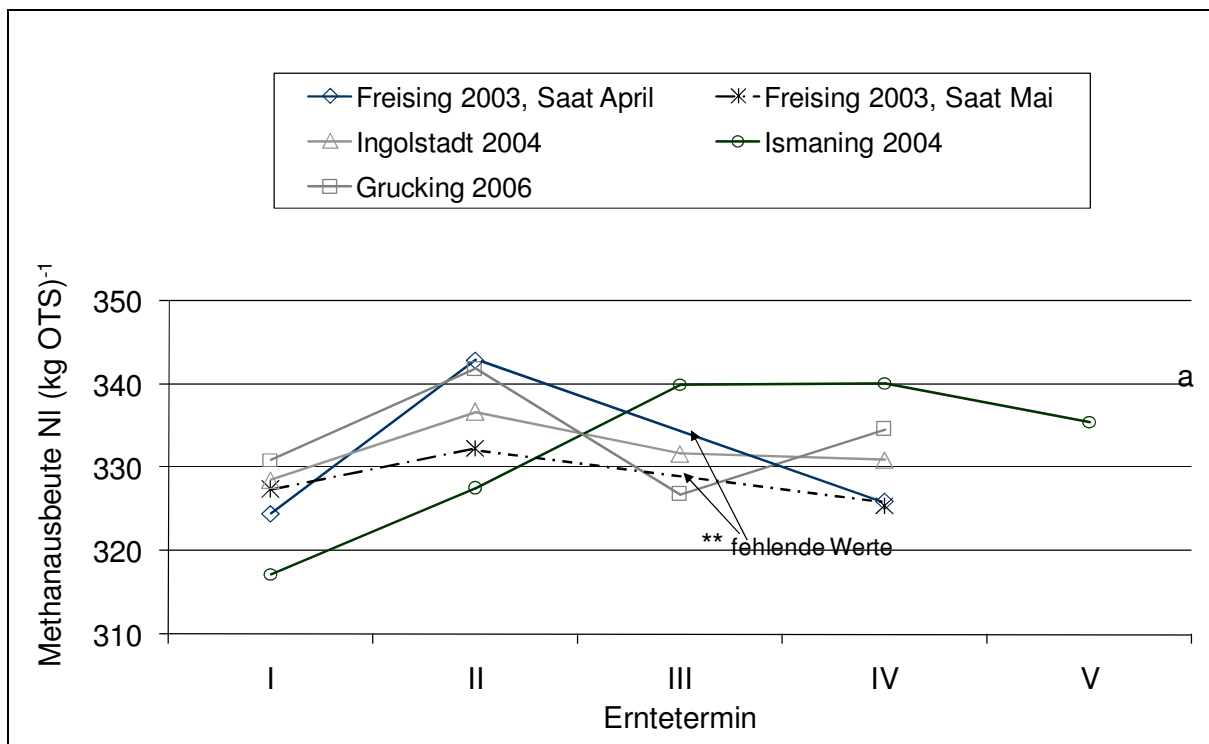


Abb. 4.7: Einfluss des Erntetermins auf die Methanausbeute (2003-2006, Mittel der Sorten).

Alle Versuchsorte zeigten einen Anstieg der Methanausbeute vom Erntetermin I auf II. Die Höhe des Anstiegs war unterschiedlich. In Freising (Saat Mai) und Ingolstadt war der Anstieg der Methanausbeute mit 5 bzw. 8 NI (kg OTS)⁻¹ gering. In Ismaning und Grucking stieg sie um ca. 10 NI (kg OTS)⁻¹. In Freising 2003 (Saat April) erhöhte sich die Methanausbeute um knapp 20 NI (kg OTS)⁻¹ am stärksten.

Nach dem Erntetermin II kam es mit zunehmender Wachstumsdauer zu einem Rückgang (Ausnahme Ismaning) in der Methanausbeute. Dieser war in seiner Ausprägung ungefähr genauso hoch wie der Anstieg zum Erntetermin II. Am Standort Ismaning allerdings stieg die Methanausbeute zum Erntetermin III noch mal um ca. 10 NI (kg OTS)⁻¹.

Zum Erntetermin IV blieben die Methanausbeuten auf dem Niveau, das sie bereits zum Erntetermin III erzielt hatten. Auch der sehr späte Erntetermin V in Ismaning hatte nur geringen Einfluss auf die Höhe der Methanausbeute. Sie nahm um ca. 5 NI (kg OTS)⁻¹ ab.

Die sehr frühe Ernte des Mais (Erntetermin I) führte nur am Standort Ismaning zu einer signifikant niedrigeren Methanausbeute von ca. 317 NI (kg OTS)⁻¹. An den anderen Orten waren die Unterschiede in den Methanausbeuten zwischen Erntetermin I und III bzw. IV nicht signifikant.

Tab. 4.5: Methanausbeute (NI (kg OTS)⁻¹) in Abhängigkeit vom Erntetermin (2003-2006, Mittel der Sorten)

Erntetermin	Freising 2003 Saat April	Freising 2003 Saat Mai	Ingolstadt 2004	Ismaning 2004	Grucking 2006	Mittel
I	324,5 a [†]	327,4 a	328,5 b	317,2 d	330,9 bc	325,7
II	342,9 n.b. ^{††}	332,3 n.b.	336,7 a	327,6 c	341,9 a	337,4
III	n.b.	n.b.	331,7 b	339,9 ab	326,8 c	329,9
IV	325,9 a	325,4 a	331,0 b	340,1 a	334,6 b	335,2
V	n.b.	n.b.	n.b.	335,5 b	n.b.	335,5

[†] verschiedene Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede bei $P < 0,05$.

^{††} nicht bestimmt

4.1.4 Einfluss der Inhaltsstoffe und Verdaulichkeitsparameter auf die Methanausbeute

Stärke

In Abb. 4.8 ist der Zusammenhang zwischen Stärkegehalt und Methanausbeute dargestellt. Es wurden alle Einzelwerte (Erntetermin, Sorte, Orte, Jahr) abgebildet. Die Darstellung zeigt deutlich, dass der Stärkegehalt die Höhe der Methanausbeute nicht beeinflusst ($r = 0,3$, siehe auch Anhang Tab. 9.8 und Tab. 9.9). Obwohl das Merkmal Stärke in einem großen Wertebereich von 0 bis ca. 40 % der TS erfasst werden konnte (Tab. 4.1), schwankten die Methanausbeuten nur um ca. 10 % vom Mittelwert.

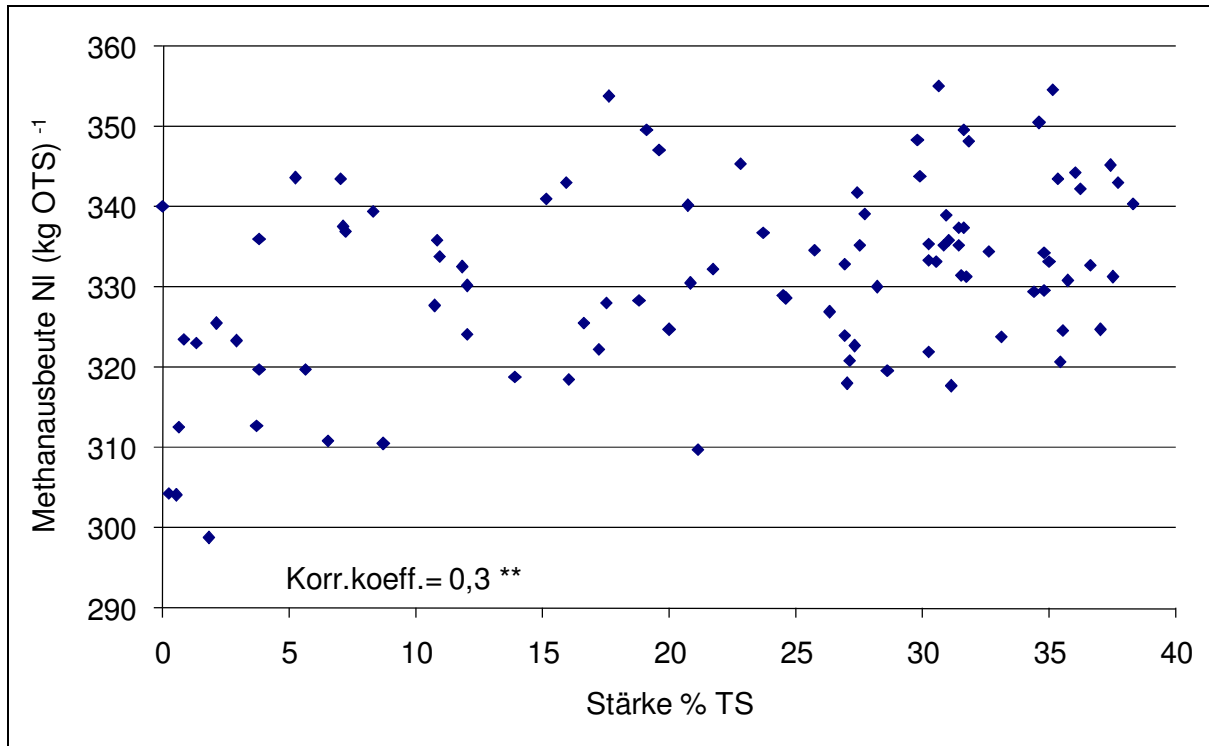


Abb. 4.8: Einfluss des Stärkegehalts auf die Methanausbeute (2003-2006, Korrelationskoeffizient, $P < 0,001$).

Der Stärkegehalt stieg an allen Orten erwartungsgemäß mit zunehmender Wachstumsdauer an (Tab. 4.6). Es zeigte sich allerdings, dass die Stärkezunahme bis zum Erntetermin II (Ismaning Erntetermin III) größer war als bei den darauf folgenden Ernteterminen. In Ingolstadt stieg der Stärkegehalt vom Erntetermin I auf II um 8 %, in Ismaning um 10 % und in Grucking um 13 %. Nur in Freising war der Anstieg mit 3 % (Saat April) und 5 % (Saat Mai) geringer. Allerdings lag hier bereits zum Erntetermin I ein durchschnittlicher Stärkegehalt von über 20 % vor. Dort waren wie bei den anderen Standorten auch die weiteren Zunahmen der Stärkegehalte zum Erntetermin III bzw. IV mit 1 % und 2 % noch geringer als zum Erntetermin II. Die Sorten hatten zum Erntetermin II (in Ismaning zum Erntetermin III) einen Stärkegehalt von mindestens 20 % erreicht. Bis dahin konnte auch ein leichter Anstieg der Methanausbeute festgestellt werden.

Tab. 4.6: Stärkegehalt (% TS) in Abhängigkeit vom Erntetermin (2003-2006, Mittel der Sorten)

Erntetermin	Freising 2003 Saat April	Freising 2003 Saat Mai	Ingolstadt 2004	Ismaning 2004	Grucking 2006	Mittel
I	27,2 b [†]	22,3 c	11,7 b	3,6 e	7,3 d	14,4
II	30,3 a	27,5 b	19,2 a	14,5 d	21,7 c	22,6
III	n.b. ^{††}	n.b.	21,4 a	24,9 c	28,4 b	27,1
IV	31,2 a	29,5 a	20,9 a	26,9 b	32,8 a	26,9
V	n.b.	n.b.	n.b.	29,9 a	n.b.	29,9

[†] verschiedene Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede bei $P < 0,05$.

^{††} nicht bestimmt

In Ingolstadt fielen die Stärkegehalte unterdurchschnittlich aus. Hier stiegen die Werte nicht über 20 % der TS, trotzdem wurden ähnlich hohe Methanausbeuten wie an den anderen Standorten erzielt. Im Einzelfall führten aber auch weitaus niedrigere Stärkegehalte zu ähnlich hohen Methanausbeuten. So wurde in Grucking zum Erntetermin I bei einem Stärkegehalt von knapp 8 % eine Methanausbeute von ca. 331 NI (kg OTS)⁻¹ gemessen.

Wasserlösliche Kohlenhydrate

Der Gehalt an wasserlöslichen Kohlenhydraten (WLK-Gehalt) in der Ganzpflanze erreichte Werte zwischen ca. 0 und 22 %, in der Restpflanze zwischen ca. 5 und 29 % (Abb. 4.9).

Der Gehalt an wasserlöslichen Kohlenhydraten der Ganzpflanze nahm erwartungsgemäß mit zunehmender Wachstumsdauer stetig ab (Tab. 4.7). Der Gehalt an wasserlöslichen Kohlenhydraten in der Restpflanze war im Vergleich zur Ganzpflanze deutlich höher. Mit Ausnahme von Grucking sank auch der WLK-Gehalt in der Restpflanze mit zunehmender Wachstumsdauer des Mais. Er zeigte ebenso keinen Einfluss auf die Höhe der Methanausbeute. Sie bewegte sich unabhängig vom WLK-Gehalt zwischen ca. 310 und 350 NI (kg OTS)⁻¹.

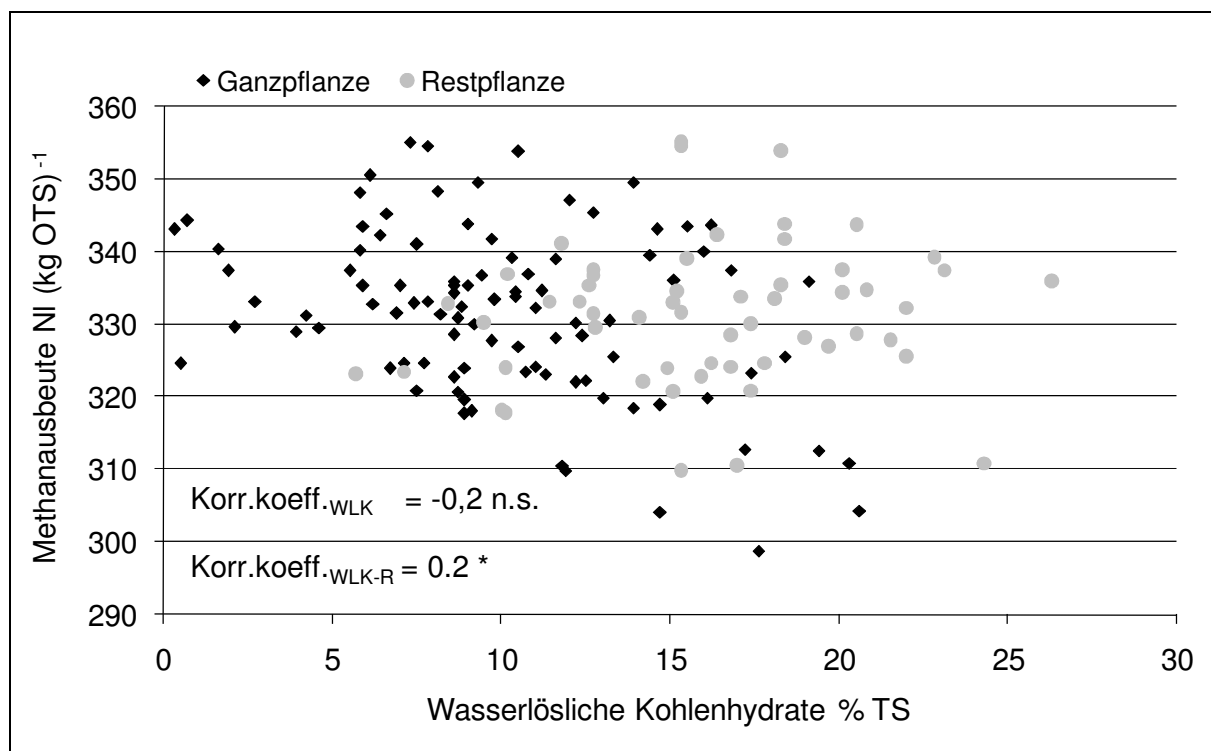


Abb. 4.9: Einfluss des Gehaltes an wasserlöslichen Kohlenhydraten auf die Methanausbeute (2003-2006, Korrelationskoeffizient, nicht signifikant, * signifikant P < 0,05).

Tab. 4.7: Wasserlösliche Kohlenhydrate (% TS) in Ganz- und Restpflanze in Abhängigkeit vom Erntetermin (2003-2006, Mittel der Sorten)

Erntetermin	Freising 2003 Saat April	Freising 2003 Saat Mai	Ingolstadt 2004	Ismaning 2004	Grucking 2006
Ganzpflanze					
I	7,0 b [†]	8,9 b	16,9 a	16,1 a	10,5 ab
II	8,0 b	6,8 c	12,3 b	14,2 b	11,3 a
III	n.b. ^{††}	n.b.	7,0 c	10,6 c	9,8 b
IV	8,3 a	11,1 a	8,3 c	8,6 d	7,9 c
V	n.b.	n.b.		2,9 e	n.b.
Restpflanze					
I	15,6 a	18,2 a	22,8 a	n.b.	8,9 c
II	15,6 a	17,8 a	20,1 b	n.b.	19,2 a
III	n.b.	n.b.	17,8 bc	n.b.	17,3 a
IV	10,3 b	14,8 b	17,0 c	n.b.	13,6 b
V	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.

[†] verschiedene Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede bei $P < 0,05$

^{††} nicht bestimmt

Rohprotein

Beim RP-Gehalt konnte ein Bereich von 4 bis 12 % der TS erfasst werden (Tab. 4.1). Der Rückgang der RP-Gehalte in Abhängigkeit vom Erntetermin war gering (Tab. 4.8) und zeigte keinen Einfluss auf die Höhe der Methanausbeute (Korr.koeff. = 0,1 n.s., $P < 0,05$, Anhang Tab. 9.8).

Tab. 4.8: RP-Gehalt (% TS) in Abhängigkeit vom Erntetermin (2003-2006, Mittel der Sorten)

Erntetermin	Freising 2003 Saat April	Freising 2003 Saat Mai	Ingolstadt 2004	Ismaning 2004	Grucking 2006
I	7,6 a [†]	8,9 a	7,7 a	8,9 a	10,6 a
II	7,2 a	8,1 b	7,8 a	7,8 b	8,4 b
III	n.b. ^{††}	n.b.	8,4 a	7,0 c	7,6 c
IV	7,2 a	7,3 c	8,3 a	6,6 d	7,6 c
V	n.b.	n.b.	n.b.	7,2 c	n.b.

[†] verschiedene Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede bei $P < 0,05$

^{††} nicht bestimmt

NDF- und ADF-Gehalt der Ganz- und Restpflanze

Der NDF- und der ADF-Gehalt der Ganzpflanze nahmen in Abhängigkeit vom Erntetermin ab, vom Erntetermin I auf II stärker als im weiteren Verlauf (Tab. 4.9). Der ADF-Gehalt sank vom Erntetermin I auf II im Mittel von ca. 28 auf 22 % der TS und blieb danach ungefähr auf diesem Niveau. Der NDF-Gehalt sank von ca. 50 auf 42 % der TS bis zum Erntetermin II und nahm danach nur noch um ca. 2 % ab.

Der NDF-Gehalt der Restpflanze (NDF-R) hingegen nahm mit Ausnahme von Grucking in der Wachstumsperiode zu. In Grucking zeigte sich diese Zunahme nicht, im Gegenteil hier nahm der NDF-R-Gehalt vom Erntetermin I auf II um ca. 10 % ab und stieg dann wieder um ca. 7 % auf 67 % an (Tab. 4.9).

Tab. 4.9: Zellwandbestandteile (% TS) der Ganz- (ADF, NDF) und Restpflanze (NDF-R) in Abhängigkeit vom Erntetermin (2003-2006, Mittel der Sorten)

Neutral lösliche Faser (NDF)					
Erntetermin	Freising 2003 Saat April	Freising 2003 Saat Mai	Ingolstadt 2004	Ismaning 2004	Grucking 2006
Ganzpflanze					
I	44,3 a [†]	47,8 a	45,3 ab	53,0 a	61,5 a
II	40,8 b	42,9 b	42,6 b	45,4 b	45,6 b
III	n.b.	n.b.	47,0 a	40,4 d	42,0 c
IV	40,2 b	39,0 c	45,6 ab	40,8 d	41,8 c
V	n.b. ^{††}	n.b.	n.b.	42,8 c	n.b.
Restpflanze					
I	60,9 b	57,6 b	53,5 c	n.b.	70,5 a
II	61,7 b	58,5 b	57,3 b	n.b.	60,9 c
III	67,3 a	61,5 a	59,0 ab	n.b.	62,3 c
IV	n.b.	n.b.	62,0 a	n.b.	66,7 b
V	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Säurelösliche Faser (ADF)					
I	23,8 a	24,9 a	23,4 ab	31,2 a	34,5 a
II	20,5 b	20,7 b	22,2 b	26,4 b	24,4 b
III	19,1 c	18,2 c	24,2 a	24,0 cd	21,3 c
IV	n.b.	n.b.	22,3 b	24,3 c	20,8 c
V	n.b.	n.b.	n.b.	23,0 d	n.b.

[†] verschiedene Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede bei P < 0,05

^{††} nicht bestimmt

Ein Zusammenhang zwischen diesen Zellwandbestandteilen (ADF, NDF, NDF-R) und der Methanausbeute ließ sich nicht finden (Abb. 4.10). Die Korrelationskoeffizienten lagen nur zwischen 0,02 und 0,3. Ähnlich wie bei den Zellinhaltsstoffen ergaben sich keine relevanten Beziehungen zur Methanausbeute.

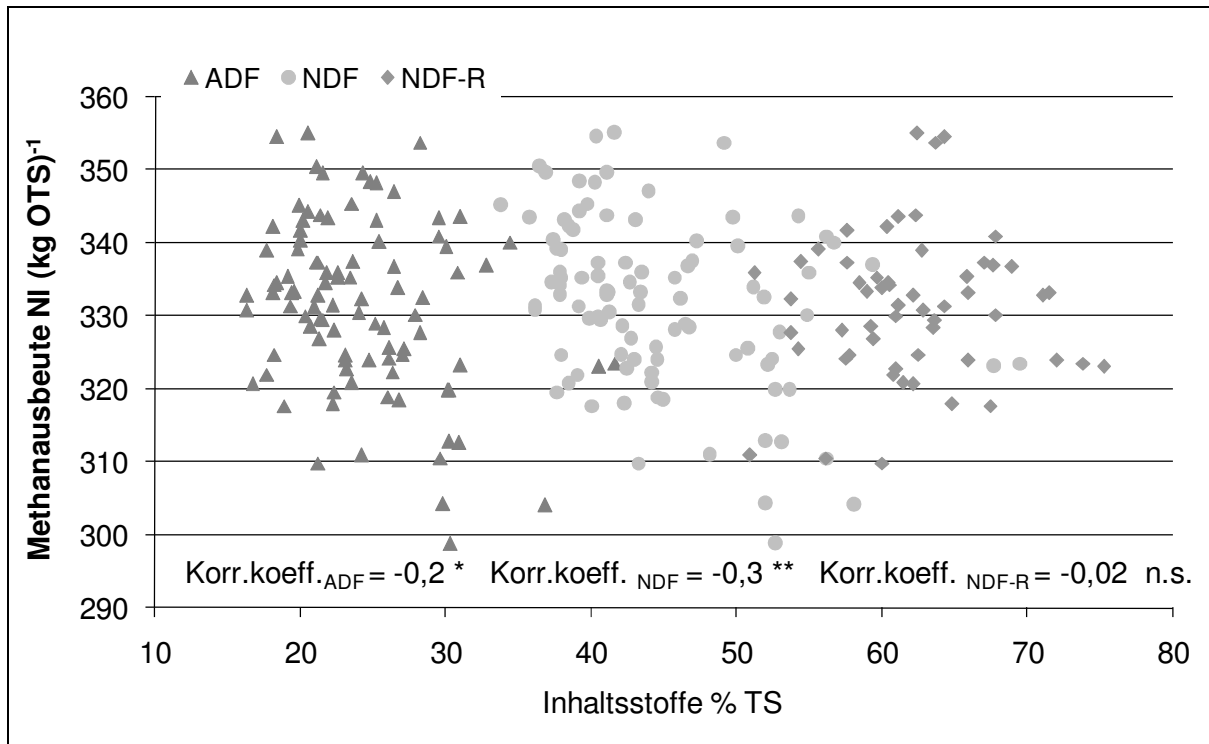


Abb. 4.10: Einfluss der Zellwandbestandteile ADF, NDF und NDF-R auf die Methanausbeute (2003-2006, Korrelationskoeffizient, n.s. nicht signifikant, * signifikant bei $P < 0,05$, ** signifikant bei $P < 0,01$).

Verdaulichkeitsparameter der Ganz- und Restpflanze

Sowohl IVDOM als auch ELOS nahmen vom Erntetermin I auf II zu und blieben dann in etwa konstant (Tab. 4.10). Mit Ausnahme von Grucking nahm die Restpflanzenverdaulichkeit (IVDOM-R) erwartungsgemäß in Abhängigkeit vom Erntetermin ab.

Tab. 4.10: Verdaulichkeitsparameter der Ganz- (IVDOM, ELOS) und Restpflanze (IVDOM-R) in Abhängigkeit vom Erntetermin (2003-2006, Mittel der Sorten)

Erntetermin	<i>In vitro</i> -Verdaulichkeit (IVDOM) % TS				
	Freising 2003 Saat April	Freising 2003 Saat Mai	Ingolstadt 2004	Ismaning 2004	Grucking 2006
	Ganzpflanze				
I	72,8 b [†]	72,0 b	73,8 a	72,0 b	63,0 b
II	75,4 a	72,5 b	74,5 a	75,6 a	73,6 a
III	n.b. ^{††}	n.b.	69,9 b	76,5 a	74,9 a
IV	76,4 a	78,0 a	71,1 b	75,7 a	74,3 a
V	n.b.	n.b.	n.b.	72,1 b	n.b.
	Restpflanze				
I	70,6 a	71,8 a	75,4 a	n.b.	67,7 c
II	68,3 b	70,2 a	71,4 b	n.b.	71,5 a
III			70,2 b	n.b.	69,9 b
IV	63,4 c	67,4 b	66,3 c	n.b.	66,2 d
V	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
	Enzymlösliche Verdaulichkeit (ELOS) % TS				
I	67,1 c	64,5 c	65,9 b	57,8 c	52,0 c
II	70,6 b	69,8 b	67,6 a	65,4 b	66,2 b
III	n.b.	n.b.	65,9 b	68,4 a	69,4 a
IV	72,0 a	72,7 a	67,3 a	68,0 a	69,9 a
V	n.b.	n.b.	n.b.	69,1 a	n.b.

[†] verschiedene Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede bei $P < 0,05$

^{††} nicht bestimmt

Der Einfluss der Verdaulichkeitsparameter auf die Höhe der Methanausbeute ist in Abb. 4.11 dargestellt. Die aus der Tierernährung stammenden Parameter zur Charakterisierung der Futterqualität hatten keinen Einfluss auf die Höhe der Methanausbeute. Die Veränderungen der Verdaulichkeitsparameter während der Wachstumsperiode zeigten keine Beziehung mit dem Parameter Methanausbeute.

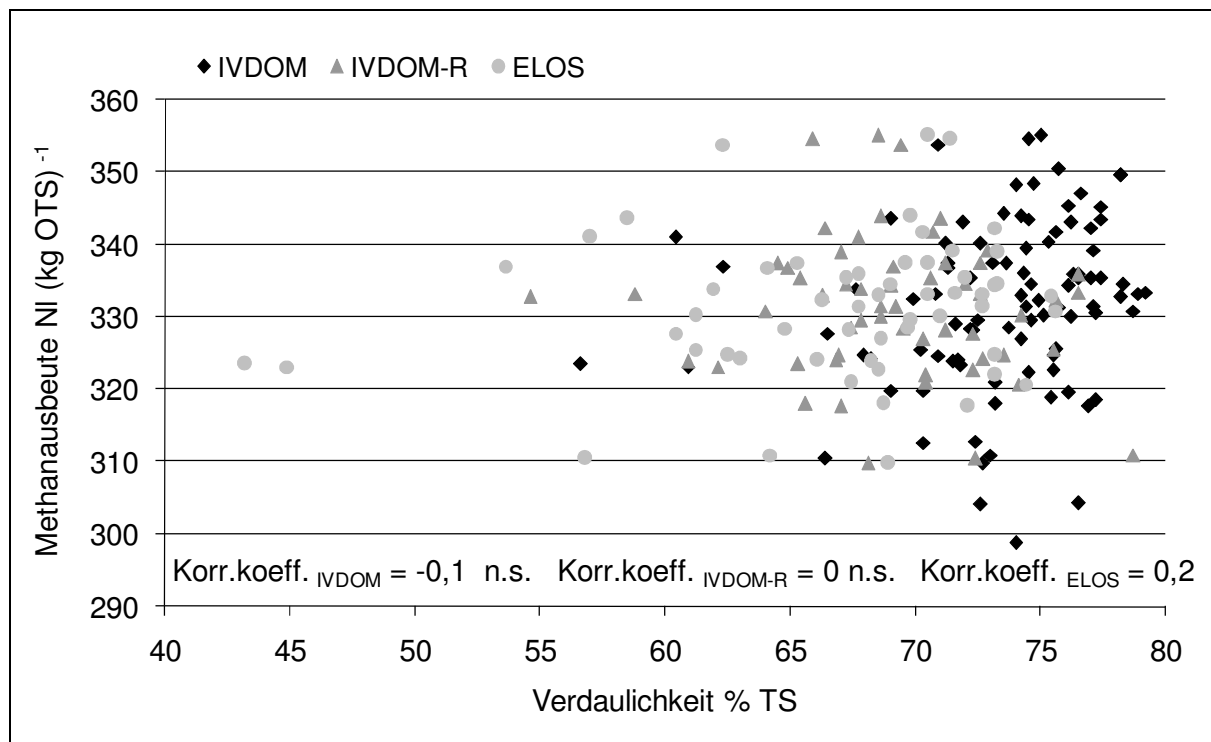


Abb. 4.11: Einfluss der Verdaulichkeitsparameter IVDOM und ELOS auf die Methanausbeute (2003-2006, Korrelationskoeffizient, n.s. nicht signifikant, ** signifikant bei $P < 0,01$).

Verdaulichkeitsparameter der Zellwand

Je nach Merkmal (DINIG, DINAG, DNDF-R) waren zwischen ca. 50 und 60 % der Zellwand verdaulich (Tab. 4.11). Mit Ausnahme von Ingolstadt 2004 nahm an allen Orten die DINAG Verdaulichkeit vom Erntetermin I auf II zu und blieb dann konstant. In Ingolstadt blieben die Werte in Abhängigkeit vom Erntetermin unverändert. Die Orte zeigten bei der DINIG-Verdaulichkeit ein nicht einheitliches Bild. Sie nahm in Freising und Grucking mit der Wachstumszeit des Mais zu und in Ingolstadt und Ismaning ab.

Die Verdaulichkeit der Restpflanzenfaser (DNDF-R) nahm an allen Orten mit zunehmender Wachstumsdauer kontinuierlich ab. Auffallend erschienen die höheren Werte am Standort Grucking im Vergleich zu den anderen Orten.

Tab. 4.11: Zellwandverdaulichkeit (% TS) der Ganz- (DINAG, DINIG) und Restpflanze (DNDF-R) in Abhängigkeit vom Erntetermin (2003-2006, Mittel der Sorten)

Erntetermin	Freising 2003 Saat April	Freising 2003 Saat Mai	Ingolstadt 2004	Ismaning 2004	Grucking 2006
DINAG					
I	50,1 b [†]	48,5 b	52,3 a	47,5 c	41,9 b
II	52,5 a	54,0 a	52,7 a	51,5 b	49,8 a
III	n.b. ^{††}	n.b.	52,4 a	51,1 b	50,7 a
IV	53,8 a	54,2 a	53,9 a	50,7 b	49,5 a
V	n.b.	n.b.	n.b.	54,0 a	n.b.
DINIG					
I	58,8 b	59,3 b	63,3 a	65,1 a	55,2 b
II	60,2 a	58,7 b	62,7 a	65,8 a	60,6 a
III	n.b.	n.b.	57,9 b	63,2 b	59,5 a
IV	61,1 a	63,1 a	59,1 b	62,1 c	56,8 b
V	n.b.	n.b.	n.b.	58,4 d	n.b.
DNDF-R					
I	56,7 a	56,4 a	58,2 a	n.b.	59,4 a
II	52,9 b	53,8 b	54,6 b	n.b.	57,1 b
III	n.b.	n.b.	53,4 b	n.b.	55,9 c
IV	49,7 c	50,8 c	48,7 c	n.b.	53,5 d
V	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.

[†] verschiedene Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede bei $P < 0,05$
^{††} nicht bestimmt

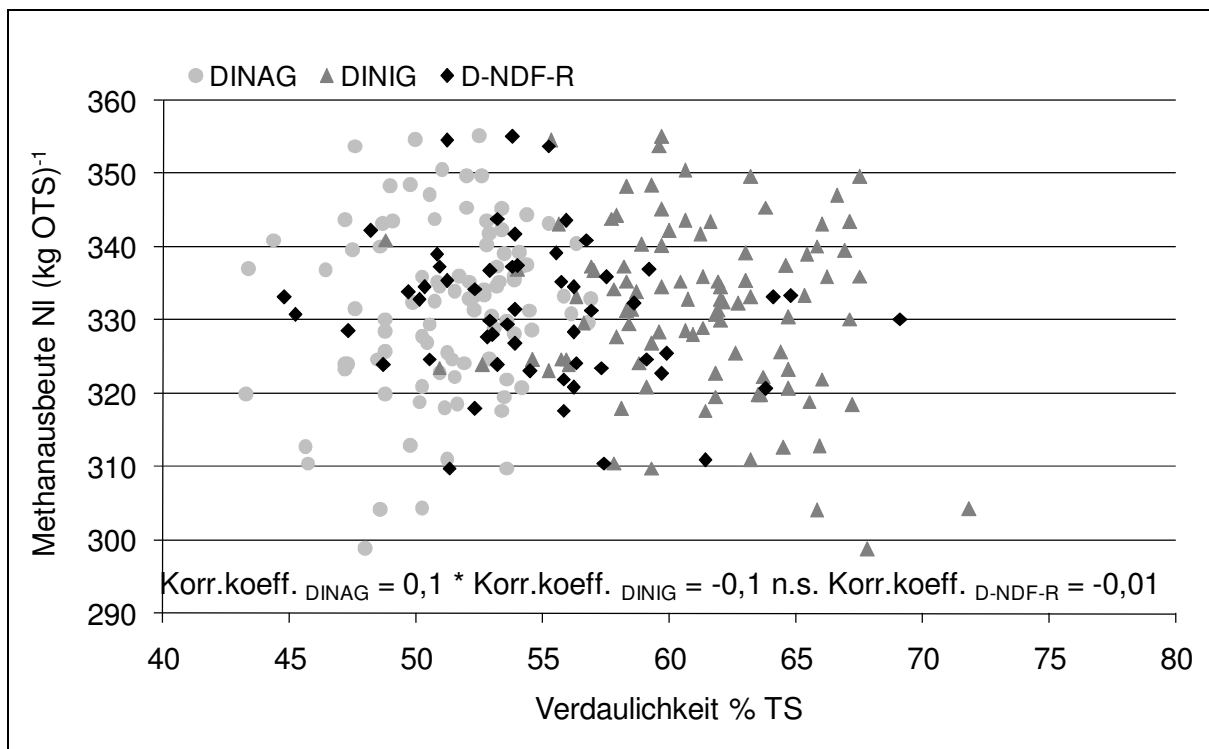


Abb. 4.12: Einfluss der Zellwandverdaulichkeit auf die Methanausbeute (2003-2006, Korrelationskoeffizient, n.s. nicht signifikant, * signifikant bei $P < 0,05$).

Auch diese Unterschiede in den Zellwandverdaulichkeiten zwischen den Ernteterminen führten nicht zu einer Beeinflussung der Methanausbeute (Abb. 4.12). Mit Korrelationskoeffizienten von 0,1 zeigte keines der untersuchten Parameter eine Beziehung zur Methanausbeute. Mais mit hoher Verdaulichkeit von ca. 65 % erzielte gleich hohe Methanausbeuten wie Mais mit niedriger Verdaulichkeit von ca. 45 %.

Regressionsanalyse der untersuchten Parameter

Mit den Inhaltsstoff- und Qualitätsparametern wurde eine multiple Regressionsanalyse durchgeführt. Das Bestimmtheitsmaß der Regressionsanalyse mit den einzelnen Parametern lag bei maximal 44 %. Selbst die Parameter Stärke und NDF, die in etwa 70 % der TS von Mais ausmachten, führten nur zu einem Bestimmtheitsmaß der Regressionsgleichung von 44 %. Das Beste, wenngleich immer noch ungenügende Bestimmtheitsmaß wurde mit den Merkmalen Stärke, ADF, NDF und ELOS erzielt und lag bei nur 45 % (Anhang Tab. 9.10). Eine aussagekräftige Regressionsgleichung konnte somit nicht ermittelt werden.

Damit zeigte sich insgesamt, dass die Wahl des Erntetermins und die Zusammensetzung der Inhaltsstoffe und Qualitätsparameter auf die Höhe der Methanausbeute keinen Einfluss

hatte. Bei den frühen Ernteterminen zeigte sich mehrfach ein Anstieg der Methanausbeute. Eine durchgängige Abnahme der Methanausbeute mit fortschreitender Wachstumsdauer konnte an den einzelnen Standorten nicht festgestellt werden. Die große Variation der Inhaltsstoff- und Qualitätsparameter durch die Wahl der Erntetermine und Sorten beeinflusste die Methanausbeute nicht. Die Korrelationsanalyse wies für keines der untersuchten Merkmale eine signifikante Beziehung zur Methanausbeute aus. Weder Zellinhaltsstoffe wie Stärke oder wasserlösliche Kohlenhydrate noch Zellwandbestandteile wie NDF oder ADF zeigten eine Wirkung auf die Methanausbeute. Auch die untersuchten Verdaulichkeitsparameter der Ganz- und Restpflanze ließen keinen Einfluss erkennen. Die durchgeführte multiple Regressionsanalyse erklärte das Zielmerkmal mit unter 50 % nur unzufriedenstellend.

4.1.5 Einfluss des Erntetermins und Reifetyps auf TS - Gehalt, TS - Ertrag und Methanertrag

Die Zielsetzung der Untersuchungen war die Klärung des optimalen Erntetermins von Silomais hinsichtlich der Parameter TS-Gehalt, TS-Ertrag, Methanausbeute und davon abgeleitet der Methanertrag. Um zu einer verallgemeinerten Aussage hinsichtlich des Erntetermin- und Sorteneinflusses zu kommen, wurden die Werte über die Orte gemittelt, zumal die Aussagen der Ergebnisse der einzelnen Orte sich mit der ortsunabhängigen Darstellung deckten.

TS-Gehalt

Der optimale Erntetermin wird begrenzt von der Anforderung der Silierfähigkeit des Substrates. Für Silomais gilt ein TS-Bereich von 28 bis 35 % der TS als optimal.

Abb. 4.13 zeigt die TS-Gehalte der Jahre 2003-2006 gemittelt über die Sorten und Orte in Abhängigkeit vom Erntetermin. Der Jahreseinfluss war je nach Erntetermin unterschiedlich groß. Tendenziell waren die Unterschiede zwischen den Jahren bei den frühen Ernteterminen (I und II) größer als bei den späten (III und IV). Das extrem heiße Jahr 2003 hob sich deutlich von den anderen Jahren ab (gepunktete Säule). Im Mittel lagen die TS-Gehalte in diesem Jahr bei ca. 35 %, während in den anderen Jahren TS-Gehalte von ca. 26 bis 29 % erzielt wurden. Demgegenüber wies der Mais im Jahr 2005 und 2006 bei den ersten beiden Ernteterminen die niedrigsten TS-Gehalte auf.

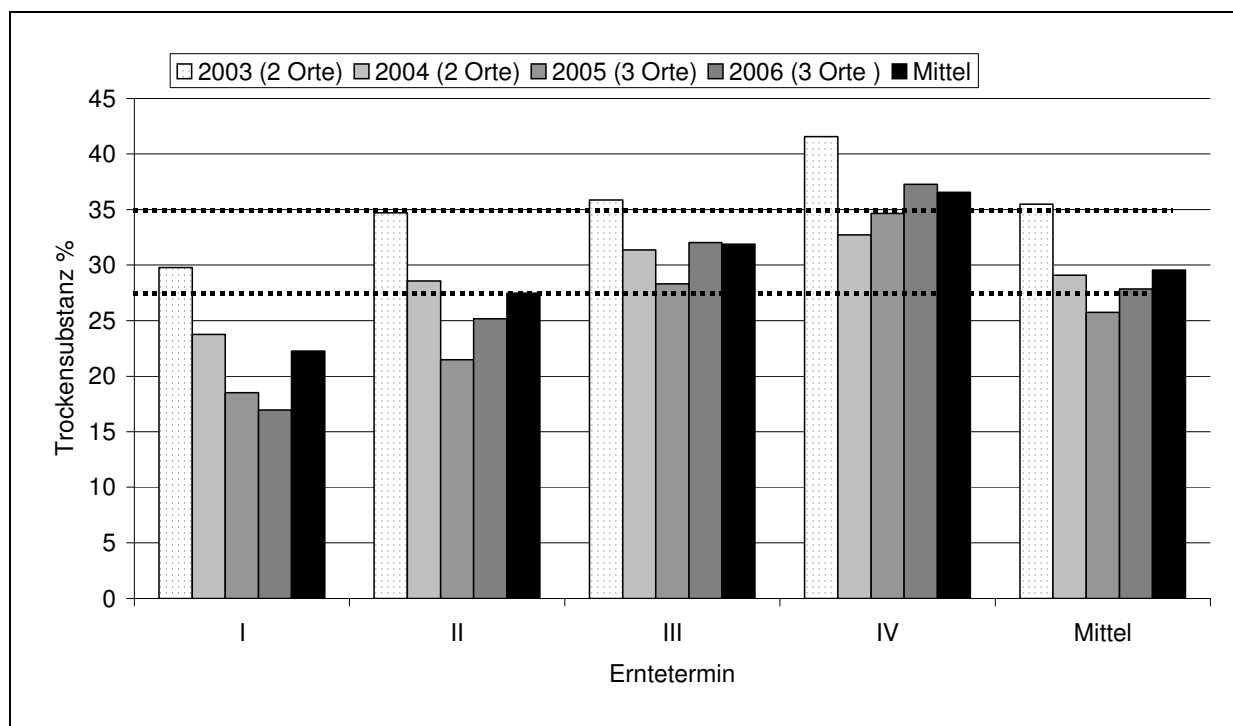


Abb. 4.13: Einfluss des Erntetermins auf den TS-Gehalt (2003-2006, Mittel der Sorte und Orte), gestrichelte Linien markieren den optimalen Bereich zur Silagebereitung.

Die TS-Gehalte der Ganzpflanze nahmen mit der Wachstumsdauer zu. Der erforderliche TS-Gehalt von 28 % wurde zwischen Erntetermin II und III erreicht, beim Erntetermin IV überschritt er die obere Grenze von 35 %. Eine Ausnahme bildete das Jahr 2003, in dem bereits beim Erntetermin I TS-Gehalte über 30 % erreicht wurden.

Erwartungsgemäß wiesen die Sorten mit einer FAO-Zahl über 250 niedrigere TS-Gehalte als die Vergleichssorte auf. Sie variierten zwischen 20 und 41 % TS (Tab 4.12). Mit Ausnahme der Sorte Mikado (FAO 600) im Jahr 2005 erzielten alle Sorten einen TS-Gehalt von über 28 % in dem untersuchten Erntezeitraum. Im Jahr 2005 lag der TS-Gehalt der Sorte Mikado beim Erntetermin IV erst bei ca. 26 %. Die Sorten mit Reifezahlen von 280 bis 400 erreichten den optimalen Silierbereich bereits zwischen Erntetermin II und III, Sorten mit FAO 600 erst zum Erntetermin IV. Im Jahr 2003 waren alle TS-Gehalte wesentlich höher und es erzielte sogar die Sorte mit FAO 800 TS-Gehalte bis zu 34 %.

Tab. 4.12: TS-Gehalt (% FM) in Abhängigkeit von Reifetyp und Erntetermin (2003-2006, Mittel der Orte)

FAO	Sorte	Erntetermin				Mittel
		I	II	III	IV	
2003 (2 Orte)						
250	Gavott	34,8 a [†]	40,7 a	41,6 a	47,3 a	41,1 a
280	KXA3191	32,2 ab	37,5 ab	37,4 b	43,0 ab	37,5 b
400	Hybride13	28,9 b	34,1 b	35,6 b	41,0 b	34,9 c
800	Hybride89	23,2 c	26,6 c	28,9 c	34,9 c	28,4 d
	Mittel	29,8 c	34,7 bc	35,9 ab	41,6 a	35,5
2004 (2 Orte)						
250	Gavott	30,7 a	36,7 a	39,6 a	38,5 a	36,4 a
400	KX2386	23,5 b	29,1 b	33,8 b	35,3 b	30,4 b
600	KXA4566	19,7 c	23,5 c	26,1 c	28,2 c	24,4 c
600	Mikado	21,2 bc	24,9 c	26,0 c	28,8 c	25,2 c
	Mittel	23,8 b	28,6 bc	31,4 a	32,7 a	29,1
2005 (3 Orte)						
250	Gavott	20,9 a	24,6 a	34,5 a	40,4 a	30,1 a
250	KXA 5243	17,5 bc	19,6 c	24,1 c	32,1 c	23,3 c
250	KXA 4171	18,9 b	22,5 b	30,0 b	37,1 b	27,1 b
400	KXA5226	18,8 b	22,6 b	30,7 b	38,1 b	27,6 b
600	Mikado	16,6 c	18,3 c	22,2 c	25,5 d	20,6 d
	Mittel	18,5 d	21,5 c	28,3 b	34,7 a	25,7
2006 (3 Orte)						
250	Gavott	20,2 a	28,9 a	36,6 a	41,8 a	31,9 a
250	KXA6231	16,5 b	25,7 b	32,5 b	37,7 b	28,1 b
250	KXA6231br	17,9 b	27,2 a	36,2 a	40,4 a	30,4 a
400	KXA5243	15,8 c	23,6 c	30,1 c	37,4 b	26,7 c
600	Mikado	14,4 c	20,4 c	24,7 d	29,0 c	22,1 d
	Mittel	16,9 d	25,2 c	32,0 b	37,3 a	27,9

† verschiedene Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede bei $P < 0,05$

TS-Ertrag

Die Erträge unterlagen deutlichen Orts- und Jahreseinflüssen. Die Orte Freising und Grucking zeichneten sich durch ein hohes, Ingolstadt durch ein niedrigeres Ertragspotenzial aus. Wehnen war mit Ausnahme im Jahr 2005 im Ertragsniveau mit Freising zu vergleichen (Tab.4.13).

Im Mittel der Jahre und Orte stieg der TS-Ertrag vom Erntetermin I auf II am stärksten. Die Ertragszunahme von Erntetermin II auf III war wesentlich geringer. Am Erntetermin IV kam es zu einem leichten Ertragsrückgang. Mit Ausnahme von Wehnen 2004 zeigten alle Orte diese deutliche Zunahme der Erträge vom Erntetermin I auf II. Nur in Wehnen 2004 hatte der Mais bereits zum Erntetermin I einen Ertrag erreicht, der sich bis zum Erntetermin IV nicht mehr veränderte (Tab. 4.13).

Tab. 4.13: TS-Ertrag (dt ha⁻¹) in Abhängigkeit vom Erntetermin (2003-2006, Mittel der Sorten)

Orte	Erntetermin			
	I	II	III	IV
	2003			
Freising [†]	211,7 b ^{††}	233,0 a	207,3 b	227,5 a
Wehnen	188,8 c	212,0 b	229,7 a	203,4 b
	2004			
Ingolstadt	176,1 a	204,4 a	191,0 a	183,5 a
Wehnen	213,8 a	216,0 a	212,3 a	215,7 a
	2005			
Freising	179,6 c	††	225,7 b	239,5 a
Ingolstadt	122,1 b	166,6 a	195,5 a	187,6 a
Wehnen	131,2 c	167,6 b	198,4 a	195,5 a
	2006			
Freising	114,2 c	190,4 b	206,0 a	*
Grucking	134,9 c	209,3 b	225,4 a	221,4 a
Wehnen	140,3 c	169,6 b	209,7 a	198,7 a

[†] Saat April

^{††} verschiedene Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede bei P < 0,05

* fehlender Wert

Die Jahre 2003 und 2004 wiesen bereits beim Erntetermin I ein höheres Niveau der TS-Erträge auf, so dass die Zunahmen zum Erntetermin II weniger deutlich ausgeprägt waren

(Abb. 4.14). In den kühlen und hinsichtlich des Witterungsverlaufs ungünstigeren Versuchsjahren 2005 und 2006 lagen die Erträge des Erntetermin I um ca. 50 dt ha⁻¹ niedriger als in den Jahren 2003 und 2004. Diese Jahre zeigten den stärksten Anstieg der Biomassebildung. Zwischen Erntetermin I und III wurden etwa 80 dt ha⁻¹ TS gebildet. Danach sanken die Erträge leicht. Dadurch ergab sich ein Ertragsoptimum für alle Orte und Jahre zwischen Erntetermin II und III.

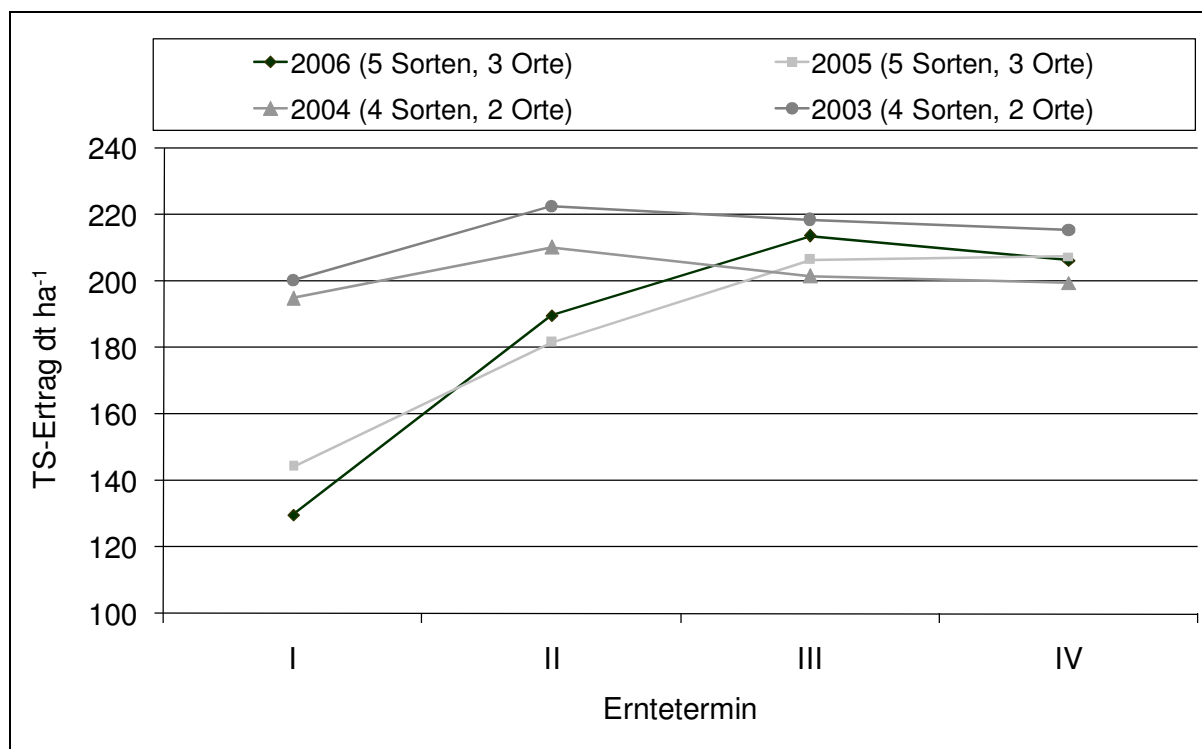


Abb. 4.14: Einfluss des Erntetermins auf den TS-Ertrag (2003-2006, Mittel der Jahre).

Tab. 4.14 zeigt die einzelnen Erträge an den jeweiligen Versuchsstandorten gemittelt über die Erntetermine. Genotypen im Reifebereich 280 bis 400 erzielten an allen Versuchsstandorten gesichert höhere Erträge als die Vergleichssorte *Gavott*. In Wehnen 2004 wurde dies nicht erreicht, da die Vergleichssorte ein extrem hohes Ertragsniveau von knapp 226 dt ha⁻¹ erzielt hatte. 2006 wurden zusätzlich noch zwei Sorten aus dem mittelfrühen Reifebereich geprüft (KXA 6231, KXA6231br) diese zeigten ebenso ein schlechtes Ertragsverhalten. Die sehr späten Sorten (FAO > 600) schafften nur in 50 % der Fälle gesichert höhere Erträge.

Tab. 4.14: TS-Ertrag (dt ha⁻¹) in Abhängigkeit von Genotyp und Ort (2003-2006)

FAO	Sorte	Wehnen	Freising	Ingolstadt	Grucking
2003 [†]					
250	Gavott	208,7b ^{††}	206,0b		
280	KXA3191	227,0a	224,6a		
400	Hybride13	203,6bc	226,8a		
800	Hybride89	194,6c	222,2a		
	Mittel	208,5	219,9		
2004					
250	Gavott	225,9a		168,3c	
400	KX2386	205,1b		197,1ab	
600	KXA4566	197,9c		183,6b	
600	Mikado	228,8a		206,1a	
	Mittel	214,4		188,7	
2005					
250	Gavott	162,4c	177,3b	158,0c	
280	KXA5226	186,1a	190,8a	185,4a	
280	KXA4171	191,7a	187,1a	170,6b	
400	KXA5243	175,1b	184,0a	160,2c	
600	Mikado	150,7d	171,5b	165,5bc	
	Mittel	173,2	182,2	167,9	
2006					
250	Gavott	187,9b	181,7a		198,6b
250	KXA6231	159,2c	155,2b		183,1c
250	KXA6231br	156,4c	142,0b		158,7d
400	KXA5243	200,8a	184,4a		218,9ab
600	Mikado	193,6ab	187,8a		229,5a
	Mittel	179,6	170,2		197,8

[†] Saat April,

^{††} unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede bei $P < 0,05$

In Abb. 4.15 wurden Jahreseffekte und Standorteinflüsse und der Genotyp nicht berücksichtigt und nur das Ertragspotenzial der Reifegruppen gegenüber der Vergleichssorte in Abhängigkeit vom Erntetermin dargestellt.

Im Mittel lag das Ertragspotenzial der Vergleichssorte *Gavott* (FAO 250) bei etwas über 190 dt ha⁻¹. Die späten Sorten zeigten im Vergleich dazu ausnahmslos höhere Erträge. Der hohe Ertrag der Sorte FAO 800 von ca. 210 dt ha⁻¹ ist nur eingeschränkt verallgemeinerbar, da

eine so späte Sorte nur einmal (2003) geprüft wurde. Abgesehen von dieser Sorte erzielten die Sorten mit einer FAO-Zahl von 280 bis 400 die höchsten Erträge von ca. 200 dt ha⁻¹. Die Sorten mit FAO Zahl 600 zeigten auch höhere Erträge, wenn gleich sie im Schnitt nur geringfügig über der Vergleichssorte lagen.

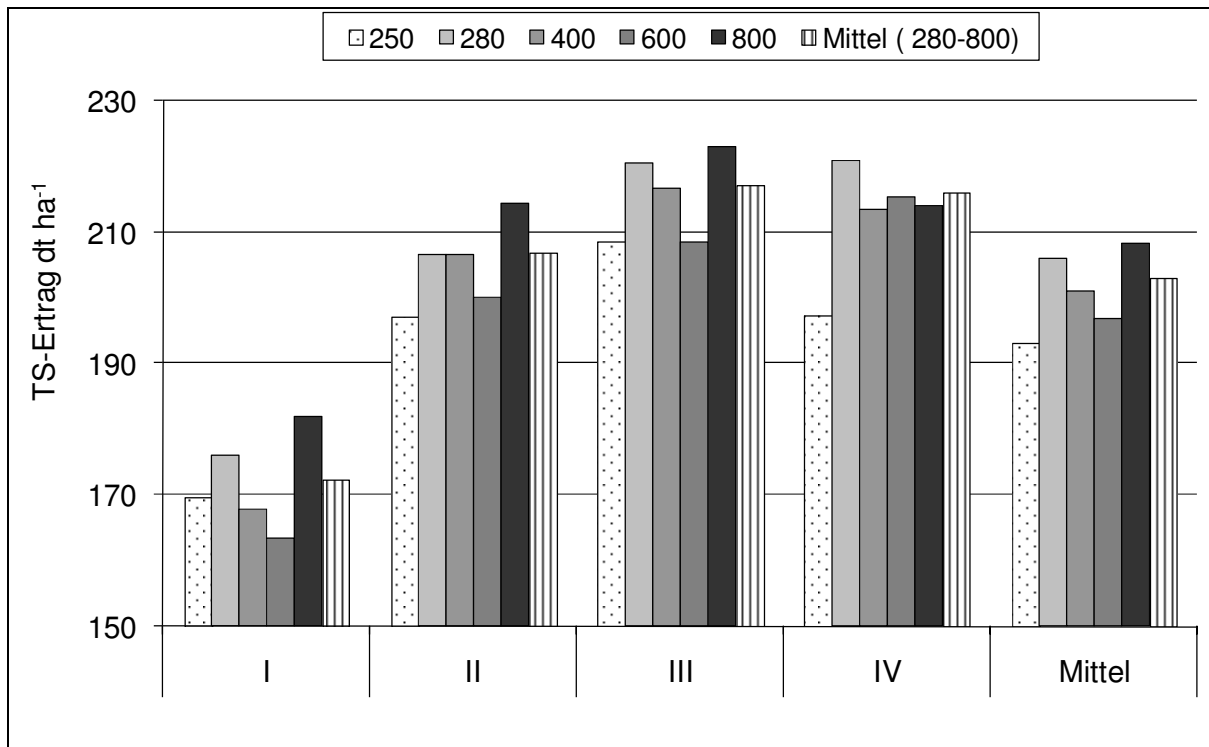


Abb. 4.15: Einfluss des Reifetyps auf den TS-Ertrag in Abhängigkeit vom Erntetermin (2003-2006).

