

Universität Hohenheim  
Institut für Agrartechnik  
Landesanstalt für Landwirtschaftliches Maschinen- und Bauwesen  
Prof. Dr. Thomas Jungbluth

**Untersuchungen zur Aufbereitung und Umwandlung  
von Energiepflanzen in Biogas und Bioethanol**

Dissertation  
zur Erlangung des Grades eines Doktors  
der Agrarwissenschaften

vorgelegt  
der Fakultät Agrarwissenschaften

von

**Dipl.-Ing., M.Sc. Britt Schumacher**  
aus Rostock

2008

Die vorliegende Arbeit wurde am 24.06.2008 von der Fakultät Agrarwissenschaften der Universität Hohenheim als „Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Agrarwissenschaften“ angenommen.

Tag der mündlichen Prüfung: 15.07.2008  
1. Prodekan: Prof. Dr. W. Bessei  
Berichterstatter, 1. Prüfer: Prof. Dr. T. Jungbluth  
Mitberichterstatter, 2. Prüfer: Prof. Dr. W. Claupein  
Weiterer Berichter, Prüfer: PD Dr. T. Senn

Die dieser Arbeit zugrunde liegenden Untersuchungen wurden im Auftrag der Landesstiftung Baden-Württemberg an der Universität Hohenheim im Rahmen des Forschungsprojekts „Optimierung der Bereitstellung von Biomasse für innovative energetische Nutzungsformen“ unter Beteiligung der Landesanstalt für Landwirtschaftliches Maschinen- und Bauwesen, des Instituts für Pflanzenbau und Grünland, Fachgebiet Allgemeiner Pflanzenbau sowie des Instituts für Lebensmittelwissenschaft und Biotechnologie, Fachgebiet Gärungstechnologie durchgeführt.

Bibliografische Information der *Deutschen Nationalbibliothek*

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

ISBN: 978-3-86664-492-2

**Zugl.: Hohenheim, Univ., Diss., 2008**

Dissertation, Universität Hohenheim

## **D 100**

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Warenbezeichnungen, usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

This document is protected by copyright law.

No part of this document may be reproduced in any form by any means without prior written authorization of the publisher.

Coverbild © Remy - Fotolia.com

alle Rechte vorbehalten | all rights reserved

© mensch und buch verlag 2008

Nordendstr. 75 - 13156 Berlin – 030-45494866

verlag@menschundbuch.de – www.menschundbuch.de

## Danksagung

Der vorliegenden Arbeit liegen Untersuchungen zugrunde, die ich als Wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Universität Hohenheim im Rahmen des Forschungsprojekts „Optimierung der Bereitstellung von Biomasse für innovative energetische Nutzungsformen“ durchführte.

Herrn Prof. Dr. Thomas Jungbluth danke ich für die Annahme als Doktorandin am Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim und für seine pragmatische Unterstützung meiner Arbeit. Bei Herrn Prof. Dr. Wilhelm Claupein bedanke ich mich für die Übernahme des Zweit-Gutachtens und wie auch bei Herrn Prof. Dr. Werner Bessei für die Mitwirkung bei der mündlichen Prüfung.

Mein besonderer Dank gilt Dr. Hans Oechsner, Leiter der Landesanstalt für Landwirtschaftliches Maschinen- und Bauwesen (Baden-Württemberg), für die fachliche Betreuung im Bereich Biogas, für seine wertvollen Anregungen und das Gewähren des Freiraums der eigenverantwortlichen Durchführung des Projekts.

Herrn PD Dr. Thomas Senn vom Institut für Lebensmittelwissenschaft und Biotechnologie, Fachgebiet Gärungstechnologie an der Universität Hohenheim danke ich sehr für die fachliche Betreuung der Bereiche Bioethanol und Ökobilanzierung sowie für seine Mitwirkung an der mündlichen Prüfung.

Natürlich möchte ich mich auch bei allen Mitarbeitern/innen der Landesanstalt und des Instituts für Agrartechnik, die zum Erfolg dieses Projekts beigetragen haben, bedanken. Thomas Clauss, Helmut Gehring, Oberingenieur Klaus Lutz, die Mitarbeiter der Messtechnik und der Werkstatt waren mir eine wertvolle Hilfe in allen Belangen der Technik und der Logistik für das Biogaslabor.

Annette Buschmann, Monika Tomalla sowie den Wissenschaftlichen Hilfskräften danke ich für die zuverlässige Bewältigung der sehr umfangreichen Laborarbeiten; Katharina Czepuck, Anna-Maria Engel, Milly-Kevin Tebusabwa und Vidur Ghimire sollen hier stellvertretend genannt sein.

Dr. Andreas Lemmer, Dr. Sigrid Kusch, Michael M. Mukengele, Daniel Preißler, Jochen Vogtherr, Simon Zielonka, Bettina Frauz und Mathieu Brulé gilt mein Dank für einen anregenden Gedankenaustausch und die gegenseitige Unterstützung der wissenschaftlichen Arbeit. Margarete Wolfer und Margit Andratschke danke ich für die engagierte Führung des Sekretariats.

Constanze Böhmle leistete durch die hervorragende Organisation des Bereichs Pflanzenbau, die Bereitstellung der Energiepflanzen für die Laboruntersuchungen, die Zuarbeit bei der Ökobilanzierung sowie durch die Koordination der Zusammenarbeit aller Beteiligten der Universität Hohenheim bzw. mit dem Auftraggeber einen außerordentlichen Beitrag zum Gelingen des Gesamtprojekts. Ebenso hatte Sven Fleischer durch seine Unterstützung bei der Biomasseaufbereitung mittels Steam Explosion, der Untersuchungen im Bioethanolabor sowie der Ökobilanzierung maßgeblichen Anteil am Erfolg des Projekts. Dafür danke ich beiden sehr.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Martin Kaltschmitt und Herrn Dr.-Ing. Frank Scholwin danke ich für ihre Flexibilität, die es mir erlaubte das Promotionsverfahren, nach dem Ablauf der Projektlaufzeit an der Universität Hohenheim und dem direkten Wechsel an das Institut für Energetik und Umwelt gemeinnützige GmbH in Leipzig (seit dem 17.06.2008 umfirmiert in Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH), innerhalb kurzer Zeit abzuschließen.

Mein herzlichster Dank gilt meiner Familie, meiner verstorbenen Mutter Ingrid Schumacher, meinem Vater Dietrich Schumacher und seiner Lebensgefährtin Erika Thurow sowie meiner Schwester Anne Brummer.

Uta und Eva Merkel übernahmen dankenswerterweise das anspruchsvolle Lektorat dieser Arbeit.

Leipzig im November 2008

Britt Schumacher



# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>III</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>X</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>XIII</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Problemstellung und Ziel der Arbeit</b> .....	<b>3</b>
<b>3 Stand des Wissens – Biogas- und Bioethanolgewinnung aus Energiepflanzen</b> .....	<b>4</b>
3.1 Aufbau von Pflanzen.....	4
3.2 Allgemeine Konversionsverfahren für nachwachsende Rohstoffe .....	6
3.3 Substrataufbereitungsverfahren für die Biogas- und Ethanolgewinnung ..	6
3.4 Biogaserzeugung.....	9
3.4.1 Rohstoffe .....	9
3.4.2 Grundlagen der Biogaserzeugung .....	10
3.4.3 Spezifische Biogaserträge ausgewählter Substrate.....	12
3.4.4 Abschätzung des Biogas- bzw. Methanertrags.....	15
3.5 Bioethanolerzeugung.....	17
3.5.1 Zucker- und stärkehaltige Rohstoffe .....	17
3.5.2 Lignozellulosehaltige Rohstoffe .....	19
3.5.3 Grundlagen der Ethanolerzeugung.....	20
3.5.4 Spezifische Ethanolausbeuten ausgewählter Substrate .....	21
3.5.5 Schlempe als Nebenprodukt.....	22
3.6 Energie- und Ökobilanzierung .....	26
3.7 Optimierungspotenziale der Aufbereitung und der Konversion von Energiepflanzen zu Biogas und Bioethanol .....	33
3.8 Folgerungen für die Arbeit .....	35
<b>4 Material und Methoden</b> .....	<b>36</b>
4.1 Methoden des Pflanzenbaus .....	36
4.2 Methoden der Biogasuntersuchungen .....	38
4.2.1 Aufbereitungsmethoden zur Biogasgewinnung .....	38
4.2.2 Verfahren zur Biogas-/Methanertragsbestimmung .....	41
4.2.3 Berechnung der Kenngrößen der Biogasuntersuchungen.....	47

4.3	Methoden der Bioethanolgewinnung .....	52
4.3.1	Bioethanoltest.....	52
4.3.2	Säurelösliche Kohlenhydrate .....	54
4.3.3	Schlempe.....	55
4.3.4	Berechnung der Kenngrößen der Ethanoluntersuchungen.....	56
4.4	Inhaltsstoffbestimmung .....	57
4.5	Statistische Methoden .....	58
4.6	Energie- und Ökobilanzierung .....	58
<b>5</b>	<b>Ergebnisse der eigenen Untersuchungen .....</b>	<b>65</b>
5.1	Biogasgewinnung .....	65
5.1.1	Ergebnisse der Substrataufbereitung für Biogas .....	65
5.1.2	Biogas-/Methanerträge von Energiepflanzen und deren Schlempen.....	90
5.1.3	Korrelation Inhaltsstoffe / gemessene Methanerträge .....	120
5.2	Bioethanolausbeuten .....	129
5.3	Energie- und Ökobilanzierung .....	136
<b>6</b>	<b>Diskussion und Folgerungen .....</b>	<b>143</b>
6.1	Biogasgewinnung .....	143
6.1.1	Aufbereitungsuntersuchungen für Biogas.....	143
6.1.2	Biogas-/Methanerträge von Energiepflanzen und deren Schlempen....	147
6.1.3	Korrelation Inhaltsstoffe / gemessene Methanerträge .....	149
6.2	Bioethanolgewinnung .....	152
6.3	Energie- und Ökobilanzierung .....	154
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>155</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>158</b>
<b>9</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>171</b>
9.1	Spezifische Methanerträge verschiedener Autoren .....	171
9.2	Spezifische Methanerträge eigener Untersuchungen .....	175
9.3	Ethanolausbeuten eigener Untersuchungen.....	187
9.4	Fließschemata zur Bilanzierung.....	189
	<b>Abstract: Investigations of the pre-treatment and the conversion of energy crops into biogas and bioethanol .....</b>	<b>202</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.1.1: Trockenmasseanteile der Stoffgruppen an einer typischen Silomaisprobe (KWS, o.J.) verändert.....	5
Abb. 4.2.2.1.1: Aufbau der 30-Liter-Fermenter im Hohenheimer Biogaslabor (Oechsner, 2005) .....	42
Abb. 4.2.2.2.1: Schema des Kolbenprobers des Hohenheimer Biogasertragstests nach Helffrich und Oechsner (2003) (Patent-Nr. 10227685) .....	46
Abb. 4.6.1: Szenarien 1-3 und 6-8, optional: Mais/Triticale, Steam Explosion ja/nein, Gärrestrückführung ja/nein .....	61
Abb. 4.6.2: Szenario 4: Getreidekorn in Bioethanol und Mais/Getreidestroh/Schlempe in Biogas mit Gärrestverwertung .....	62
Abb. 4.6.3: Szenario 5: Maisganzpflanze in Bioethanol und Maisschlempe in Biogas mit Gärrestverwertung.....	63
Abb. 5.1.1.1: Zusammensetzung der unvorbehandelten und vorbehandelten Biomasse (organ. Rest – organischer Rest, NDF – neutrale Detergentien-Faser, Rohfett, Rohprotein, Rohasche) .....	68
Abb. 5.1.1.2: Zusammensetzung der unvorbehandelten und der vorbehandelten Biomasse (NDF – neutrale Detergentien-Faser, ADF – saure Detergentien-Faser, ADL – Lignin).....	69
Abb. 5.1.1.1.1: Spezifische Methanerträge (Nm <sup>3</sup> Methan/kg oTS) der vier Vorbehandlungsvarianten des teigreifen Maises (30-L-Batch-Versuch 42 Tage) .....	71
Abb. 5.1.1.1.2: Spezifische Methanerträge (Nm <sup>3</sup> Methan/kg oTS) der vier Vorbehandlungsvarianten des teigreifen Maises bzw. der Maissilage (HBT 35 Tage) (MW=Mikrowelle) .....	73
Abb. 5.1.1.1.3: Methangehalte im Biogas (%) der vier Vorbehandlungsvarianten von teigreifem Mais (30-L-Batch-Versuch 42 Tage).....	74
Abb. 5.1.1.1.4: Essigsäurekonzentration (ppm) in den Biogasfermentern der vier Vorbehandlungsvarianten des teigreifen Maises in den 30-L-Fermentern .....	75
Abb. 5.1.1.1.5: Propionsäurekonzentration (ppm) in den Biogasfermentern der vier Vorbehandlungsvarianten des teigreifen Maises in den 30-L-Fermentern .....	76

Abb. 5.1.1.1.6: Summe der Säuren (Essigsäureäquivalent) in den Biogasfermentern der vier Vorbehandlungsvarianten des teigreifen Maises in den 30-L-Fermentern .....	77
Abb. 5.1.1.2.1: Spezifische Methanerträge (Nm <sup>3</sup> Methan/kg oTS) der vier Vorbehandlungsvarianten teigreifer Triticale (30-L-Batch-Versuch 42 Tage)....	78
Abb. 5.1.1.2.2: Spezifische Methanerträge (Nm <sup>3</sup> Methan/kg oTS) der vier Vorbehandlungsvarianten der teigreifen Triticale bzw. der Triticalesilage (HBT 35 Tage) .....	80
Abb. 5.1.1.2.3: Methangehalte im Biogas (%) der vier Vorbehandlungsvarianten von teigreifer Triticale (30-L-Batch-Versuch 42 Tage).....	81
Abb. 5.1.1.2.4: Essigsäurekonzentration (ppm) in den Biogasfermentern der vier Vorbehandlungsvarianten der teigreifen Triticale (Batch-Versuch 42 Tage) .....	82
Abb. 5.1.1.2.5: Propionsäurekonzentration (ppm) in den Biogasfermentern der vier Vorbehandlungsvarianten der teigreifen Triticale in den Fermentern (Batch-Versuch 42 Tage).....	83
Abb. 5.1.1.3.1: Spezifische Methanerträge (Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> kg/oTS) der drei Vorbehandlungsvarianten von reifer Triticale (Korn + Stroh) (30-L-Batch-Versuch 42 Tage) (Schumacher et al., 2007 b).....	84
Abb. 5.1.1.3.2: Spezifische Methanerträge der drei Vorbehandlungsvarianten von Triticalekorn/-stroh – Untersuchung im Hohenheimer Biogasertragstest (HBT)	86
Abb. 5.1.1.3.3: Änderung des spezifischen Methanertrags in Prozent bezogen auf Korn gequetscht / Stroh gehäckselt für zwei Biogastestverfahren (Schumacher et al., 2006 a) .....	87
Abb. 5.1.1.3.4: Methangehalte im Biogas (%) der drei Vorbehandlungsvarianten von reifer Triticale (Korn + Stroh) (30-L-Batch-Versuch 42 Tage) (Schumacher et al., 2007 b) .....	87
Abb. 5.1.1.3.5: Essigsäurekonzentration (ppm) in den Biogasfermentern der drei Aufbereitungsvarianten der reifen Triticale in den 30-L-Fermentern (Batch-Versuch 42 Tage).....	88
Abb. 5.1.1.3.6: Propionsäurekonzentration (ppm) in den Biogasfermentern der vier Vorbehandlungsvarianten der reifen Triticale in den 30-L-Fermentern (Batch-Versuch 42 Tage).....	89
Abb. 5.1.2.1.1: Trockensubstanzgehalt der neun Maisganzpflanzen zu den vier Erntezeitpunkten 2004 (Böhmel, 2007) .....	91

---

Abb. 5.1.2.1.2: Spezifische Methanerträge ( $\text{Nm}^3$ Methan/kg oTS) der neun Maisganzpflanzen zu den vier Erntezeitpunkten 2004 .....	92
Abb. 5.1.2.1.3: Spezifische Methanerträge ( $\text{Nm}^3$ Methan/kg oTS) der Fraktion Korn der neun Maissorten zu den vier Erntezeitpunkten 2004 .....	93
Abb. 5.1.2.1.4: Spezifische Methanerträge ( $\text{Nm}^3$ Methan/kg oTS) der Fraktion Rest (Lieschen, Spindel, Restpflanze) der neun Maissorten zu den vier Erntezeitpunkten 2004.....	94
Abb. 5.1.2.1.5: Box-Plots der spezifischen Methanerträge ( $\text{Nm}^3$ Methan/kg oTS) der Ganzpflanze, der Fraktionen Rest und Korn der neun Maissorten zu den vier Erntezeitpunkten 2004.....	95
Abb. 5.1.2.1.6: Methanhektarerträge ( $\text{Nm}^3$ Methan/(ha a)) und Energieerträge (GJ/(ha a)) der neun Maisganzpflanzen zu den vier Erntezeitpunkten 2004 (errechnet auf Basis der Trockenmasseerträge nach Böhmel, 2007) .....	96
Abb. 5.1.2.1.7: Korrelation zwischen Trockenmasseertrag und Energieertrag pro Hektar über die neun Maissorten als Ganzpflanzen zu den vier Erntezeitpunkten 2004 (Trockenmasseerträge nach Böhmel, 2007) .....	97
Abb. 5.1.2.1.8: Spezifische Methanerträge ( $\text{Nm}^3$ Methan/kg oTS) der neun Maisganzpflanzen zu den vier Erntezeitpunkten 2004 (Liniendiagramm) .....	98
Abb. 5.1.2.1.9: Trockensubstanzgehalt der sechs Maisganzpflanzen zu den fünf Erntezeitpunkten 2005 (Böhmel, 2007) .....	99
Abb. 5.1.2.1.10: Spezifische Methanerträge ( $\text{Nm}^3$ Methan/kg oTS) der sechs Maisganzpflanzen zu den fünf Erntezeitpunkten 2005 .....	100
Abb. 5.1.2.1.11: Methanhektarerträge ( $\text{Nm}^3$ Methan/(ha a)) und Energieerträge (GJ/(ha a)) der sechs Maisganzpflanzen zu den fünf Erntezeitpunkten 2005 (errechnet auf Basis der Trockenmasseerträge nach Böhmel, 2007) .....	101
Abb. 5.1.2.1.12: Korrelation zwischen Trockenmasseertrag und Energieertrag pro Hektar über die sechs Maissorten als Ganzpflanzen zu den fünf Erntezeitpunkten 2005 (Trockenmasseerträge nach Böhmel, 2007).....	102
Abb. 5.1.2.1.13: Spezifische Methanerträge ( $\text{Nm}^3$ Methan/kg oTS) der sechs Maisganzpflanzen zu den fünf Erntezeitpunkten 2005 (Liniendiagramm) .....	103
Abb. 5.1.2.1.14: Trockensubstanzgehalt der drei Maisganzpflanzen zu den vier Erntezeitpunkten 2006 (Böhmel, 2007) .....	104
Abb. 5.1.2.1.15: Spezifische Methanerträge ( $\text{Nm}^3$ Methan/kg oTS) der drei Maisganzpflanzen zu den vier Erntezeitpunkten 2006 .....	105

Abb. 5.1.2.1.16: Methanhektarerträge ( $\text{Nm}^3$ Methan/(ha a)) und Energieerträge (GJ/(ha a)) der drei Maisganzpflanzen zu den vier Erntezeitpunkten 2006 (errechnet auf Basis der Trockenmasseerträge nach Böhmel, 2007) .....	106
Abb. 5.1.2.1.17: Korrelation zwischen Trockenmasseertrag und Energieertrag pro Hektar sowie Trendlinie mit Bestimmtheitsmaß über die drei Maisganzpflanzen zu den vier Erntezeitpunkten 2006 (Trockenmasseerträge nach Böhmel, 2007) .....	106
Abb. 5.1.2.1.18: Spezifische Methanerträge ( $\text{Nm}^3$ Methan/kg oTS) der drei Maisganzpflanzen zu den vier Erntezeitpunkten 2006 (Liniendiagramm) .....	107
Abb. 5.1.2.1.19: Trockensubstanzgehalte (%) der Maissorte Gavott der Jahre 2004, 2005 und 2006 über je vier Erntetermine (Böhmel, 2007).....	108
Abb. 5.1.2.1.20: Spezifische Methanerträge ( $\text{Nm}^3$ Methan/kg oTS) der Maissorte Gavott der Jahre 2004, 2005 und 2006 über je vier Erntetermine.....	109
Abb. 5.1.2.1.21: Spezifische Methanerträge von Gavott 2005 (Korn, Spindel, Lieschen, Rest) .....	109
Abb. 5.1.2.1.22: Spezifische Methanerträge von KXA 5243 2005 (Korn, Spindel, Lieschen, Rest) .....	110
Abb. 5.1.2.1.23: Entwicklung der Anteile der Maisfraktionen am Methanhektarertrag 2005 bei Gavott (Berechnungsbasis Trockenmasseerträge Böhmel, 2007)....	111
Abb. 5.1.2.1.24: Entwicklung der Anteile der Maisfraktionen am Methanhektarertrag 2005 bei KXA 5243 (Berechnungsbasis Trockenmasseerträge Böhmel, 2007) .....	111
Abb. 5.1.2.2.1: Spezifische Methanerträge ( $\text{Nm}^3$ Methan/kg oTS) der vier Maisganzpflanzen und drei Zwischenfrüchte zu den zwei Erntezeitpunkten 2004/2005 .....	112
Abb. 5.1.2.2.2: Spezifische Methanerträge ( $\text{Nm}^3$ Methan/kg oTS) Weizen (Stroh, Korn) zu den zwei Erntezeitpunkten 2004/2005.....	113
Abb. 5.1.2.2.3: Methanhektarerträge ( $\text{Nm}^3$ Methan/(ha 2a)) der vier Maissorten als Ganzpflanzen und der drei Zwischenfrüchte sowie Weizen zu den zwei Erntestrategien 2004/2005 (auf Basis der Trockenmasseerträge nach Böhmel 2007 errechnet) .....	113
Abb. 5.1.2.3.1: Spezifische Methanerträge ( $\text{Nm}^3$ Methan/kg oTS) von Mais und Rutenhirse zu drei Düngestufen (N1, N2, N3) 2005 .....	115

---

Abb. 5.1.2.3.2: Methanhektarerträge ( $\text{Nm}^3$ Methan/(ha a)) und Energiehektarerträge (GJ/(ha a)) von Mais und Rutenhirse zu drei Düngestufen (N1, N2, N3) 2005 (errechnet auf Basis der Trockenmasseerträge nach Böhmel, 2007) .....	115
Abb. 5.1.2.3.4: Spezifische Methanerträge ( $\text{Nm}^3$ Methan/kg oTS) von Schlemphen von Mais und Rutenhirse zu drei Düngestufen (N1, N2, N3) 2005.....	116
Abb. 5.1.2.4.1: Spezifische Methanerträge ( $\text{Nm}^3$ Methan/kg oTS) der Triticaleganzpflanzensilage (drei Erntezeitpunkte) 2005 .....	117
Abb. 5.1.2.4.2: Spezifische Methanerträge ( $\text{Nm}^3$ Methan/kg oTS) von Triticale (Ganzpflanze, Korn bzw. Stroh (fünf Erntezeitpunkte) 2005.....	118
Abb. 5.1.2.4.3: Spezifische Methanerträge ( $\text{Nm}^3$ Methan/kg oTS) der Schlemphen von Triticale (Ganzpflanze, Korn bzw. Stroh (fünf Erntezeitpunkte) 2005 .....	119
Abb. 5.1.3.1: Anteile der Inhaltsstoffe in % TS der Maissorte Gavott (S250) über vier Erntezeitpunkte 2004 (T1-T4) und je drei Feldwiederholungen nach NIRS-Untersuchung .....	121
Abb. 5.1.3.2: Gemessene und errechnete spezifische Methanerträge der Maissorte Gavott (S250) über vier Erntezeitpunkte 2004 (T1-T4) und je drei Feldwiederholungen .....	123
Abb. 5.1.3.3: Anteile der Inhaltsstoffe in % TS der Maissorte Mikado (S500) über vier Erntezeitpunkte 2004 (T1-T4) und je drei Feldwiederholungen nach NIRS-Untersuchung .....	125
Abb. 5.1.3.4: Gemessene und errechnete spezifische Methanerträge der Maissorte Mikado (S500) über vier Erntezeitpunkte 2004 (T1-T4) und je drei Feldwiederholungen .....	127
Abb. 5.1.3.5: Gemessene und errechnete spezifische Methanerträge der neun Maissorten über vier Erntezeitpunkte 2004 und je drei Feldwiederholungen ..	128
Abb. 5.2.1: Ethanolausbeute (L A/Mg TS) von Rutenhirse und Mais als Ganzpflanze (drei N-Düngungsstufen) 2004 .....	129
Abb. 5.2.2: Ethanolausbeute (L A/Mg TS) von Rutenhirse und Mais als Ganzpflanze (drei N-Düngungsstufen) 2005 .....	130
Abb. 5.2.3: Ethanolausbeute (L A/Mg TS) der drei Maissorten zu den vier Erntezeitpunkten 2006.....	131
Abb. 5.2.4: Energieertrag aus Ethanol (GJ/(ha a)) der drei Maisganzpflanzen zu den vier Erntezeitpunkten 2006.....	132

Abb. 5.2.5: Ethanolausbeute (L A/Mg TS) von Triticale (Ganzpflanze, Korn bzw. Stroh) (fünf Erntezeitpunkte) 2005 .....	134
Abb. 5.2.6: Ethanolausbeute (L A/Mg TS) von Triticaleganzpflanzensilage (drei Erntezeitpunkte) und Maisganzpflanzensilage 2005 .....	134
Abb. 5.2.7: Ethanolausbeute (L A/Mg TS) Grünroggen (zwei Ernten), Welsches Weidelgras und Winterrübsen 2006 .....	135
Abb. 5.3.1: Energie-Input ( $\text{GJ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ) der acht Szenarien.....	138
Abb. 5.3.2: Energie-Output ( $\text{GJ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ) der acht Szenarien.....	138
Abb. 5.3.3: Verhältnis Energie-Output zu Energie-Input der acht Szenarien.....	139
Abb. 5.3.4: CML2001, Treibhauspotenzial (GWP 100 Jahre) [ $\text{kg CO}_2\text{-Äqv.}$ ] der acht Szenarien .....	141
Abb. 5.3.5: CML2001, Versauerungspotenzial (AP) [ $\text{kg SO}_2\text{-Äqv.}$ ] der acht Szenarien .....	141
Abb. 5.3.6: CML2001, Eutrophierungspotenzial (EP) [ $\text{kg Phosphat-Äqv.}$ ] der acht Szenarien .....	142
Abb. 9.4.1: Szenario 1: Mais in Biogas ohne Gärrestverwertung .....	189
Abb. 9.4.2: Szenario 2: Mais in Biogas mit Gärrestverwertung.....	189
Abb. 9.4.3: Szenario 3: Mais in Biogas mit Gärrestverwertung und Steam Explosion .....	189
Abb. 9.4.4: Szenario 4: Getreidekorn in Bioethanol und Mais/Getreidestroh/Schlempe in Biogas mit Gärrestverwertung .....	189
Abb. 9.4.5: Szenario 5: Maisganzpflanze in Bioethanol und Maisschlempe in Biogas mit Gärrestverwertung.....	190
Abb. 9.4.6: Szenario 6: Getreide in Biogas ohne Gärrestverwertung .....	190
Abb. 9.4.8: Szenario 8: Getreide in Biogas mit Gärrestverwertung und Steam Explosion.....	190
Abb. 9.4.9: Maisanbau ohne Gärrestverwertung (zu 1) (Böhmel).....	191
Abb. 9.4.10: Maisanbau mit Gärrestverwertung (zu 2 bis 5) (Böhmel) .....	192
Abb. 9.4.11: Getreideanbau ohne Gärrestverwertung (zu 6) (Böhmel) .....	193
Abb. 9.4.12: Getreideanbau mit Gärrestverwertung (zu 4, 7, 8) (Böhmel).....	194
Abb. 9.4.13: Mais in Biogas (zu 1 und 2).....	195
Abb. 9.4.14: Mais in Biogas mit Steam Explosion (zu 3) .....	196
Abb. 9.4.15: Getreidekorn in Bioethanol und Mais/Getreidestroh/Schlempe in Biogas (zu 4) .....	197

---

Abb. 9.4.16: Maisganzpflanze in Bioethanol und Maisschlempe in Biogas (zu 5) ..	198
Abb. 9.4.17: Getreide in Biogas (zu 6 und 7).....	199
Abb. 9.4.18: Getreide in Biogas (zu 8).....	200
Abb. 9.4.19: Getreide in Ethanol (zu 4) (Fleischer).....	201
Abb. 9.4.20: Mais in Ethanol (zu 4 und 5) (Fleischer).....	201

## Tabellenverzeichnis

Tab. 3.3.1: Verfahren zum Aufschluss und zur Verzuckerung von Lignocellulose (Prechtl et al., 2005 a, nach: Igelspacher 2006) .....	7
Tab. 3.4.3.1: Spezifische Biogas- und Methanausbeute der behandelten und unbehandelten Energiepflanzen (Amon et al., 2006 b) .....	13
Tab. 3.4.4.1: Parameter der Regressionsgleichung zur Berechnung des Methanenergiewerts von Mais anhand der Rohnährstoffe (Amon, 2006 b).....	16
Tab. 3.5.1.1: Stärken und Schwächen traditioneller Rohstoffe hinsichtlich der Bioethanolerzeugung (Schmitz, 2005) (Auswahl).....	18
Tab. 3.5.4.1: Alkoholausbeute ausgewählter Pflanzen.....	21
Tab. 3.5.4.2: Eigene Kalkulation zur Ethanolausbeute in Massenprozent des Inputs nach Daten von Igelspacher (2006) .....	22
Tab. 4.2.1: Übersicht Material und Methoden der Biogas-Aufbereitungsversuche ...	38
Tab. 4.2.2.2.1: Übersicht HBT, Messgrößen, eingesetztes Material.....	44
Tab. 4.3.1.1: Übersicht Material und Methoden der Bioethanolertragsuntersuchungen .....	52
Tab. 4.4.1: Durch NIRS bestimmte Merkmale von Silomaisganzpflanzen (VDLUFA, 2002) .....	57
Tab. 4.6.1: Szenarien der Bilanzierung .....	60
Tab. 4.6.2: Spezifische Methanerträge von Mais und Triticale, deren Schlempen und des mit Steam Explosion behandelten Materials.....	63
Tab. 5.1.1.1: Varianten der Vorbehandlung des Triticalekorns/-strohs (vollreif) .....	65
Tab. 5.1.1.2: Varianten der Vorbehandlung der teigreifen Triticale und von siloreifem Mais.....	66
Tab. 5.1.1.3: Überblick über die im HBT untersuchten Aufbereitungsverfahren von Mais und Triticale .....	66
Tab. 5.1.1.4: Trockensubstanzgehalte (TS) und organische Trockensubstanzgehalte (oTS) der vollreifen Triticale in Prozent für drei Aufbereitungsvarianten .....	67
Tab. 5.1.1.5: Trockensubstanzgehalte (TS), organische Trockensubstanzgehalte (oTS) und der auf flüchtige Stoffe korrigierte organische Trockensubstanzgehalt (oTS k) der teigreifen Triticale und des teigreifen Maises in Prozent .....	67
Tab. 5.1.1.6: Prozentuale Zusammensetzung der Gerüstsubstanzen von Mais und Triticale.....	70

Tab. 5.1.1.7: Prozentuale Zusammensetzung der Zellinhaltsstoffe von Mais und Triticale.....	70
Tab. 5.1.1.1.1: Spezifische Methanerträge ( $\text{Nm}^3$ Methan/kg oTS), Standardabweichung, relative Standardabweichung und prozentuale Unterschiede der Vorbehandlungsvarianten des teigreifen Maises (30-L-Batch-Versuch 42 Tage und HBT 35 Tage).....	72
Tab. 5.1.1.2.1: Spezifische Methanerträge ( $\text{Nm}^3$ Methan/kg oTS), Standardabweichung, relative Standardabweichung und prozentuale Unterschiede der vier Vorbehandlungsvarianten teigreifer Triticale (30-L-Batch-Versuch 42 Tage und HBT 35 Tage).....	79
Tab. 5.1.1.3.1: Spezifische Methanerträge ( $\text{Nm}^3$ $\text{CH}_4$ kg/oTS), Standardabweichung, relative Standardabweichung und prozentuale Unterschiede der drei Vorbehandlungsvarianten vollreifer Triticale (30-L-Batch-Versuch 42 Tage und HBT 35 Tage).....	85
Tab. 5.1.2.1.1: Untersuchte Maissorten mit ihren Siloreifezahlen (mittelfrüh, mittelspät bis spätreif) der Ernte 2004.....	91
Tab. 5.1.2.1.2: Statistik – Spezifische Methanerträge ( $\text{Nm}^3$ Methan/kg oTS) der Ganzpflanze, der Fraktionen Rest und Korn der neun Maissorten zu den vier Erntezeitpunkten 2004.....	95
Tab. 5.1.2.1.3: Korrelation zwischen dem Trockenmasseertrag und dem Methanertrag pro Hektar Mais 2004.....	97
Tab. 5.1.2.1.4: Untersuchte Maissorten mit ihren Siloreifezahlen (mittelfrüh, mittelspät bis spätreif) der Ernte 2005.....	99
Tab. 5.1.2.1.5: Korrelation zwischen dem Trockenmasseertrag und dem Methanertrag pro Hektar Mais 2005 (vier Ernten und ein Biomasseschnitt = BMS).....	103
Tab. 5.1.2.1.6: Untersuchte Maissorten mit ihren Siloreifezahlen (mittelfrüh, mittelspät bis spätreif) der Ernte 2006.....	104
Tab. 5.1.2.1.7: Korrelation zwischen dem Trockenmasseertrag und dem Methanertrag pro Hektar Mais 2006.....	107
Tab. 5.1.3.1: Anteile der Inhaltsstoffe in % TS der Maissorte Gavott (S250) über vier Erntezeitpunkte 2004 (T1-T4) und je drei Feldwiederholungen nach NIRS-Untersuchung.....	122

Tab. 5.1.3.2: Gemessene und errechnete spezifische Methanerträge der Maissorte Gavott (S250) über vier Erntezeitpunkte 2004 (T1-T4) und je drei Feldwiederholungen sowie Abweichung zwischen den Methanerträgen bezogen auf TS.....	124
Tab. 5.1.3.3: Anteile der Inhaltsstoffe in % TS der Maissorte Mikado (S500) über vier Erntezeitpunkte 2004 (T1-T4) und je drei Feldwiederholungen nach NIRS-Untersuchung .....	126
Tab. 5.1.3.4: Gemessene und errechnete spezifische Methanerträge der Maissorte Mikado (S500) über vier Erntezeitpunkte (T1-T4) und je drei Feldwiederholungen .....	127
Tab. 5.2.4: Vergleich der theoretischen (errechnet aus den säurelöslichen Zuckern) mit den gemessenen Ethanolausbeuten .....	132
Tab. 5.3.1: Energiebilanz der Szenarien 1 bis 4.....	136
Tab. 5.3.2: Energiebilanz der Szenarien 5 bis 8.....	137
Tab. 5.3.3: CML2001, Treibhauspotenzial (GWP 100 Jahre) [kg CO <sub>2</sub> -Äqv.], CML2001, Versauerungspotenzial (AP) [kg SO <sub>2</sub> -Äqv.], CML2001, Eutrophierungspotenzial (EP) [kg Phosphat-Äqv.] der acht Szenarien .....	140
Tab. 6.1.3.1: Wiederholbarkeit der NIRS-Inhaltsstoffbestimmung; Auszug (Degenhardt, 1996) .....	150
Tab. 9.1.1: Übersicht zu spezifischen Biogas-/Methanerträgen ausgewählter Nawaro und ausgewählter organischer Reste (verschiedene Autoren) .....	172
Tab. 9.2.1: Methanerträge eigener Untersuchungen .....	176
Tab. 9.3.1: Ethanolausbeuten eigener Untersuchungen .....	187

## Abkürzungsverzeichnis

ADF	saure Detergentien-Faser
ADL	Lignin
AP	Versauerungspotenzial
BGW	Bundesverband der deutschen Gas- und Wasserwirtschaft, Berlin
BHKW	BlockHeizKraftWerk
CML	Centrum voor Milieukunde Leiden
CO <sub>2</sub> -Äqv.	Kohlendioxid-Äquivalent
CSB	chemischen Sauerstoffbedarf
d	Tag/e
DDGS	Distillers Dried Grains and Solubles
DDS	Dried Distillers Solubles = Dünnschlempe-Sirup
DVGW	Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfachs, Bonn
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetzes (N.N., 2004)
EP	Eutrophierungspotenzial
FM	Frischmasse
GC	Gaschromatographie
GWP	Global warming potential (Treibhauspotenzial)
HBT	Hohenheimer Biogasertragstest (Verfahren zur Ermittlung des spezifischen Methan-/Biogasertrags)
HPLC	Hochleistungsflüssigkeitschromatographie (high performance liquid chromatography)
LVVG	Bildungs- und Wissenszentrum Aulendorf – Viehhaltung, Grünlandwirtschaft, Wild, Fischerei; ehemals Lehr- und Versuchsanstalt für Viehhaltung und Grünlandwirtschaft
Max	Maximum
MEWM	Methanenergiewertmodell (nach Amon, 2006 b)
Min	Minimum
min	Minuten
N1, N2, N3	Stickstoffdüngestufen 1 bis 3 der Nawaro-Anbauversuche
Nawaro	Nachwachsende Rohstoffe

NBC	National Bioenergy Center
NDF	neutrale Detergentien-Faser
NfE	Stickstofffreie Extraktstoffe
NIRS	Nah-Infrarot-Spektroskopie
oTS	organische Trockensubstanz
oTSk	organische Trockensubstanz, korrigiert um flüchtige Fettsäuren
Phosphat-Äqv.	Phosphat- Äquivalent
ppm	parts per million
rel. STD	relative Standardabweichung
SNG	synthetic natural gas
SO <sub>2</sub> -Äqv.	Schwefeldioxid-Äquivalent
Steam Ex	Steam Explosion (Dampf-Explosion)
T1-T5	Erntezeitpunkte
TM	Trockenmasse
TS	Trockensubstanz
Upm	Umdrehungen pro Minute
XP	Rohprotein
XS	Stärke
XZ	Zucker

# 1 Einleitung

Es gibt viele Gründe, die für einen Wandel bei der Auswahl von Energieträgern für die Erzeugung von elektrischer und thermischer Energie sowie von Kraftstoffen in Deutschland sprechen.

Die Ressourcen der Erde sind endlich, und über längere Zeiträume kann nur im Rahmen dieser Grenzen sinnvoll bzw. nachhaltig gewirtschaftet werden. Selbst der Dienstleistungssektor mit seinen immateriellen Produkten ist auf die Zufuhr von Material und Energie angewiesen, wie Daly und Farley (2004) betonen.

“Economic production, as it is typically understood, is the transformation of raw materials supplied by the ecosystem into something of value to humans. Transformation requires energy, and it inevitably generates waste. Even the service sector requires physical inputs to sustain those who provide the service. We have finite supplies of energy, finite supplies of raw materials, finite absorption capacities for our wastes, and poorly understood but finite capacities for ecosystems to provide a host of goods and services essential for our survival. And evidence suggests that we are reaching the limits with respect to these resources, .... With continued growth in production, the economic subsystem must eventually overwhelm the capacity of the global ecosystem to sustain it.”  
(Daly und Farley, 2004, (S. 64/65))

Als politischer Grund lässt sich die erstrebenswerte zumindest teilweise Unabhängigkeit von Importen von fossilen Energieträgern anführen. Damit einhergehend könnten ökonomische Risiken wechselnder und tendenziell steigender Kosten fossiler Energieträger gesenkt werden.

Ein weiterer Grund, Veränderungen anzustreben, liegt in der globalen Erderwärmung, die als Folge ständig steigender Kohlendioxidkonzentrationen in der Atmosphäre aufgrund anthropogenen Wirkens angesehen und als Treibhauseffekt viel diskutiert wird.

Zur heute noch überwiegender Energieerzeugung aus fossilen und nuklearen Ressourcen gibt es eine Vielzahl viel versprechender Alternativen. Für Mitteleuropa werden von Kaltschmitt (2001) die solare Strahlung, die Windenergie, die Wasserkraft, die Erdwärme und die Biomasse hervorgehoben.

Die EU und damit auch Deutschland haben ehrgeizige Pläne zum Ausbau der Energiegewinnung aus erneuerbaren Quellen. Im Aktionsplan Biomasse der EU nennt die Kommission die Ziele zur Verstärkung der Nutzung von Bioenergie für den Wärme-, Strom- und Kraftstoffbereich.

Die Ziele der Kommission bis 2010 sind (BMU, 2006 a):

- 12 % Anteil erneuerbarer Energien am Primärenergieverbrauch der EU,
- 21 % Anteil am Strom und
- 5,75 % Marktanteil am Kraftstoff.

Dementsprechend hat sich die Bundesregierung zum Ziel gesetzt, den Anteil regenerativ erzeugter Energie an der Gesamtenergieversorgung der Bundesrepublik Deutschland in den nächsten Jahren zu steigern. So soll der Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung bis 2010 auf mindestens 12,5 %, bis 2020 auf mindestens 20 % und bis 2050 auf etwa 50 % des gesamten Energiebedarfs in Deutschland erhöht werden (BMU, 2006 b).

Die Novellierung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) im Jahr 2004 hat u.a. zu einem Boom beim Neubau landwirtschaftlicher Biogasanlagen geführt. Zusätzlich zur langfristig sicheren Grundvergütung des Stroms aus regenerativen Quellen werden verschiedene Boni für Biomasseanlagen bis fünf Megawatt gewährt, wie z.B. der Biomasse-Bonus. Dieser wird u.a. gezahlt, wenn die Biomasseanlage nur mit Pflanzen oder Pflanzenbestandteilen (die nur zu diesem Zweck angebaut wurden), mit Gülle, mit Schlempe aus landwirtschaftlichen Brennereien oder Kombinationen der vorgenannten Stoffe betrieben wird (N.N., 2004).

Der Einsatz von Energiepflanzen zur Biogas- bzw. Ethanolherzeugung verbreitet sich in Deutschland immer weiter. Eine Aufgabe besteht darin, Lösungen für die effektive Ausschöpfung der energetischen Potenziale der Energiepflanzen vom Anbau, über die Lagerung bis hin zur mikrobiologischen Umsetzung zu Energieträgern zu finden. Dafür werden belastbare Daten zu den Trockenmasseerträgen standortspezifischer Energiepflanzenfruchtfolgen (inklusive neuer Sorten) und deren spezifischen Energieerträgen über die Konversionspfade Biogas und Bioethanol benötigt.

## 2 Problemstellung und Ziel der Arbeit

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen des Forschungsprojekts „Optimierung der Bereitstellung von Biomasse für innovative energetische Nutzungsformen“ durchgeführt und durch die Landesstiftung Baden-Württemberg gefördert.

Ziel des gesamten Forschungsprojekts war die Entwicklung von Anbau- und Nutzungsketten für die kostengünstige, nachhaltige und weitgehend CO<sub>2</sub>-neutrale Bereitstellung hoher Flächenenergieerträge durch

- die Optimierung der Flächenproduktivität unter Berücksichtigung pflanzenbaulicher, bioverfahrenstechnischer und ökologischer Faktoren und
- die Senkung des fossilen Energieverbrauchs durch die Kopplung von Energie- und Stoffströmen der Biogas- und Bioethanolproduktion.

Der Teilbereich Anbau wurde im Rahmen des Projekts von Frau Constanze Böhmel bearbeitet. Böhmel (2007) beschreibt in ihrer Dissertation Material und Methoden des Bereichs Anbau ausführlich und diskutiert die Ergebnisse dieses Teilbereichs.

In der vorliegenden Arbeit „Untersuchungen zur Aufbereitung und Umwandlung von Energiepflanzen in Biogas und Bioethanol“ sind die Ergebnisse des Teilbereichs Aufbereitung, Biogas- und Bioethanolgewinnung zusammengefasst. Ziel war es, einen Beitrag zur Aktualisierung und Erweiterung der Datenbasis für spezifische Biogas- bzw. Bioethanolerträge aktueller Energiepflanzen, auf der Grundlage einer Vielzahl eigener Laboruntersuchungen, zu leisten. Zusätzlich stand die Erprobung von verschiedenen Aufbereitungsverfahren für Energiepflanzen und deren Einfluss auf die Biogasertragshöhe und auf den Verlauf der Biogasbildung im Fokus dieser Arbeit.

Eine vergleichende Energie- und Ökobilanz zu Silomais und reifer Triticale über die Konversionspfade Biogas- und Ethanolgewinnung unter Berücksichtigung des Aufbereitungsverfahrens Steam Explosion soll die Entscheidungsfindung zur Auswahl optimaler Anbau- und Konversionssysteme vereinfachen.

### **3 Stand des Wissens – Biogas- und Bioethanolgewinnung aus Energiepflanzen**

#### **3.1 Aufbau von Pflanzen**

Jede Pflanze ist in die ökologischen Kreisläufe der Stoffe wie Kohlen-, Sauer- und Stickstoff eingebunden sowie auf die Zufuhr von Sonnenenergie und den Stoffwechsel von Wasser und mineralischen Nährsalzen (Makro-/Mikroelemente) angewiesen (Schopfer und Brennicke, 1999).

Die für die Konversion in Biogas geeigneten Pflanzen wie Mais oder Triticale können im Stadium der Teigreife geerntet werden, in dem sie sehr gut als Silage zu konservieren sind und anschließend relativ einfach durch Mikroorganismen im Biogasgärungsprozess abgebaut werden können. Die Pflanzen bestehen zu diesem Erntezeitpunkt zu etwa zwei Dritteln aus Wasser und zu etwa einem Drittel aus Trockenmasse.

Es ist aber auch möglich, z.B. Getreide nicht im teigreifen, sondern im vollreifen Stadium zu ernten. Dann kann das Korn sehr einfach für die Ethanolproduktion eingesetzt werden. Für die Biogasgewinnung kommen beide Fraktionen (Korn und Stroh) nach entsprechender Aufbereitung in Frage. Der Trockenmassegehalt lag bei dem hier untersuchten Triticalekorn bei etwa 86 % und bei Triticalestroh bei etwa 90 %.

Die Trockenmasse kann in Anlehnung an die Futtermittelanalyse in der Tierernährung nach modifizierter Weender-Analyse in Gerüstbaustoffen und Zellinhaltsstoffen unterteilt werden, die sich aus weiteren Stoffgruppen zusammensetzen. Zu den Zellinhaltsstoffen wird als anorganischer Bestandteil die Rohasche gezählt und als weitere organische Bestandteile das Rohprotein, das Rohfett, die Stärke, der Zucker und ein organischer Rest. Die Gerüstbaustoffe werden in Hemizellulose, Zellulose und Lignin untergliedert (Kirchgeßner, 2004).

In Abb. 3.1.1 sind beispielhaft die Trockenmasseanteile der Stoffgruppen an einer typischen Silomaisprobe dargestellt (KWS, o.J.). Die Anteile der einzelnen Stoffgruppen können je nach Maissorte und Erntezeitpunkt variieren.

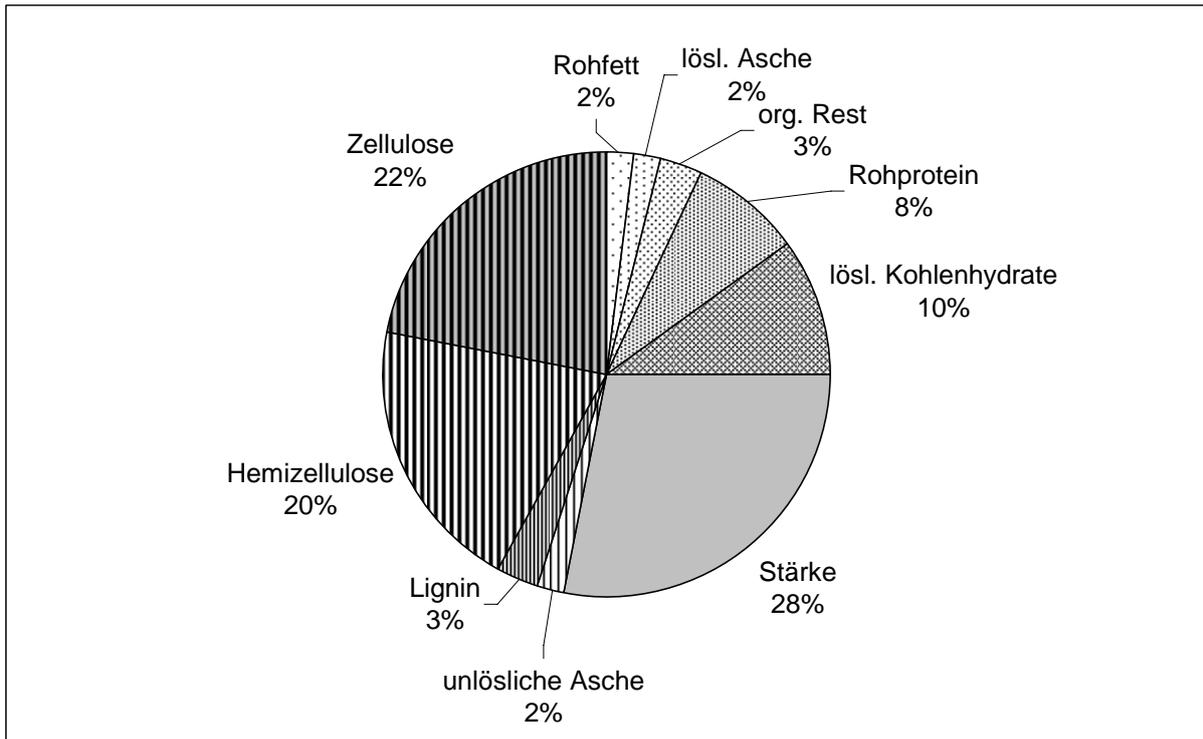


Abb. 3.1.1: Trockenmasseanteile der Stoffgruppen an einer typischen Silomaisprobe (KWS, o.J.) verändert

Für die konventionelle Bioethanolproduktion werden zucker- oder stärkehaltige Feldfrüchte wie Zuckerrüben, Kartoffeln und Winterweizen in Deutschland eingesetzt (Schmitz, 2003), während die Ethanolgewinnung aus Lignozellulose noch einen Forschungsschwerpunkt in Skandinavien, den USA, in Kanada und Brasilien bildet (Schmitz, 2005).

Das Spektrum an Einsatzstoffen für die Biogasgewinnung ist wesentlich breiter als für die Bioethanolproduktion. Es eignen sich grundsätzlich sowohl Kohlenhydrate als auch Fette und Eiweiße für die Methangärung (Maurer und Winkler, 1982).

### **3.2 Allgemeine Konversionsverfahren für nachwachsende Rohstoffe**

Für nachwachsende Rohstoffe (Nawaro) gibt es unterschiedliche Konversionsverfahren zur Bereitstellung von Energieträgern, die einer von drei Gruppen zugeordnet werden (Kaltschmitt, 2001):

- Thermochemische Umwandlung
  - Verkohlung (Kohle)
  - Vergasung (Produktgas)
  - Pyrolyse (Pyrolyseöl)
- Physikalisch-chemische Umwandlung
  - Pressung/Extraktion (Pflanzenöl)
- Biochemische Umwandlung
  - Alkoholgärung (Ethanol)
  - Anaerober Abbau (Biogas)
  - Aerober Abbau

In der vorliegenden Arbeit liegt der Fokus auf der biochemischen Umwandlung, speziell der Gewinnung eines flüssigen (Ethanol) und gasförmigen Energieträgers (Biogas).

### **3.3 Substrataufbereitungsverfahren für die Biogas- und Ethanolgewinnung**

Um nicht nur stärke- und zuckerreiche Pflanzen oder -teile für die Ethanolgewinnung einsetzen zu können, sind Verfahren zum Aufschluss und zur Verzuckerung von Lignozellulose seit Jahren Gegenstand der Forschung und Entwicklung.

Fan et al. (1987) nehmen die folgende Einteilung der Vorbehandlungsmethoden für Zellulose vor:

- Physikalische Vorbehandlung
  - Vermahlen
  - Pyrolyse
  - Hochenergetische Strahlung
  - Dampfbehandlung unter Hochdruck
  - Extrusion und Expansion
  - Mikrowellenbehandlung

- Chemische Vorbehandlung
  - Laugen
  - Säuren
  - Gase
  - Oxidationsmittel
  - Celluloselösungsmittel
  - Lösungsmittlextraktion
  - Quellmittel
- Biologische Vorbehandlung
  - Bakterien
  - Pilze

Einen Überblick zu den Verfahrenskombinationen im Ethanolbereich geben Prechtl et al. (2005 a, nach: Igelspacher, 2006), siehe Tab. 3.3.1.

Tab. 3.3.1: Verfahren zum Aufschluss und zur Verzuckerung von Lignocellulose (Prechtl et al., 2005 a, nach: Igelspacher 2006)

<b>Verfahren</b>	<b>Anbieter</b>
Totalhydrolyse mit starker Säure	u.a. Arkenol
Totalhydrolyse mit verdünnter Säure	u.a. NREL, BCI
Hydrolyse mit verdünnter Säure und nachgeschalteter enzymatischer Verzuckerung	u.a. NREL
Heißwasseraufschluss	Purevision Inc.
Heißwasseraufschluss	ATZ-EVUS
Steam-Explosion, ggf. sauer mit SO <sub>2</sub>	Corp., 2B AG, ENEA
Steam-Explosion mit NH <sub>3</sub> (AFEX)	
Oxidativer Laugeaufschluss	
Organosolv (ACOS)	Paszner Inc.

Führend auf dem Gebiet des Voraufschlusses lignocellulosehaltiger Biomassen mittels Thermodruckhydrolyse (TDH) in Deutschland ist sicherlich das ATZ Entwicklungszentrum in Sulzbach-Rosenberg. Hier wurde durch den Voraufschluss

von Mais als Ganzpflanze in Laboranlagen und Anlagen im halbertechnischen Maßstab und anschließender Ethanolfermentation eine um ca. 30 % höhere Ethanolausbeute (pro Hektar) erzielt, verglichen mit der Ausbeute aus Stärke aus der Fraktion Maiskorn. Neben Mais werden auch an Gräser und Stroh als kostengünstige Einsatzstoffe große Erwartungen geknüpft (Prechtl et al., 2005 b). Erste positive Erfahrungen zur Thermodruckhydrolysebehandlung wurden an organischen Abfällen wie beispielsweise Nahrungs- und Küchenabfällen gesammelt (Prechtl et al., 1998).

Im Biogasbereich gibt es erste Pilotanlagen, bei denen die Thermodruckhydrolyse zur Biomassevorbehandlung eingesetzt und Steigerungen der Biogasbildungsrate um 25 % gegenüber unbehandeltem Material erwartet werden (Hügler, 2007).

Aktuelle Arbeiten aus Schweden zur Vorbehandlung von Maisrestpflanzen in unterschiedlicher Kombination von Dampf-, Schwefeldioxidbehandlung und enzymatischer Vorhydrolyse zur Ethanolgewinnung veröffentlichte Öhgren (2006; Öhgren et al., 2007 a, 2007 b, 2005).

Grundsätzlich ist der Einsatz der vorgenannten Aufbereitungsverfahren auch für den Biogasbereich denkbar, um z.B. die Cellulose einfacher und schneller für den enzymatischen und mikrobiellen Abbau verfügbar zu machen. Es ist allerdings zu beachten, dass der Einsatz von Säuren und Laugen bei der Vorbehandlung nicht zu einer pH-Wert-Veränderung, aus dem neutralen Bereich heraus, im Biogasfermenter führen darf, da es sonst zu Prozessstörungen kommen kann.

Untersuchungen zum Einfluss der Aufbereitung von Biomasse auf die Biogaserträge wurden von Amon an der Universität für Bodenkunde in Wien an Sonnenblumen- und Wiesengrassilage durchgeführt. Hierbei wurden die Methanerträge der Aufschlussvarianten mit Dampfbehandlung, mit Mikrowelle und Zitronensäurebehandlung mit unbehandelter Silage verglichen und Steigerungen um bis zu 45 % bei Sonnenblumensilage bzw. um bis zu 23 % bei Wiesengrassilage gemessen (Amon, 2005).

Auch Zubr (1989) führte zwischen 1980 und 1985 in Dänemark Biogasuntersuchungen an Getreidestroh mit unterschiedlichen Häcksellängen durch. Bei einer Vergärungsdauer von 30 Tagen und einer Temperatur von 30 °C stieg bei Weizenstroh der Gasertrag von 210 auf 347 l Gas/kg TS, d.h. um 65 % ausgehend von einer Häcksellänge von 30 mm auf 0 bis 2 mm. Entsprechend erhöhte sich bei Roggenstroh der Gasertrag von 247 auf 377 l Gas/kg TS (um 53 %) bei 30 mm bzw. 0,2 bis 0,5 mm Häcksellänge.

Auch auf dem Gebiet der Tierernährung sind seit Anfang des 20. Jahrhunderts vielfältige Versuche, teilweise abgeleitet aus der Papierindustrie, zu verschiedenen Stroh-Aufschlussverfahren unternommen worden, die von Wöhlbier (1983) zusammenfassend beschrieben wurden.

## **3.4 Biogaserzeugung**

### **3.4.1 Rohstoffe**

Für die Biogasgewinnung können sowohl tierische als auch pflanzliche Produkte eingesetzt werden (Maurer und Winkler, 1982). Unter nachwachsenden Rohstoffen für die Biogaserzeugung wird im Allgemeinen pflanzliche Biomasse verstanden. Besonders geeignet sind standortangepasste Feldfrüchte wie Mais, Zuckerrüben, Getreide und ggf. auch Sonnenblumen, die verhältnismäßig hohe Trockenmasseerträge versprechen, auch wenn die Temperatur- und Niederschlagsverteilung nicht in jedem Jahr optimal ausfällt. Für die Biogasproduktion sollte die verwendete Biomasse möglichst wenig verholzt sein, da sie sonst vorbehandelt werden muss oder die Umsetzung in Biogas langsamer erfolgt. Denn das für die Verholzung verantwortliche Lignin umschließt die Cellulosemikrofibrillen der Zellwände (Kutschera, 1995).

Aus der Forschung im Bereich der Tierernährung, speziell der Verdaulichkeit bei Wiederkäuern, ist bekannt, dass Lignin nicht verdaut bzw. nur unter bestimmten Bedingungen geringfügig enzymatisch angegriffen wird (Kirchgeßner, 2004). Dagegen können Wiederkäuer in ihren Pansen die anderen Gerüstbaustoffe Cellulose und Hemicellulose enzymatisch über Pyruvat zu Propion-, Essig- und Buttersäure umwandeln (Kirchgeßner, 2004).

Es ist davon auszugehen, dass die Abbauprozesse bei der methanogenen Vergärung von Biomasse in Biogasfermentern sehr ähnlich ablaufen, d.h. dass das Lignin selbst kaum anaerob abbaubar ist und ggf. auch die Degradation von Cellulose und Hemicellulose durch ihre Verbindungen mit Lignin beeinträchtigt.

Untersuchungen von Chandler et al. wiesen einen linearen Zusammenhang zwischen Ligningehalt und Abbaubarkeit der organischen Substrate wie u.a. Weizen- und Maisstroh bzw. tierischen Exkrementen nach (Chandler, 1980). Demnach betrug der umsetzbare Anteil der organischen Trockensubstanz maximal 83 %, sofern kein Lignin vorhanden war.

### 3.4.2 Grundlagen der Biogaserzeugung

Bei der Biogasbildung handelt es sich um eine anaerobe mikrobielle Mineralisierung von organischem Material zu Methan (Heizwert 36 MJ/m<sup>3</sup>, Falbe und Regitz, 1998) und Kohlendioxid (Schlegel, 2007). Je nach Ausgangsstoff sind weitere Spurengase (meist unter einem Prozent) wie z.B. Schwefelwasserstoff im Biogas enthalten.

Nach derzeitigem Wissensstand wird der Biogasprozess in vier Phasen unterteilt (Maurer und Winkler, 1982): Hydrolyse, Versäuerung, Essigsäurebildung und Methanbildung. Historische Reaktionsmodelle für die Methanbildung bis zum Dreistufenmodell und Basiswissen über die Methangärung wurden von Braun (1982), Wellinger et al. (1991), Eder und Schulz (2006) sowie Oechsner und Lemmer (2007) zusammengefasst. Im Labor oder in der Praxis können alle vier Phasen gleichzeitig in einem Fermenter ablaufen, oder es kann z.B. bei einem zweistufigen Verfahren die Hydrolyse in einem separaten Reaktor erfolgen.

Zuerst werden die Kohlenhydrate in Zucker, die Fette in Fettsäuren und die Eiweiße in Aminosäuren gespalten. Aus diesen entstehen kurzkettige Carbonsäuren, Gase und Alkohole, die wiederum zu Essigsäure, Wasserstoff, Bicarbonat, Ameisensäure und Methanol abgebaut werden. Am Ende der Kette werden diese Stoffe in Methan und Kohlendioxid umgewandelt. Außerdem sind im Biogas noch Wasserstoff, Ammoniak und Schwefelwasserstoff in sehr geringen Konzentrationen vorhanden (Maurer und Winkler, 1982).

Einen detaillierten Überblick zur Biologie der Methanbildung gibt Sahm (1981). Neben den hydrolytischen, den fermentativen und den acetogenen Bakterien geht Sahm (1981) speziell auf die Besonderheiten der methanogenen Bakterien ein, wie u.a. die Abwesenheit des Mureins in der Zellwand dieser Bakterien und das Auftreten der Coenzyme M und F<sub>420</sub>, die bisher in anderen Organismen nicht nachgewiesen wurden. Auch stellt der Autor die Ergebnisse seiner Untersuchungen zum Einfluss von Nährsalzen und Spurenelementen auf eine Reinkultur von *Methanosarcina barkeri* vor (Sahm, 1981).

Tiefere Untersuchungen zur Zusammensetzung der mikrobiellen Gesellschaft des Biogasprozesses anhand von Durchflussversuchen mit Futterrübensilage führten Klocke et al. (2007) durch.

In der Praxis kann die Anlagentechnik in Abhängigkeit von der Substratart und -menge und den gewählten Prozessbedingungen sehr unterschiedlich ausfallen. Die

verschiedenen Verfahrenstechniken werden von mehreren Autoren beschrieben (Braun, 1982; Maurer und Winkler, 1982; Wellinger et al., 1991; Scholwin et al. 2006 a, Oechsner und Lemmer, 2007). Verfahrenstechnische und sicherheitstechnische Probleme und Maßnahmen schildert Konstandt (1982).

Zur Überwachung des Biogasprozesses können Proben aus den Fermentern entnommen und auf ihren Gehalt an flüchtigen Fettsäuren getestet werden. Die gemessenen Säurekonzentrationen sind ein Maß für die Ausgewogenheit des Zusammenwirkens der verschiedenen Bakteriengruppen der vier Phasen. Erhöhte Säurekonzentrationen können somit ein Indikator für ein temporäres Ungleichgewicht im Stoffumsatz bei Propionsäure zwischen Säure- und Acetatbildnern bzw. bei Essigsäure zwischen Acetat- und Methanbildnern sein (Oechsner und Lemmer, 2007).

Ist die Elementarzusammensetzung des Ausgangssubstrats an Kohlen-, Sauer- und Wasserstoff bekannt, kann nach der Gleichung von Buswell und Müller (1952) der theoretische Methan- bzw. Biogasertrag bestimmt werden. Boyle (1976) erweiterte diese Formel noch um die Stickstoff- und Schwefelanteile im Ausgangssubstrat, so dass auch Ammoniak und Schwefelwasserstoff errechnet werden können.

Die vollständige Oxidation von Glucose zu Kohlendioxid setzt (-)2870 kJ frei (Schlegel, 2007). Für die Acetatbildung werden (-)216 kJ benötigt, und für die weitere Umsetzung zu Methan werden (-)202 kJ freigesetzt, d.h. insgesamt nur 14,5 % der Energie werden für die Lebensvorgänge der Bakterien verwendet, und die restlichen 85,5 % sind im Methan enthalten (Schlegel, 2007).

Die praktischen Untersuchungen von Chandler et al. (1980) zeigten, dass die Zellinhaltsstoffe zu fast 100 % abbaubar waren, aber durch den Aufbau bakterieller Nebenprodukte 19 % der organischen Ausgangsmasse in diesen festgelegt wurden. Somit können praktisch nur 81 % der organischen Masse in Biogas umgewandelt werden (Chandler, 1980).

### 3.4.3 Spezifische Biogaserträge ausgewählter Substrate

Durch die Novellierung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) im Jahr 2004 ist das Interesse an spezifischen Methanerträgen der nachwachsenden Rohstoffe enorm gestiegen, da auf der Basis dieser Daten die Kalkulation für den Neu- oder Umbau von Biogasanlagen erfolgt.

Im Anhang sind ausgewählte spezifische Biogas-/Methanerträge von nachwachsenden Rohstoffen (Nawaro) und von ausgewählten organischen Resten aus Laboruntersuchungen verschiedener Autoren tabellarisch zusammengefasst. In die Tabelle wurden nur Pflanzen bzw. organische Reste aufgenommen, die auch im Rahmen dieses Projekts angebaut wurden, um die Werte vergleichen zu können.

Bei den spezifischen Biogas-/Methanerträgen des KTBL (2005) handelt es sich um Mittelwerte aus Laborergebnissen der an der KTBL-Arbeitsgruppe „Biogaserträge“ beteiligten Institutionen, die Einzelwerte wurden nicht veröffentlicht. Alle Mitglieder der Arbeitsgruppe sind im Anhang aufgeführt. Für die Praxis werden vom KTBL (2005) Richtwerte gegeben, die unter den Laborergebnissen liegen.

Lemmer (2005) untersuchte in seiner Arbeit die Kofementation von Grüngut in landwirtschaftlichen Biogasanlagen und verglich die Ergebnisse mit weiteren Durchflussversuchen an Mais. Kusch (2007) führte Feststofffermentationsversuche im Batch-Betrieb mit Maissilage durch und erzielte unter Laborbedingungen 401,2 LN CH<sub>4</sub>/kg oTS.

Für den Bereich der Vorbehandlung von Biomasse und deren Effekte auf die Biogasgewinnung liefert Amon (Amon et al., 2006 b) aktuelles Zahlenmaterial. Amon (Amon et al., 2006 b) untersuchte an Triticale als frische Ganzpflanze, Weizen als frische Ganzpflanze, kleereicher Wiesengrassilage und Sonnenblumensilage (á 30 g Frischmasse) fünf Vorbehandlungsstufen:

1. Keine Behandlung
2. Voransäuern (20%ige Zitronensäurelösung (C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>7</sub>), Einwirkdauer 24 h bei 20 °C, keine sichtbare Veränderung oder Erwärmung des Probenmaterials, Neutralisation mit 2%iger NaOH-Lösung)
3. Hitzebehandlung (Wasserdampf, Schnellkochtopf 0,4–0,8 bar Druck, 109–116 °C, 1 h, kein Wasserzusatz)
4. Mikrowellenbestrahlung (200 g Wasserzugabe, 15 Min, Mikrowellengerät mit 560 Watt)

5. IPUS-meth-max®-Behandlung (Zugabe von Tonmineralen 5 % bezogen auf TS)  
(IPUS meth-max®, vormals IPUS-zeo-lift-biokat)

In Tabelle 3.4.3.1 sind die Ergebnisse der Untersuchungen bezüglich der Spezifischen Biogas- und Methanausbeuten der behandelten und unbehandelten Energiepflanzen von Amon (Amon et al., 2006 b) zusammengestellt.

Für Triticale ergab sich nur bei den Behandlungsmaßnahmen Dampf (4 %) und IPUS meth-max® (12 %) ein positiver Einfluss auf die Methanausbeute. Beim Weizen wirkten die Vorbehandlungsmaßnahmen meist negativ. Allein die IPUS-meth-max®-Behandlung zeigte im Vergleich zur unbehandelten Variante eine Erhöhung der Methanausbeute um 22 %. Mit Ausnahme der Säurebehandlung konnte beim Wiesengras eine Steigerung der Methanausbeute um 16 % bis 29 % erzielt werden. Auf die Methanausbeute der Sonnenblumensilage wirkten sich alle Behandlungen mit Erhöhungen von 16 % bis zu 82 % (Mikrowellenbehandlung) positiv aus (Amon et al., 2006 b).