Betrachtet man die Ertragsleistung der Sorten an den jeweiligen Ernteterminen so lieferten die späten Sorten mit Ausnahme vom Erntetermin I im Vergleich zur *Gavott* immer höhere Erträge (Abb. 4.15). Die Sorten mit FAO-Zahlen von 280 lagen beim Erntetermin I auch schon über dem Ertrag von *Gavott* (170 dt ha⁻¹). Die Sorten mit einer FAO-Zahl bis zu 400 erzielten bereits beim Erntetermin II und III höhere Erträge als die Vergleichssorte. Sorten mit FAO 600 schafften dies erst beim Erntetermin IV.

Des Weiteren zeigten die Ergebnisse, dass der Ertragsrückgang im Herbst bei den späten Sorten (Mittel FAO 280-800, Abb. 4.15) weniger stark ausgeprägt war, als bei der Ver-

gleichssorte. Während der Ertrag der späten Sorten vom Erntetermin III auf IV nahezu unverändert blieb, nahm er bei der Vergleichssorte um 10 dt ha^{-1} ab.

Methanertrag

Die Methanerträge wurden aus dem TS-Ertrag und der Methanausbeute berechnet (siehe Material und Methoden). Sie beziehen sich daher nur auf die Versuche, für die auch Methanausbeuten analysiert wurden.

Lässt man den Sorteneinfluss unberücksichtigt stieg der Methanertrag pro Hektar analog zum TS-Ertrag mit zunehmender Wachstumsdauer an (Abb. 4.16) und erzielte zum Erntetermin II bzw. III (Ismaning) sein Maximum. Mit Ausnahme von Ingolstadt 2004 und Ismaning 2004 waren nach diesem Erntetermin die Ertragsveränderungen gering. In Ingolstadt hingegen nahm der Methanertrag pro Hektar um knapp 1.000 m^3 , in Ismaning 2004 um ca. 500 m^3 ab. Im Durchschnitt wurde ein Methanertrag pro Hektar von etwa 6.000 m^3 erzielt. Die Erträge schwankten je nach Standort und Jahr zwischen 4.500 m^3 (Ismaning 2004) und 7.000 m^3 pro Hektar (Freising 2003 Saat April, Anhang Tab. 9.12).

Die Korrelationsanalyse ergab für den Methanertrag nur mit dem TS-Ertrag eine signifikante Beziehung. Der Korrelationskoeffizient lag bei ca. $0,9$ ($n= 194$, Anhang Tab. 9.8). Mit einem Bestimmtheitsmaß von $0,88$ konnte der Methanertrag mit der in Abb. 4.17 beschriebenen Regressionsgleichung geschätzt werden.

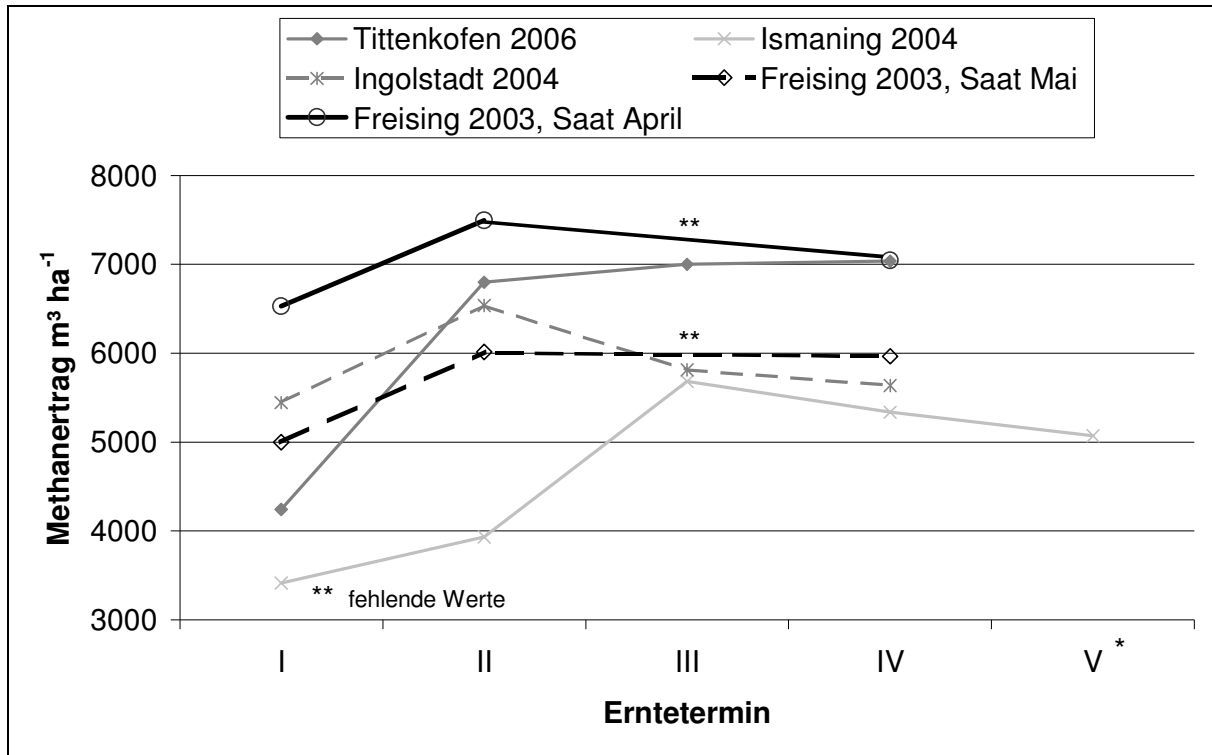


Abb. 4.16 Einfluss des Erntetermins auf den Methanertrag (2003-2006, Mittel der Sorten).

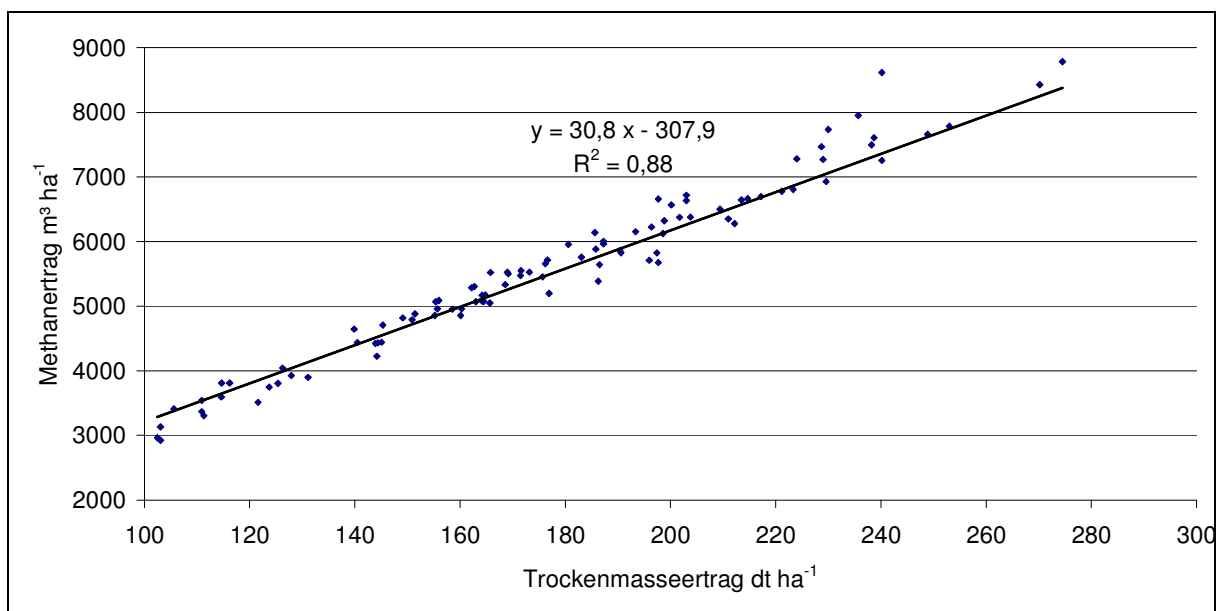


Abb. 4.17: Einfluss des TS-Ertrags auf den Methanertrag (2003-2006).

In den Tab. 4.15 bis 4.18 sind die reifetypspezifischen Methanerträge ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) in Abhängigkeit des Erntetermins dargestellt.

Für alle Versuchsorte gilt, dass die Methanerträge unterschiedlich stark mit längerer Wachstumsdauer zu nahmen. Zum Erntetermin I erzielte die Vergleichssorte vermehrt einen höheren Methanertrag. Ab dem Erntetermin II erzielten überwiegend Genotypen aus dem späten und sehr späten Reifebereich höhere Methanerträge. Mit Ausnahme von Freising 2003 und Ingolstadt 2004 wurden die höchsten Erträge überwiegend an den späteren Ernteterminen III und IV erzielt.

Die Ertragsunterschiede zwischen der Vergleichssorte und den späteren Reifetypen waren an den Versuchsorten verschieden stark ausgeprägt. In Ismaning erzielten die späten Sorten mit maximal $200 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$ den geringsten Ertragsvorteil gegenüber der Vergleichssorte. In Freising erzielten die späteren Sorten um $500 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$ bis $700 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$ mehr Methan als die Vergleichssorte. Demgegenüber stehen die Versuchsorte Ingolstadt und Grucking mit Mehrerträgen von $1000 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$ bis zu $3000 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$ deutlich heraus. Mit ca. $8500 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$ den höchsten Ertrag lieferte die sehr späte Sorte Mikado an den Standorten Grucking 2006 und Ingolstadt 2004. Während die mittelfrühe Gavott zum letzten Erntetermin immer mit einem Ertragsrückgang reagierte, zeigte sich dies bei den späteren Sorten nur vereinzelt. Die späten Sorten blieben häufiger als die Vergleichssorte entweder ertragsstabil oder legten noch zu.

Insgesamt zeigt der Versuch, dass spätere Genotypen höhere Methanerträge erbringen können, dass dies allerdings sehr deutlich vom Standort und Jahr und vom Genotyp abhängig ist. Ein genereller Vorteil von späten Sorten gegenüber mittelfrühen Sorten wurde nicht festgestellt.

Tab. 4.15: Methanertrag ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) Freising 2003

FAO	Sorte	Erntetermin [†]					
		I		II		IV	
Saat April							
250	Gavott	6380,5	n.g. ^{††}	7281,8	n.g.	6375,7	n.g.
280	KXA3191	6808,4	n.g.	7949,9	n.g.	7605,3	n.g.
400	Hybride13	6780,8	n.g.	7497,9	n.g.	6929,0	n.g.
800	Hybride89	6125,6	n.g.	**		7256,4	n.g.
Saat Mai							
250	Gavott	4858,1	ab ^{†††}	6152,1		5756,3	b
280	KXA3191	5455,6	a	6278,9	a	6663,7	a
400	Hybride13	5069,7	a	**	a	5825,3	b
800	Hybride89	4225,9	b	**		5197,3	b

[†] 25.08., 15.09., 23.10.

^{††} n.g. nicht geschätzt

^{†††} unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede bei $P < 0,05$

** fehlender Wert

Tab. 4.16: Methanertrag ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) Ingolstadt 2004

FAO	Sorte	Erntetermin [†]							
		I		II		III		IV	
250	Gavott	5503,9	a ^{††}	5713,5	b	5655,1	a	4787,2	b
400	KX2386	5527,1	a	6642,2	b	6351,3	a	5825,0	ab
600	KXA4566	5077,5	a	6005,6	b	5388,9	a	6225,4	a
600	Mikado	5674,7	a	8613,0	a	5864,6	a	5709,5	ab

[†] 20.09., 11.10., 26.10., 02.11.

^{††} unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede bei $P < 0,05$

Tab. 4.17: Methanertrag ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) Ismaning 2004

FAO	Sorte	Erntetermin [†]				
		I	II	III	IV	V
250	Gavott	3747,7 ^{††}	3806,8	6565,2	5168,4	5303,6
280	KXA4171	3512,7	3812,6	5473,1	5519,9	5527,4
280	Vitalina	3369,6	5173,8	5965,8	4959,1	4859,2
400	KX 2385	2926,3	3809,4	4646,2	5071,1	5549,0
400	Vic	3928,0	4443,0	6718,7	6138,6	5072,5
600	Mikado	3305,4	3896,3	5643,6	5955,0	4954,4
600	Kermes	3412,3	3539,6	5286,2	4958,7	4818,5
700	Doge	3131,9	2962,9	5090,4	4882,3	4437,8

[†] 27.08., 14.09., 06.10., 22.10., 10.11.

^{††} Varianzanalyse nicht möglich wegen fehlender Wiederholungen

Tab. 4.18: Methanertrag ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) Grucking 2006

FAO	Sorte	Erntetermin [†]							
		I		II		III		IV	
250	Gavott	4707,6	a ^{††}	6632,7	ab	7270,7	b	6697,9	bc
250	KXA6231	4043,5	a	6319,3	b	6501,5	b	6660,9	bc
250	KXA6231br	3595,2	a	5885,4	b	5047,8	c	5335,9	c
400	KXA5243	4421,7	a	7730,9	a	7785,7	ab	7658,6	ab
600	Mikado	4431,6	a	7465,9	ab	8428,0	a	8783,9	a

[†] Erntetermine: 24.08., 19.09., 11.10., 26.10.

^{††} unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede bei $P < 0,05$

4.2 Düngeversuch

Um der Frage nachzugehen, ob späte blattreiche Maissorten mit Gärrest ausreichend versorgt werden können, wurde ein Versuch mit zwei Sorten (mittelfrüh, spät), zwei Düngerarten (mineralisch, organisch) und vier Intensitätsstufen (30, 90, 150, 210 kg N ha⁻¹) angelegt.

4.2.1 Einfluss der Düngerart und Düngeintensität auf den TS-Ertrag

Im Versuchsmittel wurde ein TS-Ertrag von 236 dt ha⁻¹ erzielt (Tab. 4.19). Dabei wurde bereits in der Vergleichsparzelle ein auffallend hoher Ertrag von ca. 213 dt ha⁻¹ erreicht. Mit steigenden Stickstoffmengen (Stufen I bis III) nahmen die Erträge zu. Die stärkste Ertragszunahme mit 20 dt ha⁻¹ erfolgte in der Stufe I. Die zusätzlichen Düngermengen in den Stufen II und III führten nur noch zu einem Ertragsanstieg von im Mittel jeweils ca. 8 dt ha⁻¹, so dass in der Stufe III ein Ertragsniveau von knapp 250 dt ha⁻¹ erzielt wurde.

Tab. 4.19: TS-Ertrag (dt ha⁻¹) in Abhängigkeit von Düngerart und Düngeintensität
(Mittel aus 2 Sorten, 2 Orte, 2 Jahre)

Düngerstufe [†]	Düngerart	Erträge
0		212,6 d ^{††}
I	mineralisch	233,3 c
	organisch	232,2 c
II	mineralisch	240,7 bc
	organisch	239,6 bc
III	mineralisch	245,3 ab
	organisch	250,2 a
Mittel		236,3

[†] 0: Vergleichsparzelle 30 kg N ha⁻¹; I: 90 kg N ha⁻¹; II: 150 kg N ha⁻¹; III: 210 kg N ha⁻¹

^{††} verschiedene Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede bei P < 0,05

Es zeigten sich nur geringe Ertragsunterschiede in Abhängigkeit von der Düngerart (organisch, mineralisch). In den Intensitätsstufen I und II erzielten beide Düngervarianten nahezu dieselben TS-Erträge von ca. 230 dt ha⁻¹ (Stufe I) bzw. ca. 240 dt ha⁻¹ (Stufe II). Nur in der Düngestufe III zeichnete sich tendenziell ein etwas höherer Ertrag bei organischer Düngung ab. Die Variante erzielte im Mittel ca. 250 dt ha⁻¹ gegenüber 245 dt ha⁻¹ bei der mineralischen Variante der Stufe III.

Die detailliertere Betrachtung der einzelnen Jahre und Orte bestätigte diese Tendenz (Anhang Tab. 9.13, Tab. 9.14). Mit Ausnahme von Grucking 2006 lieferte die Stufe III der organischen Düngung tendenziell immer höhere Erträge als die Stufe III der mineralischen Variante.

4.2.2 Einfluss des Reifetyps auf den TS-Ertrag

Die Sortenabhängigkeit des TS-Ertrages ist in Tab. 4.20 dargestellt. Die späte Sorte *Kursus* erzielte im Mittel um ca. 20 dt ha⁻¹ mehr TS als die mittelfrühe Sorte *Gavott*, welche ca. 227 dt ha⁻¹ TS lieferte. Das höhere Leistungspotenzial der Sorte *Kursus* zeigte sich bereits ohne N-Düngung, wo sie ebenso einen um 20 dt ha⁻¹ höheren Ertrag erzielte.

Mineralische Düngung

Die Sorte *Gavott* reagierte auf die mineralische Düngung mit einer Ertragszunahme von ca. 30 dt ha⁻¹. Dieser Ertrag wurde bereits in der Düngestufe I erreicht. Höhere Düngermengen (Stufe II und III) führten nicht zu einem weiteren Ertragsanstieg.

Tab. 4.20: TS-Ertrag (dt ha⁻¹) in Abhängigkeit von Düngerart, Düngeintensität und Reifetyp
(Mittel aus 2 Orte, 2 Jahre)

FAO	Sorten	Düngung								Mittel	
		ohne	mineralisch			organisch			Mittel		
		0 [†]	I	II	III	Mittel	I	II		III	Mittel
250	Gavott	202,9f ^{††}	230,5d	234,7d	232,3d	232,5	220,8e	228,6de	236,9cd	228,7	226,7b
400	Kursus	222,4e	236,0cd	246,7b	258,4a	247,0	243,7bc	250,6b	263,5a	252,6	245,9a
	Mittel	212,6	233,3	240,7	245,3	239,8	232,2	239,6	250,2	240,7	236,3

[†] 0: Vergleichsparzelle 30 kg N ha⁻¹; I: 90 kg N ha⁻¹; II: 150 kg N ha⁻¹; III: 210 kg N ha⁻¹

^{††} verschiedene Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede bei P < 0,05

Bei der Sorte *Kursus* bewirkte die N-Steigerung einen mittleren Ertragsanstieg von ca. 36 dt ha⁻¹. Sie reagierte auf die steigenden N-Gaben in jeder Stufe mit steigenden Erträgen und erzielte selbst in der Intensitätsstufe III einen Mehrertrag von 12 dt ha⁻¹ gegenüber der Stufe II.

Organische Düngung

Mit ca. 229 dt ha⁻¹ (*Gavott*) und 253 dt ha⁻¹ (*Kursus*) bei der organischen Düngung erzielten beide Sorten ähnliche Erträge wie bei der mineralischen Düngung. Im Mittel erhöhte sich bei beiden Sorten der Ertrag um 25 dt ha⁻¹. Beide Sorten steigerten den Ertrag mit steigender Düngeintensität.

Wechselwirkungen zwischen Genotyp und Düngerart sowie Düngeintensität ließen sich nicht statistisch absichern (Anhang Tab. 9.13).

4.2.3 N_{min}-Gehalte nach der Maisernte

Die in Tab. 4.21 dargestellten N_{min}-Gehalte wurden kurz nach der Maisernte in Abhängigkeit von der Düngeintensität und der Düngerart ermittelt. Die Düngung erhöhte in jedem Fall die N_{min}-Gehalte im Boden nach der Ernte. In Freising lag der N_{min}-Vorrat im Boden in der Vergleichsparzelle bei 53 kg N ha⁻¹ und erhöhte sich im Mittel der Düngungsvarianten auf ca. 73 kg N ha⁻¹. Dasselbe zeigte sich in Grucking. Der N_{min}-Gehalt im Boden nahm um ca. 30 kg N ha⁻¹ durch die Düngung zu.

Der N_{min}-Gehalt im Boden zeigte sich unabhängig von der Düngerart. Ob mineralisch oder organisch gedüngt, beide Varianten führten zu nahezu gleichen N_{min}-Gehalten im Boden. So lag der N_{min}-Gehalt in Freising nach mineralischer Düngung im Mittel der Jahre bei ca. 73 kg ha⁻¹ und bei der organischen Düngung bei ca. 72 kg ha⁻¹. In Grucking wurden Werte von 88 kg ha⁻¹ und 83 kg ha⁻¹ ermittelt.

Ein Einfluss der Düngeintensität auf die Höhe des N_{min}-Gehaltes im Boden ließ sich erkennen. Mit steigender N-Gabe stiegen auch die N_{min}-Gehalte. Die Intensitätsstufe I (90 kg ha⁻¹) erhöhte die N_{min}-Gehalte nicht. Die Intensitätsstufe II führte häufig, die Intensitätsstufe III immer zu einer Zunahme der N_{min}-Gehalte. Auch ist festzustellen, dass die gleiche Menge an Mineral-N die N_{min}-Gehalte stärker steigen lässt als die organische Düngung.

Tab. 4.21: N_{\min} -Gehalte (kg N ha^{-1}) im Boden (0 - 90 cm) nach der Maisernte in Abhängigkeit von Düngerart und Düngeintensität (Mittel der Sorten, Freising, Grucking, 2005-2006)

Jahr	0 [†]	mineralisch			Düngung				Mittel	
		I	II	III	Mittel	organisch				
						I	II	III	Mittel	
					Freising					
2005	38,4	52,7	59,2	57,6	56,5	48,0	48,0	52,4	49,5	53,0
2006	67,4	71,0	57,6	142,1	90,2	60,1	113,0	110,4	94,5	92,4
Mittel	52,9	61,8	58,4	99,8	73,3	54,0	80,5	81,4	72,0	72,7
					Grucking					
2005	60,2	66,4	58,0	121,0	81,8	57,1	96,8	95,9	83,2	92,4
2006	68,4	44,1	112,0	128,1	94,7	68,4	130,7	49,8	83,0	88,9
	64,3	55,3	85,0	124,5	88,3	62,7	113,7	72,9	83,1	90,6
Mittel	58,6	58,5	71,7	112,2	80,8	58,4	97,1	77,1	77,5	81,6

[†] 0: Vergleichsparzelle 30 kg N ha^{-1} ; I: 90 kg N ha^{-1} ; II: 150 kg N ha^{-1} ; III: 210 kg N ha^{-1}

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass eine organische Düngung mit Gärrest der mineralischen Düngung im TS-Ertrag gleichwertig war. Der N_{\min} -Gehalt nach der Ernte ist bei der organischen Düngung tendenziell niedriger im Vergleich zur mineralischen Variante. Eine Sortenabhängigkeit war nicht erkennbar.

4.3 Bestandesdichteversuch

4.3.1 Einfluss der Bestandesdichte auf TS-Ertrag, TS-Gehalt und Qualität

TS-Ertrag

In Abb. 4.18 sind die TS-Erträge der Jahre 2002 bis 2005 gemittelt über die Sorten und Orte in Abhängigkeit der Bestandesdichte dargestellt. Das Ertragsniveau der verschiedenen Jahre war unterschiedlich. 2002 wurden die höchsten Erträge erreicht, 2004 und 2005 die niedrigsten. Die Erträge des sehr trockenen Jahres 2003 lagen dazwischen.

Die Bestandesdichte hatte einen signifikanten Einfluss auf den TS-Ertrag (Abb. 4.19). Die Erhöhung der Pflanzenzahl von 6 auf 10 Pfl/m² führte in allen Jahren zu einem Ertragsanstieg. 2002 lag der Ertragsanstieg bei ca. 30 dt ha⁻¹; 2004 und 2005 kam es zu einem Ertragsanstieg um etwa 25 dt ha⁻¹. Im sehr trockenen Jahr 2003 war der Ertragsanstieg mit ca. 10 dt ha⁻¹ am geringsten (Anhang Tab. 9.15 bis Tab. 9.18).

Die Ausweitung der Bestandesdichte auf 12 und 14 Pfl/m² in den Jahren 2004 und 2005 führte zu einem weiteren Ertragsanstieg. Allerdings erhöhte sich der Ertrag in beiden Jahren nur noch um ca. 10 dt ha⁻¹.

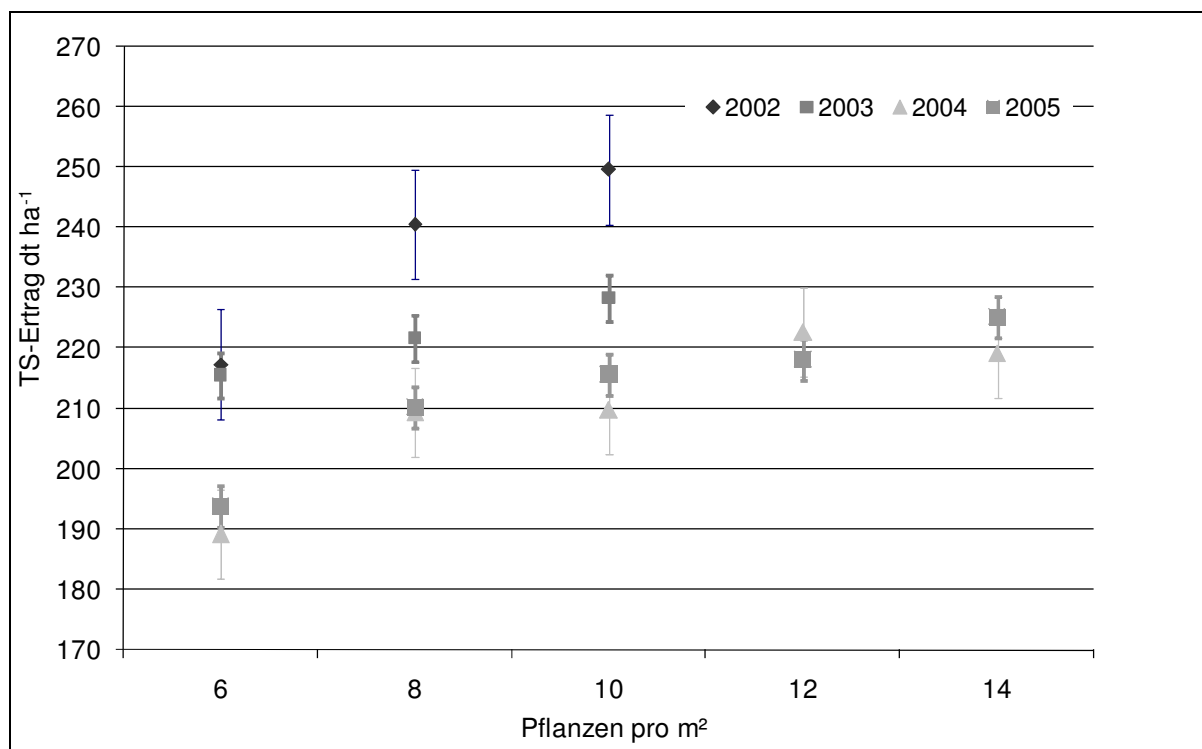


Abb. 4.18: Einfluss der Bestandesdichte auf den TS-Ertrag (Mittel der Sorten und Orte, 2002-2005, Balken zeigen die GD_{5%} der einzelnen Jahre).

In Tab. 4.22 ist die Ertragsveränderung durch die Erhöhung der Bestandesdichte von 6 auf 10 Pflanzen pro m² und in den Jahren 2004 und 2005 zusätzlich von 6 auf 14 Pflanzen pro m² dargestellt. Dabei fiel der hohe Ertragszuwachs bei der Sorte *Gavott* im Vergleich zu den anderen Sorten auf. Abgesehen vom Ausnahmejahr 2003 erzielte sie immer den höchsten Ertragszuwachs durch die Erhöhung der Bestandesdichte. Er lag in den Jahren 2002 und 2004 sehr hoch bei ca. 55 dt ha⁻¹ und ca. 42 dt ha⁻¹.

Betrachtet man die Ertragsveränderung bei der Bestandesdichteerhöhung von 6 auf 10 Pfl/m² so reagierte auch hier *Gavott* immer mit den höchsten Ertragszunahmen (Tab. 4.22). Einen vergleichbaren Ertragszuwachs erzielte bei den späten Sorten nur *KX1393* im Jahr 2002 mit ca. 41 dt ha⁻¹. Die übrigen späten Sorten blieben unter diesem Ertragszuwachs. Die mittelfrühe Vergleichssorte *Gavott* reagierte stärker auf die Erhöhung der Bestandesdichte als die späteren Sorten.

Tab. 4.22: Ertragsveränderung (Δ TS dt ha⁻¹) durch Erhöhung der Bestandesdichte in Abhängigkeit vom Reifetyp (Mittel über Orte 2002-2005)

Sorten	Erhöhung der Bestandesdichte von 6 auf 10 Pfl m ⁻²			Sorten	Erhöhung der Bestandesdichte von 6 auf 10 Pfl m ⁻²			Sorten	Erhöhung der Bestandesdichte von 6 auf 10 Pfl m ⁻²			
	2002				2003				2004			2005
	FAO	Δ		FAO	Δ		FAO	Δ		FAO	Δ	
Gavott	250	54,6		Gavott	250	17,8	Gavott	250	31,5	Gavott	250	32,2
KX2181	270	36,3		KX3191	280	18,8	KX2386	400	26,6	KXA5230	280	18,9
Hybride13	400	28,1		Hybride 13	400	-3,4	KXA4566	600	20,1	KXA5243	400	25,0
Hybride14	400	23,4		Hybride 12	400	28,2	Mikado	600	4,7	Mikado	600	10,3
Hybride45	400	30,9		Hybride 15	400	27,7						
KX1393	400	41,4		Hybride 16	400	28,9						
KX1391	400	25,8		Vic	400-450	2,7	Erhöhung der Bestandesdichte von 6 auf 14 Pfl/m ²					
Vic	400-450	36,8		KX 1393	400	32,5	Gavott	250	55,2	Gavott	250	41,5
KX1568	600	30,9		Mikado	600	4,2	KX2386	400	31,8	KXA5230	280	33,9
Mikado	600	36,1		Hybride 59	600	-3,7	KXA4566	600	19,8	KXA5243	400	29,7
Kismet	600	13,8		Hybride 89	800	13,1	Mikado	600	13,5	Mikado	600	20,2
Doge	700	29,7		Hybride 90	800	-13,6						

GD_{5%}:2002: 14,3; 2003: 23,1; 2004: 15,3; 2005: 16,2

In den Jahren 2004 und 2005 wiesen die Sorten mit hohen FAO-Zahlen geringere Ertragszuwächse als Sorten mit niedrigeren FAO-Zahlen auf. In den Versuchsjahren 2002 und 2003 wurde dieser Zusammenhang nicht eindeutig festgestellt. Innerhalb einer Reifegruppe schwankten die Ertragszunahmen deutlich.

Im Jahr 2003 war die Ertragszunahme der Vergleichssorte mit knapp 18 dt ha⁻¹ in Abhängigkeit von der Bestandesdichte vergleichsweise gering und nur in diesem Jahr erzielten die

späten Sorten zum Teil höhere Ertragszuwächse als die Vergleichssorte (vergleiche *Hybride 12, 13, 15, 16* und *KX1393*). Außerdem wurden nur in diesem Jahr so geringe Zuwächse von zum Teil unter 4 dt ha⁻¹ bzw. sogar Ertragsrückgänge um bis zu ca. 13 dt ha⁻¹ in Abhängigkeit von der Bestandesdichte festgestellt.

Obwohl es z.T. deutliche Ertragsunterschiede zwischen den Reifetypen in Abhängigkeit der Bestandesdichte gab, konnte nur für das Jahr 2004 eine signifikante Wechselwirkung festgestellt werden. 2002 und 2003 war eine Wechselwirkung nur sehr schwach ausgebildet und im Jahr 2005 nicht nachweisbar (Tab. 4.25).

TS-Gehalt

Die Bestandesdichte hatte in allen Versuchsjahren und über alle Orte ausgewertet keinen signifikanten Einfluss auf den TS-Gehalt. Es ließen sich keine Tendenzen erkennen (Tab. 4.23). Der deutlich höhere TS-Gehalt im Jahr 2003 von ca. 43 % ist durch die sehr trockene und überdurchschnittlich warme Witterung bedingt.

Tab. 4.23: TS-Gehalt (% FM) in Abhängigkeit von der Bestandesdichte (Pflanzen m⁻²)
(Mittel der Sorten und Orte)

Jahre	Pflanzen pro m ²					Mittel
	6	8	10	12	14	
2002	33,1 a ^{††}	33,2 a	32,8 a	n.b. [†]	n.b.	33,0
2003	42,7 a	42,2 a	42,9 a	n.b.	n.b.	42,6
2004	31,9 a	32,2 a	31,3 a	31,2 a	31,7 a	31,7
2005	31,8 a	31,9 a	31,7 a	31,2 a	31,4 a	31,6

[†] nicht bestimmt

^{††} verschiedene Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede bei P < 0,05

Ein genotypspezifischer Einfluss der Bestandesdichte auf die TS-Gehalte wurde nicht gefunden (Tab. 4.25). Die TS-Gehalte veränderten sich durch die Erhöhung der Bestandesdichte nicht. Selbst bei den extrem niedrigen und hohen Bestandesdichten von 6 und 14 Pfl m⁻² konnte kein Einfluss festgestellt werden (Anhang Tab. 9.15 bis Tab. 9.18).

Qualitätsmerkmale

Der Einfluss der Bestandesdichte auf die Qualitätsmerkmale war nicht jedes Jahr gleich stark, aber immer gleichgerichtet (Tab. 4.24). Im Anhang Tab. 9.15 bis 9.18 sind die Mittelwerte (über die Sorten und Orte) der Qualitätsmerkmale in Abhängigkeit der Bestandesdichte dargestellt.

Tab. 4.24: Signifikanz des Bestandesdichteeinflusses auf Ertrag und Qualitätsmerkmale
(Mittel der Sorten und Orte)

	2002	2003	2004	2005
TS-Ertrag	*† ↑††	* ↑	* ↑	** ↑
TS-G	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Stärke	n.s.	n.s.	* ↓	n.s.
Zucker	** ↓	n.s.	n.s.	+ ↓
RP	n.s.	* ↓	+ ↓	+ ↓
NDF	+ ↑	** ↑	* ↑	** ↑
ADF	n.s.	* ↑	+ ↑	** ↑
ELOS	+ ↓	** ↓	* ↓	** ↓
IVDOM	+ ↓	** ↓	* ↓	** ↓
MA	n.s. †††	n.b.	n.b.	n.b.

† Signifikanzniveau: n.s. nicht signifikant; +: $P < 0,1$; *: $P < 0,05$; **: $P < 0,01$

†† Pfeile bedeuten eine Zu (↑) - bzw. Abnahme (↓) des Merkmals mit steigender Bestandesdichte

††† nicht bestimmt

Wechselwirkungen zwischen „Sorte“ und „Bestandesdichte“ auf die Höhe der Inhaltsstoffe waren nur schwach ausgeprägt (Tab. 4.25). Es konnten für einzelne Jahre und da auch nur für die Merkmale Stärke, Zucker und RP signifikante Wechselwirkungen festgestellt werden.

Die Sorten unterschieden sich je nach FAO-Klassifizierung deutlich im Stärkegehalt. Im Jahr 2003 reagierten Sorten mit sehr hohen FAO-Zahlen (600) auf höhere Bestandesdichten mit niedrigeren Stärkegehalten als Sorten mit niedrigeren FAO-Zahlen. Hier nahm der Stärkegehalt mit der Bestandesdichte zu. Dieser Zusammenhang zeigte sich in den anderen Jahren lediglich tendenziell.

Tab. 4.25: Wechselwirkung zwischen Reifetyp und Bestandesdichte auf Ertrag und Qualitätsmerkmale (Mittel über Orte)

	2002	2003	2004	2005
TS-Ertrag	+ [†]	+	*	n.s.
TS-G	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Stärke	n.s.	*	n.s.	n.s.
Zucker	+	*	n.s.	*
RP	*	n.s.	n.s.	+
NDF	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
ADF	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
ELOS	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
IVDOM	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
MA	n.s.	n.b.	n.b. ^{††}	n.b.

[†] Signifikanzniveau: n.s. nicht signifikant; +: $P < 0,1$; *: $P < 0,05$; **: $P < 0,01$

^{††} nicht bestimmt

Komplementär zum Stärkegehalt verhielt sich der Zuckergehalt im Jahr 2003. Mit steigender Bestandesdichte zeigten Sorten mit FAO-Zahlen über 600 eine Zunahme des Zuckergehaltes. Im Gegensatz dazu nahmen die Zuckergehalte bis FAO 400 mit steigender Bestandesdichte ab. Tendenziell zeigte sich dieser Trend auch in den anderen Jahren.

Der RP-Gehalt der Sorten reagierte auf höhere Bestandesdichten entweder nicht oder nahm ab. Die Mehrheit der Sorten zeigte eine Abnahme des RP-Gehaltes. Diese war allerdings unabhängig von der Reifezahl. Späte Sorten zeigten keine stärkere Abnahme als frühe Sorten.

Methanausbeute

Im Versuchsjahr 2002 wurden die Sorten in Abhängigkeit von der Bestandesdichte auch auf ihre spezifische Methanausbeute hin analysiert. Die Methanausbeute variierte in einem Bereich von ca. 310 bis 350 NI (kg OTS)⁻¹ (Tab. 4.26) Im Durchschnitt wurde eine Methanausbeute von ca. 330 NI (kg OTS)⁻¹ erzielt, die sich in Abhängigkeit der Bestandesdichte wenig veränderte (Anhang Tab. 9.15). Die späteren Sorten hatten im Vergleich zur *Gavott* eine tendenziell geringere Methanausbeute. Mit zunehmender Bestandesdichte blieb bei den Sorten aus dem Reifebereich 400 die Methanausbeute überwiegend in etwa gleich hoch. Demgegenüber zeigten die späten Sorten aus dem Reifebereich 600 tendenziell eine Abnahme der Methanausbeute mit steigender Bestandesdichte. Absichern ließ sich diese Ab-

nahme allerdings nicht. Es konnte kein signifikanter Einfluss der Bestandesdichte (Tab. 4.24) und keine Wechselwirkung zwischen Reifetyp und Bestandesdichte gefunden werden (Tab. 4.25).

Tab. 4.26: Einfluss von Reifetyp und Bestandesdichte auf die Methanausbeute (NI (kg OTS)⁻¹), (2002, 2 Orte)

FAO	Sorte	6	8	10	Mittel
			Pfl. m ²		
250	Gavott	341,7	346,3	343,2	343,7
270	KX2181	340,6	337,3	348,5	342,2
400	Vic	330,3	336,8	330,1	332,4
400	Hybride13	348,2	338,8	335,8	340,9
400	Hybride14	336,4	338,6	330,7	335,2
400	Hybride45	339,3	341,7	338,6	339,9
400	KX1393	320,7	324,6	331,4	325,6
400	KX1391	339,3	337,3	338,5	338,4
600	KX1568	333,0	327,0	327,3	329,1
600	Mikado	338,2	328,5	320,0	328,9
600	Kismet	329,7	331,7	313,2	324,9
700	Doge	327,6	323,0	317,8	322,8
	Mittel	335,4	334,3	331,3	333,7

GD 5%: Bestandesdichte = 9,8 NI (kg OTS)⁻¹; Sorten = 12,6 NI (kg OTS)⁻¹; B x S = 18,4 NI (kg OTS)⁻¹

Insgesamt zeigten die Versuche, dass die Bestandesdichte von 10 Pfl. m² auch bei späten Sorten die höchsten Erträge erbrachte. Die Ausweitung der Bestandesdichte auf bis zu 14 Pfl. m² führte nur noch zu einem geringeren Ertragsanstieg. Dagegen lagen die Erträge bei Bestandesdichten von 6 bzw. 8 Pfl. m² deutlich niedriger.

Die Wahl der Bestandesdichte zeigte nur einen geringen und wenig relevanten Einfluss auf die Qualitätsparameter. Der TS-Gehalt wurde nicht beeinflusst, ebenso wenig die Höhe der Methanausbeute.

4.4 Energiebilanzierung

Die ermittelten energetischen Kennzahlen in Abhängigkeit der Düngerart und Düngeintensität sind in Tab. 4.27 dargestellt.

4.4.1 Energiebindung

Die verschiedenen Varianten wiesen im Mittel eine Energiebindung durch die Biomasse von ca. 435 GJ ha⁻¹ auf. Die Variante 0 hatte den geringsten Biomasseertrag und damit die geringste Energiebindung von ca. 390 GJ ha⁻¹, mineralische Düngung führte zu einer durchschnittlichen Energiebindung von ca. 440 GJ ha⁻¹ und die Variante organische Düngung erzielte die höchste Bindung von ca. 444 GJ ha⁻¹. In den Intensitätsstufen I bis III (90, 150, 210 kg N ha⁻¹) stieg die Energiebindung in Abhängigkeit von der N-Gabe an und verhielt sich analog zum Biomasseertrag.

4.4.2 Energieeinsatz

Maisproduktion

Der fossile Energieeinsatz der Maisproduktion lag im Mittel bei 10,7 GJ ha⁻¹ (Tab. 4.27). Erwartungsgemäß lag der Energieeinsatz bei der Variante ohne Düngung mit 8,4 GJ ha⁻¹ am niedrigsten. Im Mittel der N-Stufen unterschied sich die mineralische von der organischen Variante um ca. 4 GJ ha⁻¹. Während bei der mineralischen Variante vor allem die Düngherstellung mit 5,8 GJ ha⁻¹ Hauptverursacher des Energieeinsatzes war, war es bei der organischen Variante der Kraftstoffverbrauch, der den Energieeinsatz mit 4,1 GJ ha⁻¹ am stärksten belastete. Im Mittel aller Varianten hatte der Energieeinsatz für Kraftstoff und Mineraldüngerherstellung etwa einen Anteil von 70 % am Gesamtenergieeinsatz.

In den einzelnen Intensitätsstufen zeigte sich eine stärkere Differenzierung zwischen der mineralischen und organischen Variante. Der Energiebedarf für den Pflanzenschutzmitteleinsatz und die Saatguterzeugung blieb in allen Stufen konstant, da sie unabhängig von der Intensitätsstufe immer in gleicher Menge angewandt wurden. Der Energiebedarf für die Herstellung von Mineraldünger, Dieselkraftstoff und Herstellung und Nutzung der Investitionsgüter ist intensitäts- bzw. mengenabhängig und stieg dementsprechend mit steigender Düngermenge und steigendem Ertrag an.

Tab. 4.27: Energiebilanz von Silomais zur Stromerzeugung aus Biogas in Abhängigkeit von Düngerart und Düngeintensität (Mittel über Sorten, Orte und Jahre)

Kennzahl	ME	0 [†]	MD	OD	MD			OD			MW
					I	II	III	I	II	III	
Energiebindung Biomasse	GJ ^{††} ha ⁻¹	390	440	444	426	442	452	424	447	460	435
Ernteertrag	GE ha ⁻¹	98	114	115	109	116	118	109	115	123	112
Ernteertrag	dt TS ha ⁻¹	213	240	241	233	241	245	232	240	250	236
<hr/>											
Energieeinsatz, <i>gesamt</i>	GJ ha ⁻¹	23,9	30,4	26,7	27,7	30,4	32,9	25,8	26,5	27,8	27,9
<hr/>											
Maisproduktion	GJ ha ⁻¹	8,4	12,9	9,2	10,8	13,0	15,1	8,9	9,1	9,6	10,7
Saatgut, Bereitstellung		0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
- Mineraldünger		1,5	5,8	1,5	3,7	5,8	7,9	1,5	1,5	1,5	3,3
- Pflanzenschutzmittel		1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
- Investitionsgüter (Maschinen u. Geräte)		1,4	1,6	1,8	1,5	1,6	1,6	1,6	1,8	1,9	1,6
- Dieselkraftstoff		3,6	3,8	4,1	3,8	3,8	3,8	4,0	4,0	4,3	3,9
Bau und Betrieb Biogasanlage	GJ ha ⁻¹	15,5	17,4	17,5	17,0	17,5	17,8	16,9	17,4	18,2	17,2
<hr/>											
Stromerzeugung – <i>Konversion</i>	GJ ha ⁻¹	84,0	94,7	95,1	92,2	95,1	96,9	91,7	94,6	98,8	93,3
<hr/>											
Maisproduktion											
- Energieoutput	GJ ha ⁻¹	381	426	429	415	428	436	412	432	443	421
- Energieintensität	MJ GE ⁻¹	86	113	80	99	112	128	82	79	78	95
- Output/Input-Verhältnis		45	33	47	39	33	29	46	48	46	39
Stromproduktion											
- Energieoutput	GJ ha ⁻¹	60	64	68	64	65	64	66	68	71	66
- Energieintensität	MJ kWh _{el} ⁻¹	1,0	1,2	1,0	1,1	1,2	1,2	1,0	1,0	1,0	1,1
- Output/Input-Verhältnis		2,5	2,1	2,6	2,3	2,1	1,9	2,6	2,6	2,6	2,3

[†] 0: Vergleichsparzelle 30 kg N ha⁻¹, MD: Mineralische Düngung, OD: Organische Düngung; I: 90 kg N ha⁻¹, II: 150 kg N ha⁻¹, III: 210 kg N ha⁻¹;

^{††} 1 GJ entspricht ca. 278 kWh.

Bei der mineralischen Variante stieg der Energieeinsatz gemäß den steigenden N- Gaben kontinuierlich von ca. 11 auf 15 GJ ha⁻¹ an (Tab. 4.27), im Wesentlichen verursacht durch den steigenden Energiebedarf der Düngerherstellung.

Bei der organischen Düngung stieg der Energieeinsatz von Stufe I auf Stufe III um nur 1 GJ ha⁻¹ auf ca. 10 GJ ha⁻¹ an. Hier war es der Dieselkraftstoffbedarf und Energieeinsatz für Maschinen und Geräte für die zusätzliche Gärrestaubsbringung, die für den etwas höheren Energieeinsatz verantwortlich zeichnete.

Die Unterschiede zwischen der mineralischen und organischen Variante der Intensitätsstufen I bis III waren im Wesentlichen durch den Energieeinsatz der Mineraldüngerherstellung

begründet. Die Differenz betrug bei der Stufe I $1,9 \text{ GJ ha}^{-1}$, bei der Stufe II $3,9 \text{ GJ ha}^{-1}$ und stieg bei der Stufe III immerhin auf $5,5 \text{ GJ ha}^{-1}$ an.

Für den Bau und Betrieb der Biogasanlage wurde im Mittel 17 GJ ha^{-1} benötigt. Da der Energiebedarf der Konversion eine mengenabhängige Größe ist, stieg er mit zunehmendem Ertrag an. Allerdings waren die Unterschiede zwischen den Varianten und den Düngerstufen gering.

4.4.3 Stromerzeugung

Dem Energieeinsatz stand die Stromerzeugung aus Biogas gegenüber. Im Mittel wurden pro ha Silomais ca. 93 GJ Strom erzeugt. Da die Stromerzeugung von der Höhe des Ertrages abhing, stieg die Stromerzeugung mit dem Biomasseertrag an.

4.4.4 Energieoutput, Energieintensität und Output/Input-Verhältnis

Maisproduktion

Die Energiebilanz des Maisanbaus zeigte, dass sich aufgrund der hohen Energiebindung im Biomasserertrag nach Abzug des Energieinputs ein Netto-Energieoutput von ca. 421 GJ ha^{-1} ergibt. Für die Silomaiserzeugung wurde eine Energieintensität von ca. 95 MJ pro GE ermittelt (Tab. 4.27). Das Output/Input-Verhältnis lag bei ca. 40.

Energieoutput

Da der Energieoutput ertragsabhängig ist, erzielten die ertragreichen Varianten auch den höheren Energieoutput. Die mineralische Düngervariante lag um 3 GJ ha^{-1} unter der organischen Variante (Tab. 4.27). Der Output der Nullvariante war um ca. 40 GJ ha^{-1} niedriger als der Output der Düngervarianten.

Energieintensität

In der Energieintensität schnitt die organische Düngervariante am besten ab. Sie benötigte einen Energieeinsatz pro GE von nur 80 MJ , die Nullvariante lag knapp darüber, während die Mineraldüngervariante mit 113 MJ GE^{-1} deutlich über der organischen Variante lag.

Output/Input-Verhältnis

Im Output/Input-Verhältnis zeigten sich deutliche Unterschiede zwischen den Varianten. Das beste Output/Input-Verhältnis lieferte die organische Düngung mit ca. 47. Am niedrigsten war die Mineraldüngervariante, die ein Output/Input-Verhältnis von nur 33 erreichte.

Bei der Mineraldüngervariante nahm das Output/Input-Verhältnis mit steigender Intensität ab, so dass in der Stufe III nur noch ein Faktor von knapp 30 erzielt wurde. Im Gegensatz dazu blieb in der organischen Düngervariante trotz steigender Gärrestausbringmengen das Output/Input-Verhältnis konstant bei ca. 46.

Stromproduktion

Betrachtet man die Energiebilanz vom Silomaisanbau bis zur Einspeisung des aus Silomais erzeugten Stroms so ergaben sich folgende Kennzahlen.

Energieoutput

Aus der in der Biomasse ursprünglich gebundenen Energie von knapp 435 GJ ha^{-1} wurden ca. 94 GJ ha^{-1} elektrischer Strom erzeugt, allerdings wurden dafür knapp 28 GJ ha^{-1} Strom eingesetzt. Daraus resultierte auf der Ebene der Stromproduktion ein Energieoutput von ca. 66 GJ ha^{-1} . Der Energiesaldo der Stromproduktion von Silomais in Biogasanlagen war deutlich positiv. Den geringsten Energieoutput erzielte die Nullvariante mit ca. 60 GJ ha^{-1} , den höchsten die organische Düngervariante mit ca. 68 GJ ha^{-1} . Organische und mineralische Variante unterschieden sich um ca. $4 \text{ GJ Strom ha}^{-1}$.

Energieintensität

Im Mittel wurden pro erzeugten Kilowattstunde Strom aus Mais ein Energieeinsatz für die gesamte Erzeugungskette von $1,1 \text{ MJ}$ nötig. Die Unterschiede zwischen den Varianten und Intensitäten waren unbedeutend.

Output/Input-Verhältnis

Bei der Nutzung von Mais zur Stromerzeugung wurde pro eingesetzte Energieeinheit im Mittel aller Varianten etwa die 2,3 fache Energiemenge erzeugt. Am besten schnitten die Nulldünger- und die organische Düngervariante mit dem Faktor 2,5 bzw. 2,6 ab. Bei der mineralischen Variante erzielte man pro Energieinput nur die 2fache Menge, die mit steigender Düngeintensität leicht abnahm. Bei der organischen Variante blieb das Verhältnis zwischen Output/Input in Abhängigkeit der Düngeintensität konstant bei 2,6.

4.4.5 Einfluss des Genotyps

Der Sorteneinfluss auf den TS-Ertrag machte sich auch in der Energiebilanz bemerkbar. Die späte Sorte *Kursus* erzielte aufgrund des höheren Ertrages eine höhere Energiebindung und dadurch einen höheren Energieoutput bei der Maisproduktion von ca. 423 GJ ha⁻¹ im Vergleich zur Sorte *Gavott*, die ca. 406 GJ ha⁻¹ erbrachte (Anhang Tab. 9.21 und Tab. 9.22). Da ein höherer Ertrag höhere Energieaufwendungen vor allem bei der Ernte und dem Transport bedeutet, hatte die Sorte *Kursus* im Mittel einen geringfügig höheren Energieeinsatz von 10,7 GJ ha⁻¹ gegenüber der Sorte *Gavott* mit 10,5 GJ ha⁻¹.

Dementsprechend war die Sorte *Gavott* die leicht energieintensivere Sorte und zeigte ein etwas niedrigeres Output/Input-Verhältnis.

Analog reagierten die Energieparameter bezogen auf die Stromproduktion. Die Sorte *Kursus* zeigte günstigere Kennzahlen im Vergleich zur *Gavott*. Die Unterschiede waren allerdings nicht relevant.

4.5 CO₂-Bilanzierung

4.5.1 Vermiedene CO₂- Emissionen durch Stromeinspeisung

In Tab. 4.28 sind die Ergebnisse der CO₂-Bilanzierung für die verschiedenen Düngervarianten dargestellt. Ausgehend vom Ernteertrag wurde der Methan- und Stromertrag errechnet. Im Schnitt wurden aus einem Hektar Mais knapp 26.000 kWh Strom erzeugt. Aufgrund des niedrigen TS-Ertrages lieferte die Nullvariante den geringsten Stromertrag. Die Düngervarianten unterschieden sich kaum. Mit steigender Düngeintensität stieg sowohl bei der mineralischen als auch organischen Düngungsvariante der Stromertrag an. Den höchsten Stromertrag erzielte die Stufe III der organischen Düngung mit ca. 27.500 kWh ha⁻¹

Die durch die Stromeinspeisung ins Netz vermiedenen CO₂-Emissionen lagen im Mittel bei ca. 16.000 kg ha⁻¹. Die Höhe verhielt sich analog zum Stromertrag. Die vermiedenen Emissionen waren bei der Nullvariante am niedrigsten, die Düngerart (organisch, mineralisch) zeigte auf die Höhe kaum Einfluss, aber mit steigender Düngeintensität stieg auch die Substitutionsleistung an. Dementsprechend erzielte die Stufe III der organischen Düngung die höchste Substitutionsleistung von ca. 17.000 kWh ha⁻¹.

4.5.2 CO₂-Emissionen der Maisproduktion

Die CO₂-Emissionen aus der Produktion von Mais lagen bei ca. 5.300 kg ha⁻¹ (Tab. 4.28). Die Hauptursache hierfür lag in der CO₂-Freisetzung bedingt durch den Humusabbau, der mit 3.755 kg ha⁻¹ etwa 70 % der Emissionen verursachte.

Insgesamt schnitt die organische Düngervariante am besten ab. Die Maisproduktion mit organischer Düngung führte zu Emissionen, die um 1.600 kg CO_{2äq} ha⁻¹ niedriger waren als die mineralische Düngervariante mit ca. 6.100 kg CO_{2äq} ha⁻¹. Selbst die Vergleichsvariante ohne Düngung wurde von der organischen Düngervariante um 500 kg CO_{2äq} ha⁻¹ unterschritten. Die C-Sequestrierung durch die humusaufbauende Wirkung der organischen Düngervariante kam hier deutlich zur Geltung.

Wegen des Verbrauchs von Mineraldünger erhöhten sich die CO₂-Emissionen bei der Mineraldüngervariante um ca. 300 kg CO_{2äq} ha⁻¹. Demgegenüber waren die Unterschiede der CO₂-Emissionen aus Saatgut, Pflanzenschutzmittel, Investitionsgüter und Dieselkraftstoff unbedeutend.

Die Emissionen aus Lachgas lagen im Schnitt bei 824 kg CO_{2äq} ha⁻¹ und waren bei der Nullvariante mit 286 CO_{2äq} ha⁻¹ am niedrigsten. Düngung führte zu einer Verdreifachung der Emissionen. Der Unterschied zwischen der mineralischen und organischen Variante war mit 70 kg CO_{2äq} ha⁻¹ gering (Tab. 4.28).

Tab. 4.28: CO₂-Bilanz von Silomais zur Stromerzeugung aus Biogas in Abhängigkeit von Düngerart und Düngeintensität (Mittel der Sorten, Orte und Jahre)

Kennzahl	ME	0 [†]	MD	OD	MD			OD			MW
					90	150	210	90	150	210	
Energiebindung	GJ ha ⁻¹	390	440	444	426	442	452	424	447	460	435
Erntertrag	TS dt ha ⁻¹	213	240	241	233	241	245	232	240	250	236
Methanertrag	m ³ ha ⁻¹	6.665	7.517	7.545	7.314	7.546	7.690	7.279	7.511	7.844	7.408
Stromertrag	kWh _{el} ha ⁻¹	23.328	26.308	26.407	25.599	26.411	26.916	25.478	26.290	27.453	25.928
Einsatz fossiler Energie	GJ ha ⁻¹	8	13	14	11	13	15	11	14	17	13
N-Zufuhr (ohne NH ₃ -Verluste)	kg N ha ⁻¹	49	163	151	106	163	220	100	151	202	142
Δ C Humus	kg C ha ⁻¹	-1.177	-1.177	-818	-1.177	-1.177	-1.177	-998	-818	-638	-1.023
CO ₂ -Emissionen Energieeinsatz	kg CO _{2äq} ha ⁻¹	573	835	621	711	835	959	605	612	646	706
- Saatgut		66	66	66	66	66	66	66	66	66	66
- Mineraldünger		91	337	91	214	336	460	91	91	91	196
- Pflanzenschutzmittel		80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
- Investitionsgüter (Maschinen u. Geräte)		63	69	78	67	69	69	72	78	84	72
- Dieseldieselkraftstoff		272	284	306	284	284	285	296	297	325	292
N ₂ O-Emissionen	kg CO _{2äq} ha ⁻¹	286	948	879	617	948	1280	582	879	1.175	824
C-Freisetzung Boden	kg CO _{2äq} ha ⁻¹	4.321	4.321	3.001	4.321	4.321	4.321	3.661	3.001	2.341	3.755
CO ₂ -Emissionen Produktion	kg CO _{2äq} ha ⁻¹	5.179	6.105	4.501	5.649	6.104	6.560	4.849	4.493	4.163	5.285
CO ₂ -Emissionen Bau und Betrieb	kg CO _{2äq} ha ⁻¹	2.286	2.578	2.588	2.509	2.588	2.638	2.497	2.576	2.690	2.541
CO ₂ -Emissionen Substitution	kg CO _{2äq} ha ⁻¹	14.626	16.495	16.557	16.050	16.560	16.876	15.975	16.484	17.213	16.257
CO ₂ -Bilanz	kg CO _{2äq} ha ⁻¹	-7.161	-7.813	-9.468	-7.893	-7.867	-7.678	-8.629	-9.415	-10.360	-8.431

[†] 0: Vergleichsparzelle 30 kg N ha⁻¹, MD: Mineralische Düngung, OD: Organische Düngung; I: 90 kg N ha⁻¹, II: 150 kg N ha⁻¹, III: 210 kg N ha⁻¹

4.5.3 CO₂-Emissionen beim Bau und Betrieb der Biogasanlage

Die Emissionen aus dem Bau und Betrieb der Biogasanlage betragen durchschnittlich ca. 2.500 kg CO_{2äq} ha⁻¹. Da sie von der erzeugten Strommenge abhängen, waren die Emissionen der Variante ohne Düngung, aufgrund des niedrigeren TS-Ertrages und dadurch niedrigeren Stromertrages geringer. Die Düngerart hatte auf die Emissionshöhe bei der Konversi-

on keinen Einfluss. Beide Varianten führten ungefähr zu denselben CO₂-Emissionen. Sie stiegen mit zunehmender Düngermenge bzw. TS-Ertrag an.