Tab. 3.4.3.1: Spezifische Biogas- und Methanausbeute der behandelten und unbehandelten Energiepflanzen (Amon et al., 2006 b)

Energiepflanze Behandlung	Biogasausbeute [NI Biogas (kg oTS) <sup>-1</sup> ]				Methanausbeute [NI CH <sub>4</sub> (kg oTS) <sup>-1</sup> ]			
	Mittelwert	n	STABW	relativ zur unbehandelten Variante	Mittelwert	n	STABW	relativ zur unbehandelten Variante
<b>Triticale</b>								
Unbehandelt	471	5	17,3	100	269	5	16,3	100
Dampfbehandelt	495	5	7,9	105	279	5	4,7	104
Mikrow.behandelt	493	5	18,7	105	231	5	9,3	86
Säurebehandelt	471	5	33,6	100	250	5	18,1	93
IPUS m-m	517	5	17,8	110	302	5	6,5	112
<b>Weizen</b>								
Unbehandelt	665	3	0,6	100	365	3	2,5	100
Dampfbehandelt	601	3	0,8	90	345	3	1,5	95
Mikrow.behandelt	617	3	48	93	358	3	28	98
Säurebehandelt	597	3	17,3	90	323	3	27,6	88
IPUS m-m	653	3	24,5	103	414	3	19,3	122
<b>Wiesengras</b>								
Unbehandelt	577	3	12,7	100	309	3	8,7	100
Dampfbehandelt	682	3	50,3	118	380	3	27,6	123
Mikrow.behandelt	737	3	44,7	128	399	3	26,4	129
Säurebehandelt	504	3	45,8	87	282	3	10	91
IPUS m-m	684	3	23,8	122	344	3	8,6	116
<b>Sonnenblumen</b>								
Unbehandelt	439	3	20,7	100	243	3	10,4	100
Dampfbehandelt	649	3	18,7	148	402	3	9,3	165
Mikrow.behandelt	709	3	25,8	162	443	3	12,3	182
Säurebehandelt	476	3	30,6	108	281	3	15,3	116
IPUS m-m	464	3	13,8	106	298	3	9,2	123

Aus den Ergebnissen seiner Untersuchungen zieht Amon den Schluss, dass die Behandlungsmaßnahmen pflanzenartspezifisch wirken. Am Beispiel der Dampfbehandlung zeigt er, dass diese bei Sonnenblumen und Wiesengras zu einer deutlichen Erhöhung der Methanausbeute (65 und 23 %) führte, während bei Triticale nur ein minimaler positiver und bei Weizen sogar ein negativer Effekt auftrat. Durch die Mikrowellenbehandlung konnte nur bei den Silagen eine Steigerung der Methanausbeute erzielt werden. Bei den frischen Getreidepflanzen war hingegen eine Verringerung von 2 bzw. 14 % zu verzeichnen. Die Säurebehandlung mit Zitronensäure wirkte sich, mit Ausnahme der Sonnenblumensilage (+16 %), negativ (-7 bis -12 %) auf die spezifische Methanausbeute aus. Nur der Einsatz des Tonminerals (IPUS meth-max®) führte immer zu einer gesteigerten spezifischen Methanausbeute (Triticale +12 %, Wiesengras +16 %, Weizen +22 %, Sonnenblumen +23 %) (Amon et al., 2006 b).

Die Behandlungsmaßnahmen Dampf, Mikrowellen und Säure wurden von Amon mit der Intention durchgeführt, dass die Rohfasern voraufgeschlossen und damit besser anaerob abbaubar werden. Tatsächlich waren positive Wirkungen nur bei Wiesengras und Sonnenblumen zu verzeichnen. Bei Getreide traten diese nicht auf. Als mögliche Ursachen für das unterschiedliche Verhalten der beiden Gruppen werden von Amon (2006 b) die Wirkung der Silierung und das Vegetationsstadium der Pflanze zur Ernte genannt, da Letzteres Gehalt und Zusammensetzung der Rohfaser beeinflusst. Hier wird von ihm weiterer Forschungsbedarf gesehen.

Die in allen Untersuchungen von Amon (2006 b) aufgetretene methanertragssteigernde Wirkung von IPUS meth-max® wird von ihm auf die physikalische Struktur (große innere Oberfläche) und chemischen Eigenschaften (reversible Bindung von Stoffen wie Ammonium und Carbonsäuren) des Mineralien-Präparats zurückgeführt.

### 3.4.4 Abschätzung des Biogas- bzw. Methanertrags

Wie bereits im Kapitel Grundlagen der Biogaserzeugung beschrieben, wurde von Buswell und Müller (1952) eine Gleichung zur Berechnung des theoretischen Methan- bzw. Biogasertrags anhand der Elementarzusammensetzung an Kohlen-, Sauer- und Wasserstoff des Ausgangssubstrats entwickelt, die von Boyle (1976) um die Stickstoff- und Schwefelanteile erweitert wurde.

Ein weiteres Modell zur Abschätzung der Biogasausbeute von nachwachsenden Rohstoffen entwickelte Keymer (1999). Der Autor nutzte die in der Tierernährung ermittelten Daten der Futterwerttabellen zur Zusammensetzung und zur Verdaulichkeit für Wiederkäuerfutter. Den Futterinhaltsstoffen Rohprotein, Rohfett sowie den Kohlenhydraten, getrennt nach N-freien Extraktstoffe (XX), und Rohfasern (XF), werden substratspezifische Verdauungsquotienten (VQ) der Wiederkäuer zugeordnet. Je nach Inhaltsstoff werden von Keymer (1999) die Ergebnisse der vorhergehenden Multiplikation noch mit den spezifischen Gasbildungsraten von Baserga (1998) multipliziert. Die Produkte dieser Berechnung werden aufsummiert und auf die Trockensubstanz bezogen.

Czepuck (2006) verglich die in eigenen Laboruntersuchungen ermittelten Methanerträge für Monosubstrate (wie Kohlenhydrate, Fette und Eiweiße) mit errechneten Methanerträgen nach Buswell und Müller (1952) sowie Keymer (1999) bzw. Baserga (1998). Czepuck (2006) stellte eine Überschätzung der Methanerträge nach Buswell und eine Unterschätzung nach Keymer (1999) gegenüber den praktisch ermittelten Werten fest. Als Ursache werden die Unterschiede in der Biomasseumsetzung im Biogasprozess angeführt verglichen einerseits mit der Energie, die aus der Elementarzusammensetzung zur Verfügung steht (Buswell und Müller, 1952), und andererseits mit Verdaulichkeitsfaktoren, die aus der Wiederkäuerfütterung abgeleitet wurden (Keymer, 1999).

Amon (2006 b) entwickelte das Methanenergiewertmodell (MEWM) für Mais, Getreide, Sonnenblumen und Wiesengras. Wie bei Keymer (1999) erfolgt die Berechnung anhand der Inhaltsstoffe Rohprotein, Rohfett, Rohfaser und N-freie Extraktstoffe mit dem Unterschied, dass inhaltsstoffspezifische Regressionskoeffizienten z.B. bei Mais anhand von 95 Datensätzen errechnet wurden. Nach Amon (2006 b) ist seine Schätzgleichung zur Kalkulation des Methanenergiewerts für Mais von hoher Genauigkeit.

Auf der Basis eines multiplen und linearen Regressionsmodells gibt Amon (2006 b) die Schätzgleichung des Methanenergiewertmodells folgendermaßen an:

$$\begin{aligned} \text{Methanenergiewert [NI CH}_4 \text{ (kg oTS)}^{-1}] = & x_1 \times \text{Rohprotein [\% TM]} \\ & + x_2 \times \text{Rohfett [\% TM]} \\ & + x_3 \times \text{Rohfaser [\% TM]} \\ & + x_4 \times \text{N-freie Extraktstoffe [\% TM]} \end{aligned}$$

In Tab. 3.4.4.1 sind die Regressionskoeffizienten zur Berechnung des Methanenergiewerts von Mais anhand der Rohnährstoffe nach Amon (2006 b) aufgeführt.

Tab. 3.4.4.1: Parameter der Regressionsgleichung zur Berechnung des Methanenergiewerts von Mais anhand der Rohnährstoffe (Amon, 2006 b)

Inhaltsstoff	Regressionskoeffizient	Signifikanz
Rohprotein	15,27	0
Rohfett	28,38	0,001
Rohfaser	4,54	0
N-freie Extraktstoffe	1,12	0,008
Qualitätsparameter der Gesamtgleichung: R <sup>2</sup> = 0,968; F-Wert = 1583,027; Durbin-Watson-Wert = 1,176; Signifikanzniveau = 0,000; n = 95		

Herrmann et al. veröffentlichten 2007 die Ergebnisse der Gärtest an verschiedenen Energiepflanzen und untersuchten die Korrelation zwischen den Inhaltsstoffen und den gemessenen Methanerträgen. Das höchste Bestimmtheitsmaß mit 0,6467 wurde zwischen dem spezifischen Methanertrag und dem mittleren Ligningehalt (ADL) festgestellt (Herrmann, 2007).

## **3.5 Bioethanolerzeugung**

Das folgende Kapitel gibt einen Überblick zu den Grundlagen und den Rohstoffen der Ethanolgewinnung. Des Weiteren werden Ethanolausbeuten und die Verwendung der Schlempe (Gärreste aus der Ethanolgewinnung) vorgestellt.

Die Gehalte an Zucker, Stärke und Cellulose der Biomasse geben die maximale Höhe der Alkoholausbeute vor, entscheidend für einen optimalen Gärverlauf sind aber auch andere Inhaltsstoffe (Senn, 2001 a). So werden von Senn (2001 a) als Beispiel hohe Rohfasergehalte stärkereicher Rohstoffe als problematisch für den Maischprozess angegeben. Ebenfalls problematisch sind höhere Proteingehalte, die zu Schaumbildung während der Fermentation führen, dagegen aber den Futterwert der Schlempe verbessern. Fett wiederum wirkt einer Schaumbildung entgegen (Senn, 2001 a).

### **3.5.1 Zucker- und stärkehaltige Rohstoffe**

Zucker und Stärke werden den Kohlenhydraten zugeordnet. Zucker besteht größtenteils aus Aldohexosen wie D-Glucose, D-Mannose und D-Galactose sowie deren Aminoderivaten (Schlegel, 2007). In den meisten höheren Pflanzenspezies ist Saccharose die Transportform für Kohlenhydrate (Richter, 1998).

Stärke wiederum ist aus hunderten bis tausenden alpha-1,4-glykosidisch verknüpften D-Glucoseeinheiten (Amylose) aufgebaut und der häufigste Speicherstoff der Pflanzen (Schlegel, 2007).

Auf kurze bzw. mittlere Sicht werden von Schmitz (2005) die zuckerreichen Zuckerrüben und die stärkereichen Getreidearten für Deutschland und Europa als die am besten geeigneten traditionellen Pflanzen eingestuft.

In tropischen und subtropischen Gebieten Afrikas, Asiens und Amerikas, beispielsweise Brasilien, wird Alkohol dagegen aus Zuckerrohr gewonnen (Senn, 2001 a).

Im Rahmen dieses Projekts standen mit den Fruchtfolgen nur stärkehaltige Rohstoffe, wie Triticale (Kreuzung aus Weizen und Roggen) und Mais, für die Bioethanolproduktion zur Verfügung. Die durchschnittlichen Stärkegehalte des Kornes bezogen auf die Frischmasse betragen sowohl für Weizen als auch Triticale 60 % bis 62 % (Senn, 2001 a). Die größte Bedeutung als Rohstoff für die Ethanolproduktion global gesehen besitzt der Mais mit einem Stärkegehalt im Korn von etwa 62,6 % (Senn, 2001 a).

Tabelle 3.5.1.1 gibt eine Zusammenfassung der Stärken und Schwächen traditioneller Rohstoffe hinsichtlich der Bioethanolerzeugung in Deutschland nach Schmitz (2005) (Auswahl).

Tab. 3.5.1.1: Stärken und Schwächen traditioneller Rohstoffe hinsichtlich der Bioethanolerzeugung (Schmitz, 2005) (Auswahl)

Landwirtsch. Rohstoff	Stärken	Schwächen
Weizen	+ hoher Stärkegehalt, gute Kornausbildung + gute Lagerfähigkeit + gute Verfügbarkeit, weltweit auf Märkten gehandelt + Flächenproduktivität bei Vergleich mit anderen Getreidearten hoch + gute Verarbeitungseigenschaften bei der Ethanolerzeugung und hochwertige Kuppelprodukte + relativ geringe Abwassermengen	- relativ hohe Ansprüche an den Boden - relativ teurer Rohstoff - im Vergleich zu zuckerhaltigen Rohstoffen und Kartoffeln geringe Flächenproduktivität
Triticale	+ hoher Stärkegehalt, gute Kornausbildung + nicht so anspruchsvoll wie Weizen im Hinblick auf Bodengüte, Düngung und Pflege + gute Verarbeitung bei Ethanolerzeugung + relativ hohe Ausbeute + Vorzüglichkeit auf schwachen Böden + kostengünstiger Rohstoff	- relativ geringe Flächenproduktivität - wird nicht wie Weizen auf internationalen Märkten gehandelt - Verfügbarkeit am Markt eingeschränkt
Körnermais	+ geringe Ansprüche an Boden + kann in Monokultur angebaut werden (Keine Fruchtfolge erforderlich) + hohe Flächenproduktivität + gute Verfügbarkeit; Deutschland ist Mais-Importland + gute verwertbare Kuppelprodukte (Öl, DDGS)	- Anbauflächen in Deutschland aufgrund klimatischer Restriktionen für Mais eingegrenzt - hoher Düngeraufwand erforderlich - Trocknung von Mais erfordert hohen Energieaufwand

### 3.5.2 Lignozellulosehaltige Rohstoffe

Wie Stärke und Zucker ist auch die Cellulose ein Kohlenhydrat. Cellulose setzt sich aus tausenden beta-1,4-glykosidisch verknüpften Glucosemolekülen zusammen. Der Grundbaustein ist das Disaccharid Cellobiose (Schlegel, 2007).

Cellulosemoleküle treten als kompakte Mikrofibrillen auf, die durch inter- und intramolekulare Wasserstoffbrückenbindungen fest verbunden sind. Die Mikrofibrillen verfügen außerdem über einen hohen Anteil an kristallinen Bereichen (Schopfer und Brennicke, 2006). Die Cellulosefibrillen sind von einer Matrix von Hemizellulose und Lignin umgeben (Schlegel, 2007).

Als eher mittel- bis langfristige Alternative zu zucker- oder stärkehaltigen Rohstoffen werden lignozellulosehaltige Rohstoffe angesehen (Schmitz, 2005).

Schmitz (2003) teilt die wichtigsten Zelluloselieferanten folgendermaßen ein:

1. Holz
2. Zellulosehaltige Rückstände
  - a. Stroh
  - b. Bagasse
  - c. Silagen
3. Häusliche Abfälle
4. Papierabfall

Die Biomasse besteht zu großen Teilen aus Zellulose, Lignin, Pektin und Hemizellulose. Zum einen werden ein quantitativ hohes Potenzial und zum anderen vergleichsweise geringere Kosten als bei stärke- bzw. zuckerhaltigen Rohstoffen abgeschätzt (Schmitz, 2005).

Die Ethanolgewinnung aus Lignozellulose bildet vor allem in Skandinavien, den USA, in Kanada und Brasilien einen Forschungsschwerpunkt (Schmitz, 2005). Katzen (1999) fasst die internationale Forschungstätigkeit auf dem Gebiet des Lignozelluloseeinsatzes für die Ethanolproduktion, speziell die Einsatzstoffe und Aufschlussmethoden, zusammen.

### 3.5.3 Grundlagen der Ethanolerzeugung

Die Alkoholherstellung aus stärkehaltigen Rohstoffen kann nach Pieper (1983) in vier Hauptabschnitte untergliedert werden:

1. Thermischer Stärkeaufschluss
2. Enzymatische Stärkeverzuckerung (Maischprozess)
3. Alkoholische Gärung (Gärprozess)
4. Destillation (Brennen)

Der thermische Stärkeaufschluss dient der Verflüssigung und Freisetzung der von Zellwänden umschlossenen Stärkekörner, um den nachfolgenden enzymatischen Abbau zu erleichtern (Pieper, 1983). Zum einen wird die Stärke mittels alpha-Amylasen (z.B. aus *Bacillus subtilis*) enzymatisch verflüssigt und zum anderen enzymatisch verzuckert. Dabei wird aus den Dextrinen der Verflüssigungsphase durch das Exo-Enzym Glucoamylase (z.B. aus *Aspergillus niger*) Glucose freigesetzt (Senn, 2001 a). Die enzymatische Stärkeverzuckerung ist wiederum die Voraussetzung dafür, dass die Hefen (z.B. *Saccharomyces cerevisiae*) die vergärbaren Zucker in Ethanol und Kohlendioxid umsetzen können (Pieper, 1983).

Ist der Gärprozess beendet, wird die Maische mittels Destillation in ein alkoholreiches Destillat (ca. 90 Vol.-%) und einen alkoholfreien Destillationsrückstand, die Schlempe, getrennt (Pieper, 1983).

Durch das Dispergier-Maischverfahren kann ein Schlempe-Recycling erfolgen, das wie folgt beschrieben werden kann (Senn, 2001 a):

- Rohstoffzerkleinerung mittels Rotor-Stator-Dispergiermaschine
- Reduktion des Energieverbrauchs und Verbesserung der Effektivität der Gärung
- Einsatz einer angepassten Enzymkombination für die Verzuckerung, damit auch Verbesserung des Destillationsverhaltens und der anschließenden Dekantation der Schlempen

Die Ethanolgewinnung aus stärkehaltigen Rohstoffen ist Stand der Technik, während der Einsatz von lignozellulosehaltigen Rohstoffen weiterhin Gegenstand der Forschung und Entwicklung ist. Für Letztere ist ein zusätzlicher Verfahrensschritt zur Aufspaltung der Zelluloseketten zu C6-Zuckern wie Glukose notwendig (Schmitz, 2003).

Tabelle 3.3.1 Verfahren zum Aufschluss und zur Verzuckerung von Lignocellulose (Precht et al., 2005 a, nach: Igelspacher, 2006) im Kapitel Substrataufbereitungsverfahren für die Biogas- und Ethanologewinnung gibt einen aktuellen Überblick.

### 3.5.4 Spezifische Ethanolausbeuten ausgewählter Substrate

Tab. 3.5.4.1 gibt einen Überblick zu den Alkoholausbeuten ausgewählter Pflanzen nach Angaben von Senn (2001 a) und Misselhorn (2004).

Tab. 3.5.4.1: Alkoholausbeute ausgewählter Pflanzen

<b>Rohstoff (nur Korn)</b>	<b>Vergärbare Kohlenhydrate [% mas]</b>	<b>Alkoholausbeute [l A/100 kg FM]</b>	<b>Quelle</b>
Weizen	60	40	Senn, 2001 a
Roggen	56-58	36-37	Senn, 2001 a
Triticale	>60	38-40	Senn, 2001 a
Mais	62-65	>40	Senn, 2001 a
Getreide	55-61	35-39	Misselhorn, 2004
Mais	60-63	38-40	Misselhorn, 2004
Rüben	7-18	4-11	Misselhorn, 2004

Aktuelle Untersuchungen zur Vorhydrolyse von Maissilage unter Variation der Temperatur, Verweilzeit und des Trockensubstanzgehalts im Hydrolysereaktor führte Fleischer durch (Fleischer und Senn, 2007). Anhand der nach der Vorbehandlung gemessenen Glucose wurden theoretische Ethanolausbeuten zwischen 14 bis 16 Litern Ethanol pro 100 kg Trockensubstanz errechnet. Soll die Vorbehandlungsdauer möglichst kurz sein, war bei einer Hydrolysetemperatur von 150 °C über 30 Minuten und einem Trockensubstanzgehalt von 15 % mit 17 Litern Ethanol aus 100 kg Rohstofftrockensubstanz ein energetisches Optimum erreicht.

Es werden bei Hektarerträgen für Getreide von 7 bis 9 t/ha Ethanolerträge von 1,9 bis 2,5 t/ha, für Mais bei 6 bis 7 t/ha entsprechend 1,8 bis 2,2 t/ha Ethanol und für Lignocellulose (chem. Hydrolyse) bei 10 t/ha entsprechend 1,4 bis 2,4 t/ha Ethanol angegeben (FNR, 2002).

Igelspacher (2006) stellte die Massenbilanzen für verschiedene kommerzielle Verfahren zusammen, bei denen allerdings schon stark lignifizierte Stoffe wie Mais- und Weizenstroh zum Einsatz kamen, siehe Tabelle 3.5.4.2. Zum Aufschluss des Materials wurden eine stark saure Totalhydrolyse (Arkenol), eine schwach saure Hydrolyse mit Heißwassernachbehandlung (NREL) oder die Dampf-Explosion kombiniert mit enzymatischer Hydrolyse (logen) durchgeführt. Der logen-Prozess wurde von Tolan (1999) detailliert beschrieben. Nach eigenen Kalkulationen lagen die Ethanolausbeuten in Massenprozent vom Input für Lignocellulose des Maisstrohs zwischen 25,6 und 36,5 sowie zwischen 32,2 und 39,5 für Weizenstroh.

Tab. 3.5.4.2: Eigene Kalkulation zur Ethanolausbeute in Massenprozent des Inputs nach Daten von Igelspacher (2006)

1000 t/a	NREL-Verfahren		Arkenol-Verfahren		logen
	Maisstroh	Weizenstroh	Maisstroh	Weizenstroh	Maisstroh
Lignocellulose	52,6	48,8	43,3	40	680
Ethanol	15,7	15,7	15,8	15,8	174
Massen-% A	29,8	32,2	36,5	39,5	25,6

### 3.5.5 Schlempe als Nebenprodukt

Als Nebenprodukt der Destillation fallen pro Liter Alkohol zwischen 10 l und 15 l flüssige Rückstände, die sogenannte Schlempe, an (Senn, 2001 a) (Pieper, 1983). Sie ist nahezu frei von Stärke bzw. deren Abbauprodukten und besteht hauptsächlich aus Eiweiß, Fett, Mineralstoffen und Rohfaser (Pieper, 1983). Nach Braun (1982) sind 74 bis 95 % der Trockensubstanz organisch. Durch den Hefeeinsatz während der Vergärung werden zusätzlich Eiweiß und Vitamine zugeführt. Schlempe kann als Düngemittel, als Futtermittel oder als Rohstoff für die Biogasproduktion eingesetzt werden. Durch Schlempe-Recycling im Maischprozess kann die anfallende Menge stark reduziert werden, dadurch wird die Transportwürdigkeit aufgrund der aufkonzentrierten Inhaltsstoffe erhöht (Senn, 2001 a).

Pieper (1983) gibt für die Einteilung von Schlempen und Schlempeprodukten nach Deutscher Futtermittelverordnung in  
Schlempe,  
Schlempefeststoffe, getrocknet  
Schlempelösung, getrocknet  
Schlempe, getrocknet  
unter weiterer Detaillierung auch die englischen Übersetzungen nach American Feed Control Officials an.

### ***Schlempe als Futtermittel***

Schlempe kann als hochwertiges Futtermittel Verwendung finden. Am besten ist der Einsatz von Getreideschlempe bei Wiederkäuern (besonders bei Mastrindern) möglich, aber auch bei der Schweinefütterung (Kirchgeßner, 2004). Sie kann entweder frisch oder, wenn die Fütterung nicht sofort erfolgen kann, getrocknet gelagert und später eingesetzt werden (Senn, 2001 a).

Zur Vereinfachung der Trocknung wird die Schlempe zuerst mit Siebeinrichtungen oder Dekantern in Dünnschlempe und Schlempe-Feststoffe separiert (Senn, 2001 a). Beim Einsatz von Sieben weisen die Feststoffe einen Trockenmassegehalt von 10 bis 15 % auf. Durch die Nutzung von Dekantern kann der Trockenmassegehalt auf 30 bis 35 % gesteigert werden (Senn, 2001 a). Die Dünnschlempe wird in Zentrifugen oder Absetzbecken geklärt und kann über Verdampfer sowie über Sprüh- oder Walzentrockner noch höher bis zum Dünnschlempe-Sirup (Dried Distillers Solubles = DDS) konzentriert werden (Pieper, 1983).

Sollen die gesamten Nährstoffe der Schlempe in ein Futtermittel überführt werden, muss der Dünnschlempe-Sirup homogen in die Schlempe-Feststoffe gemischt werden. Dieses auf 90 bis 95 % Trockenmasse getrocknete Produkt wird auch als Distillers Dried Grains and Solubles (DDGS) bezeichnet.

Eine Zusammenfassung der Inhaltsstoffe Rohprotein, Rohfett, Rohfaser, Stickstofffreie Extraktstoffe (NfE) und Asche nach Kling und Wöhlbier (1983) für verschiedene Schlempen gibt Senn (2001 b).

Behmel und Meyer-Pittroff veröffentlichten 1998 eine Massenbilanz für eine Kartoffelbrennerei. Ausgehend von 3333 t Kartoffeln mit 20 % TS, wurden 316 t Alkohol, 39 t Verluste und 311 t Schlempe produziert. Die Schlempe diente zur Produktion von 158 t Biogas sowie 13,86 t Stickstoff, 0,13 t Natrium, 0,09 t Kalzium,

15,46 t Kalium, 10,8 t Schwefel, 1,98 t Phosphor und 0,63 t Magnesium (Behmel und Meyer-Pittroff, 1998).

### ***Schlempe als Düngemittel***

Da Schlempe Mineralstoffe enthält, kann sie auch als Dünger eingesetzt werden (Senn, 2001 a). Sie muss aber frisch ausgebracht werden oder unter Zusatz von Konservierungsmitteln gelagert werden, da es sonst zu Geruchsemissionen kommt, die als sehr unangenehm empfunden werden (Senn, 2001 a) (Senn, 2001 b).

Von Morar (2003) wurden im Ablauf einer Kartoffelbrennerei bzw. im Zulauf einer nachgeschalteten Biogasvergärung (mit Zugabe von gehäckselten Kartoffeln und Maissilage) 1,57 bis 2,72 g kg<sup>-1</sup> Gesamtstickstoff, 0,55 bis 0,85 g kg<sup>-1</sup> Phosphor und 2,56 bis 3,33 g kg<sup>-1</sup> Kalium gemessen.

### ***Schlempe als Rohstoff zur Biogasgewinnung***

Nach Braun (1982) weisen Schlemphen aus der Alkoholherstellung einen Trockensubstanzgehalt (TS) zwischen 30 und 120 g l<sup>-1</sup> sowie einen chemischen Sauerstoffbedarf (CSB) von 40 bis 130 g O<sub>2</sub> l<sup>-1</sup> auf. Die Biogasausbeute ist abhängig vom eingesetzten Rohstoff und beträgt zwischen 17 und 30 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> Schlempe bei einem Methangehalt zwischen 55 und 75 % (Braun, 1982). Der Autor gibt außerdem einen kurzen Überblick über die Ergebnisse der Methangärung diverser Abfälle der Gärungsindustrie verschiedener Autoren vom Anfang der 60er Jahre bis zum Anfang der 80er Jahre des 20. Jahrhunderts (Braun, 1982).

Aktuelle Daten zur anaeroben Behandlung von Schlempe sind bei Morar (2003) zu finden. Für 5-Liter-Batchversuche werden von Morar (2003) Methanerträge für Weizenschlempe zwischen 0,392 und 0,534 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg oTS und Biogaserträge zwischen 0,819 und 0,922 m<sup>3</sup>/kg oTS angegeben. Bei Untersuchungen derselben Autorin mit dem Hohenheimer Biogasertragstest (HBT) mit Weizenschlempe unter Variation des Mischungsverhältnisses zwischen Schlempe und Impfsupstrat wurden Biogaserträge zwischen 0,766 und 0,922 m<sup>3</sup>/kg oTS erzielt. Die Vergärung von Triticaleschlempe im HBT erbrachte einen Biogasertrag von 0,832 m<sup>3</sup>/kg oTS und einen Methanertrag von 0,502 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg oTS (Morar, 2003).

Nach Kalkulationen von Gleixner kann eine Brennerei bis zu 90 % ihres Energiebedarfs durch die energetische Verwertung der Schlempe gewinnen. Die

Wärme aus dem Blockheizkraftwerk (BHKW) wird dabei als Druckwasser mit 125 °C oder als Niederdruckdampf genutzt. Bei einem Trockensubstanzgehalt von 7 % werden von Gleixner folgende Biogasausbeuten in m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> Schlempe angegeben: Kartoffel 36, Weizen 38, Roggen 40 und Mais 45 (Gleixner, 2004).

Langhans (2007) empfiehlt für Schlempen mit ca. 7 % TS eine Vorhydrolyse von 3 bis 5 Tagen, um die Prozessstabilität bei einer Methangärung von 12 bis 16 Tagen zu gewährleisten. Bei Schlempekonzentrationen von 12 bis 14 % TS und entsprechenden Ammoniakkonzentrationen können diese toxisch auf die Mikroorganismen wirken. Langhans (2007) sieht vor allem Optimierungsbedarf in einer erhöhten Leistungsfähigkeit gerade bei der Schlempevergärung in großen Behältern sowie beim Ersatz von Schwefelsäure in der Ethanolproduktion, um die Schwefelwasserstoffbildung bei der Methangärung zu mindern.

Aktuellen Kalkulationen zur Produktion von Bioethanol als Treibstoff unter dem Aspekt der Energie-, Kosten- und Ökobilanz widmet sich Senn (2003). Teil seines Konzepts ist die Vergärung von Schlempe und weiteren Feldfrüchten in einer der Brennerei angeschlossenen Biogasanlage zur Verstromung des Biogases in einem BHKW, um so den Wärmebedarf der Brennerei aus regenerativen Energiequellen zu decken (Senn, 2003).

Wetter und Brüggling erstellten 2004 eine Machbarkeitsstudie zur Bioethanolproduktion in landwirtschaftlichen Brennereien. Die Ergebnisse ihrer Studie zeigten, dass es aus ökonomischer Sicht nur möglich ist, bereits bestehende Anlagen zu nutzen. Aus ökologischer und sozialer Sicht sind landwirtschaftliche Brennereien aber positiv zu bewerten und sollten deshalb durch die Politik unterstützt werden (Wetter und Brüggling, 2004).

### 3.6 Energie- und Ökobilanzierung

Die historische Entwicklung der Ganzheitlichen Bilanzierung und der Ökobilanzierung wird von Eyerer und Saur (1996) umfassend dargestellt. Auch bei der methodischen Vorgehensweise bei Bilanzierungen soll an dieser Stelle auf Saur und Eyerer (1996) verwiesen werden. Die softwarebasierte Modellbildung im Rahmen einer Ganzheitlichen Bilanzierung wird von Florin et al. (1996) beschrieben.

Im Folgenden soll ein kurzer Überblick zu Biomassepotenzialen in Deutschland und zu Ökobilanzen der Biomassekonversion in Ethanol und Biogas zur Bereitstellung von Kraftstoffen, elektrischer und thermischer Energie anhand von Veröffentlichungen verschiedener Autoren gegeben werden.

Kaltschmitt (1996) schätzte vor mehr als zehn Jahren die Nettoenergiepotenziale des energetisch nutzbaren Aufkommens von Nebenprodukten und Abfällen aus der Land- und Forstwirtschaft auf 274,08 PJ/a und die Nettoenergiepotenziale des Energiepflanzenbaus zur Erzeugung fester Brennstoffe auf 713,8 PJ/a. Der Autor analysierte die energetische Nutzung von Biomasse mittels Ansätzen der Ganzheitlichen Bilanzierung u.a. anhand von Energieaufkommen und Emissionen und stellte sie konventionellen Alternativen gegenüber. Kaltschmitt (1996) bewertet die Möglichkeiten der Ganzheitlichen Bilanzierung zur differenzierten vergleichenden Analyse und Beschreibung gesamter Prozessketten als positiv. Kritisch sieht der Autor hingegen den Aufwand zur Erhebung und Bereitstellung umfassender Datensätze, z.B. Emissionen beim Pflanzenanbau.

Das aktuell technisch nutzbare Potenzial für Energie aus Biomasse wird nach einer Studie im Auftrag des Bundesverbandes der deutschen Gas- und Wasserwirtschaft und der Deutschen Vereinigung des Gas- und Wasserfachs (BGW und DVGW, 2005) für die Bundesrepublik Deutschland maximal mit 857 PJ/a für das thermochemisch nutzbare Potenzial (Verbrennung, Vergasung) und maximal mit 260 PJ/a für das biochemisch nutzbare Potenzial (Vergärung zu Biogas) angegeben. Nach derselben Studie stehen von der landwirtschaftlichen Ackerfläche in Deutschland von etwa 12 Mio. ha, die hauptsächlich zur Nahrungsmittelproduktion genutzt wird, aus Stilllegungsflächen noch etwa 550.000 ha zum Anbau von Pflanzen zur thermochemischen oder biochemischen Verwertung zur Verfügung. Dabei wurden von den Stilllegungsflächen schon diejenigen abgezogen, die zum Anbau von Raps zur Ölgewinnung, Getreide zur Bioethanolgewinnung und zu anderer stofflicher

Nutzung benötigt werden. Unter der Annahme, dass die 550.000 ha zum Anbau von Mais für die Biogasgewinnung verwendet werden und ein Ertrag von 45 t/ha vorausgesetzt wird, bei einer Biogasausbeute von 180 m<sup>3</sup>/t und einem Methananteil von 55 %, stünden 2,4 Mrd. m<sup>3</sup>/a Methan und damit 86,4 PJ/a zur Verfügung (BGW und DVGW, 2005). Durch Flächenzuwachs und Ertragssteigerungen im Energiepflanzenanbau werden deutliche Zuwächse erwartet. Dazu ließen sich die Flächen, die zurzeit für den Rapsanbau zur Kraftstoffgewinnung genutzt werden, viel effizienter für die Biogasgewinnung einsetzen, da für diesen Prozess mehr Trockenmasse pro Hektar und nicht nur ölhaltige Pflanzenteile zur Verfügung stehen.

Eine umfassende Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse im Allgemeinen wurde von Fritsche et al. 2004 vorgelegt. Bei vollständiger Ausnutzung der Potenziale könnten 16 % des Stroms, 10 % der Wärme und 12 % des PKW-Treibstoffs aus Reststoffen und Energiepflanzen gewonnen werden. Die Resultate ihrer Bilanzierung ordnen die Autoren als Beleg für die Vereinbarkeit der Zielsetzung einer nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse einerseits und der Ziele des Umwelt- und Naturschutzes andererseits ein, wobei darüber hinaus Potenziale für Synergieeffekte erwartet werden. Die Autoren verweisen auf den nationalen Bezug ihrer Bilanz und raten zu einer Regionalisierung anhand konkreter Fragestellungen für geeignete Modellregionen (Fritsche et al., 2004).

Von Nitsch et al. (2004) werden als Ergebnis der Studie „Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland“ eine Reihe von Schlussfolgerungen abgeleitet. Neben allgemeinen Forderungen wie der Erhöhung der Umwandlungs- und Nutzungseffizienz aller Energieträger und der Stärkung der Kraft-Wärme-Kopplung werden u.a. auch konkrete Aussagen für die energetische Biomassenutzung wie ihre beachtlichen Potenziale auch bei Einhaltung hoher Naturschutzziele, der vorrangige Einsatz biogener Reststoffe zur stationären Gewinnung thermischer und elektrischer Energie getroffen. Aufgrund hoher Differenzkosten und der relativ hohen CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten wird zu einer eher zurückhaltenden Forcierung von Biokraftstoffen geraten. Wobei hier weiterer Untersuchungsbedarf zu den Wechselwirkungen bzw. der Flächen- und Ressourcenkonkurrenz zwischen der Kraftstoffgewinnung und dem stationären Einsatz der Biomasse angemerkt wird (Nitsch et al., 2004).

Dreier führte 1999 eine Ganzheitliche Bilanzierung biogener Kraftstoffe durch und kommt zu dem Schluss, dass diese eine wertvolle Basis für die künftige Energieversorgung bilden. Der Autor begründet das mit den einfachen und bekannten Techniken der Biomassekonversion, der allgemein guten Verfügbarkeit auf regionaler Ebene und den weitgespannten Einsatzmöglichkeiten. Da Dreier (1999) andere Energiepflanzen, beispielsweise Raps, Zuckerrüben und Miscanthus, für seine Bilanz auswählte, sind seine Ergebnisse nicht direkt mit denen der vorliegenden Arbeit vergleichbar.

Fleischer und Senn (2007) verglichen in ihrer Bilanzierung eine konventionell mit Energie versorgte Brennerei mit einer Brennerei, die sich über eine Biogasanlage autark versorgte. Als Input-Material für die Brennerei wurde zum einen Triticalekorn verwendet, in einem anderen Szenario wurde eine kombinierte Vergärung von Triticalekorn mit Maissilage gewählt. Als energetisch und ökologisch vorteilhaftestes seiner vier Szenarien identifizierten Fleischer und Senn (2007) das Szenario mit ausschließlicher Triticalekornnutzung in der Brennerei und einer autarken Energieversorgung über die angeschlossene Biogasanlage. Am ungünstigsten aus energetischer und ökologischer Sicht schnitt das Szenario mit der Kombination von Triticalekorn und Maisganzpflanze in der Brennerei und einer „fossilen“ Energieversorgung ab (Fleischer und Senn, 2007). Die Autoren begründeten ihre Ergebnisse mit dem hohen Energieaufwand im Brennereiprozess bei der Maisganzpflanzennutzung, der den Energiegewinn unter den der Vergleichsszenarien sinken lässt. Fleischer und Senn (2007) zeigen, dass der Einsatz von Maissilage zur Ethanolgewinnung grundsätzlich möglich ist, sie sehen aber weiteren Entwicklungsbedarf bei der Effizienzsteigerung bei der Umwandlung von cellulosehaltigem Material in Ethanol.

Senn und Lucà erstellten 2002 eine Energie- und Kostenbilanz zur Bioethanolproduktion aus Getreide mit einer Jahres-Produktionskapazität von 2,5 und 9 Mio. Litern. Diese Bilanz wurde 2003 von Senn noch um eine Ökobilanz erweitert. Dabei werden die Schlempe und Energiepflanzen in einer der Brennerei angeschlossenen Biogasanlage vergoren, und das Biogas wird in einem BHKW verstromt, um so den Wärmebedarf der Brennerei aus regenerativen Energiequellen zu decken (Senn, 2003). Es wird gezeigt, dass das Konzept der nachhaltigen Ethanolproduktion in dezentralen Brennereien zu einer Verbesserung der

Energiebilanz und einer positiven Ökobilanz des energieintensiven Brennereiprozesses führt (Senn, 2003).

Stelzer (1999) verglich die Umweltwirkungen u.a. von Ethanol aus Zuckerrüben, Winterweizen und Kartoffeln mit denen von konventionellen Kraftstoffen. Abgesehen von einigen Szenarien der Ethanolgewinnung aus Kartoffeln, wurde bei allen Lebenswegen der Bioenergieträger weniger fossile Primärenergie eingesetzt, als für den gleichen Verwendungsnutzen an fossilen Energieträgern notwendig wäre. Die Ethanolgewinnung aus Zuckerrüben zeigte die höchsten Einsparpotenziale an fossilen Energieträgern. Die Höhe der Einsparung sowohl an fossilen Energieträgern als auch an Treibhausgasemissionen, ausgedrückt in CO<sub>2</sub>-Äquivalent, ist vor allem von einer effizienten Umwandlungstechnik, der Höhe des Biomasseertrags und der Nutzung von Kuppelprodukten abhängig (Stelzer, 1999).

Igelspacher (2006) entwickelte eine Methode zur integrierten Bewertung von Prozessketten am Beispiel der Ethanolerzeugung aus Biomasse. Im Vergleich mit fossilem Ottokraftstoff lag der Energiebedarf der untersuchten Verfahrenstechniken höher. Andererseits wird bei der Ethanolproduktion weniger Energie aus nichtregenerativen Quellen eingesetzt. Auch die Treibhausgasemissionen reduzieren sich um mindestens 30 %, da Kohlenstoffemissionen aus dem Pflanzenmaterial nicht berücksichtigt werden.

Schmitz (2005) führte die Ergebnisse von 12 Studien zusammen, die sich auf die Energie- und Treibhausgasbilanzen der Bioethanolerzeugung beziehen. Der Autor berücksichtigte folgende Studien: Senn und Luca (2002), Wagner und Igelspacher (2003), Shapouri et al. (2002), Armstrong et al. (2002), Stelzer (1999), Reinhardt und Zemanek (2000), Jonk (2002), Elsayed et al. (2003), General Motors et al. (2002), Schmitz (2003), Gärtner und Reinhardt (2003) sowie de Carvalho Macedo et al. (2003). Schmitz (2005) gibt Out-Input-Verhältnisse für die Ethanolproduktion von 3,03 (Senn und Luca, 2002), 1,34 (Shapouri et al., 2002), 2,4 bis 2,8 (Jonk, 2002), 2,4 (General Motors et al., 2002) und 8,3 bis 10,2 (de Carvalho Macedo et al., 2003), bei Letzterem handelt es sich um Bioethanol aus Zuckerrohr in Brasilien, an. Schmitz (2005) fasst die Flächenerträge über die Ethanolproduktion wie folgt zusammen: Zuckerrüben 71 GJ/ha, Weizen 33 GJ/ha (Stelzer, 1999), Zuckerrüben 87,6 bzw. 124 GJ/ha (Reinhardt und Zemanek, 2000) und Zuckerrüben 100 GJ/ha (Jonk, 2002).

Scholwin et al. (2006 b) bilanzierten die Biogaserzeugung aus nachwachsenden Rohstoffen wie Mais-, Gras- und Roggenganzpflanzensilage sowohl separat als auch

in Kombination mit Rinder- und Schweinegülle. Die Ergebnisse belegen den positiven ökologischen Effekt der Vergärung von Gülle mit Energiepflanzen und anschließender Verstromung des Biogases gegenüber reiner Güllelage. Beim alleinigen Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen wird eine hohe Anlageneffizienz gefordert, da der Energiepflanzenanbau mit Umweltwirkungen verbunden ist und beispielsweise bei dem Verzicht auf die Wärmenutzung oder eine Abdeckung des Gärrestlagers Potenziale zur Emissionsminderung verschenkt werden. Allgemein aber werden die ökologischen Effekte des Baus und Betriebs von Biogasanlagen als verhältnismäßig gering eingestuft. Die Untersuchungen von Scholwin et al. (2006 b) zeigen, dass Maissilage und die Kombination Maissilage und Roggen-ganzpflanzensilage hinsichtlich der Flächenenergieerträge klar vor anderen Optionen wie z.B. Grassilage liegen. Genauso wie bei der vorliegenden Arbeit erscheint über die Stromgutschriften anhand der gewählten Wirkungskategorien die Auswahl von Mais auch aus ökologischer Sicht vorteilhaft. Scholwin et al. (2006 b) verweisen aber darauf, dass andere Bewertungsfaktoren und spezielle regionale oder lokale Gegebenheiten zu anderen Ergebnissen führen können und diese deshalb nicht pauschal verallgemeinert werden können. Die Autoren sehen weiteren Forschungsbedarf bezüglich technischer Maßnahmen zur Emissionsminderung entlang der Bereitstellungskette von der Lagerung, über die Substratzufuhr der Biogasanlage, den Fermenter und das BHKW bis hin zur Gärrestlagerungstechnik (Scholwin et al., 2006 b).

Eine detaillierte Lebenszyklusanalyse einer Biogasanlage im Industriemaßstab (1 MW) veröffentlichte Hartmann 2006. Der Autor verweist darauf, dass in seinem Standardszenario 87,6 % aller ökologischen Effekte von der Energiepflanzenproduktion verursacht wurden. Auch hier lautet die Schlussfolgerung, dass Anbausysteme mit höheren Hektartrockenmasseerträgen geringere ökologische Auswirkungen hervorrufen als die mit niedrigeren Hektarerträgen (Hartmann, 2006). Der Autor verglich anhand der Maissilageproduktion mit Eco indicator '99H-Punkten Szenarien des Standardanbaus und des extensiven Anbaus mit einem Szenario ohne Flächenbelegung. Hier erwies sich der Standardanbau nach der Bewertung mit dem o.g. Punktsystem am unvorteilhaftesten, während das Szenario ohne Flächenbelegung am besten abschnitt. Hartmann (2006) gibt aber zu bedenken, dass aus pragmatischer Sicht keine ökologischen Effekte berücksichtigt werden müssten, wenn die

Energiepflanzen beispielsweise auf Flächen produziert würden, die sonst mit dem gleichen Anbausystem genutzt und sich nur durch den Verwendungszweck der Biomasse unterscheiden würden. Der Transport von Energiepflanzen und der Gärreste verursachte in diesem Modell weniger als 5 % der Umweltwirkungen des gesamten Systems. Die Nutzung der Gärreste als Düngemittel zeigte auch hier positive Umwelteffekte. Der Autor merkt aber weiteren Untersuchungsbedarf bei der emissionsarmen Ausbringung von Gärresten unter Praxisbedingungen an (Hartmann, 2006). Ein hohes Minderungspotenzial der ökologischen Effekte um 29 % wurde bei dem Einsatz einer Brennstoffzelle anstelle eines Gasmotors errechnet. Dies ist auf die hohe Umwandlungseffizienz der Brennstoffzelle zurückzuführen (Hartmann, 2006).

Wegener et al. (2007 a, 2007 b) führten Untersuchungen mit dem Ziel durch, den optimalen Verwendungszweck von Biogas bzw. optimale Nutzungspfade für landwirtschaftliche Biomasse zu identifizieren. Die Autoren bestätigen die Einschätzung Hartmanns (2006) bezüglich der Vorteilhaftigkeit des Einsatzes von Brennstoffzellen gegenüber einem BHKW zur Verstromung von Biogas aufgrund der höheren CO<sub>2</sub>-Minderungseffekte (Wegener et al., 2007 b). Die Autoren erweiterten den Ansatz der Biomassepotenziale und verglichen verschiedene Nutzungspfade hinsichtlich ihrer Treibhausgas-Minderungspotenziale (Wegener et al., 2007 a). Aus technischer Sicht werden hier zwei Nachteile der Biogaserzeugung gegenüber der Feststoffverbrennung angeführt, wie der geringere Umsetzungsgrad der biochemisch gebundenen Energie und der Eigenwärmebedarf der Biogasanlage (Wegener et al., 2007 a). Allerdings blieb bei der Bilanzierung der Düngewert der Gärreste unberücksichtigt und damit ein Vorteil der Biogasgewinnung.

Bachmaier et al. (2007 a, 2007 b) untersuchten die Einflussfaktoren auf die Klimabilanz landwirtschaftlicher Biogasanlagen anhand von Betriebstagebüchern und Einzelmessungen an fünf Praxisanlagen ergänzt durch Daten aus Literaturrecherche. Im Ergebnis war die Klimabilanz der Biogasanlagen deutlich besser als die Stromproduktion im deutschen Kraftwerksmix. Weitere Potenziale zur Verbesserung der Klimabilanz wurden identifiziert, wie die Erhöhung des Wirtschaftsdüngeranteils, die Steigerung der Wärmenutzung, die Methanemissionsminderung und die Stromeigenversorgung der Biogasanlagen (Bachmaier et al., 2007a, 2007b).

Wilfert et al. widmeten sich 2004 den technischen, ökologischen und ökonomischen Aspekten der Biogasgewinnung aus Gülle, organischen Abfällen und angebauter Biomasse. Auch sie schlussfolgerten aus ihren Ergebnissen, dass Biogas zur Substitution von fossilen Energieträgern und zu einer deutlichen Reduktion an klimawirksamen Substanzen beitragen kann. Sie empfehlen, die Potenziale der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) gerade bei der Wärmenutzung auszuschöpfen. Die Autoren stellen die große Bedeutung des verantwortungsvollen Umgangs mit den Gärresten sowohl bei der Lagerung als auch bei der Ausbringung in den Vordergrund (Wilfert et al., 2004).

### **3.7 Optimierungspotenziale der Aufbereitung und der Konversion von Energiepflanzen zu Biogas und Bioethanol**

#### ***Biomasseaufbereitung***

Die Optimierungspotenziale der Aufbereitung von Biomasse sind eng mit der eingesetzten Biomasse und dem gewählten Konversionsverfahren verbunden. Für den mikrobiellen Umbau von Pflanzenmasse in Biogas oder Bioethanol ist es grundsätzlich vorteilhaft, eine große Oberfläche zu schaffen, um einen schnellen und möglichst vollständigen Umsatz in den Energieträger zu erreichen.

Der Biomassevoraufschluss kann auf biologischem (enzymatisch), chemischem, thermischem oder mechanischem Weg bzw. in Kombination verschiedener Verfahren erfolgen, dabei gilt es, möglichst energieeffiziente Verfahren, die optimal auf den anschließenden Konversionspfad abgestimmt sind, zu entwickeln.

#### ***Ethanolgewinnung***

Für den Ethanolbereich werden von Schmitz (2003) folgende Forschungsansätze für den Input der Ethanolerzeugung genannt:

- Züchtung von Getreide auf Inhaltsstoffe und höhere Flächenerträge
- Züchtung geeigneter Pflanzen bei Verwendung von lignozellulosehaltigen Rohstoffen
- Züchtung geeigneter Mikroorganismen zum Abbau lignozellulosehaltiger Rohstoffe sowie von C<sub>5</sub>-Zucker-Verwertern
- Reduktion des Wassereinsatzes durch Recyclingverfahren
- Gewinnung thermischer Prozessenergie durch Biogasnutzung
- Personalschulung für erhöhte Effizienz

Für den Prozess der Ethanolerzeugung selbst werden von Schmitz (2003) u.a. folgende Forschungsansätze angeführt:

- Ausbeuteerhöhung der Fermentation durch die Auswahl neuer Mikroorganismen mit größerer Alkohol- und Temperaturtoleranz
- Reduktion des Energieeinsatzes durch Optimierung der Prozessführung
- Weiterentwicklung der Analytik zur besseren Steuerung der Prozesse
- Einsatz genetisch veränderter Organismen zum Aufschluss und zur Fermentation kostengünstiger Stoffe aus Zellulose

- Aufstellung von Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanzen, um den aktuellen Stand der Technik für Deutschland abzubilden

### **Biogasgewinnung**

Basierend auf den Angaben von Schmitz (2003) für den Ethanolbereich wurden von Schumacher und Lemmer (2007) für den Biogasbereich folgende Forschungsansätze für den Input zusammengefasst:

- Züchtung von Getreide, besonders Mais, auf energiereiche Inhaltsstoffe, reduzierten Ligninanteil und höhere Flächenerträge
- Züchtung weiterer ertragsstarker Arten zur Diversifikation der Fruchtfolgen
- Screening und Produktion technischer Enzyme zum effizienten Voraufschluss lignozellulosehaltiger Rohstoffe
- Personalschulung für erhöhte Effizienz

Für den Prozess der Biogasgewinnung könnten folgende Forschungsansätze in Zukunft von Interesse sein (Schumacher und Lemmer, 2007):

- Screening von Mikroorganismen des anaeroben Abbaus mit dem Ziel der Maximierung der Stoffumsatzleistung im Fermenter
- Reduktion des Energieeinsatzes durch Optimierung von Rühr- und Eintragssystemen
- Substratangepasste Optimierung der Fermentersysteme, Einsatz mehrphasiger Verfahren
- Weiterentwicklung der Analytik zur besseren Steuerung der Prozesse
- Effizienzsteigerung durch neue Biogasnutzungs- und Gasaufbereitungskonzepte (SNG, Mikrogasnetze etc.)
- Effizientere Wärmenutzung bei Einsatz von BHKW
- Aufstellung von Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanzen, um auch hier den aktuellen Stand der Technik für Deutschland darzustellen

### 3.8 Folgerungen für die Arbeit

Ziel der vorliegenden Arbeit war die Gewinnung und Bereitstellung einer aktuellen und breiten Datenbasis für spezifische Biogas- bzw. Bioethanolerträge verschiedener Energiepflanzen. Dazu wurden im Biogasbereich bestehende Laborkapazitäten für Untersuchungen zur Flüssigvergärung im Batchbetrieb in 30-L-Fermentern genutzt und zusätzlich Kapazitäten für den Hohenheimer Biogasertragstest (HBT) an der Agrartechnik der Universität Hohenheim aufgebaut. Im Ethanolbereich wurden bestehende Laborkapazitäten der Gärungstechnologie zur Bestimmung von Ethanolerträgen bzw. zur Biomasseaufbereitung eingesetzt.

Es erfolgten praktische Untersuchungen:

- zum Vergleich der Abbaukinetik von Mais und Triticale unterschiedlicher physiologischer Reife im Biogasprozess bei unterschiedlicher Biomassevorbehandlung,
- zur Ermittlung der spezifischen Bioethanolerträge ausgewählter Energiepflanzen und
- zur Ermittlung der spezifischen Methanerträge ausgewählter Energiepflanzen, unter Variation der Sorte, der Stickstoffdüngung und des Erntetermins, sowie an den Schlempen aus den Ethanoluntersuchungen

Basierend auf den Ergebnissen der Laboruntersuchungen waren

- die vereinfachte Kalkulation des spezifischen Methanertrags von Mais anhand der Inhaltsstoffbestimmung mittels NIRS und
- die vergleichende Energie- und Ökobilanz zu Silomais und reifer Triticale über die Konversionspfade Biogas- und Ethanologewinnung unter Berücksichtigung des Aufbereitungsverfahrens Steam Explosion

Bestandteil dieser Arbeit.

Ziel war es, die Datenbasis zur biochemischen Biomassekonversion zu verbreitern und zu vertiefen, um so die Entscheidungsfindung über den optimalen Einsatz von Energiepflanzen zur Bereitstellung von Kraftstoffen, elektrischer und thermischer Energie zu erleichtern.

## **4 Material und Methoden**

Der Fokus dieser Arbeit lag auf Laboruntersuchungen zur Aufbereitung, Biogas- und Bioethanolgewinnung von Nawaro. Auf dieser Basis erfolgte die Bewertung der einzelnen Aufbereitungsmöglichkeiten und der Konversionswege der Biomasse mit Hilfe der energetischen/ökologischen Bilanzierung.

Zur Bereitstellung der zu untersuchenden Nawaro wurden von Mitarbeitern des Instituts für Pflanzenbau und Grünland, Fachgebiet Allgemeiner Pflanzenbau der Universität Hohenheim Anbauversuche geplant und durchgeführt. Im Rahmen dieses Projekts wurde der Bereich Pflanzenbau von Frau Constanze Böhmel bearbeitet. Die Anbaudaten sind dementsprechend der Dissertation von Böhmel (2007) zu entnehmen. An dieser Stelle soll deshalb nur ein kurzer Überblick zu diesem Bereich gegeben werden.

Die Bioethanoluntersuchungen und die Steam-Explosion-Vorbehandlung wurden am Institut für Lebensmittelwissenschaft und Biotechnologie, Fachgebiet Gärungstechnologie der Universität Hohenheim durchgeführt.

### **4.1 Methoden des Pflanzenbaus**

Die Anbauversuche können in drei Versuchskomplexe wie folgt untergliedert werden.

1. Energiemais – Einflussfaktoren auf den Energieertrag:
  - Sorten
  - Fraktionen
  - Fruchtfolgen mit anderen Hauptfrüchten und Zwischenfrüchten (Weidelgras, Rübsen, Grünroggen)
  - Saat-/Erntetermine
  - Standort
  - Jahr
2. Energietriticale (Qualitätseigenschaften)
  - Erntezeitpunkt
  - Konservierung (Silage)
  - Fraktionen

3. Vergleich von Flächenproduktivität und Umweltwirkungen ein- und mehrjähriger Energiepflanzen
  - Stickstoff-Düngungsstufen (Mais, Wintertriticale, Winterweizen, Winterraps)
  - Fruchtfolgen
    - o Energiemais
    - o Triticale
    - o Weizen
    - o Grünroggen
    - o Winterrübsen
    - o Rutenhirse
    - o Welsches Weidelgras
    - o Raps

Es sind hier nur Faktoren aufgeführt, die für die vorliegende Arbeit von Interesse waren. Weitere Faktoren von pflanzenbaulichem Interesse, die Standortbeschreibungen des Ihinger Hofes und des Goldenen Ackers (Hohenheim), die Versuchsanlage und -durchführung sind den Feldführern der Jahre 2004-2006 (N.N., 2004 a, 2004 b, 2005 a, 2005 b, 2006 a, 2006 b) und der Arbeit von Böhmel (Böhmel, 2007) zu entnehmen. Weiterführende allgemeine Informationen zum Energiepflanzenbau für Biogasanlagenbetreiber und zu Potenzialabschätzungen für Deutschland gibt Karpenstein-Machan (2005). Das Ertragspotenzial von Mais in Abhängigkeit von Niederschlag und pflanzenverfügbarem Bodenwasser bzw. Erträge in Abhängigkeit vom Standort stellt Vetter (2007) anhand von aktuellen Anbauversuchen in verschiedenen Bundesländern Deutschlands dar. Die herausragende Stellung des Silomaises lässt sich an der Einsatzhäufigkeit von 93 % bei allen seit Sommer 2004 neu errichteten Biogasanlagen ablesen (Weiland et al., 2007). Mit je etwa 50 % Einsatzhäufigkeit liegen Körnergetreide und Getreide-Ganzpflanzensilage auf dem zweiten bzw. dritten Rang (Weiland et al., 2007).

## 4.2 Methoden der Biogasuntersuchungen

### 4.2.1 Aufbereitungsmethoden zur Biogasgewinnung

Ziel der Untersuchungen zur Aufbereitung und der anschließenden Vergärung von Biomasse war die Beantwortung der Frage, ob und in welcher Höhe der spezifische Methanertrag beeinflusst bzw. ob der Abbau beschleunigt werden kann.

Dazu wurden mechanische und thermische Aufbereitungsverfahren angewandt und zwei verschiedene Laborversuchsanlagen im Batch-Verfahren zur Methangärung genutzt. Tabelle 4.2.1 gibt einen Überblick zu Material und Methoden der Biogas-Aufbereitungsversuche.

Tab. 4.2.1: Übersicht Material und Methoden der Biogas-Aufbereitungsversuche

Energieträger	Material	Konversionsmethode	Messgrößen	Messgerät/-methode
<b>Biogas Aufbereitungsversuche</b>  Methoden der Aufbereitung: Silierung Steam-Explosion mahlen quetschen dispergieren kochen Mikrowelle	Mais/-silage Triticale/-silage Triticale, vollreif	30-Liter-Vertikal-Fermenter (volldurchmischt)	Biogasvolumen	Flowmeter
			Methangehalt	Methansensor
		pH-Wert	pH-Sonde	
		Flüchtige Fettsäuren des Fermenterinhalt	Gaschromatographie (GC)	
		Hohenheimer Biogas-ertragstest	Biogasvolumen	Kolbenprober
			Methangehalt	Methansensor
			flüchtige Stoffe in Silagen (Milchsäure, Fettsäuren, Alkohole)	Hochleistungsflüssigkeitschromatographie (HPLC)
			Inhaltsstoffe	Weender-van Soest-Analyse

In den folgenden Unterkapiteln sollen zunächst die Aufbereitungsverfahren und die vorhergehende Ernte und Konservierung der Biomasse beschrieben werden. Für die Aufbereitungsversuche wurde zum einen teigreifes Material (Triticale, Mais) und zum anderen vollreifes Material (Triticale) verwendet. Dementsprechend waren die Ernte, die Lagerung und die Vorbehandlung anzupassen.

#### 4.2.1.1 Ernte und Konservierung des Pflanzenmaterials

Vom teigreifen Mais und der teigreifen Triticale wurden ca. 2 m<sup>3</sup> Biomasse mit Feldhäckslern geerntet. Die Feldhäcksler wurden auf eine Häcksellänge von 10 mm sowohl für Mais als auch Triticale eingestellt.

Die Planung der Silierung erfolgte nach den Angaben für die Herstellung stabiler Silagen nach Schmitt et al. (1973), Ahrer (1980) und Jungbluth et al. (2005) sowie denen von Nussbaum (1998) zur Durchführung von Silierversuchen im Labormaßstab.

Das frische Material wurde zur Silierung am gleichen Tag in 60-Liter-Kunststofffässer schichtenweise eingebaut, verdichtet und mit einem Deckel so verschlossen, dass ein weiterer Luftzutritt ausgeschlossen war. Dagegen konnte das während des Silierprozesses, durch den Abbau von Zuckern zu Milchsäure und zu flüchtigen Fettsäuren, sich bildende Kohlendioxid über einen Gärspund entweichen. Silierhilfsmittel wurden nicht eingesetzt.

Aus den gleichen Probechargen wurde frisches unsiliertes Material entnommen und bei -20 °C in 10-Liter-Kunststoffsäcken tiefgefroren, um einen Vergleich zwischen silierter und unsilierter Biomasse führen zu können.

Auch die vollreife Triticale wurde als Ganzpflanze geerntet und in Garben transportiert. Diese wurden gedroschen und der Kornertrag ermittelt. Das Stroh wurde grob auf ca. 5 cm Häcksellänge vorzerkleinert, um es für weitere Aufbereitungsschritte handhabbar zu machen, und dann bei Raumtemperatur gelagert (Schumacher et al., 2007 a).

#### 4.2.1.2 Mechanische Aufbereitung – Häckseln, Vermahlen, Quetschen, Dispergieren

Aufgrund der teilweise unterschiedlichen Anforderungen an die Aufbereitung von stärke- bzw. faserreicher Biomasse wurden die Fraktionen Stroh (Anteil an der Gesamttrockensubstanz 54 %) und Korn (Anteil an der Gesamttrockensubstanz 46 %) der Triticale getrennt voneinander in drei Varianten vorbehandelt.

Korn:

- gequetscht
- gemahlen, 1 mm
- dispergiert

Stroh:

- gehäckselt, 10 mm
- gemahlen, 1 mm
- Steam Explosion (Thermo-Druck-Aufschluss)

Die Zerkleinerung des Kornes der vollreifen Triticale erfolgte mittels Schneidmühle, Korn-Quetsche bzw. Labor-Dispax („Ultra Turrax T50“). Das auf einen Millimeter gemahlene Korn wurde bei ca. 50 °C getrocknet, da eine stabile Lagerung bei Raumtemperatur so gewährleistet werden sollte. Für die Variante des Nass-Aufschlusses mit einem Labor-Dispax („Ultra Turrax T50“) wurde das ganze Korn mit Wasser gemischt und 15 min zerkleinert (Schumacher et al., 2007 b).

#### **4.2.1.3 Thermische Aufbereitung – Steam Explosion, Mikrowelle, Kochen**

Das Stroh der vollreifen Triticale, die teigreife Triticale (Ganzpflanze) und der teigreife Mais (Ganzpflanze) sowie deren Silagen wurden mit dem Steam-Explosion-Verfahren behandelt. In anderen Quellen (Prechtl, 2005) wird dieser thermomechanische Aufschluss in Kombination mit Biogas- bzw. Bioethanolanlagen auch als Thermo-Druck-Hydrolyse oder als TDH-Verfahren bezeichnet.

Zusammen mit Wasser wurden jeweils das Triticalestroh (16 kg Wasser / kg Material), die teigreife Triticale (4 kg Wasser / kg Material) bzw. der teigreife Mais (2 kg Wasser / kg Material) in einen Druckbehälter im Technikumsmaßstab (400 Liter) gepumpt und dort auf 155 °C erhitzt. Dabei baute sich ein Druck von ca. 6 bar auf (Schumacher et al., 2007 a, 2007 b). Diese Bedingungen wurden eine Stunde lang konstant gehalten; danach wurde das Material explosionsartig entspannt. Das Erhitzen im Druckbehälter erfolgte mit Hilfe eines Dampfstrahlanwärmers, der das Material direkt mit Dampf erwärmt. Die unterschiedlichen Mengen an zugegebenem Wasser zu den verschiedenen Substraten erklären sich dadurch, dass so wenig Wasser wie möglich zugegeben werden sollte, aber genug Wasser zugeführt werden musste, um die Pumpfähigkeit des Biomasse-Wasser-Gemischs zu erreichen.

Neben der Steam Explosion wurden für die Untersuchungen im HBT noch die beiden thermischen Aufbereitungsvarianten Kochen und Mikrowelle zusätzlich eingeführt.

Für die Aufbereitungsvariante „Kochen“ wurden 50 g Triticalestroh 1 kg Wasser, 200 g teigreifer Triticale 800 g Wasser und 200 g teigreifem Mais 400 g Wasser zugefügt. Das Material wurde eine Stunde bei 100 °C unter Umgebungsdruck gekocht. Hier wurden die Wasserzugaben so gewählt, dass möglichst wenig Wasser verwendet wurde, aber genug, um ein Anbrennen zu verhindern.

Die Mikrowellenaufbereitung erfolgte mit einer Haushaltsmikrowelle bei 1200 W über 2 min. Das Material wurde in Schmelztiegeln in die Mikrowelle gegeben. Der Boden der Tiegel war mit Wasser benetzt worden, um ein anbrennen zu vermeiden.

#### **4.2.1.4 Substrataufbereitung für den Hohenheimer Biogasertragstest**

Für die Untersuchungen im Hohenheimer Biogasertragstest (HBT) wurden, vor der eigentlichen Aufbereitung, die teigreife Triticale und der teigreife Mais (Ganzpflanze) sowohl frisch als auch siliert mit einem Büchi-Mixer B-400 (Fa. BÜCHI Labortechnik GmbH, Konstanz, Deutschland) zerkleinert und homogenisiert. Diese Vorgehensweise wurde gewählt, um trotz der minimalen Probenmengen repräsentative Proben gewinnen zu können. Davon unberührt blieben die Varianten der Steam Explosion, bei denen dasselbe Material, das auch für die 30-L-Fermenter verwendet wurde, eingesetzt wurde.

#### **4.2.2 Verfahren zur Biogas-/Methanertragsbestimmung**

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Batch-Verfahren zur Methangärung ausgewählt, da sie laut VDI-Richtlinie 4630 (2006) zur grundsätzlichen Bewertung des Biogasertrags bzw. der Abbaubarkeit eines Stoffs oder Stoffgemischs geeignet sind. Des Weiteren liefern sie eine qualitative Aussage über die Geschwindigkeit des Abbaus des eingesetzten Materials, sofern das gleiche Impfsubstrat verwendet wird, das aber auch gewissen natürlichen Schwankungen unterliegen kann.

Ebenfalls nach der VDI-Richtlinie 4630 (2006) liefern Gärtests im Batch-Verfahren aber keine Aussage zur Prozessstabilität in kontinuierlich beschickten Fermentern, zu möglichen Synergieeffekten beim Einsatz unterschiedlicher Stoffe unter Praxisbedingungen oder zur Monovergärbarkeit des Stoffes.

#### 4.2.2.1 Batch-Tests mit 30-L-Fermenter

Die frische, silierte bzw. reife Biomasse (Mais, Triticale) und ihre Vorbehandlungsvarianten wurden in 30-Liter-Fermentern auf ihre spezifischen Biogas-/Methanerträge hin untersucht.

Der Vorteil der Vergärung in 30-Liter-Fermentern im Vergleich zum Hohenheimer Biogasertragstest (HBT) lag in der Möglichkeit, repräsentative Mengen grob gehäckselten Materials mit Material aus der Steam Explosion vergleichen zu können.

#### Versuchsaufbau

Bei den 30-Liter-Fermentern, wie in Abb. 4.2.2.1.1 dargestellt, handelt es sich um doppelwandige Metallbehälter, die über einen Zu- und einen Ablauf verfügen. Die Durchmischung des Fermenterinhalt geschieht durch elektromotorgetriebene Rührwerke, die mittels Zeitschaltuhr zwei Mal pro Stunde für fünf Minuten betrieben werden. Die Temperierung der Fermenter erfolgte über die Doppelwand, die durch Wasser aus Thermostaten gespeist werden.

Das gebildete Biogas wurde in Gassäcken (TECOBAG der Fa. TESSERAUX SPEZIALverpackungen GmbH, Bürstadt, Deutschland) gesammelt und bis zu 12-mal während der Versuchsdurchgänge in Menge und Qualität erfasst.

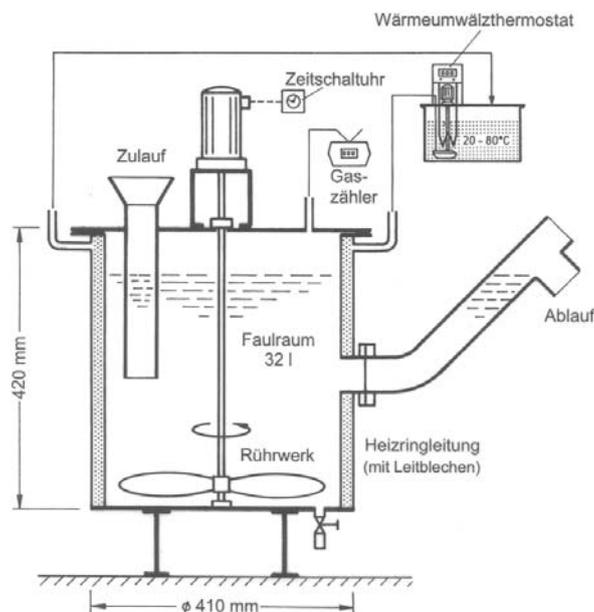


Abb. 4.2.2.1.1: Aufbau der 30-Liter-Fermenter im Hohenheimer Biogaslabor (Oechsner, 2005)

### ***Versuchsdurchführung***

Die teigreife Triticale und der teigreife Mais wurden entsprechend ihrem Trockensubstanzgehalt, in Abhängigkeit von der Aufbereitungsmethode, in unterschiedlichen Mengen in die Fermenter gegeben. Die beiden Fraktionen Stroh und Korn der reifen Triticale wurden nach erfolgter unterschiedlicher Vorbehandlung entsprechend dem Verhältnis der Trockenmasseerträge in einem Fermenter zusammengeführt. Alle Substrate wurden in Cofermentation mit ausgefauter Rindergülle als Impfmedium vergoren. Die Untersuchungen wurden in je zwei Wiederholungen im Batch-Verfahren über 42 Tage unter mesophilen Bedingungen bei 37 °C nach den Regeln der VDI-Richtlinie 4630 „Vergärung organischer Stoffe“ durchgeführt (VDI, 2006).

### ***Gasmessung***

Die quantitative Bestimmung des Biogases erfolgte mittels Massendurchflussmesser (Fa. M+W Instruments, Leonhardsbuch, Deutschland). Das Messgerät arbeitet nach dem Prinzip des Wärmetransports. Dabei wird die Temperaturänderung in der beheizten Zone eines Kapillarrohres gemessen. Die im Gasfluss absorbierte Wärmemenge bestimmt die Temperaturänderung. Die Genauigkeit wird vom Hersteller mit < 3 % vom Endwert einschließlich Nichtlinearität (Standard für Luft) angegeben. Die Wiederholbarkeit beträgt +/- 0,5 % vom Endwert (Standard) (M+W Instruments, o.J.). Die normierte Biogasmenge und der Methangehalt werden in eine Exceldatei ausgegeben. Die qualitative Analyse des Methan- bzw. Kohlendioxidgehalts des Biogases erfolgte mit Sensoren (Fa. Pronova, Berlin, Deutschland), die nach photometrischem Prinzip arbeiten. Die Messgenauigkeit liegt bei +/- 2 % (Pronova, 2002). Die Sensoren wurden täglich auf ihre Messgenauigkeit mittels Prüfgas kontrolliert und wenn notwendig kalibriert.

### ***Messung der Fettsäurenkonzentrationen***

Zur Messung der Fettsäurenkonzentrationen in den Fermentern wurden in den ersten Tagen nach Versuchsstart pro Tag und danach wöchentlich 20 ml Inoculum-Substrat-Gemisch je Fermenter entnommen. Die Proben wurden im Analytik-Labor der Agrartechnik und der Landesanstalt für Landwirtschaftliches Maschinen- und Bauwesen der Universität Hohenheim in Doppelbestimmung per Gaschromatograph

(GC) der Fa. Varian untersucht. Der pH-Wert in den Fermentern wurde parallel zur Probenentnahme für die Fettsäurenbestimmung mittels pH-Sonde SenTix (Fa. Wissenschaftlich-Technische Werkstätten GmbH, Weilheim, Deutschland) ermittelt.

#### 4.2.2.2 Batch-Tests mit dem Hohenheimer Biogasertragstest (HBT)

Als zweites Messverfahren, neben dem der 30-Liter-Fermenter, wurde der Hohenheimer Biogasertragstest (HBT) zur Ermittlung der spezifischen Biogas- bzw. Methanerträge eingesetzt. Es handelt sich hierbei um ein Batch-Verfahren im Labormaßstab, das von Helffrich und Oechsner (2003) auf der Basis des Hohenheimer Futterwerttests (HFT) (Steingass und Menke, 1986) entwickelt wurde. Das HBT-Verfahren ist patentiert (Patent-Nr. 10227685) und gehört zu den sechs exemplarisch in die VDI-Richtlinie 4630 (VDI, 2006) aufgenommene Verfahren zur Biogasertragsmessung.

Ziel dieser Untersuchungen ist es, zumeist den unter optimalen Bedingungen praktisch (im Gegensatz zu theoretischen Potenzialabschätzungen, aufgrund der chemischen Zusammensetzung) maximal möglichen spezifischen Methanertrag zu ermitteln.

Tab. 4.2.2.2.1 gibt einen Überblick über Material und Methoden der Biogaspotenzialuntersuchungen.

Tab. 4.2.2.2.1: Übersicht HBT, Messgrößen, eingesetztes Material

Energieträger	Material	Konversionsmethode	Messgrößen	Messgerät/-methode
<b>Biogas</b> <b>Biogaspotenzial</b>	Mais Triticale Weizen Grünroggen Winterrübsen Rutenhirse Wel. Weidelgras Raps Schlempen (Ethanolprod.)	Hohenheimer Biogas- ertragstest	Biogasvolumen Methangehalt	Kolbenprober Methansensor

Neben dem Aufbereitungsversuch wurde mit dem HBT auch die Abhängigkeit des spezifischen Methanertrags von

- Art,
- Sorte,
- Fraktion,
- Saat-/Ernteterminen,
- Stickstoffdüngung,
- Standort und
- Jahr

untersucht.

Der Vorteil des Hohenheimer Biogasertragstests (HBT) liegt in der sehr großen Anzahl von Fermentern (129 Stück pro Inkubator), die die gleichzeitige Untersuchung von 43 Varianten mit drei Wiederholungen erlauben. Ein weiterer Vorteil ist, dass nur geringe Mengen an Biomassechargen und Impfsubstrat benötigt werden.

### ***Probenvorbereitung***

Im Allgemeinen wurden die Biomasseproben für den HBT direkt nach der Ernte in einem Trockenschrank schonend bei 50 bis 60 °C getrocknet und danach mit einer Schneidmühle (Fa. Retsch, Haan, Deutschland) auf 1 mm Siebdurchgang gemahlen. Dadurch wurde eine Homogenisierung des Probenmaterials erreicht und somit die Einwaage einer repräsentativen Stichprobe von etwa 400 mg möglich.

Zur Untersuchung des Einflusses des Erntezeitpunkts und der Konservierung mittels Silierung wurden Triticale und Mais in 1,5-Liter-Weckgläser in drei Wiederholungen einsiliert. Das erfolgte nach den Beschreibungen von Nussbaum (1998). Das Material wurde schichtenweise eingebaut und verdichtet. Das gebildete Kohlendioxid konnte zwischen Deckel und Gummidichtungsring entweichen. Ein Luftzutritt wurde durch eine saubere Gummidichtung und das Anpressen des Deckels mit Metallklemmen vermieden. Es wurden keine Silierhilfsmittel eingesetzt. Die Gläser wurden in einem Kellerraum bei Umgebungstemperatur um 20 °C gelagert.

### **Versuchsaufbau**

In einen Brutschrank (Fa. Memmert, Schwabach, Deutschland) wurde ein elektromotorgetriebener Rotor mit 129 Plätzen für 100-Milliliter-Kolbenprober (oder Glasspritzen) (Fa. Häberle, Lonsee-Ettlenschieß, Deutschland) eingebaut.

Abb. 4.2.2.2.1 zeigt den schematischen Aufbau der Kolbenprober.

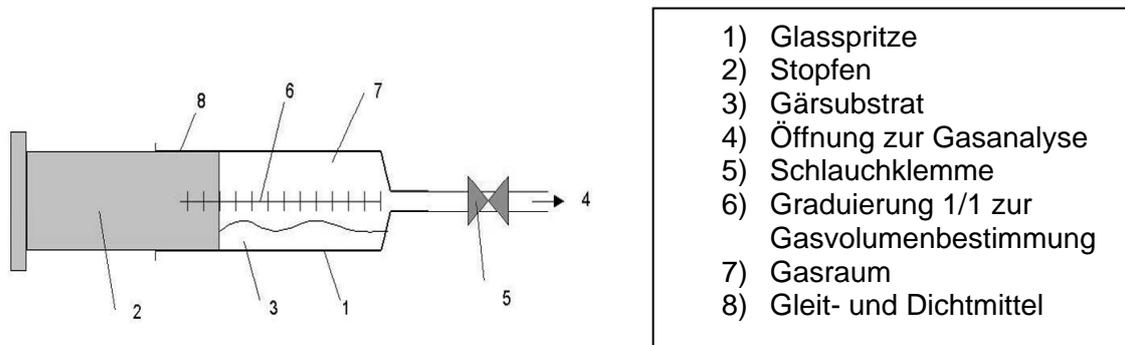


Abb. 4.2.2.2.1: Schema des Kolbenprobers des Hohenheimer Biogasertragstests nach Helffrich und Oechsner (2003) (Patent-Nr. 10227685)

### **Versuchsdurchführung**

Die Mini-Fermenter wurden mit Inoculum und mit den Biomasseproben befüllt, wobei jede Probe zur Absicherung der Ergebnisse gleichzeitig in drei Mini-Fermentern vergoren wurde (Helffrich und Oechsner, 2003). Eine Besonderheit bildete der Versuch zur Biomasseaufbereitung bei dem fünf Wiederholungen parallel getestet wurden, um eine ausreichende Basis für eine statistische Auswertung zu erlangen. Die Menge des Inoculums betrug 30 mg, die der Biomasse war je nach Trockensubstanzgehalt unterschiedlich. Die Versuche wurden unter mesophilen Bedingungen bei 37 °C über einen Zeitraum von 35 Tagen durchgeführt.

Das Inoculum wurde in einem 400-L-Fermenter bei einer Temperatur von ebenfalls 37 °C vorgehalten und mit geringen Dosen an Gärresten aus Praxisbiogasanlagen, Rindergülle, Silomais, Sojaextraktionsschrot, Speiseöl und Weizen ernährt. Auf diese Weise wurde ein homogenes Inoculum über längere Zeiträume bereitgestellt, das eine sehr geringe Eigengasproduktion zeigte.

### ***Gasmessung***

Je nach gebildeter Gasmenge wurde etwa zwölf Mal das Gasvolumen an der Skala abgelesen und aus dem Kolben entnommen. Gleichzeitig wurde der Methangehalt des Biogases mittels Methansensor (Fa. Pronova, Berlin, Deutschland), der nach photometrischem Prinzip funktioniert, bestimmt.

Die gemessenen Werte wurden auf Normbedingungen (0 °C and 1013 hPa) korrigiert. Dabei wurden die Feuchtigkeit im Gas, die Temperatur, der Luftdruck und die Variabilität des Inoculums, die anhand des Heu- und Krafffutterstandards gemessen wurde, berücksichtigt. Die Verwendung von Heu- und Krafffutterstandards wurde von Steingass und Menke (1986) übernommen. Die Einzelmessungen wurden aufsummiert.

### **4.2.3 Berechnung der Kenngrößen der Biogasuntersuchungen**

Im April 2006 wurde die aktuelle Version der VDI-Richtlinie 4630 „Vergärung organischer Stoffe – Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche“ veröffentlicht. Ziel war es, eine Richtlinie zu erarbeiten, die zur Vereinheitlichung der Methoden zur Untersuchung von Substraten und der Methoden der Datenauswertung der Versuche beiträgt, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu erreichen.

Aus denselben Erwägungen orientiert sich die vorliegende Arbeit stark an der VDI-Richtlinie 4630. Ihre Entwicklung erfolgte u.a. auf der Basis der DIN 38414-8. Zur Bestimmung des Trockensubstanzgehalts und des organischen Trockensubstanzgehalts wurden die EN 12880 und die EN 12879 herangezogen.

### ***Trockensubstanzgehalt in Prozent (TS) [%]***

Für die Bestimmung des Trockensubstanzgehalts wurden bei gemahlenem und getrocknetem Material für den Hohenheimer Biogasertragstest zwischen 3 und 5 g bzw. bei Flüssigkeiten bis zu 20 g in Porzellanschälchen eingewogen. Von den Proben für die Aufbereitungsversuche wurden abhängig von der Dichte des Materials 50 bis 200 g in größeren Porzellanschälchen eingewogen. Je Probe wurden drei Schälchen für die Dauer von 24 Stunden bei 105 +/- 5 °C im Trockenschrank bis zur Gewichtskonstanz getrocknet.

### **Organischer Trockensubstanzgehalt in Prozent (oTS) [%]**

Neben dem TS-Gehalt wurden von allen Proben auch die organischen Trockensubstanzgehalte ermittelt. Mit Hilfe eines Muffelofens wurde das Material bei 550 +/- 25 °C über mindestens 12 Stunden geglüht.

Stichproben des frischen und des silierten Materials sowie des dementsprechenden aufbereiteten Materials wurden an der LVVG Aulendorf auf Milchsäure, flüchtige Fettsäuren und Alkohole mittels HPLC analysiert. Anhand dieser Daten erfolgte die Korrektur des organischen Trockensubstanzgehalts nach der „Konventionellen Methode“ der „Arbeitsanweisung zur Korrektur des Trockensubstanzgehaltes von Silagen“ (Weißbach, 1994). Da Silagen einen nicht unerheblichen Anteil an flüchtigen Stoffen enthalten, die bei der „normalen“ TS/oTS-Bestimmung unberücksichtigt bleiben, muss diese Korrektur erfolgen, anderenfalls kann es zu großen Überschätzungen der spezifischen Methanerträge kommen (Mukengele et al., 2007).

### **Biogasmenge (unter Normbedingungen) [Nm<sup>3</sup> oder NI]**

Die bei Umgebungsdruck und -temperatur mit dem HBT-Kolbenprober ermittelte Biogasmenge in Millilitern wurde auf Normbedingungen (1013 mbar, 273 K) standardisiert. Bei der automatischen Messung mittels Massendurchflussmesser wurde das Volumen automatisch in Normliter umgerechnet, eine Korrektur war hier nicht mehr notwendig.

$$V_0^{tr} = V \cdot \frac{(p - p_w) \cdot T_0}{p_0 \cdot T}$$

$V_0^{tr}$	Volumen des trockenen Gases im Normzustand in Normmillilitern
$V$	abgelesenes Volumen des Gases in Millilitern
$p$	Druck der Gasphase zum Zeitpunkt der Ablesung in hPa
$p_w$	Dampfdruck des Wassers in Abhängigkeit von der Temperatur des umgebenden Raumes in hPa
$T_0$	Normtemperatur; $T_0 = 273$ K
$P_0$	Normdruck; $p_0 = 1013$ hPa
$T$	Temperatur des Faulgases oder des umgebenden Raumes in K

**Methangehalt [%]**

Der Methangehalt ist der prozentuale Anteil des Methans im (trockenen) Biogas und wurde mittels Methansensor (Fa. Pronova, Berlin, Deutschland) (photometrisches Funktionsprinzip) gemessen.

**Methanmenge (unter Normbedingungen) [Nm<sup>3</sup> oder NI]**

Die Methanmenge wurde über die Biogasmenge und den Methangehalt errechnet und auf Normbedingungen (1013 mbar, 273 K) standardisiert.

**Biogasausbeute [Nm<sup>3</sup>/kg oTS]**

Die Biogasausbeute gibt die Biogasmenge je eingesetzter Substratmenge an (VDI 4630, 2006). Zur Berechnung des spezifischen Biogasertrags einer Biomasseprobe wird die Differenz aus dem Biogasertrag des Inokulum-Biomasse-Gemischs und dem Biogasertrag aus reinem Inokulum ermittelt.

$$V_{IS(korr.)} = \frac{\sum V_{IS} \cdot M_{IS}}{m_M}$$

$V_{IS(korr.)}$	Gasvolumen, das aus dem Impfschlamm entwickelt wurde in Normmillilitern
$\sum V_{IS}$	Summe der Gasvolumina des Versuchs mit Impfschlamm für die betrachtete Versuchsdauer in Normmillilitern
$m_{IS}$	Masse des für die Mischung benutzten Impfschlammes in g
$m_M$	Masse des im Kontrollversuch benutzten Impfschlammes in g

$$V_n = V_{ISS} - V_{IS(korr.)}$$

$V_n$	Netto-Gasvolumen des Substrats für die betrachtete Versuchsdauer in Normmillilitern
$V_{ISS}$	Gasvolumen, das aus dem Impfschlamm und dem Substrat entwickelt wurde in Normmillilitern
$V_{IS(korr.)}$	Gasvolumen, das aus dem Impfschlamm entwickelt wurde in Normmillilitern

$$V_S = \frac{\sum V_n \cdot 100}{m \cdot w_{oTS}}$$

$V_S$	spezifische, auf die organische Trockensubstanz bezogene Biogasproduktion während der Versuchszeit in NI/kg oTS
$V_n$	Netto-Gasvolumen des Substrats für die betrachtete Versuchsdauer in Normmillilitern
$m$	Masse des eingewogenen Substrats in g
$w_{oTS}$	organische Trockensubstanz in %

### **Biogasbildungspotenzial [Nm<sup>3</sup>/kg oTS]**

Das Biogasbildungspotenzial gibt die maximal mögliche Biogasausbeute an und ist ebenso bezogen auf eine bestimmte Substratmenge. Die Bestimmung erfolgt im Rahmen dieser Arbeit mittels Batch-Test von 35 Tagen (VDI 4630, 2006), das „Ein-Prozent-Kriterium“ zur Beendigung eines Batchversuchs wurde damit eingehalten.

### **Spezifischer Methanertrag [Nm<sup>3</sup> Methan/kg oTS]**

Der spezifische Methanertrag ist das Produkt aus der Multiplikation der Biogasausbeute oder des Biogasbildungspotenzials mit dem Methangehalt. Im Rahmen dieser Arbeit wurden grundsätzlich Kofermentationsversuche mit einem speziellen Inoculum (s. Versuchsdurchführung HBT) durchgeführt. Die Menge des von diesem Impfsupstrat gebildeten Biogases bzw. Methans wurde von der Gesamtmenge subtrahiert, um den substratspezifischen Biogas- bzw. Methanertrag zu ermitteln.

$$V_{SCH_4} = \frac{\sum(V_n \cdot C_{CH_4} \cdot 10^{-2})}{m \cdot w_{oTS} \cdot 10^{-2}}$$

$V_{SCH_4}$	spezifische, auf die organische Trockensubstanz bezogene Methanproduktion während der Versuchszeit in NI CH <sub>4</sub> /kg oTS
$V_n$	Netto-Gasvolumen des Substrats für die betrachtete Versuchsdauer in Normmillilitern

$C_{CH_4}$	gemessene Konzentration des Methans im trockenen Biogas in %
$m$	Masse des eingewogenen Substrats in g
$w_{oTS}$	organische Trockensubstanz in %

### ***Methanhektarertrag [ $Nm^3$ Methan/(ha a)]***

Mit dem Methanhektarertrag können die Flächenproduktivität von Nawaro bestimmt und verschiedene Feldfrüchte miteinander verglichen werden. Dazu wird der spezifische Methanertrag bezogen auf die Trockensubstanz mit dem Trockenmasseertrag pro Hektar multipliziert.

$$V_{SCH4A} = V_{SCH4TS} \cdot e_{TS}$$

$V_{SCH4A}$	Methanhektarertrag in $Nm^3$ $CH_4$ /(ha a)
$V_{SCH4TS}$	spezifische, auf die Trockensubstanz bezogene Methanproduktion während der Versuchszeit in $Nm^3$ $CH_4$ /kg TS
$e_{TS}$	Trockenmasseertrag der Biomasse pro Jahr in kg TS/(ha a)

### ***Energieertrag pro Hektar über Biogasgewinnung [ $GJ$ /(ha a)]***

Der Energieertrag pro Hektar erlaubt nicht nur, die Flächenproduktivität verschiedener Pflanzen, sondern auch die Flächenproduktivität unterschiedlicher Konversionsverfahren und deren Kombinationen wie die Biogas- und Ethanolgewinnung miteinander zu vergleichen.

$$Y_E = V_{SCH4A} \cdot Hu \cdot 10^{-3}$$

$Y_E$	Energieertrag pro Hektar in $GJ$ /(ha a)
$V_{SCH4A}$	Methanhektarertrag in $Nm^3$ $CH_4$ /(ha a)
$Hu$	unterer Heizwert von Methan $36$ $MJ/Nm^3$ $CH_4$

## 4.3 Methoden der Bioethanolgewinnung

### 4.3.1 Bioethanoltest

Die Bioethanoltests wurden im Labor des Fachgebiets Gärungstechnologie (150f) des Instituts für Lebensmittelwissenschaft und Biotechnologie an der Universität Hohenheim durchgeführt.

Tab. 4.3.1.1 gibt einen Überblick über die untersuchten Pflanzen, die Konversionsmethode, die Messgrößen und die eingesetzten Messgeräte und -methoden.

Tab. 4.3.1.1: Übersicht Material und Methoden der Bioethanolertragsuntersuchungen

Energieträger	Material	Konversionsmethode	Messgrößen	Messgerät/-methode
<b>Ethanol</b> <b>Ethanolpotenzial</b>	Mais Triticale Rutenhirse Grünroggen Winterrübsen Wel. Weidelgras	Ethanoltest über Maische, Fermentation, Destillation im Labormaßstab	Ethanolertrag Kohlenhydrate	Alkohol. Gärung Zuckerbestimmung nach Sluiter et al. mit HPLC

Die folgende Darstellung der Methodik der Bioethanolgewinnung und der Bestimmung der säurelöslichen Kohlenhydrate basiert auf Ausführungen von Senn, Fleischer, Schneider und Sluiter (Senn, 2001; Fleischer und Senn, 2007; Schneider, 2005; Sluiter et al. 2004).

Die Bestimmung des Ethanolertrags im Labormaßstab kann in die vier Schritte saurer Aufschluss, Maischprozess, alkoholische Gärung und Destillation untergliedert werden.

#### **Saurer Aufschluss**

Das Probenmaterial (i. d. R. Ganzpflanzen) wurde nach der Zugabe von Wasser und konzentrierter Schwefelsäure in schwach saurem Milieu 60 Minuten bei 120 °C im Autoklaven aufgeschlossen.

### ***Maischprozess***

Danach wurde das aufgeschlossene Material quantitativ in Maischgefäße überführt und eine Minute mit dem Ultraturax (Dispergiermaschine nach Rotor-Stator-System) bei 8.000 bis 10.000 Upm zerkleinert. Für den Maischprozess wurde noch einmal Wasser zugegeben und der pH-Wert mit Natronlauge auf 5,5 eingestellt, ggf. wurde er mit Schwefelsäure korrigiert. Die Enzymierung der Ganzpflanzen oder der cellulosereichen Fraktionen erfolgte mit der Cellulase (fungal) GC 880 (Fa. Genencor International, B.V., Leiden, Niederlande) über 48 h (24 h) bei 55 °C.

Für die stärkereiche Fraktion wurde das Verflüssigungsenzym Liquozyme 280L (Novozymes, Bagsvaerd, Dänemark) eingesetzt. Die Temperatur der Maische wurde unter ständigem Rühren bei 200 U/min auf 65 °C erhöht und dann 30 min konstant gehalten. Danach wurde die Temperatur auf 52 °C gesenkt und der pH-Wert auf 5,0 – 5,2 korrigiert, bevor die beiden Verzuckerungsenzyme SAN Super (Novozymes, Bagsvaerd, Dänemark) und Gammaclast 2OP (Gamma Chemie GmbH, Darmstadt, Deutschland) zugegeben wurden. Die Verzuckerungsrast betrug 30 Minuten. Danach wurde die Maische auf die Fermentationstemperatur von 30 °C gekühlt.

Die Aliquoten wurden mit Hilfe eines 0,45-µm-Filters in ein HPLC-Vial filtriert und danach in den HPLC injiziert, um die vergärbaren Zucker zu bestimmen.

### ***Alkoholische Gärung***

Für die alkoholische Gärung wurde die Maische aus den Maischgefäßen quantitativ in 1-Liter-Gärkolben überführt und erneut mit Wasser auf ein definiertes Volumen gebracht. Nach der Zugabe von Hefe „Superstart“ (Fa. Alltech, Deutschland) und Kaliumdisulfit wurde das Material bei 30 °C über 48 Stunden vergoren.

### ***Destillation und Alkoholbestimmung***

Eine definierte Teilmenge der vergorenen Probe wurde mit Entschäumer behandelt und destilliert. Der gewonnene Alkohol wurde in einem Messkolben aufgefangen und mit destilliertem Wasser auf eine definierte Masse gebracht. Danach wurde über die Dichte der Alkoholgehalt in Masseprozent bestimmt. Zur Berechnung der Ethanolausbeute in LA/Mg TS wurden die Massenprozent in Masse bzw. über die Dichte in ein Volumen umgerechnet und auf die Trockensubstanzmenge bezogen.

### 4.3.2 Säurelösliche Kohlenhydrate

Wie die vorhergehenden Ausführungen zur Methodik der Bioethanolgewinnung liegen der Beschreibung der Bestimmung der säurelöslichen Kohlenhydrate mehrere Quellen zugrunde (Sluiter et al., 2004; Senn und Fleischer, 2007; Schneider, 2005).

Mittels HPLC wurden in Doppelbestimmung die säurelöslichen Kohlenhydrate Glukose, Arabinose und als Summenparameter Xylose, Galactose, Mannose gemessen. Mit Reinzuckerstandards in bekannter Konzentration wurden bei jedem Analysegang die jeweiligen Wiederfindungsraten ermittelt und die Probenergebnisse damit korrigiert.

Zur Bestimmung der maximal säurelöslichen Kohlenhydrate nach Sluiter et al. (2004) wurde das Probenmaterial in Doppelbestimmung in Glasröhrchen eingewogen. Nach Zugabe von Schwefelsäure und Durchmischung des Substrats erfolgte eine einstündige Hydrolyse bei 30 °C in einem Wasserbad. Während dieser Zeit wurden die Proben viertelstündlich geschüttelt, um eine vollständige Vermischung und Befeuchtung zu gewährleisten. Nach der Hydrolyse wurden die Proben quantitativ in die 250-ml-Schottflaschen überführt und mittels destillierten Wassers auf eine 4-prozentige Säurekonzentration eingestellt. Die Schottflaschen wurden danach verschlossen und eine Stunde bei 121 °C im Autoklav erhitzt. Nach dem Abkühlen wurde der Deckel entfernt, und 20 ml des Aliquots wurden in einen Erlenmeyerkolben überführt und sehr langsam mit Calciumcarbonat auf einen pH-Wert zwischen 5 und 6 neutralisiert. Abschließend wurde die neutralisierte Lösung mit einem 0,45-µm-Filter in ein HPLC-Vial filtriert und danach in den HPLC injiziert, um die säurelöslichen Zucker zu bestimmen.

Nach Fleischer und Senn (2007) wurden folgende HPLC-Bedingungen festgelegt:

- Flow: 0,6 ml/min
- Mobile Phase 0,01 n H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>
- Säulentemperatur 50 °C
- Detektortemperatur 35 °C
- Messdauer 35 min

Nach Fleischer und Senn (2007) bestand das HPLC System aus folgenden Teilen:

- Refraktionsindexdetektor (ERC 7510, Bischoff, Leonberg Germany)
- RHM-Monosaccharid-Säule (Phenomenex, Aschaffenburg, Germany)
- Autosampler (728, Bischoff, Leonberg, Germany)
- Säulentermostat (Jetstream 2 PLUS, Bischoff, Leonberg, Germany)

### **4.3.3 Schlempe**

Die Schlempen aus den Ethanoluntersuchungen wurden bei 50 bis 60 °C in einem Trockenschrank bis zur Gewichtskonstanz getrocknet, danach noch einmal zerkleinert und anschließend im Hohenheimer Biogasertragstest auf ihren Methanertrag getestet.

#### 4.3.4 Berechnung der Kenngrößen der Ethanoluntersuchungen

##### **Ethanolausbeute [L A/Mg TS]**

Die Ethanolausbeute in L A/Mg TS errechnet sich aus der Masse des gewonnenen Ethanols dividiert durch das Produkt aus Frischmasse, Trockensubstanzgehalt in Prozent der Frischmasse und der Dichte des Alkohols.

$$V_{SA} = \frac{m_A \cdot 100}{m \cdot w_{TS} \cdot \rho}$$

$V_{SA}$	Ethanolausbeute in L A/Mg TS
$m_A$	Masse des gewonnenen Alkohols in g
$m$	Masse des eingewogenen Substrats in g
$w_{TS}$	Trockensubstanzgehalt in % der Frischmasse
$\rho$	Dichte des Alkohols in Mg/L A

##### **Energieertrag pro Hektar über Ethanolgewinnung [GJ/(ha a)]**

Der Energieertrag pro Hektar erlaubt nicht nur, die Flächenproduktivität verschiedener Pflanzen, sondern auch die Flächenproduktivität unterschiedlicher Konversionsverfahren und deren Kombinationen wie die Biogas- und Ethanolgewinnung miteinander zu vergleichen.

$$Y_{EA} = \frac{m_A \cdot 100 \cdot e_{TS} \cdot Hu \cdot 10^{-3}}{m \cdot w_{TS}}$$

$Y_{EA}$	Energieertrag pro Hektar über Ethanolgewinnung in GJ/(ha a)
$m_A$	Masse des gewonnenen Alkohols in g
$m$	Masse des eingewogenen Substrats in g
$w_{TS}$	Trockensubstanzgehalt in % der Frischmasse
$e_{TS}$	Trockenmasseertrag der Biomasse pro Jahr in kg TS/(ha a)
$Hu$	unterer Heizwert des Alkohols 29,68 MJ/kg

## 4.4 Inhaltsstoffbestimmung

Auf der Basis langjähriger Forschungsarbeit am Institut für Grünland und Futterpflanzenforschung der Bundesanstalt für Landwirtschaft in Braunschweig (FAL) wird die Nahinfrarotspektroskopie (NIRS) zur Qualitätsbeurteilung von Silomais in bundesweiten Sortenprüfungen und -versuchen eingesetzt.

Für dieses Projekt erfolgten deshalb die Probenvorbehandlung der frischen Maisproben und die Inhaltsstoffbestimmung ebenfalls nach der „Arbeitsanleitung für NIRS-Untersuchungen an Silomaisproben (Ganz- und Restpflanze) im Rahmen des Qualitätssicherungssystem NIRS/NIT“ der VDLUFA (VDLUFA, 2002).

Für Ganzpflanzen können anhand der Kalibriergleichung folgende Merkmale innerhalb der angegebenen Bereiche in Prozent der Trockenmasse bestimmt werden:

Tab. 4.4.1: Durch NIRS bestimmte Merkmale von Silomaisganzpflanzen (VDLUFA, 2002)

<b>Merkmal</b>	<b>Referenzmethode</b>	<b>VDLUFA<sup>1</sup></b>	<b>Einheit</b>	<b>Bereich</b>
TM	Trockenmassegehalt	3.1	% FM	89–97
XS	Polarimetrie nach Ewers	7.2.1	% TM	0–47
Elos	Cellulase nach de Boever	6.6.1	% TM	38–80
XF	Rohfaser	6.1.1	% TM	13–36
XP	Rohprotein (Kjeldahl)	4.1.1	% TM	5–12
IVDOM	Verdaulichkeit nach Tilly & Terry	-	% TM	53-82
ADF	saure Detergentien-Faser van Soest	6.5.1	% TM	17-43
NDF	neutrale Detergentien-Faser van Soest	6.5.2	% TM	39-55
XZ	Zucker Luff-Schoorl	7.7.1	% TM	2-9

<sup>1</sup>VDLUFA (1997) Methodenbezeichnung

Des Weiteren wurden Futtermittelanalysen nach dem Weender-van Soest-System zur Bestimmung der Inhaltsstoffe von Mais und Triticale zur Überprüfung der Effekte der Biomasseaufbereitung für die Biogasgewinnung an der Landesanstalt für Chemie an der Universität Hohenheim durchgeführt. Diese Untersuchungen erfolgten nach Richtlinie 71/393/EWG, Richtlinie 71/250/EWG, Richtlinie 93/28/EWG, Richtlinie 92/89/EWG, Richtlinie 98/64/EG, VDLUFA MB III 6.5.1, VDLUFA MB III 6.5.2 und VDLUFA MB III 6.5.3.

## 4.5 Statistische Methoden

Zur Signifikanzanalyse der Effekte der Biomasseaufbereitung auf den Methanertrag im Batch-Versuch wurden zweiseitige heteroskedastische T-Tests mit der Software MS Excel durchgeführt. Dabei wurden jeweils die unverbundenen Stichproben einer Aufbereitungsvariante mit der Ausgangsvariante verglichen. Auch die relativen Standardabweichungen, die arithmetischen Mittel, die Mediane, die Minimal- und die Maximalwerte, die Korrelation und die Regressionsgeraden wurden mit MS Excel bestimmt. Für die statistische Analyse wurden Grimm (2007), Radke (2006) und Piepho (2006) zu Rate gezogen.

Zur Visualisierung der arithmetischen Mittel, des Medians, der Interquartilsabstände und der Variationsbreite der als Stichproben behandelten Ergebnisse der Untersuchungen zu den Methanerträgen von neun Maissorten (Ganzpflanze, Korn, Restpflanze) zu vier Erntezeitpunkten wurden Box-and-Whiskers-Plots mit der Software SPSS 15.0 für Windows erstellt.

## 4.6 Energie- und Ökobilanzierung

Um die Biomasseaufbereitung und die Biomassekonversionspfade (Biogas- und Ethanolgewinnung) hinsichtlich ihres Energiegewinns sowie ausgewählter Umweltwirkungen miteinander vergleichen zu können bzw. die Verwendung von Silomais und reifer Triticale gegenüberzustellen, wurde ein Modell entwickelt und mit der Software GaBi 4 der PE Europe GmbH (N.N., 2003; N.N., o.J.) bilanziert.

In Anlehnung an die Ökobilanznormen ISO 14040 (2006) bis ISO 14044 (2006) wurde die Bilanzierung entsprechend den vier Schritten durchgeführt:

- Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens
- Sachbilanz
- Wirkungsabschätzung
- Auswertung

Das Ziel der Bilanz wurde bereits genannt. Der Untersuchungsrahmen wird im Material und Methodenteil umrissen. Als Bezugsgröße oder funktionelle Einheit wurde der Ertrag pro Hektar und Jahr gewählt.

Grundlage der Bilanzierung war ein arrondierter landwirtschaftlicher Modellbetrieb mit 1000 ha landwirtschaftlicher Nutzfläche. Auf dieser Fläche wurde auf zwei Dritteln Triticale und auf einem Drittel Silomais konventionell nach guter fachlicher Praxis angebaut. Dabei wurden Erträge für Mais von 20.000 kg TM/ha, für Triticalekorn von 8.200 kg TM/ha und Triticalestroh von 7.000 kg TM/ha unterstellt.

Für den Mais- und Triticaleanbau wurden die Prozesse Pflügen, Eggen, Saatgutherstellung, Aussaat, Durchführung mechanischen und chemischen Pflanzenschutzes, Pflanzenschutzmittelherstellung, Ausbringung mineralischer Düngung bzw. mit Gärrest, Ernte und Transport des Erntegutes berücksichtigt. Zusätzlich wurden für die Triticale noch die Prozesse Schwaden und Pressen von Quaderballen einbezogen. Es wurden 5 % Lagerungsverluste der Biomasse angenommen.

Für die Mineraldüngung von Mais wurden 300 kg Rohphosphat, 125 kg Kaliumchlorid, 220 kg Ammoniumnitrat und 50 kg Kalk bezogen auf den Hektar angesetzt. Bei Getreide waren es 300 kg Rohphosphat, 120 kg Kaliumchlorid, 200 kg Ammoniumnitrat und 50 kg Kalk bezogen auf den Hektar. Die Düngemittelproduktionsprozesse wurden von GaBi 4 übernommen.

Die Gärreste der Biogasanlage wurden in sechs von acht Szenarien als 100%iges Substitut der mineralischen Phosphor- und Kalidüngung sowie als 60%iges Substitut der mineralischen Stickstoffdüngung, basierend auf den Angaben von Schneider (2007) angerechnet. In den Szenarien 1 und 6 werden die Gärreste nicht als Düngemittel eingesetzt. In jedem Fall handelte es sich aber um ein abgedecktes Gärrestlager.

Auf dem Modellbetrieb befanden sich eine Biogasanlage und eine landwirtschaftliche Brennerei sowie die für den Anbau, die Ernte, den Transport und die Aufbereitung der Biomasse benötigten Maschinen und Geräte. Als Verfahren zur Biomasseaufbereitung wurde die Steam-Explosion als effektiver mechanisch-thermischer Aufschluss gewählt mit einer Temperatur von 155 °C bei einem Druck von ca. 6 bar und einer explosionsartigen Entspannung.

Die Brennereiprozesse für die Konversion von Triticalekorn und Maisganzpflanze wurden von Fleischer und Senn (2007) übernommen und in das Modell eingebunden. Das Triticalekorn wurde nach einer Aufbereitung mechanisch aufgeschlossen und einer enzymatischen Hydrolyse mit dem Stargen<sup>TM</sup>-Enzym unterzogen. Der Trockensubstanzgehalt der Maische wurde auf ca. 25 % eingestellt.

Die Fermentationsdauer betrug 93 Stunden (Fleischer und Senn, 2007). Für die Bilanzierung der Destillation und der Absolutierung, um als Endprodukt absolutiertes Ethanol zu gewinnen, nutzten Fleischer und Senn (2007) die Daten einer Studie von Senn und Lucà (2002).

Der Brennereiprozess für die Maissilage lief nach Fleischer und Senn (2007) anders als für das Triticalekorn ab. So musste die Maissilage mittels einer Rotor-Stator-Maschine nass mechanisch aufgeschlossen werden. Das dafür notwendige Prozesswasser wurde nur anfangs zugeführt und dann über ein Schlemmesieb abgetrennt, um es erneut als Prozesswasser zu nutzen. Das dispergierte Material wurde anschließend thermisch aufgeschlossen. Des Weiteren erfolgte eine Vorhydrolyse von 24 Stunden mit Cellulase. Die Fermentationsdauer der Maische wurde mit drei Tagen festgelegt (Fleischer und Senn, 2007). Die Destillation und die Absolutierung wurden ebenfalls nach den Angaben von Senn und Lucà (2002) beschrieben.

Das Hauptprodukt Ethanol wurde vermarktet, aber keiner konkreten Nutzung zugeschrieben. Das Kuppelprodukt Brennereischlempe wurde wie Mais oder Triticale zur Biogaserzeugung eingesetzt. In Tab. 4.6.1 sind die Szenarien der Bilanzierung zusammengefasst. Die Fließschemata der acht Szenarien sind auf den folgenden Seiten dargestellt. Die in GaBi 4 erstellten Pläne inklusive der Unterprozesse befinden sich im Anhang. In den Szenarien 1 bis 3 und 5 wird ausschließlich Mais als Ausgangssubstrat verwendet. Die Szenarien 6 bis 8 behandeln ausschließlich die Konversion reifer Triticale. Szenario 4 verbindet die Stoffströme Mais und Triticale in dem Verhältnis der Nutzung der landwirtschaftlichen Fläche von zwei Dritteln Triticale und einem Drittel Silomais bezogen auf einen Hektar.

Tab. 4.6.1: Szenarien der Bilanzierung

<b>Szenario</b>	<b>Anbau</b>	<b>Biogas</b>	<b>Bioethanol</b>
1	Mais – Mineraldünger	Mais	-
2	Mais – Mineraldünger/Gärrest	Mais	-
3	Mais – Mineraldünger/Gärrest	Mais/Steam Ex	-
4	Mais/Getreide – Mineraldünger/Gärrest	Mais/Getreidestroh/ Schlempe	Getreidekorn
5	Mais – Mineraldünger/Gärrest	Schlempe	Maissilage
6	Getreide – Mineraldünger	Korn + Stroh	-
7	Getreide – Mineraldünger/Gärrest	Korn + Stroh	-
8	Getreide – Mineraldünger/Gärrest	Korn + Stroh/Steam Ex	-

Das Steam-Explosions-Verfahren zur Biomasseaufbereitung, als der Biogasgewinnung vorgeschalteter Prozess, wurde in den Szenarien 3 und 8 berücksichtigt. Da keine Zähler zur Messung des Dampfbedarfs während der Versuche zum Steam-Explosionsaufschluss zur Verfügung standen, wurde der Energiebedarf in Anlehnung an Pieper und Bohner (1985) errechnet. Vereinfachend wurde dabei die spezifische Wärmekapazität von Wasser  $4186 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$  für das Wasser-Biomasse-Gemisch angenommen, da der Anteil des Wassers mehr als 90 % betrug.

Abbildung 4.6.1 zeigt das Fließschema für die Szenarien 1 bis 3 und 6 bis 8 mit den Optionen: Biomasse-Input Mais/Triticale, Steam Explosion ja/nein und Gärrestrückführung ja/nein.

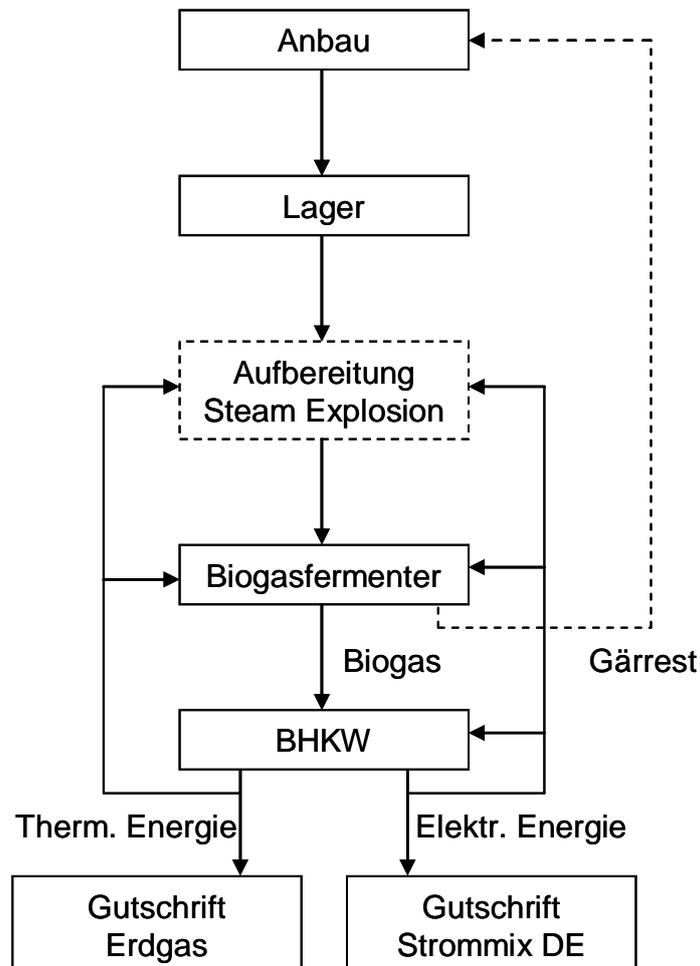


Abb. 4.6.1: Szenarien 1-3 und 6-8, optional: Mais/Triticale, Steam Explosion ja/nein, Gärrestrückführung ja/nein

Die folgende Abbildung 4.6.2 veranschaulicht anhand eines Fließschemas das komplexe Szenario 4, bei dem Getreidekorn in der Brennerei sowie Mais, Getreidestroh und Schlempe in der Biogasanlage verwendet und die Gärreste zurück in den Anbau geführt werden.

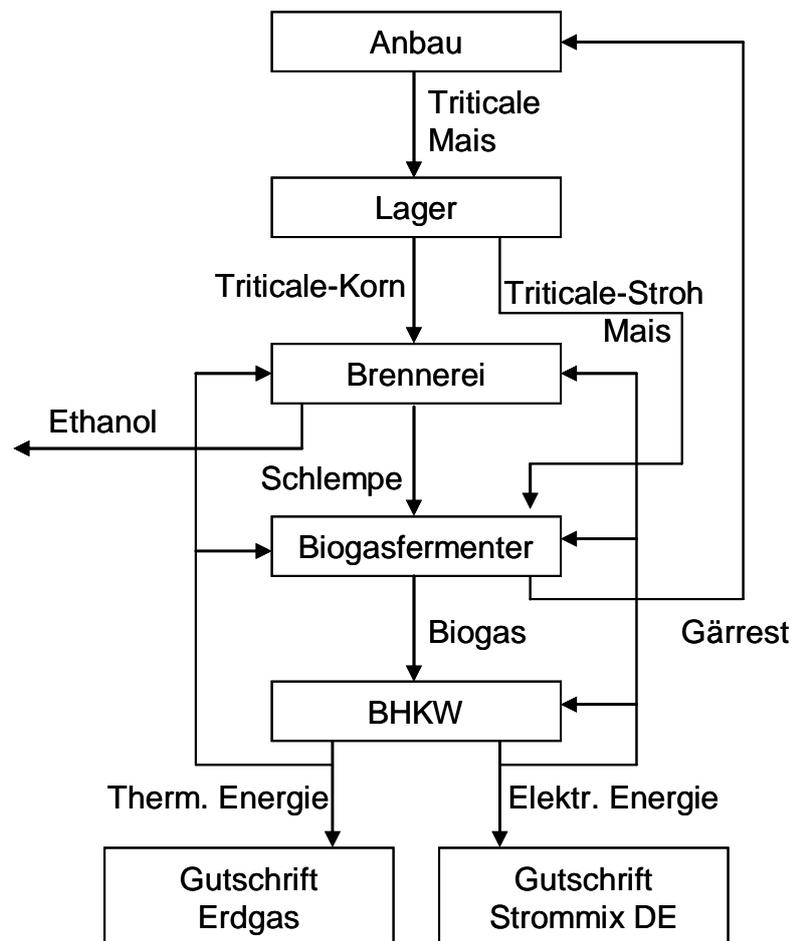


Abb. 4.6.2: Szenario 4: Getreidekorn in Bioethanol und Mais/Getreidestroh/Schlempe in Biogas mit Gärrestverwertung

In der nachfolgenden Abbildung 4.6.3 ist Szenario 5 dargestellt, bei dem Maisganzpflanzensilage als Input für die Brennerei und die Maisschlempe als Input für die Biogasanlage dienen. Auch hier werden die Gärreste zurückgeführt.

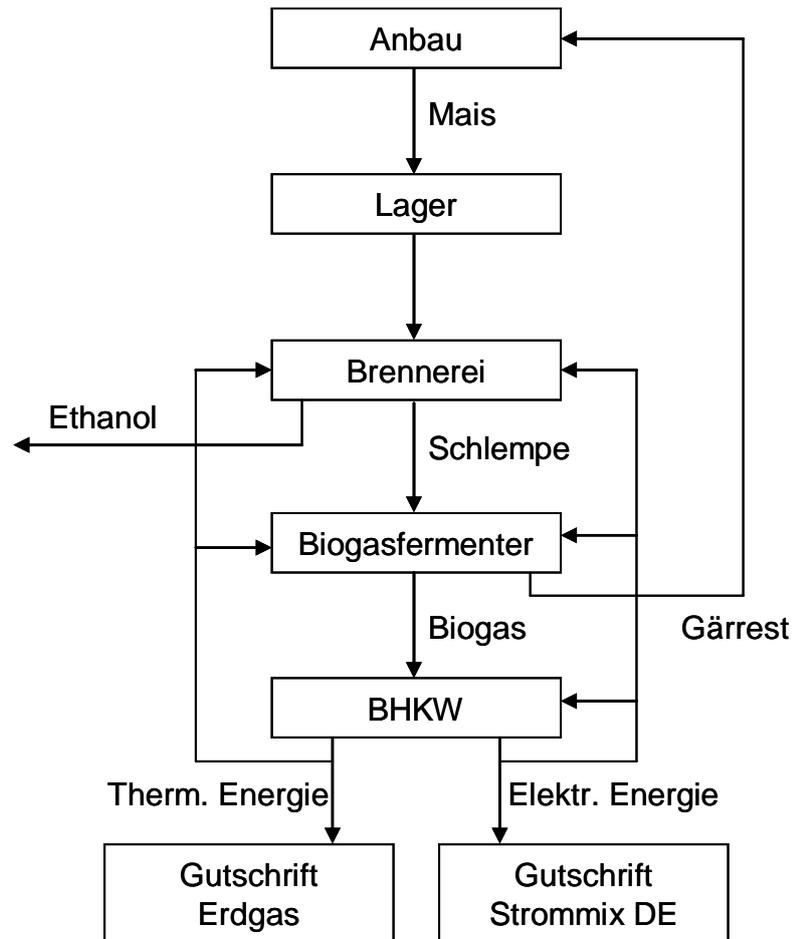


Abb. 4.6.3: Szenario 5: Maisganzpflanze in Bioethanol und Maisschlempe in Biogas mit Gärrestverwertung

Tabelle 4.6.2 zeigt die spezifischen Methanerträge von Mais und Triticale, deren Schlemphen und des mit Steam Explosion behandelten Materials. Diese Daten wurden für die Berechnung der Methanhektarerträge verwendet.

Tab. 4.6.2: Spezifische Methanerträge von Mais und Triticale, deren Schlemphen und des mit Steam Explosion behandelten Materials

	Spezifischer Methanertrag Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> / kg oTS
Mais	0,376
Mais Steam Explosion	0,399
Triticalekorn	0,368
Triticalestroh	0,300
Triticalestroh Steam Explosion	0,345
Schlempe Mais	0,344
Schlempe Korn	0,340

Das gewonnene Biogas wurde mittels Blockheizkraftwerk verstromt bzw. in thermische Energie gewandelt. Der elektrische Wirkungsgrad des BHKWs wurde mit 38 % (aufgerundet nach FNR, 2005) und der thermische mit 48 % (zwischen 22,8 und 55 % nach FNR, 2005) angesetzt, das entspricht einem Gesamtwirkungsgrad von 86 %. Sowohl die elektrische als auch die thermische Energie wurde für die Versorgung des Modellbetriebs eingesetzt, und die überschüssige Energie konnte vermarktet werden und wurde als Gutschrift behandelt.

Der Eigenverbrauch des BHKWs an elektrischer Energie wurde mit 2 % und der des Fermenters mit 6 % der produzierten elektrischen Energie angesetzt. Von Dachs und Rehm (2006) wird ein aktueller Eigenstromverbrauch von Biogasanlagen von insgesamt 8,1 % angegeben. In anderen Quellen wird der Anteil des BHKWs am Eigenstrombedarf mit einer Spanne von 10 bis 40 % ausgewiesen (FNR, 2005). Wählt man nun einen mittleren Wert von 25 % des Eigenstrombedarfs, entspricht das den angesetzten 2 % der produzierten elektrischen Energie. Der Bedarf an thermischer Energie für den Biogasfermenter bei einer Fermentationstemperatur von 38 °C wurde anhand der Substratmenge, der spezifischen Wärmekapazität und der Annahme einer durchschnittlichen Temperaturerhöhung des Substrats um 30 K errechnet.

In allen acht Szenarien, ausgenommen Nr. 5, war der Modellbetrieb im Bereich thermischer und elektrischer Energie autark. Somit wurden nur für die bei Anbau und Transport der Biomasse benötigten Kraftstoffe sowie für die vorgelagerten Prozesse z.B. der Düngemittelherstellung fossile Energieträger eingesetzt. Die Kraftstoffverbräuche für den Transport zwischen Silo und Fermenter wurden nach Frisch et al. (2004) kalkuliert. Der Energiebedarf zur Vorzerkleinerung des Getreides für den Biogasprozess wurde anhand von Daten der FNR (o.J.) berechnet.

## 5 Ergebnisse der eigenen Untersuchungen

### 5.1 Biogasgewinnung

#### 5.1.1 Ergebnisse der Substrataufbereitung für Biogas

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Untersuchungen zur Vorbehandlung von Mais und Triticale (teigreif, vollreif) für die Biogas-/Methangewinnung dargestellt. Zur Bearbeitung der Fragestellung, ob durch die Biomassevorbehandlung eine Erhöhung der Methanerträge und eine Beschleunigung der Methangärung zu erzielen sind, wurden drei Versuchsdurchgänge mit jeweils neun 30-Liter-Fermentern und ein Hohenheimer Biogasertragstest mit 120 Minifermentern durchgeführt.

Die in den 30-L-Fermentern untersuchten Vorbehandlungsvarianten sind in Tabelle 5.1.1.1 und Tab. 5.1.1.2 zusammengefasst. Die Details der Durchführung der Aufbereitung der Biomasse und der Vergärungsversuche sind dem Abschnitt Material und Methoden zu entnehmen.

In Tabelle 5.1.1.1 sind die drei Aufbereitungsvarianten der vollreifen Triticale aufgeführt. Aufgrund der teilweise unterschiedlichen Anforderungen an die Aufbereitung von stärke- bzw. faserreicher Biomasse wurden die Fraktionen Stroh (Anteil an der Gesamttrockensubstanz 54 %) und Korn (Anteil an der Gesamttrockensubstanz 46 %) getrennt voneinander vorbehandelt (Schumacher et al., 2007 a).

Tab. 5.1.1.1: Varianten der Vorbehandlung des Triticalekorns/-strohs (vollreif)

	<b>Triticalekorn</b>	<b>Triticalestroh</b>
1	gequetscht	gehäckselt, 10 mm
2	gemahlen, 1 mm	gemahlen, 1 mm
3	dispergiert	steam exploded (Thermo-Druck-Aufschluss)

Tabelle 5.1.1.2 zeigt die unterschiedlichen Aufbereitungsvarianten der teigreifen Triticale und des teigreifen Maises, die als Ganzpflanzen vorbehandelt wurden.

Tab. 5.1.1.2: Varianten der Vorbehandlung der teigreifen Triticale und von siloreifem Mais

	<b>Triticale, teigreif</b>	<b>Mais, teigreif</b>
1	frisch	frisch
2	frisch exploded	frisch exploded
3	siliert	siliert
4	siliert exploded	siliert exploded

Tabelle 5.1.1.3 gibt einen Überblick über alle Aufbereitungsvarianten des teigreifen Mais, der teigreifen Triticale sowie der reifen Triticale, die im Hohenheimer Biogasertragstest (HBT) untersucht wurden.

Tab. 5.1.1.3: Überblick über die im HBT untersuchten Aufbereitungsverfahren von Mais und Triticale

	<b>Triticale, trocken</b>	<b>Triticale, teigreif</b>	<b>Mais, siloreif</b>
1	Triticale Korn gequetscht	Triticale frisch	Mais frisch
2	Triticale Korn gemahlen 1 mm	Triticalesilage	Maissilage
3	Triticale Korn dispergiert	Triticale frisch explod.	Mais frisch exploded
4	Triticale Stroh gemahl. 10 mm	Triticalesilage exploded	Maissilage exploded
5	Triticale Stroh gemahlen 1 mm	Triticale frisch gekocht	Mais frisch gekocht
6	Triticale Stroh exploded	Triticalesilage gekocht	Maissilage gekocht
7	Triticale Stroh (10 mm) gekocht	Triticale frisch MW	Mais frisch MW
8	Triticale Stroh (10 mm) MW	Triticalesilage MW	Maissilage MW

MW=Mikrowelle

Tabelle 5.1.1.4 gibt einen Überblick über die Trockensubstanz- und die organischen Trockensubstanzgehalte der vollreifen Triticale (Korn und Stroh separat) für drei Aufbereitungsvarianten nach der Vorbehandlung.

Tab. 5.1.1.4: Trockensubstanzgehalte (TS) und organische Trockensubstanzgehalte (oTS) der vollreifen Triticale in Prozent für drei Aufbereitungsvarianten

Korn			Stroh		
Variante	TS [%]	oTS [%]	Variante	TS [%]	oTS [%]
gequetscht	85,68	83,94	gehäckselt	90,26	84,58
gemahlen	94,42	92,52	gemahlen	90,81	85,10
dispergiert	19,22	18,81	exploded	3,71	3,33

oTS bezogen auf Gesamtmasse nicht auf TS

In Tabelle 5.1.1.5 sind die Trockensubstanzgehalte (TS), organischen Trockensubstanzgehalte (oTS) und die auf flüchtige Stoffe korrigierten organischen Trockensubstanzgehalte (oTS k) (alle in Prozent der Frischmasse) der teigreifen Triticale und des teigreifen Maises zusammengefasst.

Tab. 5.1.1.5: Trockensubstanzgehalte (TS), organische Trockensubstanzgehalte (oTS) und der auf flüchtige Stoffe korrigierte organische Trockensubstanzgehalt (oTS k) der teigreifen Triticale und des teigreifen Maises in Prozent

	TS [%]	oTS [%]	oTS k [%]
Triticale frisch	37,54	35,67	35,71
Triticale frisch exploded	4,24	3,98	4,01
Triticale siliert	35,09	33,21	34,15
Triticale siliert exploded	4,21	3,93	4,05
Mais frisch	28,16	27,06	27,06
Mais frisch exploded	5,38	5,17	5,22
Mais siliert	26,22	25,29	26,26
Mais siliert exploded	4,79	4,58	4,78

oTS bezogen auf Gesamtmasse, nicht auf TS

Da bei der Bestimmung des Trockensubstanzgehalts bzw. des organischen Trockensubstanzgehalts nach EN 12880 und EN 12879 flüchtige Bestandteile unberücksichtigt bleiben, die gerade in Silagen in nicht unerheblichen Maßen vorhanden sind, erfolgte die Korrektur der organischen Trockensubstanz, wie in Material und Methoden beschrieben.

Die Inhaltsstoffe der Biomasseproben wurden vor und nach der Vorbehandlung mittels Futtermittelanalyse nach dem Wender-van Soest-System untersucht. In Abbildung 5.1.1.1 sind die unvorbehandelten und vorbehandelten Varianten (Steam Explosion) des teigreifen Mais, der teigreifen Triticale und der reifen Triticale einander gegenübergestellt.

Abbildung 5.1.1.1 verdeutlicht, dass sich die mit den Methoden der Weender-van Soest-Analytik ermittelten neutralen Detergentien-Fasern (NDF) durch die Steam-Explosion-Behandlung verringern. Dagegen steigen die nicht bestimmten Anteile, die als organischer Rest ausgewiesen werden können, in starkem Maße an.

Durch die Vorbehandlung mit der Steam Explosion stieg der organische Rest (er umfasst auch Zucker und Stärke, die hier nicht extra ausgewiesen werden) beim Stroh von 5,3 % auf 25,4 %. Bei der teigreifen Triticale als Ganzpflanze erhöhte sich der organische Rest beim frischen Material von 36,7 % auf 44,8 % und beim silierten von 32,1 % auf 41,9 %. Auch beim teigreifen Mais war eine Erhöhung des organischen Rests des frischen Materials von 38,3 % auf 56,1 % und des silierten Materials von 35,6 % auf 54,0 % zu verzeichnen.

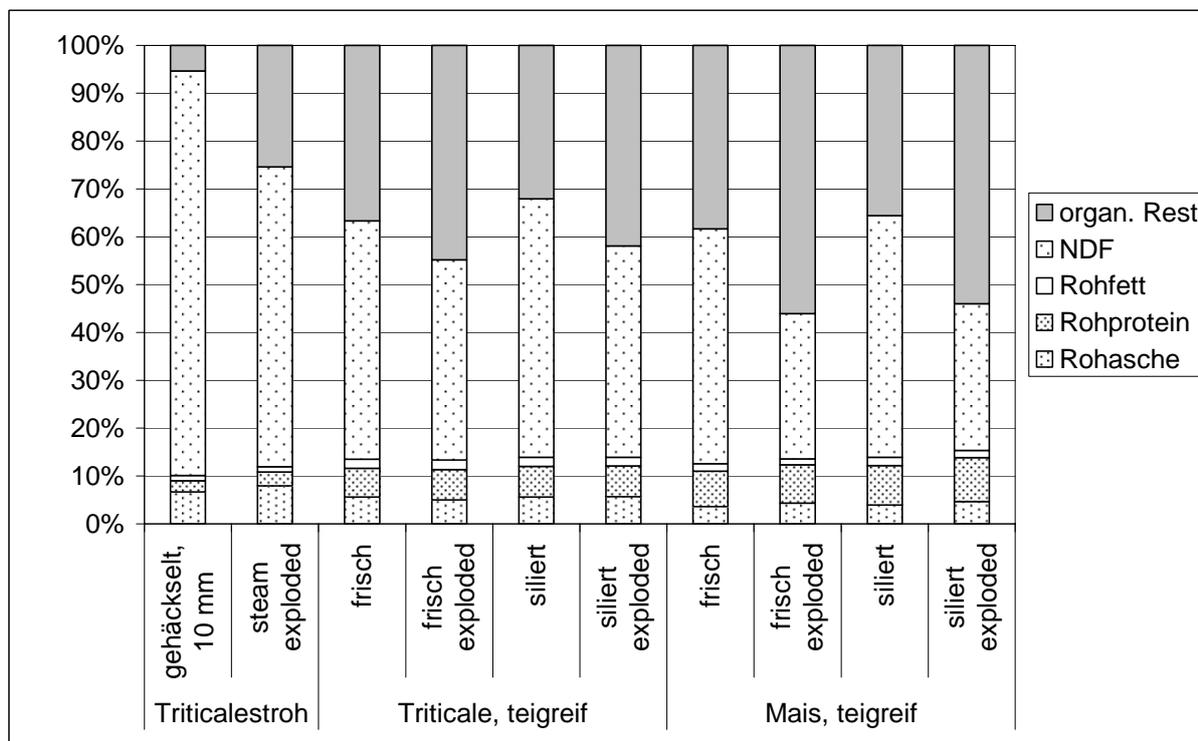


Abb. 5.1.1.1: Zusammensetzung der unvorbehandelten und vorbehandelten Biomasse (organ. Rest – organischer Rest, NDF – neutrale Detergentien-Faser, Rohfett, Rohprotein, Rohasche)

In Abbildung 5.1.1.2 sind die Gerüstsubstanzen detaillierter dargestellt. Durch die Steam Explosion wurde unabhängig von der Pflanzenart hauptsächlich die Hemicellulose reduziert.

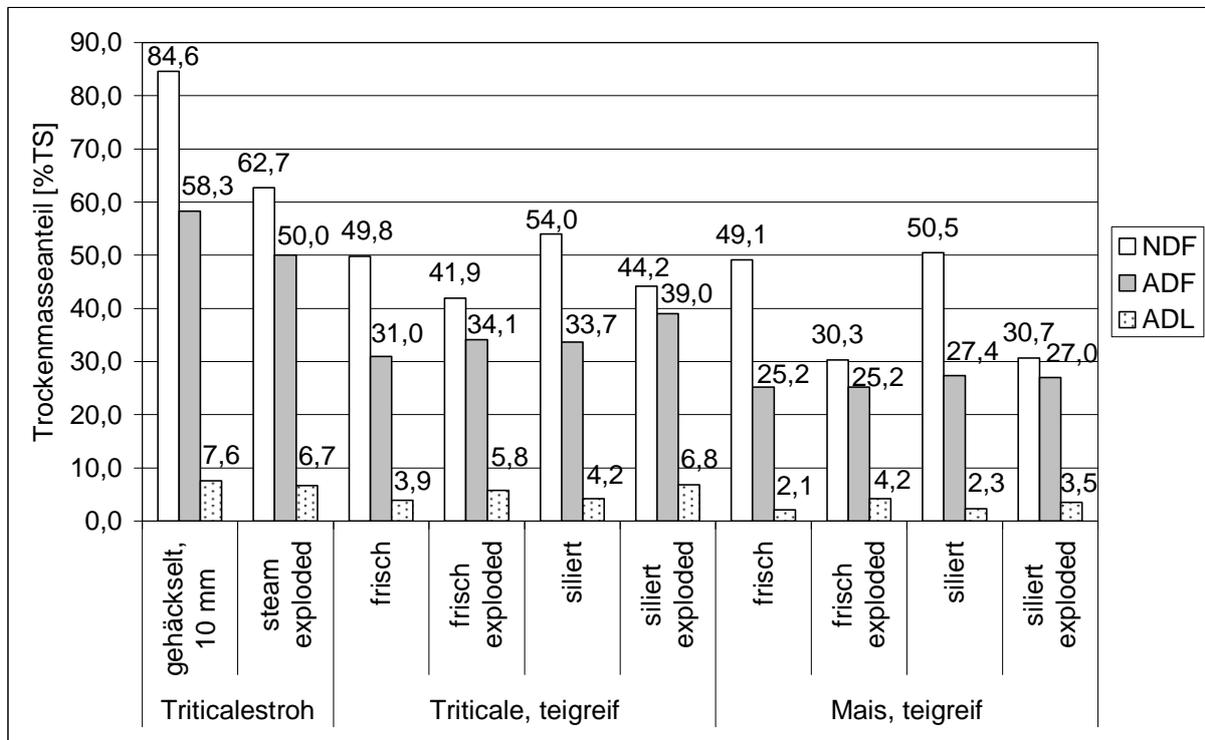


Abb. 5.1.1.2: Zusammensetzung der unvorbehandelten und der vorbehandelten Biomasse (NDF – neutrale Detergentien-Faser, ADF – saure Detergentien-Faser, ADL – Lignin)

Beim Triticalestroh verringerte sich der Anteil der ADF (sowohl Cellulose als auch Lignin) durch die Vorbehandlung. Dagegen stiegen bei der teigreifen Triticale die ADF- und ADL-Anteile leicht an. Beim Mais wiederum blieben die ADF-Anteile nahezu konstant, während sich der ADL-Anteil innerhalb der ADF erhöhte.

Der als Rohprotein bestimmte Anteil stieg nach der Vorbehandlung beim Mais deutlich, beim Triticalestroh stieg er ebenfalls, bei der teigreifen Triticale war hingegen keine bzw. eine geringe Erhöhung zu verzeichnen. Mit Ausnahme vom Mais, bei dem der Rohfettanteil leicht sank, blieb dieser Anteil sonst konstant.

In Tabelle 5.1.1.6 ist die prozentuale Zusammensetzung der Gerüstsubstanzen und in Tabelle 5.1.1.7 die der Zellinhaltsstoffe von Mais und Triticale aufgeführt.

Tab. 5.1.1.6: Prozentuale Zusammensetzung der Gerüstsubstanzen von Mais und Triticale

Material	Aufbereitungsverfahren	% der TS			
		Rohfaser	NDF	ADF	ADL
Triticalestroh	gehäckselt, 10 mm	48,3	84,6	58,3	7,6
	steam exploded	41,2	62,7	50,0	6,7
Triticale, teigreif	frisch	26,5	49,8	31,0	3,9
	frisch exploded	27,1	41,9	34,1	5,8
	siliert	28,7	54,0	33,7	4,2
	siliert exploded	31,8	44,2	39,0	6,8
Mais, teigreif	frisch	22,1	49,1	25,2	2,1
	frisch exploded	21,0	30,3	25,2	4,2
	siliert	24,2	50,5	27,4	2,3
	siliert exploded	22,0	30,7	27,0	3,5

Tab. 5.1.1.7: Prozentuale Zusammensetzung der Zellinhaltsstoffe von Mais und Triticale

Material	Aufberei- tungs- verfahren	TS Original	% der TS		
			Rohasche	Rohprotein	Rohfett
Triticalestroh	gehäckselt, 10 mm	92,3	6,7	2,3	1,1
	steam exploded	5,1	7,9	2,9	1,1
Triticale, teigreif	frisch	39,4	5,6	6,0	1,9
	frisch exploded	5,4	5,0	6,3	2,0
	siliert	37,5	5,6	6,4	1,9
	siliert exploded	5,4	5,7	6,4	1,8
Mais, teigreif	frisch	30,1	3,6	7,4	1,6
	frisch exploded	5,2	4,3	8,0	1,3
	siliert	27,5	3,9	8,3	1,7
	siliert exploded	5,1	4,7	9,1	1,5

### 5.1.1.1 Ergebnisse der Substrataufbereitung bei Mais

Im Folgenden sollen nun die Ergebnisse der Vergärungsversuche mit vorbehandelter Biomasse (teigreifem Mais, teigreifer Triticale und reifer Triticale) detailliert nacheinander dargestellt werden.

In Abbildung 5.1.1.1.1 und Tabelle 5.1.1.1.1 sind die Daten aus dem Aufbereitungsversuch für Mais in den 30-Liter-Fermentern zusammengefasst.