4.5.4 Saldo der CO₂-Emissionen aus Produktion, Konversion und Substitution

Wird den CO₂-Emissionen aus Produktion und Bau und Betrieb der Biogasanlage die Vermeidung durch Substitution gegenübergestellt, so zeigt die Berechnung deutlich, dass der Maisanbau zur Stromerzeugung aus Biogas zu einer CO₂-Vermeidung von ca. 8.400 kg CO_{2äq} ha⁻¹ in der Atmosphäre beitrug.

Die organische Düngervariante schnitt am besten ab. Die steigenden Gärrestgaben führten zu einer deutlichen Reduzierung der C-Freisetzung, so dass bei hohen Düngergaben die CO₂-Emissionen trotz steigenden Energieeinsatzes sogar niedriger waren als bei geringen Düngergaben. Die beste Reduzierungsleistung erzielte die Stufe III der organischen Düngervariante. Sie war mit 10.000 kg CO_{2äq} ha⁻¹ um knapp 3.000 kg CO_{2äq} ha⁻¹ höher als bei der mineralischen Variante. Die Stufe III der mineralischen Variante unterschied sich von der Vergleichsvariante ohne Düngung hingegen nur um ca. 700 kg CO_{2äq} ha⁻¹ gering. Bei der mineralischen Düngervariante blieb mit steigender Düngermenge das Saldo relativ konstant bei einer Vermeidungsleistung von ca. 7.800 kg CO_{2äq} ha⁻¹ (Tab. 4.28).

4.5.5 Einfluss des Genotyps

Es zeigte sich kein Einfluss des Geno- bzw. Reifetyps auf die Höhe der CO₂-Emissionen in Abhängigkeit der Düngerart und Düngeintensität (Anhang Tab. 9.23 und Tab. 9.24). Beide Sorten reagierten gleich. Das höhere Ertragsniveau der Sorte *Kursus* schlug sich auch im Saldo nieder. Sie erzielte im Mittel eine um 1.000 kg CO_{2äq} ha⁻¹ bessere Klimabilanz als die mittelfrühe Sorte *Gavott*.

5 Diskussion

5.1 Ernteterminversuch

5.1.1 Qualität der Daten

Die vorliegende Arbeit gehört zu den wenigen wissenschaftlichen Untersuchungen zum Energiepflanzenanbau, die sich ausschließlich auf eine Kulturart, in diesem Fall Mais, konzentriert. Der Probenumfang von etwa 300 Analysen und die Anzahl der Jahre (vier) und Sorten (4 bis 12) ermöglichen eine umfassende Auswertung und Interpretation.

Während die Analyse der Inhaltsstoff- und Qualitätsparameter mit NIRS zum anerkannten Stand der Methoden gehört, zählt die Analyse der Methanausbeute noch zu den jüngeren Techniken, so dass die Frage nach der Methodeneignung vor allem für eine vergleichende Diskussion nötig ist.

Der hier verwendete Hohenheimer Biogasertragstest zur Analyse der Gasausbeute unterscheidet sich von den anderen Methoden durch drei wesentliche Aspekte:

1. Es werden nur 500 mg Probenmaterial eingewogen.
2. Das Probenmaterial wird nicht siliert, sondern frisch vom Feld geerntet und bei 60 °C schonend getrocknet.
3. Das Probenmaterial wird auf 1 mm Siebgröße gemahlen.

Durch die geringe Einwaagemenge besteht ein Risiko des Einwaagefehlers. Der Durchführung ist daher eine große Genauigkeit abzuverlangen, weit mehr als in den vergleichbaren Methoden, die mit größeren Probenmengen arbeiten. Auch ist der Probenbereitstellung, der Homogenität der Probe bei geringeren Mengen größeres Augenmerk zu schenken. Ungenauigkeiten bei der Probennahme oder Entmischungen haben einen stärkeren Einfluss auf das Ergebnis bei kleiner Probenmenge als bei großer Menge.

Die Gefahr, dass Mahlen des Substrates auf 1 mm zu einem stärkeren Aufschluss führt und dadurch höhere Ausbeuten erzielt werden, konnte nicht bestätigt werden. Nach Analysen von HELFFRICH & OECHSNER (2003) hat die Probenaufbereitung keinen Einfluss auf die Höhe der Gasausbeute. Dies ist auch insofern zu erwarten, da die Zerkleinerung des Materials auf 1 mm nicht mit einer Zerstörung der Zellwände und Zellen einhergeht, da die Siebgröße 1 mm dafür zu groß ist.

Durch die Verwendung von frisch getrocknetem Material können vor allem Fehler bei der Silagebereitung vermieden werden. Material, welches schlechte Siliereigenschaften besitzt, kann trotzdem relativ verlässlich auf die Gasausbeute untersucht werden. In der vorliegenden Arbeit war es notwendig, Material mit sehr niedrigen und sehr hohen TS-Gehalten zu untersuchen. Niedrige TS-Gehalte können zu höheren Silagesaftverlusten führen, hohe TS-Gehalte zu einer ungenügenden Verdichtung der Silage. Beides beeinflusst die Silagequalität und kann letztlich Einfluss auf die erzielbare Methanausbeute haben. Sortenunterschiede, die auf die Zusammensetzung der Pflanze zurückzuführen sind, werden bei frisch getrocknetem Material nicht durch den Siliereinfluss überlagert.

Im Vergleich mit anderen Methoden zeichnet sich der HBT durch einen niedrigen Variationskoeffizienten von unter 10 % aus (OECHSNER et al. 2003). Dies ist auch damit zu begründen, dass die Probenherstellung wenigen Einflüssen unterliegt. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass die hier vorgestellten Ergebnisse eine gute Qualität aufweisen.

5.1.2 Einfluss des Erntetermins auf die Methanausbeute

In mehrjährigen Versuchen mit Silomais wurde der Einfluss des Erntetermins und ausgewählter Qualitätsparameter unterschiedlicher Maisreifetypen auf die Methanausbeute untersucht. In die Auswertung gingen bis zu 354, für die Methanausbeute 226 Maisproben ein. Die Genotypen deckten einen Reifebereich von FAO 260 bis FAO 800 ab. Als Vergleichsvariante diente die mittelfrühe Sorte *Gavott* (FAO 250). Die Qualitätsparameter und Methanausbeuten wurden an getrockneten Proben erfasst.

Die Versuche deckten einen weiten TS-Bereich von etwa 14 bis 50 % in der Ganzpflanze und 15 bis 42 % in der Restpflanze ab. Der Stärkegehalt reichte von 0 bis 41 %, der Zuckergehalt von 0 bis 22 %, Zuckergehalt in der Restpflanze von 5 bis 29 %. Beim RP-Gehalt konnte ein Bereich von 4 bis 12 % der TS gemessen werden. Die Faserfraktionen ADF und NDF schwankten von 25 bis 40 % der TS. Der Fasergehalt der Restpflanze erzielte bei den unterschiedlichen Ernteterminen Gehalte von 48 bis 78 % der TS.

Auch für die Verdaulichkeitsparameter konnte ein weites Spektrum abgedeckt werden. Die Werte der Ganzpflanze (ELOS und IVDOM) sowie die Werte der Zellwandverdaulichkeit (DINAG und DINIG) lagen zwischen ca. 30 und 80 % der TS. Mit 37 bis 80 % der TS erzielten die jeweiligen Verdaulichkeitsparameter der Restpflanze ähnliche Werte wie die der Ganzpflanze.

Im Mittel der Versuche lag die Methanausbeute bei rund $330 \text{ NI CH}_4 \text{ (kg OTS)}^{-1}$. Ihre Schwankung war mit 10 bis 20 % um den Mittelwert vergleichsweise gering.

Die Höhe der Methanausbeute von im Mittel $330 \text{ NI CH}_4(\text{kg OTS})^{-1}$ deckt sich gut mit den Werten von OECHSNER & LEMMER (2001), OECHSNER et al. (2003), LINKE et al. (2003), KAISER et al. (2004), SCHUMACHER et al. (2006), AMON et al. (2003a,b, 2006a,b, 2007), MÄHNERT (2007), KAISER (2007), STICKSEL et al. (2008) und SCHITTENHELM (2008), und mit den theoretisch abgeleiteten Werten nach BUSWELL (1936) und CZEPUCK et al. (2006).

Auch die Schwankungsbreite über den gesamten Versuch von etwa 280 bis $380 \text{ NI CH}_4(\text{kg OTS})^{-1}$ liegt im Rahmen des Erwarteten. SCHITTENHELM (2008) findet bei seinen Untersuchungen einen Wertebereich von 282 bis $429 \text{ NI CH}_4(\text{kg OTS})^{-1}$. Die Ergebnisse von NEUBERG (2002), OECHSNER et al. (2003), AMON et al. (2007) und TATAH et al. (2007) bestätigen ebenso den gefundenen Wertebereich.

Das Jahr 2003 war gekennzeichnet durch eine ausgeprägte Sommertrockenheit. Nur so ist es zu erklären, dass im Versuch Sorten mit einer FAO-Zahl von 800 einen TS-Gehalt von ca. 31 % erzielten. Bemerkenswert ist, dass dieses sehr heiße Jahr auch ein gutes Jahr hinsichtlich des TS-Ertrages, vor allem bei den späten Sorten war. Hier zeigte sich wohl der genotypische Einfluss des Dent-Anteils im Sortenmaterial, der durch eine ausgeprägte Trockentoleranz und hohen Wärmebedarf geprägt ist (SCHMIDT 2003, 2005, 2006).

Die Witterung 2003 führte außerdem zu den extrem hohen TS-Gehalten bei der Vergleichssorte *Gavott*. Da die Methanausbeute an getrocknetem Probenmaterial bestimmt wurde, ist eine Verfälschung wegen schlechter Silagequalität in Folge von ungenügender Verdichtung, nicht anzunehmen.

Mit Ausnahme von Grucking im Jahr 2006 reagierten die Sorten an den verschiedenen Orten ähnlich (2003, 2004, 2005). Das Jahr 2006 war geprägt durch ein kühles Frühjahr und extrem hohe Temperaturen im Juli während der Blüte und Kolbenbildung. Gleichzeitig waren in den Sommermonaten die Niederschläge sehr gering (vgl. Anhang Abb. 9.4). Möglicherweise führten diese Witterungsbedingungen zu den insgesamt geringen TS-Gehalten, der verzögerten Entwicklung und der abweichenden Ertrags- und Qualitätsbildung der späten Sorten im Vergleich zu den anderen Orten bzw. Jahren.

Die grundlegenden Zusammenhänge zwischen der Wahl des Erntetermins und der Entwicklung der Inhaltsstoffzusammensetzung bei Mais konnten im Versuch mit wenigen Ausnahmen bestätigt werden.

Stärkegehalte nahmen mit zunehmender Wachstumsdauer des Maises zu, die Nicht-Stärkeanteile (Zucker, Rohprotein, ADF, NDF) ab. Auffallend erscheint beim Stärkegehalt eine besonders hohe Zunahme kurz nach der Blüte, während die Gehalte zwischen Ernte-

termin III und IV weniger stark anstiegen. Diese Steigerung hatte eine Abnahme der weiteren Inhaltsstoffe zur Folge, so dass auch die Parameter Zucker, ADF und NDF die stärksten Veränderungen kurz nach der Blüte erfuhren. Diese Veränderungen vom Erntetermin I auf II spiegeln sich auch in den Verdaulichkeitsparametern wieder, deren stärkste Veränderungen vom Erntetermin I auf II messbar waren. Nur der RP-Gehalt zeigte sich als relativ konstant und unterlag der geringsten Beeinflussung durch die Wahl des Erntetermins.

Mit der Abreife geht eine Verholzung bzw. Lignifizierung der Zellwände einher, die den Abbau und die Verdaulichkeit behindert. Deshalb wäre mit fortschreitender Wachstumsdauer eine Abnahme der Ganzpflanzen-, vor allem der Restpflanzen- und der Zellwandverdaulichkeit zu erwarten. Die Verdaulichkeitsparameter IVDOM und ELOS zeigten mit zunehmender Wachstumsdauer aber keinen Qualitätsverlust, sie stiegen weiterhin an. Die Verdaulichkeit der Restpflanze hingegen nahm mit zunehmender Wachstumsdauer wie erwartet ab. Offenbar konnte die höhere Verdaulichkeit der Stärke im Kolben die schlechtere Restpflanzenverdaulichkeit ausgleichen.

Ähnlich verhielt sich die Zellwandverdaulichkeit (DINAG), sie nahm mit der Wachstumsdauer zu. Da dieser Parameter aus den Gehalten an ELOS, Stärke und Zucker berechnet wird (vgl. Kap. 3.6 Merkmalerfassung) und ELOS und Stärke eine enge positive Beziehung aufweisen, wurde hier möglicherweise die Abnahme der enzymlöslichen Zellwandverdaulichkeit durch die Zunahme der Ganzpflanzenverdaulichkeit durch steigende Stärkegehalte überlagert. Auch KRÜTZFELDT (2004) weist in ihrer Arbeit auf diesen Zusammenhang hin. Dagegen verhielt sich der Parameter DINIG wieder erwartungsgemäß und nahm mit zunehmender Wachstumszeit ab.

Trotz einer großen Spannweite in den untersuchten Qualitätsmerkmalen ließ sich kein Einfluss auf die Methanausbeute ableiten. Weder die stark unterschiedlichen TS-Gehalte, noch Zellinhaltsstoffe (Stärke, Zucker, Rohprotein), Zellwandbestandteile (ADF, NDF) oder die gemessenen Verdaulichkeitsparameter der Ganz- und Restpflanze zeigten beim jeweiligen Erntetermin eine Beziehung zur Höhe der Methanausbeute.

Ähnliche Ergebnisse zum Einfluss des Erntetermins fanden SCHUMACHER et al. (2006), die kaum Unterschiede in den Methanausbeuten zwischen verschiedenen Ernteterminen und Sorten bei unterschiedlicher Reife feststellen konnten. Tendenziell fanden sie zwar eine Abnahme der Methanausbeute mit dem Erntetermin. Die Abnahme bei den ersten drei Ernteterminen war allerdings mit weniger als $10 \text{ NI CH}_4 (\text{kg OTS})^{-1}$ unbedeutend.

Aktuelle Ergebnisse von SCHITTENHELM (2008) bestätigen den fehlenden Zusammenhang zwischen Erntetermin und Methanausbeute. Auch er fand keine Unterschiede in den Methanausbeuten in Abhängigkeit vom Erntetermin, obwohl sich auch in seinen Untersuchungen die Zellbestandteile Zellulose, Hemizellulose und Lignin in Abhängigkeit vom Erntetermin signifikant unterscheiden ließen. Und auch ältere Untersuchungen von KLASS (1984) und ZAUNER & KÜNZEL (1986) kamen zum selben Ergebnis.

Dagegen fanden AMON et al. (2003a,b, 2006a,b) und KAISER et al. (2004) bei Untersuchungen an verschiedenen Silomaisgenotypen einen negativen Einfluss des Erntetermins. Je später die Ernte stattfand, desto niedriger war in ihren Versuchen die Methanausbeute. AMON et al. (2003a) wiesen die höchsten Methanausbeuten bei TS-Gehalten unter 28 %, also noch vor bzw. zur beginnenden Milchreife nach, dann wenn auch die Stärkeeinlagerung beginnt. KAISER et al. (2004) beschrieben einen negativen Einfluss zunehmender Abreife des Kolbens auf die Methanbildung. Die Methanausbeute sank signifikant bis zum letzten Erntetermin. Beide machten die Gasanalysen mit Silagen und bei beiden deutet ein sehr hoher TS-Gehalt der letzten Ernte (AMON et al. 2003a,b) bzw. hohe Ammoniumgehalte in der Silage (KAISER et al. 2004) auf eine Beeinflussung der Methanausbeute durch die Probenaufbereitung hin. Bei KAISER et al (2004) lagen die TS-Gehalte der Sorten *Gavott* und *KXA* bei nahezu 50 % und auch bei AMON et al. (2003a) wiesen die Proben aus beiden Untersuchungsjahren (2002, 2003) einen TS-Gehalt von zum Teil über 50 % beim dritten Erntetermin auf, und das obwohl die Sorten mit einer FAO-Zahl von 600 sehr spätreif waren. Keiner von beiden machte allerdings eine Angabe zur Silagequalität der verwendeten Proben. Später weist KAISER (2005) allerdings darauf hin, dass der Abfall der Methanausbeute bei späteren Ernteterminen mit der schlechteren Silagequalität zu tun haben könnte. Er stellte erhöhte Ammoniumgehalte in den Silagen bei hohen TS-Gehalten fest. Die Ammoniumgehalte lagen zum Teil bei 800 mg/l. Für gute Silagen werden allerdings Werte unter 300 mg/l angestrebt (ANZER et al. 2003).

Die von AMON et al. (2006b) festgestellten höheren Methanausbeuten bei extrem niedrigen TS-Gehalten konnten nicht wiedergefunden werden. Im Gegenteil, in einzelnen Jahren (Ismaning 2004) deutete sich ein Anstieg der Methanausbeute bei den frühen Ernteterminen an. Möglicherweise sind die höheren Methanausbeuten bei AMON et al. (2006b) mit dem von WEISSBACH (2008) beschriebenen fehlerhaften TS-Bezug bei Silagen zu sehen. Gerade frühe Erntetermine führen bei Silagen zu TS-Abbau und erhöhter Sickersaftbildung, dadurch verändert sich die Bezugsgröße OTS. Es kommt zu einer relativen Erhöhung der Methanausbeute aufgrund einer Abnahme der TS. Vor allem bei frühen Ernteterminen aufgrund höherer Sickersaftverluste könnte sich dieser Effekt stärker bemerkbar machen.

Ergebnisse von HEIERMANN & PLÖCHL (2004), HERTWIG & HEIERMANN (2006) und LINKE et al. (2003) hingegen zeigten einen positiven Zusammenhang zwischen Stärkegehalt und Methanausbeute, wenngleich die Methanausbeuten sich nicht immer nur mit dem Stärkegehalt allein erklären ließen. Auffallend in ihren Untersuchungen waren die für Mais ungewöhnlich hohen Methangehalte im Gas von ca. 64 bis 69 %. In anderen Untersuchungen (KAISER 2008, OECHNSER et al. 2003) sowie in der vorliegenden Studie konnten demgegenüber nur Methangehalte von rund 50 % gemessen werden. HERTWIG & HEIERMANN (2006) leiteten anhand ihrer Ergebnisse einen für die Methanausbeute optimalen Erntetermin in einem TS-Bereich von 30 bis 35 % her.

Möglicherweise lagen die unterschiedlichen Ergebnisse an der Konservierungsart des Probenmaterials, denn die genannten Autoren arbeiteten im Gegensatz zu den vorliegenden Untersuchungen mit siliertem Material. KAISER et al. (2004), MUKENGELE & OECHSNER (2007) sowie AMON et al. (2006a,b) fanden für Silagen höhere Gasausbeuten als für frisches Material. Die Spanne lag zwischen 20 und 100 NI CH_4 (kg OTS)⁻¹. Getrocknetes Material erreichte mittlere Gasausbeuten. Die höheren Gasausbeuten des silierten Materials erklärten die Autoren mit einem Voraufschluss durch den Silierprozess. MÄHNERT et al. (2005) hingegen konnten keinen Einfluss der Konservierung nachweisen.

Zusätzlich ist auch ein Einfluss der Silagequalität auf die Methanausbeute nicht auszuschließen. Bei TS-Gehalten unter 28 % und über 35 % ist eine optimale Silagebereitung nur eingeschränkt möglich. Untersuchungen von MACIEJCZYK (2000) und SCHMACK (2005) zeigten, dass die Qualität der Silage einen starken Einfluss auf die Höhe der Methanausbeute hat. Deshalb ist anzunehmen, dass gerade in den TS-Bereichen, die für die optimale Silagebereitung ungünstig sind, ein Einfluss der Konservierung auf die Höhe der Methanausbeute vorhanden ist.

Außerdem wiesen NEUREITER et al. (2005) neben der Silagequalität auch eine Wirkung der Dauer der Silierung auf die Methanausbeute nach. Da diese Angaben bei den hier diskutierten Quellen nicht angegeben wurden, ist eine abschließende Vergleichbarkeit nicht möglich.

Ein weiterer Grund für die abweichenden Erkenntnisse sind möglicherweise die Anzahl der Jahre bei den Versuchen. Die meisten Ergebnisse zu Mais liegen in 2 jähriger Wiederholung vor (SCHITTENHELM 2008, KAISER et al. 2004, AMON et al. 2003a,b). Die eigenen Untersuchungen, die sechs Jahre abdeckten (2002, 2007 wurden nicht dargestellt), zeigten deutliche Jahreseinflüsse. Beispielsweise konnte in den Jahren 2002 und 2004 ein signifikanter

Zusammenhang zwischen Inhaltsstoffen und Gasausbeute festgestellt werden (Tab. 5.1). Dies ließ sich in den Jahren 2003, 2005, 2006 nicht wiederholen.

Tab. 5.1: Korrelationsmatrix Sortenversuch (2002, 2 Orte, 12 Sorten) und Ernteterminversuch (2004, 1 Ort, 8 Sorten)

	Ernte- termin	Sorten	TS – G	TS – R	Stärke	WLK	RP	ADF	NDF	ELOS	IVDOM	DINAG	DINIG
2002		*†	0,8**	-0,4	0,7*	-0,5	-0,5	-0,8**	-0,8**	0,8**	0,8**	0,8**	-0,3
2004	**	n.s.	0,5**	0,5**	0,6**	-0,5**	-0,6**	-0,6**	-0,6**	0,6**	0,4**	0,5**	-0,3**

† Signifikanzniveau: n.s. nicht signifikant; * $P < 0,05$; ** $P < 0,01$

5.1.3 Einfluss des Reifetyps auf die Methanausbeute

Späte Sorten zeichnen sich aufgrund ihres späteren Eintritts in die generative Phase beim selben Erntetermin im Vergleich zu früheren Sorten durch geringere Stärkegehalte und höhere Zucker- und Fasergehalte aus. Wegen der kürzeren generativen Phase ist die Abreife der späten Sorten im Vergleich zu früheren Sorten weniger lang, so dass auch die Abreifeerscheinungen wie der Rückgang der Verdaulichkeit weniger stark ausgeprägt sind. Dies bestätigte sich allerdings nicht. Obwohl im Vergleich zu der mittelfrühen Sorte *Gavott* (FAO 250) die späteren Sorten im Mittel über die Erntetermine erwartungsgemäß signifikant höhere Gehalte an Zucker (WLK) und Faser (ADF, NDF) in der Ganzpflanze und niedrigere Stärkegehalte in der Ganzpflanze und Fasergehalte in der Restpflanze aufwiesen, lagen sie hinsichtlich der Verdaulichkeitsparameter der Ganzpflanze ELOS und IVDOM gegenüber der mittelfrühen Sorte *Gavott* immer niedriger.

Auch bei der enzymlöslichen Zellwandverdaulichkeit (DINAG) zeigten die späteren Sorten tendenziell schlechtere Werte. Die niedrigeren DINAG Werte bei den späteren Sorten sind analog wie beim Erntetermin im Zusammenhang mit der starken Korrelation von ELOS und Stärke zu erklären. Späte Sorten, die wenig Stärke besitzen, weisen im Vergleich zu früheren Sorten eine geringere ELOS Verdaulichkeit auf, infolgedessen sinkt auch die DINAG Verdaulichkeit. Nur die *in vitro* lösliche Zellwandverdaulichkeit (DINIG) lag bei den späten Sorten deutlich höher. Die Ergebnisse lassen auch eine Korrelation mit der FAO-Zahl erkennen. Die sehr späten Sorten (FAO 600) zeigten tendenziell die höchsten DINIG-Werte.

Bei der Restpflanzenverdaulichkeit waren die Werte für die Verdaulichkeit der organischen Substanz (IVDOM-R) und der Zellwand der Restpflanze (DNDF-R) wie bei den späten Sorten erwartet überwiegend signifikant höher. Diese Beobachtungen konnten auch bei den jeweiligen Ernteterminen festgestellt werden.

Darüber hinaus zeigten die späten Sorten in Abhängigkeit vom Erntetermin einen schwächeren Qualitätsrückgang im Verlauf der Abreife als die Vergleichssorte *Gavott*, die deutlich stärker in ihrer Restpflanzenqualität verlor.

Trotz dieser signifikanten Unterschiede zwischen den Reifetypen in Abhängigkeit vom Erntetermin waren die Unterschiede zwischen den Methanausbeuten sehr gering und nicht relevant. Der an den verschiedenen Versuchsorten festgestellte sortenspezifische Anstieg der Methanausbeute vom Erntetermin I auf II korrelierte nicht mit den Inhaltsstoff- und Qualitätsparametern.

Die Unterschiede in den Methanausbeuten zwischen den Reifetypen waren mit 10 bis 15 NI CH₄ (kg OTS)⁻¹ vergleichsweise gering und konnten trotz Signifikanz nicht mit den gemessenen Parametern erklärt werden. Beispielsweise wies beim Versuch Freising 2003 (Saat April und Saat Mai) die Sorte *Hybride 13* eine um 13 NI (kg OTS)⁻¹ niedrigere Methanausbeute auf als die Sorte *KXA 3191*, obwohl sie in den Verdaulichkeitsparametern der Zellwand und der Restpflanze deutlich besser einzustufen war und sie sich in den Zellinhaltsstoffen überwiegend nicht unterschieden (Anhang Tab. 9.3, Tab. 9.4). Es ließen sich ebenso Sorten finden, die durch besonders hohe oder sehr geringe Stärkegehalte gekennzeichnet waren und trotzdem hohe Methanausbeuten lieferten (z.B. *Gavott* Freising 2003, Saat April und *Doge*, *Kermes* und *Vic*, Ismaning 2004). Auch anhand der Korrelationsanalyse ließ sich keine zufrieden stellende Erklärung zum Einfluss des Reifetyps auf die Methanausbeute finden (Anhang Tab. 9.8).

Tendenziell ließ sich bei der sehr späten Sorte *Hybride 89* (FAO 800, Freising 2003) eine geringere Methanausbeute feststellen. Da diese allerdings im Extremjahr 2003 und nur an einem Standort geprüft wurde, ist das Ergebnis nur eingeschränkt gültig. Sie wies trotz extremer Spätreife (FAO 800) eine deutlich niedrigere DINIG-Verdaulichkeit auf. Möglicherweise war dies der Grund, warum die Sorte so geringe Methanausbeuten erzielte.

Im FAO Bereich bis 700 ließ sich kein Zusammenhang zwischen der Höhe der Methanausbeute und dem Reifetyp der Sorte (bzw. den Inhaltsstoffen) feststellen. Sie erzielten ähnlich hohe Methanausbeuten zwischen ca. 330 und 335 NI CH₄ (kg OTS)⁻¹.

Alle Reifetypen erreichten ein Niveau von mindestens ca. 300 NI CH₄ (kg OTS)⁻¹. Die Unterschiede zwischen den Sorten innerhalb einer Reifegruppe waren ähnlich hoch wie zwischen den Reifegruppen.

Offenbar führten die signifikanten Unterschiede der Reifetypen bezüglich der Inhaltsstoff- und Qualitätsparameter nicht zu einer eindeutigen Differenzierung der Methanausbeute. Die Wirkung der Inhaltsstoffe auf die Höhe der Methanausbeute scheint somit gering zu sein. Ein Einfluss des Erntetermins auf die Sorten zeigte sich tendenziell nur bei einer sehr frühen Ernte Ende August. Hier erzielten die späteren Sorten um 10 NI CH₄ (kg OTS)⁻¹ weniger Methan als die Vergleichssorte.

Das Merkmal Methanausbeute scheint mit den für die Rinderfütterung relevanten Verdaulichkeitsparametern für Silomais (ELOS und IVDOM) nicht fassbar zu sein. Mais mit schlechteren Verdaulichkeitsparametern erzielte vergleichbare Methanausbeuten wie Mais mit höheren ELOS und IVDOM-Werten. Erklärbar ist dies möglicherweise mit der Verweildauer der Substrate in der Biogasanlage im Vergleich zum Pansen. Während das Rind einen viel schnelleren Durchsatz (Aufenthaltszeit des Substrates im Pansen ca. 24 h) hat, liegt die mittlere Verweildauer der Substrate im Labor bei ca. 30 bis 45 Tagen, in einer Biogasanlage bei ca. 60 bis 80 Tagen (WEILAND et al. 2004, WEILAND 2006, OECHSNER & LEMMER 2001, KAISER 2008). Da die Methoden zur Bestimmung der Verdaulichkeit auf die Verweildauer im Rind abgestimmt sind, erzielen Maissorten, die durch einen niedrigen Kolbenanteil und einer geringen Restpflanzenverdaulichkeit gekennzeichnet sind, eine niedrige Verdaulichkeit. Durch die deutlich längere Verweilzeit im Labor und in der Praxisbiogasanlage scheint es allerdings möglich zu sein, dass auch schwerer und langsamer abbaubares Material in Methan überführt werden kann. Daraus lässt sich folgern, dass Maissorten mit hoher Verdaulichkeit gut zur Biogasproduktion geeignet sind, der Umkehrschluss kann allerdings nicht gezogen werden.

5.1.4 Einfluss der Inhaltsstoffe und Qualitätsparameter

Stärke

Obwohl in der vorliegenden Untersuchung alle Phasen der Kolbenbildung, beginnend mit der Phase „ohne Kolben“ (vergleichbar mit einem Stärkegehalt von 0 % TS) bis hin zum „rei-

fen Kolben“ mit hohen Stärkegehalten (bis zu 41 % TS) erfasst wurden, hatte dies keinen Einfluss auf die Methanausbeute. Dies ist umso erstaunlicher, da der Kolben (bzw. Stärke) als nahezu vollständig verdaulich gilt. Der Ligningehalt im Kolben ist geringer als in der Restpflanze (KIRCHGESSNER 1987). Da Lignin für die Bakterien nicht abbaubar ist, senkt dies die Methanausbeute (EL BASSAM 1998). Zudem befindet sich im Korn der größte Anteil des Rohfettgehaltes (KIRCHGESSNER 1987), welches höhere Methanausbeuten liefert als Kohlenhydrate oder Proteine (BUSWELL 1936). Deshalb ist vom Kolben grundsätzlich eine höhere Gasausbeute zu erwarten.

Möglicherweise konnten die niedrigen Stärkegehalte bei den späten Sorten durch höhere Gehalte an Zucker und höhere Gehalte und besser verdauliche Gerüstsubstanzen ausgeglichen werden. Denn die späteren Sorten zeichneten sich durchweg durch eine höhere Restpflanzenverdaulichkeit und Zellwandverdaulichkeit (DINIG) aus. Ähnliche Untersuchungen von EDER & KRÜTZFELD (2000) zeigten ebenso eine über einen langen Erntezeitraum gleichbleibende Restpflanzenqualität. Dies deutet darauf hin, dass auch andere Kohlenhydratquellen, wie NDF und Zucker, die überwiegend in der Restpflanze zu finden sind, einen ebenso wichtigen Beitrag zur Methanausbeute liefern konnten wie Stärke. Offenbar war es für die am Abbauprozess beteiligte Bakterienflora unerheblich, welche Kohlenhydratquelle zur Verfügung stand.

Auch AMON et al. (2006a) stellten nur einen unbedeutenden Effekt des Kolbenanteils bzw. des Stärkegehaltes auf die Methanausbeute fest. Sie fanden die höchsten Ausbeuten noch vor der Kolbenbildung, bei TS-Gehalten unter 22 %. Obwohl die Varianz wie auch die Gehalte bei Rohprotein und Rohfett zwischen den Sorten im Vergleich zu Stärke und NDF relativ gering waren, ordneten sie diesen beiden Merkmalen die stärkste Wirkung auf die Methanausbeute zu. Rohfett zeigte einen doppelt so hohen Einfluss auf die Methanausbeute im Vergleich zu Rohprotein, Rohfaser nur ein Drittel davon und die stickstofffreien Extraktstoffe, in der die Stärke beinhaltet ist, blieben nahezu unbedeutend.

Auch die von STICKSEL et al. (2008) dargestellten Ergebnisse bestätigen den fehlenden Einfluss des Stärkegehaltes auf die Methanausbeute siliierter Maisproben.

In einem zusätzlich angelegten Versuch zum Einfluss des Kolbenanteils auf die Methanausbeute bei konstanter Qualität der Restpflanze konnte allerdings ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Kolbenanteil und Methanausbeute festgestellt werden (Anhang Tab. 9.19, Tab. 9.20). Allerdings lagen auch hier die Unterschiede der Methanausbeute in Abhängigkeit vom Kolbenanteil bei maximal $80 \text{ NI CH}_4 \text{ (kg OTS)}^{-1}$ und damit bei maximal ca. 20 % vom

Mittelwert. Obwohl der Stärkegehalt von 0 bis 62 % variierte, war demnach der Stärkeinfluss ähnlich wie beim Ernteterminversuch gering.

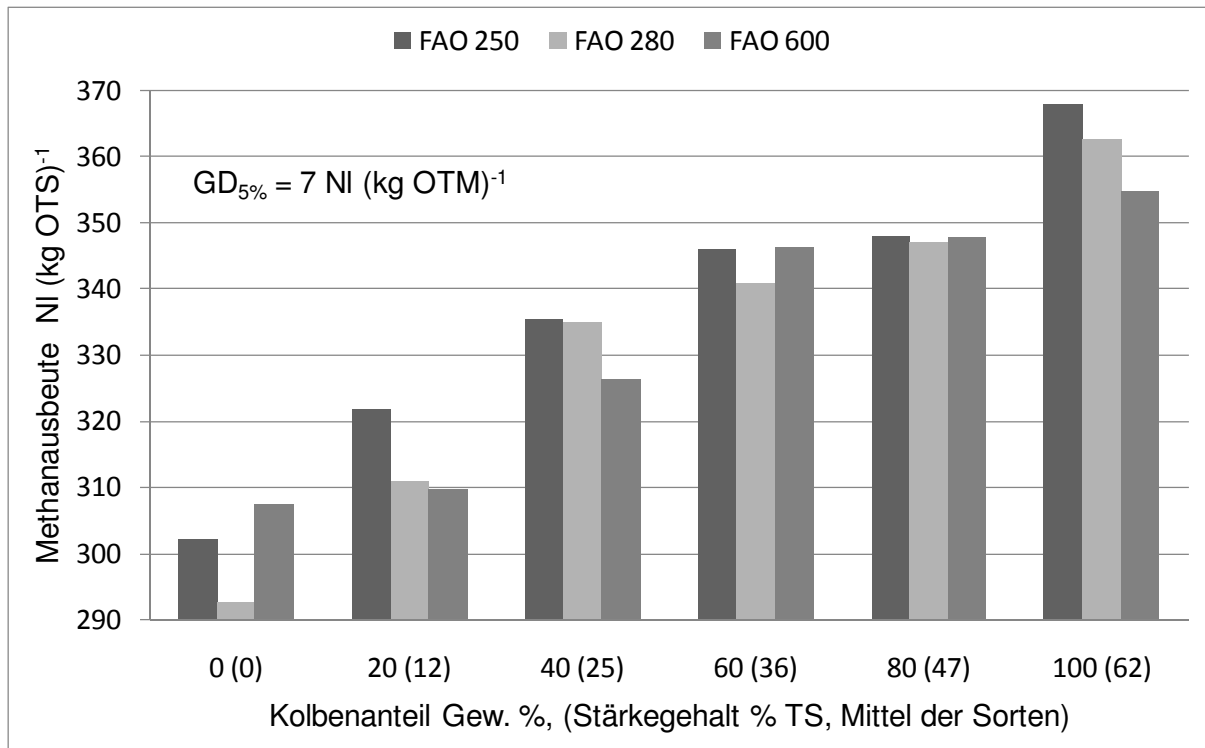


Abb. 5.1: Einfluss des Kolbenanteils auf die Methanausbeute bei Mischungen von Restpflanze und Kolben verschiedener Reifetypen. Restpflanze und Kolben wurden an einem Erntetermin getrennt geerntet und nachträglich je nach Kolbenanteil wieder zusammengemischt (Ingolstadt 2004).

Die Restpflanzen erzielten bereits eine durchschnittliche Methanausbeute von etwa 300 NI CH₄ (kg OTS)⁻¹, das war im Vergleich zum maximalen Potenzial (=100 % Kolben) bereits 83 % der möglichen Methanausbeute. Ein ausgereifter Kolben lieferte im Vergleich nur etwa 20 % mehr Gas als die Restpflanze. Unterstellt man bei der Silomaisnutzung einen Kolbenanteil von durchschnittlich 50 %, so wurden aufgrund dieser Ergebnisse vom Kolben 180 NI (kg OTS)⁻¹ und von der Restpflanze 150 NI (kg OTS)⁻¹ Methan produziert. Infolgedessen ist die Restpflanze bei Silomais für die Biogasnutzung im Gegensatz zur Tierernährung nahezu gleichwertig mit dem Kolben zu bewerten.

Die Untersuchung der Gasausbeuten von reinen Restpflanzen zeigte auch, dass es hier deutliche Sortenunterschiede gab, die eventuell durch das unterschiedliche Abreifeverhalten zu erklären sind. So zeichnete sich der sehr späte und deshalb wenig abgereifte Reifetyp (FAO 600) durch die höchsten Methanausbeuten der Restpflanze aus. Bei den Qualitätsparametern zeigte er eine deutlich höhere Verdaulichkeit der organischen Substanz, eine deut-

lich höhere Zellwandverdaulichkeit der Restpflanze sowie einen höheren Zuckergehalt, welche offenbar zu der hohen Methanausbeute führten.

Auch AMID (2004) fand bei der Analyse von Restpflanzen, Ganzpflanzen, CCM und Körnern einer Maissorte eine große Bedeutung der Restpflanze. Diese Fraktion lieferte bereits 84 % der Methanausbeute im Vergleich zur Ganzpflanze. Allerdings fand er bei CCM und Körnern geringere Methanausbeuten als bei der Ganzpflanze. Unter Umständen lag dies an der Konservierungsform des Probenmaterials. Es wurde mit Silagen gearbeitet.

Die Gasausbeuten der reinen Kolbenvarianten der Mischungsreihe lagen um etwa 60 NI CH_4 ($\text{kg OTS})^{-1}$ höher als die der reinen Restpflanzen und waren offensichtlich vom Stärkegehalt geprägt. Je höher der Stärkegehalt im Kolben, desto höher war die Methanausbeute. Die Unterschiede im Stärkegehalt der Kolben der einzelnen Sorten waren die Folge einer differenzierten Abreife.

Beim Vergleich der Ergebnisse zwischen dem Ernteterminversuch am Feld und den künstlich hergestellten Mischungsreihen ist weiterhin zu beachten, dass dieser Modellansatz nur eingeschränkt mit den natürlichen Bedingungen vergleichbar ist. Im Laufe des Wachstums und der Abreife ändert sich die Zusammensetzung der Inhaltsstoffe absolut sowie relativ zu einander. Bei dem hier gewählten Modell blieb die Zusammensetzung der Inhaltsstoffe innerhalb der Restpflanzen und Kolbenfraktion gleich. Unter natürlichen Bedingungen nehmen mit fortschreitender Abreife die Zellwandverdaulichkeit und die Restpflanzenverdaulichkeit infolge der zunehmenden Lignifizierung ab (FLACHOWSKY 1994, JUNG et al. 1983). Späte Sorten zeichnen sich daher generell aufgrund der späteren Blüte im Vergleich zu frühreifen Sorten beim gleichen Erntetermin durch höhere Restpflanzenverdaulichkeiten aus. Im hier vorgestellten Versuch wurden die Mischungen mit Material, das an einem späten Erntetermin (Mitte Oktober) geerntet wurde, hergestellt, so dass immer dieselbe Restpflanzen- und Kolbenqualität der Sorte in jeder Mischungsvariante vorlag. Zwei der Sorten (*KXA 4171* und *Gavott*) wiesen zum Erntezeitpunkt einen sehr hohen TS-Gehalt und damit eine deutlich schlechtere Restpflanzenqualität auf als die beiden spätreiferen Sorten. Nur die „100 % Restpflanzen“- und „100 % Kolbenvarianten“ waren mit den natürlichen Wachstums- und Abreifebedingungen von Mais uneingeschränkt vergleichbar.

Rohprotein und Rohfett

In den eigenen Untersuchungen variierte der RP-Gehalt nur wenig, so dass keine Korrelation mit der Methanausbeute feststellbar war. Im Gegensatz dazu fanden AMON et al. (2006a) für Rohprotein und Rohfett den stärksten Einfluss auf die Methanausbeute. Rohfett zeigte in diesen Untersuchungen eine doppelt so hohe Wirkung auf die Methanausbeute im Vergleich zu Rohprotein. Diese Erkenntnis spiegelt die Zusammenhänge der Buswell-Formel wider, dass Fette am meisten Methan, vor Proteinen und Kohlenhydraten liefern. Berechnet man den Methanenergiewert nach AMON et al. (2006a) für Mais mit drei verschiedenen TS-Gehalten, so zeigt sich allerdings auch da nur eine geringe Varianz der Methanausbeute von ca. $30 \text{ NI CH}_4 (\text{kg OTS})^{-1}$ (Tab. 5.2):

Tab. 5.2: Methanausbeute (NI (kg OTS)⁻¹) von Mais unterschiedlicher TS-Gehalte (% FM) berechnet nach AMON et al. (2006a) und KAISER (2008) mit Werten aus KIRCHGESSNER (1987)

TS-Gehalt	nach AMON et al. (2006a)	nach KAISER (2008)
16	397	459
27	377	457
35	368	463

KAISER (2008) hingegen, der seine Regressionsgerade allerdings mit den unterschiedlichsten Kulturarten erstellt hat, findet keine ausgeprägte Bedeutung des RP-Gehaltes. Rohprotein, Rohfaser und die stickstofffreien Extraktstoffe tragen annähernd gleichwertig zur Methanausbeute bei. Nur der Rohfettgehalt erzielte eine deutlich höhere Ausbeute. Für Mais ergeben sich nach dieser Berechnungsformel allerdings ebenso kaum Unterschiede in der Gasausbeute, wie Tab. 5.2 zeigt. Aufgrund des geringen Fettgehaltes von Mais und seiner geringen Variation in Abhängigkeit vom Erntetermin ist sein Einfluss auf die Methanausbeute gering und wenig relevant.

OECHSNER (2006) und KAISER (2008) beschreiben einen negativen Einfluss des Rohproteins, falls das C:N-Verhältnis zu stark eingeengt wird. Demnach kann bei sehr eiweißreichen Substraten der Abbau durch eine Anreicherung von Ammonium im Fermenter gehemmt werden. Im Allgemeinen ist Eiweiß in der Biogasanlage zwar relativ langsam abbaubar, bringt aber eine gute Biogasausbeute bei Methangehalten um 63 % (CZEPUCK et al. 2006). Wird bei der Versuchsanstellung das C:N-Verhältnis zu eng gewählt, so kann dies die Methanausbeute vermindern, ohne dass tatsächlich ein Sorten- oder Erntetermineneinfluss vor-

lag. Möglicherweise erklärt dies die teilweise widersprüchlichen Ergebnisse bezüglich der Bedeutung von Rohprotein.

Nicht ausgeschlossen werden kann, dass neben dem Fettgehalt noch andere Merkmale, die in den dargestellten Versuchen nicht erfasst wurden, wie beispielsweise das Lignin, einen Einfluss auf die Methanausbeute haben. MUKENGELE et al. (2006) fanden eine deutliche Abnahme der Methanausbeute verschiedener Substrate mit zunehmenden Gehalt an ADF, welches Lignin beinhaltet.

Unter Umständen war dies auch ein Grund, weshalb die Höhe der Methanausbeute nicht mit den in diesem Versuch erfassten Merkmalen erklärt werden konnte. Dem widersprechen allerdings die Ergebnisse von AMON et al. (2006a) und KAISER (2008), die beide keinen signifikanten Einfluss für Lignin feststellen. Außerdem gilt in der Silomaiszüchtung der Parameter Lignin als wenig relevant (ZSCHEISCHLER 1990, SCHMIDT 2004).

Anhand der vorliegenden Ergebnisse des Ernteterminversuchs konnte gezeigt werden, dass ein hoher Kolbenanteil und damit Stärkegehalt die Methanausbeute nicht positiv beeinflusst. Damit sind die bekannten Qualitätsparameter zur Beurteilung der Futterqualität von Silomais für die Methanproduktion nicht ausschlaggebend.

Stärkegehalt und Restpflanzenqualität sind für die Methanausbeute offensichtlich gleichermaßen von Bedeutung. Die untersuchten Genotypen erreichten trotz unterschiedlicher Reifebereiche und deutlich unterschiedlicher Inhaltsstoffe und Verdaulichkeitsparameter ähnliche Methanausbeuten. Es zeichnete sich ab, dass bei späten Sorten die Restpflanzenqualität entscheidend für die Methanbildung ist. Für die Methanbakterien ist es offenbar nicht relevant, aus welcher Kohlenhydratquelle das Futter stammt.

Eine Vielzahl widersprüchlicher Ergebnisse anderer Autoren erschweren endgültige Aussagen über den Einfluss von Erntetermin, Reifetyp und Qualitätsparametern. Auch wenn bereits seit 2005 eine Standardisierungsvorschrift (VDI-Richtlinie 4630) zur Messung von Biogas (VDI, 2005) vorliegt, sind die Mess- und Aufbereitungsmethoden der einzelnen Labors nicht uneingeschränkt vergleichbar. Hinsichtlich der Konservierung (getrocknet, frisch, siliert, gefroren), der Aufbereitung (gemahlen oder gehäckselt) und weiterer Randbedingungen (Sickersaftbehandlung, Silagequalität) fehlt eine verbindliche Vorschrift. Auch die Höhe des C:N-Verhältnisses, das bei zu engem Verhältnis zu einer Bakterienhemmung führen kann, ist nicht festgelegt. Zu erwähnen ist in diesem Zusammenhang auch der Einfluss des Inokulums, der bislang bei Untersuchungen weitgehend unbeachtet blieb. LEMMER (2007)

sowie HOPFNER-SIXT et al. (2005) stellten eine außerordentliche Wirkung des Impfmaterials fest.

Um eventuelle Sorteneinflüsse nachweisen zu können und die Messgenauigkeit zu erhöhen, scheint eine Überprüfung der Vergleichbarkeit der zugelassenen Methoden zur Bestimmung der Methanausbeute dringend erforderlich. Zu diesem Schluss kommen auch MÄHNERT (2007) und HERRMANN & TAUBE (2007).

5.1.5 Optimaler Erntetermin und Reifetyp

Als untere Grenze der Silierfähigkeit von Mais gilt ein TS-Gehalt von etwa 28 %. Dementsprechend konnte in der hier vorliegenden Untersuchung ein optimaler Erntetermin für späte Sorten ab Anfang/Mitte Oktober abgeleitet werden. Dann hatten unabhängig vom Ort und Jahr alle Reifetypen diese untere Grenze erreicht. Bis zu diesem Zeitraum zeigte der Mais seine größten Ertragszunahmen und hatte ein Ertragsmaximum erreicht, das im Versuch bei ca. 200 dt TS ha⁻¹ lag. Dadurch verschiebt sich beim Anbau der späten Sorten das Erntefenster nach hinten. Die Befahrbarkeit der Böden muss dies allerdings erlauben. Durch die geeignete Kombination von unterschiedlichen Reifetypen kann das Erntefenster vergrößert werden.

Die Ergebnisse zeigten außerdem, dass eine zu frühe Ernte (vor Oktober) zu starken Ertragseinbußen führen würde, da die ersten beiden Erntetermine die stärksten Ertragszuwächse aufwiesen. Die Erträge stiegen zwischen Ende August und Oktober um bis zu 80 dt TS ha⁻¹. Außerdem wäre das Risiko, nicht silierfähige TS-Gehalte zu erhalten, groß. Demgegenüber schmälerte eine späte Ernte (Erntetermin III und IV) den TS-Ertrag nur geringfügig. Bei zu später Ernte (Erntetermin IV) lagen die TS-Gehalte allerdings bereits oberhalb des empfohlenen TS-Bereiches für Silagen.

Ähnliches gilt für den Methanertrag pro Hektar. Da er mit einem Bestimmtheitsmaß von $r^2 = 0,88$ durch die TS bestimmt wurde, sind jene Erntetermine zu bevorzugen, die einen hohen Ertrag ermöglichen. Da der Methanhektarertrag von den Orten ermittelt wurde, von denen auch Gasdaten analysiert wurden, und an diesen Orten der optimale TS-Ertrag bereits zum Erntetermin II erzielt wurde, lagen auch die Methanerträge pro Hektar bereits zum Erntetermin II im Optimum. Mit Ausnahme vom Standort Ismaning, da dort erst zum Erntetermin III ein maximaler TS-Ertrag erzielt wurde. Die zeitliche Verzögerung der TS-Entwicklung in Is-

maning 2004 muss wohl in Verbindung mit den eher kühleren Bedingungen während der ganzen Vegetationsperiode, aber vor allem in der Jugendentwicklung, gesehen werden.

Hervorzuheben ist auch die starke Abnahme des Methanertrages um 1000 m³ Methan pro Hektar am Standort Ingolstadt 2004 zum Erntetermin III. Er wurde sowohl durch einen Rückgang des TS-Ertrages um etwa 15 dt ha⁻¹ und der Methanausbeute um etwa 10 NI CH₄ (kg OTS)⁻¹ verursacht.

Die unterschiedlichen Niveaus des Methanhektarertrages spiegeln die Jahres- und Standorteffekte der Versuchsorte wider. Je nach Standort und Jahr schwankten die Erträge zwischen 3.500 m³ CH₄ ha⁻¹ und 7.500 m³ CH₄ ha⁻¹.

Berücksichtigt man des Weiteren den Reifetyp einer Sorte beim jeweiligen Erntetermin, so erreichten alle Reifetypen trotz hoher FAO-Zahlen mit Ausnahme nur eines Jahres die Grenze der Silierfähigkeit von 28 %. Es fällt allerdings auf, dass Sorten im Reifebereich 260 bis 400 dies bereits früher (zwischen Erntetermin II und III) erreichten und späte Sorten (ab FAO 400) dazu die vollständige Wachstumszeit benötigten. Die Sorte Hybride 89 (geprüft 2003) mit FAO 800 ist hierbei sicherlich als Ausnahme zu sehen, da solche Sorten in „normalen“ Jahren keinen silierfähigen TS-Gehalt erreichen dürften.

Auch hinsichtlich der TS-Erträge erzielten Reifetypen bis FAO 400 bereits Mitte September höhere Erträge als die Vergleichssorte. Das Optimum lag Anfang Oktober. Dagegen erreichten die Sorten mit FAO 600 ihr Ertragsoptimum erst Ende Oktober. Sie benötigen eine längere Wachstumszeit als die Reifetypen im FAO-Bereich von 280 bis 400, um ihr Ertragsoptimum zu erzielen. Im Mittel der späten Sorten (FAO 280 bis 800) lag der Ertragsvorteil im Vergleich zur Sorte *Gavott* nur bei etwa 10 dt TS ha⁻¹. Allerdings zeigte die standortspezifische Entwicklung der späten Sorten durchaus relevante Ertragsvorteile bis zu 30 dt ha⁻¹ (vgl. Tab. 4.13, 2004 Ingolstadt, 2005 Wehnen, 2006 Grucking).

Die Ergebnisse lassen demnach den Schluss zu, dass Sorten in einem Reifebereich von FAO 280 bis 400 unter den klimatischen Anbaubedingungen der Prüferte Bayerns und We- ser Ems ausreichende TS-Gehalte und höhere Erträge liefern als Sorten mit FAO 250. Sorten aus einem höheren Reifebereich (FAO > 400) zeigten zwar ein höheres Ertragspotenzi- al, dies ließ sich jedoch nicht für alle Standorte und Jahre absichern. Außerdem zeigte sich hier ein größeres Risiko der unzureichenden TS-Entwicklung. Ein weiterer Nachteil ist, dass diesen Sorten eine lange Vegetationszeit zur Verfügung stehen muss. Dadurch erhöht sich das Anbaurisiko.

Des Weiteren zeigten die Ergebnisse, dass der Ertragsrückgang im Herbst bei den späten Sorten (Abb. 4.15) weniger stark ausgeprägt war als bei der Vergleichssorte. Während der Ertrag der späten Sorten vom Erntetermin III auf IV nahezu unverändert blieb, nahm er bei der Vergleichssorte um 10 dt ha^{-1} ab.

Dies deutet daraufhin, dass die Kälteverträglichkeit im Herbst unterschiedlich ausgeprägt ist, und dass späte Sorten unter Umständen eine höhere Kälteverträglichkeit im Herbst aufweisen als mittelfrühe Sorten. Da die beiden Eigenschaften Kälteverträglichkeit im Frühjahr bzw. im Herbst an unterschiedlichen Genorten vererbt werden (SCHMIDT 2004), kristallisiert sich hier möglicherweise ein neues Zuchtziel heraus, da die Kälteverträglichkeit im Herbst züchterisch bislang kaum eine Rolle spielte.

Betrachtet man statt der TS-Erträge die Methanerträge der verschiedenen Sorten in Abhängigkeit vom Erntetermin, dann werden die Unterschiede zwischen den Reifetypen geringer. Sie bewegten sich zwischen 4.000 bis $6.500 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$, stiegen analog zu den TS-Erträgen bis zum Anfang Oktober, und blieben bis Ende Oktober konstant. Der Abfall Anfang November ist wegen der Prüfung an nur einem Ort (2004) eingeschränkt aussagekräftig. Während die späten Sorten (bis FAO 400) bereits ab Mitte September an das Niveau der Vergleichssorte herankamen, taten dies die sehr späten Sorten (über FAO 400) erst ab Anfang Oktober (Ausnahme Doge FAO 700), ähnlich der TS-Entwicklung. Obwohl die Unterschiede zwischen den Reifetypen in Abhängigkeit vom Erntetermin bis zu $1.000 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$ betragen, waren sie nicht signifikant.

Damit nivellierte sich der Einfluss des Reifetyps hinsichtlich des Merkmals Methanertrag. Die Unterschiede zwischen den Reifetypen waren zwar gegeben, aber eine signifikante Verbesserung durch die Wahl einer späten Sorte konnte nicht gefunden werden.

Insgesamt kann dennoch abgeleitet werden, dass Genotypen mit einer möglichst hohen FAO-Zahl anzustreben sind, die allerdings noch einen ausreichenden TS-Gehalt erreichen müssen.

Die Methanerträge sowie in der Schwankungsbreite decken sich mit den Ergebnissen von AMON et al. (2003a,b, 2006a,b), GRÖBLINGHOFF et al. (2005) und SCHITTENHELM (2008). AMON et al. (2006a,b), konnten einen Genotyp bedingten Einfluss auf die Methanausbeute nachweisen. Sorten aus dem Reifebereich (260 bis 400) erzielten auch bei Ihnen die höchsten Methanhektarerträge bei gleichzeitiger Silierfähigkeit der Biomasse. Auch sie kommen zum Schluss, dass der Einsatz von spätreifen Sorten für die Biogasproduktion erfolgreich ist. In den Untersuchungen von SCHITTENHELM (2008) hingegen zeigten die Sorten ebenso einen nur geringen Unterschied. Ähnlich wie in den hier vorgestellten Untersuchungen war die

Grenzdifferenz für den Methanertrag pro Hektar zwischen 1.000 bis 2.000 m³ hoch. Eine Absicherung der Sortenunterschiede war dadurch nicht möglich.

Eine Erklärung für den geringen genotypischen Einfluss auf den Methanertrag pro Hektar geben KRUSE et al. (2006, 2007). Sie fanden bei ihren Untersuchungen an Silomais, allerdings an einem Grenzstandort, eine deutliche witterungsbedingte Variation sowohl für den TS-Ertrag als auch für den TS-Gehalt und andere Inhaltsstoffe. Der genotypische Einfluss war dem gegenüber sehr gering.

GRÖBLINGHOFF et al. (2005) finden für den Maisanbau mit späten Sorten keine Fortschritte. Sie weisen auf die verzögerte Jugendentwicklung und unzureichenden Kältetoleranz und die ungenügenden TS-Gehalte bei Sorten mit hohen FAO-Zahlen sowie auf die Verzögerung der Saat der Folgefrüchte hin. Eigene Untersuchungen mit verschiedenen Winterzwischenfrüchten zeigten allerdings, dass der TS-Ertrag der Gesamtertragsfolge in Abhängigkeit vom Ernte- bzw. Sätermin der Vorfrucht bzw. Nachfrucht in der Summe gleich hoch blieben (EDER et al. 2008).

Obwohl in der vorliegenden Arbeit Sorten bis FAO 400 ein gesichert höheres TS-Potenzial aufwiesen und ausreichend hohe TS-Gehalte erzielten, erscheint eine generelle Empfehlung von so späten Sorten zur Biogasnutzung dennoch eher riskant, da sowohl Jahreseffekte wie auch Standorteinflüsse deutlich schwankten. Dagegen erscheint eine zurückhaltende Verschiebung der FAO-Zahl um ca. 50 Einheiten, wie von DEGENHARDT (2005) empfohlen, als angemessen.

Abschließend kann festgehalten werden, dass für den Silomaisanbau zur Biogasproduktion der Stärkegehalt und damit der Kolbenanteil einer Sorte keinen Einfluss auf die Methanausbeute und den Methanertrag hatte. Damit eignen sich prinzipiell auch Sorten aus einem späten Reifebereich. Sie müssen allerdings so gewählt werden, dass sie standortspezifisch einen ausreichenden TS-Gehalt im verfügbaren Erntezeitraum erlangen. In der vorliegenden Untersuchung waren das Sorten bis einer Reifezahl von max. FAO 400.

5.2 Düngeversuch

Die Ergebnisse des zweijährigen Düngeversuchs mit den Faktoren Sorte, Düngeintensität und Düngerart an zwei Orten zeigten, dass leistungsfähige späte Sorten ausreichend mit Gärrest versorgt werden konnten. In keiner Intensitätsstufe zeigten die Sorten eine Abhängigkeit von der Düngerart. Die Gärrestdüngung war also gleich zusetzen mit der mineralischen Düngung. Die Ergebnisse decken sich mit den Ergebnissen von PÖTSCH et al. (2004), BRENNER & CLEMENS (2005) und KAUTZ & RAUBER (2007), die übereinstimmend keine Ertragsunterschiede zwischen mineralischer Düngung und Biogasgülle feststellten.

Auffallend war das relativ hohe Ertragsniveau der Vergleichsparzelle im Mittel der Jahre und Orte von etwa 212 dt ha⁻¹. Dies ist vor dem Hintergrund der hohen Nährstoffversorgung der Böden zu betrachten. Die N_{min}-Versorgung der Böden war mit 80 bis 120 kg N_{min} ha⁻¹ vergleichsweise hoch, so dass die Standortwahl für einen Düngeversuch als nicht optimal zu bezeichnen war. Nur so ist es zu erklären, dass am Standort Grucking im Jahr 2005 die Vergleichsparzelle sogar höhere Erträge lieferte als die Stufe I der mineralischen Düngevariante (vergleiche Anhang Tab. 9.14). Für N-Steigerungsversuche eignen sich besonders Böden, die langjährig keine organische Düngung erhalten haben. Da solche Versuchsstandorte nicht zur Verfügung standen, musste auf Böden zurückgegriffen werden, die eine langjährige oder zumindest regelmäßige organische Düngung erhielten. Solche Böden zeichnen sich durch hohe N_{min}-Gehalte und ein hohes Nachlieferungspotenzial aus. Damit lässt sich nicht nur das hohe Ertragsniveau der Nullvariante erklären, sondern auch die geringe Ertragsvariation zwischen den Intensitätsstufen.

Bemerkenswert erscheint allerdings, dass trotz des hohen Nährstoffangebots ein Sorten- und Gärresteffekt nachweisbar war.

Entgegen der Annahme, dass späte massenwüchsige Sorten nur bei einer ausreichend hohen N-Versorgung ihr Ertragspotenzial ausschöpfen können, zeigte die Sorte *Kursus* bereits bei der Nullvariante einen Ertragsvorsprung von 20 dt ha⁻¹. Dieser Ertragsvorsprung lässt sich möglicherweise mit der genetischen Herkunft der Sorte erklären. Es handelt sich dabei um eine in Ungarn zugelassene Sorte, die aus einem sehr breit angelegten Dent-Pool stammt, durch Spätreife und hohe Leistungsfähigkeit gekennzeichnet ist und auf *Low Input*-Eignung in Ungarn selektiert wurde (siehe Anhang Tab. 9.1, SCHMIDT (2003)). THIEMT (2002) fand ähnliche Ergebnisse. Sie stellte fest, dass *Low Input*-Material sowohl unter *Low Input*- als auch *High Input*-Bedingungen gute Leistungen erbringt und ertragsstabiler ist.

Während die mittelfrühe Sorte *Gavott* offenbar bereits bei der Dünge­stufe I der mineralischen Düngevariante ihr Ertragspotenzial ausschöpfte, konnte die späte Sorte *Kursus* eine weitere N-Steigerung mit 20 dt TS ha⁻¹ Zuwachs nutzen. Dies wiederholte sich auch bei der Gärrestvariante. Auch hier legte die späte Sorte *Kursus* noch weitere 20 dt ha⁻¹ von Dünge­stufe II auf III zu und erzielte das höchste Ertragsniveau von 260 dt ha⁻¹. Damit zeigte sich, dass die späte leistungsfähigere Sorte, noch nicht am Limit angelangt war, sondern im Gegensatz zur *Gavott* noch an Ertrag zuzulegen vermochte und die Düngung mit Gärrest den Bedarf decken konnte.

Auffallend erscheint, dass die mittelfrühe Sorte *Gavott* bei der Gärrestdüngung mit zunehmender Düngeintensität eine Ertragssteigerung zeigte. Von Intensitätsstufe I auf III legte sie sogar um ca. 16 dt ha⁻¹ zu. Dieser Effekt war bei der mineralischen Düngung nicht zu beobachten und deutet auf einen positiven Zusatzeffekt durch die organische Düngung hin. Generell zeigten die Erträge mit Gärrest ein höheres Ertragsniveau im Vergleich zu den Erträgen aus der mineralischen Düngung, was diese Annahme unterstützt.

Auch JÄKEL & MAU (1999) finden eine günstigere TS-Bildung und N-Verwertung bei Biogasgülle als bei unvergorener Gülle. Möglicherweise lässt sich dieser Effekt durch die von KORIATH et al. (1985) und GUTSER et al (1997) gefundenen allgemein den Boden verbessernde Wirkung von Gärresten erklären. BRENNER & CLEMENS (2005) stellten zudem bei Gärresten eine geringere Verunkrautung und einen geringeren Krankheitsdruck fest.

Die N_{min}-Gehalte nach der Ernte waren erwartungsgemäß bei der Nullvariante am geringsten. Die höheren N_{min}-Gehalte in der Intensitätsstufe II und III deuten darauf hin, dass der Stickstoff nicht ertragswirksam umgesetzt werden konnte. Tendenziell zeichnet sich ein leichter Vorteil der Gärrestdüngung in Bezug auf den N_{min}-Gehalt ab. Dies würde auch die tendenziell höheren Erträge bei der organischen Düngevariante erklären. Allerdings wurden die vorliegenden N_{min}-Ergebnisse keiner statistischen Analyse unterzogen, und die Streuung der Werte bei N_{min}-Analysen ist bekanntermaßen sehr hoch (MOLITOR 1983). Eine sehr hohe Probenanzahl ist deshalb notwendig, die in der vorliegenden Untersuchung nicht realisiert werden konnte. Die Werte können lediglich als Anhaltswerte dienen, so dass für eine abschließende Aussage weitere Analysen nötig sind.

Das Risiko, dass mit einer Verschiebung der Sortenreife hin zu spätreifen Sorten auch eine Intensivierung der Düngung einhergeht, muss anhand dieser Ergebnisse bestätigt werden. Wenngleich die späte Sorte auch ihre Ertragsüberlegenheit in der Nullvariante zeigt, erzielt

sie bei intensiver Düngung immer noch um 30 bis 40 dt ha⁻¹ mehr. Diese deutliche Ertragssteigerung bei hoher Düngung kann potenziell zu einer Intensivierung der Düngung führen. Damit einhergehend wären höhere N_{min}-Gehalte im Boden im Herbst, die aufgrund der Auswaschungsgefahr äußerst kritisch zu betrachten sind. Dem Anbau einer darauffolgenden Winterzwischenfrucht kommt daher, aus ökologischen Gesichtspunkten, eine große Bedeutung zu. Allerdings ist die organische Düngermenge auf Ackerland mit 170 kg N ha⁻¹ begrenzt, so dass für eine weitere Intensivierung in der landwirtschaftlichen Praxis bei Einhaltung der gesetzlichen Vorschriften keine Gefahr besteht.

Die Ergebnisse deuten nicht darauf hin, dass die N-Ausnutzung bei der späten Sorte bedingt durch eine langsamere Jugendentwicklung geringer ist und es dadurch, wie von MAIDL (1990) festgestellt, zu einer höheren N-Auswaschung kommt. Damit sollte eine Begrenzung der organischen N-Düngermenge auf 170 kg ha⁻¹ nochmals überprüft werden, zumal unter dem Kreislaufgedanken eine Rückführung des Substrates sinnvoll und die Einschränkung des Mineraldüngerzukaufs möglich erscheint. Außerdem sei darauf hingewiesen, dass bei kombinierter Gülle- und Mineralstickstoffdüngung die N-Effizienz der Gölledüngung abnimmt (JOVANOVIĆ et al. 2000).

Die N-Verluste bei der Ausbringung und Einarbeitung sollten durch geeignete Technik minimiert werden. Dadurch können der zusätzliche Mineral-N-Input so gering wie möglich gehalten und ein weitgehend geschlossener Nährstoffkreislauf realisiert werden.

5.3 Bestandesdichteversuch

5.3.1 Einfluss auf den Ertrag

Der Bestandesdichteversuch mit 6, 8, 10, 12 und 14 Pfl. m⁻² zeigte, dass die Bestandesdichte von 10 Pfl. m⁻² auch bei späten Sorten die höchsten Erträge erbrachte. Die Ausweitung der Bestandesdichte auf bis zu 14 Pfl. m⁻² führte zwar immer noch zu einem Ertragsanstieg, der aber nicht abgesichert werden konnte. Dagegen waren die Erträge bei Bestandesdichten von 6 bzw. 8 Pfl. m⁻² deutlich niedriger. Die Wahl der Bestandesdichte zeigte in diesem Versuch nur einen geringen Einfluss auf die Qualitätsparameter. Ebenso wurde der TS-Gehalt wie auch die Methanausbeute nicht beeinflusst.

Die Sorten reagierten auf die Erhöhung der Bestandesdichte unterschiedlich stark. Die Vergleichssorte *Gavott* zeigte als früheste Sorte (FAO 250) die höchsten Zuwächse von bis zu 55 dt ha⁻¹ durch die Steigerung der Bestandesdichte von 6 auf 14 Pfl. m⁻². Damit konnten die Ergebnisse von TOLLENAAR (1977), DWYER et al. (1994), OTEGUI & MELÓN (1997) und EPINAT-LE SIGNOR et al. (2001) bestätigt werden, die ebenso bei frühen Sorten bei höheren Bestandesdichten höhere Erträge feststellten. Die höheren Erträge resultieren aus einem höheren Blattflächenindex pro Flächeneinheit. Die späten Sorten reagierten ebenso bei steigender Bestandesdichte mit einer TS-Erhöhung, dieser Anstieg fiel aber stets geringer aus als der von der Sorte *Gavott* und lag zwischen etwa 14 und 42 dt ha⁻¹ (2002). Eine Abhängigkeit vom Reifetyp innerhalb der späten Sorten konnte nicht festgestellt werden. So reagierte die sehr späte Sorte *Mikado* mit einem Ertragsanstieg um 36 dt ähnlich wie die Sorte *KX2181*, die allerdings mit einer FAO Einstufung von 270 weit frühreifer war. Auch die sortenspezifischen Ertragsunterschiede waren gering.

Demgegenüber zeigten sich im sehr trockenen Jahr 2003 sortenspezifische Einflüsse. Während die Vergleichssorte *Gavott* und die Sorte *KX3191* (FAO 400) mit ca. 18 dt ha⁻¹ relativ hohe Ertragszuwächse aufwiesen, ließen sich noch spätere Sorten finden, die trotz der sehr ungünstigen Witterung bis zu 32 dt ha⁻¹ (*Hybride 12, 15, 16, KX 1393*, alle FAO 400, vgl. Tab. 4.22) Ertragszuwachs mit steigender Bestandesdichte erreichten. Es gab allerdings auch Sorten, die mit einem Ertragsrückgang reagierten. Diese waren überwiegend Sorten aus dem Reifebereich über FAO 400. Hier zeigte sich offenbar das sortenspezifische individuelle Leistungsvermögen, auf das HUGGER (1998) hinweist. Demnach reicht es nicht, die optimale Bestandesdichte einer Sorte ausschließlich in Abhängigkeit vom Reifetyp zu wählen. Auch das Leistungsvermögen einer Sorte ist relevant. So erklärt sich auch, dass späte Sorten trotz ungünstiger Witterung höhere Ertragszuwächse erzielten als die Vergleichssorte. Of-

fenbar war ihr genetisches Leistungsvermögen höher als das der Sorte *Gavott*. Die Mutterseite der hier geprüften Sorten stammte ausnahmslos aus dem späten (italienischen) Dent x Dent Zuchtprogramm. Während der europäische Flint x Dent Pool besonders durch seine Kälteverträglichkeit gekennzeichnet ist, liegt die Stärke des südlichen Dent x Dent Pools in seiner Trockenstresstoleranz (SCHMIDT 2003). Möglicherweise war das der Grund, warum diese Sorten gerade im Jahr 2003 so gut abschnitten.

Dem widersprechen allerdings die Ergebnisse von 2004 und 2005, in denen nur mehr vier Sorten aus den unterschiedlichen Reifebereichen geprüft wurden. Bei der Erhöhung der Bestandesdichte von 6 auf 10 Pfl. m⁻² sank der Ertragszuwachs in Abhängigkeit der Reifezahl deutlich von ca. 30 auf 5 (2004) bzw. 10 (2005) dt TS ha⁻¹ ab. Hier lässt sich der in vielen Untersuchungen (COLLINS et al. 1965, COX 1996, BROWN et al., 1970, BEECH & BASINSKI 1975; WIDDICOMBE & THELEN 2002, EDWARDS et al. 2005) dargestellte negative Einfluss des Reifetyps auf den TS-Ertrag in Abhängigkeit der Bestandesdichte wiederfinden.

Betrachtet man allerdings die Ertragszuwächse der beiden Jahre bis zur Bestandesdichteerhöhung auf 14 Pfl. m⁻², so fällt auf, dass dann der Ertragsrückgang abnimmt. Offenbar konnten die späten Sorten bei einer höheren Bestandesdichte als 10 Pfl. m⁻² wieder an Ertrag zulegen. Möglicherweise zwangen die höheren Bestandesdichten die Sorten zu einer aufrechteren, steileren Blattstellung, so dass es in den unteren Blattetagen zu einer besseren Lichtausnutzung und in Folge zu einem höheren Ertrag als bei den Bestandesdichten 8 und 10 Pfl. m⁻² kam. MOCK & PEARCE (1975), POMMER (1977), FRÖLICH & POLLMER (1978) und OTTMANN & WELCH (1989) zeigten, dass Sorten mit aufrechter Blattstellung Mehrerträge bei größeren Bestandesdichten infolge eines höheren Blattflächenindex bringen.

Auch die geringere Plastizität früher Sorten bei geringer Bestandesdichte hinsichtlich des Ertrages, wie sie SARLANGUE et al. (2007) fanden, konnte in diesen Versuchen bestätigt werden. Die Sorte *Gavott* zeigte in allen Jahren und Orten bei geringen Bestandesdichten von 6 Pfl. m⁻² den geringsten Ertrag. Sie war offenbar nicht in der Lage, die Vorteile eines größeren Standraums in Ertrag umzusetzen. Demgegenüber zeigten die späten Sorten bereits bei der niedrigen Bestandesdichte von 6 Pfl. m⁻² durchweg höhere Erträge als die Vergleichssorte.

Auffallend ist, dass die hier geprüften späten Sorten trotz steigender Bestandesdichten immer noch mit steigenden Erträgen reagierten (Ausnahme bildete das sehr trockene Jahr 2003), wenn gleich auch der Zuwachs ab 12 Pfl. m⁻² nicht mehr deutlich ausgeprägt war.

Dies widerspricht den allgemeinen Erkenntnissen zum Einfluss der Bestandesdichte (ZSCHEISCHLER 1990, HEPTING 1982, SANGOI 2000). Denn massewüchsige späte Sorten benötigen einen größeren Standraum, um sich nicht gegenseitig durch Nährstoff- und Wasserkonkurrenz und Beschattung zu beeinträchtigen. Auch in aktuellen Untersuchungen an drei Maishybriden unterschiedlicher Reife fanden SARLANGUE et al. (2007) einen deutlichen negativen Einfluss der Bestandesdichte auf das Ertragsverhalten. Sie prüften Bestandesdichten von 4 bis 16 Pfl. m⁻².

Möglicherweise lassen sich die in der vorliegenden Arbeit gefundenen Ergebnisse mit dem höheren Leistungspotenzial neuerer Hybriden erklären. HUGGER (1998), SANGOI (2000) und SARLANGUE et al. (2007) weisen darauf hin, dass der Einfluss der Bestandesdichte in Abhängigkeit vom Leistungspotenzial des Genotyps zu sehen ist. So stellt SANGOI (2000) fest, dass durch den züchterischen Fortschritt bei den Merkmalen Ertragsstabilität und Stresstoleranz bei Mais gleichzeitig eine Erhöhung der Bestandesdichte und Verengung der Reihenweiten einherging. Die Selektion dieser Merkmale wurde vielfach durch die Erhöhung der Bestandesdichte erzielt, so dass die neuen modernen Hybridsorten heute höhere Bestandesdichten besser tolerieren. Auch weist er auf die Fortschritte in der Pflanzenarchitektur (Blattstellung) hin, die heute mehr als früher eine bessere Lichtaufnahme ermöglichen. Da die in der vorliegenden Untersuchung verwendeten Hybriden dem aktuellsten Zuchtfortschritt entsprachen, wäre dies eine mögliche Erklärung für die gute Toleranz gegenüber hohen Bestandesdichten.

5.3.2 Einfluss auf die Inhaltsstoffzusammensetzung

Während in der Literatur übereinstimmend berichtet wird, dass vor allem die Kolbenentwicklung von hohen Bestandesdichten negativ beeinflusst wird (WILLIAMS et al. 1965, TETIO-KAGHO & GARDNER 1988, HEPTING 1982, ANDRADE et al. 1999, VEGA et al. 2001), haben die vorliegenden Ergebnisse nur eine sehr geringe Beeinträchtigung des Stärkegehaltes gezeigt. Nur im Extremjahr 2003 konnte ein sortenspezifischer Einfluss in Abhängigkeit von der Bestandesdichte auf den Stärkegehalt gemessen werden. In den Jahren 2002, 2004 und 2005 ließ sich dies nicht wiederholen. Auffallend war des Weiteren, dass von den untersuchten Parametern nur die Zellinhaltsstoffe (Zucker, RP und Stärke) auf die Bestandesdichte reagierten, wobei dies zwischen den Jahren uneinheitlich war. Die statistische Absicherung war niedrig. Diese Ergebnisse stehen im Gegensatz zu den Ergebnissen von ZSCHEISCHLER et al. (1974), WERMKE & ROHR (1985), BOHLE & WAGNER (1978) und BOESE (1997). Sie fanden einen negativen Zusammenhang zwischen Bestandesdichte und Kolbenanteil bzw. Stärkegehalt und höheren RF-Gehalten. Möglicherweise hat der Zuchtfortschritt in der Sor-

tenentwicklung die Toleranz gegenüber höheren Bestandesdichten auch hinsichtlich der Inhaltsstoffe verbessert. Dies würde auch den geringen Einfluss auf die Inhaltsstoffe und Qualitätsparameter erklären. Damit wird auch der nicht vorhandene Einfluss der Bestandesdichte auf die Methanausbeute erklärbar. Da sich die Inhaltsstoffe und Qualitätsparameter nicht änderten, ist zu erwarten, dass sich die Methanausbeute ebenfalls nicht ändert. Einschränkung muss allerdings auf die nur einjährige Prüfung der Methanausbeute in Abhängigkeit von der Bestandesdichte hingewiesen werden.

Abschließend lässt sich zusammenfassen, dass die Ertrags- und Qualitätsleistung der späten Sorten, anders als in der Literatur dokumentiert, nicht negativ von der Bestandesdichte beeinflusst wurde. Als optimale Saatstärke haben sich 10 Pfl. m⁻² herauskristallisiert. Bei höheren Bestandesdichten nahm der Ertrag weiter zu, das konnte aber nicht abgesichert werden. Auf die Inhaltsstoffzusammensetzung und Gasausbeute hatte die Wahl der Bestandesdichte keinen Einfluss.

5.4 Energiebilanzierung

Mit den Ergebnissen des Düngeversuches wurde eine Energiebilanz von der Grundbodenbearbeitung vor der Saat bis zur Stromeinspeisung und Gärrestverwertung erstellt.

Die Datenbasis zur Abschätzung des Energieeinsatzes im Pflanzenbau ist vergleichsweise gut, während für die Energieinputs beim Bau und Betrieb von Biogasanlagen die Datenbasis weniger gut abgesichert ist. Ein Grund dafür ist die Unterschiedlichkeit der Biogasanlagen und die relativ neue Technologie. Darin ist es begründet, dass für technische wie energetische Parameter große Spannweiten angegeben werden (vgl. WEILAND et al. 2004). So wurden in der vorliegenden Bilanzierung für die Parameter „Bau und Betrieb der Biogasanlage“ vielfach auf die Empfehlungen an die Politik des Wissenschaftlichen Beirat der Agrarpolitik des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV 2007) zurückgegriffen. Es ist davon auszugehen, dass diese Daten eine hohe Allgemeingültigkeit besitzen und einer soliden Prüfung unterzogen wurden.

Insgesamt zeigte sich, dass von der in der Mais-Biomasse gebundenen Energie von ca. 435 GJ ha⁻¹ nur 66 GJ ha⁻¹ Strom erzeugt werden können. Nur 15 % der im Erntegut gebundenen Energie kam tatsächlich in Form von elektrischer Energie am Ende der Produktionskette *Maisanbau zur Stromerzeugung* an.

Auf der Ebene bis zur Maisproduktion hingegen wurden nahezu 97 % der Energiebindung als Netto-Energieoutput ermittelt. Dementsprechend groß war das Output/Input-Verhältnis von ca. 40. TENTSCHER (2004) findet ein Output/Input-Verhältnis von nur 23. Auch zeigt sich, dass Silomais aus energetischer Sicht weitaus günstiger einzustufen ist als andere Fruchtarten. Die von HÜLSBERGEN (2003) angegebenen Output/Input-Verhältnisse verschiedener Getreidearten, Zuckerrüben und Kartoffel lagen zwischen 4 und 14, allerdings schnitten sie im Energieinput zum Teil deutlich günstiger ab (vgl. Tab. 2.8). Der Hauptgrund für das gute Output/Input-Verhältnis von Silomais ist in der enormen Biomasseleistung zu sehen.

Bis zur Stromerzeugung entstanden die höchsten Energieverluste von 85 %. Das Output/Input-Verhältnis reduzierte sich im Mittel auf 2,3. Dennoch blieb die Energiebilanz deutlich positiv.

Der Energieeinsatz für die Maisproduktion sowie den Bau und Betrieb der Biogasanlage von ca. 28 GJ ha⁻¹ war verglichen mit der Energiebindung (430 GJ ha⁻¹) gering, mit der Stromerzeugung (66 GJ ha⁻¹) jedoch hoch. Nahezu die Hälfte des Stromoutputs wurde für die Stromerzeugung und über die Hälfte (ca. 60 %) davon für den Bau und Betrieb der Anlage

benötigt. Das Potenzial zur Steigerung der Effizienz der Stromproduktion aus Biogas liegt damit vor allem beim Bau und Betrieb der Anlage.

Bei getrennter Betrachtung der Düngervarianten lassen sich deutliche Unterschiede darstellen. Die hohe Energiebindung der Nullvariante von 390 GJ ha^{-1} erklärt sich mit dem hohen Ertrag der Nullvariante, der wiederum durch die gute N-Versorgung der Standorte bedingt war. Unter Praxisbedingungen wäre ein deutlich niedriger Ertrag mit einer niedrigeren Energiebindung zu erwarten. Analog dazu sind die Ergebnisse in Abhängigkeit von der Düngeintensität zu sehen, deren Abstufung aufgrund der geringen Ertragsunterschiede vergleichsweise schwach ausgeprägt war.

Die mineralische Variante zeichnete sich durch einen um 4 GJ ha^{-1} höheren Energieeinsatz aus. Dabei entfallen nahezu 50 % des Energieeinsatzes in der Maisproduktion auf die Düngung und 30 % auf den Dieselmotorkraftstoff. Trotz höherem Kraftstoffverbrauch bei der organischen Variante, bedingt durch die Gärrestaustauschleistung, war der Energieeinsatz dennoch niedriger als bei der mineralischen Variante.

Der Energieeinsatz der organischen Variante erhöhte sich in Abhängigkeit von der Düngeintensität um nur ca. 2 GJ ha^{-1} bis zu Stufe III. Mit zunehmender Düngeintensität nahm der Unterschied zwischen der mineralischen und organischen Variante von ca. 2 auf 5 GJ ha^{-1} zu. Es kam also auch bei höherer organischer Düngung und dadurch vermehrten Fahrten mit größeren Maschinen nicht zu einer Umkehr der Verhältnisse. Maßgeblich beeinflussender Faktor blieb der Energieeinsatz für die Mineraldüngerbereitstellung, der in der Intensitätsstufe III immerhin 8 GJ ha^{-1} ausmacht.

Dadurch ist sie sowohl auf der Maisproduktions- wie Stromerzeugungsebene der organischen Variante in allen Parametern unterlegen. Während bei der organischen Variante ein Output/Input-Verhältnis von 2,6 erreicht wird, liegt das bei der mineralischen Variante im Mittel nur bei 2,1.

Auffallend erscheint der relativ hohe Energieeinsatz der Nullvariante für die Maisproduktion von 8 GJ ha^{-1} . Obwohl bei dieser Variante keine Düngereinfahrten anfielen, fällt der Vorteil gegenüber der organischen Variante mit 1 GJ ha^{-1} (für Kraftstoff und Investitionsgüter) sehr gering aus. Ein Vorteil der Nullvariante gegenüber der organischen Variante ist aus energetischer Sicht also nicht zu erkennen.

Der niedrige Energieeinsatz der Nullvariante mit knapp 24 GJ ha^{-1} ist dadurch bedingt, dass der Energieeinsatz für den Bau und Betrieb der Biogasanlage mengenabhängig kalkuliert wurde, sodass bei geringeren Erntemengen auch geringere Energieverbräuche entstehen.

Für den Betrieb der Anlage ist diese Vorgehensweise korrekt, da höhere Substratmengen höhere Energieverbräuche z.B. für das Rühren, Pumpen und Verstromen verursachen. Für den Bau einer Biogasanlage ist diese Herangehensweise prinzipiell zwar richtig, da höhere Erträge eine größere Anlage und damit einen höheren Energieeinsatz bedingen. Demgegenüber wird die Anlage nicht in Abhängigkeit vom standortspezifischen Ertragsniveau sondern überwiegend vom Entwicklungspotenzial des Betriebes dimensioniert, so dass beispielsweise ein witterungsbedingter Ertragsausfall keinen geringeren Energieeinsatz beim Bau der Anlage verursacht. Daher muss der Energieeinsatz der Nullvariante insgesamt als etwas zu niedrig eingestuft werden. In der Praxis wäre er ähnlich hoch wie bei den Varianten mit Düngung.

Die geringste Energieintensität zeigte nicht die Nullvariante, sondern die organisch gedüngte Variante. Sie verursachte bei einem hohen Ertragsniveau einen vergleichsweise geringen Energieeinsatz. Pro erzeugter Kilowattstunde Strom wurden in etwa 0,28 kWh Strom aufgewendet. Auch bei der Nullvariante lag die Energieintensität in dieser Höhe. Allerdings muss nochmals auf das hohe Ertragsniveau der Nullvariante verwiesen werden. Die schlechteste Variante war demgegenüber die düngerintensivste Mineraldüngervariante. Zur Erzeugung einer Kilowattstunde Strom benötigte sie ca. 0,34 kWh_{el}.

In allen vier Intensitätsstufen lieferte die organische Variante das beste Output/Input-Verhältnis. Pro eingesetzter Kilowattstunde wurde das 2,6 fache an Kilowattstunden erzeugt. Die Nullvariante unterschied sich mit einem Verhältnis von 2,5 kaum. Da in der Biogaserzeugung der Gärrest anfällt und als wertvoller Dünger zur Verfügung steht, sollte er auch wieder verwertet werden. Die Berechnungen zeigen, dass sich im Vergleich zur Nullvariante das Ergebnis nicht verschlechtert. Die höhere Anzahl an Fahrten zur Gärrestausbringung konnte den Nutzen der Düngung (höherer Ertrag) nicht schmälern.

Die mineralischen Varianten hingegen blieben im Output/Input-Verhältnis in allen Intensitätsstufen hinter der organischen Variante zurück und nahmen sogar mit zunehmender Intensität ab. Sie ermöglichten ein Output/Input-Verhältnis von nur 2,1.

Damit ist die organische Variante der mineralischen überlegen und hinsichtlich des Energieeinsatzes (Ressourcen), der Energieintensität (Effizienz) und im Output/Input-Verhältnis zu bevorzugen.

Dem Energieeinsatz ist die Stromproduktion aus Mais gegenüber zustellen. In der vorliegenden Arbeit war die Stromproduktion ein ausschließlich ertragsabhängiger Parameter, so

dass auch beim höchsten Ertrag der organischen Variante in Intensitätsstufe III die höchste Stromproduktion zu erwarten ist. Es wurde in der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt, dass beispielsweise größere BHKW einen höheren Wirkungsgrad erzielen und dadurch mehr Strom pro ha erzeugen können, und umgekehrt bei kleineren Anlagen der Wirkungsgrad niedriger ist. Insofern müssen die Ergebniszahlen bei Betrachtung von größeren Anlagen (> 500 kW) nach oben und umgekehrt bei der Betrachtung von kleineren Anlagen (< 500 kW) nach unten korrigiert werden.

Eine Sensitivitätsanalyse des Wirkungsgrades von Blockheizkraftwerken (Tab. 5.3) zeigt, dass die Steigerung des Wirkungsgrades bei großen Maschinen von 35 auf 39 % eine Erhöhung der Stromerzeugung bei der Nullvariante um 10 GJ ha⁻¹ ermöglichte und umgekehrt ein niedriger Wirkungsgrad der Anlage von z.B. 30 % die Stromproduktion um 12 GJ ha⁻¹ senkte. Dadurch verbesserte sich das Output/Input-Verhältnis bei der größeren Maschine auf fast 3 und verschlechterte sich bei der kleineren Maschine auf 2.

Tab. 5.3: Sensitivitätsanalyse des Stromertrags und Output/Input-Verhältnis in Abhängigkeit vom elektrischen Motorwirkungsgrad

		elektrischer Motorwirkungsgrad BHKW		
		30 %	35 %	39 %
Stromertrag [†]	kWh _{el} ha ⁻¹	19.995	23.328	25.994
	GJ ha ⁻¹	71,9	84,0	93,6
Output/Input-Verhältnis		2,0	2,5	2,9

[†] berechnet für die Vergleichsparzelle (30 kg N ha⁻¹) des Düngerversuchs

KELM & TAUBE (2007) finden für Mais ein günstigeres Output/Input-Verhältnis bei der Stromproduktion von 3 bis 4 trotz höherer Transportentfernungen. Die in der vorliegenden Untersuchung gewählte Transportentfernung kam mit durchschnittlich 1 km einem arrondierten Betrieb gleich. Möglicherweise liegen die Unterschiede an den gewählten Rahmenbedingungen. So vernachlässigen KELM & TAUBE (2007) in ihrer Betrachtung den Energieaufwand für den Bau der Anlage. Da in den eigenen Berechnungen der Bau und Betrieb der Anlage über die Hälfte des Energieeinsatzes ausmacht, könnte dies der Grund sein, warum sich die Ergebnisse so deutlich unterscheiden. Nimmt man an, dass etwa 1/3 des Energieeinsatzes für Bau und Betrieb nur dem Bau bzw. Rückbau der Anlage zuzuschreiben ist, dann decken sich die Ergebnisse mit denen von KELM & TAUBE (2007).

Die hier vorgestellten Untersuchungen berücksichtigen keine Wärmenutzung. Diese würde das Output/Input-Verhältnis deutlich verbessern. Eine Sensitivitätsanalyse der Wärmenutzung (Tab. 5.4) zeigt, dass durch die Wärmenutzung von nur 15 % der anfallenden Abwärme bereits das Output/Input-Verhältnis von durchschnittlich 2,3 auf 4,1 stieg. Ähnlich wie bei KELM & TAUBE (2007) führte eine 30%ige Wärmenutzung zu einer Verdoppelung der Effizienz. Damit wird deutlich, wie wichtig bei der Biogaserzeugung die Wärmenutzung ist.

Tab. 5.4: Sensitivitätsanalyse des Output/Input-Verhältnisses in Abhängigkeit von Düngerart, Düngeintensität und Wärmenutzung

Wärmenutzung [†]	MD ^{††}			OD			O	MD	OD	MW
	I	II	III	I	II	III				
15%	4,0	3,8	3,6	4,3	4,3	4,3	4,3	3,8	4,3	4,1
30%	4,7	4,5	4,2	5,1	5,1	5,1	5,0	4,5	5,1	4,8
50%	5,7	5,4	5,0	6,1	6,1	6,1	6,0	5,3	6,1	5,7

[†] unterstellter thermischer Motorwirkungsgrad 50 %

^{††} Mineralische Düngung (MD), Organische Düngung (OD), Intensitätsstufe 0: 30 kg N ha⁻¹, I: 90 kg N ha⁻¹, II: 150 kg N ha⁻¹, III: 210 kg N ha⁻¹

Vergleicht man die Energieeffizienz der Stromerzeugung aus Silomais mit anderen Stromerzeugungsverfahren, so ist sie in etwa vergleichbar mit Steinkohlekraftwerken. Nach Berechnungen von MAYER-SPOHN et al. (2005) liegt der kumulierte Energieaufwand für die Stromerzeugung aus Steinkohle bei 0,2695 kWh_{prim} kWh_{el}⁻¹. Die hier erzielten Ergebnisse liegen bei ca. 0,28 kWh kWh_{el}⁻¹. Immerhin 20 % der deutschen Stromproduktion werden aus Steinkohle erzeugt (UBA 2007).

Allerdings erzielen andere Stromerzeugungsverfahren wie Braunkohlekraftwerke, erdgasbeheizte Gas- und Dampfturbinen, Kernkraftwerke, Holz-, Wind- und Laufwasserkraftwerke weit höhere Energieeffizienzen. Sie liegen nach MAYER-SPOHN et al. (2005) zwischen 0,04 und 0,167 kWh_{prim} kWh_{el}⁻¹. Ein wesentlicher Grund für die günstigeren Werte ist in der weit höheren Anlagenleistung zu sehen. Diese liegen bei den Kraftwerken für fossile Energien zwischen 700 und 1400 MW, während die Anlagen aus dem Erneuerbaren Energiebereich eine Anlagengröße von maximal 20 MW erreichen. Für Biogasanlagen sind Anlagen mit 1 MW elektrischer Leistung die Ausnahme. Etwa 90 % der Anlagen liegen unterhalb eines Leistungsbereiches von 500 kW (FACHVERBAND BIOGAS E.V. 2006).

KELM & TAUBE (2007) beurteilen die Relation des Output/Input-Verhältnisses als bedenkenswert gering und führen des Weiteren den hohen Flächenverbrauch des Silomaisanbaus

für energetische Zwecke an, welcher negative Auswirkungen auf die Artenvielfalt der Agrarlandschaften haben könnte (ANDERSON & FERGUSON 2006). Um diese negativen Effekte zu vermeiden, kommt der ausgewogenen Fruchtfolgegestaltung in einem Biogasbetrieb eine herausragende Bedeutung zu.

Durch Nutzung des Gärrestes als Dünger kann zudem der Mineraldüngereinsatz reduziert und der Humusgehalt des Bodens stabilisiert werden.

Zusätzlich kommen gerade bei der landwirtschaftlichen Biogaserzeugung weitere positive Nebeneffekte wie hohe Versorgungssicherheit, geringe Ressourcenabhängigkeit, viele neue Arbeitsplätze gerade in ländlichen Regionen zum Tragen.

In Anbetracht der Tatsache, dass bisher wenig Alternativen vorhanden sind und die fossilen Energiereserven zur Neige gehen, erscheint unter Berücksichtigung der genannten Nebeneffekte ein erzielbares Output/Input-Verhältnis von ca. 4 bis 6 bei zusätzlicher Wärmenutzung vertretbar.

5.5 CO₂-Bilanzierung

Der Anbau von Silomais zur Stromerzeugung aus Biogas führt zur Reduktion von klimarelevanten Emissionen. Etwa 300 g CO_{2äq} pro erzeugter Kilowattstunde Strom werden vermieden. Im Vergleich dazu führt der aktuelle deutsche Energiemix zur Herstellung von Strom zu einer Emission von etwa 600 g CO_{2äq} pro kWh_{el}.

Die Vermeidung bzw. Reduzierung der Emissionen kommt ausschließlich durch den Ersatz der fossilen Energieträger zustande. Dabei wird angenommen, dass die aus Biogas erzeugte Kilowattstunde Strom nicht mehr aus fossilen Energien bereitgestellt wird und ersetzt werden kann.

Die CO₂-Bilanzierung wurde mit den Daten des Düngeversuches berechnet. Im Mittel der Varianten zeigte sich eine Reduzierung von 8.400 kg CO_{2äq} ha⁻¹. Der Anbau führte zu einer Emission von 5.300 kg CO_{2äq} ha⁻¹, davon 3.800 kg CO_{2äq} ha⁻¹ durch den Humusabbau unter Mais. 800 kg CO_{2äq} ha⁻¹ wurden durch die N₂O-Freisetzung verursacht und ähnlich viel, 700 kg CO_{2äq} ha⁻¹, verursachte der eigentliche Energieeinsatz zur Erzeugung von Silomais. 2.500 kg CO_{2äq} ha⁻¹ gingen auf den Betrieb der Anlage zurück. Demgegenüber konnten durch die Substitution von fossilen Energieträgern 16.300 kg CO_{2äq} ha⁻¹ eingespart werden.

Die energiebedingten Emissionen werden maßgeblich vom Mineraldüngereinsatz und dem Dieselkraftstoffverbrauch beeinflusst. Dementsprechend hoch ist die CO_{2äq}-Emission bei der Intensitätsstufe III der mineralischen Variante. Nahezu 1.000 kg CO_{2äq} ha⁻¹ werden emittiert, bereits 50 % durch den Mineraldünger.

Da auch bei der Nullvariante viele Fahrten zur Bodenbearbeitung, Bestellung und Ernte anfallen, ist der Dieselkraftstoffverbrauch vergleichsweise hoch und führt letztlich zu einer relativ hohen Emission von knapp 600 kg CO_{2äq} ha⁻¹.

Im Gegensatz zur Mineraldüngervariante bleibt die Emission bei der organischen Variante in Abhängigkeit der Intensität in etwa gleich. Dies lässt sich ebenso mit dem Energieeinsatz erklären. Die organische Variante benötigt auch bei hohem Intensitätsniveau kaum mehr Energie, sodass es dadurch auch nicht zu einer Steigerung der energiebedingten Emissionen kommt.

Auffallend sind die Lachgas-Emissionen. Bis auf die Nullvariante erreichen sie eine Höhe, die mit dem Energieeinsatz vergleichbar ist bzw. übersteigen bei hohen Düngeintensitäten sogar die Emissionen aus dem Energieeinsatz deutlich. Den Lachgasemissionen kommt also eine große Bedeutung zu.

Da in den hier dargestellten Ergebnissen mögliche positive Effekte durch die Vergärung nicht berücksichtigt wurden, kann man in Anlehnung an die Erkenntnisse von AMON et al. (2002) und KEHRES (2007) eine Reduzierung der Lachgasemissionen um etwa 20 % an-

rechnen. Aber auch dann bleiben die Emissionen vor allem in den intensiveren Stufen vergleichsweise hoch. Am besten schneidet die Nullvariante ab, die mit nur 300 kg wenig zur Gesamtbelastung beiträgt. Auf der anderen Seite kann auf eine Gärrestausbringung nicht verzichtet werden, so dass diese Emissionen kaum vermieden werden können.

Die C-Freisetzung des Bodens schlägt mit nahezu 70 % der CO_{2äq}-Emissionen aus der Maisproduktion sehr stark zu Buche. Bei reiner Maismonokultur würden jährlich knapp 4.000 kg CO_{2äq} ha⁻¹ nur durch den Abbau von Humus freigesetzt. Dieser Wert ist verglichen mit anderen Methoden zur Humusbilanzierung hoch. Würde man anstelle der dynamischen Betrachtung der HE-Methode nach HÜLSBERGEN (2003) die Cross Compliance Methode verwenden, so wäre die C-Freisetzung durch Humusabbau nur mit ca. 2.400 kg CO_{2äq} ha⁻¹ anzusetzen (590 kg Humus-C ha⁻¹, Umrechnung auf CO_{2äq} Faktor = 3,67). Dementsprechend könnte nach dieser Methode der Mais in einer deutlich engeren Fruchtfolge stehen als bei der dynamischen Betrachtung der HE-Methode. Der wesentliche Unterschied beider Methoden liegt in der Berücksichtigung des Ertrages und der Düngung. Bei der dynamischen Betrachtung der HE-Methode wird der N-Entzug des Erntegutes berücksichtigt. Ist der N-Entzug nicht durch die N-Düngung inklusive N_{min} und N-Deposition gedeckt, so geht man davon aus, dass der Rest über den Abbau der organischen Substanz im Boden zur Verfügung gestellt wurde. Dadurch kommt es zum Abbau von Humus und in Folge zu einer CO₂-Freisetzung. In der Cross Compliance Methode wird weder das Ertrags- noch das Düngungsniveau berücksichtigt.

Die Berechnung unterstellt allerdings, dass Mais nicht im Fruchtwechsel, sondern als Monokultur angebaut wird. Diese Betrachtung widerspricht allerdings der Wirklichkeit. Silomais steht wie andere Kulturpflanzen auch im Wechsel auf dem Feld, so dass es in der Regel zu einem Wechsel zwischen Humusmehrer und -zehrer kommt. Die Berechnung hier berücksichtigt allerdings keine Fruchtfolgeeffekte, so dass der Wert an sich nur geringe Aussagekraft hat (HÜLSBERGEN 2003).

Beispielsweise führt der Anbau von Zwischenfrüchten wie in Tab. 5.5 dargestellt zu einer Verbesserung des Humushaushaltes um ca. 80 bis 170 kg Humus-C ha⁻¹ und in Folge zu einer Reduzierung der C-Freisetzung aus dem Boden. Der Berechnung zu Grunde liegen die im Anhang Tab. 9.25 und Tab. 9.26 aufgeführten Daten. Abfrierender Senf trägt mit -640 kg CO_{2äq} ha⁻¹ am stärksten zur C-Festlegung bei. Die durch den Anbau der Zwischenfrucht zusätzlich entstehenden CO_{2äq}-Emissionen und die unvermeidbaren Lachgasemissionen liegen zwischen 550 bis 800 kg CO_{2äq} ha⁻¹. Wenn das Erntegut wie bei der abfrierenden Senfvariante nicht genutzt wird, entstehen insgesamt trotz fossilem Energieeinsatz keine

zusätzlichen CO_{2äq}-Emissionen, es wird sogar mehr C im Boden gebunden als freigesetzt. Damit kann der Anbau einer abfrierenden Zwischenfrucht vor oder nach Mais die durch den Mais bedingte Humus-C-Freisetzung deutlich reduzieren. Andere Zwischenfrüchte wie Weidelgras und Futterroggen, deren Aufwuchs in der Biogasanlage genutzt werden kann, führen zwar in einem geringeren Ausmaß aber ebenso zu einer Humusanreicherung.

Tab. 5.5: CO₂-Bilanzierung verschiedener Zwischenfrüchte

Kennzahl	ME	Senf	Weidelgras	Futterroggen
Energiebindung	GJ ha ⁻¹	0,0	88,6	124,2
Ernteertrag	GE ha ⁻¹	0,0	30,1	42,2
Ernteertrag	dt FM ha ⁻¹	0,0	273,4	383,4
Einsatz fossiler Energie	GJ ha ⁻¹	2,8	6,5	6,6
N-Zufuhr (ohne NH ₃ -Verluste)	kg N ha ⁻¹	59,6	76,4	59,2
Δ C Humus	kg Hu-C ha ⁻¹	174	87	122
CO ₂ -Emissionen Energieeinsatz	kg CO _{2äq} ha ⁻¹	197	417	453
- Saatgut		19	14	84
- Mineraldünger		41	163	123
- Pflanzenschutzmittel		0	0	0
- Investitionsgüter (Maschinen u. Geräte)		9	31	35
- Dieselmotorkraftstoff		128	208	211
N ₂ O-Emissionen	kg CO _{2äq} ha ⁻¹	346	444	344
C-Festlegung Boden	kg CO _{2äq} ha ⁻¹	-639	-319	-447
Treibhauspotenzial	kg CO _{2äq} ha ⁻¹	-96	541	350

Da die CO₂-Bilanzierung der Stromproduktion von Mais aus Biogas aufgrund der hohen Substitutionsleistung deutlich positiv ist, gilt es in einer Biogasafruchtfolge die Fruchtfolge-Partner so zu wählen, dass auf der einen Seite in der Gesamtfruchtfolge das energetische Output/Input-Verhältnis hoch ist und auf der anderen Seite die die C-Bindung im Boden die C-Freisetzung überwiegt.

Deutlich kommt auch die positive Wirkung der organischen Düngung beim Humuserhalt zur Geltung. Der Humusabbau bei der Düngung mit Gärrest ist bei der niedrigsten Intensitätsstufe (I) bereits um 700 kg CO_{2äq} ha⁻¹ geringer im Vergleich zur mineralischen Variante und bei der höchsten Intensitätsstufe bereits um ca. 2.000 kg CO_{2äq} ha⁻¹ niedriger im Vergleich zur mineralischen Variante, die dann 4.300 kg CO_{2äq} ha⁻¹ aus dem Humus freisetzt.

Da die C-Freisetzung der Nullvariante in etwa gleich hoch ist wie die mineralische Variante, zeigt sich hier ähnlich wie beim Energieeinsatz die Vorzüglichkeit der Varianten mit Gärrestdüngung. Ein zusätzlicher positiver Effekt ist zu erwarten, wenn auch die Zwischenfrüchte mit Gärrest gedüngt werden.

Insgesamt wird allerdings deutlich, dass eine vielgliedrige Fruchtfolge nötig ist, um dem Humusabbau durch Mais entgegenzuwirken.

Es bleibt beim Anbau von Silomais zur Stromerzeugung aus Biogas in der derzeitigen Situation, in der Strom aus fossiler Energie erzeugt wird, eine deutlich positive Klimawirkung bestehen. Da die Gärrestdüngung sowohl energetisch wie humusbildend positive Einflüsse gezeigt hat, erzielen dementsprechend die Gärrestvarianten das höchste Reduzierungspotenzial von 8 bis 10.000 kg CO_{2äq} ha⁻¹. Das entspricht bei einer Stromproduktion von ca. 27.000 kWh ha⁻¹ einer Reduzierungsleistung von 290 bis 370 g CO_{2äq} je eingespeister Kilowattstunde.

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Anhand der Ergebnisse können folgende Schlussfolgerungen für die Anbaupraxis gezogen werden:

1. Zur Erhöhung des TS-Ertrages bei Mais für die Biogasproduktion eignen sich Sorten aus einem FAO Bereich von 280 bis 400. Sie erzielen in Abhängigkeit vom Standort höhere TS-Erträge und erreichen gleichzeitig silierfähige TS-Gehalte. Sorten mit höheren Reifezahlen (FAO > 400) bergen ein erhöhtes Risiko unter den gegebenen klimatischen Bedingungen nicht den silierfähigen TS-Bereich zu erreichen und keine gesichert höheren Erträge zu erzielen.
2. Für einen weiten Reifebereich von FAO 250 bis FAO 600 wurde kein Einfluss der Sorte auf die Methanausbeute festgestellt. Erst ab FAO 800 zeigte sich tendenziell eine negative Wirkung. Damit erleichtert sich für die Praxis die Sortenwahl. Ausschlaggebende Kriterien sind nur der TS-Ertrag und die Silierfähigkeit.
3. Die Wahl des Erntetermins beeinflusste die Höhe der Methanausbeute nicht. Durch den Anbau von Sorten unterschiedlicher Reife kann somit das standortspezifische Erntefenster vergrößert werden, ohne Verluste in der Methanausbeute hinnehmen zu müssen.
4. Die untersuchten Merkmale (Zellinhaltsstoffe, Zellwandbestandteile, Verdaulichkeitsparameter der Ganz- und Restpflanze) zeigten keinen Einfluss auf die Methanausbeute. Für die Methan bildenden Bakterien ist es offenbar unerheblich, welche Art von Kohlenhydraten (Stärke oder Rohfaser) zur Verfügung gestellt wird. Stärke als Maß für die Qualität des Maises wie in der Tierernährung ist für die Biogasproduktion nicht von Bedeutung. Damit entfallen auch die Kriterien Kolbenanteil und Ausreife des Kolbens als Qualitätsmerkmale einer Sorte.
5. Die Höhe des Methanertrages pro Hektar wird im Wesentlichen vom TS-Ertrag der Sorte bestimmt. Eine auf diese Zielgröße angepasste Pflanzenproduktion ist deshalb wichtig. Der optimale Erntetermin wird wiederum von der Silierfähigkeit bestimmt. Damit gilt für die Sortenwahl, solche Sorten auszuwählen, die am vorgegebenen Standort einen sicheren silierfähigen Mindest-TS-Gehalt von 28 % erreichen. Der optimale Erntezeitpunkt liegt dann etwa bei Ende September bis Mitte Oktober. Eine maximale Stärkeeinlagerung ist nicht von Bedeutung.
6. Die Düngung mit Gärrest reicht auch bei massewüchsigen Sorten aus, um ein hohes Ertragsniveau zu erzielen und ermöglicht damit die Kreislaufführung des Gärsubstrates und die Einsparung mineralischen Düngers.

7. Die Energie- und Klimabilanz ist in jedem Fall positiv, so dass aus energetischer Sicht die Energieerzeugung aus Mais zu befürworten ist. Allerdings muss der Humusabbau unter Mais durch eine mehrgliedrige Fruchtfolge ausgeglichen werden.

Ausblick

Mais ist wie kaum eine andere landwirtschaftliche Kulturpflanze mit negativen Vorurteilen behaftet. Einige davon sind bedeutsam (Erosion, Humusabbau) und erfordern ein angepasstes Management, zum Beispiel entsprechende Fruchtfolgen mit Zwischenfrüchten und eine konservierende Bodenbearbeitung. Bei aller Skepsis bleiben jedoch viele positive Aspekte des Maisanbaus zur energetischen Nutzung bestehen. Durch seine hohe Flächenleistung kann Mais bei dezentraler Nutzung in einer vielgliedrigen Fruchtfolge einen substantziellen Beitrag zur Schonung fossiler Energiereserven und zur Reduzierung der CO₂-Emissionen leisten. Aufgrund fehlender Alternativen erscheint es daher geboten, dieses Potenzial nicht ungenutzt zu lassen, und die Nutzung nachhaltig zu gestalten.

Um möglichen negativen Folgen durch intensiven Maisanbau vorzubeugen, sind Biogasfruchtfolgen zu erarbeiten, die aus dem energetischen Aspekt wie auch hinsichtlich der Humusbilanz optimal sind. Dazu sollte die angewandte Wissenschaft überzeugende Beispiele liefern.

Um genotypische Unterschiede hinsichtlich der Methanausbeute einer Sorte feststellen zu können, müssen die angewandten Methoden vergleichbarer und differenzierter werden. Unterschiede in der Probenaufbereitung haben unter Umständen die Ergebnisse beeinflusst. Deshalb wäre ein Abgleich der Methoden dringend nötig. Die in der Literatur publizierten Einflüsse des Genotyps auf die Methanausbeute sollten aufgrund der unterschiedlichen Probenaufbereitung nochmals dahingehend überprüft werden, ob sie tatsächlich vom Genotyp herrühren. Und letztlich sollte eine exaktere Angabe zur statistischen Relevanz der Gasunterschiede und der Wiederholbarkeit eines Messwertes die Ergebnisse leichter vergleichbar machen.

Wie die dargestellten Ergebnisse zeigen, scheint eine Übertragung der aus der Tierernährung gewonnenen Erkenntnisse auf die Biogasnutzung nur bedingt geeignet, so dass eine neue objektive Bewertung notwendig ist.

7 Zusammenfassung

Für die Erzeugung von Biomasse zur Biogasproduktion ist der Methanertrag pro Hektar das Zielmerkmal. Eine hohe Flächenleistung dieses Parameters wird durch hohe TS-Erträge und hohe Methanausbeuten pro kg organischer TS erreicht. Der vorliegenden Arbeit lag die Frage zugrunde, ob die klassische Silomais-Sortenempfehlung für die Tierernährung auch für die Biogasproduktion gilt. Denn während für die Tierernährung spätreifende Maissorten ungeeignet sind, weil sie im Vergleich zu frühreifenden Sorten eine geringere Kolbenbildung und dadurch geringere Stärke- und Energiegehalte aufweisen, muss das für die Biogaserzeugung nicht gelten. Da späte Sorten durch ein weit höheres Biomassepotenzial gekennzeichnet sind, sollte in der vorliegenden Arbeit geprüft werden,

- ob durch die Nutzung von spätreifenden Silomaisorten die Flächenleistung (m^3 Methan ha^{-1}) gesteigert werden kann.
- ob die Inhaltsstoffzusammensetzung, v.a. die geringere Kolbenausbildung von späten Sorten, einen Einfluss auf die Höhe der Gasausbeute (NI CH_4 (kg OTS^{-1})) hat.
- wann der optimale Erntetermin hinsichtlich Methanausbeute und Methanertrag pro Hektar bei späten Sorten erreicht ist.

Neben diesen Fragestellungen wurde auch grundlegenden produktionstechnischen Fragestellungen, insbesondere zur Bestandesdichte und Düngung in Abhängigkeit vom Reifetyp nachgegangen. Die Versuchsfragestellungen lauteten diesbezüglich:

- stellen späte und massereiche Sorten andere Ansprüche an die Bestandesdichte als frühreife Sorten und
- reicht die Düngung mit Gärrest aus, das höhere Ertragspotenzial von späten Sorten zu erfüllen.

In den Jahren 2002 bis 2006 wurden dazu umfangreiche Versuche mit unterschiedlichen Maisgenotypen in klimatisch unterschiedlichen Regionen in Bayern und Niedersachsen durchgeführt. Die Versuche waren Teil eines Verbundprojektes, das zusammen mit der Universität Hohenheim und der KWS Saat AG, Einbeck durchgeführt wurden. Aufgabe des Partners aus der Züchtung (KWS) war die Bereitstellung von Maisgenotypen für die Biomasseproduktion. Dieses Material wurde dann in der hier vorliegenden Arbeit auf die oben dargestellten Fragestellungen hinsichtlich der Biogasnutzung geprüft. Die dafür benötigten Gasanalysen wurden vom Partner in der Universität Hohenheim durchgeführt.

Die verwendeten Sorten stammten aus einem Reifebereich $\text{FAO} > 250$. Dabei wurden die Sorten als spät bezeichnet, wenn sie aus einem FAO-Bereich von 260 bis 400 und sehr

spät, wenn sie aus einem FAO-Bereich von 400 bis 800 stammten. Als Vergleichssorte diente die Sorte *Gavott* (FAO 250), eine in Deutschland gut adaptierte ertragsstarke Silomaisorte aus dem mittelfrühen Reifebereich. Die Sorten wurden auf ertrags- und qualitätstbestimmende Parameter untersucht.

Die Versuche zeigten, dass die Wahl des Erntetermins keinen Einfluss auf die Höhe der Methanausbeute hatte. Im Versuchsmittel wurde eine Methanausbeute von ca. 330 NI (kg OTS)⁻¹ ermittelt. Trotz einer sehr großen Schwankungsbreite der Inhaltsstoffe und Qualitätsmerkmale konnte kein Zusammenhang hergestellt werden. Ebenso wenig konnte ein relevanter Sorteneinfluss nachgewiesen werden. Die Sorten erreichten trotz unterschiedlicher Reifebereiche und deutlich unterschiedlichen Inhaltsstoffen und Verdaulichkeitsparametern ähnliche Methanausbeuten. Die Ergebnisse deuten an, dass es für die Methanbakterien nicht relevant ist, aus welcher Kohlenhydratquelle (Kolben = Stärke, Restpflanze = NDF) das Futter stammt. Die Ursachen für die Höhe und die Variation der Methanausbeute konnten nicht eindeutig geklärt werden.

Für die Flächenleistung (m³ CH₄ ha⁻¹) konnte gezeigt werden, dass sie im Wesentlichen von der Höhe des TS-Ertrages bestimmt wird.

Als Sorten eigneten sich Genotypen aus dem Reifebereich bis FAO 400. Darüber wurden keine silierfähigen TS-Gehalte erzielt. Der optimale Erntetermin von diesen Sorten lag zwischen Ende September und Mitte Oktober.

Der Bestandesdichteversuch ergab für die späten Sorten ein Ertragsoptimum bei 10 Pfl. m⁻². Die Wahl der Bestandesdichte zeigte in diesem Versuch nur einen geringen Einfluss auf die Qualitätsparameter. Ebenso wurde der TS-Gehalt wie auch die Methanausbeute nicht beeinflusst.

Die Ergebnisse des zweijährigen Düngeversuchs mit zwei Sorten, vier Intensitätsstufen mit mineralischer und Gärrestdüngung an zwei Orten zeigten, dass leistungsfähige späte Sorten ausreichend mit Gärrest versorgt werden konnten. In allen Intensitätsstufen zeigten die Sorten keine Abhängigkeit von der Düngerart. Die Gärrestdüngung war gleich zu setzen mit der mineralischen Düngung. Damit sind die Kreislaufführung des Gärsubstrates und die Einsparung mineralischen Düngers möglich.