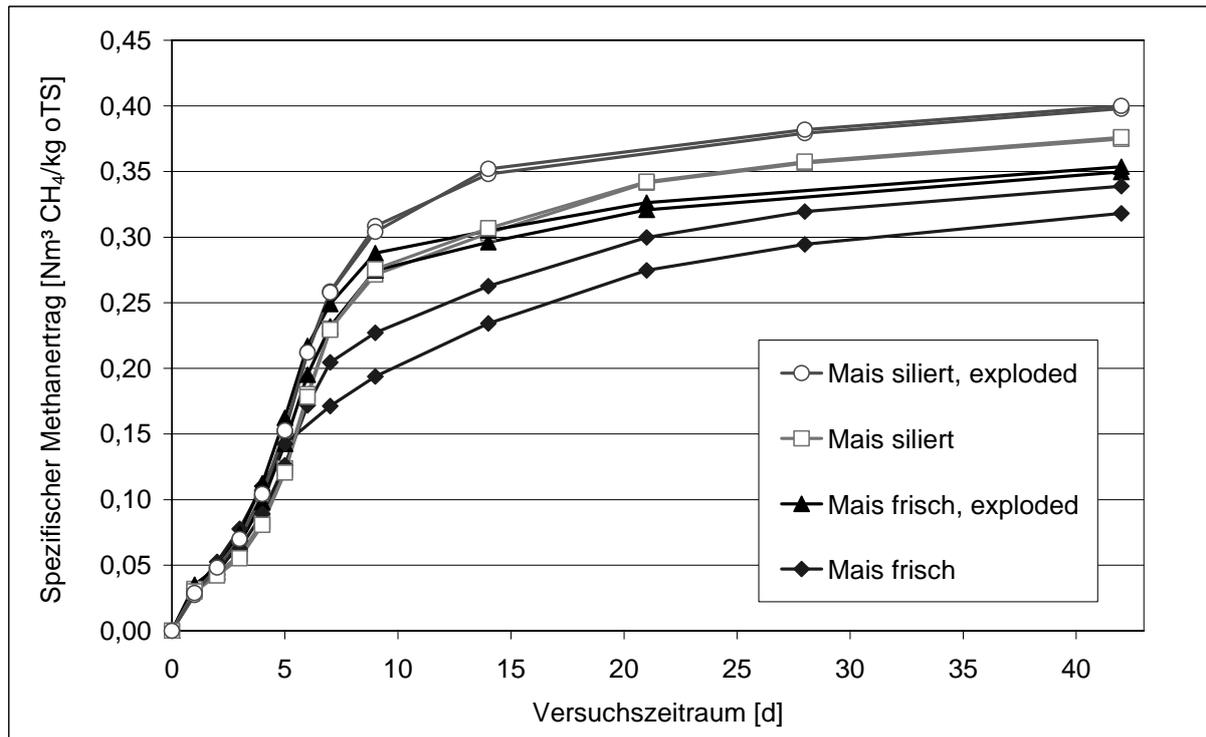


Abb. 5.1.1.1.1: Spezifische Methanerträge ( $\text{Nm}^3$  Methan/kg oTS) der vier Vorbehandlungsvarianten des teigreifen Maises (30-L-Batch-Versuch 42 Tage)

Abgesehen von der Variante „Mais frisch“ mit 4,5 % relativer Standardabweichung zwischen den beiden Wiederholungen, lagen die anderen Varianten mit 0,2 % bis 0,8 % relativer Standardabweichung innerhalb der Doppelbestimmung recht nah beieinander.

Es wurden, ausgehend vom frischen bzw. silierten Mais, maximal 7 % höhere spezifische Methanerträge für die Varianten „exploded“ erzielt, Tabelle 5.1.1.1.1. Neben der Erhöhung der Methanerträge war eine beschleunigte Biogas-/Methanbildung zu beobachten. So konnte mit der Variante „Mais siliert, exploded“ nach 28 Tagen ein spezifischer Methanertrag von  $0,381 \text{ Nm}^3$  Methan/kg oTS erzielt

werden, während die einfach silierte Vergleichsvariante nach 42 Tagen mit 0,376 Nm<sup>3</sup> Methan/kg oTS dieses Niveau noch nicht ganz erreicht hatte.

Insgesamt waren die Unterschiede in den spezifischen Methanerträgen zwischen den Maisvarianten bei den Batch-Versuchen mit den 30-L-Fermentern geringer als bei der teigreifen Triticale (Schumacher et al., 2007 a), deren Erträge im nächsten Kapitel dargestellt sind.

Tab. 5.1.1.1.1: Spezifische Methanerträge (Nm<sup>3</sup> Methan/kg oTS), Standardabweichung, relative Standardabweichung und prozentuale Unterschiede der Vorbehandlungsvarianten des teigreifen Maises (30-L-Batch-Versuch 42 Tage und HBT 35 Tage)

Mais, teigreif		n	Spezif. CH <sub>4</sub>	STD	rel. STD	Änderung
			Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg oTS	Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg oTS	%	%
30-L-Fermenter	Mais frisch	2	0,328	0,015	4,5	100
	Mais frisch, exploded	2	0,352	0,003	0,8	107
	Mais siliert	2	0,376	0,001	0,2	100
	Mais siliert, exploded	2	0,399	0,002	0,4	106
HBT	Mais frisch gemixt	4	0,346	0,025	7,1	100
	Mais frisch gemixt gekocht	4	0,334	0,011	3,4	97
	Mais frisch gemixt Mikrowelle	5	0,321	0,008	2,4	93
	Mais frisch exploded	5	0,384	0,018	4,7	111
	Mais siliert gemixt	5	0,372	0,008	2,3	100
	Mais siliert gemixt gekocht	4	0,363	0,007	1,9	97
	Mais siliert gemixt Mikrowelle	5	0,385	0,031	7,9	103
	Mais siliert exploded	5	0,397	0,021	5,3	106

Neben den Ergebnissen des 30-L-Batch-Versuchs mit teigreifem Mais sind in Tab. 5.1.1.1.1 auch die Ergebnisse für die gleiche Ausgangsbiomasse mit anderen Aufbereitungsvarianten dargestellt, die im Hohenheimer Biogasertragstest (HBT) untersucht wurden. Die Messergebnisse des HBT bestätigen die Ergebnisse der vergleichbaren Varianten des 30-L-Batch-Versuchs recht gut. Während im „Mais frisch“ (30 L) 0,328 Nm<sup>3</sup> Methan/kg oTS im Verlauf von 42 Tagen gebildet wurden, war ein spezifischer Methanertrag von 0,346 Nm<sup>3</sup> Methan/kg oTS beim „Mais frisch gemixt“ (Zerkleinerung mit Büchmixer) nach nur 35 Tagen zu verzeichnen.

Vergleicht man parallel dazu die silierten Varianten, dann wurden beim „Mais siliert“ (30 L) 0,376 Nm<sup>3</sup> Methan/kg oTS im Verlauf von 42 Tagen gebildet und beim „Mais

siliert gemixt“ nach 35 Tagen 0,372 Nm<sup>3</sup> Methan/kg oTS (Zerkleinerung mit Büchi-Mixer).

Die siliert explodierten Varianten aus beiden Versuchen lagen mit 0,399 Nm<sup>3</sup> Methan/kg oTS in 42 Tagen bzw. 0,397 Nm<sup>3</sup> Methan/kg oTS in 35 Tagen im HBT noch näher beieinander. Beim „Mais frisch exploded“ traten hingegen mit 0,352 Nm<sup>3</sup> Methan/kg oTS in 42 Tagen bzw. 0,384 Nm<sup>3</sup> Methan/kg oTS in 35 Tagen im HBT deutliche Unterschiede auf.

Mit einer Ausnahme, der Variante „Mais siliert gemixt Mikrowelle“, lagen die spezifischen Methanerträge der Varianten „gekocht“ und „Mikrowelle“ leicht bis deutlich unter denen der unbehandelten Ausgangsbiomasse. Der statistische Vergleich mittels T-Test der Variante „frisch“ mit den anderen Varianten mit Aufbereitung ergab nur für „Steam Explosion“ einen signifikanten Unterschied. Das Gleiche gilt auch für die silierten Varianten.

Abb. 5.1.1.1.2 zeigt die Entwicklung der spezifischen Methanerträge (Nm<sup>3</sup> Methan/kg oTS) der vier Vorbehandlungsvarianten des teigreifen Maises bzw. der Maissilage im Hohenheimer Biogasertagstest über 35 Tage.

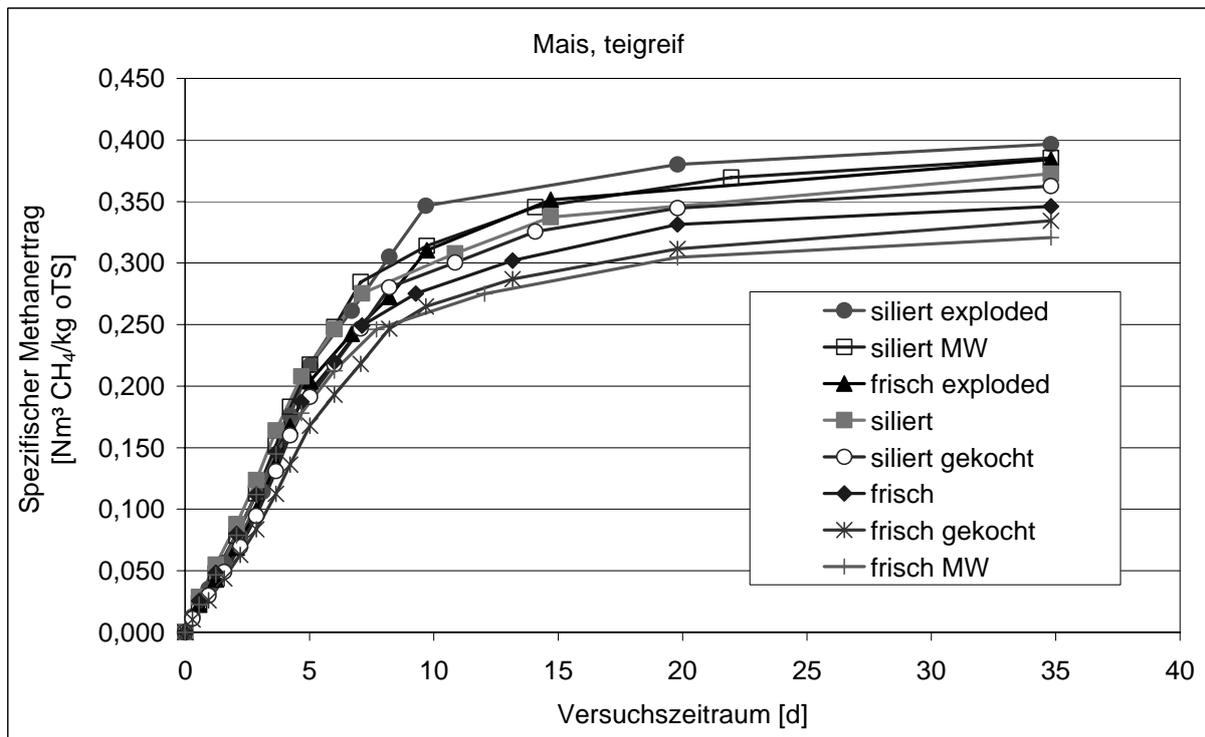


Abb. 5.1.1.1.2: Spezifische Methanerträge (Nm<sup>3</sup> Methan/kg oTS) der vier Vorbehandlungsvarianten des teigreifen Maises bzw. der Maissilage (HBT 35 Tage) (MW=Mikrowelle)

Abbildung 5.1.1.1.3 zeigt die Methangehalte während des Vergärungsversuchs mit teigreifem Mais in 30-L-Fermentern. Beim Maisversuch waren die größten Änderungen des Methangehalts, wie bei den beiden anderen Versuchsdurchgängen mit Triticale, beim steam explodeten Material, besonders bei siliertem, mit 26,0 % bis 73,9 % zu beobachten. Die geringsten Änderungen traten beim frischen Mais mit einem Methangehalt von minimal 32,6 % und maximal 66,6 % auf. Über den gesamten Versuchsverlauf lag der Methangehalt beim frischen Mais im Mittel bei 55 %, bei allen anderen Varianten bei 56 %.

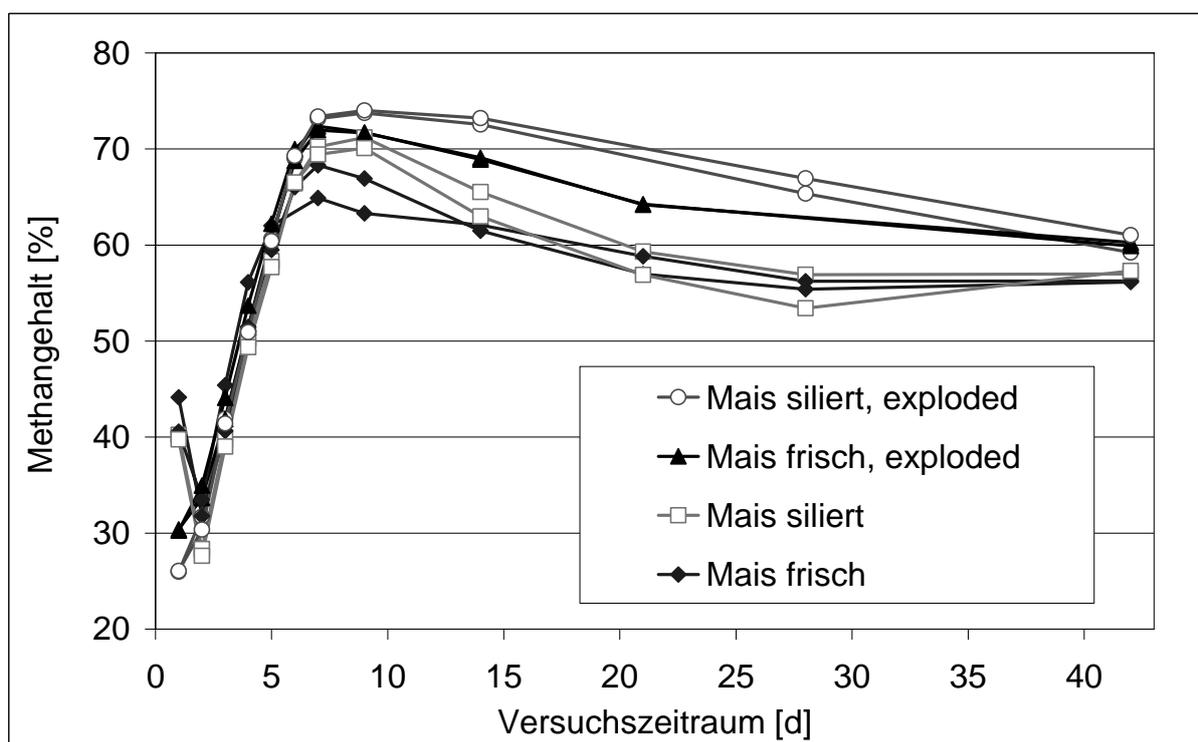


Abb. 5.1.1.1.3: Methangehalte im Biogas (%) der vier Vorbehandlungsvarianten von teigreifem Mais (30-L-Batch-Versuch 42 Tage)

Nach derzeitigem Wissenstand wird der Biogasprozess in vier Phasen unterteilt: Hydrolyse, Versäuerung, Essigsäure- und Methanbildung (Maurer und Winkler, 1982). Die gemessenen Säurekonzentrationen sind ein Maß für die Balance des Zusammenspiels der verschiedenen Bakteriengruppen dieser vier Phasen. Hohe Säurekonzentrationen sind somit ein Indikator für ein temporäres Ungleichgewicht bei Propionsäure zwischen Säure- und Acetatbildnern bzw. bei Essigsäure zwischen Acetat- und Methanbildnern.

Im Fokus der folgenden Betrachtungen stehen die Essig- und die Propionsäure, da sie den größten Anteil an der Gesamtsäurekonzentration stellen. Auf die Darstellung der Einzelkonzentrationen der weiteren flüchtigen Fettsäuren iso-Butter-, n-Butter- und iso-Valeriansäure wurde aufgrund ihres sporadischen Auftretens und ihrer sehr geringen Konzentrationen (Triticale max. 116 ppm, meist deutlich < 100) bei Triticale verzichtet. Da bei Mais Konzentrationen an n-Buttersäure von bis zu 1200 ppm (steam explodiertes Material) auftraten, wurde hier zusätzlich das Essigsäureäquivalent dargestellt, bei dessen Berechnung alle Säuren berücksichtigt wurden.

Die Abbildung 5.1.1.1.4 gibt den Verlauf der Essigsäurekonzentration (in ppm) in den Biogasfermentern der vier Aufbereitungsvarianten des reifen Mais und Abbildung 5.1.1.1.5 entsprechend den der Propionsäurekonzentration wieder.

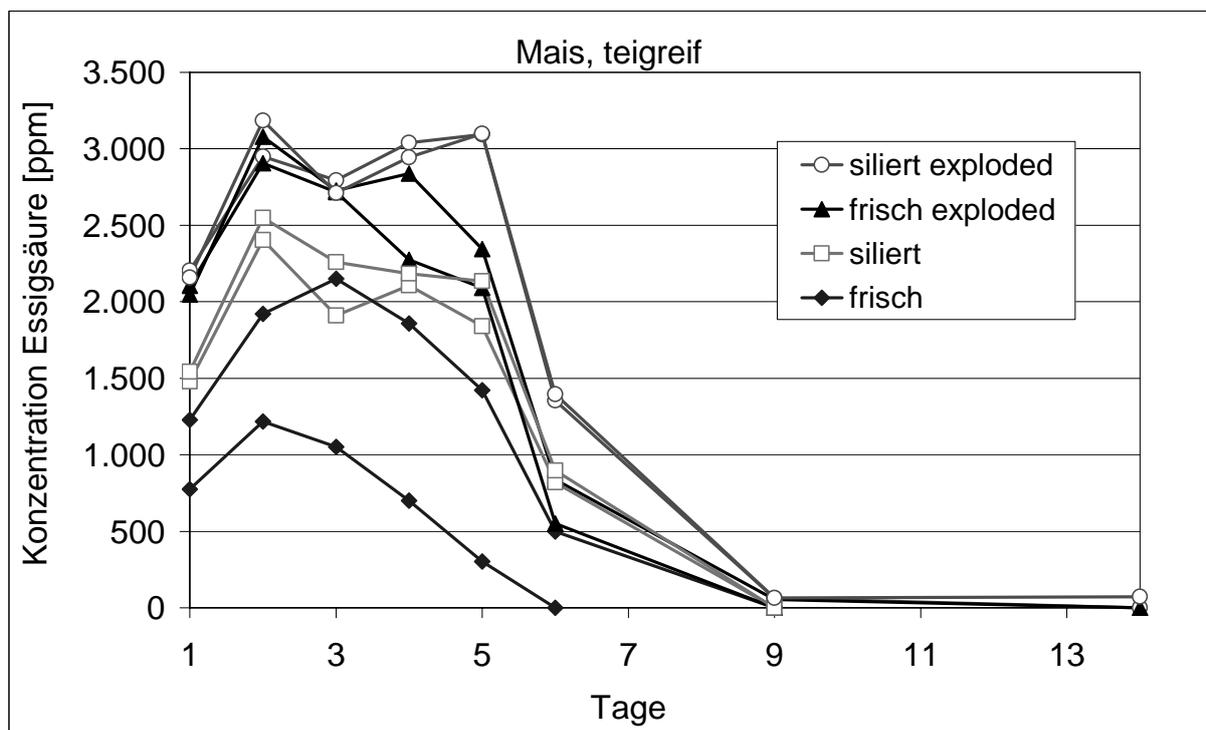


Abb. 5.1.1.1.4: Essigsäurekonzentration (ppm) in den Biogasfermentern der vier Vorbehandlungsvarianten des teigreifen Mais in den 30-L-Fermentern

Verglichen mit den Verläufen der Säurekonzentrationen bei den Versuchsdurchgängen mit Triticale traten beim Mais, abgesehen von der Variante „Steam Explosion“, deutlichere Unterschiede auch zwischen den zwei Fermentern einer Variante auf. Die höchsten Essigsäurekonzentrationen waren bei den Varianten

mit Steam Explosion zu verzeichnen, während die Propionsäurekonzentrationen in den Fermentern mit dem silierten Material am ersten Tag am höchsten lagen und auch danach über denen der Variante „frisch exploded“ blieben.

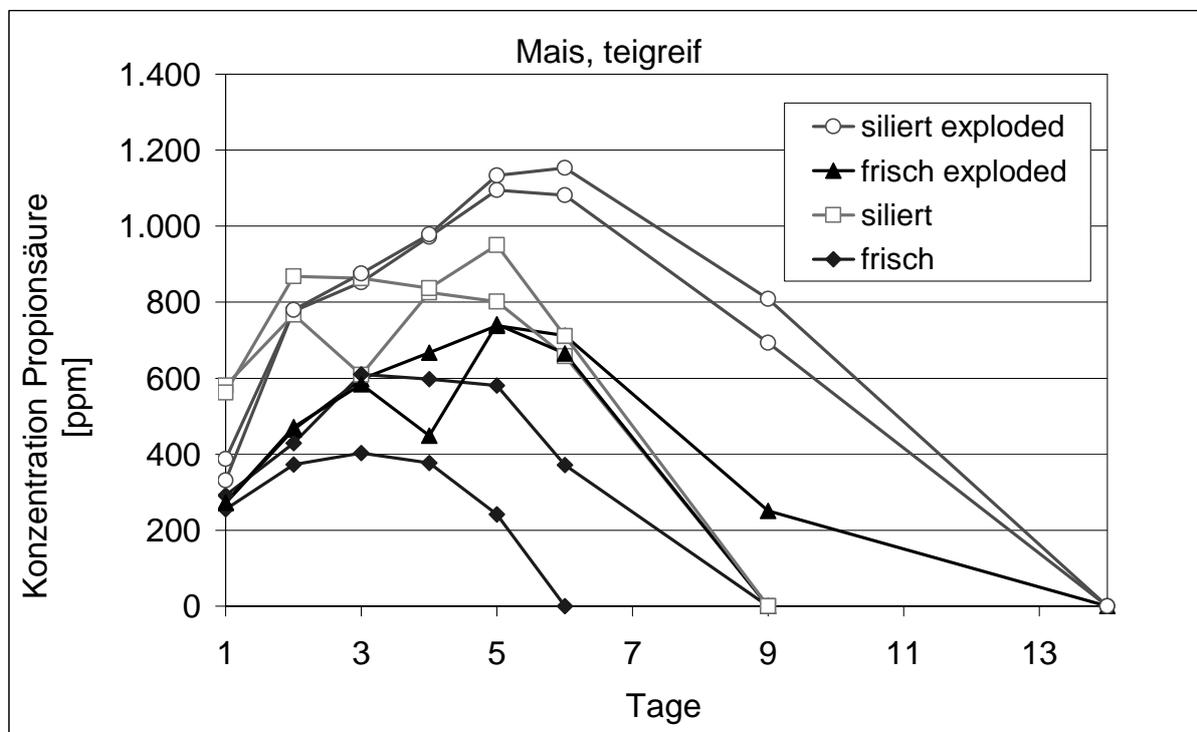


Abb. 5.1.1.1.5: Propionsäurekonzentration (ppm) in den Biogasfermentern der vier Vorbehandlungsvarianten des teigreifen Mais in den 30-L-Fermentern

Während die Konzentration der Essigsäure aller Varianten am neunten Tag des Maisversuchs auf null bzw. deutlich unter 100 ppm sank, lagen die Propionsäurewerte der beiden Varianten mit Steam Explosion bei 0 ppm und 251 ppm bzw. bei 694 ppm und 809 ppm. Mit Ausnahme der Essigsäurekonzentration eines Fermenters der Variante „siliert exploded“, waren ab dem 14. Versuchstag bis zum Ende keine Säuren in den Proben aus den 30-L-Fermentern nachzuweisen.

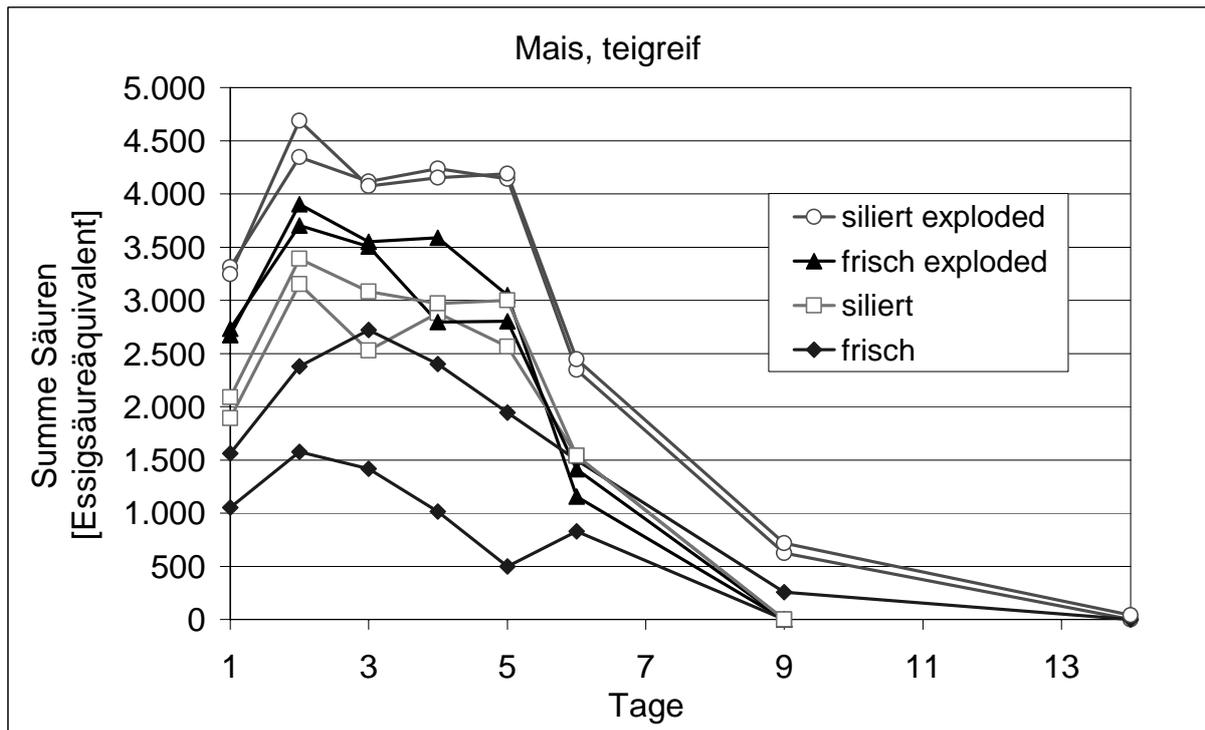


Abb. 5.1.1.1.6: Summe der Säuren (Essigsäureäquivalent) in den Biogasfermentern der vier Vorbehandlungsvarianten des teigreifen Mais in den 30-L-Fermentern

In Abbildung 5.1.1.1.6 sind die Summen der Säuren in den Biogasfermentern der vier Vorbehandlungsvarianten des teigreifen Mais in den 30-L-Fermentern als Mittelwerte der Doppelbestimmungen als Essigsäureäquivalent dargestellt. Maximal bis zum 6. Versuchstag konnten iso-Buttersäure (20 bis 140 ppm) und iso-Valeriansäure (20 bis 130 ppm) gemessen werden. Maximal bis zum 4. Tag konnte n-Buttersäure (30 bis 1200 ppm) bestimmt werden. Nur am 3. und 4. Tag traten sehr geringe Konzentrationen (< 40 ppm) von n-Valerian- und Capronsäure auf. Am 9. Tag bestand die Summe der Säuren praktisch nur noch aus Propionsäure.

### 5.1.1.2 Ergebnisse der Substrataufbereitung bei Triticale, teigreif

Die Ergebnisse der Untersuchungen der spezifischen Methanerträge an teigreifer Triticale in 30-Liter-Fermentern sind in Abbildung 5.1.1.2.1 dargestellt.

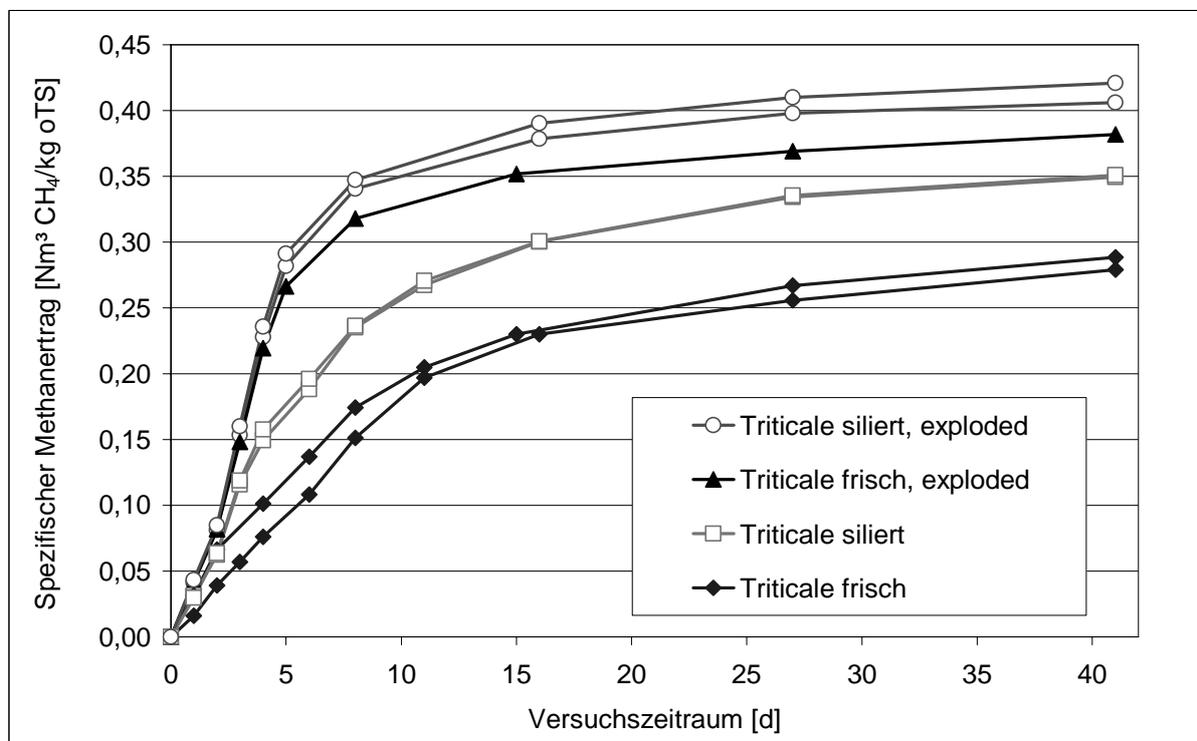


Abb. 5.1.1.2.1: Spezifische Methanerträge ( $\text{Nm}^3$  Methan/kg oTS) der vier Vorbehandlungsvarianten teigreifer Triticale (30-L-Batch-Versuch 42 Tage)

In Tab. 5.1.1.2.1 sind die spezifischen Methanerträge zusammengefasst. Ausgehend von den Varianten mit frischer bzw. siliertes Triticale sind die prozentualen Unterschiede von 34 bzw. 18 % zu den explodierten Varianten in den 30-L-Versuchen aufgeführt. Auffallend sind die beachtlichen Unterschiede in den spezifischen Methanerträgen von 34 % zwischen frischer und explodeter Triticale nach 42 Tagen, die aus den sehr niedrigen spezifischen Methanerträgen der frischen Triticale resultieren (Schumacher et al., 2007 a).

Im Versuch mit dem HBT wirkten sich die Vorbehandlungen auf das silierte und das unsilierte (frische) Material unterschiedlich aus, obwohl die Ausgangsvarianten gleiche spezifische Methanerträge erbrachten. Beim frischen Material war eine Senkung des Ertrags auf 97 % der Variante „gekocht“ und auf 83 % bei der Mikrowellenbehandlung gegenüber der nicht behandelten Variante zu beobachten. Nur die Variante „Triticale frisch, exploded“ zeigte eine leicht positive Wirkung.

Bei der silierten Triticale im HBT-Versuch erbrachte die Variante „gekocht“ mit 106 %, „exploded“ mit 103 % und Mikrowellenbehandlung mit 102 % deutlich positive Effekte.

Bei frischer Triticale konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen der unaufbereiteten und den vorbehandelten Varianten nachgewiesen werden. Für das silierte Material zeigte der T-Test signifikante Unterschiede für die explodierte und gekochte Triticale.

Tab. 5.1.1.2.1: Spezifische Methanerträge ( $\text{Nm}^3$  Methan/kg oTS), Standardabweichung, relative Standardabweichung und prozentuale Unterschiede der vier Vorbehandlungsvarianten teigreifer Triticale (30-L-Batch-Versuch 42 Tage und HBT 35 Tage)

Triticale, teigreif		n	Spezif. $\text{CH}_4$	STD	rel. STD	Änderung
			$\text{Nm}^3 \text{CH}_4/\text{kg oTS}$	$\text{Nm}^3 \text{CH}_4/\text{kg oTS}$	%	%
30-L-Fermenter	Triticale frisch	2	0,284	0,007	2,3	100
	Triticale frisch, exploded	1	0,382	-	-	134
	Triticale siliert	2	0,350	0,001	0,3	100
	Triticale siliert, exploded	2	0,414	0,011	2,6	118
HBT	Triticale frisch gemixt	5	0,363	0,028	7,6	100
	Triticale frisch gemixt gekocht	5	0,354	0,017	4,9	97
	Triticale frisch gemixt Mikrow.	5	0,303	0,057	18,8	83
	Triticale frisch exploded	5	0,373	0,014	3,8	103
	Triticale siliert gemixt	4	0,363	0,005	1,3	100
	Triticale siliert gemixt gekocht	5	0,386	0,013	3,4	106
	Triticale siliert gemixt Mikrow.	5	0,372	0,035	9,3	102
	Triticale siliert exploded	5	0,376	0,005	1,2	103

Mikrow.=Mikrowelle

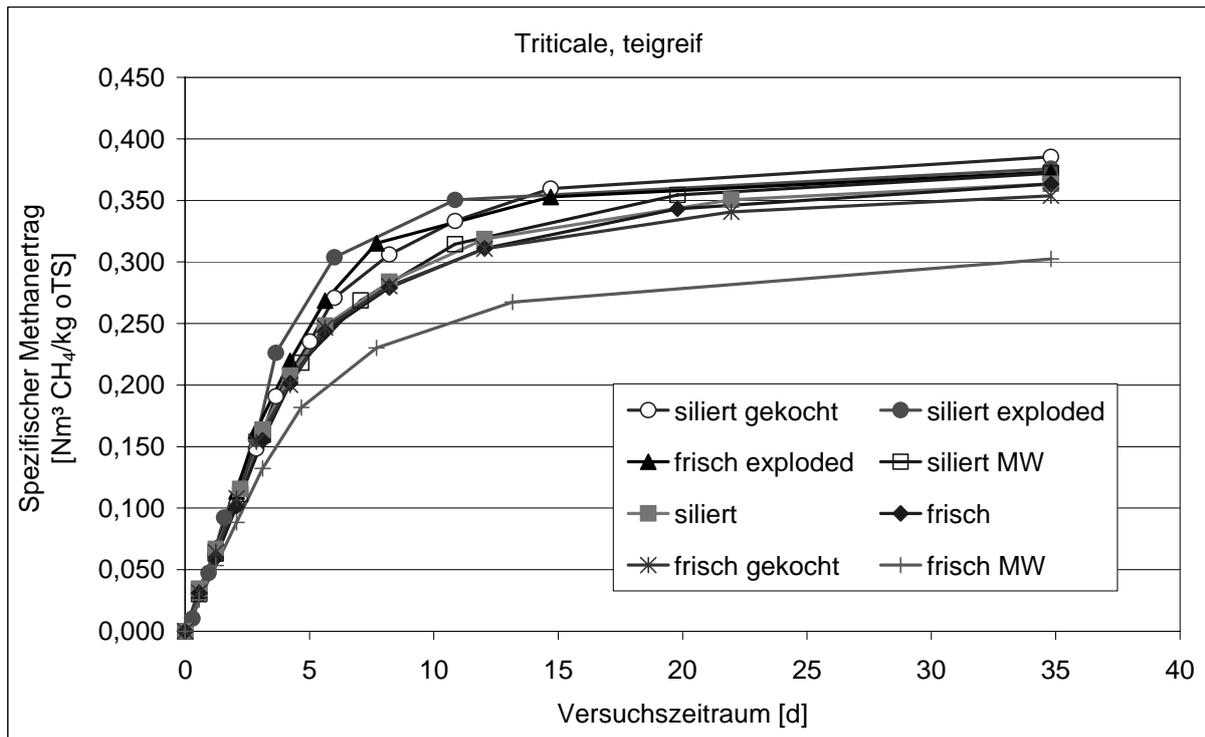


Abb. 5.1.1.2.2: Spezifische Methanerträge ( $\text{Nm}^3$  Methan/kg oTS) der vier Vorbehandlungsvarianten der teigreifen Triticale bzw. der Triticalesilage (HBT 35 Tage)

In Abbildung 5.1.1.2.2 sind die Ergebnisse der Tabelle 3.3.1.2.1 zu den spezifischen Methanerträgen ( $\text{Nm}^3$  Methan/kg oTS) der vier Vorbehandlungsvarianten der teigreifen Triticale bzw. der Triticalesilage im HBT ergänzend grafisch als Summenkurven über den Versuchszeitraum dargestellt.

Abbildung 5.1.1.2.3 bezieht sich hingegen auf den 30-L-Batch-Versuch und die gemessenen Methangehalte im Biogas (%) der vier Vorbehandlungsvarianten von teigreifer Triticale.

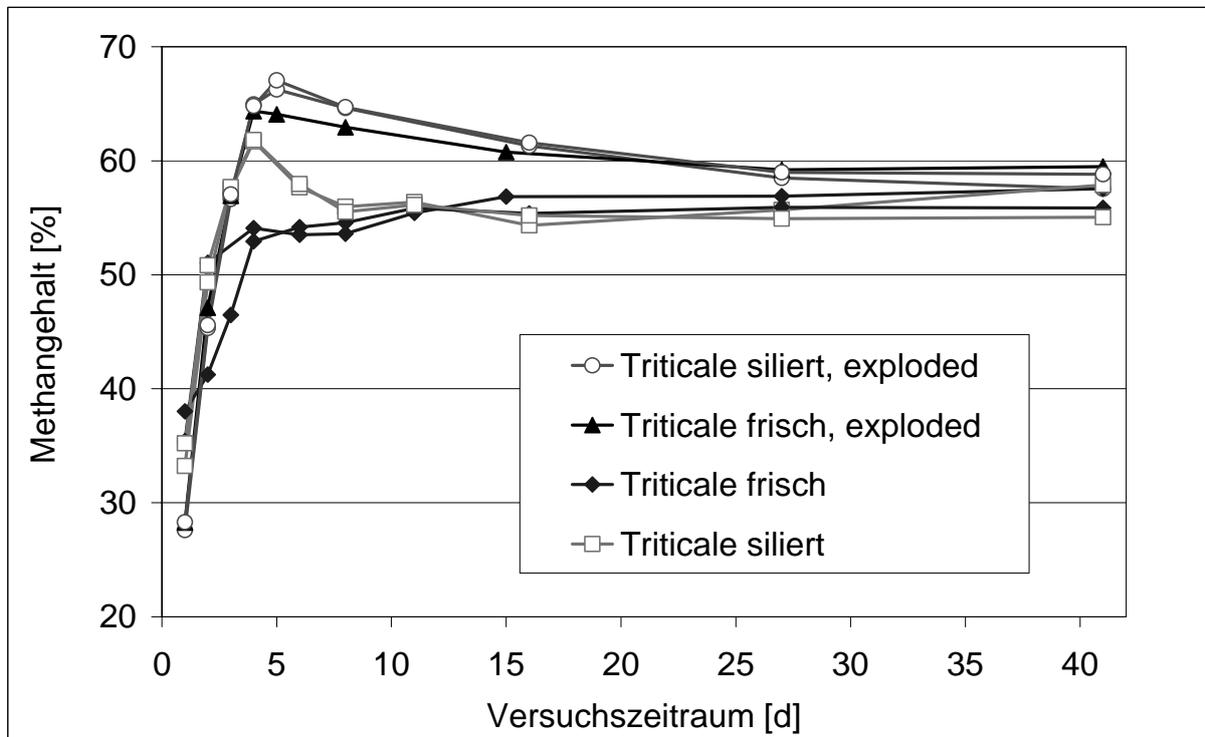


Abb. 5.1.1.2.3: Methangehalte im Biogas (%) der vier Vorbehandlungsvarianten von teigreifer Triticale (30-L-Batch-Versuch 42 Tage)

Wie bei den Versuchen mit dem teigreifem Mais waren auch bei der teigreifen Triticale stärkere Änderungen des Methangehalts im Biogas während der Startphase des Versuchs und die größten beim silierten steam explodierten Material zu verzeichnen. Wobei die Maximalwerte für Mais noch höher lagen.

Beim Versuch mit teigreifer Triticale waren die größten Änderungen des Methangehalts beim steam explodierten Material bei siliertem mit 27,9 % bis 66,7 % zu beobachten. Die geringsten Änderungen traten wiederum beim frischen Material mit einem Methangehalt von minimal 36,7 % und maximal 56,9 % auf. Über den gesamten Versuchsverlauf wurden im Mittel folgende Werte für den Methangehalt errechnet: frisch 51,7 %, frisch exploded 53,7 %, siliert 53,5 % und siliert explodiert 54,3 %.

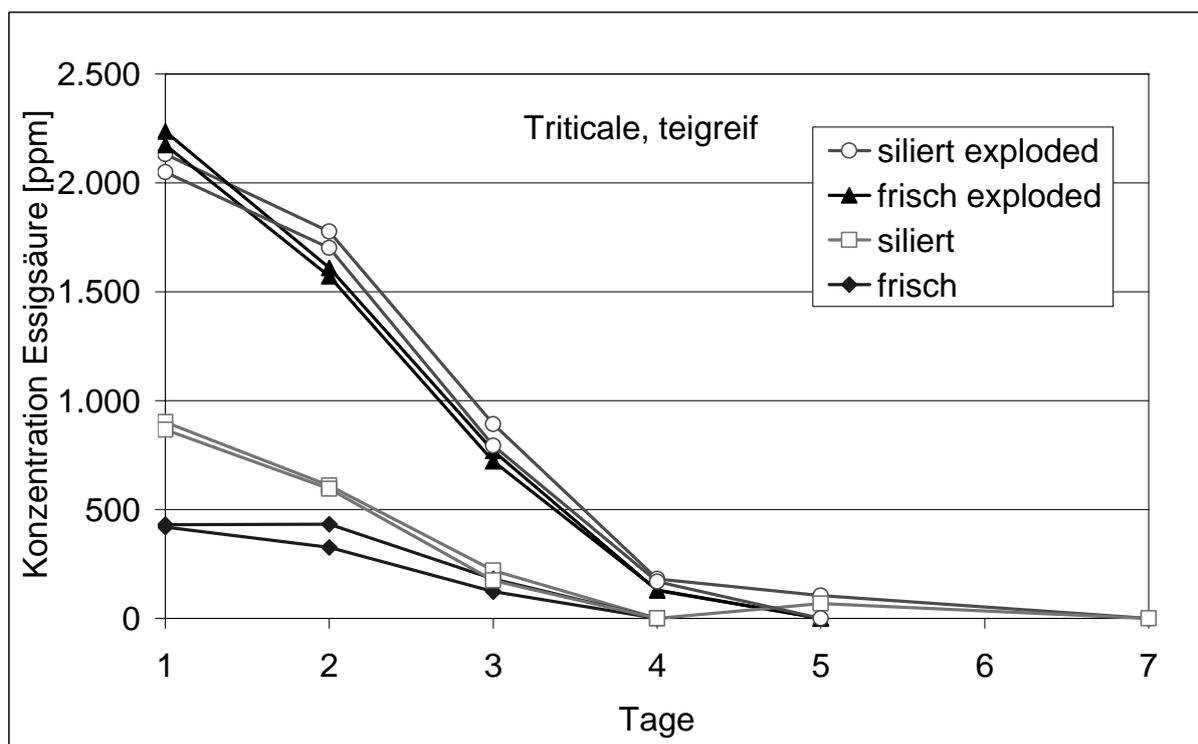


Abb. 5.1.1.2.4: Essigsäurekonzentration (ppm) in den Biogasfermentern der vier Vorbehandlungsvarianten der teigreifen Triticale (Batch-Versuch 42 Tage)

In Abbildung 5.1.1.2.4 ist der Verlauf der Essigsäurekonzentration während der Vergärung der teigreifen Triticale dargestellt. Die Varianten mit Steam Explosion als Vorbehandlung zeigen deutlich höhere Essigsäurekonzentrationen als die Vergleichsvarianten „frisch“ (max. 430 ppm) und „siliert“ (max. 901 ppm) im selben Versuchsdurchgang. Außerdem liegen die Essigsäurekonzentrationen der Varianten „siliert exploded“ (max. 2131 ppm) und „frisch exploded“ (max. 2236 ppm) auch über denen der reifen Triticale „Korn dispergiert + Stroh exploded“ (max. 1804 ppm) des dritten Versuchsdurchgangs.

Abbildung 5.1.1.2.5 zeigt den Verlauf der Propionsäurekonzentration bei der Vergärung teigreifer Triticale, wie er typisch für einen Batch-Versuch ist. Am zweiten Tag wurden die höchsten Konzentrationen an Propionsäure gemessen.

Zwischen dem silierten und unsilierten Material waren die Unterschiede bei der Geschwindigkeit der Säurebildung geringer als bei den Varianten mit Steam Explosion.

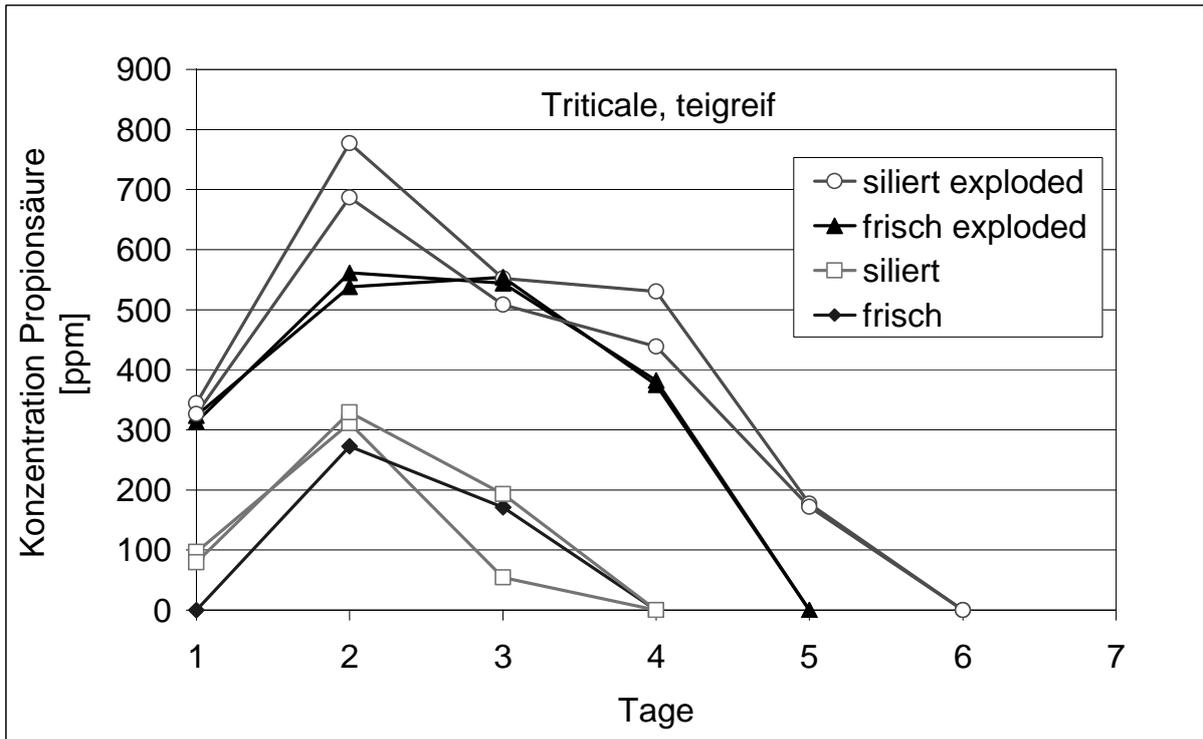


Abb. 5.1.1.2.5: Propionsäurekonzentration (ppm) in den Biogasfermentern der vier Vorbehandlungsvarianten der teigreifen Triticale in den Fermentern (Batch-Versuch 42 Tage)

### 5.1.1.3 Ergebnisse der Substrataufbereitung bei Triticale, reif

Im Folgenden werden die Ergebnisse des dritten Versuchsdurchgangs in den 30-L-Fermentern bzw. die Untersuchungen im HBT mit reifer Triticale vorgestellt.

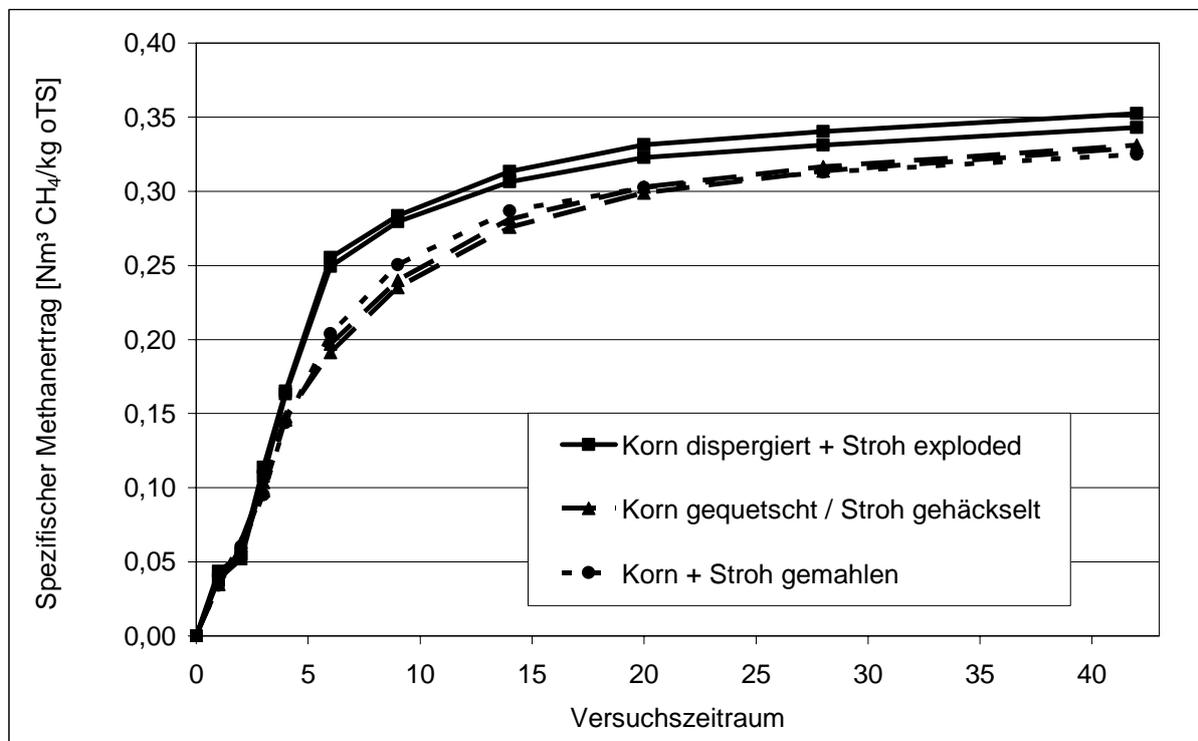


Abb. 5.1.1.3.1: Spezifische Methanerträge ( $\text{Nm}^3 \text{CH}_4 \text{ kg oTS}$ ) der drei Vorbehandlungsvarianten von reifer Triticale (Korn + Stroh) (30-L-Batch-Versuch 42 Tage) (Schumacher et al., 2007 b)

Abbildung 5.1.1.3.1 zeigt die unterschiedlichen Verläufe der Methanbildung anhand der Summenkurven der spezifischen Methanerträge der reifen Triticale als Ganzpflanze (Stroh + Korn). Aufgrund eines technischen Defekts konnte von der Variante, bei der Korn und Stroh auf einen Millimeter gemahlen wurden, nur ein Fermenter zur Auswertung herangezogen werden (Schumacher et al., 2007 b).

Die beiden trocken-mechanischen Aufbereitungsvarianten zeigten einen sehr ähnlichen Verlauf der Methanbildung und mit  $0,330 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ kg oTS}$  bei „Korn gequetscht / Stroh gehäckselt“ sowie  $0,325 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ kg oTS}$  bei „Korn gemahlen / Stroh gemahlen“ auch nahezu gleiche Endwerte. Das gleiche Niveau des spezifischen Methanertrags war mit  $0,327 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ kg oTS}$  bei der nass aufbereiteten Variante „Korn dispergiert / Stroh exploded“ bereits nach 20 Tagen

erreicht. Am Versuchsende nach 42 Tagen lag der spezifische Methanertrag dieser Variante mit 0,348 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> kg/oTS um 5 bis 7 % höher als die Erträge der anderen (s.a. Tab. 5.1.1.3.1) (Schumacher et al., 2007 b).

Tab. 5.1.1.3.1: Spezifische Methanerträge (Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> kg/oTS), Standardabweichung, relative Standardabweichung und prozentuale Unterschiede der drei Vorbehandlungsvarianten vollreifer Triticale (30-L-Batch-Versuch 42 Tage und HBT 35 Tage)

Triticale, vollreif		n	Spezif. CH <sub>4</sub>	STD	rel. STD	Änderung
			Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg oTS	Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg oTS	%	%
30-L-Fermenter	Korn + Stroh gemahlen	1	0,325	-	-	100
	Korn gequetscht + Stroh gehäckselt	2	0,330	0,001	0,4	102
	Korn dispergiert + Stroh exploded	2	0,348	0,007	1,9	107
HBT	Triticale Korn gequetscht	5	0,369	0,012	3,4	100
	Triticale Korn gemahlen 1 mm	5	0,368	0,005	1,4	100
	Triticale Korn dispergiert	5	0,372	0,015	3,9	101
	Triticale Stroh gemahlen 10 mm	5	0,295	0,005	1,7	100
	Triticale Stroh gemahlen 1 mm	5	0,299	0,002	0,8	101
	Triticale Stroh (10 mm) gekocht	4	0,266	0,045	16,8	90
	Triticale Stroh (10 mm) Mikrow.	5	0,233	0,028	12,0	79
	Triticale Stroh exploded	4	0,339	0,013	3,9	115

Bei weiteren Untersuchungen an den einzelnen Fraktionen Korn und Stroh im Hohenheimer Biogasertragstest (HBT) zeigte sich, dass die Erhöhung des spezifischen Methanertrags bei der nass aufbereiteten Variante allein auf eine 15%ige Erhöhung des Methanertrags des Strohs zurückzuführen war. Durch die Aufbereitung des grundsätzlich gut anaerob abbaubaren Triticalekorns konnte keine deutliche Erhöhung des spezifischen Methanertrags erzielt werden. Beim Triticalestroh hingegen war allein die Steam Explosion (115 %) geeignet, einen deutlich positiven Effekt zu bewirken, während die Feinvermahlung (101 %) den spezifischen Methanertrag kaum positiv und das Kochen (90 %) und die Mikrowellenbehandlung (79 %) ihn negativ beeinflussten. Für die Vorbehandlungsvarianten des Triticalekorns konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Dagegen waren beim Stroh durch Steam Explosion und durch die Mikrowellenbehandlung hochsignifikante Unterschiede zur gemahlene Variante festzustellen.

Abbildung 5.1.1.3.2 zeigt die Summenkurven des spezifischen Methanertrags im HBT von Triticalestroh und Triticalekorn, als Mittelwerte aus fünf Wiederholungen. Bei der Kornfraktion war auch im Kurvenverlauf nahezu kein Einfluss des Aufbereitungsverfahrens auf die Methanbildungsgeschwindigkeit und die Höhe des Methanertrags zu beobachten.

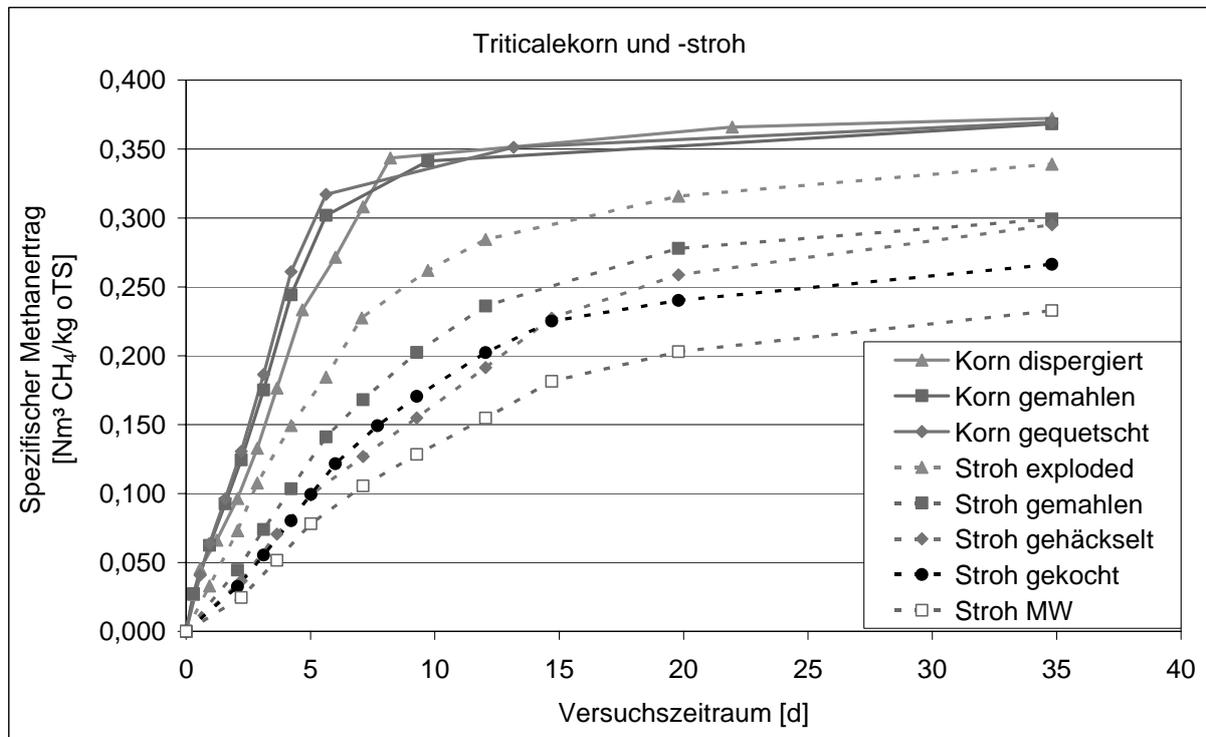


Abb. 5.1.1.3.2: Spezifische Methanerträge der drei Vorbehandlungsvarianten von Triticalekorn/-stroh – Untersuchung im Hohenheimer Biogasertragstest (HBT)

Dagegen war bei der Strohfraktion bei der Variante mit dem explodierten Material neben der Steigerung des spezifischen Methanertrags auf 115 % am 35. Tag auch schon nach etwa 15 Tagen (also nach weniger als der Hälfte der Zeit) das Ertragsniveau der Vergleichsvarianten zum Versuchsende erreicht.

Abbildung 5.1.1.3.3 veranschaulicht die prozentualen Unterschiede in den spezifischen Methanerträgen, sowohl zwischen den Vorbehandlungsvarianten als auch zwischen dem Hohenheimer Biogasertragstest (HBT) und den 30-Liter-Fermentern. Die Daten der Ganzpflanze Triticale wurden für den HBT aus den zwei separat untersuchten Fraktionen errechnet, während im 30-L-Batch-Versuch die Fraktionen Korn und Stroh gemeinsam vergoren wurden (Schumacher et al., 2006 a).

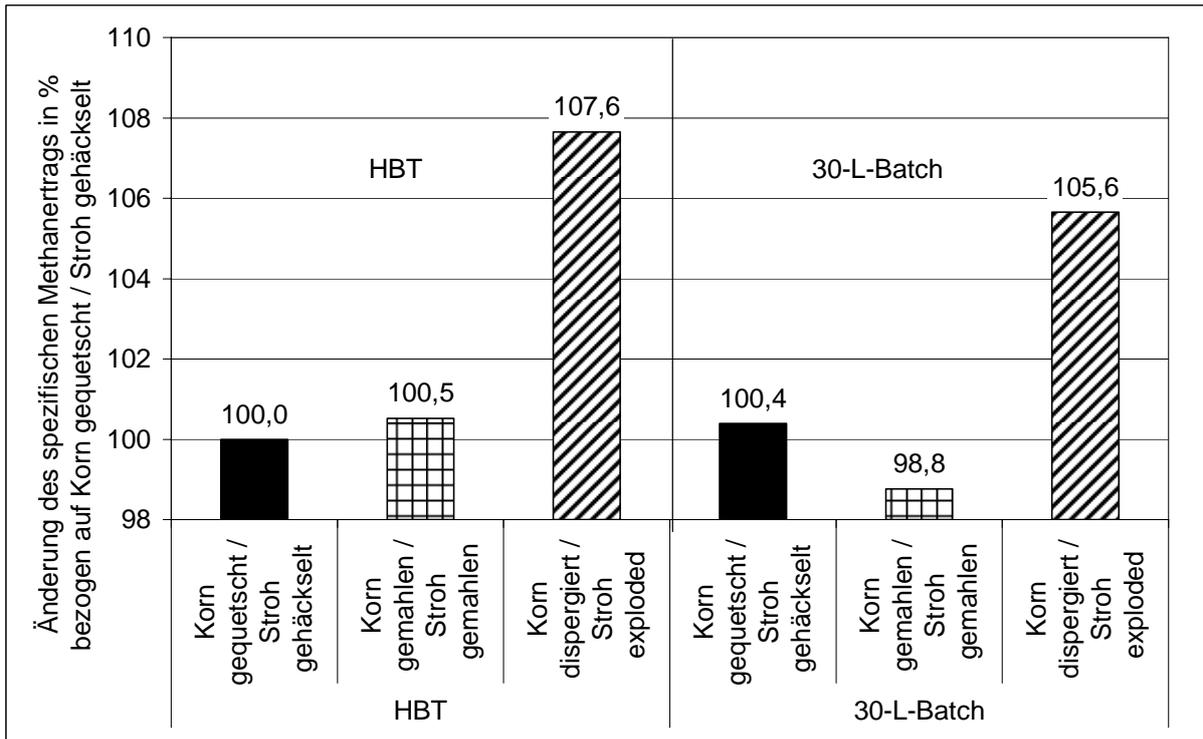


Abb. 5.1.1.3.3: Änderung des spezifischen Methanertrags in Prozent bezogen auf Korn gequetscht / Stroh gehäckselt für zwei Biogastestverfahren (Schumacher et al., 2006 a)

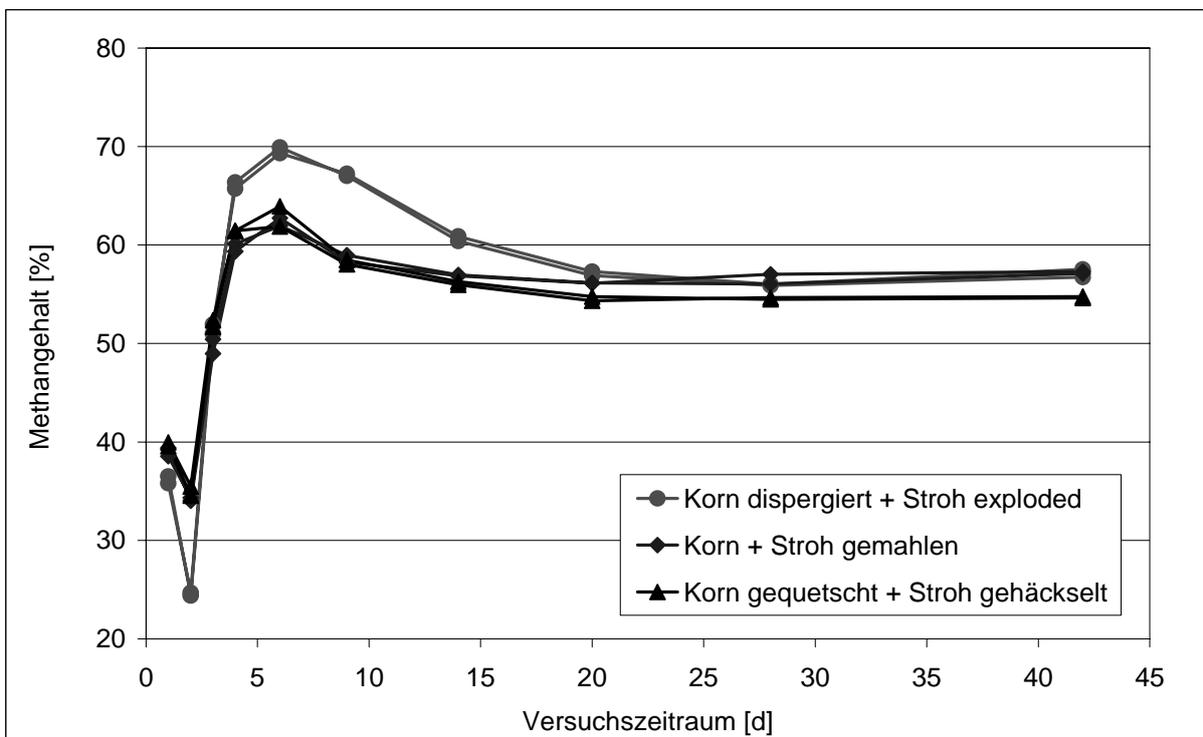


Abb. 5.1.1.3.4: Methangehalte im Biogas (%) der drei Vorbehandlungsvarianten von reifer Triticale (Korn + Stroh) (30-L-Batch-Versuch 42 Tage) (Schumacher et al., 2007 b)

Abbildung 5.1.1.3.4 zeigt die im Biogas gemessenen Methangehalte. Die Methankonzentration des Biogases der Variante „Korn dispergiert / Stroh exploded“ schwankte mit minimal 24,5 % und maximal 69,6 % stärker als die der Vergleichsvarianten.

Eine Erklärung dieses Phänomens könnte ein beschleunigter Ablauf der Hydrolysestufe sein (Schumacher et al., 2007 b). Am sechsten Tag erreichte die Methankonzentration bei allen Varianten ihren Höhepunkt. Im Mittel betragen die Methankonzentrationen über die Versuchsdauer 52,4 % für das gequetschte Material, 53,3 % für das gemahlene und 54,8 % für das explodete.

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Fettsäurebestimmungen während der Vergärungsversuche in den 30-Liter-Fermentern für die reife Triticale dargestellt. Pro Aufbereitungsvariante sind zwei Graphen dargestellt, da immer zwei Fermenter pro Variante parallel untersucht wurden. Jeder Graph ist der Mittelwert aus der Doppelbestimmung einer Probe mittels HPLC.