Darüber hinaus wurde eine Energie- und Klimabilanzierung des Silomaisanbaus zur Stromerzeugung in Biogasanlagen mit Hilfe des Modells REPRO unter dem Einfluss differenzierter Düngung durchgeführt. Der Energieeinsatz der Energieerzeugung aus Mais sollte Aufschluss über die Effizienz eines solchen Anbausystems geben. Darüber hinaus sollte die CO₂-Bilanzierung eine Bewertung der Klimawirkung der Maisproduktion zur Stromerzeugung aus Biogas ermöglichen. Mit den Ergebnissen aus dem Düngeversuch wurde dazu eine

Energie- und CO₂-Bilanzierung von der Bodenbearbeitung vor der Maissaat bis zur Strom-einspeisung und Gärrestverwertung durchgeführt. Es zeigte sich, dass immer die intensivste Gärrestvariante die besten Ergebnisse erzielte. Sie ermöglichte das höchste Energie Output/Input-Verhältnis von 2,6, die niedrigste Energieintensität und die beste CO₂-Bilanzierung. Am schlechtesten schnitten die Mineraldüngervarianten ab. Nach wie vor verursacht der hohe Energieeinsatz der Mineraldüngerherstellung ein ungünstiges Output/Input-Verhältnis und eine hohe Energieintensität. Auffallend war die ungünstige Effizienz der Nullvariante. Obwohl kein Energieeinsatz für die Düngung erforderlich wurde, war der Energieeinsatz dennoch so hoch, dass es gegenüber der Gärrestvariante kaum Vorteile ergab.

Die CO₂-Bilanzierung war deutlich positiv zu Gunsten des Anbaus von Mais. Durch die hohe Stromproduktion pro ha können große Mengen an Strom aus fossil erzeugten Energieträgern eingespart werden und dadurch ca. 8.400 kg CO_{2äq} ha⁻¹ vermieden werden. Am ungünstigsten zeigte sich der Silomaisanbau allerdings in der C-Freisetzung durch Humusabbau. Eine weit gestellte Fruchtfolge und der Anbau von Zwischenfrüchten können dem Humusabbau der trotz positiver C-Bilanz entgegenwirken.

Summary

Maize (*Zea mays* L.) is the main substrate used for biogas production in Germany. It is used in over 85 % of the biogas plants (about 4000 agricultural plants). Core criteria for the creation of biomass for the production of biogas is a high methane and dry matter yield per hectare.

The key question discussed in this study is: Can late-ripening varieties be recommended for biogas production? Late-ripening maize hybrids have in comparison to early-ripening hybrids less developed cobs and therefore contain less sources of starch und energy, but have a higher biomass yield potential than early- ripening genotypes.

The following trials were conducted to determine:

- if the use of late-ripening maize hybrids results in a higher methane yield per hectare
- if the quality parameters of the late-ripening genotypes influence the specific methane yield per kg organic dry matter
- if there is an optimal harvest time to achieve high methane yields per kg organic dry matter per hectare.

Additional tests were conducted to determine the effects of plant density and organic fertilizing on the genotype based on the following questions:

- Do late-ripening hybrids require a different plant density than early- ripening hybrids?
- Is it possible to meet fertilizer demand for late-ripening hybrids with their higher biomass yield potential by using the effluent of a biogas plant ?

From 2002 to 2006 many trials were conducted on genotypes with different ripening cycles at two climatically different sites in Bavaria and Lower Saxony (both Germany). Partners of the project were KWS Saat AG, Einbeck and the University Hohenheim. KWS Saat AG developed the maize prototypes used for biomass production. The field trials were conducted on the basis of the prototype material and the required methane gas analysis was conducted by project partners in Hohenheim.

Maize maturity ranged from FAO 250 up to 800. The varieties were classified according to late-ripening (FAO 260 - 400) and very late ripening (FAO 450 - 800) types. *Gavott*, a climatically well- adapted medium-early variety was used as a standard for comparison in all trials. Total plant yield was determined at least four times after female flowering and biomass was analyzed for nutrient composition and digestibility. Specific methane yield was measured according to the *Hohenheimer Biogasertragstest (HBT)*.

The trials showed that the time of harvest had no influence on the specific measurable methane yield. A specific methane yield of about 330 NI (kg ODM)⁻¹ was obtained. In spite of a wide range of fluctuation in the nutrient composition and quality parameters of the varieties at the time of each harvest, no correlation could be found. Although the varieties were at different stages of ripeness and differed in parameters of content and digestibility, they showed similar specific methane yields while their range of maturity differed considerably. The findings lead to the conclusion that the source of carbohydrates (cobs = starch, plant surplus = NDF) is irrelevant to the bacteria involved in the biogas production process. The cause for the amount and variation in methane yield could not be determined.

The dry matter hectare yield determined the methane hectare yield which did not differ considerably from the specific methane yield. Varieties with a maturity up to FAO 400 performed best. Late-ripening varieties did not achieve the necessary dry matter concentrations of at least 28 % to avoid seepage during ensiling.

The optimal harvest time/date was later than for medium-early hybrids, e.g. but between the end of September and mid of October.

The optimal plant density did not differ much between medium-early and late-maturity varieties. Late-maturity varieties also achieved 10 plants per m², e.g. the highest dry matter yield. Depending on plant density which ranged from 6 to 14 plants per m² no or a very little influence on nutrient composition and digestibility parameters were found. Dry matter concentration and specific methane yield was not influenced by plant density.

The findings from the fertilizer trials over two years with two varieties and three different intensities obtained from the effluent of biogas plants (minerals and organic fertilizer), showed that the nutrient demand of the late-maturity varieties with their higher biomass potential can be met by organic fertilizers (effluent of a biogas plant). Fertilizing intensity and variety had no effect on the plants. Consequently, recycling valuable nutrients found in the effluent of biogas plant is possible and saves on mineral fertilizer.

In addition, an energy and CO₂- balance study was conducted to determine the climatic effectiveness of the system on the basis of the findings of the fertilizer trials with the help of the calculation model REPRO. Energy demand and production, produced by feeding the electricity obtained from maize-based biogas into the grid, was calculated in an effort to prove the efficiency of creating energy in this manner.

A high input of organic fertilizer achieved the best result in all cases. It reached the highest energy output/input in a ratio of 2,6, the lowest energy intensity and the best CO₂-balance. Mineral fertilizing showed the worst performance in relation to energy demand and CO₂ emission. It led to a smaller energy output/input ratio and a higher energy intensity. The most remarkable results of the trial were those achieved without the use of any kind of fertilizer. Although the energy demand for fertilizer production was not calculated, no advantage could be determined when compared to organic fertilizer trials. Not fertilizing did not automatically lead to a better energy and CO₂-balance.

In total, the CO₂-balance from maize production was clearly positive. By using maize-produced electricity, electricity obtained from fossil fuels can be reduced, thereby eliminating climatic gas emissions of about 8.400 kg CO_{2äq} ha⁻¹. But maize cultivation leads to a high degradation of organic matter. Therefore it is highly recommended to avoid maize monoculture in favor of alternating cultures and spacing between planting seasons.

8 Literaturverzeichnis

ALDRICH, S.R., W.O. SCOTT & R.G. HOEFT (1986): Modern corn production. 3. Aufl. A&L Publications, Champaign, Illinois.

AMID, A. (2004): Biogaserzeugung aus Mais – Einfluss des Ernteverfahrens und des Erntezeitpunktes auf den Methanertrag. Diplomarbeit am Institut für Landtechnik, Department für Nachhaltige Agrarsysteme, Universität für Bodenkultur Wien.

AMON, B., V. MOITZI, V. KRYVORUCHKO, T. AMON, E. HACKL & S. ZECHENMEISTER-BOLTENSTERN (2002): Emissionen von NH₃, N₂O und CH₄ nach Ausbringung von Rinderflüssigmist und Einfluss der Flüssigmistbehandlung, In: KTBL/UBA, Emissionen der Tierhaltung – Grundlagen, Wirkungen, Minderungsmaßnahmen, KTBL-Schrift 406 (2002). 331–332.

AMON, T. (2005): Biogaserzeugung aus Nebenprodukten der Zuckerrübenverarbeitung, Vortrag BETAEXPO, Linz.

AMON, T. & H. DÖHLER (2006): Qualität und Verwertung des Gärrestes: In: FNR: Handreichung Biogasgewinnung und –nutzung; Gülzow.153-165.

AMON, T., V. KRYVORUCHKO, V. BODIROZA & B. AMON, (2005): Das Methanbildungsvermögen und die Biogasqualität bei der Vergärung von Energiepflanzen. Forschungsbericht. Universität für Bodenkultur Wien, im Auftrag der Saatbau Linz GmbH. 12 S.

AMON, T., V. KRYVORUCHKO, B. AMON, V. BODIROZA, W. ZOLLITSCH & J. BOXBERGER (2006a): Biogaserzeugung aus Energiemais. Landtechnik 61. 2. 86-87.

AMON, T., V. KRYVORUCHKO, B. AMON, V. BODIROZA, W. ZOLLITSCH J. BOXBERGER & E.M. PÖTSCH, (2006b): Strategien zur nachhaltigen Biogaserzeugung aus Energiepflanzen durch standortangepasste Fruchtfolgesysteme, Sortenwahl und optimale Ernte. Biogas-tagung Hannover. 25-27.01.2006. 99-111.

- AMON, T., V. KRYVORUCHKO, B. AMON, W. ZOLLITSCH, K. MAYER, S. BUGA & A. AMID (2003a): 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.
- AMON, T., V. KRYVORUCHKO, B. AMON, G. MOITZI, S. BUGA, D. FISTAROL, E. HACKL, D. JEREMIC, W. ZOLLITSCH & E. PÖTSCH (2003b): Optimierung der Biogaserzeugung aus den Energiepflanzen Mais und Klee gras. Enderbericht Juli 2003. Institut für Land-, Umwelt-, und Energietechnik, Universität für Bodenkultur Wien, Wien, 76 S.
- AMON, T., B. AMON, V. KRYVORUCHKO, W. ZOLLITSCH, K. MAYER & L. GRUBER (2007): Biogas production from maize and dairy cattle manure – influence of biomass composition on the methane yield. *Agric. Ecosyst. Environ.* 118. 173-182.
- ANDERSON, G.Q.A. & M.J. FERGUSSON (2006): Energy from biomass in the UK: sources, processes and biodiversity implications. *Ibis* 148. 180-183.
- ANDRADE, F.H., S.A. UHART, G. ARGUISSAIN & R.A. RUIZ (1992): Radiation use efficiency of maize grown in a cool area. *Field Crops Research*. 28. 345-354.
- ANDRADE, F.H., C.R.C. VEGA, S.A. UHART, A. CIRILIO, M.G. CANTARERO & O.R. VALENTINUZ (1999): Kernel number determination in maize. *Crop Sci.* 39. 453-459.
- ANDRIEU, J., C. DEMARQUILLY, P. DARDENNE, Y. BARRIÈRE, M. LILA, P. MAUPETIT, F. RIVIÈRE & N. FEMENIAS (1993): Composition and nutritive value of whole plants fed fresh to sheep. I. Factors of variation. *Ann. Zootech.* 42. 221-249
- ANDRIEU, J., Y. BARRIÈRE & C. DEMARQUILLY (1999): Digestibilité et valeur énergétique des ensilages de maïs: le point sur des méthodes de prévision au laboratoire. *Prod. Anim.* 12. 391-396.
- ANONYMUS (2006a): Versuchsergebnisse aus Bayern. Landessortenversuche Silomais mittelfrühe und mittelspäte Sorten. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft.

- ANONYMUS (2006b): Über den Einfluss von Häcksellänge und Trockenmassegehalt auf die Verdichtungs- und Silierkriterien von Silomais. Versuchsbericht. Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen. 14 S.
- ANSCOMBE, F. & J.W. TUKEY (1963): The examination and analysis of residuals. *Technometrics* 5. 141-160.
- ANZER, T; S. PRECHTL, R. SCHNEIDER, J. WINTER & C. GRAF ZU ELTZ (2003): Erfahrungen bei der thermophilen Vergärung von Wirtschaftsdüngern und Nachwachsenden Rohstoffen. *Biogas International 2003 – Konferenz, Augsburg: Anaerobe Vergärung von Organischen Rohstoffen und Energiepflanzen*. Hrsg. IBBK, Weckelweiler. 55-60.
- ARGILLIER, O., Y. BARRIÈRE & Y. HÉBERT (1995a): Genetic variation and selection criterion for digestibility traits of forage maize. *Euphytica* 82. 175-184.
- ARNOLD, K. (2008): Vorzüglichkeit verschiedener Bioenergielinien – Klimaschutz und Energieeffizienz. *VDLUFA. Schriftenreihe* 64. 30-39.
- AUERSWALD, K. (1989): Verminderung von Bodenerosion im Maisanbau. *mais* 2/89. 24-26.
- AUFHAMMER, W., E. KÜBLER & H.-W. BECKER (1991): Stickstoffaufnahme und Stickstoffverlagerungspotential unter Maisbeständen. *Mais* 4. 30-32.
- BACHMEIER, H., M. EFFENBERGER & A. GRONAUER (2007): Klimabilanz von Biogasstrom. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft. Freising. *LFL Information* 2007. 12 S.
- BACHMEIER, H., M. EFFENBERGER & A. Gronauer (2008): Der Beitrag landwirtschaftlicher Biogasanlagen zum Klimaschutz. *VDLUFA. Schriftenreihe* 64. 100-108.
- BADGER, D.M., M.J. BOGUE & D.J. STEWART (1979): Biogas production from crops and organic wastes. 1. Results of batch digestions. *New Zealand Journal of Science* 22. 1. 11-20.
- BARRIÈRE, Y., M.R. TOVAR-GÓMEZ, J.C. ÉMILE & D. SAUVANT (1998): Genetic variation in rate and extent of the in situ cell wall degradation of maize stalks at silage harvest time. *Agronomie* 18. 581-589.

- BARRIÈRE, Y., C. GUILLET, D. GOFFNER & M. PICHON (2003): Genetic variation and breeding strategies for improved cell wall digestibility in annual forage crops. A review. *Anim. Res.* 52. 193-228.
- BASERGA, U. (1998): Landwirtschaftliche Ko-Vergärungsanlagen. FAT-Berichte, Eidg. Forschungsanstalt für Agrarwissenschaften und Landtechnik (FAT), Tänikon, Schweiz.
- BASERGA, U. & K. EGGER (1997): Projekt Energiegras/feldholz – Bundesamt für Energiewirtschaft, Tänikon (Schweiz) 1997. in: Kraftwerk Wiese. Strom und Wärme aus Gras. Walter Graf (Hrsg.) 1999. 34-39.
- BEECH, D.F. & J.J. BASINSKI (1975): Effect of plant populations and row spacings on early and late maize hybrids in the Ord Valley. *Aust.J.Exp.Agric.* 15. 406-413.
- BESGEN, S. (2005): Energie- und Stoffumsetzung in Biogasanlagen. Dissertation Rheinischen Friedrich-Wilhelm-Universität, Bonn. 172 S.
- BESSON, J.-M., V. LEHMANN, M. ROULET & W. EDELMANN (1982): Comparaison de trois traitements des lisiers en conditions expérimentales contrôlées :stockage, aération et méthanisation. *Rev. Suisse Agric.* 14. 327-335.
- BMELV (2007): Nutzung von Biomasse zur Energiegewinnung – Empfehlungen an die Politik. Wissenschaftlicher Beirat Agrarpolitik beim Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. Verabschiedet im November 2007. 255 S.
- BMLF (2003): Bayerisches Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten (Hrsg.): Merkblatt Verminderung gasförmiger Emissionen in der Tierhaltung, RB-Nr. 08/03/16, Freising 2003.
- BOESE, L. (1997): Mais in engeren Reihen ablegen? *top agrar spezial* (3). 26-29.
- BOHLE, H. & F. WAGNER (1978): Ertragsstruktur von Silomais bei variiertem Standraum. Das wirtschaftseigene Futter. 24. 115-124.
- BÖSE, S. (1998): „Heliotrop“-Maissorten nutzen Sonnenenergie effizienter und versprechen Vorteile. *Neue Landwirtschaft*, 2. 48-51.

- BREITSCHUH, G. (2003): Indikatorsystem zur einzelbetrieblichen Analyse und Bewertung der Nachhaltigkeit landwirtschaftlicher Unternehmen. Initiativen zum Umweltschutz. 56. 79-90.
- BRENNER A. & J. CLEMENS (2005): Vergleich der Stoffflüsse mit ökologischer Bilanzierung von zwei Kofermentationsanlagen. Landwirtschaftliche Fakultät der Universität Bonn, Schriftenreihe des Lehr- und Forschungsschwerpunkts USL 128.
- BROWN, R.H., E.R. BEATY, W.J. ETHREDGE & D.D. HAYES (1970): Influence of row width and plant population on yield of two varieties of corn (*Zea mays* L.). *Agron.J.*62. 767-770.
- BStMLF & BStMUGV (2005): Cross Compliance 2005. Bayerisches Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten sowie Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz.
- BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN (2005): Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen 2005. BGR, Kurzstudie, Stand 31.12.2005.
- BUSWELL, A.M. (1936): Anaerobic Fermentations. Bull.No.32. Div. State Water Survey. Univ. of Illionois. 193.
- CAI G.X., D.L. CHEN, H. DING, A. PACHOLSKI, X.H. FAN & Z.L. ZHU (2002): Nitrogen losses from fertilizers applied to maize, wheat and rice in the North China Plain : Nutrient Cycling in Agroecosystems, Vol.63/ 2-3, 187-195(9).
- CALLAGHAN, F.J., D.A.J. WASE, K. THAYANITHY & C.F. FORSTER (2002): Continuous codigestion of cattle slurry with fruit and vegetable wastes and chicken manure. *Biomass & Bioenergy* 22. 1. 71-77.
- CAMPBELL, C.J. (1999): The imminent peak of world oil production, Rede vor dem Britischen Unterhaus am 7.7.1999, <http://www.oilcrisis.com/campbell/commons.htm>.
- CAPRISTO, P.R., R.H. RIZZALLI & F.H. ANDRADE (2007): Ecophysiological Yield Components of Maize Hybrids with contrasting maturity. *Agron.J.* 99. 1.111-1.118.

-
- CHESSON, A. & J. A. MONRO (1982): Legume Pectic Substances and their Degradation in the Ovine Rumen. *J. Sci. Food Agric.* 33. 852-859.
- CLAYTON, H., I.P. MC TAGGART, J. PARKER, L. SWAN & K.A. Smith (1997): Nitrous oxide emissions from fertilised grassland: A 2-year study of the effects of N fertiliser form and environmental conditions. *Biology and Fertility of Soils.* 25. 252-260.
- COLLINS, W.K., W.A. RUSSELL & S.A. EBERHART (1965): Performance of two-ear type of corn belt maize. *Crop Sci.* 5. 113-116.
- CONE, J.W. & F.M. ENGELS (1993): The influence of ageing on cell wall composition and degradability of three maize genotypes. *Anim. Feed Sci. Technol.* 40. 331-342.
- COX, W.J. (1996): Whole-plant physiological and yield responses of maize to plant density. *Agron.J.* 88. 489-496.
- CRÖSSMANN, G. (1967): Standraum und Stoffproduktion bei Mais. *Acker- und Pflanzenbau*, 125. 222-253.
- CRUTZEN, P.J., A.R. MOSIER, K.A. SMITH & W. WINIWARTER (2007): N₂O release from agro-biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* 7. 11.191-11.205.
- CZEPUCK, K., H. OECHSNER, B. SCHUMACHER & A. LEMMER (2006): Biogasausbeuten im Labor im Vergleich zur rechnerischen Abschätzung. *Landtechnik* 61. 2/2006.82-82.
- DACHS, G. & W. REHM (2006): Der Eigenstromverbrauch von Biogasanlagen und Potenziale zur dessen Reduzierung. *Solarenergieförderverein Bayern e.V. SeV Studien* 01. 25 S.
- DÄMMGEN, U. (2006): Berechnungen der Emissionen aus der Landwirtschaft – Nationaler Emissionsbericht (NIR) 2006 für 2004. *Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft* 291 A.
- DBU (2003): Biogasgewinnung aus Gülle, organischen Abfällen und aus angebaute Biomasse – eine technische, ökologische und ökonomische Analyse, DBU-Projekt 15071. Institut für Energietechnik und Umwelt GmbH, Leipzig.

- 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.
- DEGENHARDT, H. (1996): NIRS-Untersuchungen zur Erfassung futterwertrelevanter Qualitätsparameter von Silomaisarten in einem Gerätenetzwerk. Dissertation Universität Halle-Wittenberg. *Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft* 163.
- DEGENHARDT, H. (2005): Optimierung des Biogasertrages durch angepasste Maissorten und richtiges Anbaumanagement. CD-ROM. In: *Proceedings of the First International Energy Farming Congress, Papenburg, Germany, March 2-4 2005*. Kompetenzzentrum Nachwachsende Rohstoffe, Werlte, Germany.
- DEUTSCHER BUNDESTAG (2006): Antwort der Bundesregierung auf die kleine Anfrage der Abgeordneten Bärbel Höhn, Hans Josef Fell, Cornelia Behm, Ulrike Höfken, und der Fraktion Bündnis 90/Die Grünen, Drucksache 16/5.346.
- DIEPENBROCK, W. (1989): Der N-Haushalt der Maispflanze – Physiologische Grundlagen und genetische Variabilität. 13. Einbecker Maiskolloquium am 7.9.1989.
- DOSCH, P. & R. GUTSER (1995): Reducing N losses (NH_3 , N_2O , N_2) and immobilization from slurry through optimized application techniques. In: *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 156-171.
- DOSCH, P. & R. GUTSER (1996): Risk for gaseous N losses by different slurry managements. *Transactions of the 9th Nitrogen Workshop Braunschweig*. 481-484.
- DüV (2006): Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung - DüV), BGBl I.
- DWYER, L.M., B.L. MA, L. EVENSON & R.I. HAMILTON (1994): Maize physiological traits related to grain yield and harvest moisture in mid to short-season environments. *Crop Sci.* 34. 985-992.

- EEG (2009): Gesetz zur Neuregelung des Rechts der Erneuerbaren Energien im Strombereich und zur Änderung damit zusammenhängender Vorschriften (Erneuerbare-Energien-Gesetz, EEG 2009). 2074 Bundesgesetzblatt, Jahrgang 2008, Teil I Nr. 49, ausgegeben zu Bonn am 31. Oktober 2008.
- EDELMANN, W., H. ENGELI & M. GRADENECKER (2000): Co-digestion of organic solid waste and sludge from sewage treatment. *Water Science and Technology* 41. 3. 213-221.
- EDELMANN, W., K. SCHLEISS, H. ENGELI & U. BAIER (2001): Ökobilanz der Stromgewinnung aus landwirtschaftlichem Biogas. Bundesamt für Energie, Bern. 2001.
- EDER, B. & H. SCHULZ (2007): *Biogas Praxis*. Ökobuchverlag, Staufen b. Freiburg, 4. Auflage 2007.
- EDER, B., J. EDER & E. STICKSEL (2008): Optimierte Maisfruchtfolgen für die Biomasseproduktion zur Biogaserzeugung. VDLUFA. Schriftenreihe 64. 334-340.
- EDER, J. & B. KRÜTZFELDT (2000): Einfluss des Reifestadiums auf den Ertrag und Qualitätsmerkmale von Silomais. *Pflanzenbauwissenschaften* 2/00. 65-71.
- EDMEADES, G.O., & T.B. DAYNARD (1979): The relationship between final yield and photosynthesis at flowering in individual maize plants. *Can. J. Plant Sci.* 89. 585–601.
- EDWARDS, J.T., L.C. PURCELL & E.D. VORIES (2005): Light interception and yield of short-season maize (*Zea mays* L.) hybrids in the Midsouth. *Agron.J.* 97. 225-234.
- EL BASSAM, N. (1998): *Energy plant species – Their use and impact on environment*. London, James (Science Publishers) Ltd.
- EPA (2006): Environmental Protection Agency, Global Anthropogenic Non-CO₂ Greenhouse Gas Emissions: 1990-2020. Washington D.C.
- EPINAT-LE SIGNOR, C., S. DOUSSE, J. LORGEOU, J.B. DENIS, R. BONHOMME, P. CAROLO & A. CHARCOSSET (2001): Interpretation of genotype environment interactions for early maize hybrids over 12 years. *Crop Sci.* 41. 663-669.

- EWERS, E. (1908): Über die Bestimmung des Stärkegehalts auf polarimetrischem Wege. Z. öffentl. Chem. 14:150-157.
- FACHVERBAND BIOGAS E.V. (2006): Biogas - das Multitalent für die Energiewende; Fakten im Kontext der Energiepolitik-Debatte, Hrsg. Fachverband Biogas e.V., Freising.
- FAIDLEY, L.W. (1992): Energy and Agriculture. In Fluck, R.C. [Ed]: Energy in Farm production. Elsevier Scientific Publishers, Amsterdam.1-12.
- FELDE, A. (2007): Stand und Perspektiven der Energieerzeugung aus Biomasse aus der Sicht der Pflanzenzüchtung. Herbsttagung der Agrarsozialen Gesellschaft e.V. am 8./9. November 2007 in Göttingen „Nahrung und Energie aus der Landwirtschaft“.
- FIENER, P.& K. AUERSWALD (2007): Rotation Effects of Potato, Maize, and Winter Wheat on Soil Erosion by Water. Soil Sci. Soc. of America journal. 71/6. 1919-1925.
- FINKE, C., K. MÖLLER, S. SCHLINK, B. GEROWITT & J. ISSELSTEIN (1999): The environmental impact of maize cultivation in the European Union. Case Study Germany. Forschungs- und Studienzentrum Landwirtschaft und Umwelt in Zusammenarbeit mit der Abteilung Futterbau & Graslandwirtschaft des Institutes für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung, Georg-August-Universität Göttingen.
- FLACHOWSKY G. (1994): Einsatz von maisstärkehaltigen Futtermitteln. Tierproduktion. Kraftfutter 94, 224-232.
- FLACHOWSKY, G., P. BALDEWEG & G. SCHEIN (1992): A note on the in sacco dry matter degradableability of variously processed maize grains and of different maize varieties in sheep. Anim. Feed Sci. Technol. 39. 173-181.
- FLESSA H., F. BEESE, R BRUMME, E. PRIESACK, E. PRZEMECK & J.-P. LAY (1998): Freisetzung und Verbrauch der klimarelevanten Spurengase N₂O und CH₄ beim Anbau nachwachsender Rohstoffe, Deutsche Bundesstiftung Umwelt (Hrsg.) Initiativen zum Umweltschutz 11, Zeller Verlag, Osnabrück 1998 -ISBN 3-535-02486-2.

-
- FNR (2005): Ergebnisse des Biogas-Messprogramms. Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Hrsg. Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe e.V. , Gülzow.
- FRÖLICH, W. & M. POLLMER (1978): Die Blatthaltung bei Mais (*Zea mays* L.) als ertragbeeinflussender Faktor. Kali-Briefe, 5.345-354.
- GERICKE, D., A. PACHOLSKI & H. KAGE (2007): NH₃-Emissionen bei der ackerbaulichen Nutzung von Gärrückständen aus Biogasanlagen. 50. Pflanzenbautagung in Bonn, 18.-20.09.2007. Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss. 19. 280-281.
- GOERING, H.K., R.W. HERMKEN, N.A. CLARK & J.H. VANDERSALL (1969): Intake and digestibility of corn silage of different maturities, varieties and plant populations. J. Anim.Sci. 29. 512-518.
- GRABBER, J.H., J. RALPH, R.D. HATFIELD & S. QUIDEAU (1997): P-hydroxyphenyl, guaiacyl, and syringyl lignins have similar inhibitory effects on wall degradability. J. Agric. Food Chem. 45. 2.530-2.532.
- GRABBER, J.H., J. RALPH & R.D. HATFIELD (1998): Ferulate cross-links limit the enzymatic degradation of synthetically lignified primary walls of maize. J. Agric. Food Chem. 46. 2.609-2.614.
- GRAF, W. (1999): Kraftwerk Wiese. Eigenverlag. ISBN: 3-89811-193-8. 34-40.
- GRAHAM, E.R., P.L. LOPEZ & T.M. DEAN (1972): Artificial light as a factor influencing yield of high population corn. Trans ASAE, St. Joseph, Mich, 15(3). 576-579.
- GREPMEIER, M. (2002): Experimentelle Untersuchungen an einer zweistufigen Fuzzy-geregelten anaeroben Abwasserreinigungsanlage mit neuartigem Festbettmaterial. Dissertation. Technische Universität München, Lehrstuhl für Energie- und Umwelttechnik der Lebensmittelindustrie. 24-32.
- GRÖBLINGHOFF, F.-F., N. LÜDTKE-ENTRUP & K. BLOCK (2005): Mais liefert viel Methan. Landwirtschaftliches Wochenblatt Westfalen Lippe 13/2005. 34-36.

- GRONAUER, A., M. EFFENBERGER, R. KISSEL & H. BACHMEIER (2009): Neue Perspektiven für Biogas?! Tierhaltung und Biogas - Herausforderung und Chance für die Landwirtschaft. LFL Schriftenreihe 2, 2009. 59-80.
- GROSS, F. & G. AVERDUNK (1974): Der Gehalt an Nährstoffen in Maissilagen, ihre Verdaulichkeit und ihre Beziehungen zum TS-Gehalt. Z. Das wirtschaftseigene Futter. 20.
- GROSS, F. & W. PESCHKE (1980): Nährstoffgehalt und Verdaulichkeit von Silomais. Wirtschaftseig. Futter 26. 104-117.
- GRUBER, L., H. KOPAL, F. LETTNER & F. PARKER (1983): Einfluss des Erntezeitpunktes auf den Nährstoffgehalt und den Ertrag von Silomais. Wirtschaftseig. Futter 29. 87-109.
- GRUBER, W., B. LINKE, H. SCHELLE, G. REINHOLD & U. KEYMER (2004): Gaserträge aus der Sicht der Praxis. In: Die Landwirtschaft als Energieerzeuger. KTBL-Schrift 420. Darmstadt. 62-69.
- GUNASEELAN, V.N. (1995): Effect of Inoculum/Substrate Ratio and pretreatments on methane yield from parthenium. Biomass & Bioenergy 8. 1. 39-44.
- GUNASEELAN, V.N. (1997): Anaerobic digestion of biomass for methane production: A review. Biomass & Bioenergy 13. 1-2. 83-114.
- GUTSER, R., A. AMBERGER & K. VILSMEIER (1987): Wirkung unterschiedlich aufbereiteter Gülle im Gefäßversuch zu Hafer und Weidelgras; VDLUFA-Schriftenreihe 23. Kongressband. 279-293.
- GUTSER, R., A. NITSCHKE & A. KLASNIK (1997): Umweltschonende Verwertung von Reststoffen verschiedener Gülleaufbereitungsverfahren; KTBL-Arbeitspapier 242 Umweltverträgliche Gülleaufbereitung und -verwertung. 97-108.
- HANEGRAAF, M.C., E.E. BIEWINGA & G. VAN DER BIJL (1998): Assessing the ecological and economic sustainability of energy crops. Biomass and Bioenergy Vol.15. Nos 4/5. 345-355.

-
- HARTMANN, J. K. (2007): Life cycle assessment of industrial scale biogas plants. Dissertation. Fakultät für Agrarwissenschaften , Georg-August Universität Göttingen. 214 S.
- HARTMANN K. & M. NELLES (2006): Ökobilanz großtechnischer Biogasanlagen, www.biogas-infoboard.de/pdf/Oekobilanz%20grosstechnischer%20Biogasanlagen.pdf. Stand: 3. Dezember 2008.
- HASHIMOTO, A.G. (1989): Effect of Inoculum/Substrate Ratio on methane yield and production rate of straw. *Biological Wastes*. 28. 247-255.
- HEGE, U. (1988): Düngewirkung von ausgefaultem Fließmist. 27. Biogas Praktiker Informationstagung. Grub. 50-56.
- HEIERMANN, M. & M. PLÖCHL (2002): Pflanzliche Biomassen – ein großes Potenzial für die Biogasgewinnung. *Bornimer Agrartechnische Berichte* 32. 43-49.
- 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.
- HEIERMANN, M., H. SCHELLE & M. PLÖCHL (2002): Biogaspotenziale pflanzlicher Kosubstrate. *Bornimer Agrartechnische Berichte* 32. 19-26.
- HELFFRICH, D. & H. OECHSNER (2003): Hohenheimer Biogasertragstest. *Agrartechnische Forschung* (2003) Heft 3. 27-30.
- HEPTING, L. (1982): Die optimale Bestandesdichte. *mais* 2/82.14-16.
- HEPTING, L. (1988): Zum Erntezeitpunkt bei Silomais. *MAIS-Informationen*, Harms-Herford. 2/88.
- HEPTING, L. & J. ZSCHEISCHLER (1975): Der Einfluss der reihenweite und Bestandesdichte auf Kornertrag und Trockensubstanzgehalt bei Körnermais. *Z. Acker- und Pflanzenbau*. 141. 178-186.

- HERRMANN, A. & F. TAUBE (2007): Masse oder Verdaulichkeit? DLG Saatgut-Magazin Winter/06. 2-3. Verlagsbeigabe Saatgutmagazin zu DLG Mitteilungen 1/2007.
- HERTWIG, F. & M. HEIERMANN (2006): Energetischer Futterwert und Biogasausbeute unterschiedlicher Maissortentypen. Landesamt für Verbraucherschutz, Landwirtschaft und Flur-neuordnung, Referat Grünland und Futterwirtschaft, 14641 Paulinenaue, Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim.
- HEYLAND, K.-U. & S. SOLANSKY (1979): Energieeinsatz und Energieumsetzung im Bereich der Pflanzenproduktion. In: Agrarwirtschaft und Energie. Berichte über Landwirtschaft, Sonderheft 195. 15-30.
- HIRSCHFELD, J., J. WEIß, M. PREIDL & T. KORBUN (2008): Klimawirkungen der Landwirtschaft in Deutschland. Schriftenreihe des IÖW 186/08. 43-44.
- HOFFMANN, C., M. ANGER & W. KÜHBAUCH (2001): N₂O-Freisetzung auf gemähtem Dauergrünland in Abhängigkeit von Standort und N-Düngung. J Agronomy Soil Sci 187. 153-159.
- HOLM-NIELSEN, J.B. (2005): Biogas in Europe – a general Overview.
www.ecop.ucl.be/aebiom/articles/biogas/biogas.htm.
- HOPFNER-SIXT K., T. AMON, A. BAUER, V. KRYVORUCHKO, B. AMON, V. BODIROZA, M. RAMUSCH, R. HRBECK, J.K. FRIEDEL, J. BOXBERGER & W. ZOLLITSCH (2005): Möglichkeiten zur Verbesserung der Gasausbeute aus Gärrohstoffen. Die Internet-Plattform für innovative Energietechnologien in den Bereichen Erneuerbare Energieträger und Energieeffizienz. <http://energytech.at>.
- HORCINE, A. (2005): Konzeptionierung, Erstellung und Betrieb einer Versuchsfermentieranlage zur Bearbeitung von Fragestellungen im Bereich Inputmaterialien und Mikrobiologie bei landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Bundesministerium für Bildung und Forschung. Technische Universität München, Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft. Endbericht.
- HUGGER, H. (1989): Mais effizienter düngen. DLG-Mitt. 5/89. 228-229.

- HUGGER, H. (1998): Moderne Sorten verlangen mehr Know-how. Deutsche landschaftliche Zeitung, 98 (4). 30-34.
- HÜLSBERGEN, K.-J. (1990): Methodik zur Quantifizierung von Stoffflüssen im System Boden - Pflanze - Tier und Ableitung von Parametern des natürlichen Reproduktionsprozesses als Grundlage rechnergestützter Analysen in Landwirtschaftsbetrieben. Dissertation, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg.
- HÜLSBERGEN, K.-J. (2003): Entwicklung und Anwendung eines Bilanzierungsmodells zur Bewertung der Nachhaltigkeit landwirtschaftlicher Systeme. Habilitationsschrift Universität Halle–Wittenberg. Shaker Verlag Aachen.
- HÜLSBERGEN, K.-J. (2008): Energiebilanzen und klimarelevante Emissionen ökologischer und konventioneller Anbausysteme. In: Klimawandel und Bioenergie – Pflanzenproduktion im Spannungsfeld zwischen politischen Vorgaben und ökonomischen Rahmenbedingungen. Hrsg. Bundesarbeitskreis Düngung, Frankfurt/Main. 65-89.
- HÜLSBERGEN, K.-J., W. DIEPENBROCK & E. ROST (2000): Analyse und Bewertung von Umweltwirkungen im Landwirtschaftsbetrieb- Das Hallesche Konzept -. In Landwirtschaftliche Fakultät der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg [Hrsg.] (2000): Die Agrarwissenschaften im Übergang zum 21. Jahrhundert - Herausforderungen und Perspektiven.
8. Hochschultagung am 28.04.2000 in Halle/Saale. Tagungsband.
- HÜLSBERGEN, K.-J. & W.-D. KALK (2001): Energy Balancing in Different Agricultural Systems - Can they be Improved? Symposium in Lisbon, 5th March 2001, The International Fertiliser Society. ISSN 1466-1314. 36 S.
- HÜLSBERGEN, K.-J., B. FEIL, S. BIERMANN, G.-W. RATHKE, W.-D. KALK & W. DIEPENBROCK (2001): A method of energy balancing in crop production and its application in a long-term fertilizer trial. Agriculture, Ecosystems and Environment 86. 303–321.
- HÜLSBERGEN, K.-J. & B. KÜSTERMANN (2007): Ökologischer Landbau – Beitrag zum Klimaschutz. In: Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft 3: Angewandte Forschung und Beratung für den ökologischen Landbau in Bayern. Öko-Landbau-Tag 2007.

- HUSSEN, I.M. (1983): Untersuchungen zum Einfluss von Bestandesdichte, Beregnung und Erntetermin auf Pflanzenentwicklung, Ertrag, Ertragskomponenten und auf einige Qualitätsparameter bei frühen Silomais. Dissertation Humboldt Universität Berlin 1983.122 S.
- IEA (2006): Energy Technologies Perspectives. OECD publications, Paris.
- IEA (2007): World Energy Outlook. International Energy Agency. www.iea.org.
- IPCC (2006): Intergovernmental Panel on Climate Change, Guidelines for National Gas Inventories. Vol.4. Annex 16, A/R Methodological tool "Estimation of direct nitrous oxide emission from nitrogen fertilization".
- IPCC (2007): Intergovernmental Panel on Climate Change, Assessment Report 2007. Climate Change 2007. <http://www.ipcc.ch/ipccreports/index.htm> .
- ISERMANN K. (1994): Agriculture's share in the emission of trace gases affecting the climate and some cause-oriented proposals for sufficiently reducing this share. In: Environmental Pollution Volume 83 (1994). 95 -111.
- JÄKEL K. & S. MAU (1999): Umweltwirkungen von Biogasgülle. Abschlußbericht zum Forschungsprojekt. Freistaat Sachsen, Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft. 60 S.
- JÄKEL, K. (2002): Grundlagen der Biogasproduktion. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft. Dresden, 60 S.
- JEROCH, H., G. FLACHOWSKY & F. WEIßBACH (1993): Futtermittelkunde. Jena, Stuttgart: Gustav Fischer Verlag, 510 S.
- JILEK, W. & K. PUCHAS (2007): Energiebilanz Silomais. Biogasstammtisch Schloss Seggau. 6.2.2007.
- JOVANOVIĆ, N., M. WACHENDORF, & F. TAUBE (2000): N-Bilanz und –effizienz von Silomais bei variierter N- und Güllendüngung. 44. Jahrestagung der AG Grünland und Futterbau, Kiel. Band 2 (2000). 189-192.

- JUNG, H.G. & D.R. BUXTON, (1994): Forage quality variation among maize inbreds: Relationship of cell-wall composition and in-vitro degradability for stem internodes. *J. Sci. Food Agric.* 66. 313-322.
- 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. 1.255-1.265.
- JUNG, H.G.; G.C. FAHEY, Jr. & J.E. GARST (1983): Simple phenolic monomers of forages and effect of in vitro fermentation on cell wall phenolics. *J. Anim. Sci.* 57. 1.294-1.305.
- JUNG, H.G., D.R. MERTENS & D.R. BUXTON, (1998a): Forage quality variation among maize inbreds: In vitro fiber digestion kinetics and prediction with NIRS. *Crop Sc.* 38. 205-210.
- JUNG, H. G., T.A. MORRISON & D.R. BUXTON, (1998b): Degradability of cell-wall polysaccharides in maize internodes during stalk development. *Crop Sci.* 38.1.047-1.051.
- KAISER, D. (1992): Nährstoffverdaulichkeit und Wärmeproduktion beim Wiederkäuer unter Wärmebelastung und bei unterschiedlichem Nährstoffangebot. Dissertation, Institut für Tierproduktion der Technischen Universität Berlin, Berlin, 118 S.
- KAISER, F. (2005): Mündliche Mitteilung, Daten liegen vor.
- KAISER, F. (2006): Methanertragspotenziale verschiedener nachwachsender Rohstoffe. Work-shop „Futterpflanzen – Perspektiven für eine energetische Nutzung“, Bayerische Landes-anstalt für Landwirtschaft, Freising, 09./10.03.
http://www.lfl.bayern.de/ipz/gruenland/18480/workshop_futterpflanzen_kaiser.
- KAISER, F. (2007): Einfluss der stofflichen Zusammensetzung auf die Verdaulichkeit nachwachsender Rohstoffe beim anaeroben Abbau in Biogasreaktoren. Dissertation. Technische Universität München. Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan, Lehr-stuhl für Agrarsystemtechnik.

- KAISER, F. (2008): Entwicklung eines Berechnungsmodells für die Bestimmung des Methanpotenzials aus nachwachsenden Rohstoffen. In: Tagungsband Biogas – effizient und verlässlich. 17. Jahrestagung Fachverband Biogas e.V. (Hrsg), Nürnberg. 131-135.
- 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.
- KAISER, F., M. SCHLATTMANN & A. GRONAUER (2005): Methane yield from various energy crops tests at laboratory scale and transferability to full-scale application. In: Proceedings of the 7th International Conference on Construction, Technology and Environment in Farm Animal Husbandry. Braunschweig. Germany. March 2-3 2005. 355-360.
- KALK, W.D. & K.-J. HÜLSBERGEN (1996): Methodik der Einbeziehung des indirekten Energieverbrauchs mit Investitionsgütern in Energiebilanzen von Landwirtschaftsbetrieben. Kühn-Arch. 90. 41-56.
- KARAKASHEV, D., D.J. BATSTONE & I. ANGELIDAKI (2005): Influence of environmental conditions on methanogenic compositions in anaerobic biogas reactors. Applied and Environmental Microbiology. 71. 1. 331-338.
- KAUTZ, T. & R. RAUBER (2007): Einfluss der Düngung mit Gärrückständen aus der Biogasfermentation auf den Ertrag von Silomais und auf die bodenmikrobielle Aktivität. 9. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau.
<http://orgprints/view/projects/wissenschafts-tagung-2007.html>.
- KEATING, J.D., C. PANGANIBAN & S.D. MANSFIELD (2006): Tolerance and adaptation of ethanologenic Yeasts to lignocellulosic inhibitory compounds. Biotechnol. Bioeng. 93. 1.196-1.206.
- KEHRES, B. (2007): Landwirtschaft und Klimaschutz. In: Humuswirtschaft und Kompost aktuell, Nr. 08/2007. 6-7.

- KELM, M. & F. TAUBE (2007): Energiebilanz der Biogaserzeugung aus Mais- und Grassilage. Workshop I. Energie. Mitteilungen der Arbeitsgemeinschaft Grünland und Futterbau Band 8. Neue Funktionen des Grünlands: Ökosystem, Energie, Erholung. 51. Jahrestagung der AGGF 2007, Göttingen. 209-212.
- KEYMER, U. (2004): Wirtschaftlichkeit landwirtschaftlicher Biogasanlagen. ALB Jahrestagung 8.-9. Dezember 2004, Rosenheim. LFL-Schriftenreihe 13/2004. 69-80.
- 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.
- KLASS, D.L. (1984): Methane from anaerobic fermentation. Science 223. 1.021-1.028.
- KORIATH, H., V. HERRMANN, G.-R. VOLLMER & J. FRANZ (1985): Nährstoffdynamik während der anaeroben Fermentation von Gülle und Wirkung auf den Ertrag und Inhaltsstoffe von Mais im Gefäßversuch; Archiv Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde 29. 741-747.
- KRUSE, S., A. HERRMANN, A. KORNER & F. TAUBE (2006): Einfluss der Witterung auf Ertrag und Futterqualität von Silomais – eine Simulationsstudie. Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft 17. 126-129.
- KRUSE, S., A. HERRMANN, J.M. GREEF, F., HÖPPNER, J. RATH & F. TAUBE (2007): Quantifizierung der genotyp- und umweltbedingten Unterschiede in der Verdaulichkeit von Silomais (*Zea mays* L.). Neue Funktionen des Grünlands. Mitteilungen der Arbeitsgemeinschaft Grünland und Futterbau Band 8, 2. Auflage. Referate und Poster der 51. Jahrestagung der Arbeitsgemeinschaft Grünland und Futterbau. der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften, Herausgeber: N. Wrage und J. Isselstein. ISBN: 978-3-00-022335-8.
- KRÜTZFELDT, B.A.E. (2004): Untersuchungen zur Vererbung von Qualitätseigenschaften bei Silomais (*Zea mays* L.). Dissertation Universität Hohenheim. 6-7.

- KTBL (2002): Emissionen der Tierhaltung. Grundlagen, Wirkungen, Minderungsmaßnahmen. KTBL-Schrift 406. Darmstadt. 203-214.
- KTBL (2005): Gasausbeute in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL) Darmstadt.
- KÜSTERMANN, B., H. SCHMID, H. AMON & K.-J. HÜLSBERGEN (2008): PC gestützte Analyse der Klimarelevanz landwirtschaftlicher Anbausysteme. Müller, R. A. E., H.-H. Sundermeier, L. Theuvsen, S. Schütze, M. Morgenstern (Hrsg.): Referate der 28. Jahrestagung. Gesellschaft für Informatik in der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft. 10.-11. März 2008, Kiel. 87-90.
- KUIKMAN, P.J., K.W. VAN DER HOEK, A. SMIT & K. ZWART (2006): Update of emission factors for nitrous oxide from agricultural soils on the basis of measurements in the Netherlands, Alterra rapport 1217, Alterra Wageningen 2006. ISSN 1566-7197.
- LAL, R. (2004): Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. Science Vol. 304. 11 June 2004. www.sciencemag.org.
- LANDBECK, M. & W. SCHMIDT (2005): Energy maize – goals, strategies and first breeding successes. CD-ROM. In: Proceedings of the First International Energy Farming Congress, Papenburg, Germany, March 2-4 2005. Kompetenzzentrum Nachwachsende Rohstoffe, Werlte, Germany.
- LAURENZ, L. (1984): Wieviel Mais vertragen unsere Böden? dlz 3/84.
- LAURENZ, L. (1987): Kostensparende und umweltschonende Düngung zu Mais. Mais-Informationen 2/87, HARMS-Herford.
- LEHNER, A., M. EFFENBERGER, R. KISSEL & A. GRONAUER (2008): Verfahrenstechnische Kennzahlen der bayerischen Biogas-Pilotbetriebe. Neue Perspektiven für Biogas?! Schriftenreihe LFL 12 2008. 23-33.

- LEICK, B. C. E. (2003): Emission von Ammoniak (NH₃) und Lachgas (N₂O) von landwirtschaftlich genutzten Böden in Abhängigkeit von produktionstechnischen Maßnahmen. Dissertation an der Fakultät Agrarwissenschaften der Universität Hohenheim.
- LEITHOLD, G., K.-J. HÜLSBERGEN, D. MICHEL & H. SCHÖNMEIER (1997): Humusbilanz – Methoden und Anwendung als Agrar-Umweltindikator. Initiativen zum Umweltschutz 5. Zeller Verlag, Osnabrück. 43 – 54.
- LEMMER, A. (2007): Monovergärung und Feststoffvergärung, Stand des Wissens und Erfahrungen. Schulung von Biogasanlagenbetreibern, 12.02.2007, Bildungsstätte des Bayerischen Bauerverbandes, Herrsching.
- LI, X., J.-K. WENG & C. CHAPPLE (2008): Improvement of biomass through lignin modification. The Plant Journal 54. 569-581.
- LINKE, B. & H.-J. THIEME (1996): Biogasgewinnung aus Schweinegülle und anderen organischen Reststoffen durch Cofermentation. VDI/MEG Kolloquium Agrartechnik. Heft 25. Aufbereitung und Verwertung organischer Reststoffe im ländlichen Raum. 94-104.
- LINKE, B. & P. MÄHNERT (2005): Einfluss der Raumbelastung auf die Gasausbeute von Gülle und Nachwachsenden Rohstoffen. In : Biogas – Nachwachsende Rohstoffe. Tagungsband zur 14. Jahrestagung des Fachverband Biogas e.V., Nürnberg. 33-46.
- LINKE, B. & G.-R. VOLLMER (2002): Kofermentation: Gemeinsame Vergärung von Gülle und pflanzlichen Biomassen in kontinuierlichen Laborversuchen. Bornimer Agrartechnische Berichte 32. 31-37.
- LINKE, B., M. HEIERMANN, P. GRUNDMANN & F. HERTWIG (2003): Grundlagen, Verfahren und Potenzial der Biogasgewinnung im Land Brandenburg. in: Leitfaden Biogas 2003. Hrsg. Ministerium für Landwirtschaft, Umweltschutz und Raumordnung des Landes Brandenburg. 10-14.
- LOOMIS, R.S. & D.J. CONNOR (1996): Crop ecology. Productivity and management in agricultural systems Cambridge Univ. Press, Cambridge.

- LOOMIS, R.S., W.A. WILLIAM, W.G. DUNCAN, A. DORVAT & A. NUNEZ (1968): Quantitative descriptions of foliage display and light absorption in field communities of corn plants. *Crop Sci.* 8. 352-356.
- LOPEZ, C.P., R. KIRCHMAYR, M. NEUREITER & R. BRAUN (2005): Effect of physical and chemical pre-treatments on methane yield from maize silage and grains. In: Ahring, B.K., Hartmann, H. (Eds.), *ADSW 2005 Conference Proceedings, Volume 2 Poster Presentations, 4th International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Waste, August 31 - September 2, 2005, Copenhagen.* 204-208.
- LÜTKE-ENTRUP, N., R. WOLF & I. KRATZER (1993): *Umweltkritische Bereiche des Maisanbaues.* Verlag Dr. Kovac, Hamburg.
- LÜTKE-ENTRUP, N. (1988): *Umweltsünder Mais? DLG-Mitt. PLUS 13/88.*
- LUFF, G. & W. SCHOORL (1929): *Chem. Weekbl.* 26. 130.
- LUNDVALL, J.P., D.R. BUXTON, A.R. HALLAUER & J.R. GEORGE (1994): Forage quality variation among maize inbreds: in vitro digestibility and cell-wall components. *Crop Sci.* 34. 1.672-1.678.
- MACHAT, M. & K. WERNER (2007): *Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommixes.* Climate Change 01/07 Umweltbundesamt.
- MACIEJCZYK, A. (2000): *Gasbildung bei unterschiedlicher Futterqualität. Veröffentlichung des EBA Zentrum Triesdorf.*
- MÄHNERT, P. (2007): *Kinetik der Biogasproduktion aus nachwachsenden Rohstoffen und Gülle.* Dissertation. Landwirtschaftliche - Gärtnerische Fakultät der Humboldt Universität Berlin. 11-18.
- MÄHNERT P., M. HEIERMANN, & B. LINKE (2005): *Batch- and Semicontinuos Biogas Production from Different Grass Species.* *Agricultural Engineering International: The CIGRE Journal.* Manuskript EE 05 010. Vol. VII. December 2005.

- MAIDL, F.-X. & G. FISCHBECK (1989): Neue Wege einer gezielten Stickstoffdüngung zu Mais. VDLUFA-Schriftenreihe 30. 143-148.
- MAIDL, F.-X. (1990): Pflanzenbauliche Aspekte einer gezielten N-Versorgung und verbesserten N-Ausnutzung. Landwirtschaftl. Jahrbuch 67. SH2. 71-87.
- MAIDL, F.-X., E. STICKSEL & R. VALTA (1999): Untersuchungen zur verbesserten Gülleverwertung im Maisanbau. 1. Mitteilung: Verwertung von Güllestickstoff durch Silo- und Körnermais bei unterschiedlichen Applikationsverfahren. Pflanzenbauwissenschaften 1999, 3 (1). 9–16. ISSN 1431-8857, Verlag Eugen Ulmer GmbH & Co., Stuttgart.
- MATTHIAS, J. (2002): Energiepflanzen steigern den Gasertrag. In: Biogas - Strom aus Gülle und Biomasse; top agrar Fachbuch; 86-89.
- MAYER-SPOHN, O., S. WISSEL, A. VOß, U. FAHL & M. BLESL (2005): Lebenszyklusanalyse ausgewählter Stromerzeugungstechniken – Stand 2005 -. Arbeitsbericht Nr. 1., November 2005, aktualisiert 2007. Universität Hohenheim. Institut für Energiewirtschaft und rationelle Energieanwendung IER. 9-10.
- MÉCHIN, V., O. ARGILLIER, Y. BARRIÈRE & V. MÉNANTEAU (1998): Genetic variation in stems of normal and brown midrib 3 maize inbred lines. Towards similarity for in vitro digestibility and cell wall composition. Maydica 43. 205-210.
- MÉCHIN, V., O. ARGILLIER, V. MÉNANTEAU, Y. BARRIÈRE, I. MILA, B. POLLET & C. LAPIERRE (2000): Relationship of cell wall composition to in vitro cell wall digestibility of maize inbred line stems. J. Sci. Food Agric. 80. 574-580.
- MESSNER, H. (1988): Düngewirkung anaerob fermentierter und unbehandelter Gülle. Dissertation TU München. Weihenstephan, Lehrstuhl für Pflanzenernährung.
- MIHELIC, R. (2004): Influence of Farmyard Manure Fertilisation to Maize (*Zea Mais* L.) on Net-Nitrogen-Mineralisation, Dynamics of Soluble Nitrogen Fractions in the Soil and Nitrogen Losses from Shallow Soils under the Conditions of the Humid Climate of Central Slovenia. Shaker-Verlag. 196 S.

- MOCK, J. J. & R. B. PEARCE (1975): An ideotype of maize. *Euphytica*, Wageningen. 24. 613-623.
- MOLITOR, H.D. (1983): Die Anwendung der Nmin-Methode auf verschiedenen Böden. Stickstoff exakt dosieren. *Gemüse* 9/1983. 324-325.
- MÖLLER, K., W. STINNER, A. DEUKER & G. LEITHOLD (2005): Biogaserzeugungspotenzial aus Gülle und Koppeprodukten in viehhaltenden und viehlosen Betriebssystemen des ökologischen Landbaus. In: Ende der Nische. J. Heß & G. Rahmann (Hrsg.), Beiträge zur 8. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Kassel 2005. 615-618.
- MØLLER, H. B. (2005): Future Biomasses for biogas. *Bioenergy research* 2. edi. no.8. June 2005.
- MUKENGELE, M., M. BRULÉ & H. OECHSNER (2006): Einfluss der Substratmischung aus Energiepflanzen auf Abbaukinetik und Methanertrag. *Landtechnik* 61 (1). 26–27.
- MUKENGELE, M. & H. OECHSNER (2007): Effect of Ensiling on the Specific Methane Yield of Maize. *Landtechnik* 62 (1). 20–21.
- NALLATHAMBI, V. (1997): Anaerobic digestion of biomass for methane production: a review. *Biomass and Bioenergy*, Vol. 13. 83-114.
- NEUBERG, C. (2002): Aktuelle Resultate der Nawaro - Anbauversuche in Luxemburg. *Ökologesch Landwirtschaftsberodung*, Ettelbruck Luxemburg
- NEUREITER, M., J. TEIXEIRA PEREIRA DOS SANTOS, C. PEREZ LOPEZ, H. PICHLER, R. KIRCHMAYR & R. BRAUN (2005): Effect of silage preparation on methane yields from whole crop maize silages. In Ahring, B.K. & Hartmann, H. (eds), Proc. 4th Int. Symposium Anaerobic Digestion of Solid Waste, Copenhagen. Vol.1. 119-115.
- NÖSBERGER, J. (1971): Einfluss der Bestandesdichte auf die Ertragsbildung bei Mais. I. Teil: Effekte der Bestandesdichte und der Lichtintensität auf die Ertragsbildung. *Z. Acker- und Pflanzenbau*.133.215-232.

- NÖSBERGER, J. & W. OPITZ V. BOBERFELD (1986): Grundfutterproduktion. Berlin und Hamburg P-Parey.
- OECHSNER, H. (2006): Biogaspotenziale bei der Vergärung von Nachwachsenden Rohstoffen. In: Internationaler Workshop Biogas: „Bioenergie aus Biogasanlagen: Status und Perspektiven“ 23.3.2006 in Husum, Deutschland.
- OECHSNER, H. & A. LEMMER (2001): Bestimmung des Gasertrages verschiedener Feldfrüchte. Universität Hohenheim. Endbericht im Auftrag von Administration des Services Techniques de l'Agriculture, Großherzogtum Luxemburg.
- OECHSNER, H., A. LEMMER & C. NEUBERG (2003): Feldfrüchte als Gärsubstrat in Biogasanlagen. Landtechnik 58 (3). 146-147.
- OTEGUI, M.E. & S. MELÓN (1997): Kernel set and flower synchrony within the ear of maize: I. Sowing date effects. Crop.Sci. 37. 441-447.
- OTTOMAN, M. J. & L. F. WELCH (1989): Planting Patterns and Radiation Interception, Plant Nutrient Concentration and Yield in Corn. Agronomy Journal. 81. 167-174.
- PAPST, C. (2004): Resistance breeding in maize (*Zea mays* L.) against the European Corn Borer (*Ostrinia Nubilalis* Hübner) and the use of DNA.markers for marker assisted selection. Dissertation. Fakultät Agrarwissenschaften der Universität Hohenheim. 6-7.
- PENDLETON, J.W., G.E. SMITH, S.R. WINTER & T.I. JAHNSTON (1968): Field investigations of the relationship of leaf angle in corn (*Zea mays* L.) to grain yield and apparent photosynthesis. Agron. J. 60 (4). 422-424.
- PEX, E., F., J. SCHWARZ & M. KIRCHGESSNER (1996): Zum Einfluss des Erntezeitpunkts von Silomais auf Verdaulichkeit und Energiegehalt von Maissilage bei Rind und Schaf. Wirtschaftseig. Futter 42. 83-96.
- PEYKER, W. (1994): Mais: Höhere Bestandesdichten - mehr Ertrag? Top agrar spezial.23. 20-21.

- PLÖCHL, M., M. HEIERMANN, B. LINKE & H. SCHELLE (2001): Wieviel Strom bringen Pflanzen? Neue Landwirtschaft 2001 (3). 42-45.
- POMMER, G. (1977): Ertragsphysiologie und Züchtung. I. Assimilatbildung, Photosynthese, Bayer. Landwirtsch. Jb. München, 54(2), 141-152.
- POMMER, G., W. SANCHEZ & H. HÄCKEL (1981): Auswirkungen verschiedener Reihenweiten und Bestandesdichten auf den Ertrag von Maissorten mit waagrechter und aufrechter Blatthaltung. Z. Acker- und Pflanzenbau, Berlin Hamburg. 150 (2). 113-128.
- PÖTSCH, E.M., E. PFUNDTNER, R. RESCH & P. MUCH (2004): Stoffliche Zusammensetzung und Ausbringungseigenschaften von Gärrückständen aus Biogasanlagen. 10. Alpenländisches Expertforum, 18.-19. März 2004. Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein. 37-47.
- POUECH, P., H. FRUTEAU & H. BEWA (1998): Agricultural Crops for Biogas Production on Anaerobic Digestion Plants. In Biomass for Energy and Industry, C.A.R.E.N., Proceeding of the International Conference Würzburg, Germany, 8 – 11 June 1998. 163-165.
- RAMESOHL, S., K. ARNOLD, M. KALTSCHMITT, F. SCHOLWIN, F. HOFMANN, A. PLÄTTNER, M. KALIES, S. LULIES, G. SCHRÖDER, W. ALTHAUS, W. URBAN & F. BURMEISTER (2006): Analyse und Bewertung der Nutzungsmöglichkeiten von Biomasse. Untersuchung im Auftrag von BGW und DVGW. Bd. 1: Gesamtergebnisse und Schlussfolgerungen. Wuppertal, Wuppertal-Institut für Klima, Umwelt, Energie.
- RAPOSO, F., C.J. BANKS, I. SIEGERT, S. HEAVEN & R. BORJA (2006): Influence of inoculum to substrate ratio on the biochemical methane potential of maize in batch tests. Process Biochemistry 41 (6). 1.444-1.450.
- RHEINHOLD, F. & W. NOACK (1956): Laboratoriumsversuche über die Gasgewinnung aus land-wirtschaftlichen Stoffen. In: Biogas-Handbuch Wirz Aarau Verlag, 1991.
- REINHOLD, G. & W. PEYKER (2007): Wirkung der Silagequalität auf den ökonomischen Erfolg der Biogasanlage. Vortrag zur 16. Jahrestagung des Fachverband Biogas in Leipzig. 31.1.2007.

-
- RODE, M., C. SCHEIDER, G. KETELHAKE & D. REIßHAUER (2005): Naturschutzverträgliche Erzeugung und Nutzung von Biomasse zur Wärme- und Stromgewinnung, BfN-Skripten 136. Bundesamt für Naturschutz (Hrsg.), Bonn-Bad Godesberg.
- ROSCHKE, M. & M. PLÖCHL (2006): Biogas in der Landwirtschaft. Leitfaden für Landwirte und Investoren im Land Brandenburg. Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz, Land Brandenburg (Hrsg.). 36-39.
- RUPPERT, W., A. FISCHER & W. HÖSEL (1987): Extensivierungseffekte einer Betriebsmittelverteuerung, dargestellt am Beispiel Stickstoff unter Auswertung der Schlagkartei. Bayer. Ldw.Jb. 4, 8./87. 923-924.
- SANGOI, L. (2000): Understanding plant density effects on maize growth and development: An important issue to maximize grain yield. *Ciència Rural*, V.31.N.1. 159-168.
- SARLANGUE, T., F.H. ANDRADE, P.A. CALVINO & L.C. PURCELL (2007): Why Do Maize Hybrids Respond Differently to Variations in Plant Density? Published online June 5, 2007. *Agronomy Journal*, Vol. 99, July-August 2007. 984-991.
- SAS (1999): User`s Guide. Statistics, Version 8 Edition, SAS Institute Inc., Gary, NC,USA.
- SCHACHTSCHABEL, P., H.-P. BLUME, K.-H. HARTGE & U. SCHWERTMANN (1989): Lehrbuch der Bodenkunde. Stuttgart, Enke Verlag. 63-69.
- SCHITTENHELM, S. (2008): Chemical composition and methane yield of maize hybrids with contrasting maturity. *Europ.J.Agronomy* 29. 72-79.
- SCHLATTMANN, M., M. SPECKMAIER & A. GRONAUER (2004): Biogas-Gärtests in verschiedenen Fermentertypen. *Landtechnik* 59 (6). 338-339.
- SCHLUMBOHM, F. (1975): Untersuchungen zur Ertragsanalyse bei Mais, in Abhängigkeit von Anbauart, Jahreseinfluss, Bestandesdichte, N-Gabemenge und N-Gabezeit. Dissertation Kiel.

- SCHMACK, C. (1999): Bezugsgröße CSB und TOC als Hilfsmittel zur Voraussage der Biogasausbeuten verschiedener Cosubstrate. In: Landtechnik-Bericht 32. Hrsg. Landtechnik Weihenstephan.
- SCHMACK, D. (2005): Einfluss der Silagequalität auf die Biogasproduktion. Tagungsbeitrag 16. März 2005. Biogas. Wirtschaftskammer Steyr.
- SCHMIDT, W. (2003): Hybridmaiszüchtung bei der KWS Saat AG. 54. Tagung der Vereinigung der Pflanzenzüchter und Saatgutkaufleute Österreichs, BAL Gumpenstein, 25.-27. November 2003.
- SCHMIDT, W. (2004): persönliche Mitteilung, KWS Saat AG, Einbeck.
- SCHMIDT, W. (2005): Maiszüchtung für die Energieerzeugung. Vortrag. Wissenschaftliche Tagung des Dachverbandes Agrarforschung (DAF) e.V. Braunschweig 26. und 27. 10. 2005.
- SCHMIDT, W. (2006): Aspekte der Züchtung von Energiepflanzen am Beispiel Mais. Landwirtschaftlicher Hochschultag 2006. landinfo 5/06. 31-38.
- SCHMID, H., R. GUTSER, & N. CLAASSEN (1997): Wurzelentwicklung und -umsatz von Winterweizen. 4.Wiss.-Tagung, Ökol.Landbau, Bonn, 279-285
- SCHNELL, F.M. & H.F. UTZ (1981): Der züchterische Fortschritt in Frühreife und Ertrag bei Körnermais. Mais 4 (81). 10-14.
- SCHOLWIN, F., J. MICHEL, G. SCHRÖDER & M. KALIES (2006): Ökologische Analyse einer Biogasnutzung aus nachwachsenden Rohstoffen. Endbericht FNR-FKZ: 22014303. Institut für Energietechnik und Umwelt, Leipzig.
- SCHOLWIN, F., J. MICHEL, G. SCHRÖDER & M. KALIES (2007): Ökologische Analyse einer Biogasnutzung aus nachwachsenden Rohstoffen. Endbericht Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe, Gülzow. 88 S.

- SCHÖN, M., R. WALZ, G. ANGERER, K. BÄTCHER, E. BÖHM, T. HILLENBRAND, H. HIESSL & J. REICHERT (1993): Emissionen der Treibhausgase Distickstoffoxid und Methan in Deutschland - Emissionsbilanz, Identifikation von Forschungs- und Handlungsbedarf sowie die Erarbeitung von Handlungsempfehlungen, Berichte 9/93 Umweltbundesamt Berichts-nummer 93- 121, Erich Schmidt Verlag Berlin, ISBN 3-50303495-1.
- SCHUCHARDT F. (1983): Batch-Gärtests zur Methangewinnung aus tierischen Exkrementen und Pflanzen. In: Biogas-Handbuch. Wirz Aarau Verlag 1991.
- SCHUHMACHER, I. (1999): Versuchsbericht zur Lagerung von Gülle und Kofermenten im Rahmen des DBU-Vorhabens „Untersuchung der Emission direkt und indirekt klimawirksamer Spurengase (Ammoniak, Lachgas und Methan) nach Ausbringung von Kofermentationsrückständen sowie Entwicklung von Verminderungsstrategien“.
- SCHUMACHER, B., C. BOEHMEL & H. OECHSNER (2006): Welchen Energiemais wann ernten für die Biogasgewinnung? Landtechnik 2/2006. 84-85.
- SCHWARZ, F.J., E.J. PEX & M. KIRCHGESSNER (1996): Zum Sorteneinfluss von Silomais auf Verdaulichkeit und Energiegehalt von Maissilage bei Rind und Schaf. Wirtschaftseig. Futter 42. 161-172.
- SHIHUWU S. & T. LIUB (2003): Ammonia inhibition on thermophilic anaerobic digestion. Chemo-sphere. 2003 Elsevier Ltd. Vol. 53. 43-52.
- SPECKMEIER, M., M. SCHLATTMANN, T. METZNER & A. GRONAUER (2005): Bestimmung des Biogasertrags aus Co-Substraten im diskontinuierlichen Durchflussverfahren. Landtechnik 60/6. 340-341.
- SPIEKERS, H. (2008): Tierphysiologische Anforderungen an die Silagequalität. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Tierernährung und Futterwirtschaft. http://www.lfl.bayern.de/ite/futterwirtschaft/07330/linkurl_0_1.pdf.
- STÄHLIN, A. (1968): Das wirtschaftseigene Futter. H2.14.164-176.
- STEINHAUSER, H. & H. HEISSENHUBER (1985): Getreide-Ganzpflanzen statt Mais silieren? DLG-Mitteilungen. 4/85. 205-208.

- STICKSEL, E., F.-X. MAIDL & R. VALTA (1999): Untersuchungen zur verbesserten Gülleverwertung im Maisanbau. 2. Mitteilung: Einfluss des Düngezeitpunktes auf die Ertragsbildung von Silo- und Körnermais. *Pflanzenbauwissenschaften* 3 (1) 17-21.
- STICKSEL, E., J. EDER, B. EDER, A. AIGNER, G. SALZEDER, G. WEBER & A. AIGNER (2008): Optimierung von Biogasfruchtfolgen unter bayerischen Anbaubedingungen, Versuchsergebnisse der LFL. *Neue Perspektiven für Biogas ?!* LFL Schriftenreihe 12/2008.
- STROBL, M. & U. KEYMER (2006): Technische und ökonomische Kennzahlen landwirtschaftlicher Biogasanlagen. *Landtechnik* 61 (5). 266-268.
- STRUİK, P.C. (1984): An ideotype of forage maize for northwest Europe. *Neth. J. Agric. Sci.* 32 (1984). 145-147.
- 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.
- TATAH, E., M. GAUDCHAU & B. HONERMEIER (2007): The impact maize cultivar and maturity stage on dry matter, biogas and methane gas yields. *Mitt.Ges. Pflanzenbauwiss.* 19. 196-197.
- TENTSCHER, W. (2004): The best biogas partner for slurry. In: *Agrifuture European agribusiness magazine* 3. Max-Eyth Verlag. 31-33.
- TETIO-KAGHO, F. & F.P. GARDNER (1988): Responses of maize to plant population density: II. Reproductive development, yield, and yield adjustments. *Agron. J.* 80. 935–940.
- THIEMT, E.-M. (2002): Untersuchungen zur Bedeutung der Stickstoffeffizienz für die Ertragsicherheit bei Mais. *Dissertation Hohenheim.*
- 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.

-
- TOLLENAAR, M. (1977): Sink-source relationships during reproductive development in maize. A review. *Maydica* 22. 49-75.
- UBA (2007): Umweltdaten Deutschland, Nachhaltig wirtschaften- Natürliche Ressourcen und Umwelt schonen. Umweltbundesamt. Ausgabe 2007.
- UTZ, H.F. (2001): PLABSTAT Version 20. Ein Computerprogramm zur statistischen Analyse von pflanzenzüchterischen Experimenten. Institut für Pflanzenzüchtung, Saatgutforschung und Populationsgenetik, Stuttgart-Hohenheim.
- 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.
- VDI (2005): Vergärung organischer Stoffe. VDI-Richtlinie 4630, Handbuch Energietechnik, Verein Deutscher Ingenieure Gesellschaft, Düsseldorf.
- VDLUFA (2004): Humusbilanzierung. Methode zur Beurteilung und Bemessung der Humusversorgung von Ackerland. Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten. Darmstadt
- VEEKEN, A. & B. HAMELERS (1999): Effect of temperature on hydrolysis rates of selected biowaste components. *Bioresource Technology* 69. 3. 249-254.
- VEGA, C.R.C., F.H. ANDRADE, V.O. SADRAS, S.A. UHART & O.R. VALENTINUZ (2001): Seed number as a function of growth. A comparative study in soybean, sunflower and maize. *Crop sci.* 41. 748-754.
- VETTER, H. & MITARB. (1977): *Wieviel düngen?* DLG Verlag Frankfurt am Main.
- VETTER, H. & G. STEFFENS (1986): *Wirtschaftseigene Düngung.* VUA/DLG Frankfurt/M.
- VIDOVIC, J. (1974): Effect of the change of leaf angle arrangement on productivity of maize (*Zea mays* L.) standard. *Bilo. Plantarum.* Praha 16(3).174-183.
- VOLLMER, C.-R. (2000): Erfahrungen mit anaeroben Anlagen. Brandenburgische Umwelt Berichte (BUB) 6. 207-213.

- WALTHER, H. (1947): Grundlagen des Pflanzenbaues, Ulmer Verlag Stuttgart, 185.
- WANG, S.-H. (2001): Einfluss der Blattstellung und Bestandesdichte auf Ertrag, Qualität, Lichtaufnahme und Blattflächenindex bei Silomaisorten verschiedenen Wuchstyps. Dissertation. Humboldt-Universität zu Berlin. 117 S.
- WEILAND, P. (2001): Grundlagen der Methangärung - Biologie und Substrate. In: Biogas als regenerative Energie - Stand und Perspektiven, VDI-Bericht 1620, Düsseldorf. 19-32.
- WEILAND, P. (2006): Stand der Technik von Biogasanlagen und aktueller Forschungsbedarf. Institut für Technologie und Biosystemtechnik der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Braunschweig. Workshop Husum 3.
- 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.
- WEISSBACH, F. (2008): Trockensubstanzkorrektur auf flüchtige Gärprodukte. Mais 3/2008 (35.J.) 104-105.
- WEISSBACH, F. & H. AUERBACH (1999): Wann ist der Mais siloreif ? Mais 2. 72-77.
- WENDLAND, M. (2008): Einsatz von Gärresten aus der Biogasproduktion. Bayer. Landesanstalt für Landwirtschaft. Institut für Agrarökologie, Ökologischen Landbau und Bodenschutz. 8 S.
- WENDLAND, M., M. DIEPOLDER & P. CAPRIEL (2007): Leitfaden für die Düngung von Acker- und Grünland. Bayer. Landesanstalt für Landwirtschaft. Institut für Agrarökologie, Ökologischen Landbau und Bodenschutz. 98 S.
- WELLINGER, A., U. BASERGA, W. EDELMANN, K. EGGER & B. SEILER (1991): Biogas Handbuch. Verlag Wirz Aarau, 1991.

- WERMKE, M. & K. ROHR (1985): Einfluss der Bestandesdichte auf die Ertragsleistung, Silier-eignung und den Futterwert von Silomais. 1. Mitteilung. Trockenmasse und Ernteertrag, stoffliche Zusammensetzung und Silagequalität. Das wirtschaftseigne Futter 31. 20-34.
- WIDDICOMBE, W.D. & K.D.THELEN (2002): Row width and plant density effects on corn grain production in the northern Corn Belt. Agron.J. 94. 1.020-2.023.
- WILLIAMS, W. A., R. S. LOOMIS & C. R. LEPLEY (1965): Vegetative growth of corn as affected by population density. I. Productivity in relation interception of solar radiation. Crop Sci. 5. 211-215.
- WOLF, D.P., J.G. COORS, K.A. ALBRECHT, D.J. UNDERSANDER & P.R. CARTER (1993): Forage quality of maize genotypes selected for extreme fiber concentrations. Crop Sci. 33. 1.353-1.359.
- WÜRFEL, T., H. HUGGER & H. PFLEIDERER (2002): Umweltschonender Maisanbau. Merkblätter für die umweltgerechte Landbewirtschaftung 15/2002. Hrsg. Landesanstalt für Pflanzenbau, Rheinstetten.
- ZAUNER, E. & U. KÜNTZEL (1986): Methane production from ensiled plant material. Biomass 10. 207-223.
- ZIMMER, E. & M. WERMKE (1986): Improving the nutritive value of maize. In: Dolstra, O. & P. Miedema (Hrsg.). Breeding of silage maize. Proceedings of the 13th Congress of the Maize and Sorghum Section of EUCARPIA, 9-12 September 1985, Wageningen, the Netherlands, Pudoc, Wageningen. 91-100.
- ZSCHEISCHLER, J. (1990): Handbuch Mais. 4. Auflage. DLG-Verlag München.
- ZSCHEISCHLER, J., F. GROSS & L. HEPTING (1974): Einfluss von Schnittzeit, Sorte und Standweite auf Ertrag und Futterwert von Silomais. Bayer.Ldw.J. 51. 611-636.

9 Anhang

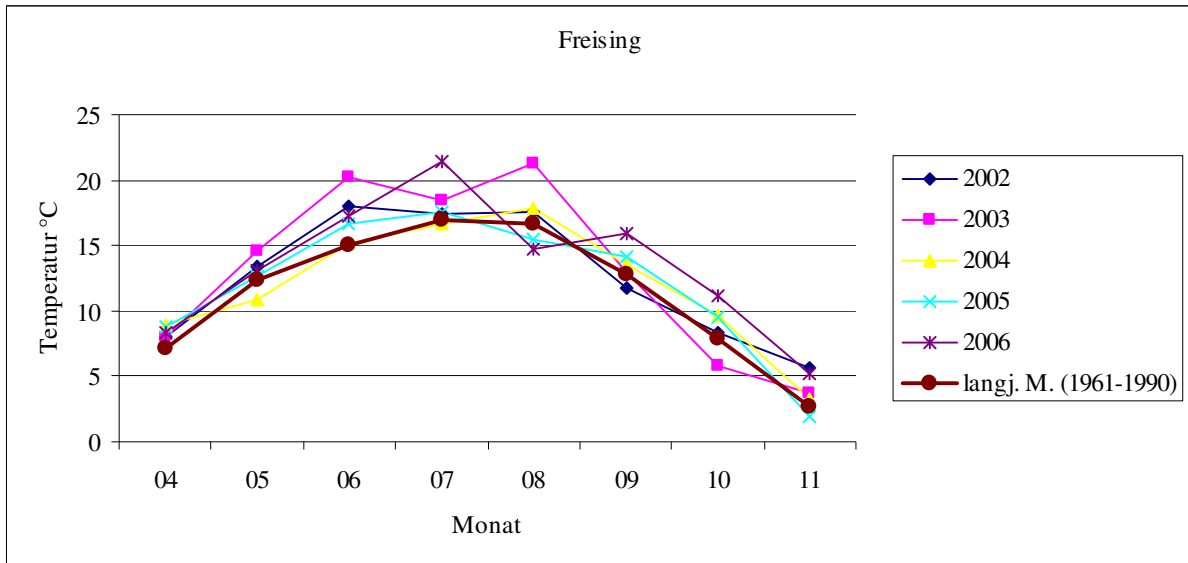


Abb. 9.1: Durchschnittliche Lufttemperatur [°C] während der Vegetationsperiode in den Jahren 2002 bis 2006 und im langjährigen Mittel (langj. M.), Freising.

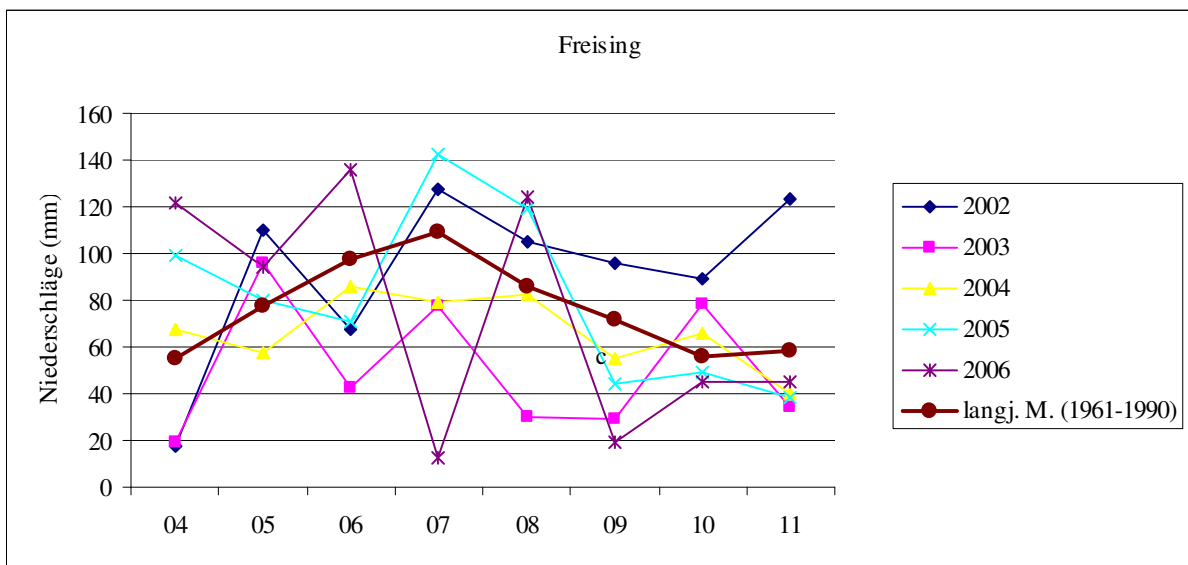


Abb. 9.2: Durchschnittliche Niederschlagsmenge [mm] während der Vegetationsperiode in den Jahren 2002 bis 2006 und im langjährigen Mittel (langj. M.), Freising.

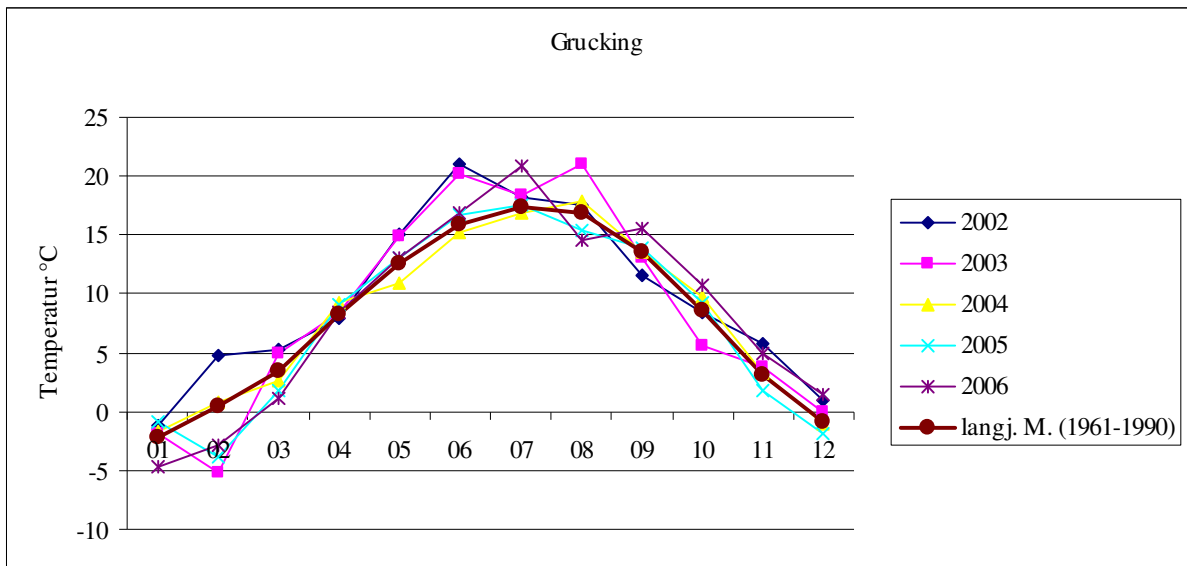


Abb. 9.3: Durchschnittliche Lufttemperatur [°C] während der Vegetationsperiode in den Jahren 2002 bis 2006 und im langjährigen Mittel (langj. M.), Grucking.

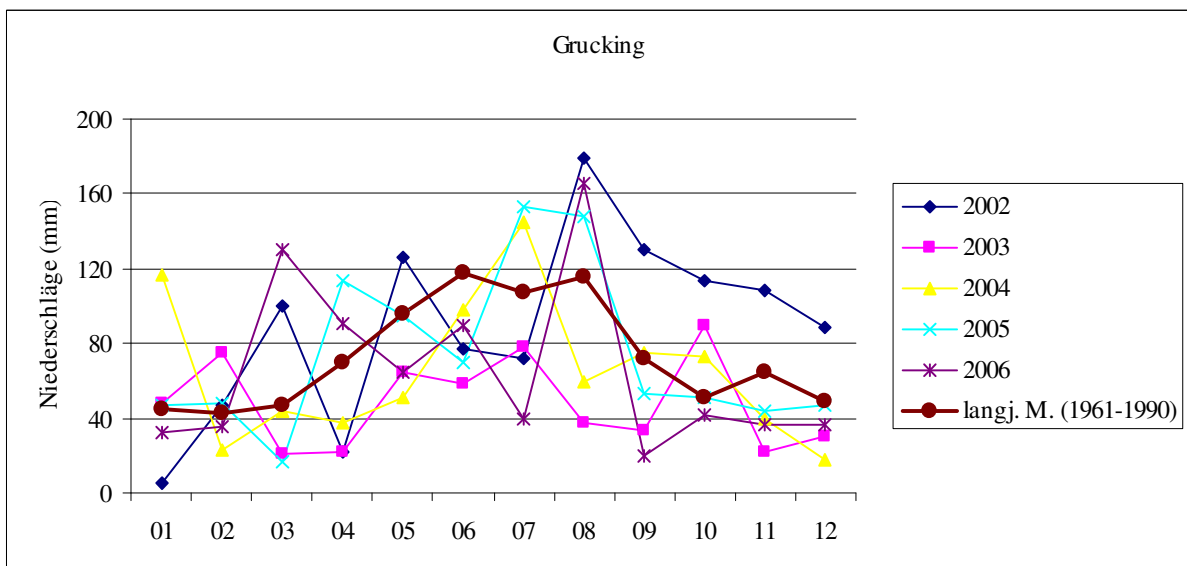


Abb. 9.4: Durchschnittliche Niederschlagsmenge [mm] während der Vegetationsperiode in den Jahren 2002 bis 2006 und im langjährigen Mittel (langj. M.), Grucking.

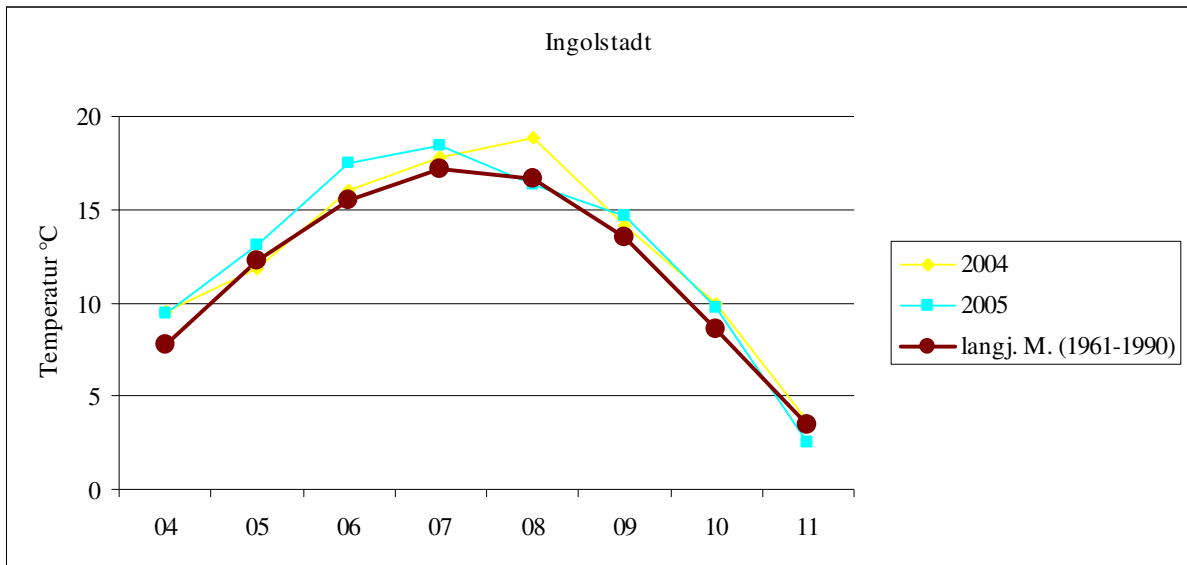


Abb. 9.5: Durchschnittliche Lufttemperatur [°C] während der Vegetationsperiode in den Jahren 2004 bis 2005 und im langjährigen Mittel (langj. M.), Ingolstadt.

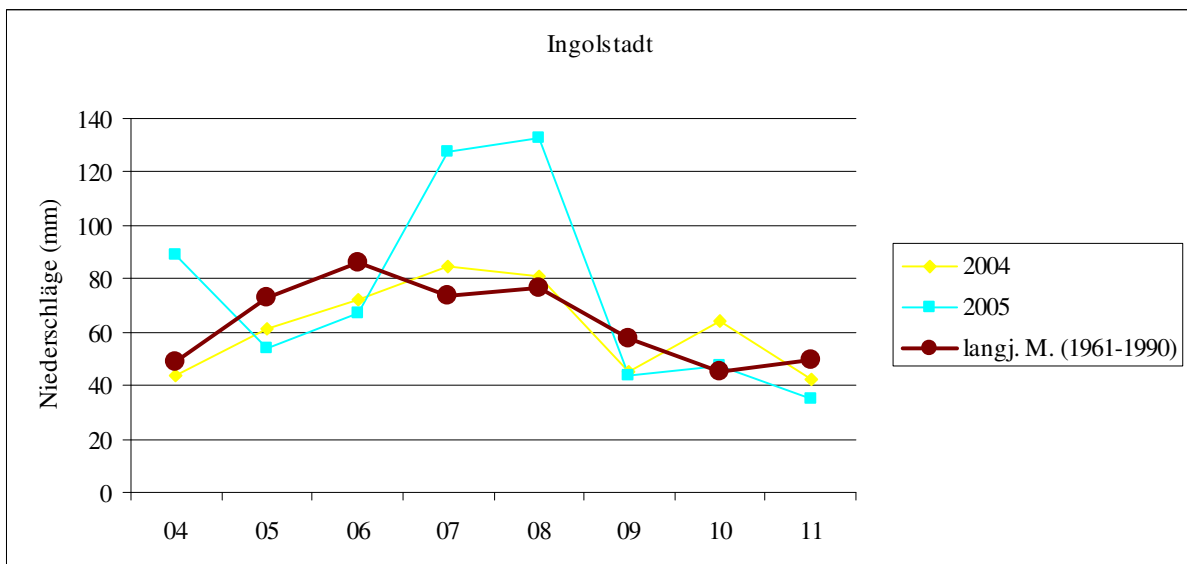


Abb. 9.6: Durchschnittliche Niederschlagsmenge [mm] während der Vegetationsperiode in den Jahren 2004 bis 2005 und im langjährigen Mittel (langj. M.), Ingolstadt.

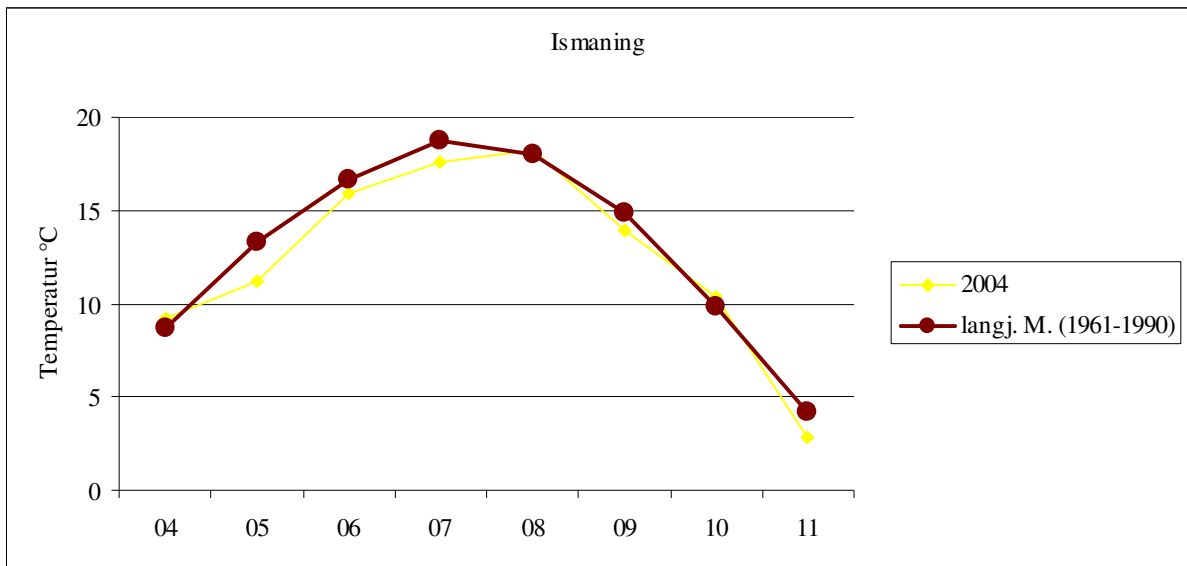


Abb. 9.7: Durchschnittliche Lufttemperatur [°C] während der Vegetationsperiode 2004 und im langjährigen Mittel (langj. M.), Ismaning.

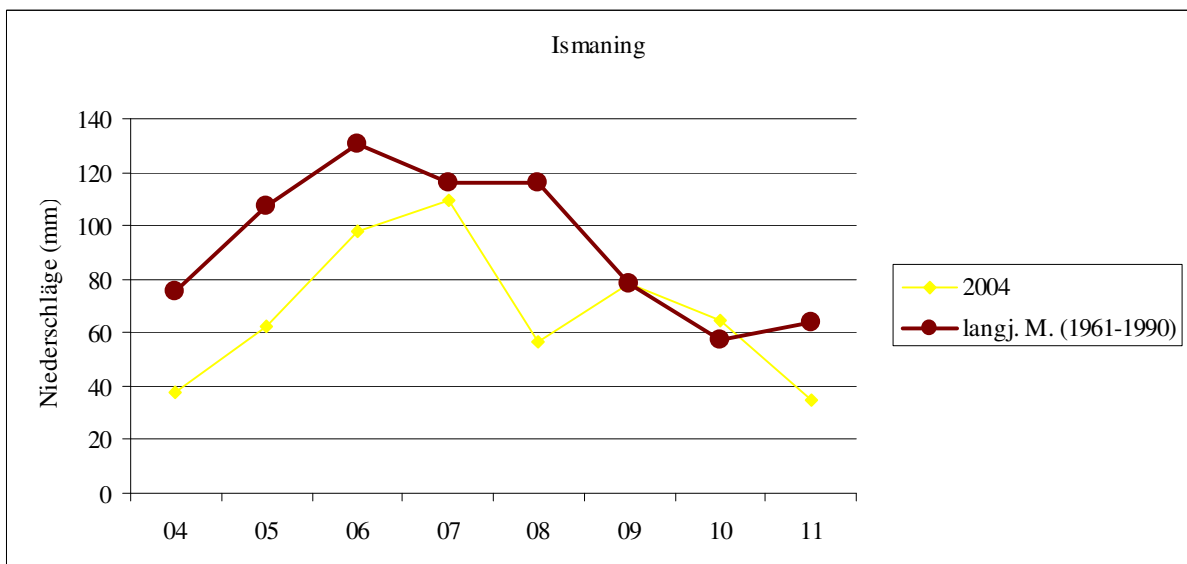


Abb. 9.8: Durchschnittliche Niederschlagsmenge [mm] während der Vegetationsperiode 2004 und im langjährigen Mittel (langj. M.), Ismaning.

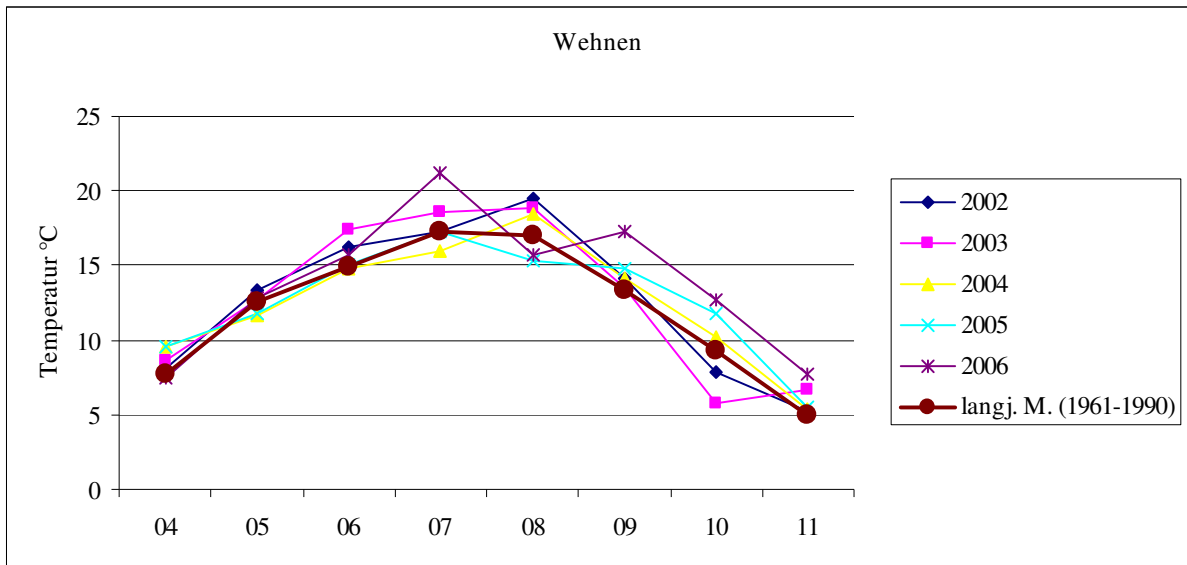


Abb. 9.9: Durchschnittliche Lufttemperatur [°C] während der Vegetationsperiode in den Jahren 2002 bis 2006 und im langjährigen Mittel (langj. M.), Wehnen.

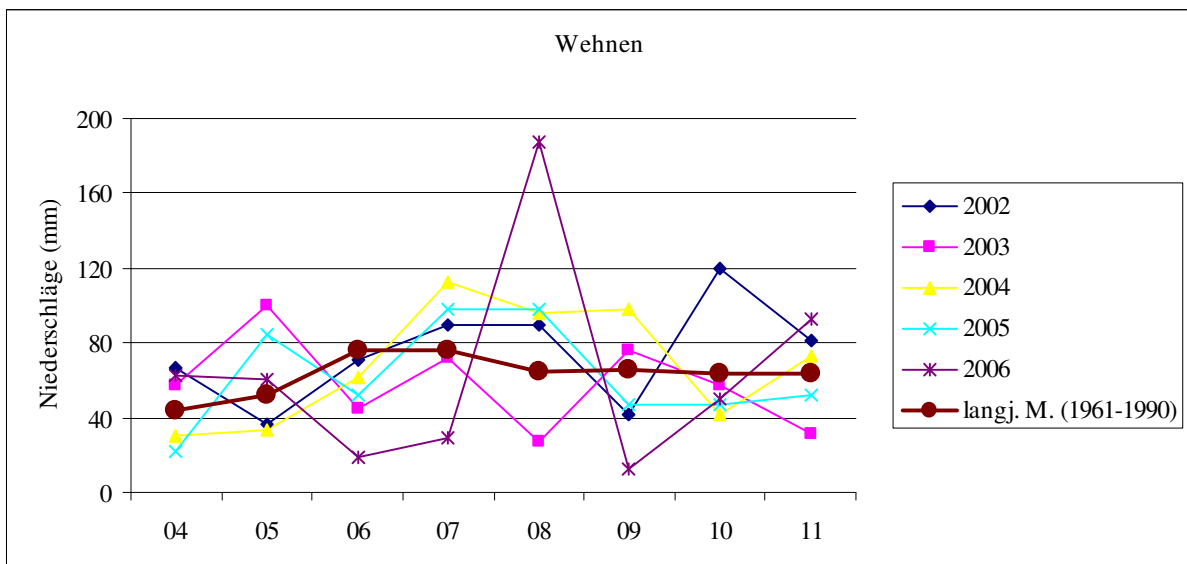


Abb. 9.10: Durchschnittliche Niederschlagsmenge [mm] während der Vegetationsperiode in den Jahren 2002 bis 2006 und im langjährigen Mittel (langj. M.), Wehnen.

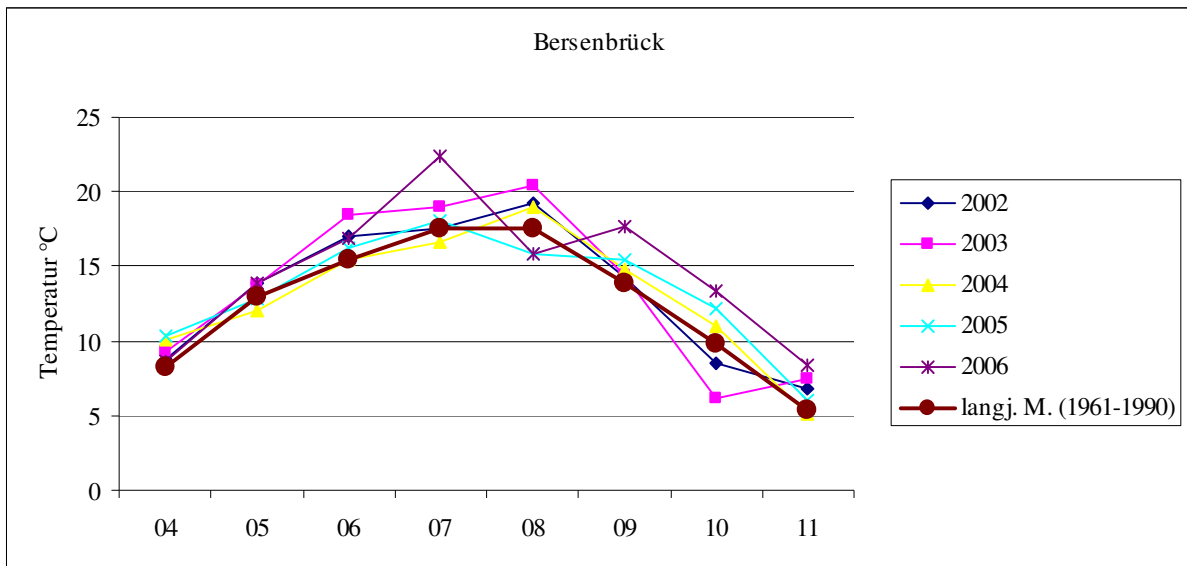


Abb. 9.11: Durchschnittliche Lufttemperatur [°C] während der Vegetationsperiode in den Jahren 2002 bis 2006 und im langjährigen Mittel (langj. M.), Bersenbrück.

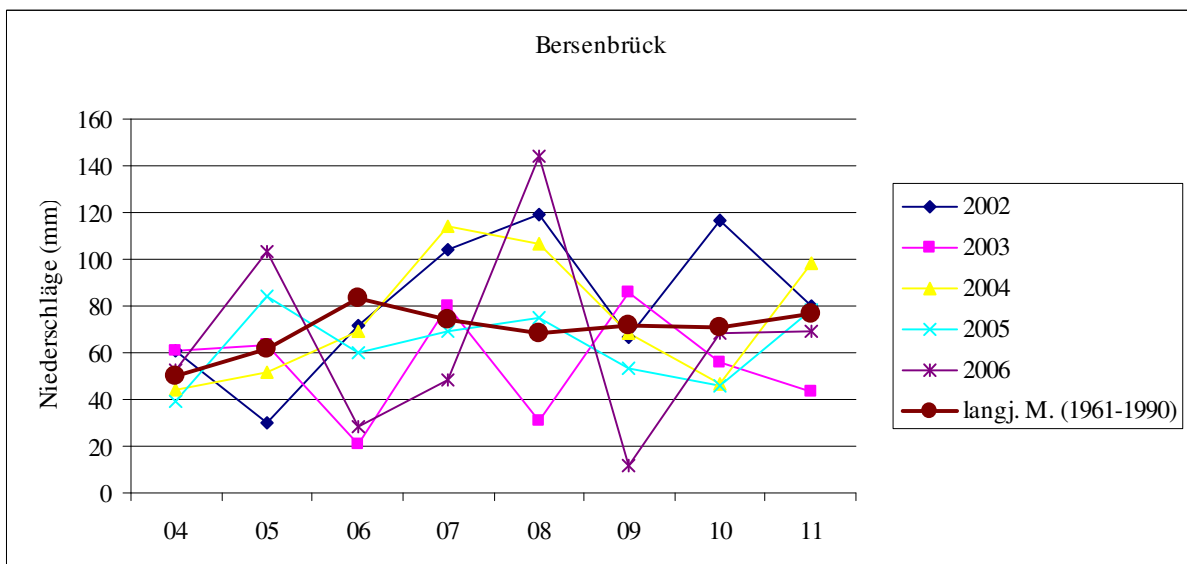


Abb. 9.12: Durchschnittliche Niederschlagsmenge [mm] während der Vegetationsperiode in den Jahren 2002 bis 2006 und im langjährigen Mittel (langj. M.), Bersenbrück.

R	R	R	R	R	R	R	R
R	1	2	4	5	3	5	R
R	4	3	1	1	2	1	R
R	5	5	2	4	1	2	R
R	3	4	5	3	4	4	R
R	2	1	3	2	5	3	R
R	5	2	4	5	3	1	R
R	4	5	1	2	2	3	R
R	3	4	3	4	5	2	R
R	2	1	2	3	1	4	R
R	1	3	5	1	4	5	R
R	R	R	R	R	R	R	R

Erntetermine: I **II** III IV

Versuchsglieder: 5 Sorten, 3 Wiederholungen

Parzellenzahl: 60

Beetlänge: 6 m + 1,5 m Weg

Beetbreite: 4 m

Saatstärke: 10 Pfl./m²

R: Rand

Abb. 9.13: Versuchsplan Erntetermin.

Nullvariante	Gärrestdüngung	mineralische Düngung
R R R R	R R R R R R R R	R R R R R R R R R R R R
R 1 1 R	R 1 2 R R 2 1 R R 1 2 R	R 1 2 R R 1 2 R R 2 1 R
R 1 2 R	R 2 1 R R 1 2 R R 1 2 R	R 1 2 R R 2 1 R R 1 2 R
R 2 2 R	R 1 2 R R 1 2 R R 2 1 R	R 2 1 R R 1 2 R R 1 2 R
R R R R	R R R R R R R R	R R R R R R R R R R R R

Stufe I **II** III Versuchsglieder: 2 Sorten, 3 Wiederholungen
 Gärrestdüngung (m³ ha⁻¹) 30 60 90 Parzellenzahl: 42
 mineralische Düngung (kg N ha⁻¹) 60 120 180 Beetbreite: 4 m
 Beetlänge: 6 m + 1,5 m Weg
 Saatstärke: 10 Pfl./m²
 R: Rand

Abb. 9.14: Versuchsplan Düngung.

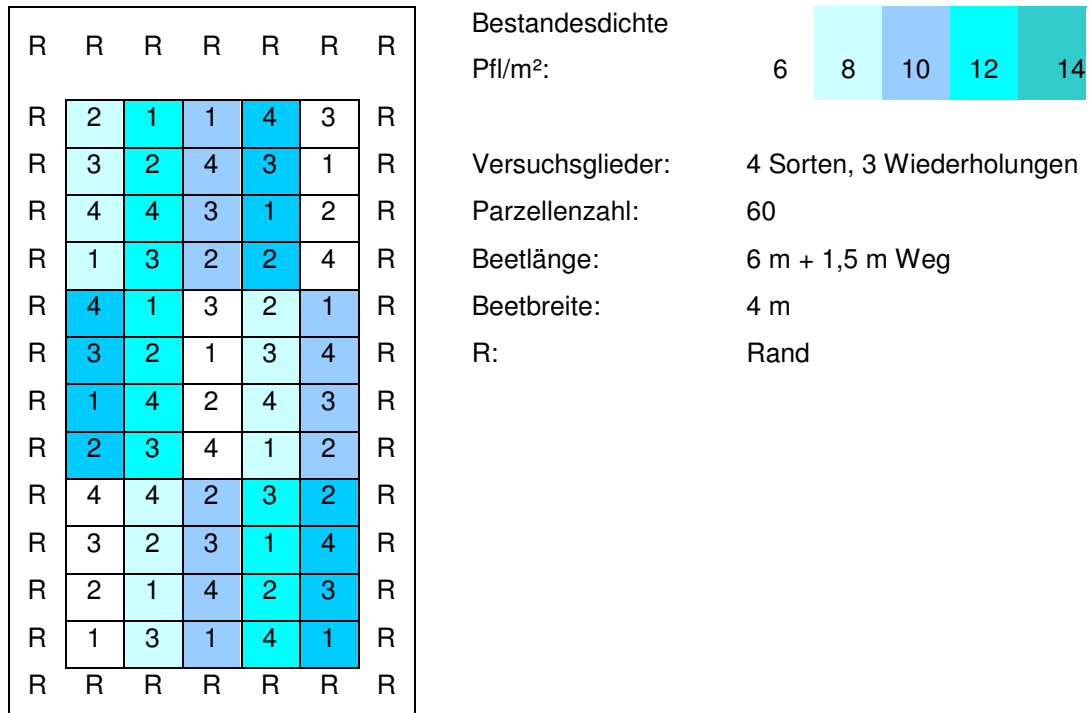


Abb. 9.15: Versuchsplan Bestandesdichte.

Tab. 9.1: Beschreibung der Sorten nach Reife und Herkunft

Sorte	FAO-Zahl	Herkunft, genetische Basis [†]	Versuche ^{††}
Gavott, Vergleichssorte	250	D	E, D, B
KXA 6231	250	k.A. [†]	E
KXA 6231br	250	k.A.	E
KX 2181	270	D	B
Benicia	280	D	B
KXA 4171	280	D	E
Vitalina	280	D	E
KX 5226	280	D	E
Hybride 12	400	D x F	B
Hybride 13	400	D	E, B
Hybride 14	400	D	B
Hybride 15	400	D	B
Hybride 16	400	D	B
Hybride 45	400	F	B
Kursus	400	U	D
KX 1391	400	F	B
KX 1393	400	F	B
KX 2386	400	U x F	E, B
KX 5243	400	I	E, B
KXA 5243	400	I	E
KX 2385	350-400	U x F	E
Vic	400-450	F	E, B
Kermes	450	I	E
Hybride 59	600	D	B
Kismet	600	I	B
KX 1568	600	I	B
KXA 4566	600	I	E, B
Mikado	600	I	E, B
Doge	700	I	E, B
Hybride 89	800	M x D	E, B
Hybride 90	800	M x D	B
KXA 3191	k.A.	D	E, B
MS 12035	k.A.	D	B
MS 23-17	k.A.	D	B

[†] Herkunft: I = Italien, F = Frankreich, D = Deutschland, U = Ungarn, M = Mexiko; k.A. = keine Angabe

^{††} Versuche: E Erntetermin, B Bestandesdichte, D Düngung

Tab. 9.2: Beschreibung der Aussaat- und Erntetermine von 2002-2006

Orte	Versuche	Aussaatdatum	Erntedatum
2002			
Grucking	Bestandesdichte	25.4.	24.10.
Bersenbrück	Bestandesdichte	25.4.	24.09.
2003			
Freising I	Bestandesdichte	28.04.	23.10.
	Sä/Erntetermin	28.04/19.05.	25.08./15.09./10.10./23.10.
	Düngung	28.04.	09.10.
Bersenbrück	Bestandesdichte	28.04.	16.10.
Wehnen	Erntetermin	28.04.	28.08/19.09./09.10./30.10.
2004			
Freising II	Bestandesdichte	24.04.	12.08. Sturm, Ernteaussfall
	Erntetermin	24.04.	12.08. Sturm, Ernteaussfall
	Düngung	24.04.	12.08. Sturm, Ernteaussfall
Ingolstadt	Bestandesdichte	23.04.	26.10.
	Erntetermin	23.04.	20.09./11.10./26.10./02.11.
Ismaning	Erntetermin	28.04.	27.08./14.09./06.10./22.10./10.11.
Bersenbrück	Bestandesdichte	26.04.	01.11.
Wehnen	Erntetermin	19.04.	22.9./12.10./26.10./08.11.

Orte	Versuche	Aussaatdatum	Erntedatum
2005			
Freising III	Bestandesdichte	12.05.	27.10.
	Erntetermin	12.05.	29.08./16.09./07.10./27.10.
	Düngung	12.05.	27.10.
	Düngung	04.05.	12.10.
Ingolstadt	Bestandesdichte	04.05.	28.09.
	Erntetermin	04.05.	17.08./06.09./28.09./20.10.
Bersenbrück	Bestandesdichte	02.05.	08.11.
Wehnen	Erntetermin	18.04.	05.09./26.09./17.10./07.11.
2006			
Freising III	Erntetermin	26.04.	23.08./19.9./11.10./26.10.
	Düngung	26.04.	02.10.
Grucking	Erntetermin	25.04.	24.08./19.9./11.10./26.10.
	Düngung	25.04.	04.10.
Wehnen	Erntetermin	20.04.	24.08.