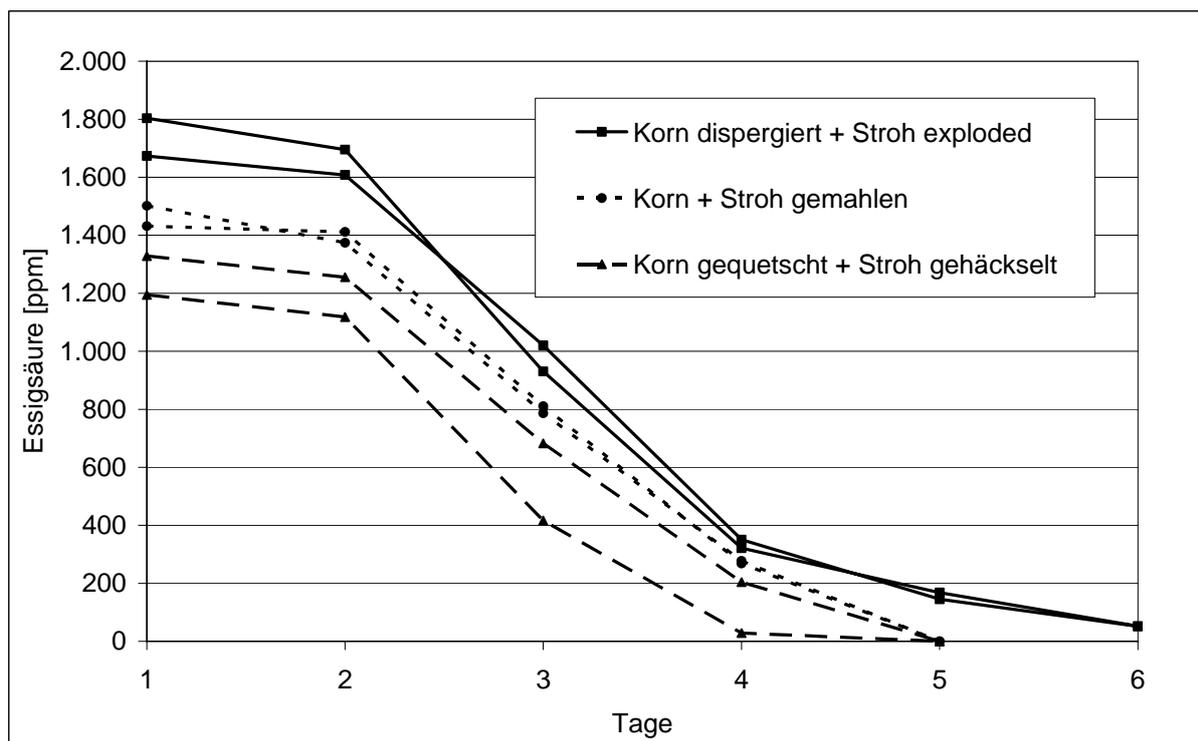


Abb. 5.1.1.3.5: Essigsäurekonzentration (ppm) in den Biogasfermentern der drei Aufbereitungsvarianten der reifen Triticale in den 30-L-Fermentern (Batch-Versuch 42 Tage)

Die Abbildung 5.1.1.3.5 zeigt den Verlauf der Essigsäurekonzentration (in ppm) in den Biogasfermentern der drei Aufbereitungsvarianten der reifen Triticale und die Abbildung 5.1.1.3.6 entsprechend den der Propionsäurekonzentration.

Am zweiten Tag lagen die Essigsäurekonzentrationen aller Varianten nur geringfügig unter denen des Vortags, und bei der Variante „Steam Explosion“ erreichte die Propionsäure zusätzlich eine deutlich höhere Konzentration als bei den Vergleichsvarianten. Erst am dritten Tag nahm die Summe der flüchtigen Fettsäuren wieder ab, und am siebten Tag waren bis zum Ende des Batch-Versuchs nach 42 Tagen keine überschüssigen Fettsäuren mehr nachzuweisen (Schumacher et al., 2007 b).

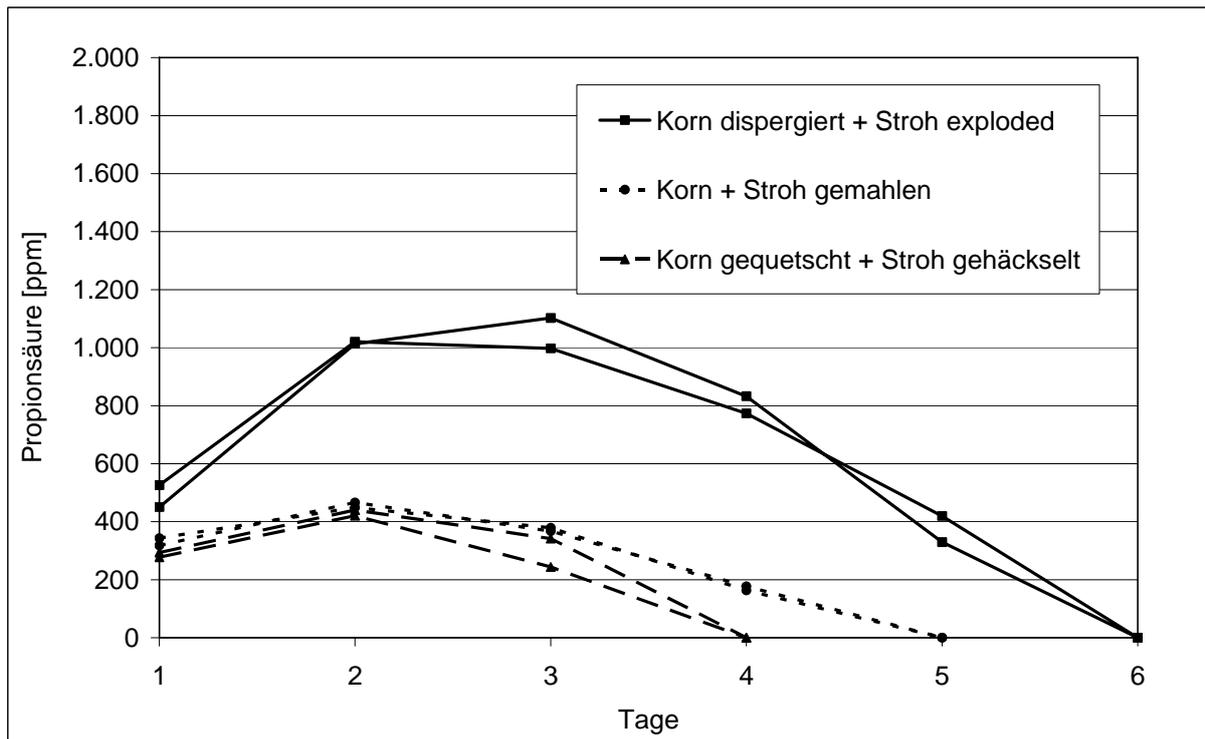


Abb. 5.1.1.3.6: Propionsäurekonzentration (ppm) in den Biogasfermentern der vier Vorbehandlungsvarianten der reifen Triticale in den 30-L-Fermentern (Batch-Versuch 42 Tage)

Die höchsten Fettsäurekonzentrationen bei der Vergärung von Triticale waren bei den mit dem Steam-Explosion-Verfahren aufbereiteten Varianten zu beobachten, gleichgültig ob es sich um siliertes, unsiliertes oder reifes Material handelte. Gleiches gilt auch für den Mais. Bei allen Varianten wurden demnach den Acetat- und Methanbildnern kurzfristig mehr Säuren zur Verfügung gestellt, als diese umsetzen konnten. Der Abbau verlief trotzdem stabil, und eine Hemmung konnte anhand der Summenkurven der spezifischen Methanerträge nicht beobachtet werden. Die Abwägung der Argumente pro und contra Aufbereitung von Biomasse findet sich im Diskussionsteil.

## **5.1.2 Biogas-/Methanerträge von Energiepflanzen und deren Schlemphen**

Im folgenden Abschnitt sind die Ergebnisse der Untersuchungen zur Ermittlung der spezifischen Methanerträge dargestellt, die mit dem Hohenheimer Biogasertragstest gewonnen wurden.

Zuerst sollen hier die Untersuchungen zwischen 2004 und 2006 an verschiedenen Maissorten mit unterschiedlichen Reifezahlen zu vier Ernteterminen auf ihre spezifischen Methanerträge vorgestellt werden. Danach folgen die Ergebnisse der Methanertragstests an Triticale, Weizen, Grünroggen, Winterrübsen, Rutenhirse, Welschem Weidelgras, Raps und deren Schlemphen aus den Untersuchungen zu den Ethanolausbeuten.

### **5.1.2.1 Variation der Sorten und Erntetermine von Mais und Maisfraktionen**

Im Jahr 2004 wurden neun, 2005 sechs und 2006 drei Maissorten mit Reifezahlen zwischen 250 und 700 auf ihre Methanerträge getestet. Durch das Institut für Pflanzenbau und Grünland wurden zu den vier verschiedenen Ernteterminen die Trockenmasseerträge erfasst (Böhmel, 2007). Die verschiedenen Sorten mit unterschiedlicher Reifezahl wurden je Erntetermin zum gleichen Zeitpunkt geerntet. Dadurch befanden sie sich zum Zeitpunkt der Ernte in verschiedenen physiologischen Reifestadien. Der erste Erntetermin wurde auf die Milchreife der Sorte mit der niedrigsten Reifezahl (Gavott) gelegt.

#### ***Mais – Ernte 2004***

In Tabelle 5.1.2.1.1 sind die Reifezahlen der Maissorten der Ernte 2004 aufgeführt. Abbildung 5.1.2.1.1 zeigt die Trockensubstanzgehalte zu den Ernteterminen nach Böhmel (2007). In diesem Kapitel sind die Maissorten für jedes Jahr in den Balkendiagrammen mit von links nach rechts steigender Reifezahl sortiert.

Tab. 5.1.2.1.1: Untersuchte Maissorten mit ihren Siloreifezahlen (mittelfrüh, mittelspät bis spätreif) der Ernte 2004

Maissorte	Reifezahl
Gavott	S250
PR39F58	S260
Eminent	S270
Pollen	S300
PR37D25	S ca. 330
Méridienne	S ca. 400-450
Mahora	S440
Mikado	FAO500
Doge	FAO700

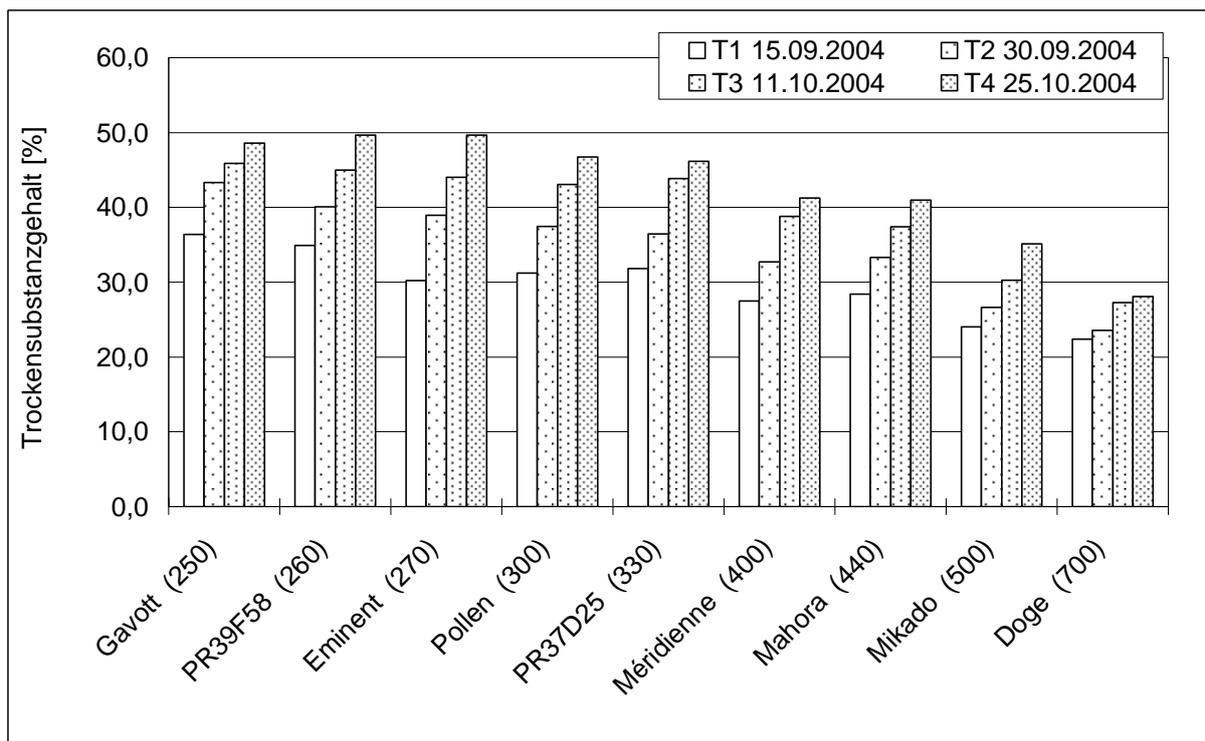


Abb. 5.1.2.1.1: Trockensubstanzgehalt der neun Maisganzpflanzen zu den vier Erntezeitpunkten 2004 (Böhmel, 2007)

Deutlich ist die Tendenz der geringeren Trockensubstanzgehalte und damit der höheren Wassergehalte mit steigender Reifezahl der Sorte zu erkennen. Innerhalb der Sorten steigt der Trockensubstanzgehalt vom ersten zum vierten Erntetermin.

Insgesamt variierten die Trockensubstanzgehalte der Ganzpflanzen zwischen 22 und 50 %.

Da eine große Bandbreite an Maissorten über mehrere Erntetermine hinsichtlich ihres spezifischen Methanertrags verglichen werden sollte, wurden hier auch Kombinationen aus Ernteterminen und Sorten untersucht, die für den Praxiseinsatz weniger empfehlenswert sind. Einerseits können Trockensubstanzgehalte unter 25 % Gärtaftverluste verursachen. Andererseits ist die Verdichtung des Materials bei TS-Gehalten über 45 % während der Einsilierung mitunter schwierig, und außerdem ist die Gefahr der Nachgärung nach Öffnung des Silos dann erhöht (Schumacher et al., 2006 b).

Die spezifischen Methanerträge der untersuchten Varianten lagen zwischen 0,307 und 0,357 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg oTS, bei einer relativen Standardabweichung der drei Wiederholungen von minimal 0,2 %, maximal 5,5 % und von 2,0 % im Mittel. In Abb. 3.3.2.1.2 sind die spezifischen Methanerträge der neun Maisganzpflanzen zu den Erntezeitpunkten 2004 dargestellt.

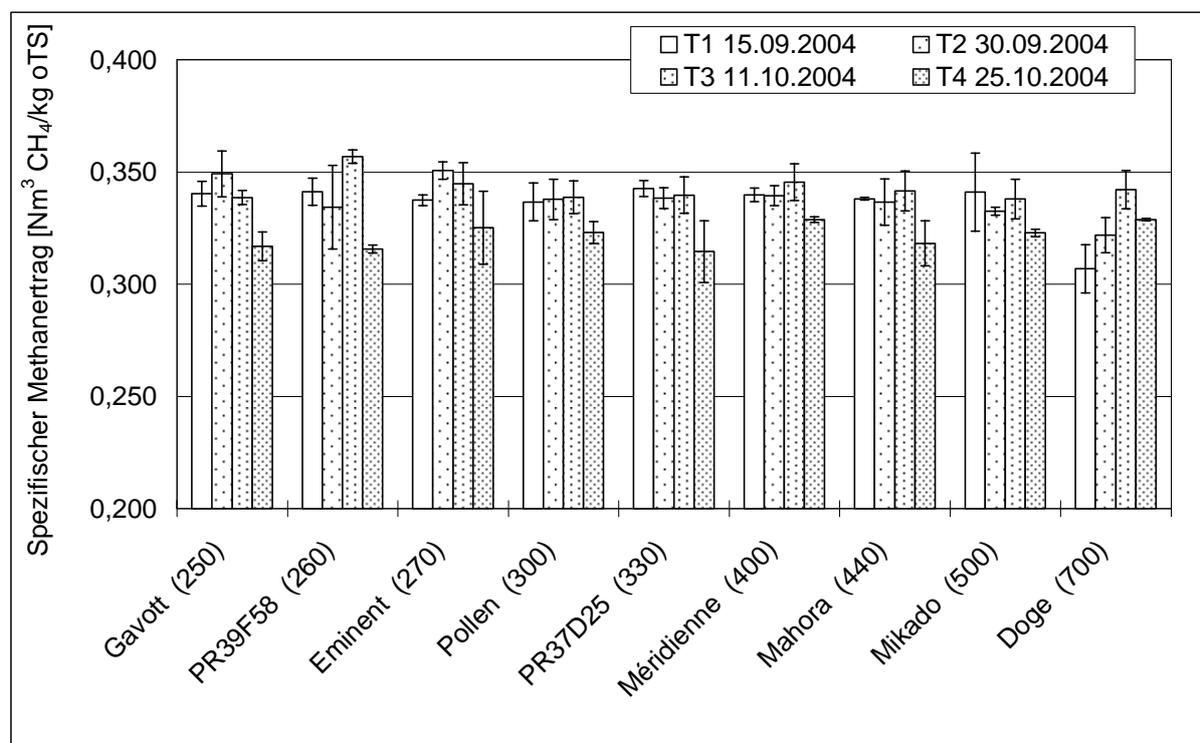


Abb. 5.1.2.1.2: Spezifische Methanerträge (Nm<sup>3</sup> Methan/kg oTS) der neun Maisganzpflanzen zu den vier Erntezeitpunkten 2004

Tendenziell brachten die Sorten mit niedrigerer Siloreifezahl höhere spezifische Methanerträge als die mit höherer Reifezahl. Bei allen Sorten nahm der spezifische Methanertrag vom dritten zum vierten Erntetermin ab.

Im Jahr 2004 wurden die neun Maissorten nicht nur als Ganzpflanzen auf ihren spezifischen Methanertrag untersucht, sondern auch getrennt nach den Fraktionen Korn und Rest (Lieschen, Spindel, Restpflanze) vergoren. In Abbildung 5.1.2.1.3 und 5.1.2.1.4 sind die Ergebnisse des Batch-Tests im HBT für diese Fraktionen dargestellt.

Die Mittel-, Minimal-, Maximalwerte und die Standardabweichungen über alle neun Sorten und über alle vier Erntetermine sind Tabelle 5.1.2.1.2 zu entnehmen. Die relativen Standardabweichungen betragen für die Ganzpflanze 3,33, für Korn 3,34 und für die Restpflanze 2,74 %.

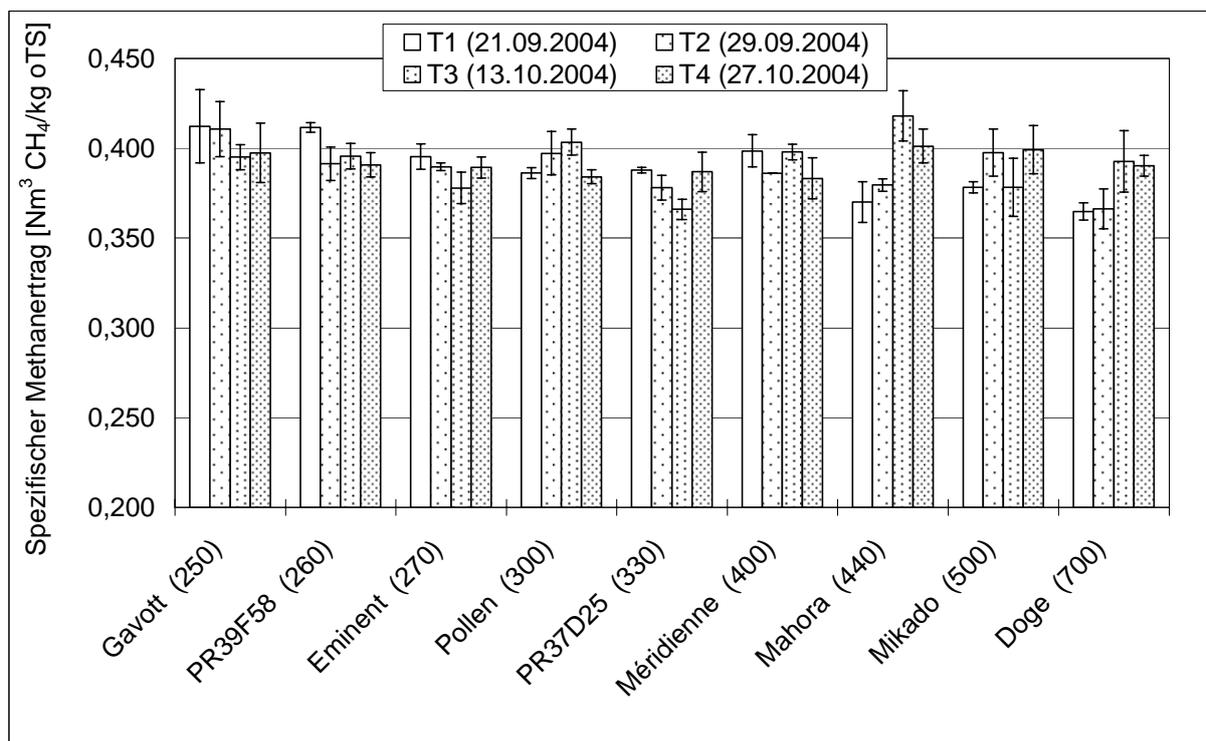


Abb. 5.1.2.1.3: Spezifische Methanerträge ( $\text{Nm}^3$  Methan/kg oTS) der Fraktion Korn der neun Maissorten zu den vier Erntezeitpunkten 2004

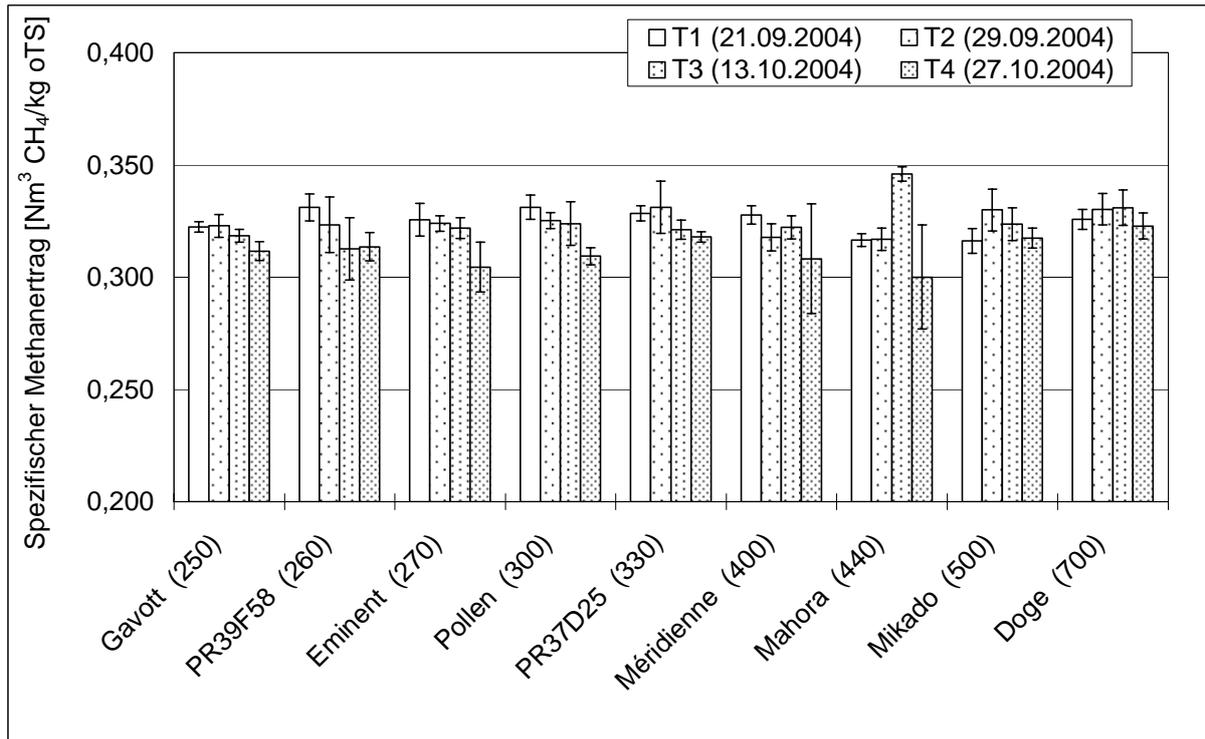


Abb. 5.1.2.1.4: Spezifische Methanerträge (Nm<sup>3</sup> Methan/kg oTS) der Fraktion Rest (Lieschen, Spindel, Restpflanze) der neun Maissorten zu den vier Erntezeitpunkten 2004

In Abbildung 5.1.2.1.5 sind die spezifischen Methanerträge ( $\text{Nm}^3$  Methan/kg oTS) der Ganzpflanze, der Fraktionen Rest und Korn über alle neun Maissorten und alle vier Erntezeitpunkte 2004 als Box-Plots dargestellt.

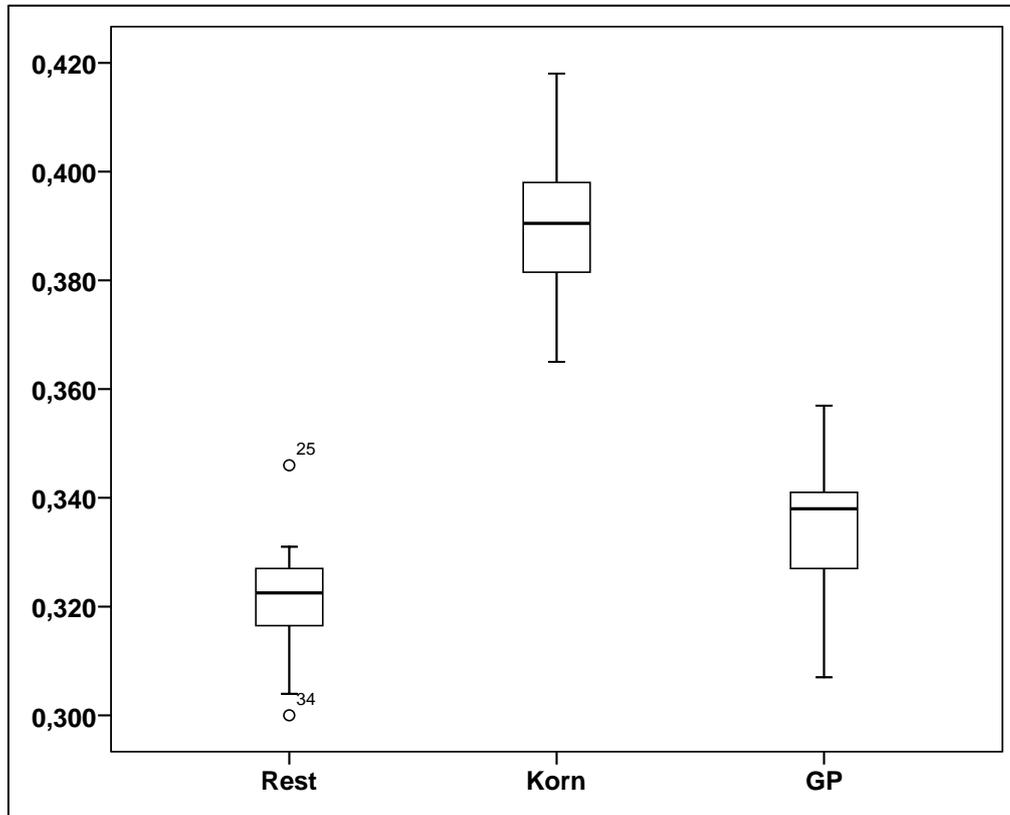


Abb. 5.1.2.1.5: Box-Plots der spezifischen Methanerträge ( $\text{Nm}^3$  Methan/kg oTS) der Ganzpflanze, der Fraktionen Rest und Korn der neun Maissorten zu den vier Erntezeitpunkten 2004

Tabelle 5.1.2.1.2 sind die statistischen Kennzahlen zu entnehmen. Die geringste Variationsbreite zeigten die Daten der Restpflanze, gefolgt von der Ganzpflanze und Korn.

Tab. 5.1.2.1.2: Statistik – Spezifische Methanerträge ( $\text{Nm}^3$  Methan/kg oTS) der Ganzpflanze, der Fraktionen Rest und Korn der neun Maissorten zu den vier Erntezeitpunkten 2004

#### Deskriptive Statistik

	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung
Rest	36	,300	,346	,32142	,008836
Korn	36	,365	,418	,39019	,012992
GP	36	,307	,357	,33458	,011154
Gültige Werte (Listenweise)	36				

In Abbildung 5.1.2.1.6 sind die Methanhektarerträge ( $\text{Nm}^3$  Methan/(ha a)) der neun Maisganzpflanzen zu den vier Erntezeitpunkten 2004 veranschaulicht, die auf Basis der Trockenmasseerträge (Böhmel, 2007) errechnet wurden. Der niedrigste Methanhektarertrag lag bei 5696 (Doge, 2. Termin), der höchste bei 8003 (Mérienne, 3. Termin) und der mittlere bei 6869  $\text{Nm}^3$  Methan/(ha a). Mit einem Mittelwert pro Erntetermin über alle neun Sorten von 7290  $\text{Nm}^3$  Methan/(ha a) war der dritte Termin der ertragreichste, gefolgt vom zweiten Termin mit 6874, dem vierten mit 6700 und dem ersten mit 6613  $\text{Nm}^3$  Methan/(ha a).

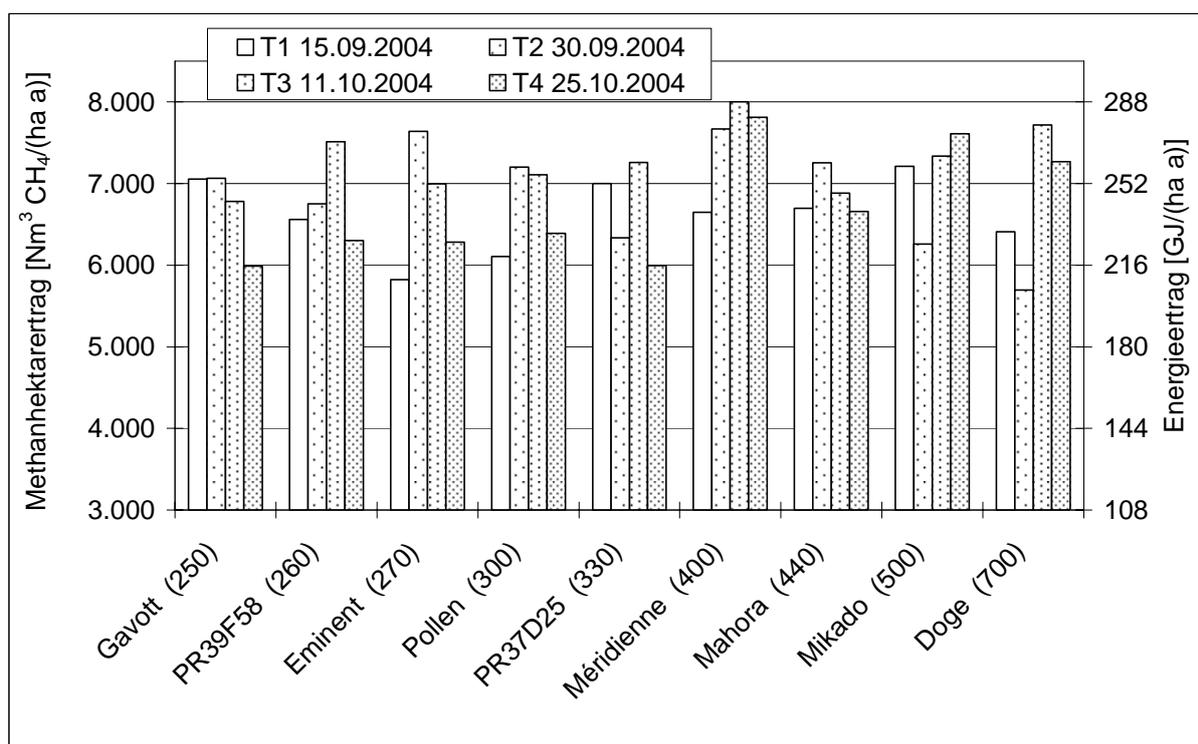


Abb. 5.1.2.1.6: Methanhektarerträge ( $\text{Nm}^3$  Methan/(ha a)) und Energieerträge ( $\text{GJ}/(\text{ha a})$ ) der neun Maisganzpflanzen zu den vier Erntezeitpunkten 2004 (errechnet auf Basis der Trockenmasseerträge nach Böhmel, 2007)

Abb. 5.1.2.1.6 zeigt außerdem die Energieerträge der neun Maissorten als Ganzpflanzen zu den vier Erntezeitpunkten 2004, die anhand der Methanhektarerträge errechnet wurden. Der niedrigste Energieertrag pro Hektar lag bei 205  $\text{GJ}/(\text{ha a})$  (Doge, 2. Termin), der höchste bei 288 (Mérienne, 3. Termin) und der mittlere bei 247  $\text{GJ}/(\text{ha a})$  im Jahr 2004.

In Abb. 5.1.2.1.7 ist die Korrelation zwischen dem Trockenmasseertrag und dem Energieertrag pro Hektar über die neun Maissorten als Ganzpflanzen zu den vier Erntezeitpunkten 2004 dargestellt (Trockenmasseerträge nach Böhmel, 2007). In Tab. 5.1.2.1.3 sind die Korrelationen zwischen dem Trockenmasseertrag und dem

Energieertrag pro Hektar je Erntetermin aufgeführt. Der Trockenmasseertrag korreliert stark mit dem Energieertrag pro Hektar. Lässt man beim ersten Erntetermin die Sorte Doge außer Betracht, steigt die Korrelation auch für diesen Termin von 0,83 auf 0,99.

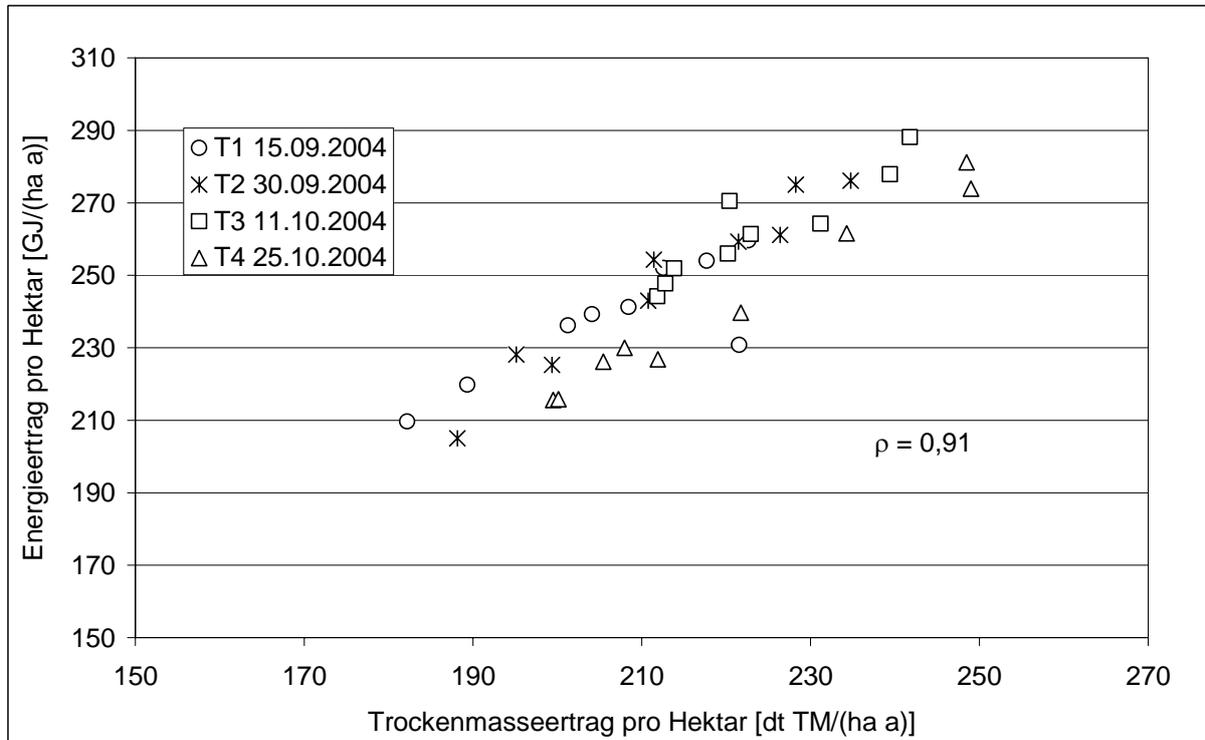


Abb. 5.1.2.1.7: Korrelation zwischen Trockenmasseertrag und Energieertrag pro Hektar über die neun Maissorten als Ganzpflanzen zu den vier Erntezeitpunkten 2004 (Trockenmasseerträge nach Böhmel, 2007)

Tab. 5.1.2.1.3: Korrelation zwischen dem Trockenmasseertrag und dem Methanertrag pro Hektar Mais 2004

Erntetermin	Korrelation Trockenmasseertrag/Methanertrag
alle	0,91
1	0,83
2	0,97
3	0,92
4	0,99

Abb. 5.1.2.1.8 zeigt die spezifischen Methanerträge der neun Maisganzpflanzen zu den vier Erntezeitpunkten 2004 als Liniendiagramm. Hier werden die Extrema der Maissorten Doge und PR39F58 deutlich.

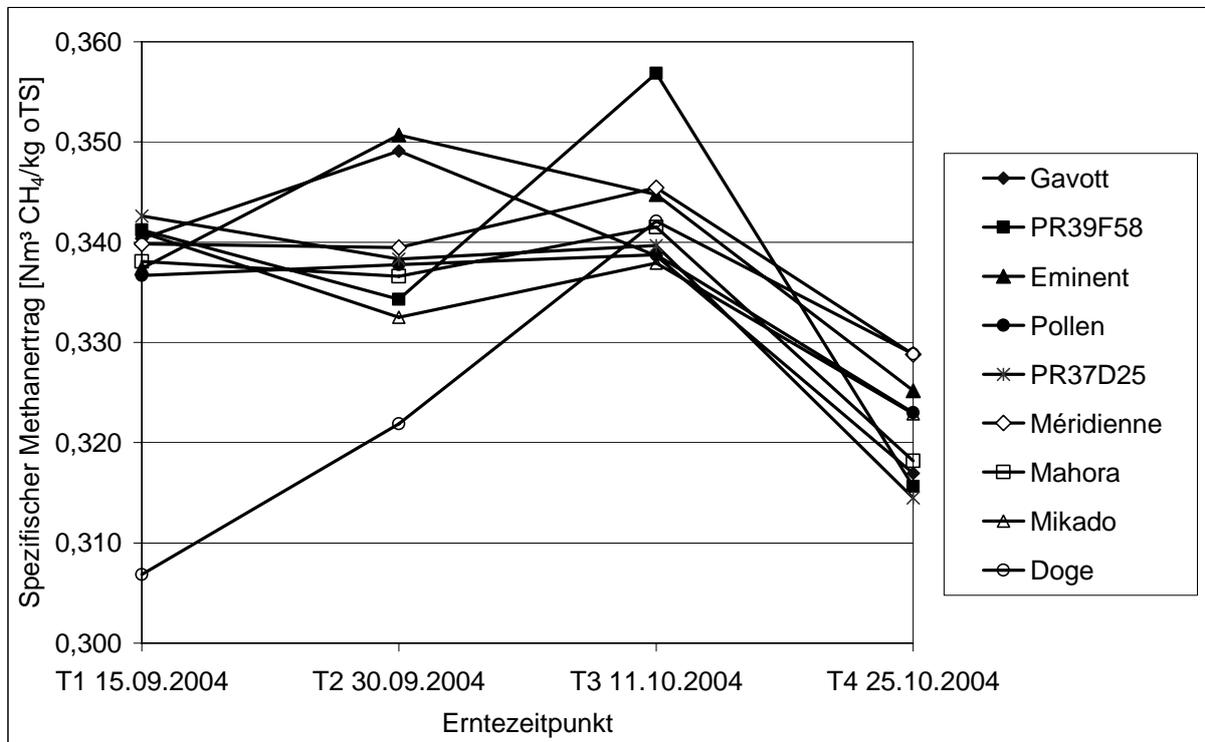


Abb. 5.1.2.1.8: Spezifische Methanerträge (Nm<sup>3</sup> Methan/kg oTS) der neun Maisganzpflanzen zu den vier Erntezeitpunkten 2004 (Liniendiagramm)

**Mais – Ernte 2005**

Im Jahr 2005 wurden sechs Maissorten zu vier Ernteterminen auf ihren spezifischen Methanertrag untersucht, zusätzlich wurde bei vier der sechs Sorten auch der letzte Biomasseschnitt vor dem ersten Erntetermin untersucht. Tabelle 5.1.2.1.4 gibt einen Überblick zu den Reifezahlen der Maissorten, und Abbildung 5.1.2.1.9 zeigt die Trockensubstanzgehalte über die Erntetermine.

Tab. 5.1.2.1.4: Untersuchte Maissorten mit ihren Siloreifezahlen (mittelfrüh, mittelspät bis spätreif) der Ernte 2005

Maissorte	Reifezahl
Gavott	S250
KXA 5226	S260
KXA 5233	S300
PR 37 D 25	S330
Mikado	S370
KXA 5243	S400

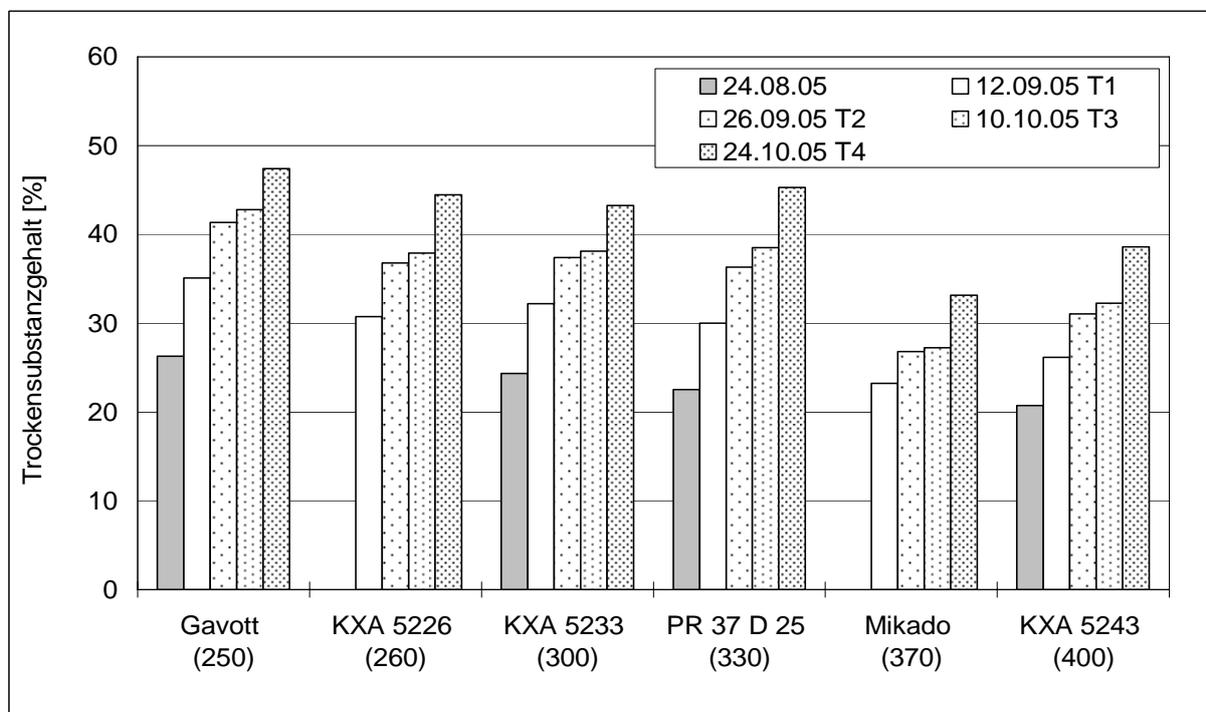


Abb. 5.1.2.1.9: Trockensubstanzgehalt der sechs Maisganzpflanzen zu den fünf Erntezeitpunkten 2005 (Böhmel, 2007)

Die Sortierung der Maissorten in den folgenden Balkendiagrammen erfolgte wieder von links beginnend mit der Sorte Gavott mit der niedrigsten Reifezahl und nach rechts aufsteigend.

Genau wie im Jahr 2004 war auch im Jahr 2005 ein Anstieg der Trockensubstanzgehalte über die Erntetermine zu beobachten, und wie ebenfalls zu erwarten, lagen die Gehalte der Sorten mit niedrigeren Reifezahlen über denen mit höheren Reifezahlen.

Die gemessenen spezifischen Methanerträge der Ernten eins bis vier lagen zwischen 0,333 und 0,370 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg oTS (im Mittel bei 0,356 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg oTS), bei einer relativen Standardabweichung der Messwiederholungen von minimal 0,2 %, maximal 3,0 % und von 1,7 % im Mittel. Die spezifischen Methanerträge des letzten Biomasseschnitts der vier ausgewählten Sorten erreichten 0,331 bis 0,339 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg oTS, bei einer relativen Standardabweichung von minimal 0,3 % und maximal 2,0 %. In Abb. 5.1.2.1.10 sind die spezifischen Methanerträge der neun Maisganzpflanzen zu den Erntezeitpunkten 2004 dargestellt.

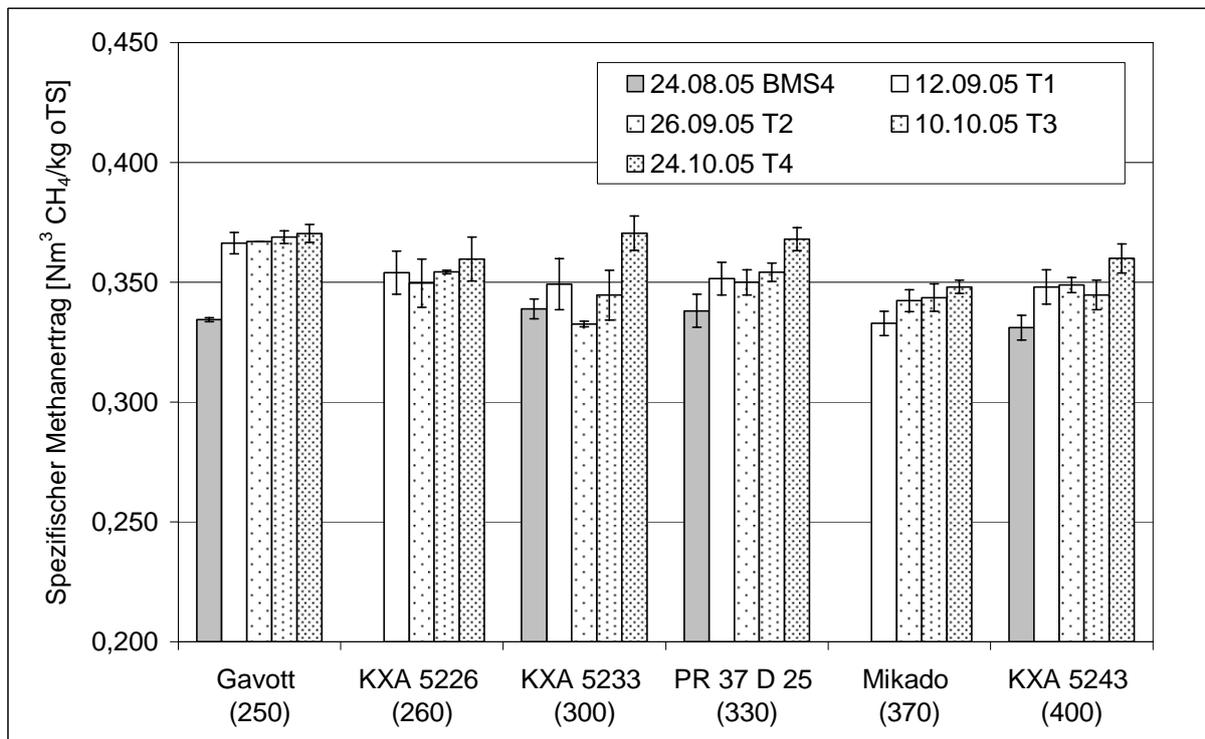


Abb. 5.1.2.1.10: Spezifische Methanerträge (Nm<sup>3</sup> Methan/kg oTS) der sechs Maisganzpflanzen zu den fünf Erntezeitpunkten 2005

Die aus den Trockenmasseerträgen des Pflanzenbaus und aus den gemessenen spezifischen Methanerträgen errechneten Methanhektarerträge veranschaulicht Abbildung 5.1.2.1.11.

Im Jahr 2005 lieferte die Sorte Mikado zum zweiten Termin den niedrigsten Methanhektarertrag von 7304 Nm<sup>3</sup> Methan/(ha a) und die Sorte KXA 5243 zum vierten Termin den höchsten mit 12023. Im Mittel aller Sorten und der Erntetermine eins bis vier lag er bei 9537 Nm<sup>3</sup> Methan/(ha a). Mit einem Mittelwert pro Erntetermin über alle sechs Sorten von 11205 Nm<sup>3</sup> Methan/(ha a) war 2005 der vierte Termin der ertragreichste, gefolgt vom ersten Termin mit 9505, dem dritten mit 9410 und dem zweiten mit 8029 Nm<sup>3</sup> Methan/(ha a). Die Methanhektarerträge des letzten Biomasseschnitts lagen zwischen 7961 und 8918 Nm<sup>3</sup> Methan/(ha a).

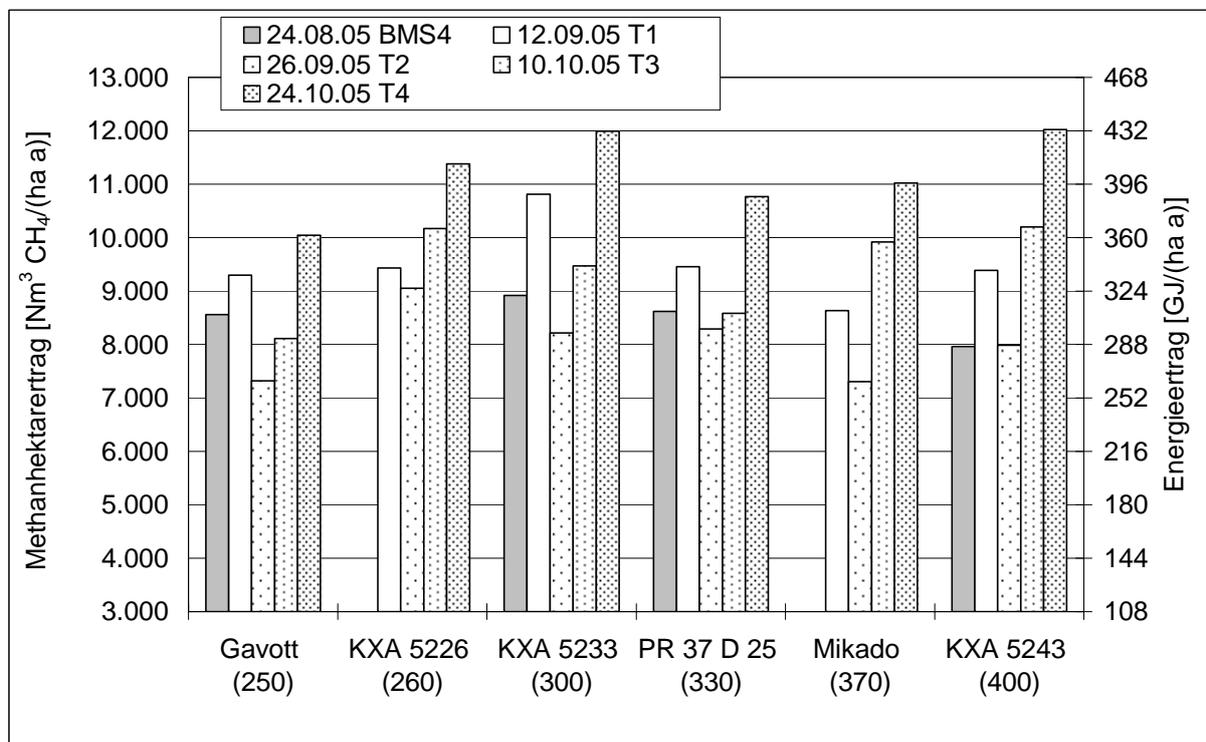


Abb. 5.1.2.1.11: Methanhektarerträge (Nm<sup>3</sup> Methan/(ha a)) und Energieerträge (GJ/(ha a)) der sechs Maisganzpflanzen zu den fünf Erntezeitpunkten 2005 (errechnet auf Basis der Trockenmasseerträge nach Böhmel, 2007)

Ebenfalls in Abbildung 5.1.2.1.11 sind die Energieerträge der sechs Maissorten als Ganzpflanzen zu den fünf Erntezeitpunkten 2005 dargestellt, die anhand der Methanhektarerträge errechnet wurden. Der niedrigste Energieertrag pro Hektar lag bei 263 GJ/(ha a) (Mikado, 2. Termin), der höchste bei 433 (KXA 5243, 4. Termin) und der mittlere bei 343 GJ/(ha a) im Jahr 2005.

Aus Abbildung 5.1.2.1.12 wird die Korrelation zwischen dem Trockenmasseertrag und dem Energieertrag pro Hektar über die sechs Maissorten als Ganzpflanzen zu den vier Erntezeitpunkten 2005 plus dem letzten Biomasseschnitt (BMS) ersichtlich (Trockenmasseerträge nach Böhmel, 2007).

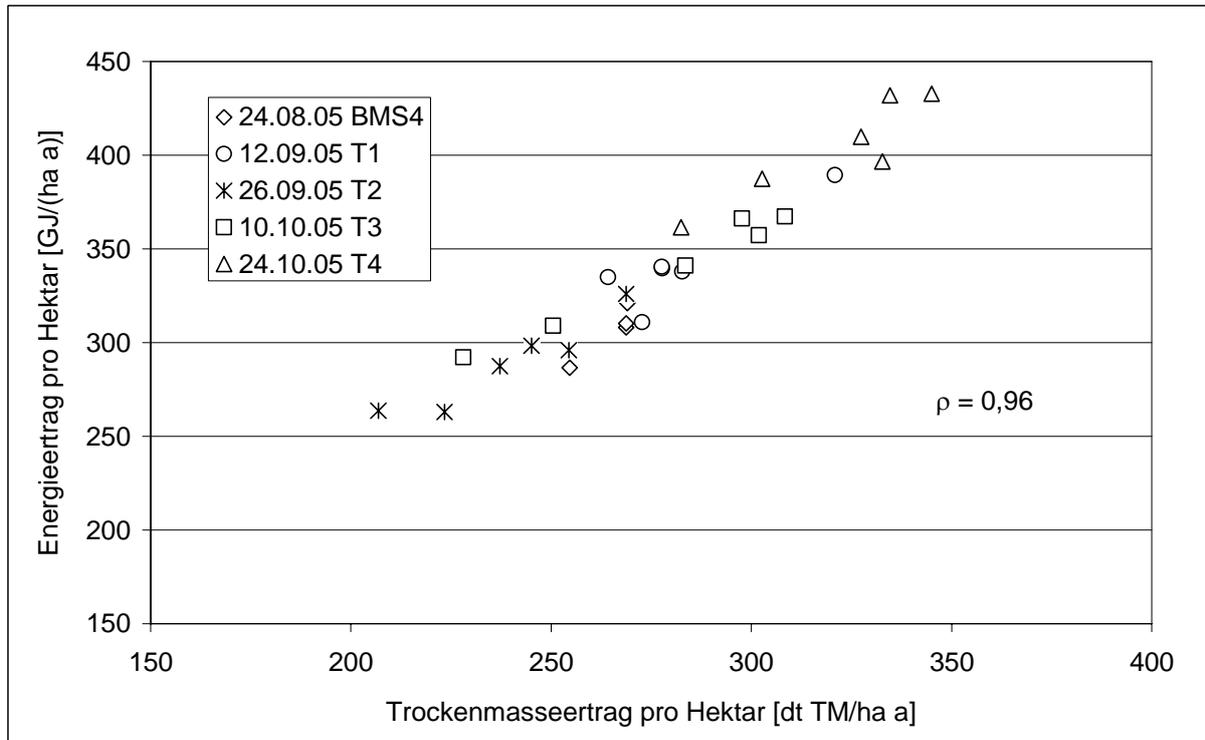


Abb. 5.1.2.1.12: Korrelation zwischen Trockenmasseertrag und Energieertrag pro Hektar über die sechs Maissorten als Ganzpflanzen zu den fünf Erntezeitpunkten 2005 (Trockenmasseerträge nach Böhmel, 2007)

In Tab. 5.1.2.1.5 sind die Korrelationen zwischen dem Trockenmasseertrag und dem Energieertrag pro Hektar je Erntetermin angegeben. Auch im Jahr 2005 korreliert der Trockenmasseertrag stark mit dem Energieertrag pro Hektar. Die niedrigste Korrelation trat zum ersten Erntetermin auf, die höchste zum dritten.

Tab. 5.1.2.1.5: Korrelation zwischen dem Trockenmasseertrag und dem Methanertrag pro Hektar Mais 2005 (vier Ernten und ein Biomasseschnitt = BMS)

Erntetermin	Korrelation Trockenmasseertrag/Methanertrag
alle (inkl. BMS)	0,96
1	0,90
2	0,95
3	0,99
4	0,92

Abb. 5.1.2.1.13 verdeutlicht noch einmal die Entwicklung der spezifischen Methanerträge der sechs Maissorten über die vier Erntetermine plus Biomasseschnitt. Konstant hohe spezifische Methanerträge zwischen der ersten und der vierten Ernte erbrachte die Sorte mit der niedrigsten Reifezahl Gavott, da sie früher reift als die anderen Sorten.

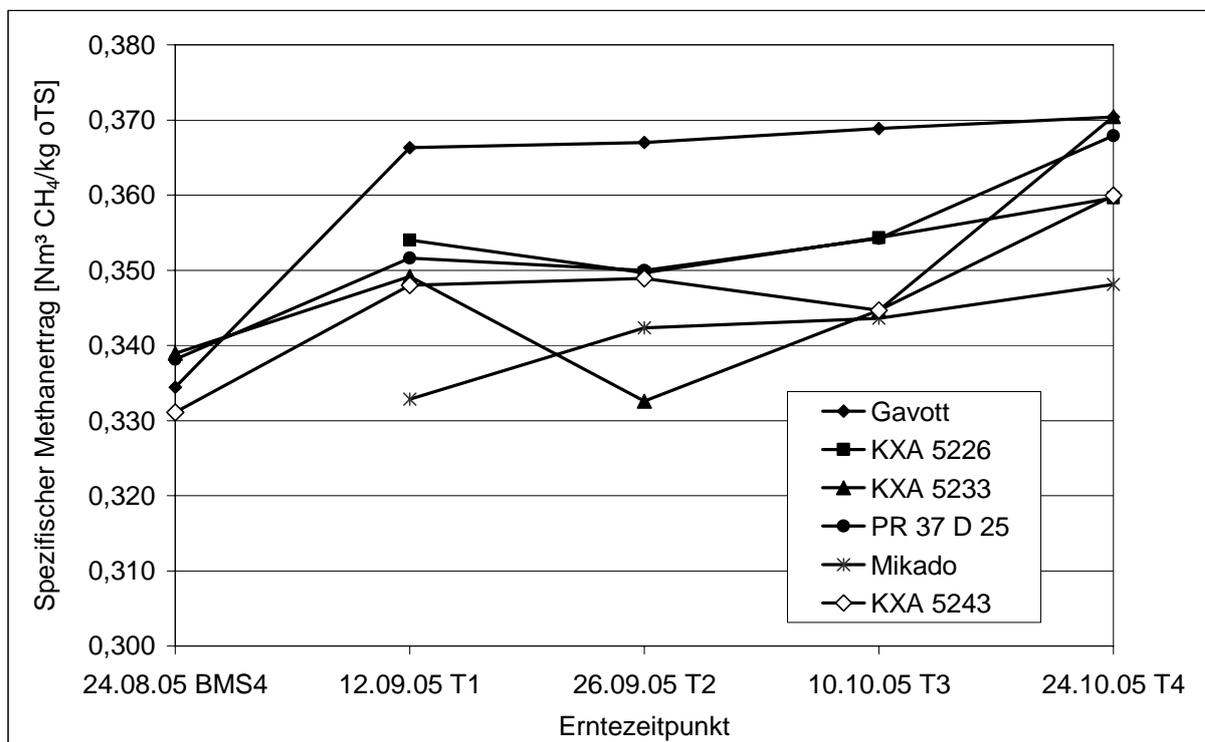


Abb. 5.1.2.1.13: Spezifische Methanerträge (Nm³ Methan/kg oTS) der sechs Maisganzpflanzen zu den fünf Erntezeitpunkten 2005 (Liniendiagramm)

**Mais – Ernte 2006**

Im dritten und damit letzten Erntejahr dieses Projekts, im Jahr 2006, wurden noch einmal drei Maissorten zu vier Ernteterminen auf ihre spezifischen Methanerträge untersucht. Die Reifezahlen der ausgewählten Sorten sind in Tabelle 5.1.2.1.6 aufgeführt.

Tab. 5.1.2.1.6: Untersuchte Maissorten mit ihren Siloreifezahlen (mittelfrüh, mittelspät bis spätreif) der Ernte 2006

Maissorte	Reifezahl
Gavott	S250
KXA 5233	S300
Mikado	S370/500

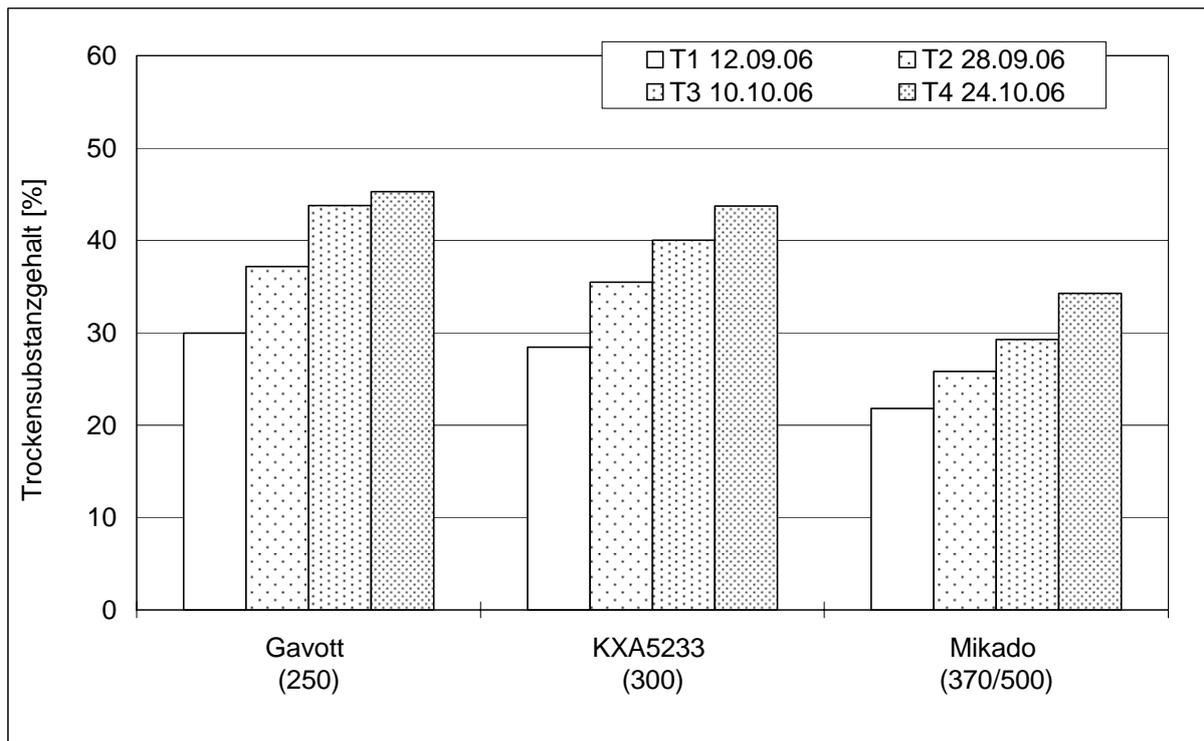


Abb. 5.1.2.1.14: Trockensubstanzgehalt der drei Maisganzpflanzen zu den vier Erntezeitpunkten 2006 (Böhmel, 2007)

Abbildung 5.1.2.1.14 zeigt wiederum die Trockensubstanzgehalte der drei Maissorten zu den vier Ernteterminen 2006. In Abb. 5.1.2.1.15 sind dementsprechend die spezifischen Methanerträge dargestellt.

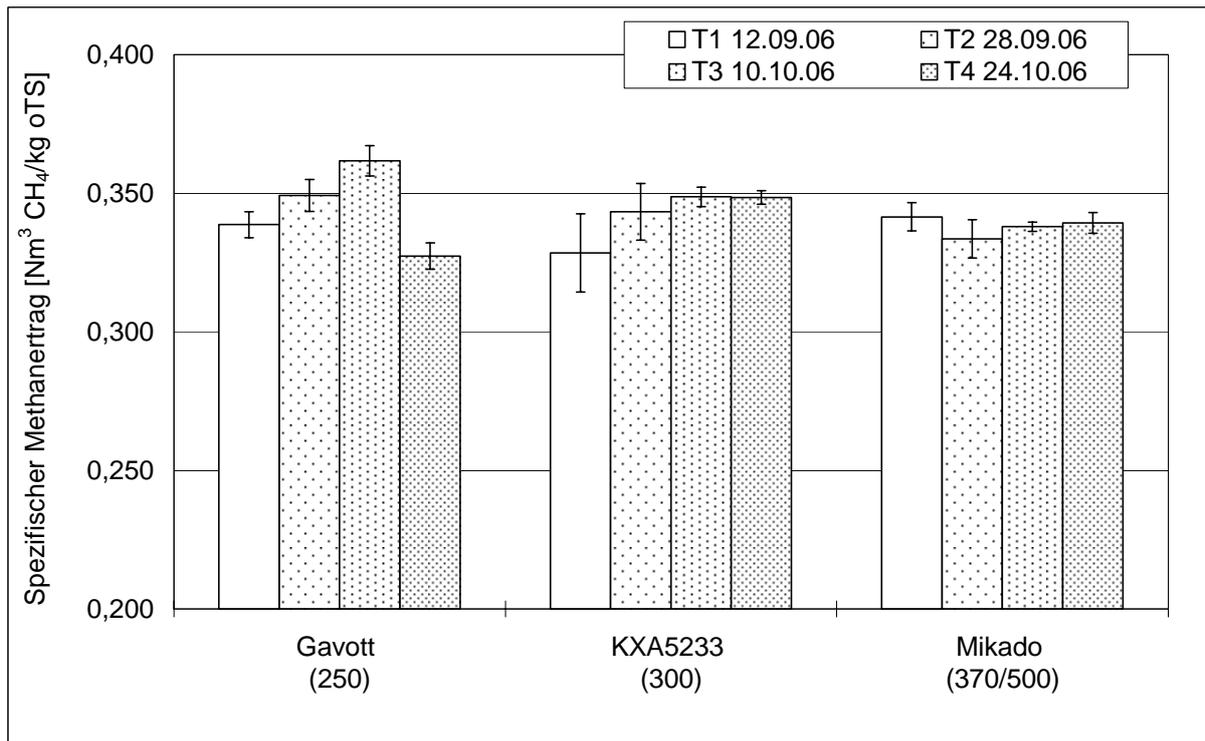


Abb. 5.1.2.1.15: Spezifische Methanerträge ( $\text{Nm}^3$  Methan/kg oTS) der drei Maisganzpflanzen zu den vier Erntezeitpunkten 2006

Die gemessenen spezifischen Methanerträge des Jahres 2006 lagen zwischen 0,327 und 0,362  $\text{Nm}^3$   $\text{CH}_4$ /kg oTS (im Mittel bei 0,342  $\text{Nm}^3$   $\text{CH}_4$ /kg oTS), bei einer relativen Standardabweichung der Messwiederholungen von minimal 0,5 %, maximal 4,3 % und von 1,7 % im Mittel.

In Abb. 5.1.2.1.16 sind die Methan- und Energiehektarerträge der drei Maisganzpflanzen zu den Erntezeitpunkten 2006 dargestellt. Im Jahr 2006 erzielte die Sorte Gavott zum ersten Termin den niedrigsten Methanhektarertrag von 3421, die Sorte Mikado zum vierten Termin den höchsten mit 6244 bei einem mittleren Ertrag über die drei Sorten und vier Erntetermine von 4770  $\text{Nm}^3$  Methan/(ha a). Die Mittelwerte pro Erntetermin über die drei Sorten waren 2006 vom ersten mit 3984, über den zweiten mit 4717, den dritten mit 5165 bis zum vierten mit 5212  $\text{Nm}^3$  Methan/(ha a) aufsteigend.

Den niedrigsten Energieertrag pro Hektar erzielte Gavott zum ersten Termin mit 123 GJ/(ha a), den höchsten Mikado zum vierten Termin mit 225. Der mittlere lag im Jahr 2006 für die drei ausgewählten Sorten bei 172 GJ/(ha a).

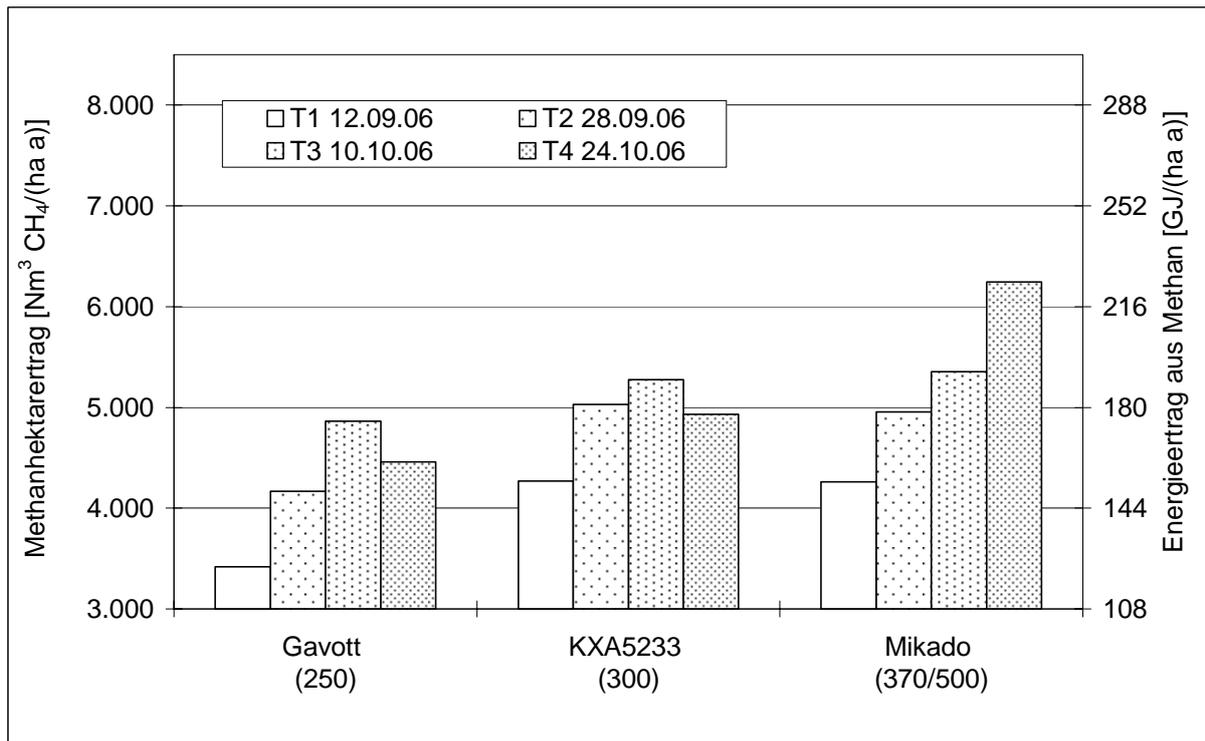


Abb. 5.1.2.1.16: Methanhektarerträge (Nm³ Methan/(ha a)) und Energieerträge (GJ/(ha a)) der drei Maisganzpflanzen zu den vier Erntezeitpunkten 2006 (errechnet auf Basis der Trockenmasseerträge nach Böhmel, 2007)

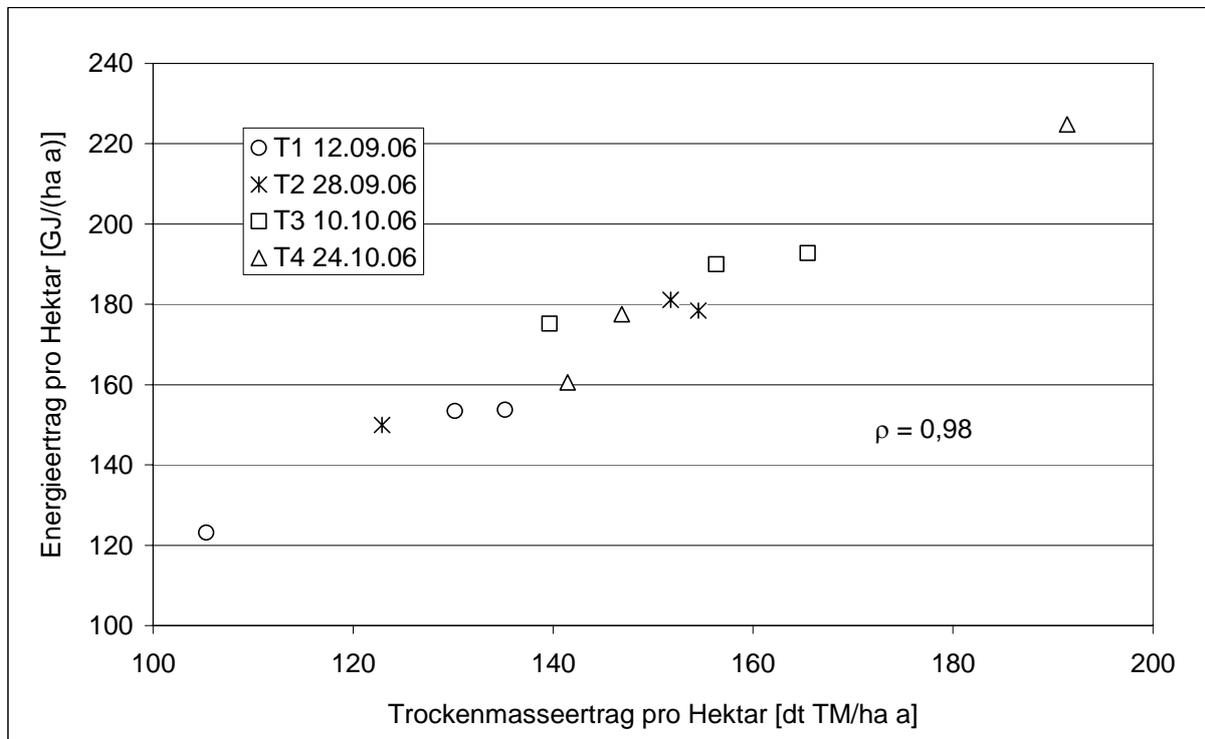


Abb. 5.1.2.1.17: Korrelation zwischen Trockenmasseertrag und Energieertrag pro Hektar sowie Trendlinie mit Bestimmtheitsmaß über die drei Maisganzpflanzen zu den vier Erntezeitpunkten 2006 (Trockenmasseerträge nach Böhmel, 2007)

Aus Abb. 5.1.2.1.17 wird die Korrelation zwischen dem Trockenmasseertrag und dem Energieertrag pro Hektar über die sechs Maissorten als Ganzpflanzen zu den vier Erntezeitpunkten 2006 inklusive des letzten Biomasseschnitts (BMS) ersichtlich (Trockenmasseerträge nach Böhmel, 2006). In Tab. 3.3.2.1.6 sind die Korrelationen zwischen dem Trockenmasseertrag und dem Energieertrag pro Hektar je Erntetermin angegeben. Auch im Jahr 2006 korreliert der Trockenmasseertrag stark mit dem Energieertrag pro Hektar. Die niedrigste Korrelation trat zum dritten Erntetermin auf.

Tab. 5.1.2.1.7: Korrelation zwischen dem Trockenmasseertrag und dem Methanertrag pro Hektar Mais 2006

Erntetermin	Korrelation Trockenmasseertrag/Methanertrag
alle	0,98
1	0,99
2	0,99
3	0,98
4	0,99

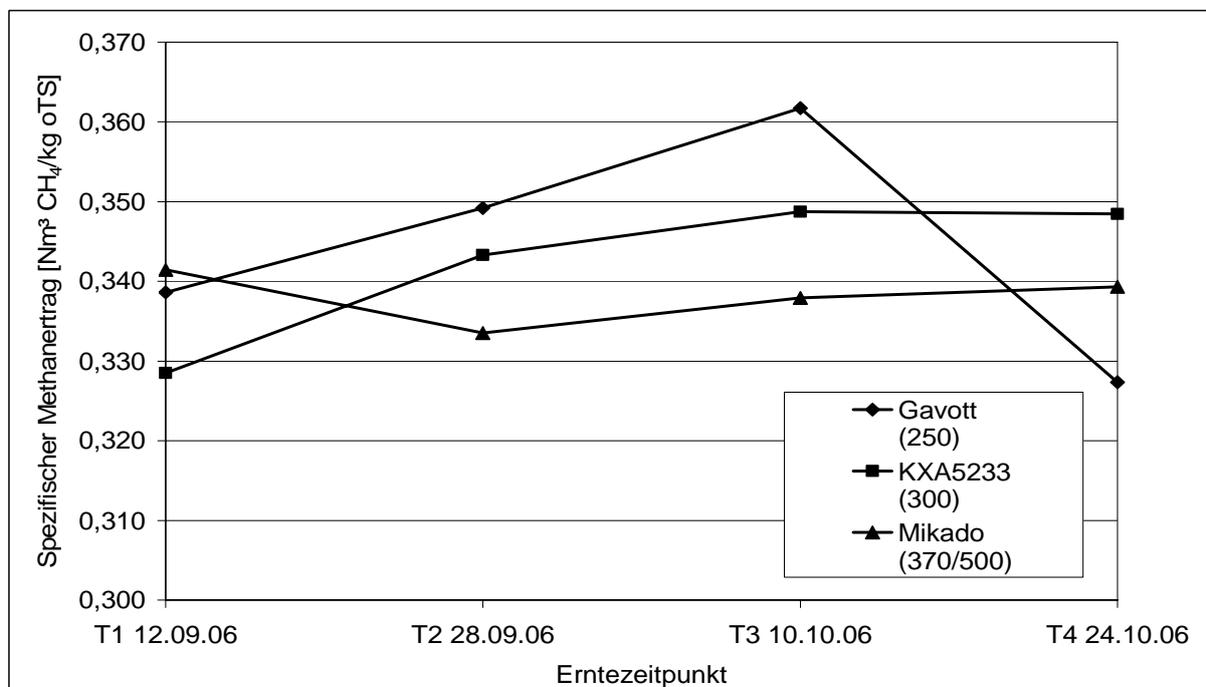


Abb. 5.1.2.1.18: Spezifische Methanerträge ( $\text{Nm}^3 \text{Methan}/\text{kg oTS}$ ) der drei Maisganzpflanzen zu den vier Erntezeitpunkten 2006 (Liniendiagramm)

Anhand der Abbildung 5.1.2.1.18 wird die Entwicklung der spezifischen Methanerträge der Maissorten Gavott, KXA 5233 und Mikado ersichtlich. Auffallend im Jahr 2006 ist der starke Abfall zum vierten Erntetermin der Sorte mit der niedrigsten Reifezahl Gavott.

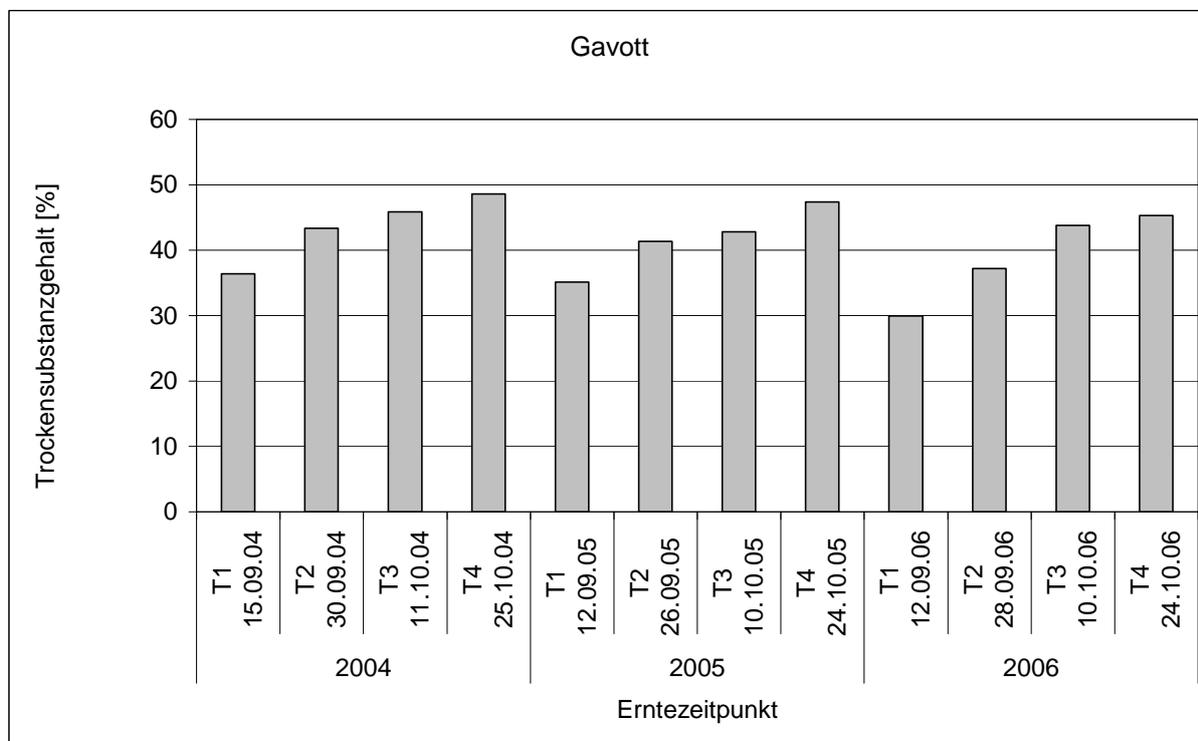


Abb. 5.1.2.1.19: Trockensubstanzgehalte (%) der Maissorte Gavott der Jahre 2004, 2005 und 2006 über je vier Erntetermine (Böhmel, 2007)

Die Abbildungen 5.1.2.1.19 und 5.1.2.1.20 zeigen die Trockensubstanzgehalte bzw. die spezifischen Methanerträge der Sorte Gavott der Jahre 2004, 2005 und 2006 über je vier Erntetermine. Diese Grafiken sollen die jährlichen natürlichen Schwankungen der Entwicklung der Maispflanze aufzeigen. In den Jahren 2004 und 2006 stieg der spezifische Methanertrag zuerst an und fiel dann zur dritten oder vierten Ernte wieder ab. Ganz anders waren die Ergebnisse im Jahr 2005, hier war ein kontinuierlicher Anstieg desselben zu verzeichnen.

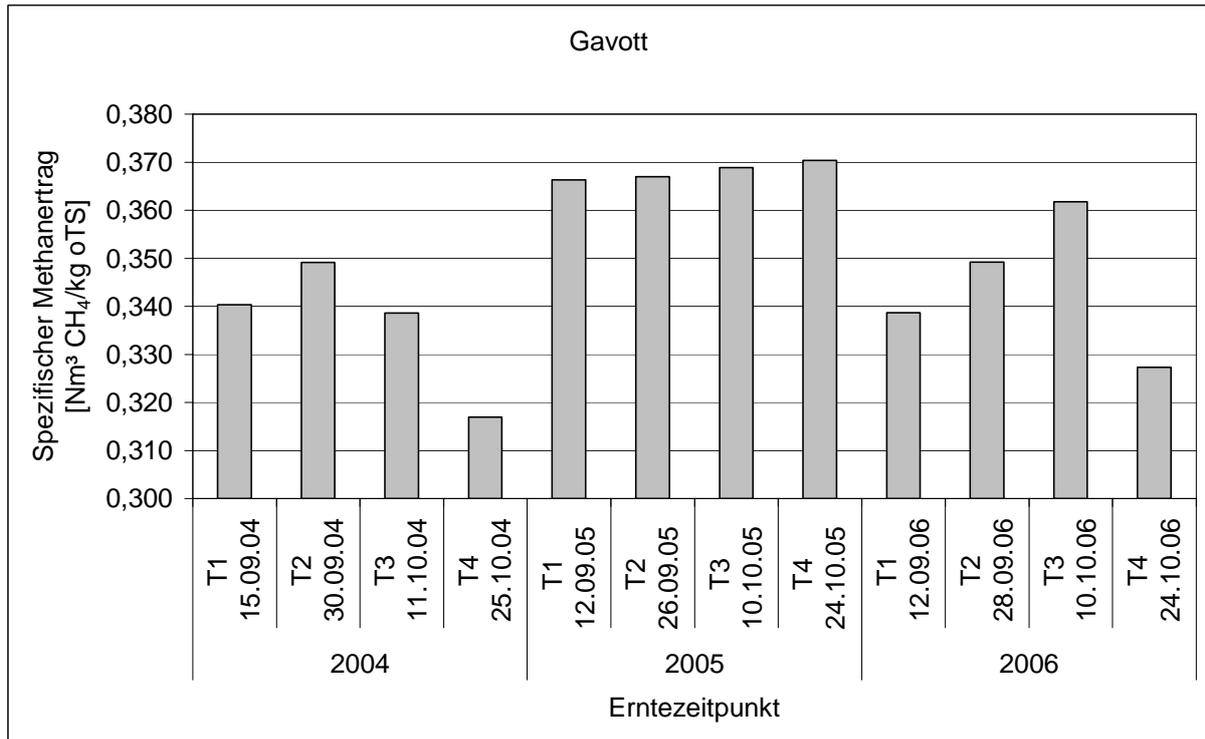


Abb. 5.1.2.1.20: Spezifische Methanerträge (Nm<sup>3</sup> Methan/kg oTS) der Maissorte Gavott der Jahre 2004, 2005 und 2006 über je vier Erntetermine

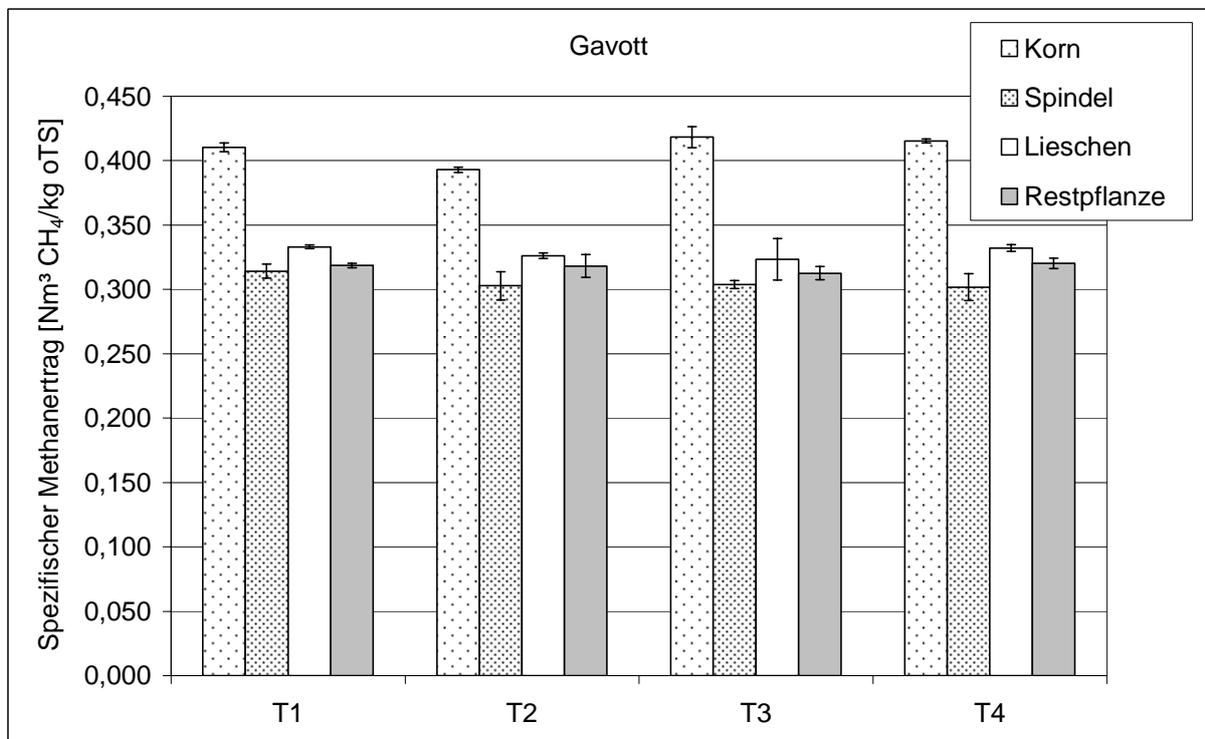


Abb. 5.1.2.1.21: Spezifische Methanerträge von Gavott 2005 (Korn, Spindel, Lieschen, Rest)

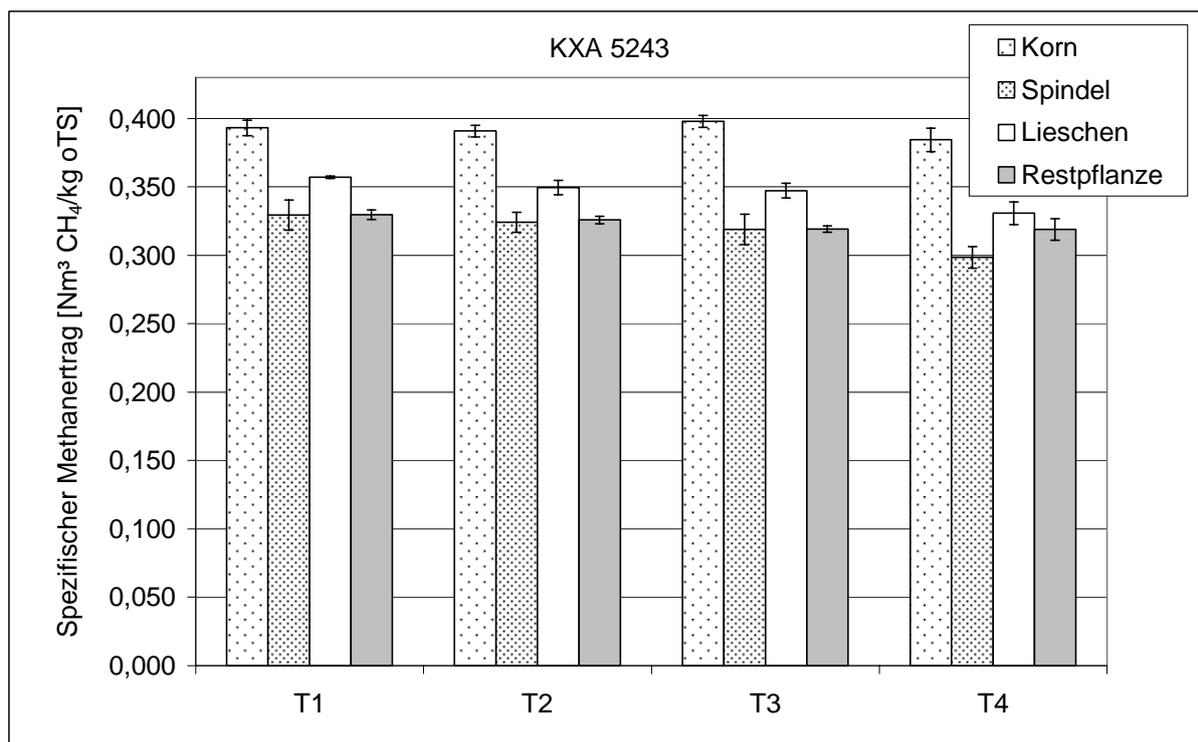


Abb. 5.1.2.1.22: Spezifische Methanerträge von KXA 5243 2005 (Korn, Spindel, Lieschen, Rest)

In Abb. 5.1.2.1.21 und Abb. 5.1.2.1.22 sind die spezifischen Methanerträge der vier Fraktionen zu vier Ernteterminen von Gavott und KXA 5243 dargestellt. Die folgende Abb. 5.1.2.1.23 zeigt die Entwicklung der Anteile der Maisfraktionen am Methanhektarertrag 2005 von Gavott, der Sorte mit der niedrigsten Reifezahl. Die Abb. 5.1.2.1.24 veranschaulicht dasselbe für die Sorte KXA 5243, die später als Gavott reift. Für diese Untersuchungen wurden die Maispflanzen zu den vier Ernteterminen in die vier Fraktionen Korn, Spindel, Lieschen und Restpflanze geteilt und die Trockenmasseerträge einzeln bestimmt. Anhand der Trockenmasseerträge und der spezifischen Methanerträge wurden die Methanhektarerträge der einzelnen Fraktionen und aus diesen deren Anteil am Gesamtertrag berechnet. Es wird deutlich ersichtlich, dass aufgrund der verschiedenen Reifezahlen die Bedeutung des Kornes unterschiedlich zu den vier Erntezeitpunkten ist. Bei der Sorte Gavott erhöht sich der Anteil des Kornes von der ersten zur zweiten Ernte, bleibt dann aber nahezu konstant. Die Sorte KXA 5243 zeigt dagegen mit zunehmender Reife einen kontinuierlichen Anstieg der Bedeutung des Anteils des Kornes am Gesamtmethanhektarertrag.

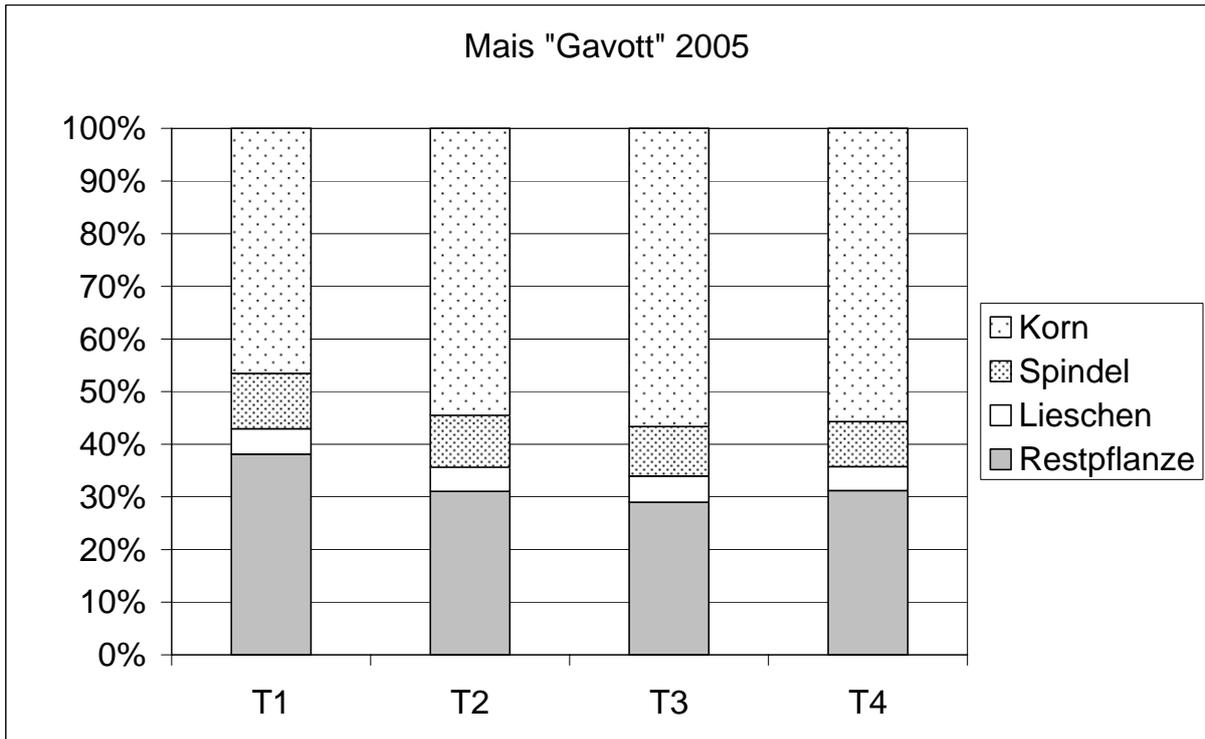


Abb. 5.1.2.1.23: Entwicklung der Anteile der Maisfraktionen am Methanhektarertrag 2005 bei Gavott (Berechnungsbasis Trockenmasseerträge Böhmel, 2007)

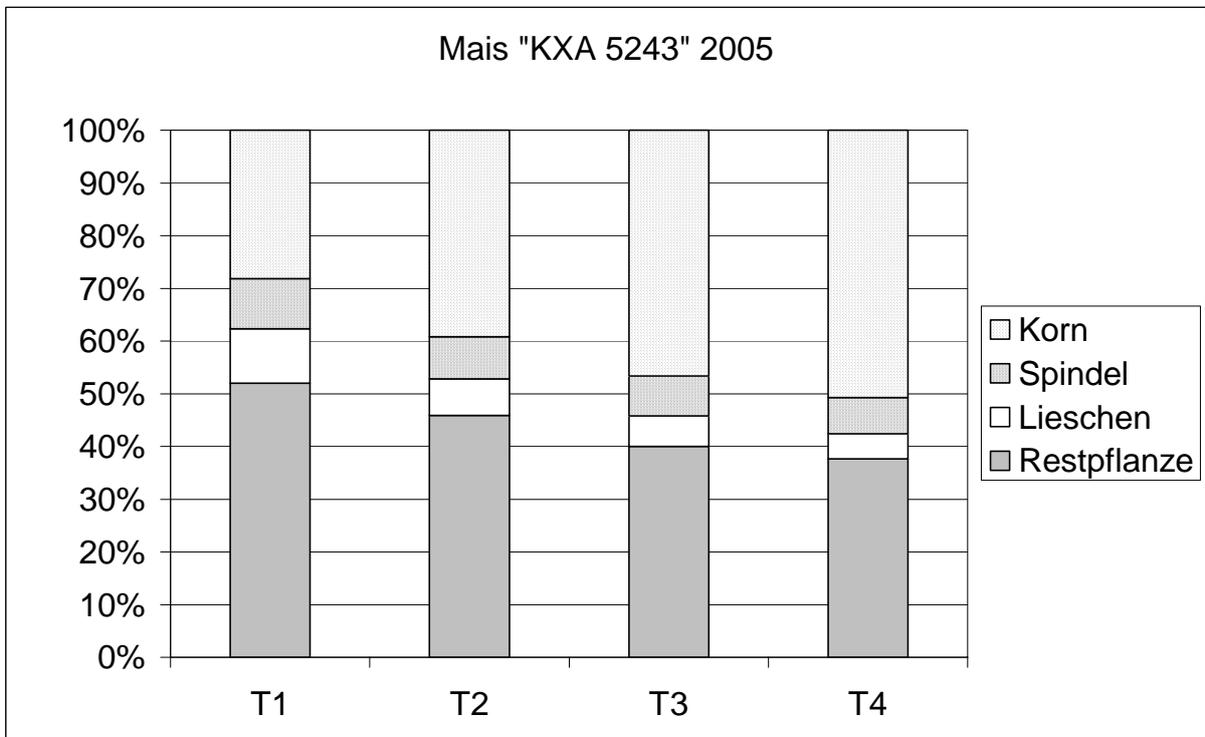


Abb. 5.1.2.1.24: Entwicklung der Anteile der Maisfraktionen am Methanhektarertrag 2005 bei KXA 5243 (Berechnungsbasis Trockenmasseerträge Böhmel, 2007)

### 5.1.2.2 Variation der Fruchtfolgen – Zwischenfrucht, Mais, Weizen

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Untersuchungen an Biomasseproben dargestellt, die vom Standort Ihinger Hof stammen. Es wurden die Maissorten Gavott, Méridienne, Mikado und Doge sowie die Zwischenfrüchte Welsches Weidelgras, Grünroggen und Winterrübsen getestet. Eine Anbaustrategie TM1 mit Mais über 190 Tage und Zwischenfrucht über 222 Tage zwischen Saat und Ernte wurde mit einer zweiten TM2 mit Mais 155 Tagen und Zwischenfrucht 246 Tagen verglichen.

Für den Mais waren Unterschiede im spezifischen Methanertrag zwischen 2,7 % bei Méridienne und 6,5 % bei Gavott zu verzeichnen. Ein geringer Unterschied im spezifischen Methanertrag von unter 1 % für die zwei Erntetermine war beim Welschen Weidelgras zu beobachten, bei Grünroggen mit 4,1 % und Winterrübsen mit 3 % war die Änderung dagegen größer. In Abb. 5.1.2.2.1 sind die spezifischen Methanerträge dargestellt, sie betragen bei Welschem Weidelgras 0,374, bei Grünroggen 0,381 und bei Winterrübsen 0,353 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg oTS maximal. Auch beim Weizen (Abb. 5.1.2.2.2) waren bei TM1 mit 0,9 % und TM2 mit 1,4 % praktisch keine Unterschiede in den spezifischen Methanerträgen festzustellen.

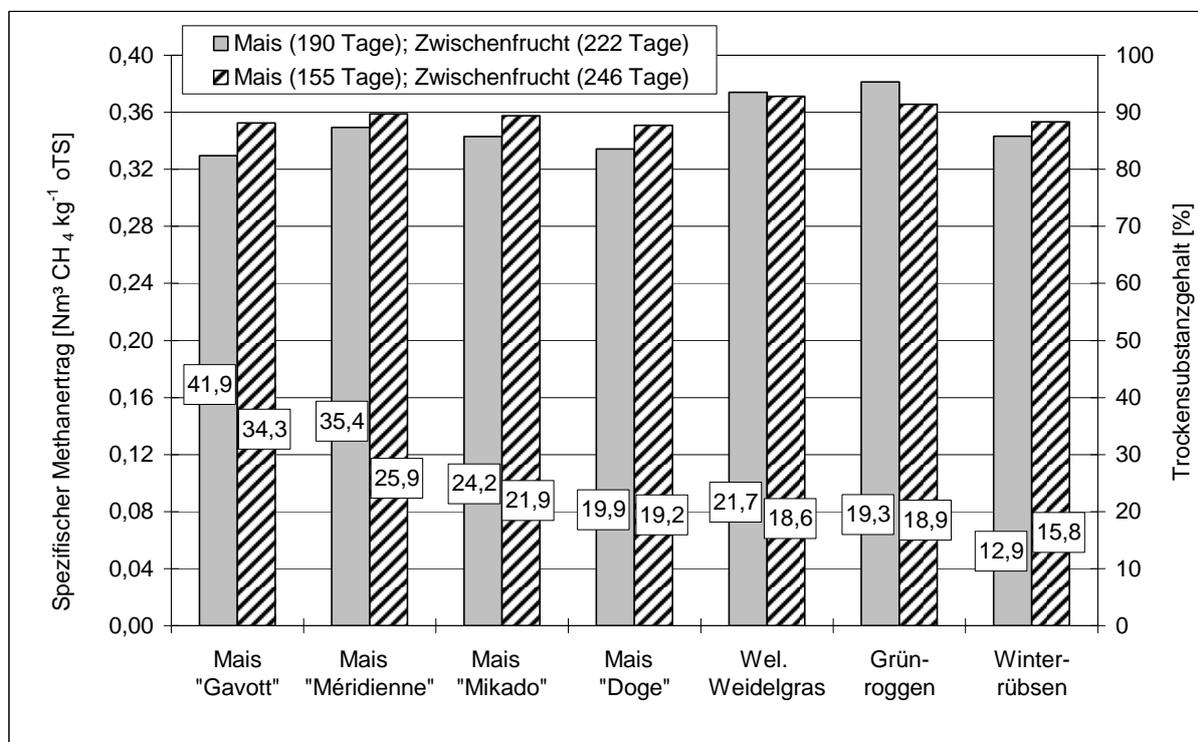


Abb. 5.1.2.2.1: Spezifische Methanerträge (Nm<sup>3</sup> Methan/kg oTS) der vier Maissortpflanzen und drei Zwischenfrüchte zu den zwei Erntezeitpunkten 2004/2005

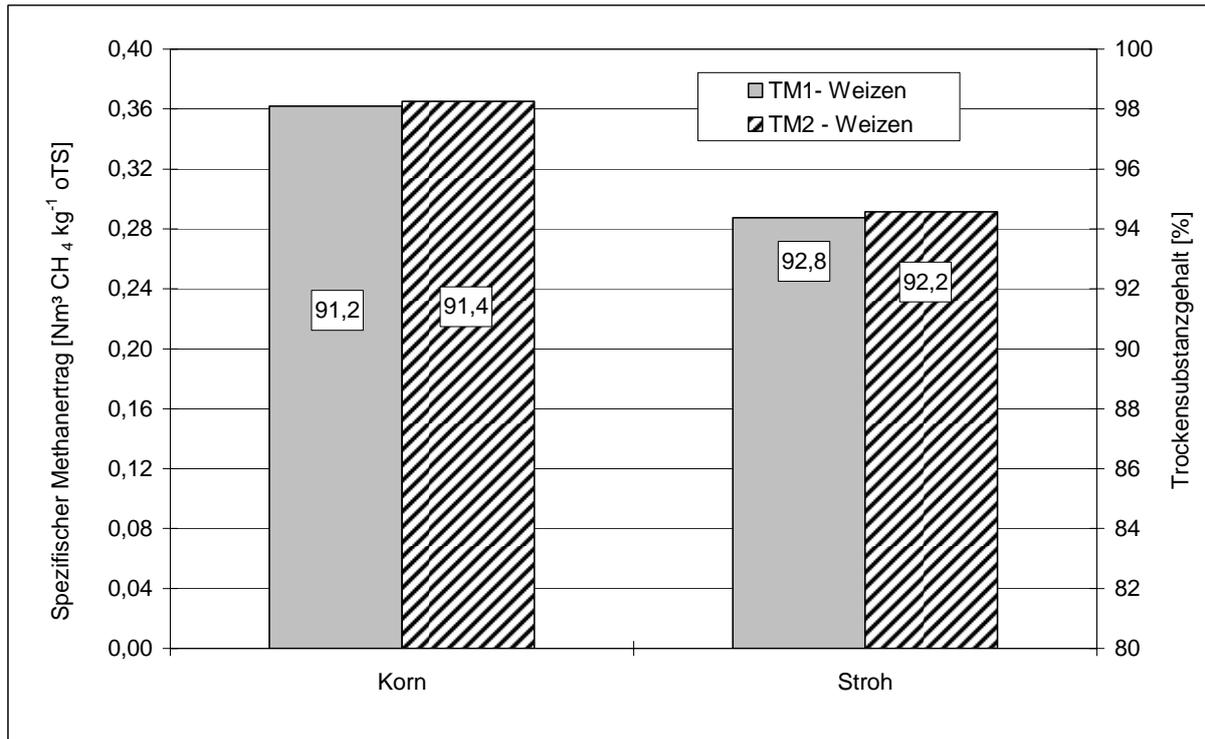


Abb. 5.1.2.2.2: Spezifische Methanerträge (Nm³ Methan/kg oTS) Weizen (Stroh, Korn) zu den zwei Erntezeitpunkten 2004/2005

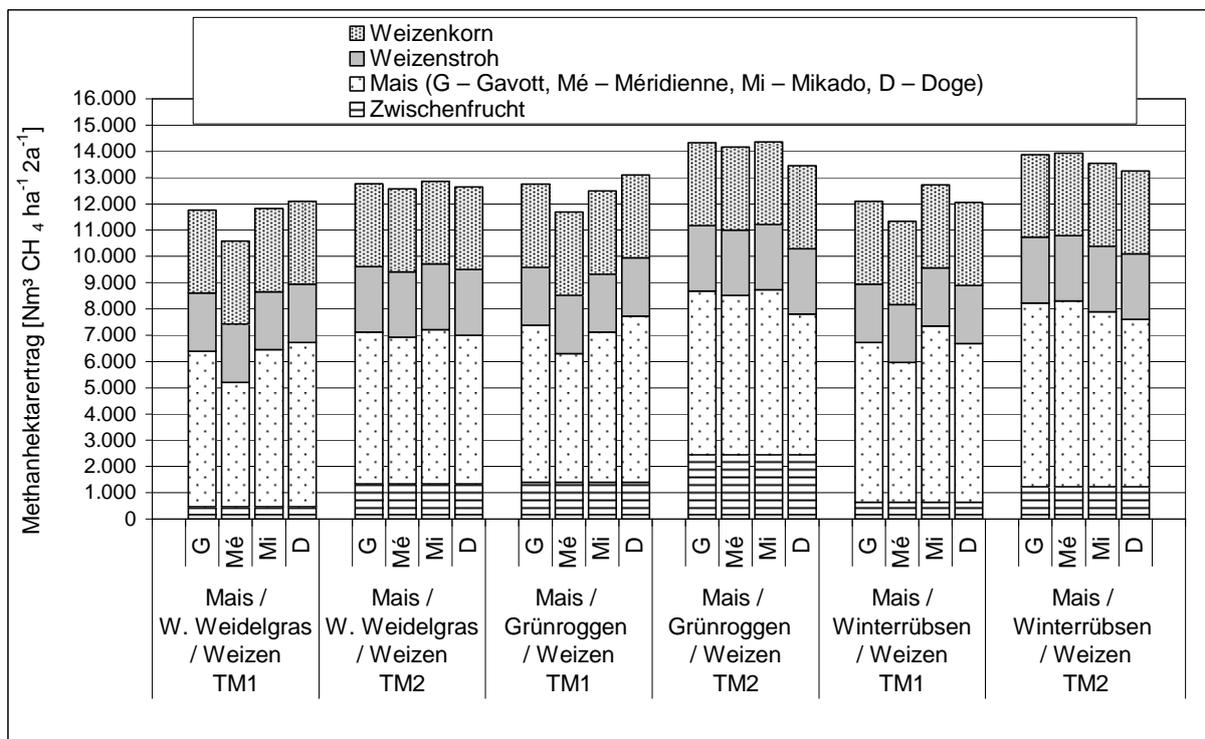


Abb. 5.1.2.2.3: Methanhektarerträge (Nm³ Methan/(ha 2a)) der vier Maissorten als Ganzpflanzen und der drei Zwischenfrüchte sowie Weizen zu den zwei Erntezeitpunkten 2004/2005 (auf Basis der Trockenmasseerträge nach Böhmel 2007 errechnet)

Abbildung 5.1.2.2.3 zeigt die Methanhektarerträge für den Mais und die Zwischenfrüchte zusammen. Die höchsten Methanhektarerträge wurden im Jahr 2004/2005 für die Anbaustrategie TM2 mit der kürzeren Wachstumszeit für den Mais in Kombination mit der längeren Wachstumszeit für die Zwischenfrucht erreicht. Bei dieser Strategie wurden für die Zwischenfrüchte bei Grünroggen mit 2451 Nm<sup>3</sup> Methan/(ha a) die besten Ergebnisse erzielt. Dieselbe Strategie erbrachte für Mais plus Zwischenfrucht und Weizen 12567 bis 14367 Nm<sup>3</sup> Methan/(ha 2a), die Strategie TM1 dagegen nur 10582 und 13102 Nm<sup>3</sup> Methan/(ha 2a).

Die Reihenfolge, beginnend mit dem höchsten Methanhektarertrag, von Grünroggen, Winterrübsen, Welsches Weidelgras jeweils mit Mais und Weizen war dieselbe wie beim Trockenmassehektarertrag, d.h. auch hier war der Trockenmasseertrag der dominierende Faktor für den Energieertrag.

### **5.1.2.3 Variation der N-Düngung Mais, Rutenhirse sowie Schlemphen (Ihinger Hof)**

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Untersuchungen im Hohenheimer Biogasertragstest an Mais und Rutenhirse, die unter verschiedenen Stickstoffdüngeneiveaus (N) angebaut und ein- bis zweimal geschnitten wurden, und deren Schlemphen aus der Ethanolproduktion vorgestellt.

Für Energiemais wurden die Dünge­stufen N1 bis N3 mit 0, 120 und 240 kg N ha<sup>-1</sup> angesetzt. Bei der Rutenhirse mit einer Ernte betragen die Stufen N1 bis N3 0, 40 und 80 kg N ha<sup>-1</sup>. Die Rutenhirse, die zweimal geschnitten wurde, erhielt nach dem ersten Schnitt eine zusätzliche Düngung 0, 40 + 20 bzw. 80 + 40 kg N ha<sup>-1</sup> (N1 bis N3) (N.N., 2005).

In Abbildung 5.1.2.3.1 sind die spezifischen Methanerträge von Mais und Rutenhirse zu drei Dünge­stufen der Ernte 2005 dargestellt. Die spezifischen Methanerträge von Mais lagen bei den drei N-Dünge­stufen zwischen 0,338 und 0,342 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg oTS. Die Rutenhirse erzielte zum ersten Schnitt zwischen 0,316 und 0,324 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg oTS, zum zweiten 0,296 bis 0,300 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg oTS sowie bei einschüriger Ernte 0,248 bis 0,260 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg oTS.

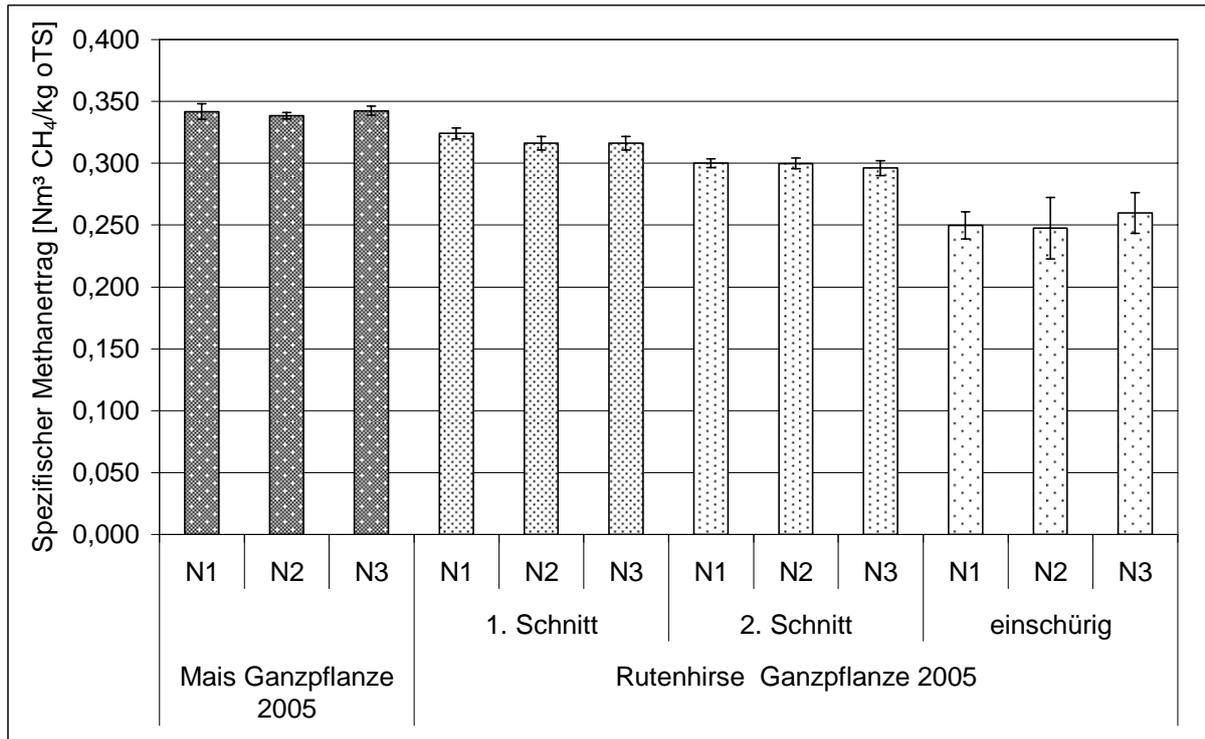


Abb. 5.1.2.3.1: Spezifische Methanerträge (Nm³ Methan/kg oTS) von Mais und Rutenhirse zu drei Düngestufen (N1, N2, N3) 2005

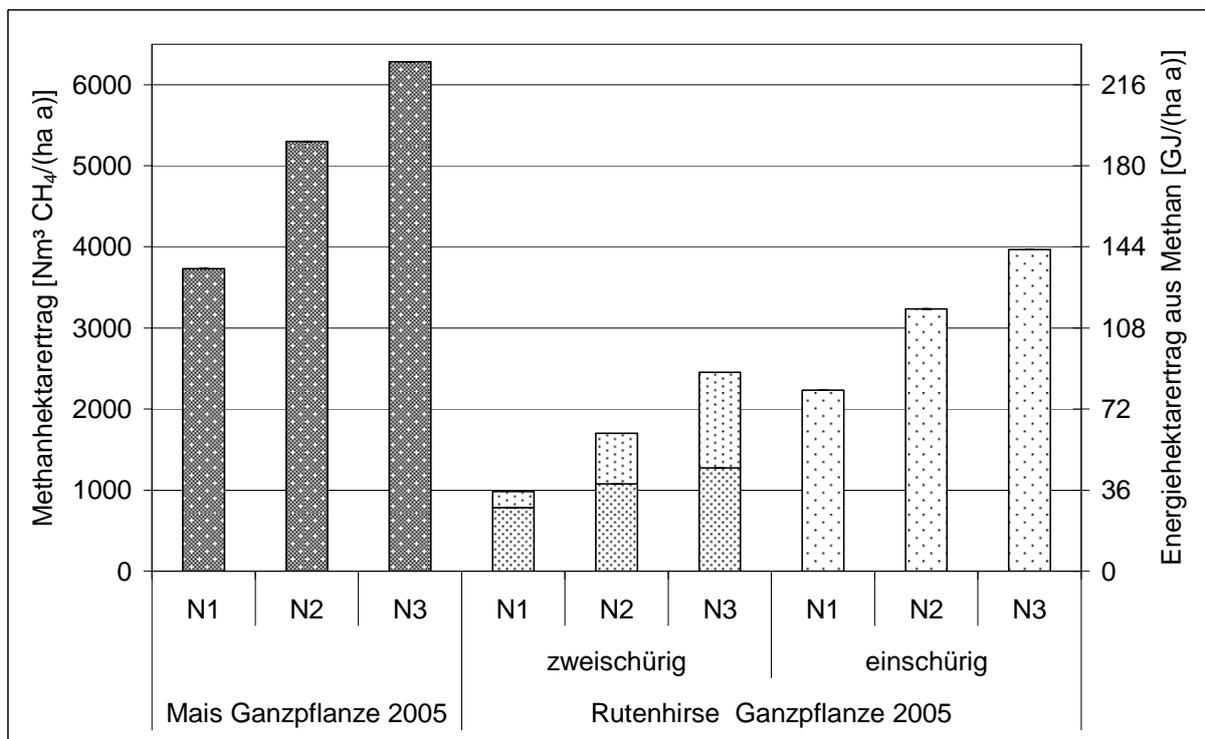


Abb. 5.1.2.3.2: Methanhektarerträge (Nm³ Methan/(ha a)) und Energiehektarerträge (GJ/(ha a)) von Mais und Rutenhirse zu drei Düngestufen (N1, N2, N3) 2005 (errechnet auf Basis der Trockenmasseerträge nach Böhmel, 2007)

Betrachtet man die Methanhektarerträge von Mais und Rutenhirse, Abb. 5.1.2.3.2, ergibt sich ein differenzierteres Bild im Vergleich der Düngestufen und der Pflanzenarten. Die Methanhektarerträge von Mais erreichten mit 3732 bis 6283 Nm<sup>3</sup> Methan/(ha a) deutlich höhere Werte als die von Rutenhirse mit 785 bis 1274 zum ersten Schnitt, 200 bis 1178 Nm<sup>3</sup> Methan/(ha a) zum zweiten und 2234 bis 2967 Nm<sup>3</sup> Methan/(ha a).

Höhere Stickstoffgaben waren hier mit höheren Trockenmasseerträgen und damit Methanhektarerträgen bzw. Energiehektarerträgen verbunden, siehe auch Abb. 5.1.2.3.2. Die zweischürige Bewirtschaftung der Rutenhirse brachte im Jahr 2005 keinen Vorteil gegenüber der einschürigen, denn bei der zweischürigen Variante lagen die Methanhektar- bzw. Energiehektarerträge nur bei 44, 52 bzw. 62 % verglichen mit der einschürigen.

Für Rapskorn wurden spezifische Methanerträge von 0,623, 0,626 und 0,590 Nm<sup>3</sup> Methan/kg oTS für die Düngungsstufen 1 bis 3 gemessen. Rapsstroh erbrachte 0,188, 0,208 und 0,169 Nm<sup>3</sup> Methan/kg oTS mit steigender N-Düngung.

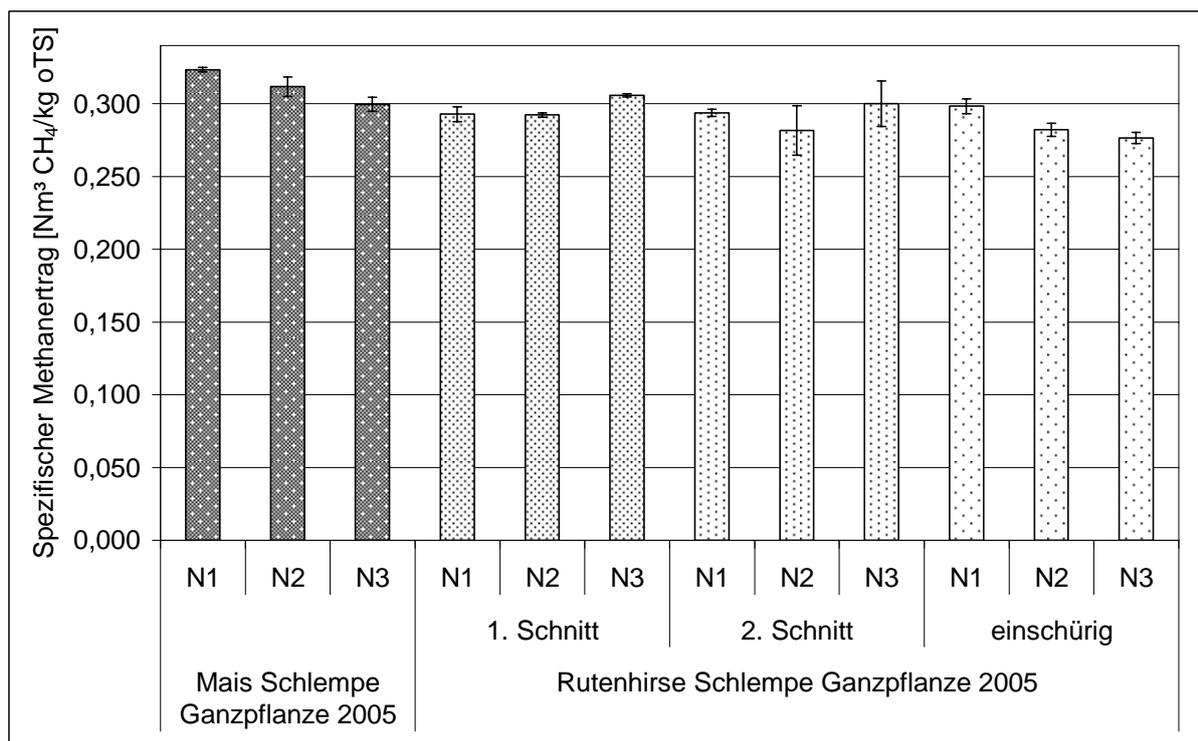


Abb. 5.1.2.3.4: Spezifische Methanerträge (Nm<sup>3</sup> Methan/kg oTS) von Schlempen von Mais und Rutenhirse zu drei Düngestufen (N1, N2, N3) 2005

Die letzte Grafik dieses Kapitels, Abb. 5.1.2.3.4, zeigt die spezifischen Methanerträge der Schlempen von Mais und Rutenhirse zu den drei Stickstoff-Düngestufen 2005. Es wurden für Maisschlempe zwischen 0,299 und

0,323 Nm<sup>3</sup> Methan/kg oTS, für Rutenhirse zum ersten Schnitt zwischen 0,292 und 0,306 Nm<sup>3</sup> Methan/kg oTS, zum zweiten 0,282 bis 0,300 Nm<sup>3</sup> Methan/kg oTS sowie bei einschüriger Ernte 0,282 bis 0,298 Nm<sup>3</sup> Methan/kg oTS erzielt.

#### 5.1.2.4 Erntezeitpunkte Triticale/-silage sowie Schlempen

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Biogasuntersuchungen im HBT an frischer und silierter Triticale zu fünf bzw. drei Erntezeitpunkten aus dem Jahr 2005 vorgestellt.

Abbildung 5.1.2.4.1 zeigt die spezifischen Methanerträge der Triticaleganzpflanzensilagen zum Zeitpunkt Ährenschieben mit 0,357, zur Milchreife mit 0,369 und zur Teigreife mit 0,358 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg oTS. Der höchste Wert lag damit nur 3,4 % über dem niedrigsten, d.h. die Unterschiede im spezifischen Methanertrag der Silagen zwischen den verschiedenen Ernteterminen waren sehr gering.

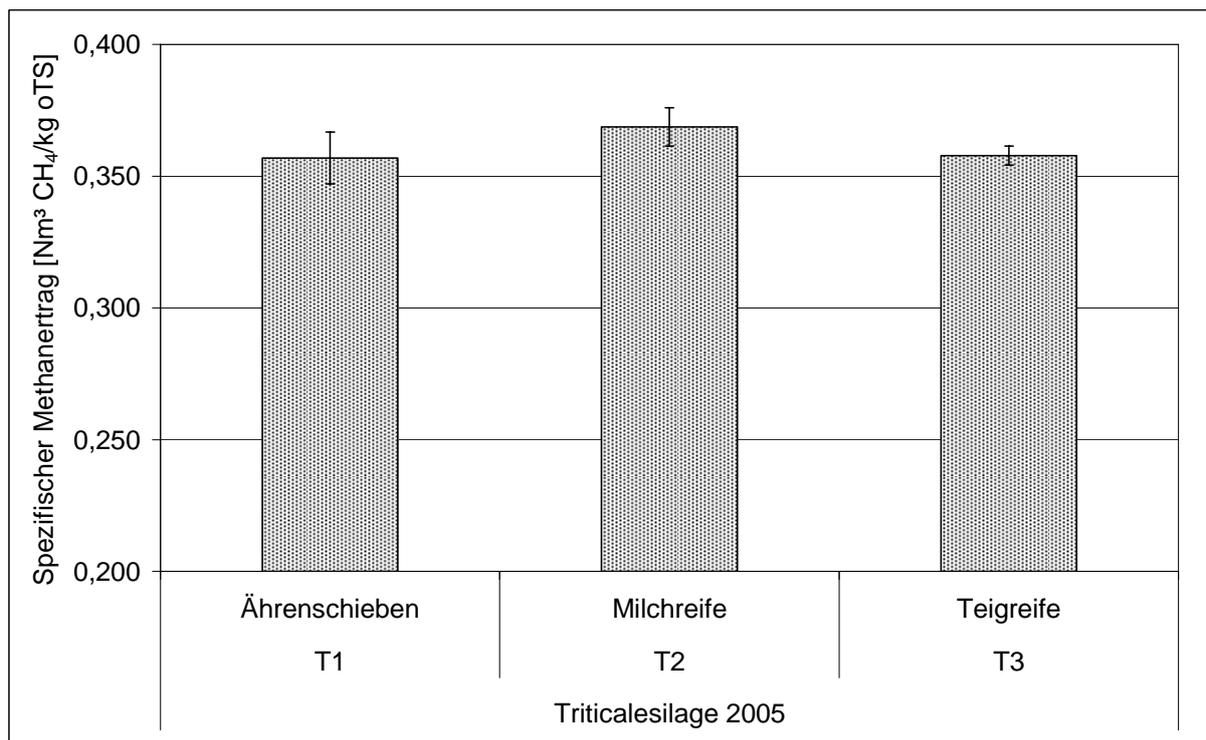


Abb. 5.1.2.4.1: Spezifische Methanerträge (Nm<sup>3</sup> Methan/kg oTS) der Triticaleganzpflanzensilage (drei Erntezeitpunkte) 2005

In Abbildung 5.1.2.4.2 sind die spezifischen Methanerträge der frischen Triticaleganzpflanze zu drei Erntezeitpunkten bzw. von Korn und Stroh zur Voll- bzw. Totreife dargestellt. Hier nahm der spezifische Methanertrag vom ersten zum dritten

Erntetermin deutlich um 14,4 % ab. Die Methanerträge des voll- und totreifen Korns unterschieden sich weniger als 1 %, während das totreife Stroh 2,7 % unter dem reifen lag.

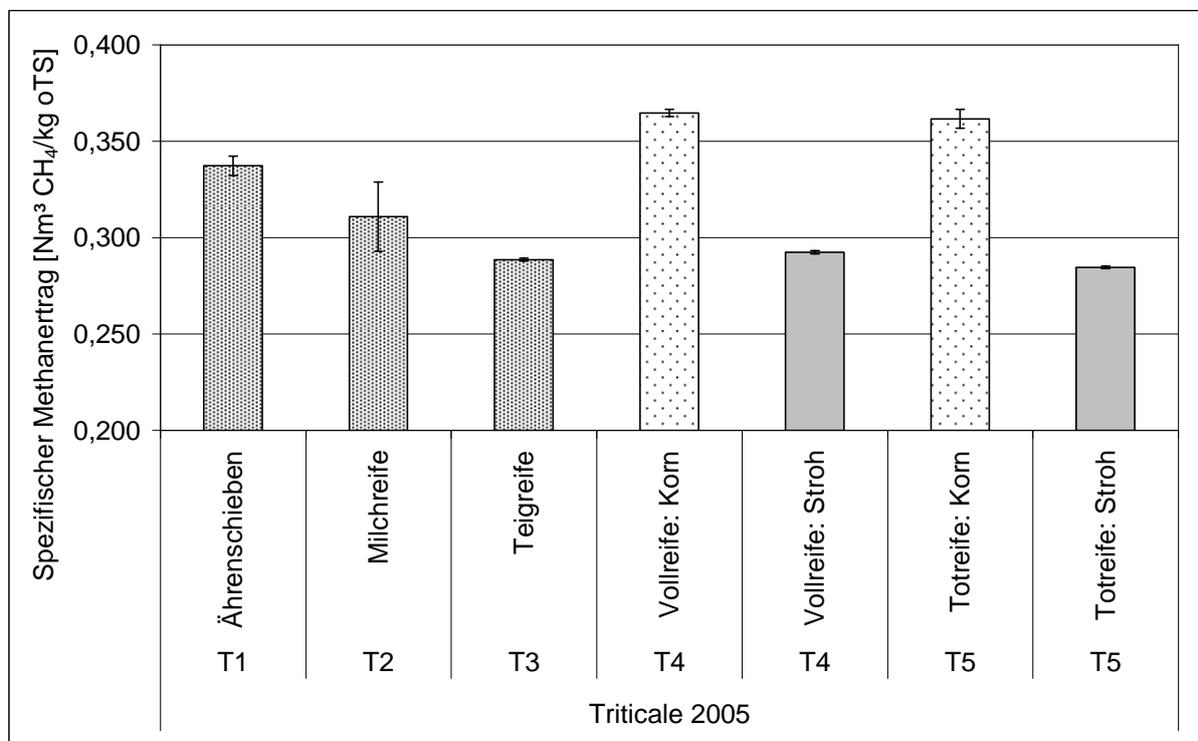


Abb. 5.1.2.4.2: Spezifische Methanerträge (Nm³ Methan/kg oTS) von Triticale (Ganzpflanze, Korn bzw. Stroh (fünf Erntezeitpunkte) 2005

In der letzten Abbildung, Abb. 5.1.2.4.3, dieses Kapitels sind die spezifischen Methanerträge der Schlempe der Triticale aus den Ethanoluntersuchungen zu sehen. Die Methanerträge stiegen vom ersten Erntetermin mit 276, über den zweiten mit 293 zum dritten auf 298 Nm³ CH₄/kg oTS und damit um 7,8 %. Bei der Schlempe aus totreifem Korn waren 6,7 % Methanertrag mehr als beim reifen Korn zu verzeichnen. Beim Stroh verhielt es sich genau andersherum, hier sank der Ertrag des totreifen Materials auf 97,8 %, ausgehend vom reifen.

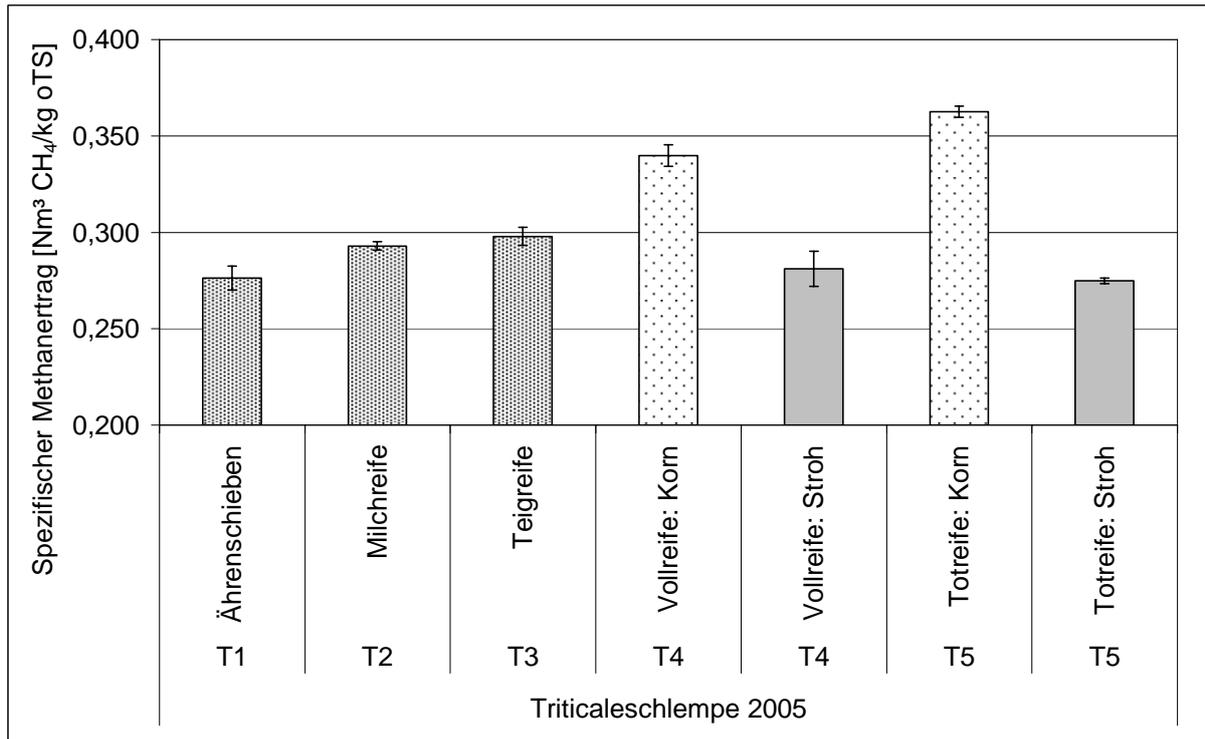


Abb. 5.1.2.4.3: Spezifische Methanerträge (Nm³ Methan/kg oTS) der Schlempen von Triticale (Ganzpflanze, Korn bzw. Stroh (fünf Erntezeitpunkte) 2005

### 5.1.3 Korrelation Inhaltsstoffe / gemessene Methanerträge

Wie im Kapitel Material und Methoden beschrieben, wurden die Maisproben mit der Nahinfrarotspektroskopie (NIRS) auf ihre Inhaltsstoffe untersucht. Ausgewählte Parameter dieser Untersuchungen wurden zur Berechnung des spezifischen Methanertrags herangezogen. Es wurde folgende Formel entwickelt, bei der das Protein sowie die Kohlenhydrate (anhand ihrer Anteile an der Trockensubstanz zu einer Gruppe zusammengefasst) mit substrattypischen Faktoren für mittlere Biogaserträge und deren Methangehalte multipliziert werden.

$$V_{\text{CH}_4/\text{TS}} = ((\text{XS} + \text{XZ} + \text{NDF})/100 \cdot V_{\text{B-KH}} \cdot C_{\text{CH}_4\text{-KH}}) + (\text{XP}/100 \cdot V_{\text{B-P}} \cdot C_{\text{CH}_4\text{-P}}) \quad [\text{Nm}^3 \text{CH}_4/\text{kg TS}]$$

$V_{\text{CH}_4/\text{TS}}$ [ $\text{Nm}^3 \text{CH}_4/\text{kg TS}$ ]	Spezifischer Methanertrag
$V_{\text{B-KH}}$ [ $\text{Nm}^3/\text{kg TS}$ ]	Mittlerer Biogasertrag von Kohlenhydraten (nach Czepuck, 2005; Werte aufgerundet)
$C_{\text{CH}_4\text{-KH}}$ [%]	Mittlere Methankonzentration im Biogas bei der Vergärung von Kohlenhydraten (nach Czepuck, 2005; Werte aufgerundet)
$V_{\text{B-P}}$ [ $\text{Nm}^3/\text{kg TS}$ ]	Mittlerer Biogasertrag von Proteinen (nach Czepuck, 2005)
$C_{\text{CH}_4\text{-P}}$ [%]	Mittlere Methankonzentration im Biogas bei der Vergärung von Proteinen (nach Czepuck, 2005)
NDF [% TS]	Neutrale Detergentien-Faser
XS [% TS]	Stärke
XZ [% TS]	Zucker
XP [% TS]	Rohprotein

Im Rahmen dieses Projekts wurden von Czepuck (2005) Vergärungsversuche im Hohenheimer Biogasertragstest (HBT) u.a. an Kohlenhydraten wie Stärke, Zellulose, Pektin, Inulin, Saccharose sowie Proteinen wie Gelatine, Casein und Ei-Albumin durchgeführt. Aufbauend auf der Arbeit von Czepuck wurden aus den Mittelwerten der Biogaserträge und den entsprechenden Methangehalten eigene substrattypische Faktoren abgeleitet. In der folgenden Formel sind diese Faktoren den Substrattypen zugeordnet.

$$V_{\text{CH}_4/\text{TS}} = ((\text{XS} + \text{XZ} + \text{NDF})/100 \cdot 0,750 \cdot 0,47) + (\text{XP}/100 \cdot 0,667 \cdot 0,60) \quad [\text{Nm}^3 \text{CH}_4/\text{kg TS}]$$

Anhand der substrattypischen Faktoren und der Parameter der NIRS-Untersuchungen wurden die spezifischen Methanerträge für jede der drei Feldwiederholungen von neun Maissorten über vier Erntezeitpunkte im Jahr 2004 errechnet.

Im Folgenden sollen die mittelfrüh reife Maissorte Gavott (Reifezahl S250) und die mittelspät bis spät reife Maissorte Mikado (S500) detaillierter betrachtet werden. Die Anteile der Inhaltsstoffe (neutrale Detergentien-Faser (NDF), Stärke (XS), Zucker (XZ), Rohprotein (XP) sowie ein unbestimmter Rest) in Prozent der Trockensubstanz der Maissorte Gavott über vier Erntezeitpunkte und je drei Feldwiederholungen nach den Untersuchungen mit NIRS sind in Abb. 5.1.3.1 dargestellt. Der „unbestimmte Rest“ wurde aus der Differenz von 100 % und der Summe der mittels NIRS-Kalibration bestimmten Inhaltsstoffe errechnet. Es dürfte sich dabei hauptsächlich um einen anorganischen Rest und um einen organischen Rest handeln. Zu Letzterem zählt das Rohfett mit etwa 2 % der TM (KWS, o.J.), das zurzeit noch nicht als Einzelstoff ausgewiesen wird.

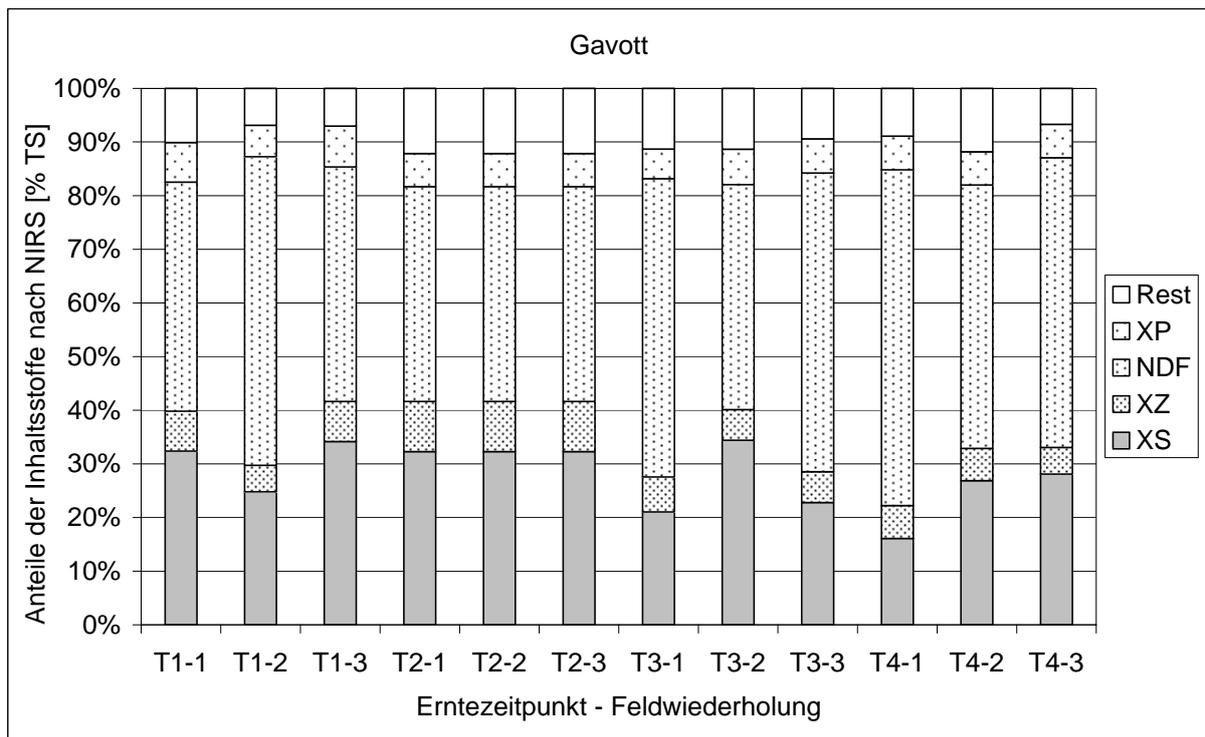


Abb. 5.1.3.1: Anteile der Inhaltsstoffe in % TS der Maissorte Gavott (S250) über vier Erntezeitpunkte 2004 (T1-T4) und je drei Feldwiederholungen nach NIRS-Untersuchung

Zum zweiten Erntetermin konnte nur die erste Feldwiederholung von Gavott per NIRS bestimmt werden. Die zweite und dritte Feldwiederholung hatten Fehlerwerte über 3 (H-Ausreißer) und mussten verworfen werden. Für diese Feldwiederholungen

wurden deshalb die gleichen Werte wie für die erste Feldwiederholung der zweiten Ernte angenommen.

Tabelle 5.1.3.1 gibt die Anteile der Inhaltsstoffe in Prozent der Trockensubstanz der Maissorte Gavott über die vier Erntezeitpunkte 2004 und je drei Feldwiederholungen nach den Untersuchungen mit NIRS im Überblick wieder. Auffallend ist die starke Variabilität zwischen den Feldwiederholungen, z.B. liegt bei der ersten Ernte die Feldwiederholung mit dem niedrigsten Proteinanteil 22 % (immer der höchste Wert wurde als 100 % angesetzt) unter der mit dem höchsten Anteil, bei einer Differenz von 1,7 % bezogen auf die Gesamtmasse. Die zweite Ernte konnte aus den auf der vorhergehenden Seite genannten Gründen nicht berücksichtigt werden. Bei Ernte drei waren wiederum Unterschiede im Proteinanteil von 17 % zu verzeichnen bei einer Differenz von 1,1 % bezogen auf die Gesamtmasse. Erst bei der vierten Ernte trat eine geringe maximale Differenz von 0,1 % bezogen auf die Gesamtmasse auf (2 % bezogen auf den Proteinanteil).

Tab. 5.1.3.1: Anteile der Inhaltsstoffe in % TS der Maissorte Gavott (S250) über vier Erntezeitpunkte 2004 (T1-T4) und je drei Feldwiederholungen nach NIRS-Untersuchung

<b>Gavott</b>	<b>XS</b>	<b>XZ</b>	<b>NDF</b>	<b>XP</b>	<b>Rest</b>
	<b>[%]</b>	<b>[%]</b>	<b>[%]</b>	<b>[%]</b>	<b>[%]</b>
T1-1	32,4	7,4	42,7	7,4	10,1
T1-2	24,8	5,0	57,5	5,9	6,9
T1-3	34,2	7,5	43,7	7,6	7,0
<b>Mittelwert</b>	<b>30,5</b>	<b>6,6</b>	<b>48,0</b>	<b>6,9</b>	<b>8,0</b>
<b>rel. STD</b>	<b>16,3</b>	<b>21,8</b>	<b>17,2</b>	<b>13,7</b>	<b>22,5</b>
T2-1	32,3	9,3	40,1	6,1	12,2
T2-2	32,3	9,3	40,1	6,1	12,2
T2-3	32,3	9,3	40,1	6,1	12,2
<b>Mittelwert</b>	-	-	-	-	-
<b>rel. STD</b>	-	-	-	-	-
T3-1	21,0	6,5	55,6	5,5	11,3
T3-2	34,4	5,7	41,9	6,6	11,3
T3-3	22,8	5,7	55,7	6,4	9,4
<b>Mittelwert</b>	<b>26,1</b>	<b>6,0</b>	<b>51,1</b>	<b>6,2</b>	<b>10,7</b>
<b>rel. STD</b>	<b>27,8</b>	<b>7,7</b>	<b>15,5</b>	<b>9,4</b>	<b>10,5</b>
T4-1	16,1	6,1	62,6	6,3	8,9
T4-2	26,9	6,0	49,1	6,2	11,8
T4-3	28,1	4,9	54,0	6,2	6,7
<b>Mittelwert</b>	<b>23,7</b>	<b>5,7</b>	<b>55,2</b>	<b>6,2</b>	<b>9,1</b>
<b>rel. STD</b>	<b>27,8</b>	<b>11,5</b>	<b>12,3</b>	<b>0,6</b>	<b>28,1</b>

Die Zuckeranteile der Feldwiederholungen sind ähnlich variabel wie die Proteinanteile, während die Stärkeanteile zum Teil mehr als 40 % bezogen auf ihren Anteil abwichen bzw. die Differenz der Anteile an der Gesamtmasse bis zu 12 % betrug (Ernte 4). Bei den neutralen Detergentien-Fasern traten die maximalen Unterschiede von 22 % auch bei der vierten Ernte auf (13,5 % Differenz auf die Gesamtmasse).

In Abbildung 5.1.3.2 sind die gemessenen und die errechneten spezifischen Methanerträge der Maissorte Gavott über vier Erntezeitpunkte 2004 und je drei Feldwiederholungen gegenübergestellt.

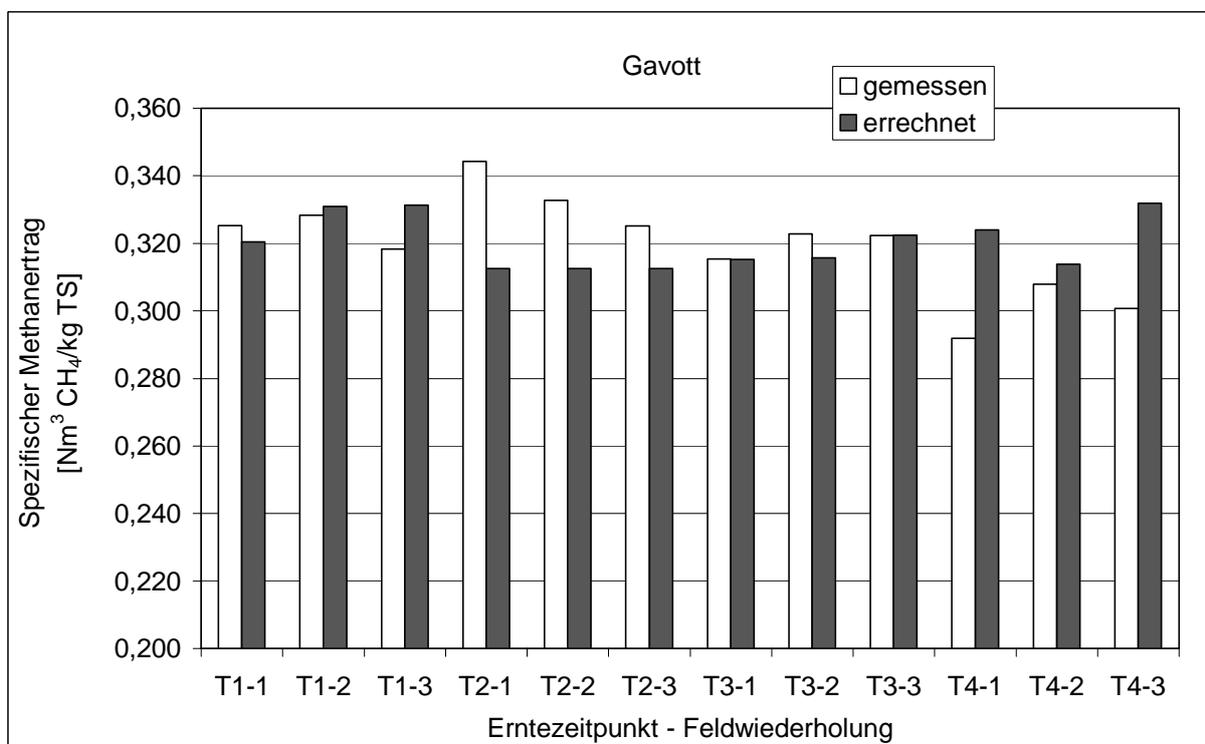


Abb. 5.1.3.2: Gemessene und errechnete spezifische Methanerträge der Maissorte Gavott (S250) über vier Erntezeitpunkte 2004 (T1-T4) und je drei Feldwiederholungen

Ergänzend zeigt Tabelle 5.1.3.2 die Werte der gemessenen (bezogen auf oTS und TS) und der errechneten spezifischen Methanerträge der Maissorte Gavott über die vier Erntezeitpunkte (T1-T4) und je drei Feldwiederholungen. Des Weiteren sind die prozentualen Abweichungen zwischen den errechneten und gemessenen Werten aufgeführt sowie die relative Standardabweichung, die Mittel-, die Minimal- und die Maximalwerte über alle Feldwiederholungen und Erntetermine angegeben.

Auch aus Tabelle 5.1.3.2 wird ersichtlich, dass die errechneten Werte mit einer mittleren Abweichung von 0,4 % sehr nahe an den gemessenen Werten liegen.

Andererseits sind maximale Abweichungen von -9,2 bzw. 11,0 % zu verzeichnen. Die prozentuale Standardabweichung über alle Erntetermine und Feldwiederholungen beträgt bei Gavott für die gemessenen Methanerträge po kg TS 4,4 % und die errechneten spezifischen Methanerträge 2,4 %.

Tab. 5.1.3.2: Gemessene und errechnete spezifische Methanerträge der Maissorte Gavott (S250) über vier Erntezeitpunkte 2004 (T1-T4) und je drei Feldwiederholungen sowie Abweichung zwischen den Methanerträgen bezogen auf TS

Mais Gavott	Messung		Berechnung	Abweichung
	Spezif. Methan	Spezif. Methan	Spezif. Methan	
	Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg oTS	Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg TS	Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg TS	
T1-1	0,344	0,325	0,320	-1,5
T1-2	0,343	0,328	0,331	0,8
T1-3	0,334	0,318	0,331	4,1
T2-1	0,360	0,344	0,313	-9,2
T2-2	0,348	0,333	0,313	-6,1
T2-3	0,339	0,325	0,313	-3,9
T3-1	0,335	0,315	0,315	-0,1
T3-2	0,340	0,323	0,316	-2,2
T3-3	0,341	0,322	0,322	0,0
T4-1	0,312	0,292	0,324	11,0
T4-2	0,324	0,308	0,314	1,9
T4-3	0,314	0,301	0,332	10,4
<b>Mittelwert</b>	<b>0,336</b>	<b>0,320</b>	<b>0,320</b>	<b>0,4</b>
<b>Min</b>	<b>0,312</b>	<b>0,292</b>	<b>0,313</b>	<b>-9,2</b>
<b>Max</b>	<b>0,360</b>	<b>0,344</b>	<b>0,332</b>	<b>11,0</b>
<b>rel. STD [%]</b>	<b>4,1</b>	<b>4,4</b>	<b>2,4</b>	

Im Folgenden soll nun die mittelspät bis spät reife Maissorte Mikado (S500) im Fokus detaillierter Betrachtungen stehen. In Abbildung 5.1.3.3 und Tabelle 5.1.3.3 sind die Anteile der Inhaltsstoffe in % TS der Untersuchungen mit NIRS der Maissorte Mikado über vier Erntezeitpunkte im Jahr 2004 und je drei Feldwiederholungen dargestellt. Die Anteile der Inhaltsstoffe von Mikado variieren über die Erntezeitpunkte und innerhalb der Feldwiederholungen deutlich weniger als die von Gavott. Der „unbestimmte Rest“ bei Mikado liegt mit mittleren 8,3 % auch unter dem von Gavott mit 10,0 %.

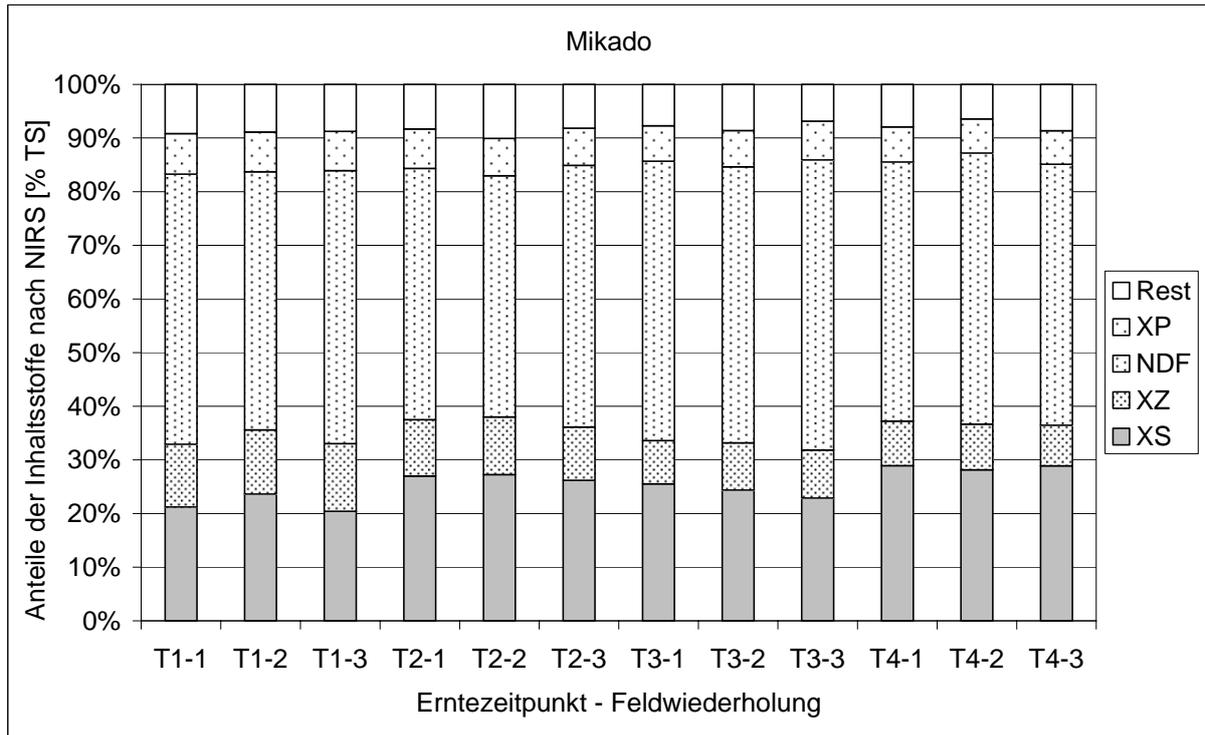


Abb. 5.1.3.3: Anteile der Inhaltsstoffe in % TS der Maissorte Mikado (S500) über vier Erntezeitpunkte 2004 (T1-T4) und je drei Feldwiederholungen nach NIRS-Untersuchung

Während sich der Protein- und der Zuckeranteil kontinuierlich über die Erntetermine verringert, steigt die Summe aus Stärke, Zucker und neutralen Detergentien-Fasern um 2,3 % an.

Tab. 5.1.3.3: Anteile der Inhaltsstoffe in % TS der Maissorte Mikado (S500) über vier Erntezeitpunkte 2004 (T1-T4) und je drei Feldwiederholungen nach NIRS-Untersuchung

<b>Mikado</b>	<b>XS</b>	<b>XZ</b>	<b>NDF</b>	<b>XP</b>	<b>Rest</b>
	<b>[%]</b>	<b>[%]</b>	<b>[%]</b>	<b>[%]</b>	<b>[%]</b>
T1-1	21,2	11,7	50,4	7,5	9,2
T1-2	23,6	12,0	48,1	7,4	8,9
T1-3	20,4	12,6	50,9	7,3	8,8
<b>Mittelwert</b>	<b>21,8</b>	<b>12,1</b>	<b>49,8</b>	<b>7,4</b>	<b>8,9</b>
<b>rel. STD</b>	<b>7,7</b>	<b>3,9</b>	<b>3,0</b>	<b>1,5</b>	<b>2,4</b>
T2-1	27,0	10,5	46,8	7,3	8,3
T2-2	27,3	10,8	45,0	6,9	10,1
T2-3	26,2	9,9	48,8	6,9	8,2
<b>Mittelwert</b>	<b>26,8</b>	<b>10,4</b>	<b>46,9</b>	<b>7,1</b>	<b>8,9</b>
<b>rel. STD</b>	<b>2,1</b>	<b>4,1</b>	<b>4,1</b>	<b>3,3</b>	<b>11,9</b>
T3-1	25,5	8,1	52,0	6,6	7,7
T3-2	24,4	8,8	51,5	6,8	8,6
T3-3	22,9	8,9	54,1	7,3	6,8
<b>Mittelwert</b>	<b>24,3</b>	<b>8,6</b>	<b>52,5</b>	<b>6,9</b>	<b>7,7</b>
<b>rel. STD</b>	<b>5,5</b>	<b>5,3</b>	<b>2,6</b>	<b>4,9</b>	<b>11,3</b>
T4-1	28,9	8,3	48,3	6,6	7,9
T4-2	28,2	8,5	50,6	6,3	6,5
T4-3	28,9	7,5	48,7	6,3	8,6
<b>Mittelwert</b>	<b>28,7</b>	<b>8,1</b>	<b>49,2</b>	<b>6,4</b>	<b>7,7</b>
<b>rel. STD</b>	<b>1,5</b>	<b>6,2</b>	<b>2,5</b>	<b>2,4</b>	<b>14,5</b>

In Abbildung 5.1.3.4 und Tabelle 5.1.3.4 sind die gemessenen und die errechneten spezifischen Methanerträge der Maissorte Mikado über vier Erntezeitpunkte 2004 (T1-T4) und je drei Feldwiederholungen gegenübergestellt.

Tabelle 5.1.3.4 gibt einen Überblick über die prozentualen Abweichungen zwischen den errechneten und gemessenen Werten pro kg TS sowie über die relativen Standardabweichungen, die Mittel-, die Minimal- und die Maximalwerte über alle Feldwiederholungen und Erntetermine der Maissorte Mikado.

Aus Tabelle 5.1.3.4 wird ersichtlich, dass die errechneten Werte bei Mikado mit einer mittleren Abweichung von 4,4 % sehr nahe an den gemessenen Werten liegen und die Maximalwerte -1,0 bzw. 10,3 % betragen. Die relative Standardabweichung über alle Feldwiederholungen und Erntetermine beträgt bei Mikado für die gemessenen Methanerträge 2,1 % und die errechneten spezifischen Methanerträge 1,0 %.

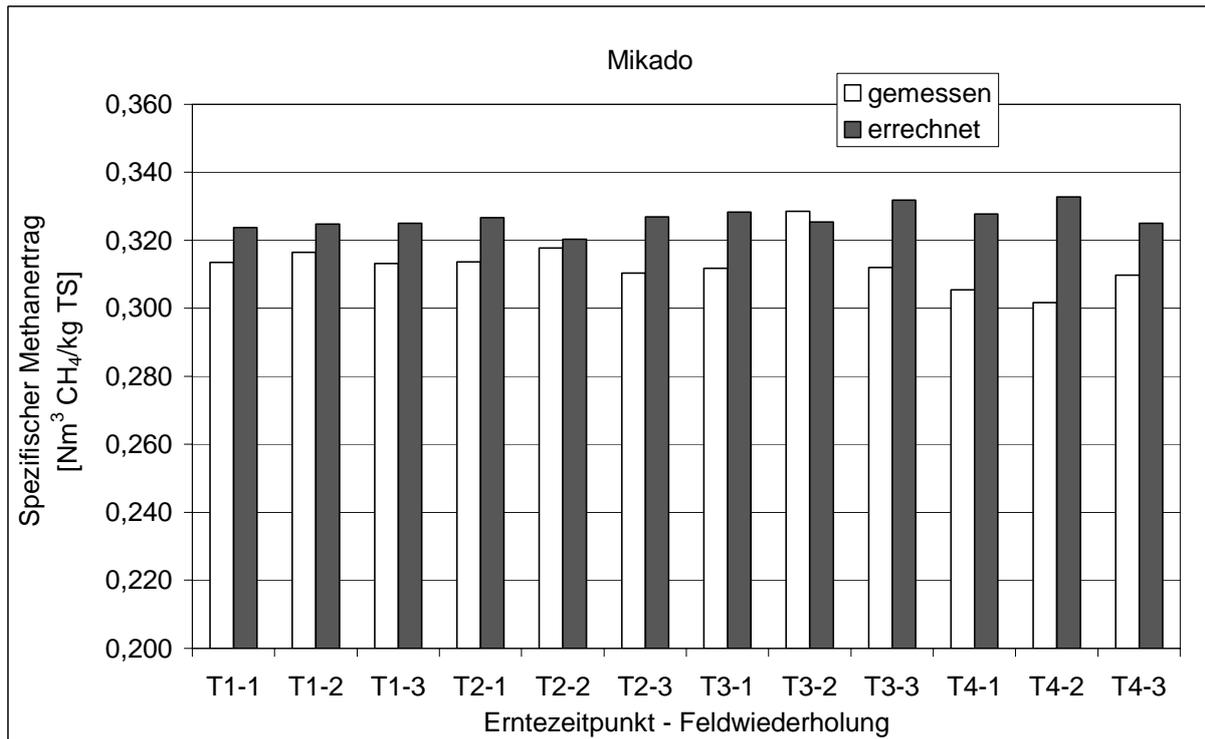


Abb. 5.1.3.4: Gemessene und errechnete spezifische Methanerträge der Maissorte Mikado (S500) über vier Erntezeitpunkte 2004 (T1-T4) und je drei Feldwiederholungen

Tab. 5.1.3.4: Gemessene und errechnete spezifische Methanerträge der Maissorte Mikado (S500) über vier Erntezeitpunkte (T1-T4) und je drei Feldwiederholungen

Mais Mikado	Messung		Berechnung	
	Spezif. Methan	Spezif. Methan	Spezif. Methan	Abweichung
	Nm³ CH₄/kg oTS	Nm³ CH₄/kg TS	Nm³ CH₄/kg TS	%
T1-1	0,330	0,314	0,324	3,3
T1-2	0,333	0,316	0,325	2,6
T1-3	0,331	0,313	0,325	3,8
T2-1	0,331	0,314	0,327	4,2
T2-2	0,335	0,318	0,320	0,8
T2-3	0,332	0,310	0,327	5,3
T3-1	0,332	0,312	0,328	5,3
T3-2	0,348	0,329	0,325	-1,0
T3-3	0,334	0,312	0,332	6,3
T4-1	0,323	0,305	0,328	7,3
T4-2	0,321	0,302	0,333	10,3
T4-3	0,325	0,310	0,325	4,9
<b>Mittelwert</b>	<b>0,331</b>	<b>0,313</b>	<b>0,327</b>	<b>4,4</b>
<b>Min</b>	<b>0,321</b>	<b>0,302</b>	<b>0,320</b>	<b>-1,0</b>
<b>Max</b>	<b>0,348</b>	<b>0,329</b>	<b>0,333</b>	<b>10,3</b>
<b>rel. STD [%]</b>	<b>2,1</b>	<b>2,1</b>	<b>1,0</b>	

In Abbildung 5.1.3.5 sind die gemessenen spezifischen Methanerträge aller neun Maissorten über vier Erntezeitpunkte mit je drei Feldwiederholungen gegen die errechneten spezifischen Methanerträge aufgetragen. Deutlich wird, dass die Bandbreite an gemessenen Werten nicht mit den errechneten Werten abzubilden ist, mögliche Ursachen werden im Kapitel Diskussion erörtert. Das Bestimmtheitsmaß der Regressionsgeraden ist nahe null.

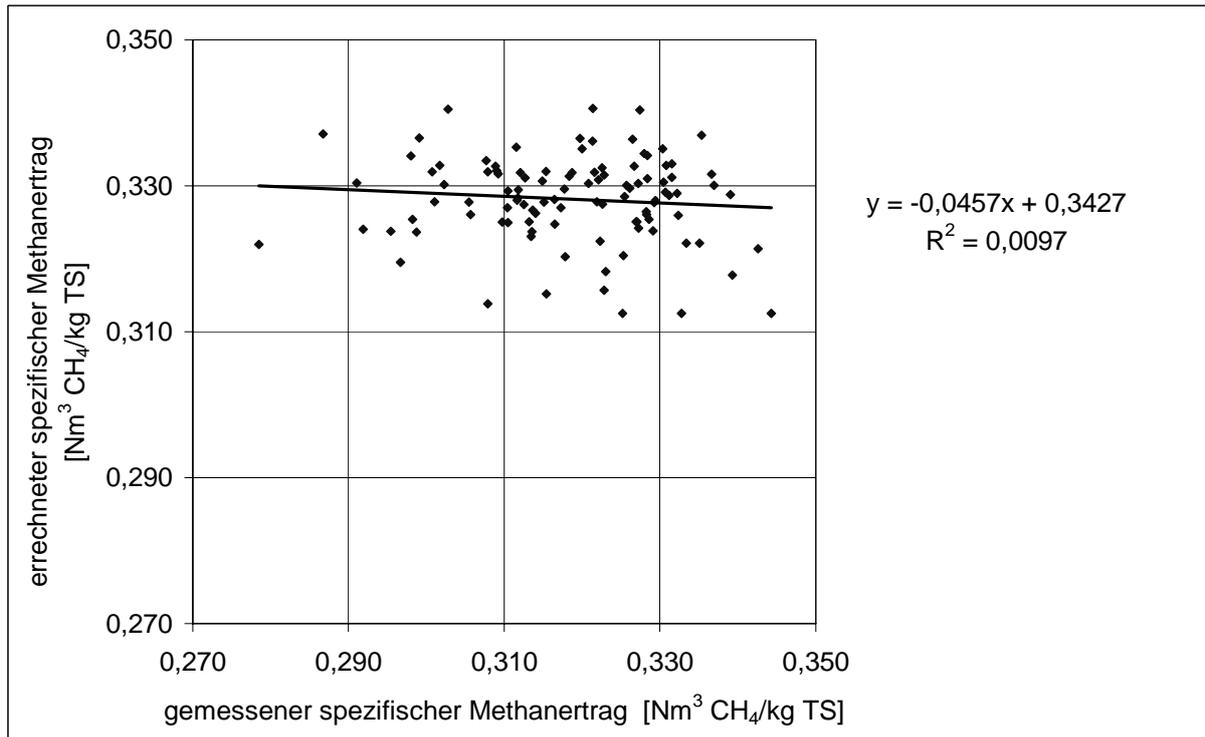


Abb. 5.1.3.5: Gemessene und errechnete spezifische Methanerträge der neun Maissorten über vier Erntezeitpunkte 2004 und je drei Feldwiederholungen

## 5.2 Bioethanolausbeuten

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Laboruntersuchungen zu den Bioethanolausbeuten verschiedener Pflanzen bzw. -teile dargestellt. In den Jahren 2004 bis 2006 wurden unter Variation der Konservierung, der Erntezeitpunkte oder des Stickstoffdüngenniveaus Proben von im Rahmen des Projekts angebaute Biomasse gewonnen.

So wurden im Jahr 2004 Rutenhirse und Mais verschiedener Stickstoffdüngestufen (s.a. Kapitel 5.1.2.3) als Ganzpflanzen auf ihre Ethanolausbeute untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.2.1 dargestellt. Die höchsten Ausbeuten pro Trockenmassegewicht wurden mit 153 L A/Mg TS bei der Rutenhirse mit der niedrigsten Düngestufe erzielt. Bei Düngestufe zwei sank die Ausbeute um 6 % auf 143 L A/Mg TS und blieb bei der höchsten Düngestufe drei mit 144 L A/Mg TS auf gleichem Niveau wie bei N2.

Beim Mais als Ganzpflanze wirkte sich die Düngung im Jahr 2004 anders als auf die Rutenhirse aus. Bei Düngestufe eins war mit 264 L A/Mg TS die geringste Ausbeute pro Trockenmassegewicht für Mais zu verzeichnen, während Stufe zwei die höchste Ausbeute mit 333 L A/Mg TS erbrachte. Bei der höchsten Stufe drei sank die Ausbeute von Mais auf 278 L A/Mg TS und lag damit 5 % über Stufe eins.

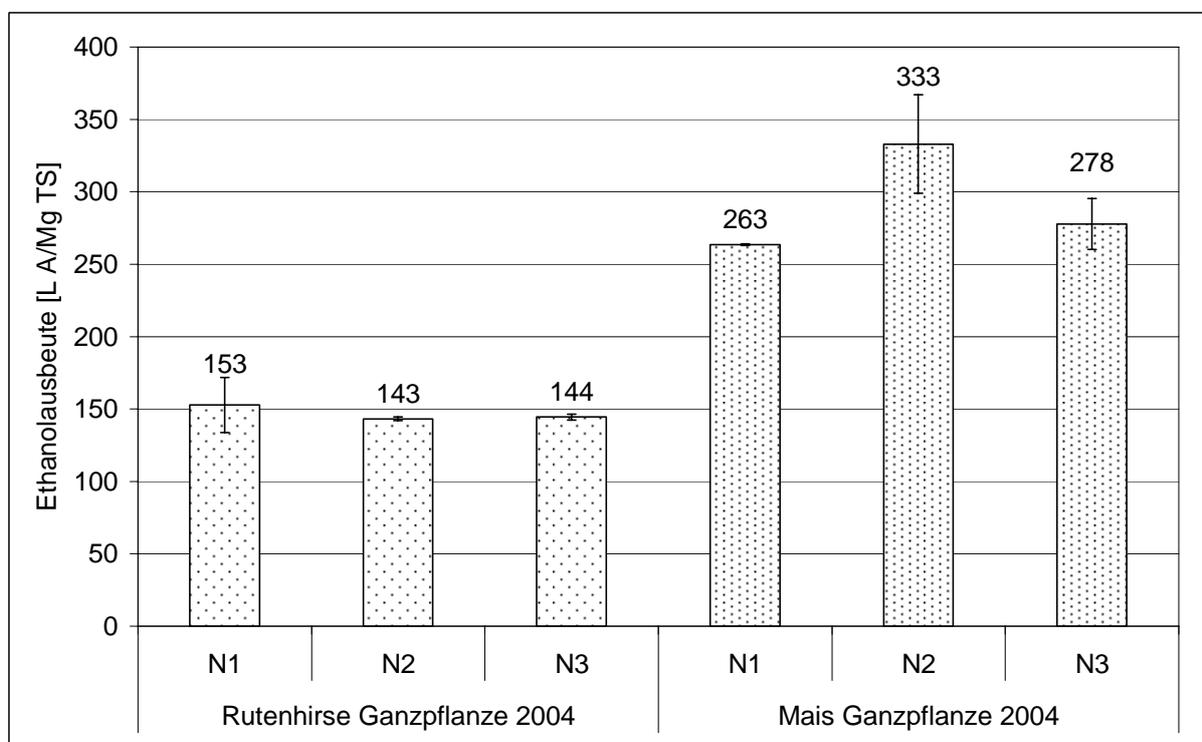


Abb. 5.2.1: Ethanolausbeute (L A/Mg TS) von Rutenhirse und Mais als Ganzpflanze (drei N-Düngungsstufen) 2004

Im Mittel über die drei Düngestufen war die Ethanolausbeute, bezogen auf das Trockenmassegewicht, von Mais doppelt so hoch wie die der Rutenhirse.

Im Jahr 2005 wirkte sich die Düngung sowohl bei Rutenhirse als auch bei Mais anders als im Jahr 2004 auf die Ethanolausbeuten, bezogen auf das Trockenmassegewicht, aus. Insgesamt erreichten die Ethanolausbeuten, bezogen auf das Trockenmassegewicht, 2005 im Mittel über die Düngungsstufen bei Rutenhirse nur 73 % und bei Mais 83 % der Vorjahresausbeute (2004). Im Jahr 2005 lag die Ethanolausbeute von Rutenhirse der zweiten Düngestufe mit 115 L A/Mg TS 4 % über der ersten mit 110 L A/Mg TS. Die Ausbeute der dritten Stufe war mit 98 L A/Mg TS am niedrigsten.

Beim Mais war über die drei Düngestufen ein kontinuierlicher Anstieg der Ausbeute von 234 L A/Mg TS, über 243 L A/Mg TS bis zu 253 L A/Mg TS zu verzeichnen. Abb. 5.2.2 veranschaulicht die Untersuchungsergebnisse des Jahres 2005 für Rutenhirse und Mais.

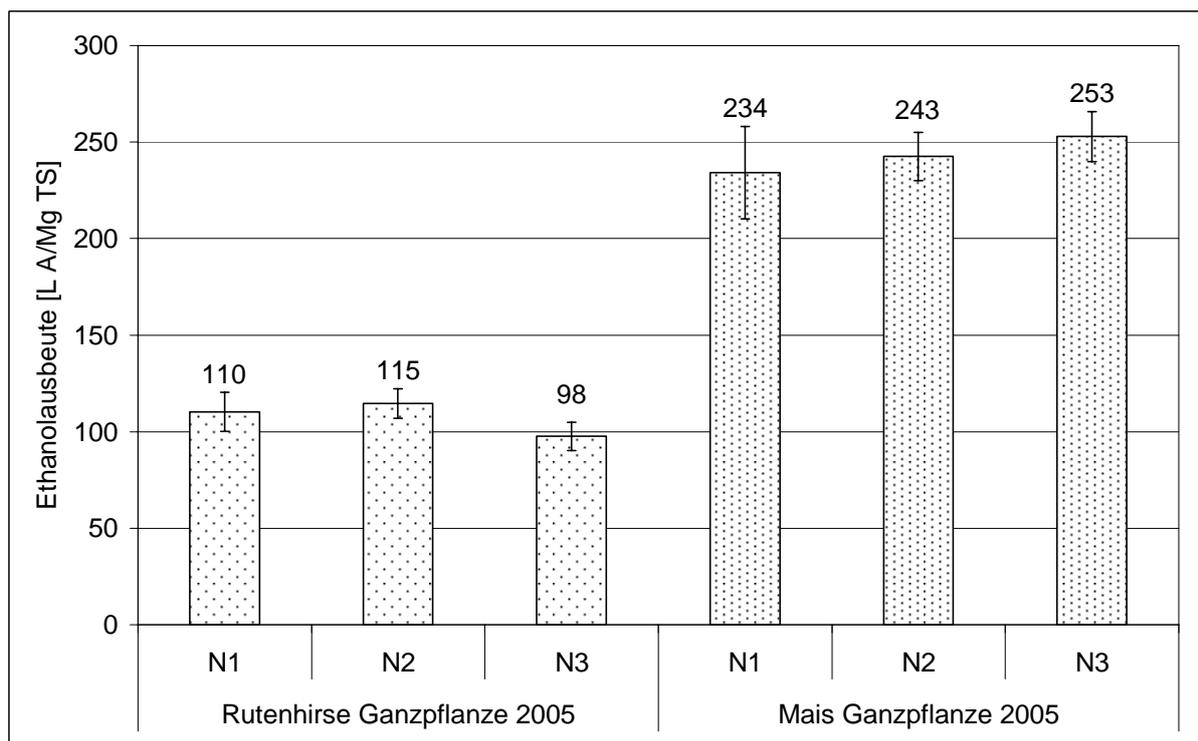


Abb. 5.2.2: Ethanolausbeute (L A/Mg TS) von Rutenhirse und Mais als Ganzpflanze (drei N-Düngungsstufen) 2005

Im Jahr 2006 wurden Proben der Maissorten Gavott, KXA 5233 und Mikado als Ganzpflanzen auf ihre Ethanolusbeuten zu vier verschiedenen Erntezeitpunkten untersucht. Bei der Maissorte Gavott waren die Unterschiede zwischen den Ernten mit Ausbeuten von 259 L A/Mg TS bis 269 L A/Mg TS sehr gering. Die deutlichsten Veränderungen traten bei KXA 5233 mit Ausbeuten von 251 L A/Mg TS bis 291 L A/Mg TS auf. Die Sorte mit der höchsten Reifezahl, Mikado, erbrachte mit 242 L A/Mg TS zur frühen Ernte die geringste Ausbeute aller Sorten und erreichte am Ende mit 266 L A/Mg TS ein ähnliches Niveau wie Gavott zu den beiden letzten Erntezeitpunkten. Abb. 5.2.3 zeigt die Ethanolusbeuten der drei Maissorten über die vier Erntetermine.

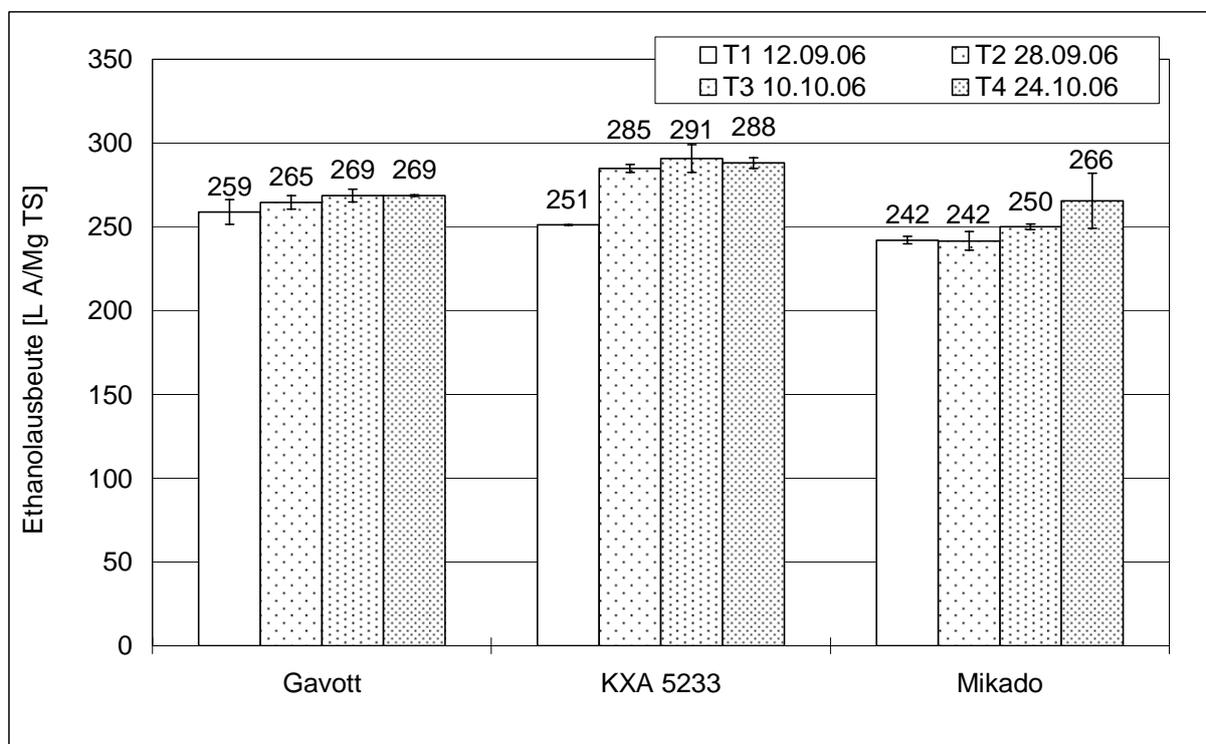


Abb. 5.2.3: Ethanolusbeute (L A/Mg TS) der drei Maissorten zu den vier Erntezeitpunkten 2006

Die in der Literatur angegebenen Ethanolusbeuten der Mais Kornfraktion von 380 bis 400 L A/Mg FM (Misselhorn, 2004) liegen deutlich über den Ausbeuten der hier untersuchten Ganzpflanzenproben.

In Tab. 5.2.4 sind die gemessenen den aus den säurelöslichen Zuckern errechneten theoretischen Ethanolusbeuten einander gegenübergestellt. Ein sehr hoher Anteil der säurelöslichen Zucker wurde demnach in den Gärtests tatsächlich in Ethanol umgewandelt.

Tab. 5.2.4: Vergleich der theoretischen (errechnet aus den säurelöslichen Zuckern) mit den gemessenen Ethanolausbeuten

		theoretische Ethanolausbeute	gemessene Ethanolausbeute	gemessene zu theoret. Ausbeute
Sorte/FAO	Zeitpunkt	L A/Mg TS	L A/Mg TS	%
<b>Gavott (250)</b>	T1 12.09.06	270	259	96,0
	T2 28.09.06	301	265	88,0
	T3 10.10.06	300	269	89,5
	T4 24.10.06	305	269	88,2
<b>KXA 5233 (300)</b>	T1 12.09.06	266	251	94,5
	T2 28.09.06	306	285	93,1
	T3 10.10.06	308	291	94,4
	T4 24.10.06	307	288	93,8
<b>Mikado (370/500)</b>	T1 12.09.06	261	242	92,7
	T2 28.09.06	264	242	91,6
	T3 10.10.06	283	250	88,3
	T4 24.10.06	296	266	89,6

In Abb. 5.2.4 sind Energieerträge aus Ethanol pro Hektar und Jahr der drei Maissorten über die Erntetermine im Jahr 2006 dargestellt. Berechnungsgrundlage waren die Ergebnisse der Gärversuche und die Trockenmasseerträge der Anbauversuche im Jahr 2006 (nach Böhmel, 2007).

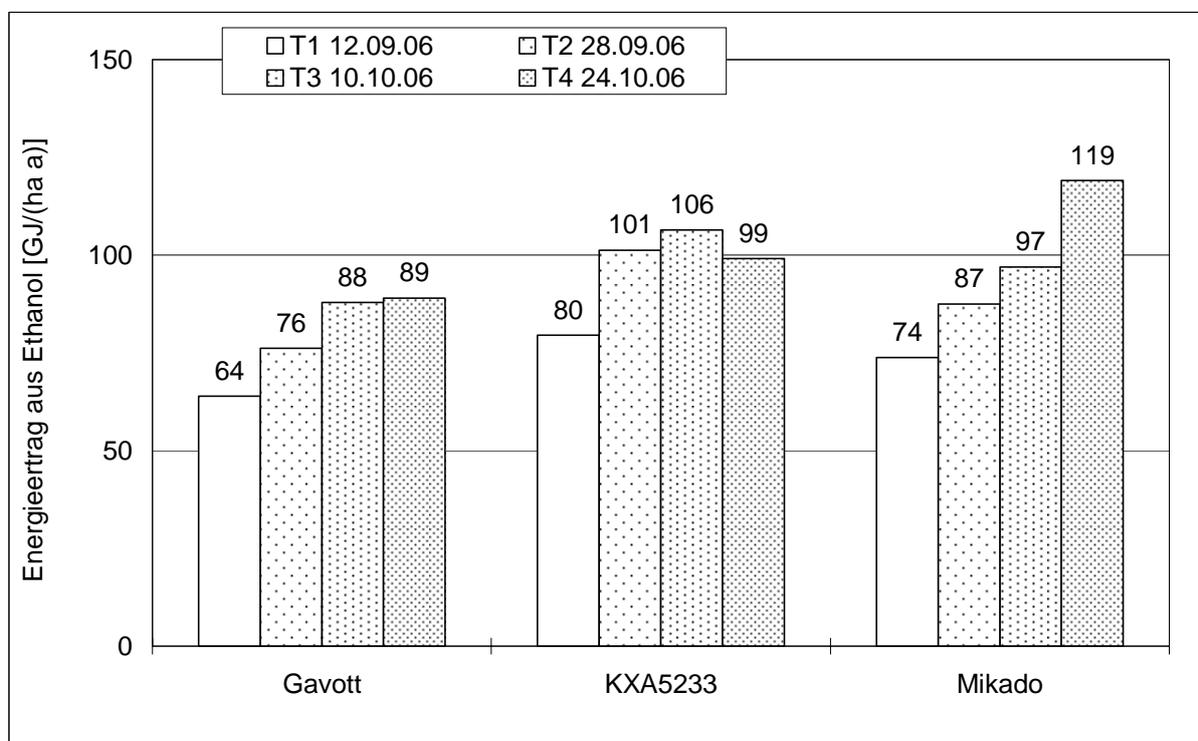


Abb. 5.2.4: Energieertrag aus Ethanol (GJ/(ha a)) der drei Maisganzpflanzen zu den vier Erntezeitpunkten 2006

Wie beim Vergleich der spezifischen Methanerträge mit den Methanhektarerträgen wird auch beim Vergleich der Ethanolausbeuten mit den Energieerträgen aus Ethanol pro Hektar ersichtlich, dass ein hoher Trockenmasseertrag einer Maissorte wie Mikado die vergleichsweise geringen Ethanolausbeuten pro Trockenmassegewicht mehr als ausgleicht. Mit 119 GJ/(ha a) Energieertrag aus Ethanol zur vierten Ernte erreicht Mikado 2006 den höchsten Energiehektarertrag. Die niedrigsten Erträge über den Konversionspfad Ethanol zwischen 64 GJ/(ha a) und 89 GJ/(ha a) erzielte 2006 Gavott. Von der ersten bis zur dritten Ernte zeigte KXA 5233 verglichen mit den beiden anderen Sorten die höchsten Energieerträge aus Ethanol zwischen 80 GJ/(ha a) und 106 GJ/(ha a), erst bei der vierten Ernte sank der Ertrag auf 99 GJ/(ha a) und damit unter den von Mikado. Im Vergleich dazu geben Schmitz (2003) Erträge von 3520 L A/(ha a) für Körnermais an, das entspricht etwa 82 GJ/(ha a).

Neben Mais und Rutenhirse wurden im Jahr 2005 auch Untersuchungen an frischer und siliierter Triticale sowie an siliertem Mais als Ganzpflanzen durchgeführt. Die zu fünf Zeitpunkten (Ährenschieben, Milchreife, Teigreife, Vollreife, Totreife) geerntete Triticale wurde, wie im Kapitel Material und Methoden beschrieben, konserviert und gelagert.

Abbildung 5.2.5 zeigt die Ethanolausbeuten der unsilierten Biomasseproben, bezogen auf das Trockenmassegewicht. Von der ersten Ernte mit 136 L A/Mg TS, über die zweite mit 179 L A/Mg TS bis zur dritten mit 223 L A/Mg TS stiegen die Ausbeuten der als Ganzpflanze untersuchten Proben. Bei der Ernte zur Voll- und Totreife wurden die Fraktionen Korn und Stroh getrennt auf ihre Ausbeuten untersucht. Insgesamt war die Ausbeute zur Vollreife mit 490 L A/Mg TS für Korn und 33 L A/Mg TS für Stroh am höchsten und sanken zur Totreife für die Gesamtpflanze mit 425 L A/Mg TS für Korn und 34 L A/Mg TS für Stroh wieder ab.

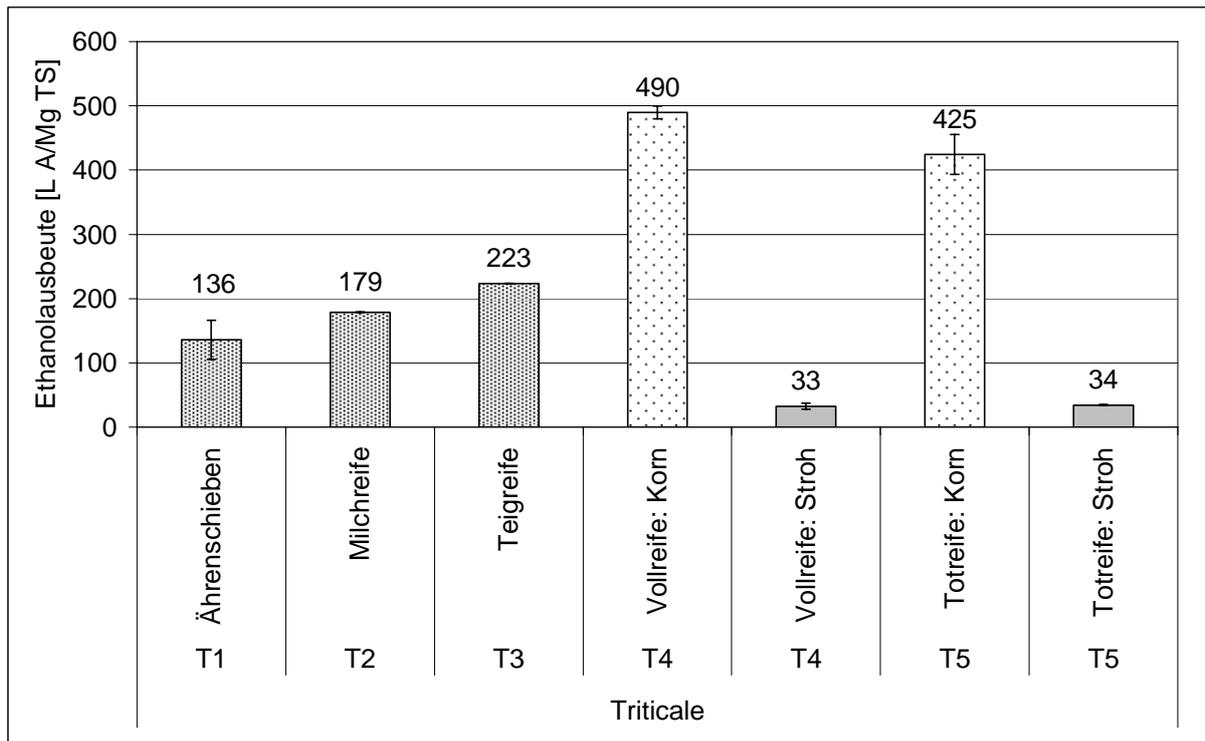


Abb. 5.2.5: Ethanolausbeute (L A/Mg TS) von Triticale (Ganzpflanze, Korn bzw. Stroh) (fünf Erntezeitpunkte) 2005

In Abbildung 5.2.6 sind die Ergebnisse der Untersuchungen an silierter Triticale und an Mais dargestellt.

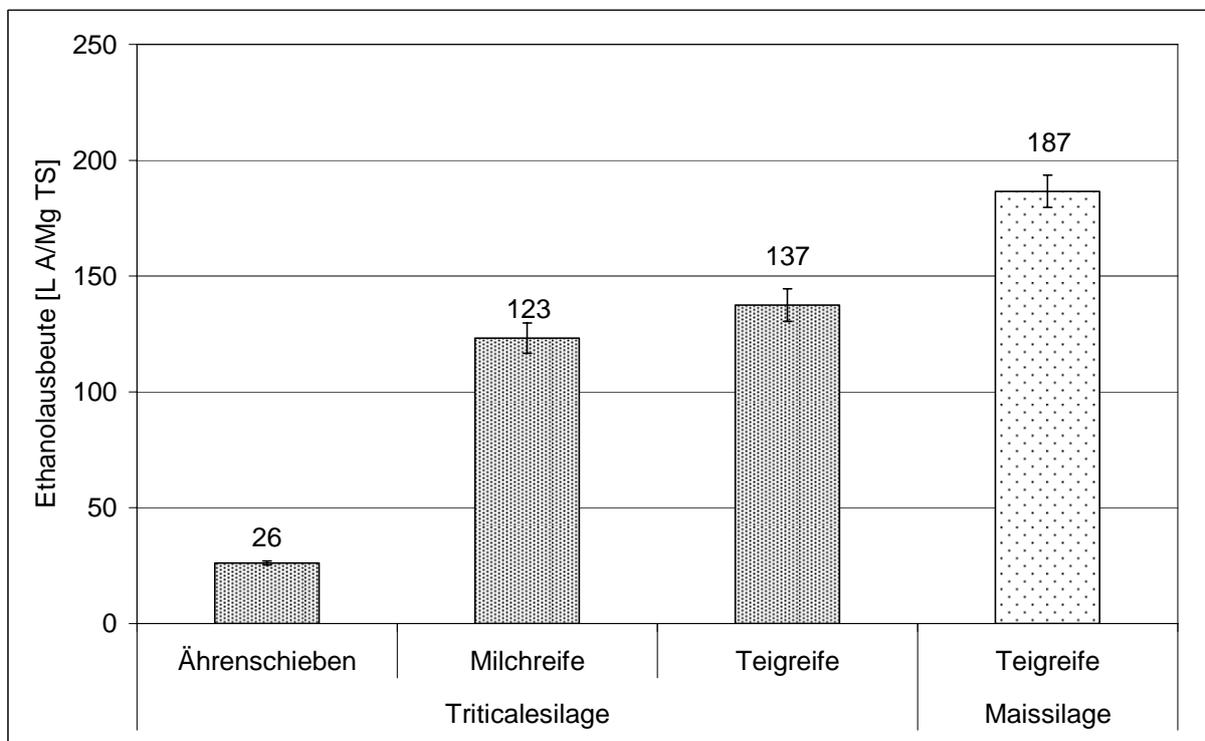


Abb. 5.2.6: Ethanolausbeute (L A/Mg TS) von Triticaleganzpflanzensilage (drei Erntezeitpunkte) und Maissilage 2005

Die silierten Biomasseproben zeigten deutlich niedrigere Ausbeuten, bezogen auf das Trockenmassegewicht. Der Trend zu steigenden Ausbeuten mit steigender Reife war aber auch hier mit 26 L A/Mg TS bei Ährenschieben, 123 L A/Mg TS bei Milchreife und 137 L A/Mg TS bei Teigreife zu beobachten. Die Ausbeute von Maissilage als teigreifes Material lag mit 187 L A/Mg TS über der der Triticalesilagen.

Zum Schluss sollen nun die Ethanolausbeuten pro Trockenmassegewicht der Zwischenfrüchte Grünroggen, Welsches Weidelgras und Winterrübsen in Abb. 5.2.7 dargestellt werden.

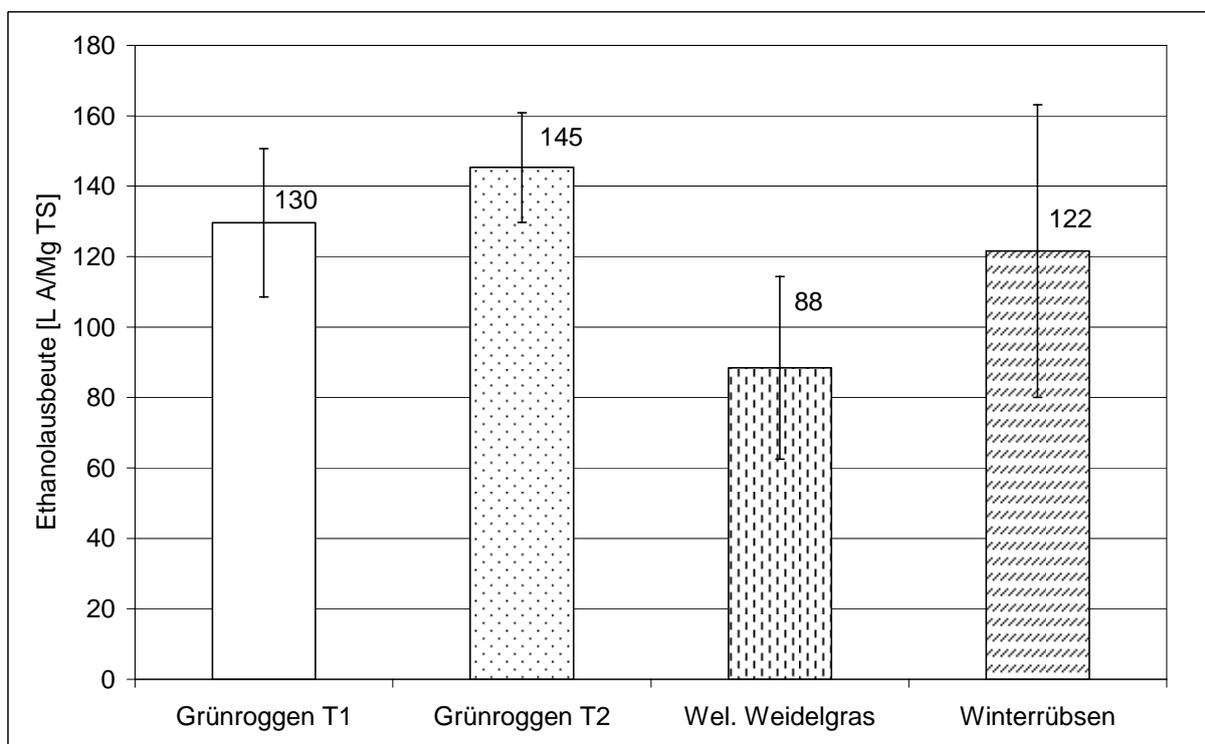


Abb. 5.2.7: Ethanolausbeute (L A/Mg TS) Grünroggen (zwei Ernten), Welsches Weidelgras und Winterrübsen 2006

Die Ausbeuten betragen zur Ernte 2006 zwischen 130 L A/Mg TS und 145 L A/Mg TS für den Grünroggen, 88 L A/Mg TS für das Welsche Weidelgras und 122 L A/Mg TS für die Winterrübsen.

### 5.3 Energie- und Ökobilanzierung

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Energiebilanz der acht Szenarien in den Tabellen 5.3.1 und 5.3.2 dargestellt. Anhand der Abbildungen 5.3.1 bis 5.3.3 werden die Resultate der Berechnungen näher erläutert. Die Grenze hinsichtlich des Energiebedarfs zwischen Biomasseanbau und -konversion in Biogas bzw. Ethanol wurde am Lager bzw. Silo am Hof gesetzt, d.h. der Energiebedarf der Prozesse wurde entsprechend bis zum Biomasselager dem Anbau und alle folgenden Prozesse den Konversionsanlagen zugeschlagen.

Tab. 5.3.1: Energiebilanz der Szenarien 1 bis 4

Szenario	1	2	3	4
<b>Biomasse</b>	<b>Mais</b>	<b>Mais</b>	<b>Mais</b>	<b>1/3 Mais</b>
<b>Biomasse</b>				<b>2/3 Triticale</b>
<b>Rückführung</b>		<b>Gärrest</b>	<b>Gärrest</b>	<b>Gärrest</b>
<b>Aufbereitung der Biomasse</b>			<b>Steam Ex</b>	
<b>Erzeugung von</b>	<b>Biogas</b>	<b>Biogas</b>	<b>Biogas</b>	<b>Biogas</b>
<b>Erzeugung von</b>				<b>Ethanol</b>
<b>Input (GJ/ha a)</b>				
Anbau Triticale				4,57
Anbau Mais	8,95	6,18	6,18	2,06
Biogas-/Ethanolanlage	25,29	25,29	134,82	36,88
<b>Summe Energie-Input</b>	<b>34,23</b>	<b>31,47</b>	<b>141,00</b>	<b>43,51</b>
<b>Output (GJ/ha a)</b>				
Ethanol				57,46
Elektr. Energie	93,82	93,82	99,56	53,07
Therm. Energie	111,69	111,69	125,76	64,76
<b>Summe Energie-Output</b>	<b>205,51</b>	<b>205,51</b>	<b>225,32</b>	<b>175,29</b>
<b>Energiegewinn (GJ/ha a)</b>	<b>171,28</b>	<b>174,05</b>	<b>84,32</b>	<b>131,78</b>
(Energie-Output - Energie-Input)				
<b>Energiegewinn : Energie-Input</b>	<b>5,00</b>	<b>5,53</b>	<b>0,60</b>	<b>3,03</b>
<b>Energie-Output : Energie-Input</b>	<b>6,00</b>	<b>6,53</b>	<b>1,60</b>	<b>4,03</b>

Tab. 5.3.2: Energiebilanz der Szenarien 5 bis 8

<b>Szenario</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
<b>Biomasse</b>	<b>Mais</b>			
<b>Biomasse</b>		<b>Triticale</b>	<b>Triticale</b>	<b>Triticale</b>
<b>Rückführung</b>	<b>Gärrest</b>		<b>Gärrest</b>	<b>Gärrest</b>
<b>Aufbereitung der Biomasse</b>				<b>Steam Ex</b>
<b>Erzeugung von</b>	<b>Biogas</b>	<b>Biogas</b>	<b>Biogas</b>	<b>Biogas</b>
<b>Erzeugung von</b>	<b>Ethanol</b>			
<b>Input (GJ/ha a)</b>				
Anbau Triticale		9,21	6,86	6,86
Anbau Mais	6,18			
Biogas-/Ethanolanlage	148,08	29,15	29,15	106,49
<b>Summe Energie-Input</b>	<b>154,26</b>	<b>38,36</b>	<b>36,00</b>	<b>113,35</b>
<b>Output (GJ/ha a)</b>				
Ethanol	91,50			
Elektr. Energie	58,60	63,89	63,89	67,75
Therm. Energie	74,03	80,71	80,71	85,58
<b>Summe Energie-Output</b>	<b>224,13</b>	<b>144,60</b>	<b>144,60</b>	<b>153,34</b>
<b>Energiegewinn (GJ/ha a)</b>	<b>69,87</b>	<b>106,25</b>	<b>108,60</b>	<b>39,99</b>
(Energie-Output - Energie-Input)				
<b>Energiegewinn : Energie-Input</b>	<b>0,45</b>	<b>2,77</b>	<b>3,02</b>	<b>0,35</b>
<b>Energie-Output : Energie-Input</b>	<b>1,45</b>	<b>3,77</b>	<b>4,02</b>	<b>1,35</b>

Die Abbildungen 5.3.1 und 5.3.2 zeigen den Energie-Input bzw. -Output in GJ pro Hektar und Jahr unter Variation der Biomasseart, der Biomassevorbehandlung, der Konversionsart (Biogas bzw. Ethanol) und der Gärrestrückführung als Düngemittelsubstitut. Da das gesamte Biogas in das BHKW eingespeist wird, ist die daraus resultierende thermische und elektrische Energie als Output angegeben.

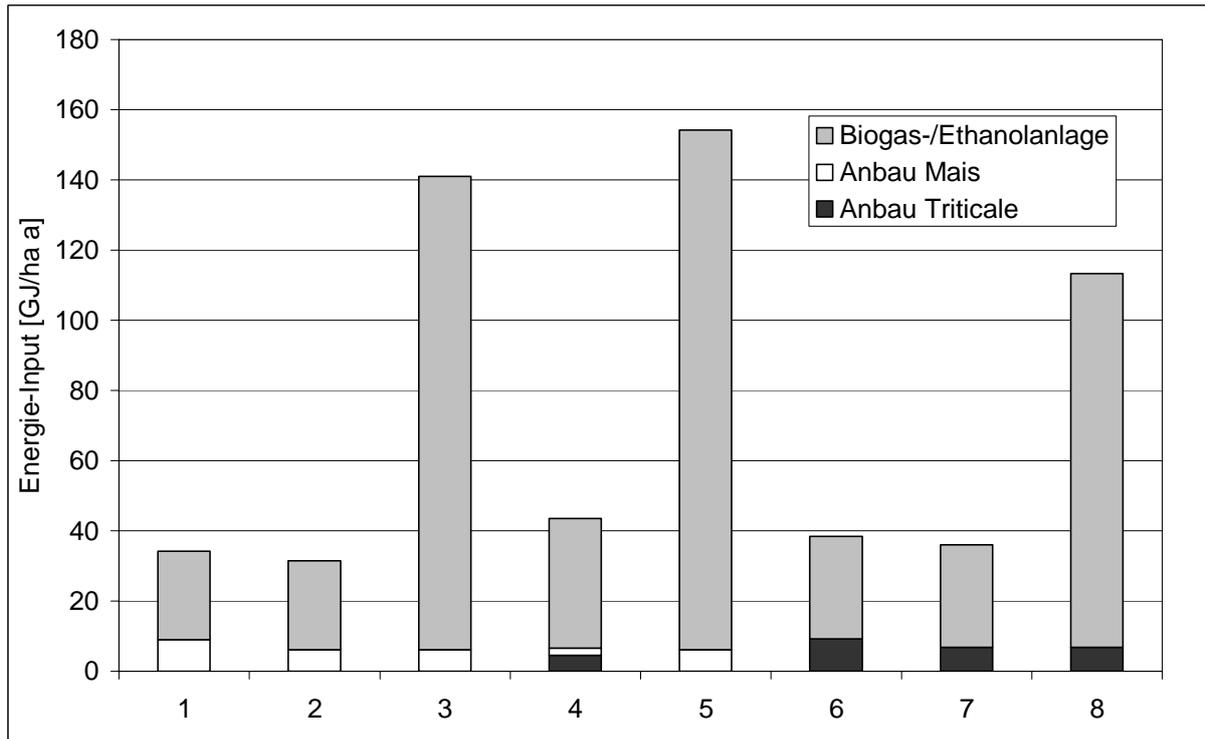


Abb. 5.3.1: Energie-Input ( $\text{GJ ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ ) der acht Szenarien

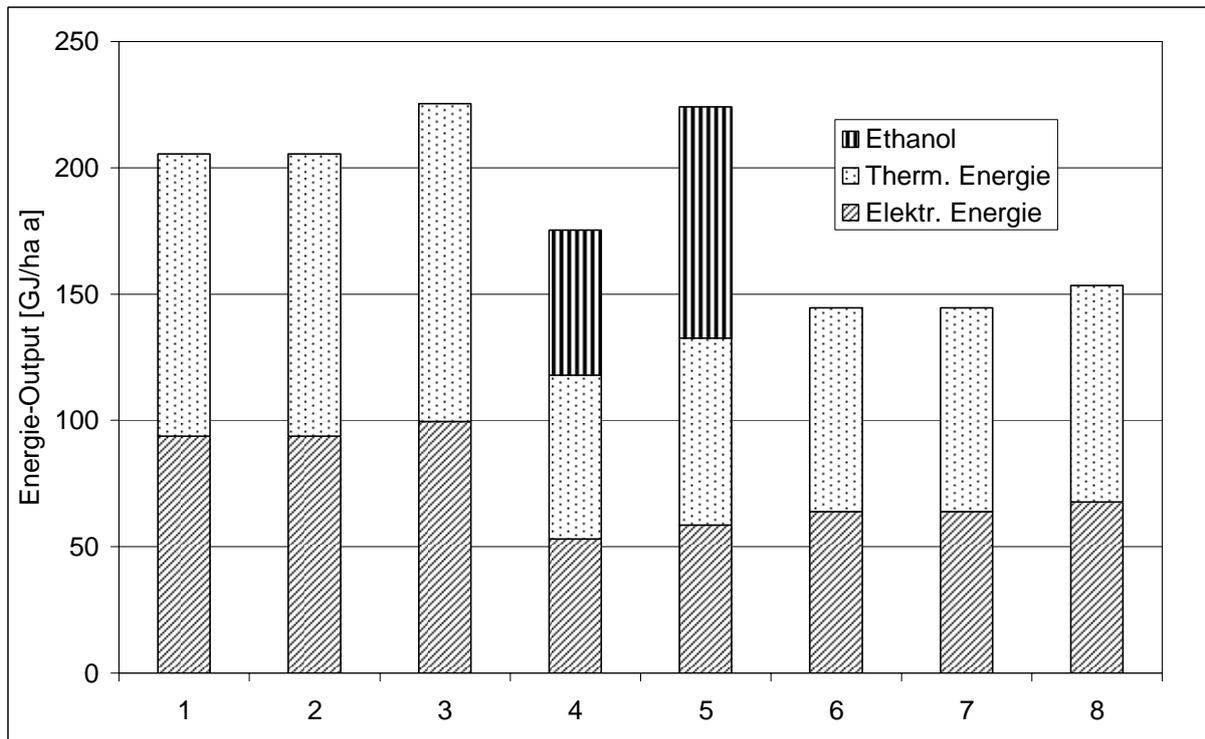


Abb. 5.3.2: Energie-Output ( $\text{GJ ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ ) der acht Szenarien

Der Energie-Output von Szenario 4 teilt sich in etwa zu je einem Drittel in Ethanol mit 57, elektrische mit 53 und thermische Energie mit rund 65 GJ/ha a auf. In Szenario 5 übersteigt der Energie-Output über Biogas aus der Schlempe mit ca. 59 elektrischer und 74 thermischer Energie den aus dem Ethanol mit 91, 5 GJ/ha a.

In Abbildung 5.3.3 ist das Verhältnis von Energie-Output zu Energie-Input für jedes der acht Szenarien dargestellt. Den höchsten Wert mit 6,5 erreicht Szenario zwei, in dem Mais zu Biogas umgewandelt wurde und die Gärreste auf die landwirtschaftlichen Flächen zurückgeführt wurden. Der zweithöchste Wert wird mit 6,0 bei Szenario eins erzielt, das sich nur durch die Nichtverwendung der Gärreste von Szenario zwei unterscheidet. Szenario vier, sechs und sieben liegen mit 4,0, 3,8 und 4,0 auf einem Niveau. Die Szenarien mit Biomassevorbehandlung mittels Steam Explosion erbrachten mit Abstand die niedrigsten Output-Input-Verhältnisse, da für die Biomasseaufbereitung sehr viel Energie benötigt wurde.

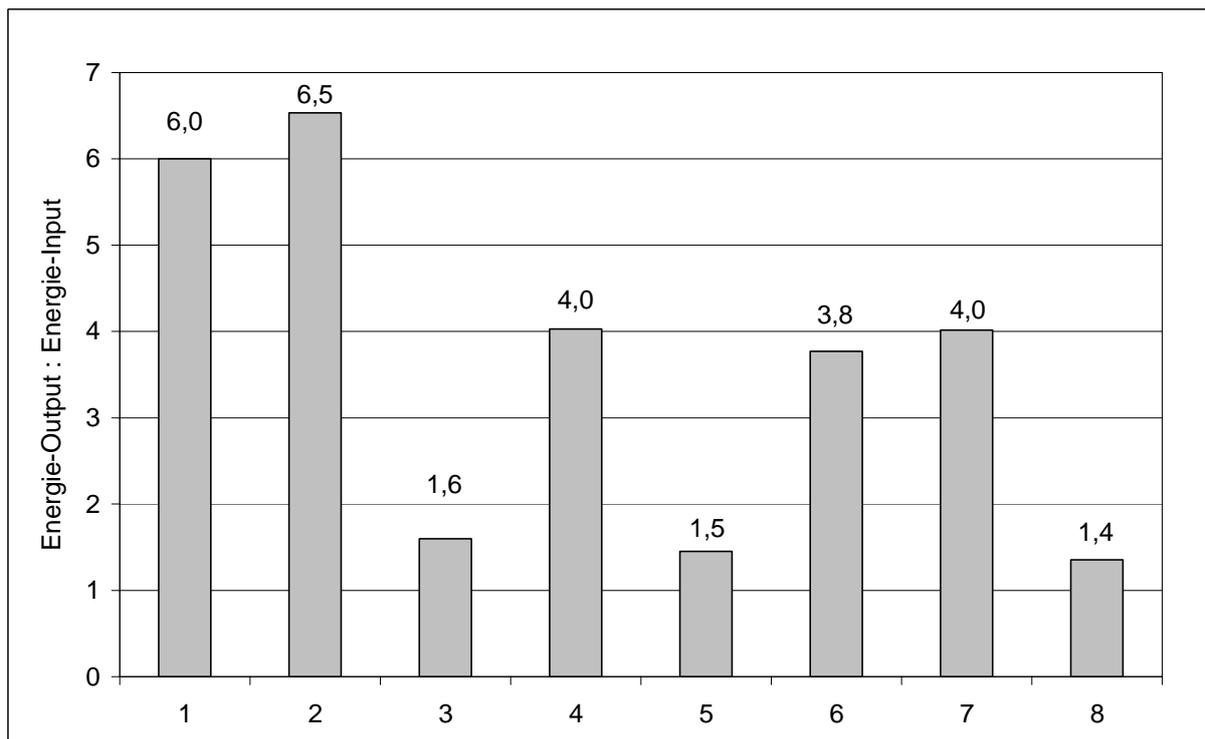


Abb. 5.3.3: Verhältnis Energie-Output zu Energie-Input der acht Szenarien

Im Folgenden sollen die acht Szenarien kurz hinsichtlich ausgewählter Umweltwirkungen (ausgedrückt in den entsprechenden Äquivalenten) betrachtet werden. In Tabelle 5.3.3 sind das Treibhauspotenzial (GWP 100 Jahre) in kg CO<sub>2</sub>-Äqv., das Versauerungspotenzial (AP) in kg SO<sub>2</sub>-Äqv. und das

Eutrophierungspotenzial (EP) in kg Phosphat-Äqv. nach CML 2001, bezogen auf einen Hektar und ein Jahr, der acht Szenarien aufgeführt. Mit Ausnahme von Szenario 5, bei dem keine autarke Versorgung mit thermischer und elektrischer Energie gegeben war und deshalb keine thermische oder elektrische Energie gutgeschrieben werden konnte, werden in allen anderen Szenarien die Emissionen gemindert. Durch die thermische Energie und die elektrische Energie aus dem Biogas-BHKW abzüglich des Eigenbedarfs wurde „Thermische Energie aus Erdgas“ und „Strommix Deutschland“ substituiert. Diese mit Emissionsdaten hinterlegten Standardprozesse werden durch die Software GaBi zur Verfügung gestellt.

Bei der Bewertung der Daten des Eutrophierungspotenzials ist zu beachten, dass eventuell auftretende unterschiedliche Wirkungen der mineralischen Düngung gegenüber der Düngung mit Gärresten im Rahmen dieses Projekts nicht berücksichtigt werden konnten. Hierfür wären Praxisuntersuchungen und die Entwicklung komplexer Agrarmodelle angeraten, die die Emissionen abhängig von einer Vielzahl von Faktoren wie z.B. Pflanzenart, Bodenart, Hangneigung, Temperatur, Niederschlag, Windgeschwindigkeit, Zeitpunkt und Technik der Düngerausbringung errechnen.

Tab. 5.3.3: CML2001, Treibhauspotenzial (GWP 100 Jahre) [kg CO<sub>2</sub>-Äqv.], CML2001, Versauerungspotenzial (AP) [kg SO<sub>2</sub>-Äqv.], CML2001, Eutrophierungspotenzial (EP) [kg Phosphat-Äqv.] der acht Szenarien

1	2	3	4	5	6	7	8
CML2001, Treibhauspotenzial (GWP 100 Jahre) [kg CO <sub>2</sub> -Äqv./ha a]							
-23105,2	-23227,1	-19521,2	-11209,9	1361,4	-14673,8	-14771,5	-11926,8
CML2001, Versauerungspotenzial (AP) [kg SO <sub>2</sub> -Äqv./ha a]							
-39,7	-40,5	-36,1	-19,3	8,7	-26,6	-27,2	-23,8
CML2001, Eutrophierungspotenzial (EP) [kg Phosphat-Äqv./ha a]							
-2,7	-2,9	-2,4	-1,2	1,5	-2,0	-2,1	-1,7

Die Abbildungen 5.3.4 bis 5.3.6 veranschaulichen die Daten aus Tabelle 5.3.3 und zeigen ebenfalls das Treibhauspotenzial (GWP 100 Jahre), das Versauerungspotenzial (AP) und das Eutrophierungspotenzial (EP) nach CML2001 der acht Szenarien.

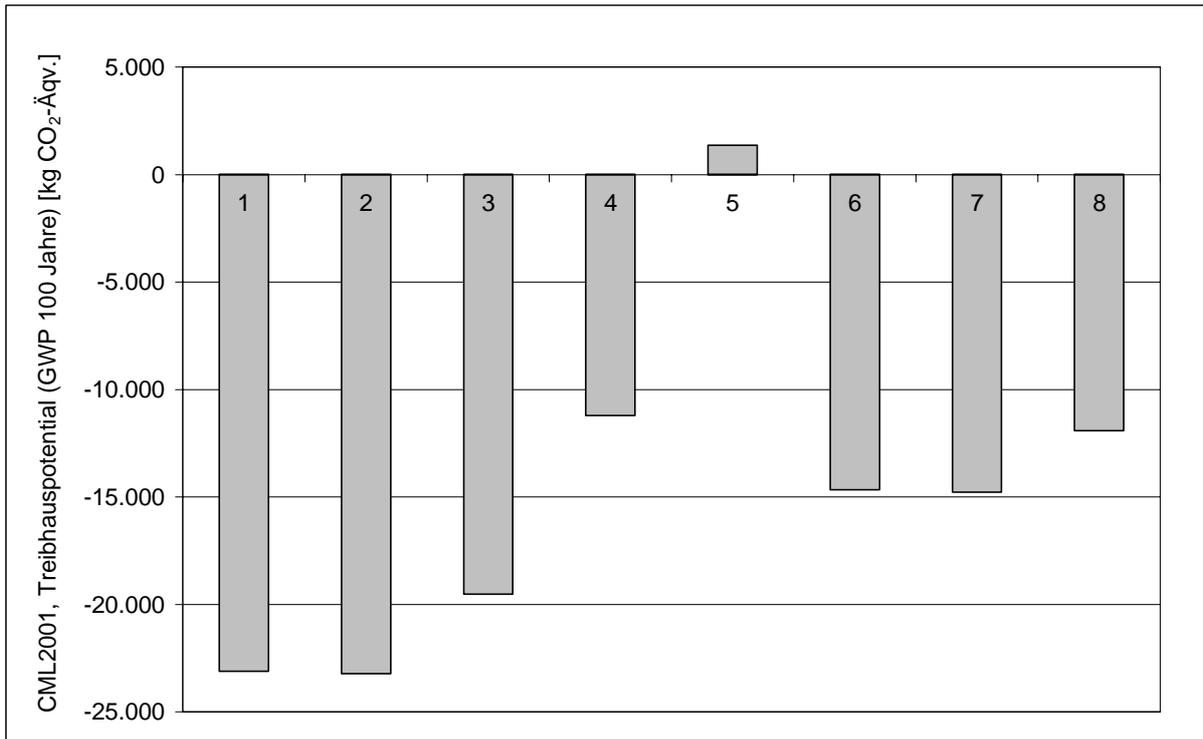


Abb. 5.3.4: CML2001, Treibhauspotential (GWP 100 Jahre) [kg CO<sub>2</sub>-Äqv.] der acht Szenarien

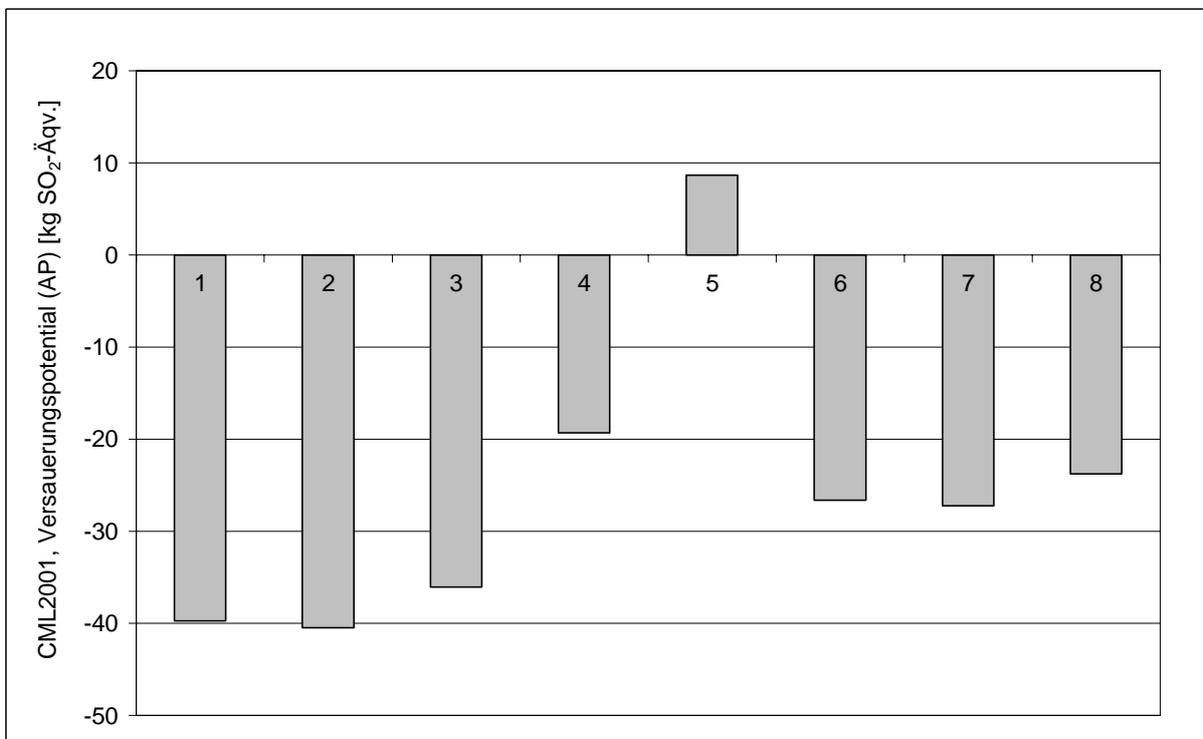


Abb. 5.3.5: CML2001, Versauerungspotential (AP) [kg SO<sub>2</sub>-Äqv.] der acht Szenarien

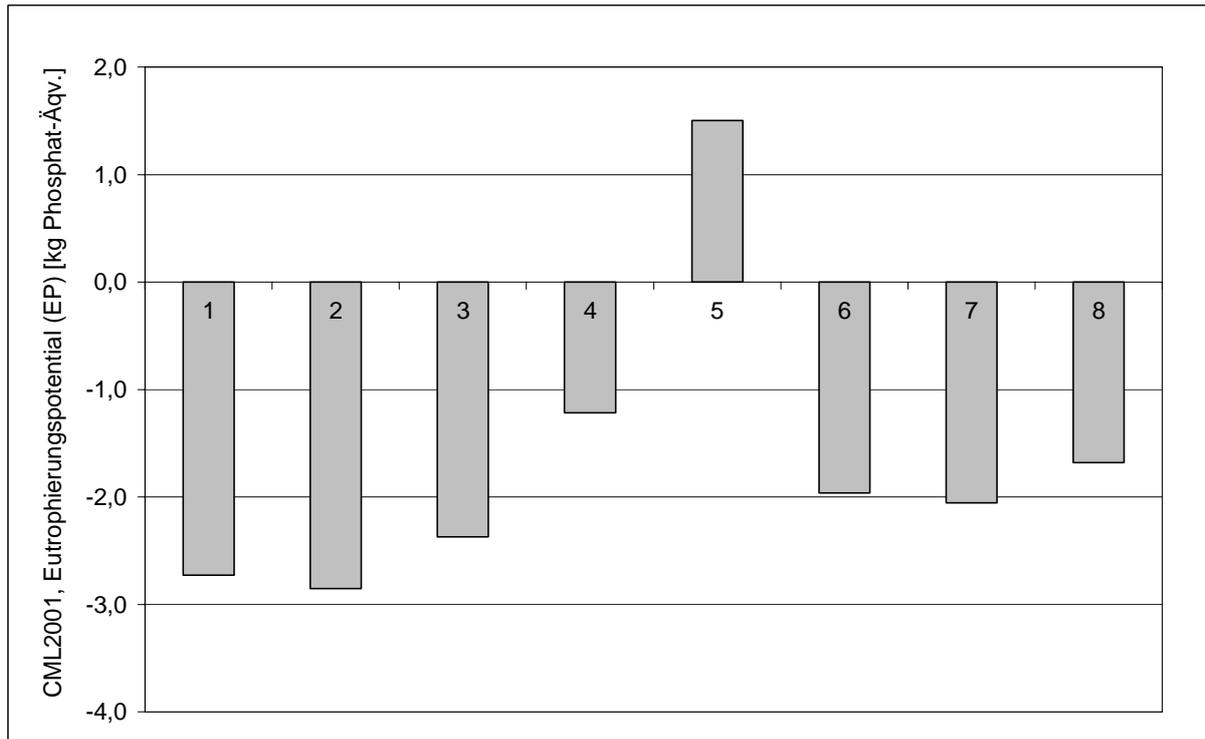


Abb. 5.3.6: CML2001, Eutrophierungspotenzial (EP) [kg Phosphat-Äqv.] der acht Szenarien

Die Szenarien 4 und 5 verfügen noch über weitere Potenziale der Emissionsminderung, da das hier gewonnene Ethanol keinem bestimmten Verwendungszweck zugeordnet wurde und damit keine Gutschriften für beispielsweise substituiertes Benzin erfolgten. So könnte in Szenario 4 Benzin durch Ethanol in Höhe von 57 und in Szenario 5 in Höhe von 91,5 GJ/(ha a) substituiert werden. In der „GaBi 4 Lean Version“ steht nur ein Standardprozess der Dieselherstellung mit seinen Umweltwirkungen, aber nicht zur Benzinherstellung zur Verfügung, deshalb waren keine weiteren Berechnungen der Emissionsminderung möglich.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass aufgrund der geringeren Trockenmasse- und damit Energieerträge pro Hektar der Triticale auch die Emissionsminderungspotenziale verglichen mit dem Mais geringer sind.

## 6 Diskussion und Folgerungen

### 6.1 Biogasgewinnung

#### 6.1.1 Aufbereitungsuntersuchungen für Biogas

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Weender-van Soest-Analyse, der Fettsäureuntersuchungen in den Fermentern und der Biogasvergärungsversuche mit vorbehandeltem Mais und vorbehandelter Triticale (teigreif, vollreif) diskutiert.

##### ***Weender / van Soest Analytik***

Anhand der Weender-van Soest-Analytik konnte festgestellt werden, dass sich durch die Vorbehandlung mit der Steam Explosion der als organischer Rest ausgewiesene Anteil der Biomasse grundsätzlich erhöhte. Dagegen verringerte sich der Anteil der neutralen Detergentien-Fasern (NDF). Innerhalb der NDF reduzierte sich hauptsächlich der Anteil der Hemicellulose.

Die Änderung des Anteils der ADF (Cellulose und Lignin) beim Vergleich „unbehandelt“ mit „exploded“ lässt eine Abhängigkeit vom Reifestadium und von der Art der Biomasse vermuten, da er sich beim Triticalestroh verringerte, bei der teigreifen Triticale leicht erhöhte und beim Mais nahezu konstant blieb.

Mit Ausnahme des Triticalestrohs, bei dem sich der bei der Weender-van Soest-Analyse als Lignin ausgewiesene Anteil von „unbehandelt“ zu „steam exploded“ erniedrigte, erhöhte sich der Ligninanteil bei Mais und Triticale von „frisch“ bzw. „siliert“ zu „steam exploded“.

Die silierten Varianten wiesen grundsätzlich einen niedrigeren organischen Rest als die dazugehörigen frischen auf. Dies kann mit dem Abbau von Zuckern durch Mikroorganismen während des Silierprozesses erklärt werden.

##### ***Fettsäurebestimmung des Fermenterinhalt***

Wie bereits in den vorangegangenen Kapiteln erläutert, können aus der Menge und der Art der flüchtigen Fettsäuren Schlüsse auf die Aktivitäten verschiedener Gruppen von Mikroorganismen in der Abbaukette zu Biogas gezogen werden.

Lemmer und Preißler (2007) geben für Praxisfermenter mit stabilem Gärverlauf eine Gesamtkonzentration der Säuren von unter 3500 ppm und ein Verhältnis von 2:1 von Essig- zu Propionsäure an. Lemmer und Preißler (2007) empfehlen vor allem eine Analyse der Säuren in der Startphase von Gärprozessen, bei der Erhöhung der Substratzufuhr und bei Anlagen mit wenig oder keinem Gülleeinsatz, der im Allgemeinen einen stabilisierenden Effekt hat.

Bei der Vergärung von siliertem Mais mit Steam-Explosion-Vorbehandlung lag im Batchversuch vom zweiten bis zum fünften Tag die Gesamtkonzentration über 4000 Essigsäureäquivalent und bei unsiliertem Mais mit Steam Explosion am zweiten und dritten über 3500 Essigsäureäquivalent. Die Gesamtkonzentration von 3500 Essigsäureäquivalent wurde bei den unbehandelten Varianten zu keinem Messzeitpunkt überschritten.

Während der Vergärung von Triticale, unabhängig vom Reifestadium, traten keine Gesamtkonzentrationen von über 3500 Essigsäureäquivalent auf. Die Säurekonzentrationen der Varianten mit Steam-Explosion-Behandlung lagen aber auch hier deutlich über denen ohne Voraufschluss.

Daraus lässt sich ableiten, dass bei Biogasanlagen unter Praxisbedingungen mit großen Fermentervolumen (im Durchflussbetrieb) die Dosierung stark aufbereiteter Materials niedriger zu wählen ist und öfter erfolgen sollte als bei unaufbereiteter Biomasse. So lassen sich ggf. Hemmungen oder Überlastungen der biologischen Prozesse vermeiden.

### ***Methangehalt im Biogas***

Der Verlauf des Methangehalts im Biogas war abhängig von der Art und Reife der Biomasse sowie der Vorbehandlung. Die größten Änderungen des Methan- und damit Kohlendioxidgehalts traten bei der Vorbehandlung mit Steam Explosion auf, und am deutlichsten war dieser Effekt beim Triticalestroh zu beobachten. Eine Erklärung dieses Phänomens könnte ein beschleunigter Ablauf der Hydrolysestufe und damit einhergehend eine schnelle und hohe Produktion an Kohlendioxid sein, da die Verfügbarkeit und Menge der anaerob leicht abbaubaren Stoffe für die Mikroorganismen erhöht wurde.

### **Spezifischer Methanertrag**

Durch Aufbereitung von Biomasse mit dem Steam-Explosion-Verfahren lässt sich die Methanbildung, abhängig von der Art der Biomasse und dem Reifestadium, unterschiedlich stark beschleunigen und erhöhen.

Triticale frisch als Ganzpflanze erbrachte bei den hier vorliegenden 30-l-Batch-Versuchen einen spezifischen Methanertrag von 284 NI Methan/kg oTS. Durch die Vorbehandlung mit Steam Explosion ließ sich der spezifische Methanertrag nach 42 Tagen um 18 % bei siliertem Material und um 34 % beim frischen steigern. Beim Mais war bei der gleichen Aufbereitung maximal eine Erhöhung um 7 % bzw. 11 % zu erzielen. Aus der Tierernährung ist bekannt, dass der Futterwert von Grüngetreidesilage unter dem von Maissilage liegt (Jeroch et al., 1993), d.h. Mais ist an sich leichter verdaulich als Grüngetreide. Kochen und Mikrowellenbehandlung zeigten überwiegend negative Wirkung auf den Methanertrag der Biomassen (Mais und Triticale).

Amon (2006 b) erzielte mit frischer Triticaleganzpflanze ebenfalls 269 NI Methan/kg oTS. Von den Vorbehandlungsmöglichkeiten, die Amon testete, war allein die Dampfbehandlung bei frischer Triticale mit 4 % Steigerung als positiv auf die Methanbildung zu bewerten.

Aus vorangegangenen Untersuchungen ist bekannt, dass das Getreidekorn vor der Zugabe zum Fermenter gemahlen oder gequetscht werden muss, um einen Gasertragsverlust durch Kurzschlussströme von nicht abgebautem Material zu vermeiden. Anhand der durchgeführten Batch-Versuche mittels Hohenheimer Biogasertragstest (HBT) und 30-Liter-Fermentern bei einer Verweilzeit von fünf bis sechs Wochen war es für die Höhe des spezifischen Methanertrags des Triticalekorns unerheblich, ob eine grobe oder feine bzw. trockene oder feuchte Vorbehandlung des Getreidekorns vorlag.

Im Gegensatz zum Korn waren bei unterschiedlich aufbereitetem Stroh größere Unterschiede in den spezifischen Methanerträgen zu beobachten. Grundsätzlich war mit zunehmender Intensität des Aufschlusses ein höherer spezifischer Methanertrag zu verzeichnen. Der Aufschluss mit Steam Explosion wies bis zum Versuchsende deutlich höhere Erträge als die Vergleichsvarianten auf. Bei gehäckseltem und gemahlenem Material nivellierte sich dagegen der anfängliche Unterschied im Laufe der Vergärungszeit.

Die Steigerung des organischen Rests bei gleichzeitiger Senkung des Anteils an Hemizellulose, die höheren Konzentrationen flüchtiger Fettsäuren in den Fermentern und die höheren spezifischen Methanerträge der Varianten mit Steam-Explosion-Aufschluss legen den Schluss nahe, dass die Verfügbarkeit der anaerob leicht biologisch abbaubaren Stoffe durch die Vorbehandlung gegenüber den Vergleichsvarianten erhöht wurde.

Ursächlich für den Anstieg des Methanertrags könnte der Aufbruch von anaerob kaum abbaubaren Ligninverbindungen und damit verbunden die Freilegung der darin enthaltenen gut abbaubaren Zellulosen sein.

Ein Erklärungsansatz für den sehr niedrigen Ertrag der frischen Triticale könnte sein, dass hier, anders als bei dem zum Silieren verdichteten Material, die Stängelröhrchen beim Eintrag in den Fermenter weitgehend unversehrt waren. Dadurch blieb das anaerob nicht abbaubare Rohlignin, hier speziell das hydrophobe makromolekulare Cutin, erhalten. Es besteht aus Hydroxyfettsäuren, Fettsäureestern sowie Phenolen und umschließt als Cuticula die Epidermis der Sprossorgane höherer Pflanzen. Auf dem Cutin befindet sich zusätzlich noch eine wasserabweisende Wachsschicht (Schopfer und Brennicke, 2006).

Im Folgenden sollen kurz die Pro- und Contra-Argumente der Aufbereitung von Biomasse mit Steam Explosion für die Biogasgewinnung zusammengefasst werden.

#### ***Pro – Vorbehandlung mit Steam Explosion***

- Bei Triticale und Mais beschleunigter Trockensubstanzabbau zu Biogas
- Der spezifische Methanertrag wurde erhöht (bezogen auf eine Vergärung bis zu 35 bzw. 42 Tagen), abhängig von Pflanzenart und Reifestadium
- Schwimmschichten reduziert

#### ***Contra – Vorbehandlung mit Steam Explosion***

- Kein positiver Effekt bei leicht vergärbare Biomasse (z.B. Triticalekorn)
- Zusätzliche Investitionskosten
- Zusätzlicher Energieaufwand, der aber ggf. vollständig aus der Abwärme des BHKWs gedeckt werden kann
- Verdünnungseffekt durch Wasserzugabe

- Einfluss auf die Prozessstabilität, durch möglicherweise entstehende unerwünschte Nebenprodukte, bleibt zu untersuchen, gerade bei Mono-Vergärung oder geringer Pufferkapazität im Fermenter

Die durch Zubr (1989) festgestellten großen Effekte bei einer einfachen mechanischen Verringerung der Häcksellänge von 30 mm auf 0 bis 2 bzw. 0,2 bis 0,5 bei Weizen- und Roggenstroh mit Steigerungen der Biogaserträge von 65 bzw. 53 % bei einer Vergärungsdauer von 30 Tagen bei einer Temperatur von 30 °C konnten nicht bestätigt werden.

Ein direkter Vergleich mit Triticalestroh gestaltet sich auch schwierig, da bei den Untersuchungen im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Verweildauer höher, die Temperatur höher und die maximale Häcksellänge geringer war als bei den Untersuchungen Zubrs. Des Weiteren sind die niedrigen Gaserträge von 210 bzw. 247 l Gas/kg TS der Ausgangsvarianten bei Zubr (1989) zu beachten, die möglicherweise auf Schwimmschichten in den Laborreaktoren zurückzuführen sind, da im Versuchsaufbau keine Rührereinheit erwähnt wird.

### **6.1.2 Biogas-/Methanerträge von Energiepflanzen und deren Schlempen**

Die in den Gärtests erzielten spezifischen Methanerträge verschiedener Maissorten zu vier Ernteterminen in den Jahren 2004 bis 2006 in der Höhe von 0,307 bis 0,370 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg oTS lagen auf dem Niveau der Mittelwerte der spezifischen Methanerträge von Maissilagen aus Laboruntersuchungen der KTBL-Arbeitsgruppe „Biogaserträge“ (KTBL, 2005). Eine große Spannbreite von 0,245 bis 0,431 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg oTS, wie Kaiser sie für Maissilagen angibt, war anhand der hier untersuchten Maissorten nicht zu bestätigen. Ein Grund für die teilweise sehr hohen spezifischen Methanerträge gerade von Silagen aus früh geerntetem Material könnte die Vernachlässigung der Gärsäuren (Milch- und flüchtige Fettsäuren) bei der Bestimmung des organischen Trockensubstanzgehalts sein, wodurch es zu einer Überschätzung des spezifischen Methanertrags kommen kann.

In den hier vorliegenden Untersuchungen wurden die spezifischen Methanerträge aus dem frischen (durch Trocknung konservierten) Material ermittelt, um einen Einfluss über möglicherweise unterschiedliche Gärungsverläufe bei der Silierung auszuschließen. Da in dem frisch geernteten getrockneten Material keine Gärsäuren

vorhanden waren, war auch keine Korrektur derselben bei der Bestimmung des organischen Trockensubstanzgehalts notwendig. So wurde die Möglichkeit des Vergleichs der Maissorten zu den vier Erntezeitpunkten sehr erleichtert.

Die Hektarenergieerträge aus Mais über den Konversionspfad Methangärung unterlagen in den Jahren 2004 bis 2006 starken Änderungen. So konnten 2004 und 2005 Werte über 200 GJ/(ha a) und teilweise bis 433 GJ/(ha a) erzielt werden, während im Jahr 2006 die Hektarenergieerträge der untersuchten Sorten mit 123 bis 172 GJ/(ha a) deutlich darunter lagen.

Abgesehen vom ersten Erntetermin des Jahres 2004 mit 0,83 waren die Trockenmasseerträge mit den Hektarenergieerträgen zwischen 0,90 und 0,99 sehr stark korreliert.

Als Ergebnis lässt sich festhalten:

- Die spezifischen Methanerträge in  $\text{Nm}^3 \text{CH}_4/\text{kg oTS}$  variierten je nach Sorte unterschiedlich stark über die Erntezeitpunkte.
- Die Sorten mit niedrigeren Reifezahlen erbrachten bei früher Ernte die höheren spezifischen Methanerträge.
- Die Unterschiede der Trockenmasseerträge zwischen den Sorten waren deutlich höher als Unterschiede in den spezifischen Methanerträgen.
- Empfehlenswert sind standortgerechte Sorten mit hohem Trockenmasseertrag bei gleichzeitig guter Silierbarkeit.

Bei den Fruchtfolgeversuchen zeigten sich sehr geringe Unterschiede in den spezifischen Methanerträgen der Zwischenfrüchte wie Welschem Weidelgras, Grünroggen und Winterrübsen zu unterschiedlichen Ernteterminen. Dagegen waren die Trockenmasseerträge und damit die Methanhektarerträge abhängig von der Saat-/Erntestrategie doch recht unterschiedlich. Als (energie-)ertragreichste Fruchtfolge erwies sich 2004/2005 Grünroggen-Mais-Weizen, bei späterer Ernte des Grünroggens und kürzerer Wachstumsperiode für den Mais im Vergleich zu der zweiten Anbaustrategie.

Es ist zu erwarten, dass die vorliegenden Ergebnisse durch das unter der Federführung der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft 2005 begonnene deutschlandweite Projekt „Entwicklung und Vergleich von optimierten Anbausystemen für die landwirtschaftliche Produktion von Energiepflanzen unter den

verschiedenen Standortbedingungen Deutschlands“ grundsätzlich bestätigt werden. Wobei natürlich regionale Unterschiede sowohl in den Fruchtfolgen als auch in den Trockenmasseerträgen zu beachten sind.

Die Versuche mit unterschiedlichen Stickstoffdüngeneiveaus ließen keine Unterschiede in den spezifischen Methanerträgen im Jahr 2005 erkennen, wohl aber in den Trockenmasseerträgen und damit in den Hektarenergieerträgen. Mais erwies sich gegenüber der Rutenhirse als deutlich überlegen, bezüglich des Methanhektarertrags.

Die höchsten spezifischen Methanerträge wurden für das Rapskorn mit bis zu  $0,626 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4/\text{kg oTS}$  gemessen. Aufgrund des noch vollständig vorhandenen Ölanteils liegt der Wert über dem in der Literatur für Rapspresskuchen angegebenen von  $0,489 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4/\text{kg oTS}$  (KTBL, 2005). Da die Trockenmasseerträge aber verhältnismäßig gering sind, ist in der Praxis die Konversion von Rapskorn zu Biogas sicher nicht angeraten. Die spezifischen Methanerträge von Rapsstroh waren mit  $0,169$  und  $0,208 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4/\text{kg oTS}$  noch geringer als die von Getreidestroh.

Die spezifischen Methanerträge der Maisschlempe lagen mit  $0,299$  bis  $0,323 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4/\text{kg oTS}$  etwas unter den Angaben von Bauer et al. (2007), und die der Rutenhirse lagen mit  $0,282$  bis  $0,300 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4/\text{kg oTS}$  noch darunter.

### **6.1.3 Korrelation Inhaltsstoffe / gemessene Methanerträge**

Anhand der mittels NIRS bestimmten Inhaltsstoffe neutrale Detergentien-Faser (NDF), Stärke (XS), Zucker (XZ) und Rohprotein (XP) sowie der substrattypischen Faktoren wurden spezifische Methanerträge für Maisproben errechnet und mit den gemessenen aus den Untersuchungen im Hohenheimer Biogasertragstest verglichen.

Sowohl der Mittelwert als auch der Median der prozentualen Unterschiede zwischen den errechneten Werten und den gemessenen spezifischen Methanerträgen über die neun Maissorten bei vier Erntezeitpunkten 2004 und je drei Feldwiederholungen lag bei 3 %. Der Minimalwert der errechneten spezifischen Methanerträge betrug 90,8 % und der Maximalwert 117,6 % der gemessenen spezifischen Methanerträge.

Für die Unterschiede können verschiedene Gründe angeführt werden. Zum einen sind die maximal zulässigen Abweichungen zwischen zwei Messwiederholungen für

die Silomaisganzpflanzenuntersuchung bei NIRS nach Degenhardt (1996) (Tab. 6.1.3.1) verhältnismäßig weit gefasst.

Tab. 6.1.3.1: Wiederholbarkeit der NIRS-Inhaltsstoffbestimmung; Auszug (Degenhardt, 1996)

<b>Merkmal</b>	<b>Einheit</b>	<b>Wiederholbarkeit</b>
Stärke	% TM	2,1
Rohprotein	% TM	0,4
Rohfaser	% TM	1,4

Bei Proteinanteilen von teilweise unter 6 % TM in den Maisganzpflanzen 2004 entsprechen 0,4 % TM bezogen auf den Proteinanteil bis zu 7 % Unterschied innerhalb dieses Inhaltsstoffs. Ähnliches gilt für die Stärke, mit teilweise nur 20 % TM wirken sich zulässige Abweichungen zwischen zwei Messwiederholungen von 2,1 % TM bezogen auf den Stärkeanteil mit bis zu 10 % aus. Bei NIRS-Bestimmungen von Mais aus den Jahren 2004 und 2005 im Rahmen dieses Projekts traten bei Stärke häufig Unterschiede zwischen den Doppelbestimmungen von über 1 % auf.

Ein weiterer Grund für die Abweichungen zwischen den gemessenen und den errechneten Methanerträgen könnte in dem nach NIRS nicht bestimmten Rest, der bei den vorliegenden Untersuchungen 8 bis 15 % betrug, zu suchen sein. Der Rest dürfte zum Teil aus anorganischen Stoffen (Rohasche) und zum anderen aus organischen Stoffen bestehen. Bei Messungen zur Bestimmung des organischen und des Trockensubstanzgehalts waren Aschegehalte von etwa 5 % TM bei den Maisganzpflanzen zu verzeichnen. Ein nicht unwesentliches, aber bisher nicht in der Silomais-Kalibration (VDLUFA, 2002) bei NIRS enthaltenes Merkmal ist das Rohfett. In der Kalibration für Maissilage (VDLUFA, 2001) ist das Rohfett bereits als Merkmal enthalten. Es wäre wünschenswert, wenn das Rohfett auch in die Silomais-Kalibration aufgenommen werden könnte, um eine genauere Abschätzung des Methanertrags anhand der NIRS-Bestimmung zu ermöglichen.

Die Kalibration für Maissilage konnte für die vorliegenden Untersuchungen nicht verwendet werden, da es sich um frisch getrocknete Maisproben handelte und der Probenumfang zu groß für Silierversuche war. Außerdem sollten mögliche Effekte aufgrund unterschiedlicher Silierverläufe und Unsicherheiten durch die notwendige Korrektur des oTS um flüchtige Stoffe, die durch die Silierung verstärkt gebildet werden, vermieden werden.

Ein dritter Grund für die Abweichungen zwischen den gemessenen und den errechneten Methanerträgen könnte darin liegen, dass Lignin bei den NIRS-Bestimmungen nicht explizit ausgewiesen wurde, sondern nur in den sauren Detergentien-Fasern (ADF) und in den neutralen Detergentien-Fasern (NDF) enthalten war. Nach KWS ist bei typischem Silomais ein Ligninanteil von etwa 3 % der TM zu erwarten (KWS, o.J.). Dieser Anteil kann je nach Maissorte und Erntezeitpunkt variieren. Aus der Forschung im Bereich der Tierernährung speziell der Verdaulichkeit bei Wiederkäuern ist bekannt, dass Lignin nicht verdaut bzw. nur unter bestimmten Bedingungen geringfügig enzymatisch angegriffen wird (Kirchgeßner, 2004).

Dagegen können Wiederkäuer in ihren Pansen die anderen Gerüstbaustoffe Cellulose und Hemicellulose enzymatisch über Pyruvat zu Propion-, Essig- und Buttersäure umwandeln. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Abbauprozesse bei der methanogenen Vergärung von Biomasse in Biogasfermentern sehr ähnlich ablaufen, d.h. dass das Lignin selbst kaum anaerob abbaubar ist und ggf. durch die von Pflanzen gebildeten Lignocellulosekomplexe auch die Degradation von Cellulose und Hemicellulose beeinträchtigt.

Abschließend bleibt festzuhalten, dass einerseits Einschränkungen bei der NIRS-Bestimmung zu beachten sind. Genannt seien hier die relativ weit gefasste Wiederholbarkeit der Doppelbestimmungen der Inhaltsstoffe, der nicht bestimmte Rest und die bisher in der Silomaiskalibration undifferenzierte Ausweisung von Faserstoffen mit unterschiedlicher anaerober Abbaubarkeit bzw. das Fehlen des Fettanteils. Auf der anderen Seite ist darauf hinzuweisen, dass auch bei den Untersuchungen mit dem Hohenheimer Biogasertragstest (HBT) Abweichungen des spezifischen Methanertrags bei der Vergärung von Standardsubstraten von maximal +/- 3 % toleriert werden. Eine andere Vorgehensweise ist aufgrund der Verwendung eines komplexen Impfmediums und des biologischen Abbauprozesses derzeit nicht darstellbar.

## 6.2 Bioethanolvergewinnung

Ziel der Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit war die Gewinnung einer Datenbasis für die Potenziale der Ethanolausbeuten ausgewählter Ganzpflanzen (unter Voraufschluss der Biomasse in schwach saurem Milieu bei 120 °C im Autoklaven über 60 Minuten).

### ***Stickstoffdüngung bei Rutenhirse und Mais als Ganzpflanzen***

Die Ethanolausbeuten pro Trockenmassegewicht in den Jahren 2004 und 2005 von Rutenhirse lagen unter denen von Mais. Die höchsten Ausbeuten wurden für Rutenhirse im Jahr 2004 mit der niedrigsten Düngestufe und im Jahr 2005 mit der mittleren erzielt. Beim Mais wurden die höchsten Ausbeuten 2004 mit der mittleren Düngestufe und 2005 mit der höchsten realisiert. Es konnte somit kein eindeutiger Trend zwischen Düngehöhe und Ethanolertrag festgestellt werden. Natürlich lagen die Ethanolausbeuten für Mais als Ganzpflanze unter den Angaben zu durchschnittlichen Ausbeuten der Fraktion Maiskorn von Senn (2001 a) und Misselhorn (2004).

Für die Gesamtbetrachtung sind die Ethanolerträge pro Hektar (die Kombination aus Trockenmasseertrag und Ethanolausbeute pro Trockenmassegewicht) entscheidend. Doch auch hier sank 2004 der Trockenmasseertrag mit Erhöhung der Düngergabe, während er 2005 stieg, d.h. es lag keine Korrelation der Größen vor.

Es kann daraus geschlossen werden, dass weitere Einflussfaktoren die Wirkung der Stickstoffdüngung sowohl auf die Ethanolausbeuten pro Trockenmassegewicht als auch auf die Ethanolhektarerträge überwogen.

### ***Triticale***

Das vollreife Triticalekorn erreicht mit einer Ethanolausbeute von 39,8 L A/100 Kg FM ein Niveau, wie Senn (2001 a) es für Triticale und Misselhorn (2004) allgemein für Getreide mit 35 bis 39 L A/100 Kg FM angeben. Mit totreifem Triticalekorn wurde eine Ausbeute von 36,0 L A/100 Kg FM erzielt.

Mit einer Ausbeute von etwa 3,3 bzw. 3,4 L A/100 Kg TM bei der Vergärung von vollreifem bzw. totreifem Getreidestroh sind die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchungen deutlich niedriger als die der speziell auf Stroh ausgerichteten NREL- bzw. Arkenol-Verfahren mit 17,5 und 21,5 L A/100 Kg TM, die mit

Totalhydrolyse mit schwacher bzw. starker Säure arbeiten. Die Ausbeuten für das NREL- und das Arkenol-Verfahren wurden nach den Angaben von Igelspacher (2006) über Massenbilanzen von Lignocellulose-Input und die entsprechende Ethanolausbeute auf Strohtrockenmasse mit einem Rohfaseranteil von 42,9 % in Weizenstroh nach Kirchgeßner (2004) umgerechnet.

### ***Maisganzpflanze – Erntezeitpunkt***

Auch bei diesen Untersuchungen waren die Ethanolausbeuten für Mais als Ganzpflanze deutlich niedriger als die durchschnittlichen Ausbeuten der Fraktion Maiskorn mit mehr als 40 L A/100 Kg FM nach Senn (2001 a) bzw. 38 bis 40 L A/100 Kg FM nach Misselhorn (2004). Ethanolausbeuten von minimal 24,2 und maximal 29,1 L A/100 Kg TM für die Maissorten Gavott, KXA 5233 und Mikado als Ganzpflanzen konnten 2006 realisiert werden.

Die Angabe von Prechtel et al. (2005 b) einer um ca. 30 % höheren Ethanolausbeute aus Mais als Ganzpflanze nach Voraufschluss verglichen mit der Ausbeute aus Korn lässt sich aufgrund fehlender Angaben zum Masseverhältnis von Korn und Restpflanze schwer diskutieren.

Öhgren et al. (2007 b) errechnete basierend auf dem Zuckergehalt des Rohmaterials für vorbehandelte Maisrestpflanzen einen Umsatz zu Ethanol von 80,2 %. Die hier untersuchten Maisproben als Ganzpflanzen erzielten dagegen im Durchschnitt über die drei Sorten und vier Erntetermine einen Umsatz der säurelöslichen Zucker zu Ethanol von 91,6 %.

### ***Zwischenfrüchte – Grünroggen, Welsches Weidelgras und Winterrüben***

Die Ethanolerträge 2006 zwischen 130 L A/Mg TS und 145 L A/Mg TS von Grünroggen entsprachen in etwa denen der Triticale zum Ährenschieben (unsiliert) bzw. der Rutenhirse. Die Erträge von Winterrüben fielen mit 122 L A/Mg TS etwas niedriger aus und die des Welschen Weidelgrases mit 88 L A/Mg TS deutlich, wobei die Standardabweichung zwischen den Wiederholungsuntersuchungen verhältnismäßig hoch war.

### **6.3 Energie- und Ökobilanzierung**

Das höchste Output-Input-Verhältnis der hier betrachteten Szenarien bezogen auf die Energie pro Hektar wurde von Szenario zwei erzielt, bei dem Mais zu Biogas umgewandelt und die Gärreste als Substitut für mineralische Düngemittel eingesetzt wurden. In diesem Szenario wird kein Ethanol gewonnen.

Die Produktion des hochwertigen flüssigen Kraftstoffs Ethanol, das sehr einfach Otto-Kraftstoffen beigemischt werden kann, verlangt einen höheren Energieeinsatz als die Biogasherstellung. Zu beachten ist, dass zurzeit die Ethanolgewinnung aus Maisganzpflanzen einen wesentlich höheren Energieeinsatz kostet als die Verwendung von stärkereichem Triticalekorn.

Die Aufbereitung der Biomasse mittels Steam Explosion erhöht zwar den Biogasertrag, aufgrund des hohen Energieeinsatzes fällt aber der Energiegewinn deutlich niedriger aus als bei den Vergleichsszenarien. Auf der anderen Seite wird für diese Art der Aufbereitung hauptsächlich thermische Energie benötigt, die zurzeit bei der Biogasverbrennung im BHKW entsteht, oft aber nicht anderweitig sinnvoll genutzt werden kann.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Da die fossilen Ressourcen endlich sind, ist eine Option für die Zukunft den Energiebedarf verstärkt aus erneuerbaren Energiequellen zu decken. Eine Möglichkeit ist die Biomassenutzung, die durch eine Vielzahl von Kombinationen aus unterschiedlichen Biomassearten, Nutzungspfaden und Konversionstechniken flexibel an die natürlichen lokalen bzw. regionalen Gegebenheiten sowie die anthropogenen Bedürfnisse angepasst werden kann. Um die begrenzten landwirtschaftlichen Flächen möglichst effizient zur Bioenergieträgerbereitstellung nutzen zu können, werden aktuelle und belastbare Daten zu den spezifischen Energieerträgen und den Hektarenergieerträgen von Energiepflanzen benötigt.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, diese Daten für die Bereiche Biogas und Bioethanol bereitzustellen. Dazu wurden anhand von Untersuchungen in Laborfermentern im Batch-Betrieb spezifische Biogas- bzw. Bioethanolerträge ermittelt. Zusätzlich stand die Erprobung von verschiedenen Aufbereitungsverfahren für Energiepflanzen und deren Einfluss auf die Biogasertragshöhe und auf den Verlauf der Methanbildung im Fokus dieser Arbeit.

Eine Energie- und Ökobilanz für Silomais und reife Triticale stellt die Konversionspfade Biogas- und Bioethanolgewinnung vergleichend gegenüber. Dabei wurde auch das Steam-Explosion-Verfahren zur Aufbereitung von Biomasse berücksichtigt.

### ***Aufbereitung von Energiepflanzen***

Die Aufbereitung von Biomasse mit dem Steam-Explosion-Verfahren beschleunigt die Methanbildung und steigert sie zum Teil. Die Effekte sind, abhängig von der Art der Biomasse und dem Reifestadium, unterschiedlich stark. Weitere Aufbereitungsverfahren wie Mikrowellenbehandlung und Kochen zeigten meist keine signifikante Änderung oder teilweise negative Wirkung. Eine Variation der Versuchsparameter könnte aber ggf. interessant sein.

Den positiven Wirkungen des Steam-Explosion-Verfahrens stehen aber auch Argumente wie die zusätzlichen Investitionskosten und der Verdünnungseffekt durch die Wasserzugabe bzw. die Erhöhung des Massenstroms entgegen. Der zusätzliche Energiebedarf, der hauptsächlich in thermischer Energie besteht, kann aus der Abwärme des BHKW gedeckt werden.

Forschungsbedarf besteht weiterhin beim Screening und der Produktion technischer Enzyme zum effizienten Voraufschluss lignozellulosehaltiger Rohstoffe sowie bei der Kombination biologischer (enzymatisch), chemischer, thermischer oder mechanischer Aufschlussverfahren unter Berücksichtigung der Energieeffizienz.

### ***Methanerträge von Energiepflanzen und Schlempen***

Anhand der Biogasuntersuchungen eines breiten Spektrums an Maissorten konnte festgestellt werden, dass die spezifischen Methanerträge je nach Sorte unterschiedlich stark über die Erntezeitpunkte variierten, wobei die Sorten mit niedrigerer Reifezahl höhere spezifische Methanerträge erreichten. Der dominierende Faktor für den Energiehektarertrag war aber der Trockenmasseertrag und nicht der spezifische Methanertrag. Allgemein empfehlenswert sind standortgerechte Sorten mit hohem Trockenmasseertrag bei gleichzeitig guter Silierfähigkeit zum optimalen Erntezeitpunkt. Die Zwischenfrüchte trugen nur zum Teil zur deutlichen Erhöhung der Methanhektarerträge bei. Aus Gründen des Bodenschutzes ist der Anbau aber zu empfehlen.

Die Stickstoffdüngung beeinflusst die Trockenmasseerträge und damit die Energiehektarerträge meist positiv. Mit Mais konnten deutlich höhere Energiehektarerträge als mit Rutenhirse erzielt werden.

Durch die Nutzung der Schlempen aus der Ethanolproduktion aus Maisganzpflanzen oder aus Triticalekorn sowie durch die Nutzung der Nebenprodukte wie Stroh in der Biogasgewinnung kann der Energieoutput pro Hektar mindestens verdoppelt werden verglichen mit der „reinen“ Ethanolproduktion.

Weitere Optimierungsmöglichkeiten für die Biogasgewinnung unter Praxisbedingungen liegen im substratangepassten Aufbau der Fermentersysteme sowie im Einsatz mehrphasiger Verfahren sowie der Entwicklung schneller Analyseverfahren zur besseren Prozesssteuerung.

### ***Korrelation Inhaltsstoffe / gemessene Methanerträge***

Die anhand der über NIRS bestimmten Inhaltsstoffe neutrale Detergentien-Faser (NDF), Stärke (XS), Zucker (XZ) und Rohprotein (XP) sowie der substrattypischen Faktoren errechneten spezifischen Methanerträge für Maisproben zu den vier Erntezeitpunkten lagen sehr nah an den tatsächlich gemessenen Methanerträgen.

Eine Korrelation zwischen den gemessenen und errechneten Werten lag aber nicht vor.

Ob eine andere Inhaltsstoffanalysetechnik und die Bestimmung weiterer Einzelbestandteile die Biogasertragstests zur Potenzialabschätzung gerade von neuen Sorten ersetzen können, sollte Gegenstand weiterer Untersuchungen sein.

### ***Bioethanolausbeuten***

Die Energieausbeuten über den Konversionspfad Bioethanol liegen ohne die Nutzung der Nebenprodukte Schlempe oder Stroh deutlich unter denen des Konversionspfads Biogas, da nur Stoffe, die verzuckert werden können, in Ethanol umgesetzt werden können. Der Vorteil der Ethanolproduktion liegt in dem flüssigen Kraftstoff, der gewonnen wird. Durch die Kombination mit einer Biogasanlage können auch die Nebenprodukte energetisch genutzt werden und liefern einen gasförmigen Energieträger.

Im Bioethanolbereich liegen sicher noch hohe bioverfahrenstechnische Optimierungspotenziale z.B. die Züchtung geeigneter Mikroorganismen zum Abbau lignozellulosehaltiger Rohstoffe sowie von C5-Zucker-Verwertern. Des Weiteren sind Prozessoptimierungen bei Wasser- und Energieeinsatz anzustreben.

### ***Energie- und Ökobilanzierung***

Sowohl Biogas als auch Bioethanol, letzteres bei optimaler Kombination mit Biogas, sind nach den hier untersuchten Szenarien unter den erläuterten Rahmenbedingungen dazu geeignet, den Einsatz nicht regenerativer Energieträger und damit Emissionen zu senken. Eine Aufgabe für die Zukunft wird es sein, differenzierte standortgerechte Nutzungskonzepte zu entwickeln auf der Basis einer Entscheidung, in welchem Maß eine (Flüssig-)Kraftstofferzeugung oder eine stationäre Bereitstellung thermischer und elektrischer Energie aus Biomasse zu bevorzugen sind.

Ziel muss es sein, durch eine sinnvolle Kombination aus Biomasse, Nutzungspfad und Konversionstechnik, in Abhängigkeit von den lokalen und regionalen natürlichen Gegebenheiten sowie den anthropogenen Anforderungen, die land- und forstwirtschaftliche Fläche (als dem limitierten Faktor) höchst effizient zur Bioenergieträgerbereitstellung zu nutzen.

## 8 Literaturverzeichnis

- Ahrer, K., 1980: Viel und gutes Gärfutter. 4., verb. Aufl., Stocker: Graz (u.a.), ISBN 3-7020-0314-2 (S. 22 u. 35)
- Amon, T., 2005: Gaserträge von Kofermenten in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. 2. Mitteldeutscher Bioenergetag „Biogas und Biogene Kraftstoffe“ auf der agra 2005, 29. April 2005, Leipzig
- Amon, T., V. Kryvoruchko, K. Hopfner-Sixt, B. Amon, V. Bodiroza, M. Ramusch, R. Hrbek, J. K. Friedel, W. Zollitsch und J. Boxberger, 2006 a: Biogaserzeugung aus Energiepflanzen. Teil 1: gem. Werkvertrag Nr. 439; Wien, 27.02.2006  
[http://www.nas.boku.ac.at/fileadmin/\\_/H93/H931/AmonPublikationen/Biogaserzeugung\\_aus\\_Energiepflanzen.pdf](http://www.nas.boku.ac.at/fileadmin/_/H93/H931/AmonPublikationen/Biogaserzeugung_aus_Energiepflanzen.pdf) (Stand: 15.10.2007)
- Amon, T. et al., 2006 b: Optimierung der Methanerzeugung aus Energiepflanzen mit dem Methanenergiesystem. Berichte aus Energie- und Umweltforschung 80/2006,  
[http://www.energiesystemederzukunft.at/edz\\_pdf/0680\\_methanerzeugung.pdf](http://www.energiesystemederzukunft.at/edz_pdf/0680_methanerzeugung.pdf) (Stand: 15.10.2007)
- Amon, T., 2007: Potential of Biogas Production from Sustainable Biorefinery Concepts, Vortragsfolien, 30.05.2007,  
[http://www.nas.boku.ac.at/uploads/media/Biorefinery\\_Concepts\\_Berlin.pdf](http://www.nas.boku.ac.at/uploads/media/Biorefinery_Concepts_Berlin.pdf) (Stand: 15.10.2007)
- Armstrong, A.P., J. Baro, J. Dartoy, A.P. Groves, J. Nikkonen and D.J. Rickeard, 2002: Energy and greenhouse gas balance of biofuels for Europe. An update. CONCAWE, report no. 2/02, Brussels 2002,  
[http://www.senternovem.nl/mmfiles/26601\\_tcm24-124161.pdf](http://www.senternovem.nl/mmfiles/26601_tcm24-124161.pdf) (Stand: 03.01.2008)
- Bachmaier, J., M. Effenberger und A. Gronauer, 2007a: Einflussfaktoren auf die Klimabilanz landwirtschaftlicher Biogasanlagen. Landtechnik 62, 06/2007 S. 412-413
- Bachmaier, J. und A. Gronauer, 2007b: Klimabilanz von Biogasstrom. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, LfL-Information, August 2007  
[http://www.lfl.bayern.de/publikationen/daten/informationen/p\\_27453.pdf](http://www.lfl.bayern.de/publikationen/daten/informationen/p_27453.pdf) (Stand: 14.01.2008)
- Baserga, U., 1998: Landwirtschaftliche Co-Vergärungs-Biogasanlagen. FAT Berichte Nr. 512, Tänikon
- Bauer, A., R. Hrbek, B. Amon, V. Kryvoruchko, V. Bodiroza, H. Wagentristl, W. Zollitsch, B. Liebmanne, M. Pfeffere, A. Friedle and T. Amon, 2007: Potential of biogas production in sustainable biorefinery concepts. Erstellt 21.07.2007, [http://www.nas.boku.ac.at/uploads/media/OD7.1\\_Berlin.pdf](http://www.nas.boku.ac.at/uploads/media/OD7.1_Berlin.pdf) (Stand: 15.10.2007)

- Behmel, U. und R. Meyer-Pittroff, 1998: Energy-related processing of organic wastes in agricultural biogas plants in combination with the effective use of fertilizers. In: N.N., 1998: 10th European Conference and Technology Exhibition Biomass for Energy and Industry. proceedings of the International Conference, Würzburg, Germany, 8 - 11 June 1998, Commission of the European Communities. C.A.R.M.E.N., Rimpar, Ed. by H. Kopetz, pp. 156-159
- BGW, DVGW [Auftrag.], Ramesohl, S., K. Arnold, M. Kaltschmitt, F. Scholwin, F. Hofmann, A. Plättner, M. Kalies, S. Lulies, G. Schröder, 2005: Analyse und Bewertung der Nutzungsmöglichkeiten von Biomasse. Untersuchung im Auftrag von BGW und DVGW, Band 1: Gesamtergebnisse und Schlussfolgerungen, Wuppertal Institut, [www.biogas.org/datenbank/file/notmember/fach/BGW\\_Biogas\\_Zus.pdf](http://www.biogas.org/datenbank/file/notmember/fach/BGW_Biogas_Zus.pdf) (Stand: 31.12.2007)
- BMU, 2006 a: EU-Aktionsplan-Biomasse. (Stand: Mai 2006) [http://www.erneuerbare-energien.de/files/erneuerbare\\_energien/downloads/application/pdf/eu\\_aktionsplan\\_biomasse.pdf](http://www.erneuerbare-energien.de/files/erneuerbare_energien/downloads/application/pdf/eu_aktionsplan_biomasse.pdf)
- BMU, 2006 b: Forschung für Erneuerbare Energien. (Stand: September 2006) <http://www.erneuerbare-energien.de/inhalt/37840>
- Böhmel, C., 2007: Comparative performance of annual and perennial energy cropping systems under different management regimes. Dissertation, Universität Hohenheim
- Boyle, W.C., 1976: Energy recovery from sanitary landfills – a review. In: Schlegel, H.G. und S. Barnea (Hrsg.): Microbial Energy Conversion: Oxford, Pergamon Press
- Braun, R., 1982: Biogas, Methangärung organischer Abfallstoffe: Grundlagen u. Anwendungsbeispiele. Wien, Springer-Verlag, Wien/New York. ISBN 3-211-81705-0, 0-387-81705-0
- Buswell, A. M. and H. F. Müller, 1952: Mechanism of methane fermentation. Ind. Eng. Chem. 44, pp. 550-552
- Chandler, J.-A., W.J. Jewell, J.M. Gosset, P.J. van Soest and J.B. Robertson, 1980: Predicting methane fermentation biodegradability. In: Biotechnology and Bioengineering, No. 10, pp. 93 – 107
- Czepuck, K., 2005: Gemessener Methanertrag von Reinsubstanzen bei der Biogasvergärung im Vergleich zur theoretischen Gasausbeute, Dipl.-Arbeit, unveröffentlicht
- Dachs, G. und W. Rehm, 2006: Der Eigenstromverbrauch von Biogasanlagen und Potenziale zu dessen Reduzierung. Solarenergieförderverein Bayern e. V. [Hrsg.], SeV-Studien 01, 11/2006, <http://www.sev-bayern.de>
- Daly, H. E. and J.C. Farley, 2004: Ecological economics: principles and applications. Washington, Island Press, 1-417-54379-5 (electronic bk.)

- De Carvalho Macedo, Isaias; Manoel Regis Lima Verde Leal; João Eduardo Azevedo Ramos da Silva, 2003: Greenhouse Gas (GHG) Emission in the Production and Use of Ethanol in Brazil: Present Situation (2002). [http://www.senternovem.nl/mmfiles/135550\\_tcm24-124345.pdf](http://www.senternovem.nl/mmfiles/135550_tcm24-124345.pdf) (Stand: 03.01.2008)
- Degenhardt, H., 1996: NIRS-Untersuchungen zur Erfassung futterwertrelevanter Qualitätsparameter von Silomaisorten in einem Gerätenetzwerk. Dissertation Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg. Landbau-forschung Völkenrode, Sh163. 147 S. ISSN 0376-0723. Nach VDLUFA, 2002
- DIN 38414-8, 1985-06: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung – Schlamm und Sedimente (Gruppe S) – Bestimmung des Faulverhaltens (S. 8), Berlin, Beuth Verlag GmbH
- Dreier, T., 1999: Ganzheitliche Bilanzierung von Grundstoffen und Halbzeugen. Teil V Biogene Kraftstoffe
- Eder, B. und H. Schulz, 2006: Biogas-Praxis: Grundlagen, Planung, Anlagenbau, Beispiele, Wirtschaftlichkeit. 3., vollständig überarb. u. erw. Aufl., Staufen bei Freiburg, Ökobuch, ISBN 3-936896-13-5; 978-3-936896-13-8
- Elsayed, M.A., R. Matthews und N.D. Mortimer, 2003: Carbon and energy balances for a range of biofuels options. Resources Research Unit, Sheffield, Hallam University. Project Number B/B6/00784/REP. <http://www.berr.gov.uk/files/file14925.pdf> (Stand: 03.01.2008)
- Eyerer, P. und K. Saur, 1996: Die Ganzheitliche Bilanzierung. Definition, Geschichte, Hintergründe. In: Eyerer, P., 1996: Ganzheitliche Bilanzierung. Werkzeug zum Planen und Wirtschaften in Kreisläufen. Springer-Verlag, Berlin. ISBN 3-540-59356-X
- Falbe, J. und M. Regitz [Hrsg.], 1998: Römpp-Lexikon Chemie. 10., völlig überarb. Aufl., Band 4, Thieme, Stuttgart, New York, ISBN 3-13-734910-9
- Fan, L.T., M.M. Gharpuray and Y.-H. Lee, 1987: Cellulose Hydrolysis. Springer Verlag: Berlin; Heidelberg (u.a.), ISBN 3-540-17671-3 ; 0-387-17671-3
- Fleischer, S. und T. Senn, 2007: Verbesserung der Energie-, Stoff- und Emissionsbilanzen bei der Bioethanolproduktion aus nachwachsenden Rohstoffen. Abschlussbericht August 2003 – Juni 2007, Entwurf Oktober 2007
- Florin, H., I. Pfeleiderer und Th. Volz, 1996: Software zur Ganzheitlichen Bilanzierung. In: Eyerer, P., 1996: Ganzheitliche Bilanzierung. Werkzeug zum Planen und Wirtschaften in Kreisläufen. Springer-Verlag, Berlin. ISBN 3-540-59356-X
- FNR, 2002: Innovative Verfahren zur Wärme- und Stromerzeugung aus Biomasse. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. [Hrsg.], Landwirtschaftsverl.: Münster, ISBN 3-7843-3171-8

- FNR, 2005: Ergebnisse des Biogasmessprogramms. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. [Hrsg.], Bundesforschungsanstalt (FAL), Gülzow, [www.tb.fal.de](http://www.tb.fal.de)
- FNR, o.J.: Leitfaden Bioenergie. Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen. Aktualisierung der Fassung von 2000, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. [Hrsg.], Gülzow, ISBN 3-00-015389-6
- Frisch, J., et al., 2004: Betriebsplanung Landwirtschaft 2004/2005, Daten für die Betriebsplanung in der Landwirtschaft, KTBL-Datensammlung, Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster, ISBN 3-7843-2178-X
- Fritsche, U. R., G. Dehoust, W. Jenseit, K. Hünecke, L. Rausch, D. Schüler, K. Wiegmann, A. Heinz, M. Hiebel, M. Ising, S. Kabasci, C. Unger, D. Thrän, N. Fröhlich, F. Scholwin, G. Reihardt, S. Gärtner, A. Patyk, F. Baur, U. Bemmann, B. Groß, M. Heib, C. Ziegler, M. Flake, M. Schmehl, 2004: Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse. Endbericht. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Forschungszentrum Jülich.
- Gärtner, S.O. und G.A. Reinhardt, 2003: Erweiterung der Treibhausgasbilanz für RME. Gutachten im Auftrag der Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e.V., Projekt Nr. 530/025, Ifeu, Heidelberg, Mai 2003. [http://www.co2star.eu/publications/ifeu\\_berichte/IFEU\\_Gutachten.pdf](http://www.co2star.eu/publications/ifeu_berichte/IFEU_Gutachten.pdf)
- General Motors; et al., 2002: Report. GM Well-to-Wheel Analysis of Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Advanced Fuel/Vehicle Systems – A European Study. [http://www.lbst.de/publications/studies\\_\\_d/2002/TheReport\\_Euro-WTW\\_27092002.pdf](http://www.lbst.de/publications/studies__d/2002/TheReport_Euro-WTW_27092002.pdf) (Stand: 03.01.2008)
- Gleixner, A. J., 2004: Brennerei und Biogas. Referat zur Infoveranstaltung „Bioethanol- und Energieerzeugung in mittelständischen landwirtschaftlichen Brennereien“, veranstaltet vom Verband Bayer. Landw. Brennereien e.G., München am 19.07.2004
- Grimm, H., 2007: Mündliche Mitteilungen, Universität Hohenheim, Fachgebiet Verfahrenstechnik der Tierhaltungssysteme, 06.11.2007
- Hartmann, J.K., 2006: Life-cycle-assessment of industrial scale biogas plants. Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen
- Heiss, R., 2004: Lebensmitteltechnologie. biotechnologische, chemische, mechanische und thermische Verfahren der Lebensmittelverarbeitung, Völlig überarb. 6. Aufl., Berlin; Heidelberg [u.a.]: Springer, ISBN 3-540-00476-9
- Helffrich, D. und H. Oechsner, 2003: Hohenheimer Biogasertragstest: Vergleich verschiedener Laborverfahren zur Vergärung von Biomasse. Agrartechnische Forschung 2003; 9