Tab. 9.3: Agronomische Merkmale, Qualitätsmerkmale und Methanausbeute in Abhängigkeit von Erntetermin und Genotyp (Saat April, Freising 2003)

FAO	Sorte	TS-Ertrag dt ha ⁻¹	TS-G % FM	TS-R	Stärke	WLK	RP	ADF	NDF	WLK-R	NDF-R	ELOS	IVDOM	DINAG	DINIG	IVDOM-R	D-NDF-R	MA	MHE
				% TS										NI kg OTS ⁻¹		m ³ ha ⁻¹			
Erntetermin I																			
250	Gavott	203,8 b	39,1 a	28,3 a	34,4 a	4,6 b	8,2 a	21,5 c	40,7 d	12,8 b	63,6 a	69,8 a	74,6 a	50,5 a	58,4 b	67,8 c	53,6 c	329,5 a	6380,5 n.g.
280	KXA3191	223,3 a	35,8 b	27,7 a	27,1 b	7,5 a	7,0 b	23,5 b	44,2 b	17,4 a	61,4 ab	67,4 b	73,2 b	50,2 a	59,1 ab	70,4 b	56,2 b	320,9 a	6808,4 n.g.
400	Hybride 13	221,2 a	32,7 c	26,0 a	27,3 b	8,6 a	7,1 b	23,2 b	42,5 c	15,9 a	60,9 b	68,5 ab	75,5 a	50,9 a	61,8 a	75,3 a	59,7 a	322,7 a	6780,8 n.g.
800	Hybride 89	198,6 b	25,0 d	24,4 b	20,0 c	7,1 ab	8,1 a	27,0 a	49,9 a	16,2 a	57,7 c	62,5 c	67,9 c	48,5 b	55,9 c	73,5 a	59,1 a	324,7 a	6125,6 n.g.
Erntetermin II																			
250	Gavott	224,0 b	42,7 a	33,3 a	36,2 a	6,4 b	8,1 a	18,1 c	38,4 c	16,4 a	60,3 bc	73,2 a	77,0 a	53,4 a	60,0 a	66,4 c	48,2 c	342,3 ab	7281,8 n.g.
280	KXA3191	235,7 a	38,9 b	32,7 ab	30,6 b	7,3 ab	6,9 ab	20,5 b	41,6 b	15,3 a	62,4 ab	70,5 b	75,0 b	52,5 b	59,7 a	68,5 ab	53,8 b	355,1 a	7949,9 n.g.
400	Hybride 13	238,2 a	35,9 c	31,0 b	31,7 b	8,2 a	7,2 ab	19,3 b	39,1 c	12,7 b	64,3 a	72,7 a	77,1 a	54,5 a	61,9 b	69,2 a	56,9 a	331,4 b	7497,9 n.g.
800	Hybride 89	234,2 a	28,8 d	25,2 c	22,6 c	10,0 a	6,6 b	24,1 a	44,2 a	17,8 a	59,8 c	66,0 c	72,4 c	49,6 c	59,1 a	68,0 bc	53,2 b	**	**
Erntetermin IV																			
250	Gavott	201,7 c	48,2 a	38,0 a	36,6 a	6,2 b	8,5 a	16,3 c	37,8 c	8,4 c	71,0 a	75,4 a	78,2 a	56,9 a	62,0 a	54,6 b	38,5 c	332,8 a	6375,7 n.g.
280	KXA3191	238,7 a	44,4 b	36,2 a	30,2 b	9,0 a	6,9 b	19,1 b	40,5 b	12,6 a	65,8 bc	72,0 b	77,4 ab	53,9 b	63,0 a	65,4 a	51,2 b	335,4 a	7605,3 n.g.
400	Hybride 13	229,6 b	44,0 b	38,6 a	31,1 b	8,9 a	7,0 b	18,9 b	40,1 b	10,1 b	67,4 b	72,1 b	76,9 b	53,4 b	61,4 a	67,0 a	55,8 a	317,7 b	6929,0 n.g.
800	Hybride 89	240,2 a	37,3 c	33,5 b	27,0 c	9,1 a	6,3 b	22,2 a	42,3 a	10,0 c	64,8 c	68,7 c	73,2 c	51,1 c	58,1 b	65,6 a	52,3 b	318,0 b	7256,4 n.g.
Mittel Erntetermine																			
	Erntetermin I	211,7 c	33,1 c	26,6 c	27,2 b	7,0 b	7,6 a	23,8 a	44,3 a	15,6 a	60,9 b	67,1 c	72,8 b	50,1 b	58,8 b	70,6 a	56,7 a	324,5 a	6526,6 n.g.
	Erntetermin II	233,0 a	36,6 b	30,6 b	30,3 a	8,0 b	7,2 a	20,5 b	40,8 b	15,6 a	61,7 b	70,6 b	75,4 a	52,5 a	60,2 a	68,3 b	52,9 b	338,5 n.g.	7493,9 n.g.
	Erntetermin IV	227,5 b	43,5 a	36,6 a	31,2 a	8,3 a	7,2 a	19,1 c	40,2 b	10,3 b	67,3 a	72,0 a	76,4 a	53,8 a	61,1 a	63,4 c	49,7 c	325,9 a	7045,3 n.g.
	Mittel	219,9	37,2	30,7	29,6	7,7	7,3	21,1	41,8	13,4	63,8	69,9	74,9	52,1	60,0	66,8	52,3	329,9	7021,9
Mittel Sorten																			
250	Gavott	206,0 a	43,0 a	32,5 a	35,7 a	5,7 b	8,3 a	18,6 c	39,0 d	12,6 b	64,9 a	72,8 a	76,6 a	53,6 a	60,1 a	62,5 c	45,6 c	334,9 a	6554,0 n.g.
280	KXA3191	224,6 a	38,4 b	31,6 a	29,3 b	7,9 a	7,0 bc	21,0 b	42,1 b	14,9 a	63,4 b	70,0 c	75,2 b	52,2 a	60,6 a	67,3 b	52,4 b	337,1 a	7193,2 n.g.
400	Hybride 13	226,8 a	37,3 b	31,8 a	30,0 c	8,6 a	7,1 c	20,5 b	40,6 c	12,4 b	64,7 ab	71,1 b	76,5 a	52,9 a	61,7 a	69,2 a	57,3 a	324,0 b	6979,0 n.g.
800	Hybride 89	222,2 a	30,2 c	26,9 c	23,2 d	8,7 a	7,0 c	24,5 a	45,5 a	13,5 ab	62,0 c	65,8 d	71,2 c	49,8 b	57,7 b	68,2 ab	53,8 b	324,9 n.g.	6855,9 n.g.
	Mittel	219,9	37,2	30,7	29,6	7,7	7,3	21,1	41,8	13,4	63,8	69,9	74,9	52,1	60,0	66,8	52,3	329,9	6895,5

Erntetermine: 25.08., 15.09., 23.10.

n.g. nicht geschätzt; ** fehlender Wert; unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede bei $P < 0,05$

Tab. 9.4: Agronomische Merkmale, Qualitätsmerkmale und Methanausbeute in Abhängigkeit von Erntetermin und Genotyp (Saat Mai, Freising 2003)

FAO Sorte	TS-Ertrag dt ha ⁻¹	TS-G % FM	TS-R % TS	Stärke	WLK	RP	ADF	NDF	WLK-R	NDF-R	ELOS	IVDOM	DINAG	DINIG	IVDOM-R	DNDF-R	MA NI kg OTS ⁻¹	MHE m ³ ha ⁻¹
Erntetermin I																		
250 Gavott	160,1b	30,7a	25,9a	31,5a	6,9b	8,3b	22,2c	43,2c	15,3c	61,1a	67,7a	74,4a	47,6b	58,5b	68,6d	53,9d	331,5a	4858,1ab
280 KXA3191	175,7a	27,2b	25,5a	27,5b	5,9b	8,8b	23,4bc	45,7bc	18,3b	59,6b	67,2a	72,2a	50,8a	58,3b	70,6c	55,7c	335,3a	5455,6a
400 Hybride 13	163,0b	24,8c	24,1b	21,7c	11,0a	8,7b	24,2b	46,2b	22,0a	53,7d	66,3a	74,9a	49,9a	62,7a	75,6a	58,6a	332,3a	5069,7a
800 Hybride 89	144,2c	20,1d	23,1b	8,7d	11,8a	9,7a	29,6a	56,2a	17,0bc	56,1c	56,8b	66,4b	45,7b	57,8b	72,4b	57,4b	310,5b	4225,9b
Erntetermin II																		
250 Gavott	193,4b	36,2a	29,0a	32,6a	10,4a	7,6c	18,4b	37,2c	15,2d	60,4a	73,3a	78,3a	53,2b	62,0a	67,2d	50,3c	334,5a	6152,1a
280 KXA3191	212,2a	33,0b	27,3a	28,2b	9,2a	7,2c	20,3b	40,5b	17,4b	60,9a	71,0a	76,2ab	53,6b	62,0a	68,6c	52,9b	330,0a	6278,9a
400 Hybride 13	192,4b	28,3c	25,2b	29,1b	5,6b	8,2b	19,4b	41,5b	17,7b	56,1b	71,3a	73,6b	56,1a	59,7b	75,0a	60,0a	**	**
800 Hybride 89	164,6c	22,6d	23,2c	20,2c	2,3b	9,6a	24,7a	52,2a	21,1a	56,7b	63,7b	62,0b	53,1b	51,0c	69,9b	52,1b	**	**
Erntetermin IV																		
250 Gavott	183,1c	45,2a	36,3a	35,7a	8,7a	8,0a	16,3b	36,1b	14,1a	62,8a	75,6a	78,7a	56,1a	61,8b	64,0c	45,2c	330,8a	5756,3b
280 KXA3191	214,7a	40,4b	34,3b	30,9b	11,6a	7,0b	17,7ab	37,9b	15,5a	62,7a	73,3a	80,1a	53,5b	65,4a	67,0b	50,8b	339,0a	6663,7a
400 Hybride 13	197,4b	38,4c	33,4b	30,2b	12,2a	7,3ab	17,7ab	39,0b	14,2a	60,7b	73,2a	80,4a	53,6b	66,0a	70,4a	55,8a	322,0b	5825,3b
800 Hybride 89	176,9d	31,3d	30,9c	21,1c	11,9a	7,0b	21,2a	43,2a	15,3a	60,0b	68,9b	72,7b	53,6b	59,3b	68,1b	51,3b	309,8c	5197,3b
Mittel Erntetermine																		
Erntetermin I	160,8b	25,7c	24,6c	22,3c	8,9b	8,9a	24,9a	47,8a	18,2A	57,6b	64,5c	72,0b	48,5b	59,3a	71,8a	56,4a	327,4a	5000,4b
Erntetermin II	190,6a	30,0b	26,2b	27,5b	6,8c	8,1b	20,7b	42,9b	17,8A	58,5b	69,8b	72,5b	54,0a	58,7a	70,2a	53,8b	332,3n.g.	6016,7n.g.
Erntetermin IV	193,0a	38,8a	33,7a	29,5a	11,1a	7,3c	18,2c	39,0c	14,8b	61,5a	72,7a	78,0a	54,2a	63,1b	67,4b	50,8c	325,4a	5966,4a
Mittel	181,5	31,5	27,6	26,4	8,9	8,1	21,3	43,2	16,9	59,2	69,0	74,2	52,2	60,4	69,8	53,6	328,3	5661,2
Mittel Sorten																		
250 Gavott	178,9b	37,4a	29,8a	33,3a	8,6b	8,0b	19,0c	38,9d	14,8b	61,4a	72,2a	77,2a	52,3a	60,8b	66,6c	49,8c	332,3a	5645,7b
280 KXA3191	200,9a	33,6b	28,6ab	28,9b	8,9b	7,7c	20,5b	41,3c	17,1a	61,0a	70,5bc	76,2b	52,6a	61,9ab	68,7b	53,1b	334,8a	6387,8a
400 Hybride 13	184,3ab	30,5c	26,9b	27,0b	9,6a	8,1b	20,4b	42,2b	18,0a	56,8b	70,3bc	76,3b	53,2a	62,8a	73,6d	58,1a	327,2n.g.	5727,4b
800 Hybride 89	161,9c	24,7d	25,2c	16,7c	8,7b	8,8a	25,2a	50,5a	17,8a	57,6b	63,1d	67,0c	50,8b	56,1c	70,1a	53,6b	310,1n.g.	4769,3c
Mittel	181,5	31,5c	27,6	26,4	8,9	8,1	21,3	43,2	16,9	59,2	69,0c	74,2	52,2	60,4	69,8	53,6	326,1	5632,6

Erntetermine: 25.08., 15.09., 23.10.

n.g. nicht geschätzt; ** fehlender Wert; unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede bei P < 0,05

Tab. 9.5: Agronomische Merkmale, Qualitätsmerkmale und Methanausbeute in Abhängigkeit von Erntetermin und Genotyp (Ingolstadt 2004)

FAO	Sorte	TS-Ertrag		TS-G		TS-R		Stärke	WLK	RP	ADF	NDF	WLK-R	% TS		ELOS	IVDOM	DINAG	DINIG	IVDOM-R	D-NDF-R	MA	MHE
		dt ha ⁻¹	dt ha ⁻¹	% FM	% TS	% TS	NI kg OTS ⁻¹							m ³ ha ⁻¹									
Erntetermin I																							
250	Gavott	169,2 a	32,1 a	25,0 a	27,4 a	9,7 b	8,1 a	20,0 d	38,8 c	18,4 c	57,6 a	70,3 a	75,6 a	52,9 ab	61,2 b	70,7 c	53,9 b	341,8 a	5503,9 a				
400	KX2386	173,2 a	24,6 b	23,7 a	10,8 b	19,1 a	7,2 a	22,6 c	43,5 b	26,3 a	51,2 bc	67,7 b	76,3 a	53,9 a	66,2 a	76,5 ab	57,5 b	335,9 a	5527,1 a				
600	KXA 4566	164,2 a	20,1 b	22,1 a	2,1 b	18,4 a	7,7 a	27,1 a	50,8 a	22,0 b	54,2 b	61,2 d	70,2 c	51,2 b	62,6 b	75,5 b	59,9 a	325,5 b	5077,5 a				
600	Mikado	197,7 a	22,8 b	23,7 a	6,5 b	20,3 a	8,0 a	24,2 b	48,1 a	24,3 a	50,9 c	64,2 c	73,0 b	51,2 b	63,2 b	78,7 a	61,4 a	310,9 c	5674,7 a				
Erntetermin II																							
250	Gavott	176,6 c	36,2 a	28,1 a	26,9 a	7,4 c	8,0 ab	21,2 b	41,1 b	15,1 c	62,1 a	68,5 b	74,2 b	52,1 ab	60,7 c	66,3 b	50,1 c	332,9 a	5713,5 b				
400	KX2386	213,5 ab	29,9 b	23,8 a	27,7 a	10,3 bc	7,4 b	19,8 b	37,7 c	22,8 a	55,6 b	71,5 a	77,1 a	54,1 a	63,0 ab	72,9 a	55,5 b	339,2 a	6642,2 b				
600	KXA 4566	187,3 bc	23,3 c	22,1 a	7,1 b	16,8 a	8,5 a	23,6 a	46,9 a	23,1 a	54,4 b	65,3 c	73,1 b	54,4 a	64,6 a	72,6 a	54,0 b	337,5 a	6005,6 b				
600	Mikado	240,2 a	26,3 bc	23,2 a	15,0 b	14,8 ab	7,5 a	24,2 a	44,8 a	19,4 b	57,2 b	65,1 c	73,6 b	50,3 b	62,3 bc	74,0 a	58,8 a	**	8613,0 a				
Erntetermin III																							
250	Gavott	176,2 a	37,2 a	28,7 a	31,6 a	1,9 b	8,6 a	21,2 c	42,4 b	12,7 c	67,0 a	69,6 a	71,3 b	54,2 a	56,9 a	64,5 b	50,9 c	337,4 a	5655,1 a				
400	KX2386	211,0 a	31,4 b	25,2 a	31,4 a	5,5 b	7,6 a	21,1 c	40,5 b	20,1 a	57,6 b	70,5 a	73,6 a	53,2 a	58,2 a	71,2 a	53,8 b	337,4 a	6351,3 a				
600	KXA 4566	186,3 a	25,4 c	25,2 a	10,7 b	9,7 a	8,6 a	28,2 a	52,9 a	21,5 a	53,7 c	60,4 c	66,5 d	50,2 b	57,9 a	72,3 a	52,8 bc	327,7 b	5388,9 a				
600	Mikado	190,4 a	25,8 c	24,2 a	12,0 b	11,0 a	8,7 a	26,1 b	52,4 a	16,8 b	57,5 b	63,0 b	68,2 c	51,9 ab	58,8 a	72,7 a	56,3 a	324,2 b	5864,6 a				
Erntetermin IV																							
250	Gavott	150,9 b	35,9 a	32,0 a	30,5 a	2,7 b	9,1 a	19,4 c	43,4 b	11,4 c	71,5 a	70,5 a	70,8 b	55,8 a	56,3 c	58,8 c	44,8 d	333,2 a	4787,2 b				
400	KX2386	190,6 a	31,6 b	26,4 a	24,6 a	8,6 a	7,8 b	20,7 bc	42,1 b	20,5 a	59,2 b	69,7 a	73,7 a	54,6 a	60,6 ab	67,4 b	47,3 c	328,6 a	5825,0 ab				
600	KXA 4566	196,4 a	27,5 b	27,3 a	10,9 b	10,4 a	8,1 a	26,7 a	51,1 a	17,1 b	60,0 b	61,9 c	67,6 c	51,5 b	58,7 b	67,8 b	49,7 b	333,9 a	6225,4 a				
600	Mikado	196,0 a	28,9 b	26,1 a	17,5 b	11,6 a	8,1 a	22,3 b	45,7 b	19,0 a	57,2 b	67,3 b	72,3 a	53,9 a	60,9 a	71,2 a	53,0 a	328,1 a	5709,5 ab				

Erntetermine: 20.09., 11.10., 26.10., 02.11.
n.g. nicht geschätzt; ** fehlender Wert; unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede bei P < 0,05

Tab. 9.5: Fortsetzung

FAO	Sorte	TS-Ertrag dt ha ⁻¹	TS-G % FM	TS-R % FM	Stärke	WLK	RP	ADF	NDF	WLK-R	NDF-R % TS	ELOS	IVDOM	DINAG	DINIG	IVDOM-R D-NDF-R	MA NI kg OTS ⁻¹	MHE m ³ ha ⁻¹	
Mittel Erntetermine																			
	Erntetermin I	176,1 a	24,9 c	23,6 c	11,7 b	16,9 a	7,7 a	23,4 ab	45,3 ab	22,8 a	53,5 c	65,9 b	73,8 a	52,3 a	63,3 a	75,4 a	58,2 a	328,5 b	5445,8 b
	Erntetermin II	204,4 a	28,9 b	24,3 bc	19,2 a	12,3 b	7,8 a	22,2 b	42,6 b	20,1 b	57,3 b	67,6 a	74,5 a	52,7 a	62,7 a	71,4 b	54,6 b	346,8 a	6743,6 a
	Erntetermin III	191,0 a	30,0 ab	25,8 b	21,4 a	7,0 c	8,4 a	24,2 a	47,0 a	17,8 bc	59,0 ab	65,9 b	69,9 b	52,4 a	57,9 b	70,2 b	53,4 b	331,7 b	5815,0 ab
	Erntetermin IV	183,5 a	31,0 a	27,9 a	20,9 a	8,3 c	8,3 a	22,3 b	45,6 ab	17,0 c	62,0 a	67,3 a	71,1 b	53,9 a	59,1 b	66,3 c	48,7 c	331,0 b	5636,8 b
	Mittel	188,7	28,7	25,4	18,3	11,1	8,1	23,0	45,1	19,4	57,9	66,7	72,3	52,8	60,7	70,8	53,7	334,5	5910,3
Mittel Sorten																			
250	Gavott	168,3 c	35,4 d	28,4 a	29,1 a	5,4 c	8,4 a	20,5 c	41,4 c	14,4 c	64,6 a	69,7 a	73,0 b	53,8 a	58,8 c	65,1 c	49,9 c	336,3 a	5414,9 b
400	KX2386	197,1 ab	29,4 a	24,8 b	23,6 b	10,9 b	7,5 b	21,0 c	40,9 c	22,4 a	55,9 b	69,8 a	75,2 a	53,9 a	62,0 a	72,0 b	53,5 b	335,3 ab	6086,4 ab
600	KXA4566	183,6 b	24,1 c	24,2 b	7,7 d	13,8 a	8,2 a	26,4 a	50,4 a	20,9 ab	55,6 b	62,2 c	69,3 d	51,8 b	61,0 b	72,1 b	54,1 b	331,1 b	5674,4 b
600	Mikado	206,1 a	26,0 b	24,3 b	12,7 c	14,4 a	8,1 a	24,2 b	47,7 b	19,9 b	55,7 b	64,9 b	71,8 c	51,8 b	61,3 ab	74,2 a	57,4 a	321,2 n.g.	6288,3 n.g.
	Mittel	188,7	28,7	25,4	18,3	11,1	8,1	23,0	45,1	19,4	57,9	66,7	72,3	52,8	60,7	70,8	53,7	334,5	5910,3

Erntetermine: 20.09., 11.10., 26.10., 02.11.

n.g. nicht geschätzt; ** fehlender Wert; unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede bei P < 0,05

Tab. 9.6: Agronomische Merkmale, Qualitätsmerkmale und Methanausbeute in Abhängigkeit von Erntetermin und Genotyp (Ismaning 2004)

FAO	Sorte	TS-Ertrag dt ha ⁻¹	TS-G % FM	Stärke	WLK	RP	ADF	NDF % TS	ELOS	IVDOM	DINAG	DINIG	MA NI kg OTS ⁻¹	MHE m ³ ha ⁻¹
Erntetermin I														
250	Gavott	123,7 †	22,7 †	13,9 a	14,7	7,8 c	26,0 d	44,6 c	64,3 c	75,4 a	50,1 a	65,5 a	318,9 b	3747,7 †
280	KXA 4171	121,6	20,2	0,5 b	14,7 bc	10,2 a	36,8 a	58,1 a	58,8 a	72,6 bc	48,6 ab	65,8 a	304,1 c	3512,7
280	Vitalina	110,9	19,7	3,8 b	16,1 b	9,0 b	30,2 c	52,7 b	51,9 b	69,0 c	43,3 c	63,5 b	319,8 b	3369,6
400	KX 2385	103,1	20,1	1,8 b	17,6 ab	8,3 bc	30,3 c	52,7 b	58,0 a	74,0 ab	48,0 b	67,8 a	298,8 d	2926,3
400	Vic	127,9	21,0	2,9 b	17,4 ab	8,1 c	31,0 c	52,2 b	57,8 a	71,8 b	47,2 b	64,7 b	323,3 b	3928,0
600	Mikado	111,3	17,2	0,6 b	19,4 a	8,6 c	30,9 c	53,1 b	54,5 b	70,3 c	45,6 c	64,5 b	312,6 cb	3305,4
600	Kermes	105,6	17,4	0,0 c	16,0 b	10,0 a	34,4 b	56,7 a	58,9 a	72,6 b	48,6 ab	65,8 a	340,1 a	3412,3
700	Doge	103,1	16,6	5,6 b	13,0 c	9,1 b	30,1 c	53,6 b	58,2 a	70,3 c	48,8 ab	63,6 b	319,8 b	3131,9
Erntetermin II														
250	Gavott	125,4	29,5	28,6 a	8,9 e	7,8 c	22,3 c	37,7 e	71,0 a	76,1 a	53,5 a	61,8 d	319,6 c	3806,8
280	KXA 4171	116,2	29,2	22,8 b	12,7 d	6,7 d	23,5 c	39,7 e	68,3 a	76,1 ab	52,0 ab	63,8 cd	345,4 a	3812,6
280	Vitalina	164,8	28,4	20,8 b	13,2 cd	6,7 d	24,0 c	41,3 de	69,7 a	77,2 a	53,0 ab	64,7 c	330,5 bc	5173,8
400	KX 2385	114,7	26,1	19,1	13,9 cd	7,2 cd	24,3 bc	41,1 de	67,8 b	78,2 a	52,0 ab	67,5 b	349,6 a	3809,4
400	Vic	145,1	26,2	17,2 c	12,5 d	7,7 c	26,3 b	44,2 c	65,9 b	74,5 b	51,5 ab	63,7 cd	322,3 c	4443,0
600	Mikado	131,1	21,1	3,7 d	17,2 b	7,8 c	30,2 a	52,0 b	59,2 c	72,4 b	49,8 c	65,9 bc	312,8 cd	3896,3
600	Kermes	110,9	21,0	3,8 d	15,1 c	9,7 a	30,8 a	55,0 a	60,6 c	74,3 b	50,2 bc	67,5 b	336,0 ab	3539,6
700	Doge	102,5	18,4	0,2 e	20,6 a	8,7 b	29,8 a	52,0 b	60,6 c	76,5 ab	50,2 bc	71,8 a	304,3 d	2962,9
Erntetermin III														
250	Gavott	200,2	36,4	37,4	6,6 b	6,7 b	19,9 d	33,8 d	73,9 a	77,4 a	53,4 a	59,7 c	345,2 ab	6565,2
280	KXA 4171	171,5	31,9	31,0 a	8,6 b	6,6 b	21,8 cd	37,8 c	70,7 b	76,5 ab	51,7 ab	61,3 bc	335,9 b	5473,1
280	Vitalina	187,3	31,8	30,8 a	8,6 b	6,4 b	22,6 c	37,9 c	71,0 ab	77,0 a	52,1 a	61,9 b	335,3 b	5965,8
400	KX 2385	139,9	28,7	31,6 a	9,3 b	6,7 b	21,5 cd	36,9 c	71,9 ab	78,2 a	52,6 a	63,2 b	349,6 a	4646,2
400	Vic	203,0	33,6	29,8 a	8,1 b	6,7 b	24,8 b	39,2 c	68,8 bc	74,7 b	49,8 b	59,3 c	348,4 a	6718,7
600	Mikado	186,5	24,0	16,0 b	13,9 a	6,8 b	26,8 b	45,0 b	66,4 cd	77,2 a	51,6 ab	67,2 a	318,5 c	5643,6
600	Kermes	162,2	22,9	15,9 b	14,6 a	7,9 a	25,2 b	43,1 b	64,1 d	76,2 ab	48,7 c	66,0 a	343,1 a	5286,2
700	Doge	156,0	19,2	7,0 c	15,5 a	8,4 a	29,5 a	49,8 a	60,6 e	74,5 ab	49,1 bc	67,1 a	343,5 a	5090,4

Erntetermine: 27.08., 14.09., 06.10., 22.10., 10.11.

† wurde wegen fehlender Wiederholungen nicht geschätzt, unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede bei P < 0,05

Tab. 9.6: Fortsetzung

FAO	Sorte	TS-Ertrag dt ha ⁻¹	TS-G % FM	Stärke	WLK	RP	ADF	NDF % TS	ELOS	IVDOM	DINAG	DINIG	MA NI kg OTS ⁻¹	MHE m ³ ha ⁻¹
Erntetermin IV														
250	Gavott	164,2 †	39,4 †	37,5 a	4,2 d	6,4 ab	20,9 c	36,1 d	72,2 a	75,7 ab	52,3 ab	58,3 d	331,3 b	5168,4 †
280	KXA 4171	165,8	34,0	34,6 ab	6,1 cd	6,7 ab	21,1 c	36,5 d	69,8 b	75,7 ab	51,0 ab	60,6 cd	350,5 a	5519,9
280	Vitalina	155,7	32,4	31,4 b	7,0 c	6,3 ab	22,6 c	39,4 cd	72,3 a	76,5 ab	53,3 a	60,4 cd	335,3 b	4959,1
400	KX 2385	155,4	30,7	35,3 a	5,9 cd	6,1 b	21,9 c	35,8 d	72,3 a	77,4 a	52,8 ab	61,6 c	343,5 a	5071,1
400	Vic	185,6	34,0	31,8 b	5,8 cd	6,4 ab	25,2 b	40,2 c	68,2 bc	74,0 ab	49,0 bc	58,3 d	348,2 a	6138,6
600	Mikado	180,6	25,5	19,6 c	12,0 b	6,8 ab	26,4 b	43,9 b	65,3 cd	76,6 ab	50,5 bc	66,6 ab	347,1 a	5955,0
600	Kermes	160,3	23,6	16,6 c	13,3 a	7,0 a	26,1 b	44,4 b	64,9 d	75,6 ab	48,8 bc	64,4 b	325,6 b	4958,7
700	Doge	151,4	20,3	8,3 d	14,4 a	7,0 a	30,0 a	50,1 a	59,4 e	74,4 b	47,5 c	66,9 a	339,5 a	4882,3
Erntetermin V														
250	Gavott	162,7	39,4	37,7 ab	0,3 c	6,6 b	20,2 d	38,2 d	72,8 ab	71,9 bc	55,2 ab	55,6 d	343,1 a	5303,6
280	KXA 4171	169,0	35,0	36,0 a	0,7 c	7,0 b	20,5 d	39,2 cd	71,2 ab	73,5 ab	54,4 ab	57,9 bc	344,3 a	5527,4
280	Vitalina	155,2	36,2	34,8 b	2,1 c	6,4 b	21,4 d	39,9 cd	72,7 ab	72,5 b	56,8 a	56,6 bcd	329,6 c	4859,2
400	KX 2385	171,6	33,6	38,3 a	1,6 c	7,0 b	20,0 d	37,4 d	73,7 a	75,3 a	56,3 a	58,9 bc	340,4 ab	5549,0
400	Vic	164,5	32,4	35,5 ab	0,5 c	6,6 b	23,1 c	42,0 c	69,8 b	70,9 bc	52,9 bc	54,6 d	324,6 c	5072,5
600	Mikado	158,5	21,5	24,5 c	3,9 bc	7,7 a	25,1 bc	46,5 b	65,5 c	71,6 bc	53,1 b	61,3 ab	329,0 bc	4954,4
600	Kermes	149,1	22,1	20,7 d	5,8 b	8,1 a	25,4 b	47,3 b	66,2 c	71,2 bc	52,8 bc	59,7 bc	340,2 ab	4818,5
700	Doge	140,5	18,8	11,8 e	8,8 a	8,1 a	28,4 a	51,9 a	60,9 d	69,9 c	50,7 c	62,1 a	332,5 bc	4437,8
	Mittel	147,9	26,6	20,0	10,5	7,5	25,8	44,5	65,7	74,4	51,0	62,9	332,0	4683,6

Erntetermine: 27.08., 14.09., 06.10., 22.10., 10.11.

† wurde wegen fehlender Wiederholungen nicht geschätzt, unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede bei P < 0,05

Tab. 9.6: Fortsetzung

FAO	Sorte	TS-Ertrag dt ha ⁻¹	TS-G % FM	Stärke	WLK	RP	ADF	NDF % TS	ELOS	IVDOM	DINAG	DINIG	MA NI kg OTS ⁻¹	MHE m ³ ha ⁻¹
Mittel Erntetermine														
	Erntetermin I	113,4 †	19,3 †	3,6 e	16,1 a	8,9 a	31,2 a	53,0 a	57,8 c	72,0 b	47,5 c	65,1 a	317,2 d	3414,6 †
	Erntetermin II	126,3	25,0	14,5 d	14,2 b	7,8 b	26,4 b	45,4 b	65,4 b	75,6 a	51,5 b	65,8 a	327,6 c	3933,0
	Erntetermin III	175,8	28,6	24,9 c	10,6 c	7,0 c	24,0 cd	40,4 d	68,4 a	76,5 a	51,1 b	63,2 b	339,9 ab	5681,0
	Erntetermin IV	164,9	30,0	26,9 b	8,6 d	6,6 d	24,3 c	40,8 d	68,0 a	75,7 a	50,7 b	62,1 c	340,1 a	5337,8
	Erntetermin V	158,9	29,9	29,9 a	2,9 e	7,2 c	23,0 d	42,8 c	69,1 a	72,1 b	54,0 a	58,4 d	335,5 b	5071,4
	Mittel	147,9	26,6	20,0	10,5	7,5	25,8	44,5	65,7	74,4	51,0	62,9	332,0	4687,6
Mittel Sorten														
250	Gavott	154,8	33,5	31,0	6,9 d	7,1 bc	21,9 e	38,1 f	70,8 a	75,3 b	52,9 a	60,2 e	327,9 cd	4921,1
280	KXA 4171	136,9	30,1	25,0 a	8,6 c	7,5 b	24,7 d	42,2 d	67,5 b	74,4 bcd	51,7 a	61,4 d	330,1 bcd	4777,0
280	Vitalina	148,8	29,7	24,3 ab	9,4 c	7,0 c	24,1 d	42,2 d	67,7 b	74,9 bc	51,5 a	61,9 d	331,6 abc	4866,1
400	KX2385	130,7	27,8	25,2 a	9,6 c	7,1 bc	23,6 d	40,8 e	68,7 b	76,6 a	52,3 a	63,8 c	336,0 a	4398,6
400	Vic	137,6	29,4	23,4 b	8,8 c	7,1 bc	26,1 c	43,6 c	66,1 c	73,2 d	50,1 b	60,1 e	337,0 a	5288,2
600	Mikado	153,6	21,8	12,9 c	13,3 b	7,5 b	27,9 b	48,1 b	62,9 d	74,0 c	49,8 b	64,7 cb	324,0 d	4758,6
600	Kermes	165,2	21,4	11,4 d	13,0 b	8,5 a	28,4 ab	49,3 b	62,2 d	73,6 d	50,1 b	65,1 b	333,4 abc	4410,0
700	Doge	155,2	18,7	6,6 e	14,4 a	8,2 a	29,6 a	51,5 a	59,9 e	73,1 d	49,3 b	66,3 a	336,4 a	4101,0
	Mittel	147,9	26,6	20,0	10,5	7,5	25,8	44,5	65,7	74,4	51,0	62,9	332,0	4687,6

Erntetermine: 27.08., 14.09., 06.10., 22.10., 10.11.

† wurde wegen fehlender Wiederholungen nicht geschätzt, unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede bei P < 0,05

Tab. 9.7: Agronomische Merkmale, Qualitätsmerkmale und Methanausbeute in Abhängigkeit von Erntetermin und Genotyp (Grucking 2006)

FAO	Sorte	TS-Ertrag dt ha ⁻¹	TS-G % FM	TS-R	Stärke	WLK	RP	ADF	NDF	WLK-R	NDF-R % TS	ELOS	IVDOM	DINAG	DINIG	IVDOM-R	D-NDFF-R	MA NI kg OTS ⁻¹	MHE m ³ ha ⁻¹
Erntetermin I																			
250	Gavott	145,3 a	21,3 a	17,4 a	15,1 a	7,5 c	10,8 b	29,5 c	56,2 d	11,8 a	67,8 c	57,0 b	60,4 b	44,4 b	48,8 c	67,7 c	56,7 c	341,0 a	4707,6 a
250	KXA6231	126,3 b	16,4 b	15,6 c	7,2 c	10,8 ab	11,1 ab	32,8 b	59,4 c	10,2 b	67,6 c	53,6 c	62,3 b	43,4 b	54,0 b	69,1 b	59,2 b	337,0 a	4043,5 a
250	KXA6231br	114,6 b	16,8 b	15,7 c	12,0 b	12,2 a	11,6 a	27,9 c	54,8 d	9,5 b	67,8 c	61,2 a	75,1 a	48,8 a	67,1 a	74,2 a	69,1 a	330,2 a	3595,2 a
400	KXA5243	143,9 a	16,3 b	16,9 b	0,8 d	10,7 b	9,8 c	41,6 a	69,5 a	7,1 c	73,8 b	43,2 d	56,6 c	35,9 c	50,9 bc	65,3 d	57,3 c	323,5 b	4421,7 a
600	Mikado	144,4 a	14,6 c	15,4 c	1,3 d	11,3 ab	9,7 c	40,5 a	67,7 b	5,7 d	75,2 c	44,9 d	60,9 b	37,0 c	55,2 b	62,1 e	54,5 d	323,1 b	4431,6 a
Erntetermin II																			
250	Gavott	203,0 b	29,3 a	19,7 a	29,9 a	9,0 c	8,3 ab	21,4 c	41,1 c	18,4 b	62,3 b	69,8 a	74,2 bc	50,7 a	57,7 b	68,6 d	53,2 c	343,9 ab	6632,7 ab
250	KXA6231	198,8 b	27,5 b	19,8 a	25,7 b	11,2 b	8,6 ab	21,7 c	42,6 c	20,8 a	58,4 d	69,0 a	74,6 b	50,9 a	59,7 b	72,0 b	56,2 b	334,6 b	6319,3 b
250	KXA6231br	185,8 c	27,3 b	18,2 b	30,2 a	9,8 c	9,0 a	19,6 c	41,1 c	18,1 b	58,9 d	71,6 a	79,2 a	52,7 a	65,3 a	76,5 a	64,8 a	333,4 b	5885,4 b
400	KXA5243	230,0 a	24,6 c	20,0 a	17,6 c	10,5 bc	8,1 b	28,2 b	49,2 b	18,3 b	63,7 a	62,3 b	70,9 cd	47,6 b	59,6 b	69,4 d	55,2 b	353,8 a	7730,9 a
600	Mikado	228,7 a	21,5 d	19,8 a	5,2 d	16,2 a	8,0 b	31,0 a	54,2 a	20,5 a	61,1 c	58,5 c	69,0 d	47,2 b	60,6 b	71,0 c	55,9 b	343,6 ab	7465,9 ab
Erntetermin III																			
250	Gavott	229,0 c	37,0 a	24,1 a	34,8 a	8,6 c	7,9 ab	18,2 c	37,8 c	20,1 a	60,5 d	73,2 a	76,1 b	52,7 ab	57,8 b	69,0 c	52,3 c	334,3 a	7270,7 b
250	KXA6231	209,4 d	33,7 b	23,5 b	26,3 b	10,5 b	8,1 ab	21,3 b	42,7 b	19,7 a	59,4 e	68,6 b	74,2 bc	50,4 bc	59,3 b	70,3 b	53,9 c	326,9 ab	6501,5 b
250	KXA6231br	165,7 e	37,0 a	24,8 a	35,4 a	8,7 c	8,4 a	16,7 c	38,4 c	15,1 c	62,1 c	74,4 a	80,3 a	54,2 a	64,7 a	74,1 a	63,8 a	320,7 b	5047,8 c
400	KXA5243	253,0 b	30,8 c	22,3 c	26,9 b	8,9 c	6,0 c	24,7 a	44,5 ab	14,9 c	65,9 a	66,1 c	71,7 c	47,3 d	56,0 b	66,8 d	53,2 c	324,0 b	7785,7 ab
600	Mikado	270,2 a	25,0 d	19,3 d	18,8 c	12,4 a	7,5 b	25,7 a	46,8 a	16,8 b	63,5 b	64,8 c	72,2 c	48,8 cd	59,6 b	69,5 bc	56,2 b	328,4 a	8428,0 a
Erntetermin IV																			
250	Gavott	217,2 c	43,7 a	31,0 b	37,0 a	7,7 b	7,6 a	18,2 c	37,9 d	17,8 a	62,5 e	73,2 a	75,5 ab	51,4 a	55,7 b	66,9 b	50,5 d	324,7 ac	6697,9 bc
250	KXA6231	197,7 d	40,3 d	29,9 c	35,1 ab	7,8 b	8,4 a	18,4 c	40,3 c	15,3 b	64,3 d	71,4 a	74,5 bc	50,0 a	55,3 b	65,9 c	51,2 c	354,6 b	6660,9 bc
250	KXA6231br	168,6 e	44,4 b	32,6 a	35,0 bc	7,8 b	8,2 a	18,1 c	41,2 bc	12,3 c	65,9 c	72,7 a	78,9 a	52,3 a	63,2 a	72,6 a	64,1 a	333,2 cd	5335,9 c
400	KXA5243	248,9 b	42,1 c	31,1 b	33,1 c	6,7 b	7,0 b	23,1 b	43,0 b	10,1 d	72,0 a	68,2 b	71,5 c	47,2 b	52,6 b	60,9 d	48,7 e	323,9 c	7658,6 ab
600	Mikado	274,5 a	30,2 e	23,4 d	23,7 d	9,4 a	7,0 b	26,4 a	46,7 a	12,7 c	68,9 b	64,1 c	71,3 c	46,4 b	57,0 b	64,9 c	52,9 b	336,8 ad	8783,9 a

Erntetermine: 24.08., 19.09., 11.10., 26.10.,

unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede bei $P < 0,05$

Tab. 9.8: Korrelationsmatrix der agronomischen Merkmale, der Inhaltsstoff- und Qualitätsparameter und der Methanausbeute (Ernteterminversuchen 2003-2006)

Erntetermin	WH	Sorten	TS-G	TS-Ertrag	TS-R	Stärke	WLK	RP	ADF	NDF	WLK-R	NDF-R	ELOS	IVDOM-R	ND-F-R	MA	MHE	DINAG	DINIG		
Erntetermin	1	-0.02453	0.10105	0.52502	0.24973	0.58864	0.48525	-0.43339	-0.40805	-0.41924	-0.42416	-0.23988	0.27208	0.46391	0.17476	-0.44896	-0.46788	0.12231	0.23848	0.43673	-0.11709
TT	0.6456	0.0575	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	0.0002	<.0001	<.0001	<.0001	0.001	<.0001	<.0001	0.0665	0.0008	<.0001	0.0329
TTT	354	354	275	275	273	235	354	354	354	354	233	233	233	354	354	233	233	226	195	332	332
WH	-0.02453	1	-0.07883	0.19477	0.19475	0.15877	0.10721	-0.02139	0.0082	-0.10917	-0.05267	-0.15192	0.09404	0.09444	0.01095	-0.11726	-0.07012	-0.01366	0.09893	0.04171	0.00899
	0.6456	0.1388	0.0012	0.0148	0.0438	0.6978	0.8778	0.0401	0.323	0.0203	0.1525	0.076	0.8373	0.074	0.2865	0.8382	0.1688	0.4488	0.8703	0.4488	0.8703
	354	354	275	273	235	354	354	354	354	354	233	233	233	354	354	233	233	226	195	332	332
Sorten	0.10105	-0.07883	1	-0.31907	-0.24765	-0.27367	-0.20869	0.14162	-0.11238	0.25309	0.07043	0.09941	-0.18236	-0.15668	0.05472	0.46294	0.54937	-0.108	-0.22724	-0.07898	0.20172
	0.0575	0.1388	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	0.0346	<.0001	0.1862	0.1303	0.0052	0.0031	0.3046	<.0001	<.0001	0.1054	0.0014	0.151	0.0002	0.0002
	354	354	275	273	235	354	354	354	354	354	233	233	233	354	354	233	233	226	195	332	332
TS-G	0.52502	0.19477	-0.31907	1	0.50262	0.8582	0.81923	-0.45968	-0.3992	-0.7996	-0.7506	-0.26736	0.27622	0.79423	0.5006	-0.48816	-0.49693	0.08591	0.43653	0.56456	-0.0106
	<.0001	0.0012	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	0.2336	<.0001	<.0001	0.8667
	275	275	275	273	273	235	275	275	275	275	233	233	233	275	275	233	233	194	194	253	253
TS-Ertrag	0.24973	0.19475	-0.24765	0.50262	1	0.33024	0.41711	-0.16911	-0.45441	-0.41048	-0.40561	0.03017	0.05478	0.41749	0.23227	-0.12823	-0.16892	0.18213	0.92081	0.22596	-0.10484
	<.0001	0.0012	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	0.0516	0.0101	0.0112	<.0001	0.0003	0.0975
	273	273	273	273	273	235	273	273	273	273	231	231	231	273	273	231	231	193	194	251	251
TS-R	0.58864	0.15877	-0.27367	0.8582	0.33024	1	0.59883	-0.27701	-0.42558	-0.64735	-0.59131	-0.27701	0.18851	0.63923	0.42674	-0.43575	-0.47897	-0.13664	0.22905	0.55501	0.17973
	<.0001	0.0148	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	0.0859	0.0037	<.0001	0.0086
	235	235	235	233	233	235	213	235	235	235	233	233	233	235	235	233	233	159	159	213	213
Stärke	0.48525	0.10721	-0.20869	0.81923	0.41711	0.59883	1	-0.75724	-0.31916	-0.849	-0.79248	-0.23382	0.20925	0.86801	0.30588	-0.37163	-0.37396	0.27519	0.38273	0.58307	-0.32814
	<.0001	0.0438	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001
	354	354	275	273	235	354	332	354	354	354	233	233	233	354	354	233	233	226	195	332	332

Tab. 9.8: Fortsetzung

Erntetermin	WH	Sorten	TS-G-TS-Ertrag	TS-R	Stärke	WLK	RP	ADF	NDF	WLK-R	NDF-R	ELOS	IVDOM	IVDOM-R	NDF-R	MA	MHE	DINAG	DINIG		
WLK	-0.43339	0.02139	0.14162	-0.45968	-0.16911	-0.27701	-0.75724	1	0.10399	0.44412	0.36921	0.3518	-0.3262	-0.44763	0.15367	0.45952	0.38779	-0.2077	-0.23793	-0.3316	0.6941
	<.0001	0.6978	0.0098	<.0001	0.0072	<.0001	<.0001	0.0584	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	0.005	<.0001	<.0001	0.0017	0.0008	<.0001	<.0001
	332	332	332	253	251	213	332	332	332	332	211	332	211	332	332	211	211	226	195	332	332
RP	-0.40805	0.0082	-0.11238	-0.3992	-0.45441	-0.42558	-0.31916	0.10399	1	0.29407	0.59821	-0.1368	0.09911	-0.41992	-0.53689	0.02145	0.11955	-0.14915	-0.3712	-0.28941	-0.13354
	<.0001	0.8778	0.0346	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	0.0584	<.0001	<.0001	<.0001	0.0369	0.1314	<.0001	0.7446	0.0685	0.0249	<.0001	<.0001	<.0001	0.0149
	354	354	354	275	273	235	354	354	354	332	332	354	233	354	354	233	233	226	195	332	332
ADF	-0.41924	-0.10917	0.25309	-0.7996	-0.41048	-0.64735	-0.849	0.44412	0.29407	1	0.86837	-0.08622	0.1221	-0.97072	-0.52585	0.12441	0.3036	-0.21281	-0.34367	-0.83375	0.02634
	<.0001	0.0401	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	0.1897	0.0628	<.0001	<.0001	0.0579	<.0001	0.0013	<.0001	<.0001	0.6326
	354	354	354	275	273	235	354	354	354	332	332	354	233	354	354	233	233	226	195	332	332
NDF	-0.42416	-0.05267	0.07043	-0.7506	-0.40561	-0.59131	-0.79248	0.36921	0.59821	0.86837	1	-0.13335	0.13492	-0.94167	-0.74879	0.09071	0.26132	-0.27738	-0.33512	-0.74987	-0.11276
	<.0001	0.323	0.1862	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	0.042	0.0396	<.0001	<.0001	0.1676	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	0.04
	354	354	354	275	273	235	354	354	354	332	332	354	233	354	354	233	233	226	195	332	332
WLK-R	-0.23988	-0.15192	0.09941	-0.26736	0.03017	-0.27701	-0.23382	0.3518	-0.1368	-0.08622	-0.13335	1	-0.86978	0.07848	0.17084	0.64216	0.13864	0.15731	0.04676	0.25324	0.25414
	0.0002	0.0203	0.1303	<.0001	0.6482	<.0001	0.0003	<.0001	0.0369	0.1897	0.042	<.0001	0.2327	0.009	<.0001	0.0344	0.0491	0.5609	0.0002	0.0002	
	233	233	233	233	231	233	233	233	233	233	233	233	233	233	233	233	233	157	157	211	211
NDF-R	0.27208	0.09404	-0.18236	0.27622	0.05478	0.18851	0.20925	-0.3262	0.09911	0.1221	0.13492	-0.88978	1	-0.10759	-0.15643	-0.76018	-0.2488	-0.02318	0.03642	-0.30495	-0.29074
	<.0001	0.1525	0.0052	<.0001	0.4073	0.0039	0.0013	<.0001	0.1314	0.0628	0.0396	<.0001	0.1014	0.0169	<.0001	0.0001	0.7732	0.6507	<.0001	<.0001	
	233	233	233	233	231	233	233	233	233	233	233	233	233	233	233	233	233	157	157	211	211
ELOS	0.46391	0.09444	-0.15668	0.79423	0.41749	0.63923	0.86801	-0.44763	-0.41992	-0.97072	-0.94167	0.07848	-0.10759	1	0.61558	-0.1168	-0.28	0.24241	0.34523	0.84491	0.03936
	<.0001	0.076	0.0031	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	0.2327	0.1014	<.0001	0.0752	<.0001	<.0001	0.0002	<.0001	<.0001	0.4748
	354	354	354	275	273	235	354	354	354	332	332	354	233	354	354	233	233	226	195	332	332
IVDOM	0.17476	0.01095	0.05472	0.5006	0.23227	0.42674	0.30588	0.15367	-0.53689	-0.52585	-0.74879	0.17084	-0.15643	0.61558	1	0.10741	0.01794	0.11953	0.161	0.56846	0.67538
	0.001	0.8373	0.3046	<.0001	0.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	0.009	0.0169	<.0001	0.102	0.7853	0.0729	0.0245	<.0001	<.0001	
	354	354	354	275	273	235	354	354	354	332	332	354	233	354	354	233	233	226	195	332	332

Tab. 9.8: Fortsetzung

Erntetermin	WH	Sorten	TS-GTS-Ertrag	TS-R	Stärke	WLK	RP	ADF	NDF	NDF-R	WLF-R	NDF-R	ELOS	IVDOM	IVDOM-R	NDF-R	MA	MHE	DINAG	DINIG	
IVDOM-R	-0.44896	-0.11726	0.46294	-0.48816	-0.12823	-0.43575	-0.37163	0.45952	0.02145	0.12441	0.09071	0.64216	-0.76018	-0.11168	0.10741	1	0.81042	0.00121	-0.14488	0.00717	0.34309
	<0.001	0.074	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.7446	0.0579	0.1676	<0.001	<0.001	<0.001	0.0752	0.102	<0.001	<0.001	0.988	0.0702	0.9176	<0.001	
	233	233	233	231	233	233	211	233	233	233	233	233	233	233	233	233	157	157	211	211	
D NDF-R	-0.46788	-0.07012	0.54937	-0.49693	-0.16692	-0.47897	-0.37396	0.38779	0.11955	0.3036	0.26132	0.13864	-0.2488	-0.28	0.01794	0.81042	1	-0.05605	-0.2046	-0.27181	0.25403
	<0.001	0.2865	<0.001	<0.001	0.0101	<0.001	<0.001	0.0685	<0.001	0.0344	0.0001	<0.001	<0.001	0.7853	<0.001	<0.001	0.4856	0.0102	<0.001	0.0002	
	233	233	233	231	233	233	211	233	233	233	233	233	233	233	233	233	157	157	211	211	
MA	0.12231	-0.01366	-0.108	0.08591	0.18213	-0.13664	0.27519	-0.2077	-0.14915	-0.21281	-0.27738	0.15731	-0.02318	0.24241	0.11953	0.00121	-0.05605	1	0.34194	0.13961	-0.10944
	0.0665	0.8382	0.1054	0.2336	0.0112	0.0859	<0.001	0.0017	0.0249	0.0013	<0.001	0.0491	0.7732	0.0002	0.0729	0.988	0.4856	<0.001	0.036	0.1008	
	226	226	194	193	159	226	226	226	226	226	226	157	157	226	226	157	226	194	226	226	
MHE	0.23848	0.09893	-0.22724	0.43653	0.92081	0.22905	0.38273	-0.23793	-0.3712	-0.34367	-0.33512	0.04676	0.03642	0.34523	0.161	-0.14438	-0.2046	0.34194	1	0.17118	-0.18997
	0.0008	0.1688	0.0014	<0.001	<0.001	0.0037	<0.001	0.0008	<0.001	<0.001	<0.001	0.5609	0.6507	<0.001	0.0245	0.0702	0.0102	<0.001	0.0167	0.0078	
	195	195	195	194	194	159	195	195	195	195	195	157	157	195	195	157	157	194	195	195	
DINAG	0.43673	0.04171	-0.07898	0.56456	0.22596	0.55501	0.58307	-0.3316	-0.28941	-0.83375	-0.74987	0.25324	-0.30495	0.84491	0.56846	0.00717	-0.27181	0.13961	0.17118	1	0.15943
	<0.001	0.4488	0.151	<0.001	0.0003	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.0002	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.9176	<0.001	0.036	0.0167	0.0036	
	332	332	332	253	251	213	332	332	332	332	211	211	211	332	332	211	211	226	195	332	
DINIG	-0.11709	0.00899	0.20172	-0.0106	-0.10484	0.17973	-0.32814	0.6941	-0.13354	0.02634	-0.11276	0.25414	-0.29074	0.03936	0.67538	0.34309	0.25403	-0.10944	-0.18997	0.15943	1
	0.0329	0.8703	0.0002	0.8667	0.0975	0.0086	<0.001	<0.001	0.0149	0.6326	0.04	0.0002	<0.001	0.4748	<0.001	<0.001	0.0002	0.1008	0.0078	0.0036	
	332	332	332	253	251	213	332	332	332	332	211	211	211	332	332	211	211	226	195	332	

† Korrelationskoeffizient, †† Signifikanzniveau, ††† Anzahl Beobachtungen, Fett markiert sind signifikante Merkmale

Tab. 9.9: Statistische Bewertung der Ernteterminversuche 2003-2006

Effekt	Zählerfreiheitsgrade	Nennerfreiheitsgrade	F-Statistik	Pr > F
Freising, Saat April 2003				
Erntetermin	2	4,0	8,0	0,0402
Sorte	3	17,9	3,1	0,0554
E x S †	5	18,0	1,2	0,3344
Freising, Saat Mai 2003				
Erntetermin	2	1,0	0,2	0,8632
Sorte	3	16,7	14,6	<,0001
E x S	4	16,5	1,3	0,3242
Ingolstadt 2004				
Erntetermin	3	8,0	1,4	0,3251
Sorte	3	17,5	17,1	<,0001
E x S	8	17,4	5,0	0,0025
Ismaning 2004				
Erntetermin	4	25,2	46,5	<,0001
Sorte	7	25,5	6,4	0,0002
E x S	28	25,0	10,0	<,0001
Grucking 2006				
Erntetermin	3	32,1	10,0	<,0001
Sorte	4	32,1	2,4	0,0702
E x S	12	32,2	4,0	0,0008

† Wechselwirkung Erntetermin und Sorte

Tab. 9.10: Ergebnis der Regressionsanalyse für die Parameter Stärke, NDF, ADF, ELOS

Quelle	FG	Summe der Quadrate	Mittleres Quadrat	F-Statistik	Pr > F
Modell	47	19184,3	408,2	3,13	<,0001
Fehler	178	23212,7	130,4		
Korrigierte Summe	225	42396,9			
	R-Quadrat	Korr-Koeff,	Wurzel MSE	Mittelwert MA	
	0,45	3,44	11,42	332,0	
Quelle	FG	Typ III SS	Quadrat	F-Statistik	Pr > F
Stärke	1	985,1	985,1	7,6	0,007
NDF	1	369,2	369,2	2,8	0,094
ELOS	1	373,1	373,1	2,9	0,093
ADF	1	135,0	135,0	1,0	0,310
Erntetermin	4	476,5	119,1	0,9	0,457
Sorte	8	1184,8	148,1	1,1	0,342
E x S	31	9085,8	293,1	2,3	0,001

† Wechselwirkung Erntetermin und Sorte

Tab. 9.11: TS-Gehalte und TS-Erträge in Abhängigkeit von Erntetermin und Genotyp (2003-2006)

FAO Sorten	Erntetermin								Mittel	
	I		II		III		IV		TS-G %	TS dt ha ⁻¹
	TS-G %	TS [†] dt ha ⁻¹	TS-G %	TS dt ha ⁻¹	TS-G %	TS dt ha ⁻¹	TS-G %	TS dt ha ⁻¹		
2003 (2 Orte)										
250 Gavott	34,8	200,2	40,7	213,8	41,6	209,2	47,3	206,1	41,1	207,3
280 KXA3191	32,2	213,3	37,5	236,3	37,4	225,6	43	228,1	37,5	225,8
400 Hybride13	28,9	205,5	34,1	225,4	35,6	216,2	41	213,6	34,9	215,2
800 Hybride89	23,2	182,0	26,6	214,5	28,9	223,1	34,9	214,1	28,4	208,4
Mittel	29,8	200,3	34,7	222,5	35,9	218,5	41,6	215,5	35,5	214,2
2004 (2 Orte)										
250 Gavott	30,7	200,1	36,7	204,3	39,6	199,5	38,5	184,3	36,4	197,1
400 KX2386	23,5	188,6	29,1	209,6	33,8	208,8	35,3	197,4	30,4	201,1
600 KXA4566	19,7	180,4	23,5	190	26,1	191,2	28,2	201,4	24,4	190,7
600 Mikado	21,2	210,7	24,9	236,9	26	207	28,8	215,3	25,2	217,5
Mittel	23,8	194,9	28,6	210,2	31,4	201,6	32,7	199,6	29,1	201,6
2005 (3 Orte)										
250 Gavott	20,9	140,2	24,6	177,2	34,5	200,6	40,4	189	30,1	176,7
250 KXA 5243	17,5	141,6	19,6	180,5	24,1	203,8	32,1	209,2	23,3	183,8
250 KXA 4171	18,9	157,4	22,5	185,4	30	215,1	37,1	214,6	27,1	193,1
400 KXA5226	18,8	157,3	22,6	198,1	30,7	220,7	38,1	220,3	27,6	199,1
600 Mikado	16,6	125,1	18,3	166,4	22,2	192,4	25,5	204,5	20,6	172,1
Mittel	18,5	144,3	21,5	181,5	28,3	206,5	34,7	207,5	25,7	185
2006 (3 Orte)										
250 Gavott	20,2	137,9	28,9	193	36,6	225	41,8	209,9	31,9	191,4
250 KXA6231	16,5	120,2	25,7	174	32,5	192,1	37,7	184,4	28,1	167,7
250 KXA6231br	17,9	117,6	27,2	163,3	36,2	169,6	40,4	163,2	30,4	153,4
400 KXA5243	15,8	136	23,6	211	30,1	238	37,4	233,3	26,7	204,6
600 Mikado	14,4	137,4	20,4	207,4	24,7	243,8	29	240,7	22,1	207,3
Mittel	16,9	129,8	25,2	189,8	32	213,7	37,3	206,3	27,9	184,9
Versuchsmittel										
	22,3	167,3	27,5	201	31,9	210,1	36,6	207,2	29,5	196,4

[†] TS-Ertrag

GD 5%	Erntetermin			Sorte		E x S	
	TS	TS-G	TS	TS-G	TS	TS-G	
2003	50,8	6,6	36,4	2,9	21,5	3,7	
2004	26,1	6,3	49,8	3,8	18,6	3,1	
2005	14,5	2,8	14,5	2,3	11,4	1,9	
2006	25,2	3,9	12,7	1,8	13,1	1,7	

Tab. 9.12: TS- und Methanertrag (MHE) sowie Methanausbeute von Mais in Abhängigkeit vom Erntetermin (2003-2006)

Erntetermin	TS-Ertrag dt ha ⁻¹	MA NI (kg OTS) ⁻¹	MHE m ³ ha ⁻¹
Freising, Saat April 2003			
I	211,7b	324,5a	6526,6n.b.
II	233,0a	338,5n.b.	7493,9n.b.
IV	227,5a	325,9a	7045,3n.b.
Mittel	219,9	329,9	7021,9
Freising, Saat Mai 2003			
I	160,8b	327,4a	5000,4b
II	190,6a	332,3n.g.	6016,7n.b.
IV	193,0a	325,4a	5966,4a
Mittel	181,5	328,3	5661,2
Ingolstadt 2004			
I	176,1a	328,5b	5445,8b
II	204,4a	346,8a	6743,6a
III	191,0a	331,7b	5815,0ab
IV	183,5a	331,0b	5636,8b
Mittel	188,7	334,5	5910,3
Ismaning 2004			
I	113,4n.g.	317,2e	3414,6n.b.
II	126,3n.g.	327,6d	3933,0n.b.
III	175,8n.g.	339,9c	5681,0n.b.
IV	164,9n.g.	340,1a	5337,8n.b.
V	158,9n.g.	335,5b	5071,4n.b.
Mittel	147,8	332,0	4687,6
Grucking 2006			
I	134,9c	330,9bc	4241,5b
II	209,3b	341,9a	6796,4a
III	225,4a	326,8b	6999,1a
IV	221,4a	334,6c	7037,5a
Mittel	170,2	333,6	6268,6
Mittelwert über die Orte			
I	159,4	325,7	4925,8
II	192,7	337,4	6196,7
III	202,5	329,9	6301,4
IV	189,9	335,2	6004,0
V	158,9	335,5	5071,4
Mittel	181,6	331,7	5909,9

n.b. nicht bestimmt, unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede bei $P < 0,05$.

Tab. 9.13: Einfluss der Düngerart und –intensität auf den TS-Ertrag
(Freising, Grucking 2005-2006)

Düngestufen	Freising		Grucking	
	2005	2006	2005	2006
TS dt ha ⁻¹				
ohne Düngung				
0 [†]	210,3 c	190,3 c	243,4 bc	206,6 d
mineralische Düngung				
I	239,0 b	233,7 ab	231,5 c	228,8 bc
II	249,2 ab	239,0 ab	250,1 b	224,4 b
III	249,6 ab	238,9 ab	248,8 bc	244,1 a
Mittel	245,9	237,2	243,5	232,4
organische Düngung (Gärrest)				
I	237,2 b	219,5 b	256,9 ab	215,4 cd
II	251,8 a	229,3 ab	244,2 bc	233,1 ab
III	257,1 a	253,4 a	271,3 a	218,9 cd
Mittel	248,7	234,1	257,5	222,4
Mittel	242,0	229,2	249,5	224,5

[†]Stufe 0: Vergleichsparzelle 30 kg N ha⁻¹, Stufe I: 90 kg N ha⁻¹, Stufe II: 150 kg N ha⁻¹, Stufe III: 210 kg N ha⁻¹, unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede bei P < 0,05.

Tab. 9.14: TS-Erträge (dt ha⁻¹) in Abhängigkeit von Genotyp, Düngerart und -intensität (Freising, Grucking, 2005-2006)

Sorten	ohne	mineralische Düngung			organische Düngung			Mittel
		Düngestufen [†]						
	0	I	II	III	I	II	III	
2005								
Freising								
Gavott	212,4bc	243,4ab	249,7ab	244,3ab	240,3ab	256,6a	257,9a	243,5a
Kursus	208,1c	234,6b	248,7ab	254,8a	234,1b	247,0ab	256,3a	240,5a
Mittel	210,3	239,0	249,2	249,6	237,2	251,8	257,1	242,0
Grucking								
Gavott	232,7bc	234,3bc	245,3b	233,0bc	241,4bc	236,8bc	253,6b	239,6b
Kursus	254,1b	228,8bc	254,9b	264,5b	272,4ab	251,6bc	288,9a	259,3a
Mittel	243,4	231,5	250,1	248,8	256,9	244,2	271,3	249,5
2006								
Freising								
Gavott	178,3c	227,5b	237,8b	220,7b	204,7c	201,0c	233,1b	214,7b
Kursus	202,3c	239,8b	240,2b	257,2ab	234,3b	257,6ab	273,7a	243,6a
Mittel	190,3	233,7	239,0	238,9	219,5	229,3	253,4	229,2
Grucking								
Gavott	188,3c	216,9b	206,0bc	231,1b	196,7c	219,9b	202,9bc	208,8b
Kursus	224,9b	240,7ab	242,8ab	257,1a	234,1ab	246,2ab	234,8ab	240,1a
Mittel	206,6	228,8	224,4	244,1	215,4	233,1	218,9	224,5

[†]Stufe 0: Vergleichsparzelle 30 kg N ha⁻¹, Stufe I: 90 kg N ha⁻¹, Stufe II: 150 kg N ha⁻¹, Stufe III: 210 kg N ha⁻¹, unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede bei P < 0,05.

Tab. 9.15: Agronomische und Qualitätsmerkmale in Abhängigkeit von Bestandesdichte und Genotyp (Mittel über Orte)

2002																										
Pfl,m ²	Sorten	FAO	Agro, Merkmale						Qualitätsmerkmale																	
			TS	TS-G	Stärke	WLK	RP	ADF	NDF	ELOS	IVDOM	DINAG	DINIG	MA												
			dt ha ⁻¹	% FM	% TS						NI (kg OTS) ⁻¹															
6	Gavott	250	182,2	c	38,0	a	33,0	a	5,7	a	8,2	a	21,4	a	41,1	a	69,1	a	72,5	a	49,6	a	55,0	a	341,7	a
8	Gavott	250	212,7	b	39,1	a	35,2	a	4,8	b	7,9	b	21,3	a	40,5	a	69,6	a	73,1	a	49,4	a	55,1	a	346,3	a
10	Gavott	250	236,8	a	39,0	a	34,8	a	4,2	b	7,4	c	21,9	a	41,6	a	68,8	a	71,2	a	48,9	a	52,8	b	343,2	a
6	KX2181	270	211,3	b	39,7	a	34,8	a	4,9	a	7,2	a	21,8	a	40,3	a	70,0	a	73,4	a	50,3	a	55,9	a	340,6	a
8	KX2181	270	239,6	a	38,6	a	32,8	a	4,9	a	7,2	a	22,4	a	42,6	a	68,8	a	71,7	a	50,1	a	54,7	ab	337,3	a
10	KX2181	270	247,6	a	38,9	a	35,9	a	4,2	a	6,9	b	22,5	a	40,7	a	69,4	a	72,4	a	49,0	a	54,0	b	348,5	a
6	Hybride13	400	246,4	b	33,1	a	29,3	a	9,2	a	7,7	a	21,4	b	41,1	a	69,8	a	74,3	a	50,9	a	58,3	a	348,2	a
8	Hybride13	400	251,1	b	29,9	b	27,9	a	8,5	ab	7,4	b	23,5	a	43,0	a	67,6	a	71,8	b	49,0	b	55,6	b	338,8	a
10	Hybride13	400	274,5	a	30,2	b	31,7	a	6,8	b	7,5	ab	22,5	a	41,7	a	69,0	a	72,4	ab	49,6	a	55,0	b	335,8	a
6	Hybride14	400	220,2	b	33,4	a	29,7	b	6,1	a	7,9	a	23,1	a	43,8	a	67,4	a	71,3	a	49,4	a	55,5	a	336,4	a
8	Hybride14	400	254,7	a	34,4	a	33,4	a	5,3	ab	7,6	b	22,5	a	41,9	a	68,9	a	71,5	a	49,4	a	53,6	b	338,6	a
10	Hybride14	400	243,6	a	33,0	a	35,1	a	4,3	b	7,6	b	22,6	a	42,0	a	68,7	a	71,7	a	48,5	a	53,4	b	330,7	a
6	Hybride45	400	209,5	b	40,3	a	40,6	a	4,4	a	7,6	a	19,5	b	37,3	b	73,7	a	75,6	a	52,4	a	55,8	a	339,3	a
8	Hybride45	400	229,0	a	40,9	a	37,0	a	3,7	a	7,6	a	21,2	a	41,0	a	70,8	b	72,5	b	50,0	b	53,9	b	341,7	a
10	Hybride45	400	240,4	a	41,2	a	36,5	b	3,6	a	7,2	b	21,9	a	42,1	a	70,1	b	72,7	b	50,0	b	54,4	ab	338,6	a
6	KX1393	400	218,1	b	33,1	a	33,5	a	6,1	a	7,7	a	22,3	b	41,8	a	69,5	a	72,6	a	49,6	a	54,6	a	320,7	a
8	KX1393	400	248,0	a	34,3	a	34,4	a	5,1	b	7,5	a	23,0	a	41,8	a	68,9	a	71,9	a	48,6	a	53,6	a	324,6	a
10	KX1393	400	259,5	a	33,8	a	33,1	a	4,2	b	7,2	b	24,2	a	43,9	a	67,1	a	70,0	b	47,7	b	52,2	b	331,4	a
6	KX1391	400	208,7	b	37,0	a	35,9	a	4,9	a	7,4	a	22,1	b	40,7	b	70,3	a	74,0	a	49,9	a	56,1	a	339,3	a
8	KX1391	400	225,7	a	36,6	a	35,9	a	4,3	a	7,1	b	22,4	b	40,2	b	70,1	a	73,2	a	50,1	a	55,2	a	337,3	a
10	KX1391	400	234,5	a	36,4	a	32,4	a	4,4	a	7,0	b	24,3	a	44,2	a	67,2	b	71,1	b	48,3	a	54,5	b	338,5	a
6	Vic	400-450	212,2	c	37,0	a	34,6	a	4,5	a	7,5	a	23,5	a	42,5	a	68,4	a	71,5	a	48,2	a	53,3	a	330,3	a
8	Vic	400-450	242,8	b	36,5	a	35,9	a	4,5	a	7,6	a	22,4	a	41,8	a	69,5	a	72,1	a	49,0	a	53,3	a	336,8	a
10	Vic	400-450	249,0	a	36,0	a	33,8	a	4,3	a	7,4	a	24,0	a	43,2	a	67,5	a	70,7	a	47,5	a	52,7	a	330,1	a
6	KX1568	600	212,7	b	25,1	a	24,4	a	8,3	a	8,3	a	25,9	a	47,3	a	64,4	a	69,7	a	47,2	a	55,1	a	333,0	a
8	KX1568	600	245,0	a	26,5	a	24,5	a	7,7	a	8,2	a	26,2	a	48,3	a	63,9	a	69,2	a	46,7	a	54,6	a	327,0	a
10	KX1568	600	243,6	a	25,8	a	24,8	a	6,6	b	8,0	b	26,6	a	48,4	a	63,4	a	67,9	a	46,6	a	53,3	b	327,3	a
6	Mikado	600	233,8	b	26,9	a	23,3	a	9,2	a	7,9	a	25,6	a	47,6	a	64,6	a	71,3	a	47,7	a	57,6	a	338,2	a
8	Mikado	600	261,1	a	28,5	a	24,4	a	9,2	a	7,6	b	25,6	a	46,4	a	65,0	a	71,8	a	47,4	a	57,5	a	328,5	a
10	Mikado	600	269,9	a	28,0	a	23,5	a	7,9	b	7,6	b	26,7	a	49,0	a	63,5	a	69,3	b	46,7	a	55,3	b	320,0	a
6	Kismet	600	234,4	a	28,5	a	27,7	a	8,5	a	8,2	a	23,8	b	44,0	b	67,5	a	72,8	a	49,0	a	57,4	a	329,7	a

2002														
Pfl,m ²	Sorten	FAO	Agro, Merkmale						Qualitätsmerkmale					
			TS	TS-G	Stärke	WLK	RP	ADF	NDF	ELOS	IVDOM	DINAG	DINIG	MA
			dt ha ⁻¹	% FM				% TS			NI (kg OTS) ⁻¹			
8	Kismet	600	241,1 a	27,7 a	26,3 a	8,0 a	8,1 a	24,7 a	46,1 a	65,9 a	71,6 a	48,2 a	56,8 a	331,7 a
10	Kismet	600	248,2 a	27,7 a	24,5 a	7,2 b	7,9 b	25,8 a	47,6 a	64,5 b	69,4 b	48,0 a	55,3 b	313,2 b
6	Doge	700	218,9 b	24,7 a	20,9 a	8,1 a	7,9 b	28,5 a	49,8 a	61,7 a	70,2 a	46,1 a	58,0 a	327,6 a
8	Doge	700	236,1 a	25,0 a	20,6 a	8,5 a	7,7 b	28,4 a	49,7 a	61,5 a	69,7 a	45,8 a	57,4 a	323,0 a
10	Doge	700	248,6 a	24,2 a	18,4 a	8,9 a	8,2 a	29,0 a	50,8 a	60,5 a	69,6 a	45,7 a	58,3 a	317,8 a
Mittel Bestandesdichte														
6			217,4 b	33,1 a	30,6 a	6,7 a	7,8 a	23,2 a	43,1 b	68,0 a	72,4 a	49,2 a	56,1 a	335,4 a
8			240,6 a	33,2 a	30,7 a	6,2 b	7,6 a	23,6 a	43,6 ab	67,5 ab	71,7 a	48,6 a	55,1 b	334,3 a
10			249,7 a	32,9 a	30,4 a	5,6 c	7,5 a	24,3 a	44,6 a	66,6 b	70,7 a	48,0 a	54,3 c	331,3 a

unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede bei $P < 0,05$.

Tab. 9.16: Agronomische und Qualitätsmerkmale in Abhängigkeit von Bestandesdichte und Genotyp (Mittel über Orte)

2003														
Pfl,m ²	Sorten	FAO	Agro, Merkmale					Qualitätsmerkmale						
			TS	TS-G	Stärke	WLK	RP	ADF	NDF	ELOS	IVDOM	DINAG	DINIG	MA
			dt ha ⁻¹	%FM				% TS						NI (kg OTS) ⁻¹
6	Gavott	250	186,0 a	47,8 a	31,6 a	5,1 a	7,9 a	19,9 a	43,0 a	69,9 a	72,1 a	52,4 a	55,9 a	
8	Gavott	250	206,2 a	49,1 a	33,5 a	5,1 a	7,4 ab	19,5 a	41,7 a	70,9 a	74,1 a	52,6 a	57,9 a	343,5
10	Gavott	250	203,8 a	49,7 a	33,5 a	4,7 a	7,3 b	19,5 a	42,2 a	70,7 a	72,9 a	52,6 a	56,3 a	
6	KX3191	280	219,1 a	44,4 b	29,2 a	7,3 a	7,0 a	20,4 a	43,4 a	69,9 a	74,0 a	52,8 a	59,3 a	
8	KX3191	280	230,0 a	45,8 a	28,9 a	7,0 a	6,8 a	21,0 a	43,6 a	69,3 a	73,7 a	52,1 a	59,3 a	349,5
10	KX3191	280	237,9 a	48,4 a	32,7 a	5,3 b	6,9 a	20,2 a	44,1 a	70,1 a	73,8 a	51,6 a	57,9 a	
6	Hybride13	400	212,1 a	44,4 a	30,7 a	8,1 a	7,2 a	20,0 b	41,8 b	70,7 a	75,6 a	52,2 ab	60,3 a	
8	Hybride13	400	232,2 a	42,9 a	33,7 a	7,7 a	7,1 a	19,0 b	40,1 b	72,3 a	76,3 a	53,4 a	59,7 a	347,5
10	Hybride13	400	208,7 a	45,2 a	29,6 a	5,9 b	6,8 a	22,3 a	46,4 a	67,7 b	72,4 b	50,0 b	57,4 a	
6	Hybride12	400	214,8 b	45,6 a	28,6 a	7,7 a	7,4 a	21,0 a	43,9 a	68,8 a	73,5 a	51,2 ab	58,6 a	
8	Hybride12	400	231,1 a	43,7 a	31,6 a	7,4 a	7,1 a	19,7 a	41,4 a	71,1 a	74,4 a	52,7 a	58,2 a	354,5
10	Hybride12	400	243,0 a	43,5 a	30,8 a	7,8 a	6,5 b	21,7 a	43,7 a	68,8 a	73,2 a	50,1 b	57,1 a	
6	Hybride15	400	183,4 b	46,9 a	30,4 a	5,9 a	6,9 a	22,3 a	44,8 a	68,3 a	72,5 a	50,3 a	56,9 a	
8	Hybride15	400	194,9 a	48,7 a	34,4 a	4,9 a	7,0 a	21,0 a	42,3 a	70,2 a	74,0 a	51,1 a	57,2 a	355,0
10	Hybride15	400	211,1 a	47,8 a	33,3 a	4,4 a	6,7 a	21,7 a	43,8 a	69,5 a	73,3 a	51,1 a	57,3 a	
6	Hybride 16	400	204,4 b	45,4 a	30,2 a	6,7 a	7,3 a	22,1 a	45,2 a	67,9 a	73,0 a	49,1 a	57,3 a	
8	Hybride 16	400	233,2 a	43,0 a	32,4 a	6,2 a	7,1 a	21,2 a	42,9 a	69,8 a	73,9 a	50,7 a	57,5 a	363,0
10	Hybride 16	400	233,3 a	44,6 a	32,8 a	4,8 a	6,9 a	21,8 a	44,6 a	68,5 a	71,8 a	49,6 a	54,8 a	
6	Vic	400	205,2 a	50,2 a	34,1 a	4,4 a	7,2 a	20,9 a	43,4 a	69,8 a	71,7 a	50,9 a	54,2 a	
8	Vic	400	203,5 a	52,5 a	33,3 a	3,7 a	6,8 a	22,1 a	46,1 a	67,7 a	70,2 a	48,7 a	53,0 ab	341,5
10	Vic	400	207,9 a	53,0 a	34,4 a	1,6 b	6,8 a	22,4 a	46,5 a	67,4 a	67,4 b	49,6 a	50,1 b	
6	KX 1393	400	218,4 b	47,1 a	32,1 a	6,3 a	6,9 a	21,2 a	41,9 a	69,1 a	72,7 a	49,9 a	55,7 a	
8	KX 1393	400	235,9 a	48,2 a	34,5 a	5,7 a	6,5 a	21,6 a	41,7 a	69,3 a	73,3 a	48,8 a	55,5 a	339,0
10	KX 1393	400	250,9 a	46,9 a	34,6 a	4,0 b	6,4 a	22,2 a	43,5 a	68,2 a	70,7 a	48,3 a	52,3 b	
6	Mikado	600	255,0 a	38,2 a	27,6 a	9,3 b	6,9 a	22,3 a	43,4 a	67,8 a	74,1 a	49,1 a	58,9 a	
8	Mikado	600	231,7 b	34,5 b	21,4 b	12,2 a	6,9 a	22,9 a	45,9 a	65,2 a	72,1 a	47,7 a	58,0 a	350,5
10	Mikado	600	259,2 a	36,5 a	22,1 b	11,9 a	7,1 a	22,4 a	45,7 a	66,0 a	72,6 a	48,6 a	58,5 a	
6	Hybride 59	600	241,6 a	35,3 a	27,0 a	10,4 a	7,6 a	21,4 a	42,9 a	69,1 a	75,6 a	50,6 a	61,0 a	

2003														
Pfl,m ²	Sorten	FAO	Agro, Merkmale						Qualitätsmerkmale					
			TS	TS-G	Stärke	WLK	RP	ADF	NDF	ELOS	IVDOM	DINAG	DINIG	MA
			dt ha ⁻¹	%FM						% TS				NI (kg OTS) ⁻¹
8	Hybride 59	600	244,2 a	33,0 a	25,6 a	11,0 a	7,8 a	21,7 a	43,6 a	68,2 a	75,3 a	49,8 a	61,1 a	352,5
10	Hybride 59	600	237,9 a	33,1 a	26,5 a	12,2 a	7,8 a	22,4 a	46,2 a	65,8 a	72,5 a	48,9 a	58,7 a	
6	Hybride 89	800	227,1 a	34,0 a	23,9 a	10,0 a	7,1 a	22,5 a	43,4 a	67,5 a	71,9 a	51,0 a	57,5 a	
8	Hybride 89	800	209,3 b	33,9 a	22,9 a	10,8 a	6,9 a	23,2 a	45,2 a	66,1 a	72,2 a	49,0 ab	58,0 a	350,5
10	Hybride 89	800	240,2 a	33,9 a	20,4 a	11,0 a	6,7 a	24,3 a	47,1 a	64,3 a	70,3 a	48,1 b	56,7 a	
6	Hybride 90	800	219,5 a	33,3 a	23,8 a	11,3 a	7,0 a	22,8 b	43,2 b	67,4 a	73,1 a	49,8 a	58,6 a	
8	Hybride 90	800	208,5 a	31,4 a	21,3 a	11,7 a	6,8 a	24,2 a	44,7 a	65,2 a	72,6 a	48,2 a	59,1 a	345,0
10	Hybride 90	800	205,9 a	32,6 a	16,4 b	12,9 a	6,3 b	26,0 a	48,7 a	61,3 b	69,7 b	45,4 b	57,2 a	
Mittel Bestandesdichte														
6			215,6 b	42,7 a	29,1 a	7,7 a	7,2 a	21,4 b	43,4 b	68,9 a	73,3 a	50,8 a	57,8 a	
8			221,7 ab	42,2 a	29,5 a	7,8 a	7,0 ab	21,4 b	43,3 b	68,8 a	73,5 a	50,4 a	57,9 a	349,3
10			228,3 a	42,9 a	28,9 a	7,2 a	6,9 b	22,2 a	45,2 a	67,4 b	71,7 b	49,5 b	56,2 b	

unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede bei $P < 0,05$.

Tab. 9.17: Agronomische und Qualitätsmerkmale in Abhängigkeit von Bestandesdichte und Genotyp (Mittel über Orte)

2004													
Pfl.,m ²	Sorten	FAO	Agro, Merkmale		Qualitätsmerkmale								
			TS dt ha ⁻¹	TS-G % FM	Stärke	WLK	RP	ADF	NDF	ELOS	IVDOM	DINAG	DINIG
6	Gavott	250	165,9 c	39,2 a	34,6 a	5,6 a	8,4 a	19,3 a	37,4 a	72,0 a	75,4 a	53,3 a	59,0 a
8	Gavott	250	192,2 b	39,4 a	37,8 a	3,8 a	7,9 b	18,8 b	35,5 b	73,4 a	74,7 a	54,4 a	56,7 a
10	Gavott	250	197,4 b	38,5 a	35,0 a	4,8 a	7,5 b	19,8 a	37,4 a	71,6 ab	73,9 a	52,7 a	56,5 a
12	Gavott	250	214,0 a	38,9 a	34,9 a	4,2 a	7,6 b	20,3 a	37,0 a	71,3 b	72,5 b	52,9 a	54,8 b
14	Gavott	250	221,1 a	39,9 a	38,4 a	3,7 a	7,4 c	19,7 a	35,5 b	72,5 a	74,0 a	52,6 a	55,1 b
6	KX2386	400	191,3 c	32,9 a	36,4 a	6,9 a	7,7 a	19,6 b	35,3 b	73,2 a	77,0 a	52,9 a	59,5 a
8	KX2386	400	210,8 b	34,1 a	36,4 a	5,8 a	7,3 a	20,4 b	35,5 b	72,6 a	75,2 a	52,8 a	57,1 a
10	KX2386	400	217,9 a	33,4 a	33,7 a	5,8 a	7,0 b	22,9 a	38,4 a	69,3 b	73,2 b	49,3 b	55,6 b
12	KX2386	400	234,2 a	34,2 a	33,4 a	6,1 a	7,1 b	21,5 a	37,8 a	70,7 b	73,6 b	51,5 a	56,2 b
14	KX2386	400	223,1 a	34,1 a	33,4 a	6,4 a	6,8 b	22,4 a	38,5 a	69,2 b	73,5 b	49,0 b	56,0 b
6	KXA4566	600	182,7 b	27,3 a	21,0 a	10,3 a	8,1 a	25,1 b	45,1 b	64,7 a	71,9 a	48,5 a	59,0 a
8	KXA4566	600	207,6 a	27,4 a	23,1 a	8,7 a	7,7 ab	26,1 b	45,3 b	64,1 a	70,6 a	47,4 a	56,9 a
10	KXA4566	600	202,8 a	25,9 ab	16,1 b	10,7 a	7,8 ab	26,9 a	48,1 a	61,5 b	68,4 b	47,4 a	56,8 a
12	KXA4566	600	216,9 a	25,6 b	16,9 b	9,5 a	7,7 ab	28,0 a	49,0 a	60,3 b	67,1 b	46,0 b	55,3 b
14	KXA4566	600	202,5 a	25,5 b	16,0 b	10,4 a	7,4 b	28,1 a	48,5 a	60,4 b	67,9 b	46,2 b	56,4 a
6	Mikado	600	216,8 a	28,1 a	22,7 a	10,6 a	7,3 a	24,8 b	44,0 a	65,0 a	73,5 a	47,6 a	60,3 a
8	Mikado	600	227,2 a	27,9 a	22,6 a	10,0 a	7,6 a	24,5 b	43,7 a	65,8 a	71,9 b	49,3 a	58,3 a
10	Mikado	600	221,5 a	27,5 a	20,2 a	10,6 a	7,0 b	26,7 a	45,6 a	62,9 b	71,2 b	46,4 b	58,4 a
12	Mikado	600	225,7 a	26,1 b	21,3 a	9,4 a	7,4 a	26,4 a	45,5 a	63,4 b	70,9 b	47,2 a	58,0 a
14	Mikado	600	230,3 a	27,3 a	18,9 a	11,3 a	6,8 b	26,2 a	45,9 a	63,0 b	70,9 b	46,9 b	58,3 a
Mittel Bestandesdichte													
6			189,2 b	31,9 a	28,7 ab	8,4 a	7,9 a	22,2 b	40,5 b	68,7 a	74,5 a	50,6 a	59,5 a
8			209,5 a	32,2 a	30,0 a	7,1 a	7,6 ab	22,5 b	40,0 b	69,0 a	73,1 a	51,0 a	57,3 ab
10			209,9 a	31,3 a	26,3 c	8,0 a	7,3 b	24,1 a	42,4 a	66,3 b	71,7 b	49,0 a	56,8 b
12			222,7 a	31,2 a	26,6 bc	7,3 a	7,5 ab	24,1 a	42,3 a	66,4 b	71,0 b	49,4 a	56,1 b
14			219,3 a	31,7 a	26,7 bc	8,0 a	7,1 b	24,1 a	42,1 a	66,3 b	71,6 b	48,7 a	56,5 b

unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede bei $P < 0,05$.

Tab. 9.18: Agronomische und Qualitätsmerkmale in Abhängigkeit von Bestandesdichte und Genotyp (Mittel über Orte)

2005													
Pfl.,m ²	Sorten	FAO	Agro, Merkmale		Qualitätsmerkmale								
			TS	TS-G	Stärke	WLK	RP	ADF	NDF	ELOS	IVDOM	DINAG	DINIG
			dt ha ⁻¹	%FM									
6	Gavott	250	176,8 b	38,3 a	29,2 b	6,9 a	7,9 a	21,1 a	40,1 a	69,6 a	72,8 a	52,6 a	57,5 a
8	Gavott	250	189,0 b	38,1 a	29,8 ab	5,5 b	7,1 b	23,4 a	41,6 a	67,1 a	70,8 ab	49,5 b	55,1 b
10	Gavott	250	209,0 a	38,2 a	32,3 a	4,7 b	7,4 b	22,4 a	41,0 a	68,3 a	70,7 ab	50,0 b	53,6 bc
12	Gavott	250	210,0 a	38,9 a	34,1 a	4,2 c	6,9 c	22,5 a	39,8 a	68,8 a	70,7 ab	49,6 b	52,5 c
14	Gavott	250	218,3 a	38,9 a	33,6 a	4,2 c	6,9 c	22,8 a	40,1 a	68,5 a	70,4 b	49,6 b	52,6 c
6	KXA5226	280	202,1 b	34,3 a	29,7 a	6,4 a	6,9 a	22,5 b	41,3 b	68,9 a	73,3 a	51,4 a	58,2 a
8	KXA5227	280	223,6 a	35,4 a	29,4 a	5,6 a	7,1 a	23,3 b	42,3 a	68,0 a	72,5 a	50,8 a	57,7 a
10	KXA5228	280	221,0 a	35,2 a	32,6 a	5,0 b	6,6 b	23,3 b	41,2 b	68,3 a	72,1 a	49,4 a	55,5 b
12	KXA5229	280	227,1 a	33,7 a	30,6 a	4,4 b	6,7 ab	24,8 a	43,8 a	66,3 a	70,4 b	48,2 b	54,5 b
14	KXA5230	280	236,0 a	34,2 a	28,5 a	5,0 b	6,3 b	25,9 a	44,9 a	64,8 b	69,8 b	47,2 b	54,6 b
6	KXA5243	400	197,2 b	29,6 a	23,9 a	8,0 a	7,2 a	26,1 a	44,5 b	64,6 a	71,2 a	48,1 a	57,6 a
8	KXA5243	400	222,2 a	29,6 a	23,7 a	7,2 b	7,3 a	26,4 a	45,8 a	63,7 a	70,2 a	47,6 a	56,9 a
10	KXA5243	400	223,2 a	30,3 a	22,9 a	7,2 b	6,8 b	27,2 a	47,0 a	62,8 a	69,0 a	46,9 a	55,7 b
12	KXA5243	400	219,6 a	28,3 b	20,8 a	7,9 a	6,7 b	28,1 a	48,3 a	61,3 ab	67,9 b	45,9 a	55,0 b
14	KXA5243	400	226,9 a	28,6 ab	19,6 a	8,5 a	6,7 b	28,4 a	48,1 a	61,0 b	67,8 b	45,9 a	55,2 b
6	Mikado	600	199,3 b	24,9 a	15,1 a	12,7 a	7,3 a	27,2 a	46,9 a	62,7 a	71,6 a	48,4 a	60,7 a
8	Mikado	600	206,0 a	24,4 a	16,5 a	12,6 a	7,7 a	25,7 a	45,9 a	64,3 a	72,6 a	49,7 a	61,4 a
10	Mikado	600	209,6 a	23,5 a	13,7 a	12,4 a	7,1 b	28,0 a	48,8 a	61,3 a	70,4 a	47,6 a	60,0 b
12	Mikado	600	215,9 a	23,9 a	14,8 a	11,8 a	7,2 b	27,9 a	49,0 a	61,1 a	70,4 a	47,1 b	59,8 b
14	Mikado	600	219,5 a	23,9 a	14,2 a	12,0 a	7,0 b	28,1 a	49,0 a	61,2 a	70,4 a	47,5 ab	59,9 b
Mittel Bestandesdichte													
6			193,9 d	31,8 a	24,5 a	8,5 a	7,3 a	24,2 c	43,2 c	66,5 a	72,2 a	50,1 a	58,5 a
8			210,2 c	31,9 a	24,9 a	7,7 ab	7,3 a	24,7 c	43,9 b	65,8 ab	71,5 a	49,4 a	57,8 ab
10			215,7 bc	31,8 a	25,4 a	7,3 b	7,0 ab	25,2 bc	44,5 b	65,2 bc	70,6 b	48,5 ab	56,2 b
12			218,2 b	31,2 a	25,1 a	7,1 b	6,9 ab	25,8 ab	45,2 a	64,4 c	69,9 bc	47,7 b	55,5 b
14			225,2 a	31,4 a	24,0 a	7,4 b	6,7 b	26,3 a	45,5 a	63,9 c	69,6 c	47,6 b	55,6 b

unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede bei $P < 0,05$.

Tab. 9.19: TS-Gehalt und Kolbenanteil der Sorten für die Herstellung der Mischungen

Sorte	FAO	TS-G [†]	TS-R % FM	TS-K	KA ^{††} % TS [¶]
Gavott	250	40,4	33,4	60,1	56,9
KXA 4171	280	37,1	32,3	56,4	47,3
Mikado	600	27,6	23,2	45,9	45,2

[†]TS –G: Ganzpflanze, -R: Restpflanze, K: Kolben,

^{††} KA = Kolbenanteil

Tab. 9.20: Qualitätsparameter der künstlich hergestellten Mischungen mit Kolbenanteilen von 0-100 % von drei verschiedenen Genotypen

Sorte	KA	MA	Qualitätsparameter der Ganzpflanze						Qualitätsparameter der Restpflanze						
			IVDOM	ELOS	Stärke	WLK	RP	ADF	NDF	IVDOM-R	DNDF-R	WLK-R	NDF-R		
% der NI·(kg OTS) ⁻¹		% TS		% TS		% TS		% TS		% TS		% TS			
TS	1 [⊗]														
Gavott	0 ^{††}	302	-	-	-	-	-	-	-	-	-	62,8	50,6	7,1	69,3
	20	322	59,4	53,5	10,2	2,7	7,3	33,2	65,5						
	40	335	67,9	63,9	25,9	2,9	7,9	24,4	51,9						
	60	346	75,9	71,4	36,9	3,0	8,2	18,9	40,8						
	80	348	82,4	79,9	49,0	2,9	8,5	12,7	29,9						
	100	368	86,9	91,1	65,1	2,9	9,2	6,7	17,9						
KXA 4171	0	293	-	-	-	-	-	-	-	-	64,3	54,3	6,3	70,2	
	20	311	60,9	55,4	12,8	3,3	5,9	32,7	63,4						
	40	335	68,8	64,7	25,7	3,2	6,9	25,1	52,3						
	60	341	75,6	72,3	37,2	3,3	7,3	19,0	40,9						
	80	347	82,2	80,3	48,9	3,6	7,9	13,1	30,7						
	100	363	86,1	90,6	63,3	3,4	8,7	8,1	19,7						
Mikado	0	307	-	-	-	-	-	-	-	-	71,1	60,0	7,5	64,2	
	20	310	66,3	56,8	12,4	6,1	7,9	31,7	60,9						
	40	326	73,4	65,2	24,6	6,1	8,1	25,0	50,3						
	60	346	78,8	71,3	33,8	6,2	8,1	20,2	42,6						
	80	348	83,2	77,2	43,0	6,1	8,2	16,1	34,4						
	100	355	86,6	86,7	56,2	5,5	8,9	10,9	25,7						
GD 5% [†]		7	1,1	1,3	1,6	0,2	0,2	1,2	1,2	0,9	1,1	0,6	0,5		
Korr.Koeff mit MA			0,99**	0,99**	0,98**	-0,53	0,98**	-0,99**	-0,99**						

^{††}GD 5% Grenzdifferenz KA x Sorte bei P < 0,05, ^{†††}Kolbenanteil in Gew. %

Tab. 9.21: **Energiebilanz der Stromerzeugung aus Mais in Abhängigkeit der Düngeart- und intensität (Sorte Gavott, Mittelwert über Orte und Jahre)**

Kennzahl	ME	MD			OD			MW			
		0	I	II	I	II	III				
Energiebindung Biomasse	GJ ha ⁻¹	370,8	426,6	422,3	424,2	426,4	429,1	408,0	422,8	435,9	416,8
Energiebindung Saatgut	GJ ha ⁻¹	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Energiebindung OD	GJ ha ⁻¹	0,0	0,0	4,9	0,0	0,0	0,0	2,4	4,9	7,3	2,1
Ernteertrag	GE ha ⁻¹	84,8	99,3	99,9	97,1	99,8	101,1	94,5	99,3	105,9	97,5
Ernteertrag	dt TS ha ⁻¹	202,9	232,5	228,7	230,5	234,7	232,3	220,8	228,6	236,9	226,7
Stromertrag	kWhel ha ⁻¹	22.263	25.511	25.094	25.292	25.752	25.489	24.227	25.083	25.994	24.875
Energieeinsatz - <i>gesamt</i>	GJ ha ⁻¹	22,9	29,7	25,6	27,4	29,8	31,8	24,8	25,5	26,7	27,0
<i>Maisproduktion</i>	GJ ha ⁻¹	8,2	12,8	9,0	10,6	12,8	14,9	8,7	8,9	9,5	10,5
Saatgut, Bereitstellung	GJ ha ⁻¹	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Mineraldünger	GJ ha ⁻¹	1,5	5,8	1,5	3,7	5,8	7,9	1,5	1,5	1,5	3,3
Pflanzenschutzmittel	GJ ha ⁻¹	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Investitionsgüter (Maschinen u. Geräte)	GJ ha ⁻¹	1,3	1,4	1,6	1,4	1,4	1,4	1,5	1,6	1,7	1,5
Diesellostoff	GJ ha ⁻¹	3,5	3,8	4,1	3,8	3,8	3,8	3,9	4,0	4,4	3,9
<i>Bau & Betrieb</i>	GJ ha ⁻¹	14,7	16,9	16,6	16,8	17,1	16,9	16,0	16,6	17,2	16,5
Stromerzeugung - Konversion	GJ ha ⁻¹	80,1	91,8	90,3	91,0	92,7	91,8	87,2	90,3	93,6	89,5
<i>Maisproduktion</i>	GJ ha ⁻¹	361,9	413,1	412,5	412,9	412,9	413,5	398,6	413,2	425,7	405,5
Energieoutput	GJ ha ⁻¹	96,2	128,5	90,3	109,6	128,0	147,2	92,2	89,3	89,4	107,7
Energieintensität	MJ GE ⁻¹	44,4	32,4	45,8	38,8	32,3	27,8	45,8	46,6	44,9	38,6
Output/Input-Verhältnis											
Stromproduktion											
Energieoutput	GJ ha ⁻¹	57,2	62,2	64,7	63,7	62,9	60,0	62,5	64,8	66,9	62,6
Energieintensität	MJ kWhel ⁻¹	1,0	1,2	1,0	1,1	1,2	1,2	1,0	1,0	1,0	1,1
Output/Input-Verhältnis		2,5	2,1	2,5	2,3	2,1	1,9	2,5	2,5	2,5	2,3

ME Einheit, MD Mineralische Düngung, OD organische Düngung mit Gärrest, MW Mittelwert, Stufe 0: Vergleichsparzelle 30 kg N ha⁻¹, Stufe I: 90 kg N ha⁻¹, Stufe II: 150 kg N ha⁻¹, Stufe III: 210 kg N ha⁻¹

Tab. 9.22: Energiebilanz der Stromerzeugung aus Mais in Abhängigkeit der Düngeart- und Intensität (Sorte *Kursus*, Mittelwert über Orte und Jahre)

Kennzahl	ME	MD			OD			MW			
		0	I	II	III	I	II		III		
Energiebindung Biomasse	GJ ha ⁻¹	409,1	453,4	465,4	428,5	457,3	474,3	440,5	470,8	484,9	434,5
Energiebindung Saatgut	GJ ha ⁻¹	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Energiebindung OD	GJ ha ⁻¹	0,0	0,0	4,9	0,0	0,0	0,0	2,4	4,9	7,3	2,1
Ernteertrag	GE ha ⁻¹	111,1	128,8	131,0	120,0	131,6	134,7	122,7	130,9	139,3	112,3
Ernteertrag	dt TS ha ⁻¹	222	247	246	236	247	258	244	251	264	246
Stromertrag	kWhel ha ⁻¹	24.403	27.102	26.981	25.895	27.069	28.353	26.740	27.497	28.913	26.981
Energieeinsatz - <i>gesamt</i>	GJ ha ⁻¹	24,8	31,1	27,3	28,1	31,1	34,0	26,9	27,5	28,9	28,6
<i>Maisproduktion</i>	GJ ha ⁻¹	8,7	13,1	9,4	10,9	13,1	15,3	9,2	9,3	9,7	10,7
Saatgut, Bereitstellung	GJ ha ⁻¹	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Mineraldünger	GJ ha ⁻¹	1,5	5,8	1,5	3,7	5,8	7,9	1,5	1,5	1,5	3,3
Pflanzenschutzmittel	GJ ha ⁻¹	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Investitionsgüter (Maschinen u. Geräte)	GJ ha ⁻¹	1,6	1,7	2,0	1,7	1,7	1,7	1,8	2,0	2,1	1,6
Dieselmotorkraftstoff	GJ ha ⁻¹	3,7	3,8	4,1	3,8	3,8	3,8	4,0	4,0	4,3	3,9
<i>Bau & Betrieb</i>	GJ ha ⁻¹	16,2	18,0	17,9	17,2	17,9	18,8	17,7	18,2	19,2	17,9
Stromerzeugung - Konversion	GJ ha ⁻¹	87,9	97,6	97,1	93,2	97,4	102,1	96,3	99,0	104,1	97,1
<i>Maisproduktion</i>	GJ ha ⁻¹	399,7	439,5	455,3	416,9	443,4	458,3	430,6	460,7	474,5	423,1
Energieoutput	GJ ha ⁻¹	78,2	101,8	71,7	91,1	99,7	113,3	74,6	71,0	69,8	95,2
Energieintensität	MJ GE ⁻¹	46,0	33,6	48,5	38,2	33,8	30,0	47,0	49,6	48,8	39,6
Output/Input-Verhältnis											
Stromproduktion	GJ ha ⁻¹	63,0	66,5	69,9	65,1	66,4	68,0	69,4	71,5	75,2	68,6
Energieoutput	GJ ha ⁻¹	1,0	1,1	1,0	1,1	1,1	1,2	1,0	1,0	1,0	1,1
Energieintensität	MJ kWhel ⁻¹	2,5	2,1	2,6	2,3	2,1	2,0	2,6	2,6	2,6	2,4
Output/Input-Verhältnis											

ME Einheit, MD Mineralische Düngung, OD organische Düngung mit Gärrest, MW Mittelwert, Stufe 0: Vergleichsparzelle 30 kg N ha⁻¹, Stufe I: 90 kg N ha⁻¹, Stufe II: 150 kg N ha⁻¹, Stufe III: 210 kg N ha⁻¹

Tab. 9.23: CO₂-Bilanz der Stromerzeugung aus Mais in Abhängigkeit der Düngeart- und Intensität (Sorte *Gavott*, Mittelwert über Orte und Jahre)

Kennzahl	ME	MD				OD					
		0	MD	OD	I	II	III	I	II	III	MW
Energiebindung	GJ ha ⁻¹	370,8	426,6	422,3	424,2	426,4	429,1	408,0	422,8	435,9	416,8
Ernteertrag	dt TS ha ⁻¹	202,9	232,5	228,7	230,5	234,7	232,3	220,8	228,6	236,9	226,7
Methanertrag	m ³ ha ⁻¹	6.360,9	7.288,9	7.169,7	7.226,2	7.357,8	7.282,6	6.922,1	7.166,6	7.426,8	7.107,0
Stromertrag	kWhel ha ⁻¹	22.263,2	25.111,1	25.094,1	25.291,6	25.752,5	25.489,1	24.227,3	25.083,1	25.993,9	24.874,7
Einsatz fossiler Energie	GJ ha ⁻¹	8,2	12,8	13,9	10,6	12,8	14,9	11,1	13,7	16,7	12,6
N-Zufuhr (ohne NH ₃ -Verluste)	kg N ha ⁻¹	49,2	163,2	151,3	106,2	163,2	220,3	100,2	151,3	202,3	141,8
Δ C Humus	kg Hu-C ha ⁻¹	-1.177,4	-1.177,4	-817,8	-1.177,4	-1.177,4	-1.177,4	-997,6	-817,8	-638,0	-1.023,3
CO ₂ -Emissionen Energieeinsatz	kg CO ₂ äq ha ⁻¹	558,1	827,8	613,2	704,8	827,6	950,9	594,1	602,2	643,2	697,3
Saatgut		66,0	66,0	66,0	66,0	66,0	66,0	66,0	66,0	66,0	66,0
Mineraldünger		91,3	336,6	91,3	214,0	336,2	459,6	91,3	91,3	91,3	196,4
Pflanzenschutzmittel		80,1	80,1	80,1	80,1	80,1	80,1	80,1	80,1	80,1	80,1
Investitionsgüter (Maschinen u. Geräte)		55,9	61,4	68,9	61,2	61,9	61,2	63,7	68,9	74,0	63,8
Dieselmotoren		264,8	283,7	306,9	283,5	283,5	284,0	293,0	296,0	331,8	290,9
N ₂ O-Emissionen	kg CO ₂ äq ha ⁻¹	285,6	948,1	878,7	616,7	947,8	1.279,8	582,2	878,7	1.175,3	823,7
C-Freisetzung Humusabbau	kg CO ₂ äq ha ⁻¹	4.321,1	4.321,1	3.001,3	4.321,1	4.321,1	4.321,1	3.661,2	3.001,3	2.341,5	3.755,5
CO ₂ -Emissionen Produktion	kg CO ₂ äq ha ⁻¹	5.164,8	6.096,9	4.493,2	5.642,6	6.096,5	6.551,7	4.837,5	4.482,3	4.159,9	5.276,5
CO ₂ -Emissionen Konversion	kg CO ₂ äq ha ⁻¹	2.181,8	2.500,1	2.459,2	2.478,6	2.523,7	2.497,9	2.374,3	2.458,1	2.547,4	2.437,7
CO ₂ -Emissionen Substitution	kg CO ₂ äq ha ⁻¹	13.959,0	15.995,4	15.734,0	15.857,8	16.146,8	15.981,7	15.190,5	15.727,1	16.298,1	15.596,4
CO ₂ -Bilanz	kg CO ₂ äq ha ⁻¹	-6.612,5	-7.398,4	-8.781,6	-7.736,7	-7.526,6	-6.932,0	-7.978,8	-8.786,7	-9.590,8	-7.882,2

ME Einheit, MD Mineralische Düngung, OD organische Düngung mit Gärrest, MW Mittelwert, Stufe 0: Vergleichsparzelle 30 kg N ha⁻¹, Stufe I: 90 kg N ha⁻¹, Stufe II: 150 kg N ha⁻¹, Stufe III: 210 kg N ha⁻¹

Tab. 9.24: CO₂-Bilanz der Stromerzeugung aus Mais in Abhängigkeit der Düngeart- und Intensität (Sorte *Kursus*, Mittelwert über Orte und Jahre)

Kennzahl	ME	0	MD			OD			MW		
			I	II	III	I	II	III			
Energiebindung	GJ ha ⁻¹	409,1	453,4	465,4	428,5	457,3	474,3	440,5	470,8	484,9	434,5
Ernteertrag	dt TS ha ⁻¹	222,4	247,0	252,6	236,0	246,7	258,4	243,7	250,6	263,5	245,9
Methanertrag	m ³ ha ⁻¹	6.972,2	7.743,5	7.919,0	7.398,6	7.734,0	8.100,8	7.640,0	7.856,3	8.260,7	7.709,0
Stromertrag	kWhel ha ⁻¹	24.402,8	27.102,1	27.716,5	25.895,1	27.069,2	28.352,9	26.740,0	27.497,1	28.912,5	26.981,4
Einsatz fossiler Energie	GJ ha ⁻¹	8,7	12,8	14,3	10,9	13,1	15,3	11,6	14,2	17,0	12,8
N-Zufuhr (ohne NH ₃ -Verluste)	kg N ha ⁻¹	49,2	163,2	151,3	106,2	163,2	220,3	100,2	151,3	202,3	141,8
Δ C Humus	kg Hu-C ha ⁻¹	-1.177,4	-1.177,4	-817,8	-1.177,4	-1.177,4	-1.177,4	-997,6	-817,8	-638,0	-1.023,3
CO ₂ -Emissionen Energieeinsatz	kg CO ₂ äq ha ⁻¹	587,5	843,2	629,5	718,1	843,3	968,0	616,3	622,7	649,7	706,2
Saatgut		66,0	66,0	66,0	66,0	66,0	66,0	66,0	66,0	66,0	66,0
Mineraldünger		91,3	336,6	91,3	214,0	336,2	459,6	91,3	91,3	91,3	196,4
Pflanzenschutzmittel		80,1	80,1	80,1	80,1	80,1	80,1	80,1	80,1	80,1	80,1
Investitionsgüter (Maschinen u. Geräte)		70,8	75,6	86,9	73,4	76,4	77,1	80,2	86,5	94,1	71,8
Dieselskraftstoff		279,4	284,8	305,3	284,6	284,6	285,3	298,8	298,8	318,2	291,9
N ₂ O-Emissionen	kg CO ₂ äq ha ⁻¹	285,6	948,1	878,7	616,7	947,8	1.279,8	582,2	878,7	1.175,3	823,7
C-Freisetzung Humusabbau	kg CO ₂ äq ha ⁻¹	4.321,1	4.321,1	3.001,3	4.321,1	4.321,1	4.321,1	3.661,2	3.001,3	2.341,5	3.755,5
CO ₂ -Emissionen Produktion	kg CO ₂ äq ha ⁻¹	5.194,2	6.112,3	4.509,6	5.655,9	6.112,2	6.568,9	4.859,7	4.502,7	4.166,4	5.285,4
CO ₂ -Emissionen Konversion	kg CO ₂ äq ha ⁻¹	2.391,5	2.656,0	2.716,2	2.537,7	2.652,8	2.778,6	2.620,5	2.694,7	2.833,4	2.644,2
CO ₂ -Emissionen Substitution	kg CO ₂ äq ha ⁻¹	15.300,6	16.993,0	17.378,3	16.236,2	16.972,4	17.777,3	16.766,0	17.240,7	18.128,2	16.917,3
CO ₂ -Bilanz	kg CO ₂ äq ha ⁻¹	-7.714,9	-8.224,7	-10.152,4	-8.042,6	-8.207,4	-8.429,8	-9.285,8	-10.043,2	-11.128,3	-8.987,8

ME Einheit, MD Mineralische Düngung, OD organische Düngung mit Gärrest, MW Mittelwert, Stufe 0: Vergleichsparzelle 30 kg N ha⁻¹, Stufe I: 90 kg N ha⁻¹, Stufe II: 150 kg N ha⁻¹, Stufe III: 210 kg N ha⁻¹

Tab. 9.25: Beschreibung der Verfahrensschritte für den Zwischenfruchtanbau von Senf, Weidelgras und Futterroggen zur Berechnung der Energie- und CO₂-Bilanzierung mit REPRO

Fruchtart	Verfahrensabschnitt	Datum	Geräte/Bedingungen
Senf	Bodenbearbeitung	23/08/04	Pflügen mit Aufsatteldrehpflug 7 Schare, 2,45 m, 120 kW
Senf	Bodenbearbeitung	25/08/04	Eggen mit Saatbettkombination, angebaut 4,0 m, 120 kW
Senf	Bestellung	25/08/04	Säen mit Sämaschine 6,0 m, 83 kW
Senf	Mineraldüngung	25/08/04	Mineraldünger ab Feld streuen, Schleuderstreuer, lose 1,5 m, Anbauschleuderstreuer, 67 kW
Senf	Hauptproduktiernte	03/05/05	Ohne eigenen Aufwand
Weidelgras	Bodenbearbeitung	23/08/04	Pflügen mit Aufsatteldrehpflug 7 Schare, 2,45 m, 120 kW
Weidelgras	Bodenbearbeitung	25/08/04	Eggen mit Saatbettkombination, angebaut 4,0 m, 120 kW
Weidelgras	Bestellung	25/08/04	Säen mit Sämaschine 6,0 m, 83 kW
Weidelgras	Mineraldüngung	25/08/04	Mineraldünger ab Feld streuen, Schleuderstreuer, lose 1,5 m, Anbauschleuderstreuer, 67 kW
Weidelgras	Mineraldüngung	10/03/05	Mineraldünger ab Feld streuen, Schleuderstreuer, lose 1,5 m, Anbauschleuderstreuer, 67 kW
Weidelgras	Hauptproduktiernte	02/05/05	Mähen mit Rotationsmäherwerk 4,5 m, Front, + Heckarbeit, 67 kW
Weidelgras	Hauptproduktiernte	03/05/05	Schwaden mit 4-Kreiselschwader 12,5 m, 83 kW
Weidelgras	Hauptproduktiernte	03/05/05	Anweilgut bergen - Felhdäcksler 250 kW Selbstfahrer Doppelzug je 10 (6) t, Dreiseitenkippanhänger, 67 kW Radlader
Futterroggen	Bodenbearbeitung	23/08/04	Pflügen mit Aufsatteldrehpflug 7 Schare, 2,45 m, 120 kW
Futterroggen	Bodenbearbeitung	25/08/04	Eggen mit Saatbettkombination, angebaut 4,0 m, 120 kW
Futterroggen	Bestellung	25/08/04	Säen mit Sämaschine 6,0 m, 83 kW
Futterroggen	Mineraldüngung	25/08/04	Mineraldünger ab Feld streuen, Schleuderstreuer, lose 1,5 m, Anbauschleuderstreuer, 67 kW
Futterroggen	Mineraldüngung	10/03/05	Mineraldünger ab Feld streuen, Schleuderstreuer, lose 1,5 m, Anbauschleuderstreuer, 67 kW
Futterroggen	Hauptproduktiernte	02/05/05	Mähen mit Rotationsmäherwerk 4,5 m, Front, + Heckarbeit, 67 kW
Futterroggen	Hauptproduktiernte	03/05/05	Schwaden mit 4-Kreiselschwader 12,5 m, 83 kW

Tab. 9.26: Berechnungsgrundlagen verschiedener Zwischenfrüchte für die Energie- und CO₂-Bilanzierung mit REPRO

Fruchtart	Verfahrensabschnitt	Datum	Düngerart	Menge	
				kg N ha ⁻¹	ges kg N ha ⁻¹
Senf	Mineraldüngung	25/08/04	KAS	20	20
Weidelgras	Mineraldüngung	25/08/04	KAS	20	
Weidelgras	Mineraldüngung	10/03/05	KAS	60	80
Futterroggen	Mineraldüngung	25/08/04	KAS	20	
Futterroggen	Mineraldüngung	10/03/05	KAS	40	60
KAS Kalkammonsalpeter					
Fruchtart	Verfahrensabschnitt	Datum	Verwendung	Ertrag	
				dt FM ha ⁻¹	dt TS ha ⁻¹
Senf	Hauptprodukternte	03/05/05	Gründüngung	100,0	15,0
Weidelgras	Hauptprodukternte	03/05/05	Anweilksilage	273,3	49,2
Futterroggen	Hauptprodukternte	03/05/05	Anweilksilage	383,3	69,0

Danksagung

Herrn Prof. Dr. K.-J. Hülshagen, Wissenschaftszentrum Weihenstephan, gilt mein herzlicher Dank für die unkomplizierte Übernahme der Arbeit, für wissenschaftliche Anregungen und die Unterstützung bei der Anfertigung dieser Arbeit.

Dr. Peter Doleschel und Dr. Joachim Eder, LfL Freising, danke ich ganz besonders, dass sie die besondere Arbeitsgestaltung für eine vierfache Mutter möglich gemacht und mir dadurch die Chance gegeben haben, zu promovieren.

Dr. Joachim Eder, LfL Freising, danke ich für die Möglichkeit der Bearbeitung des Themas sowie die fachliche Unterstützung bei der Durchführung der Arbeit.

Ein besonderer Dank gilt Dr. Christine Papst, Dr. Birte Darnhofer, Dr. Ewald Sticksel, LfL Freising und Harald Schmid sowie Dr. Franz Xaver Maidl, Wissenschaftszentrum Weihenstephan, für ihre fachlichen Diskussionen, das Korrekturlesen und ihre mentale Unterstützung. Sandra Anke danke ich für ihre kompetente Unterstützung beim Gestalten der Arbeit.

Herrn Dr. W. Schmidt, KWS SAAT AG Einbeck, danke ich für die Bereitstellung des genetischen Materials, die fachliche Beratung, die jederzeit möglich war und den Schnellkursus in Silomaiszüchtung. Auch sei ihm für seine züchterischen Visionen gedankt, die die Bearbeitung dieser Fragestellungen erst möglich gemacht und die Diskussion in Deutschland in Gang gesetzt haben.

Bei den Mitarbeitern des Instituts für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung 4a der LfL bedanke ich mich für die tatkräftige Hilfe bei der Ernte und Probenverarbeitung. Ohne die zahlreichen Aushilfen wäre die Kolbenernte und Vermahlung der Proben zur Qualitätsanalyse nicht so problemlos möglich gewesen - danke.

In Hohenheim danke ich Dr. Hans Oechner und Michael Mukengele für die Durchführung der Biogasanalysen.

Außerdem gilt mein Dank den Betreuern der Feldversuche in Ingolstadt, Wehnen und Bersenbrück und allen nicht namentlich genannten Mitarbeitern der Universität Hohenheim, der KWS und der LfL, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Und zu guter letzt danke ich natürlich meinem Mann und meinen Kindern, die diesen unglaublichen Kraftakt mittragen mussten und mitgetragen haben.

Lebenslauf

Name Barbara Eder geb. Klingler
Geboren 23. November 1967 Hall in Tirol Österreich
Familienstand verheiratet, 4 Kinder

Schulbildung

1974-86 Besuch der Volksschule, Naturwissenschaftliches Realgymnasium, Innsbruck
1986-89 Studium der Agrarwissenschaften an der Universität für Bodenkultur Wien
1989-93 Fortsetzung an der TU-München-Weihenstephan Schwerpunkt: Pflanzenproduktion, Bodenkunde, Landwirtschaft der Tropen und Subtropen, Abschluss 1993

Berufliche Tätigkeit

1987-88 12-monatiges Praktikum in zwei landwirtschaftlichen Gemischtbetrieben, Österreich.
1989-93 Wissenschaftliche Tätigkeiten während des Studiums an folgenden Instituten: Institut für Landtechnik; Landtechnischer Verein, Abteilung alternative und regenerative Energien; Institut für Bodenkunde; Institut für Pflanzenernährung; Universität für Bodenkultur, Institut für ländliche Regionalentwicklung, Wien.
1993-94 Praktikum bei der Deutschen Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit GmbH, Eschborn, Abteilung Internationale Agrarforschung
1994-97 Mitarbeiterin des Planungs- und Beratungsbüros „Naturgerechte Technologien, Bau- und Wirtschaftsberatung, TBW-GmbH Frankfurt“ verantwortlich für die Bereiche Public Relation, Umwelt- und Klimaschutz, fachliche Assistenz der Geschäftsführung.
seit 07.1997 selbständig, Beratung im landwirtschaftlichen und Umweltbereich,
seit 08.2003 wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft in Freising-Weihenstephan

Projekte und Referenzen

2006 Überarbeitung und Herausgabe des Buches "Biogaspraxis" (Ökobuchverlag, Staufeu i. Breisgau)
2004 Autorin Pflanzenölkraftstoffe (Ökobuchverlag, Staufeu i. Breisgau)
seit 2000 regelmäßig Durchführung von Biogasseminaren für Anfänger und Fortgeschrittene (BBV, Herrsching)
1999 Recherche und Analyse zum EU-Projekt "Environmental impact of 2078/92 measures in conservation of soil and water resources in the European Union (Institut für Ländliche Strukturforschung, Frankfurt)
Umweltwirkungen der Kofermentation mit Speiseabfällen (Krieg & Fischer Ingenieure, Göttingen)

-
- 1998 Betriebswirtschaftliche Analyse der Kooperationsformen kleinbäuerliche Betriebe in Aserbeidschan (Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit GmbH, Eschborn)
Machbarkeitsstudie: Organische Abfallverwertung in der Landwirtschaft im Landkreis Ravensburg (TBW GmbH, Frankfurt)
- 1997 Messeorganisation und -durchführung Agritechnika, Hannover (TBW GmbH)
Organisation und Durchführung der Partnerbetreuung/ GATE (Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit GmbH, Eschborn)
Konzeption und Organisation eines zwei Tagesseminar für Anaerobtechnologie in den Niederlanden (Landbowuniversität Wageningen, Niederlande)
- 1996 Organisation der Anaerob Konferenz 96' in Ho Chi Minh City, Vietnam,
Identifikation geeigneter Partner zur Mitarbeit im GTZ-Sektorvorhaben „Förderung der Anaerobtechnologie zur Behandlung kommunaler und industrieller Abwässer und Abfälle“ Thailand
Machbarkeitsstudie für die Einführung eines neuen Abfallkonzepts im Bezirkskrankenhaus Lohr am Main
- 1995 Evaluierung der Bevölkerungsbeteiligung (genderspezifisch) eines Wasserversorgungs- und Sanitärprojektes in Chitral, Water Supply and Sanitation Project Chitral/ Pakistan
Befragung von biologisch wirtschaftenden Landwirten über Bedarf und Notwendigkeit biologischer Saatgutbehandlungsmitteln, Hessen
- 1995-97 Backstopping eines Mitarbeiters des Umweltamtes Bogotá (Unidad de Política Ambiental UPA), Kolumbien, Bogotá
- 1994 Studie „Methan- und Lachgasemissionen aus Landwirtschaft, häuslichen und agroindustriellen Abwässern“
Evaluierung des Fertilizer Extension Projects in Kenia über Erfolg und Akzeptanz von On-Farm-Versuchen bei der Düngemittelberatung
Machbarkeitsstudie „Nachhaltige Kreislaufwirtschaft im ländlichen Raum und der Kommunen unter besonderer Berücksichtigung Niederösterreichs“
Implikationsanalyse der im Rahmen des Tropen Ökologischen Begleitprogrammes (TÖB) durchgeführten Forschungsarbeiten (Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit GmbH, Eschborn).

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft unter dem Förderkennzeichen 22 000 303 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin.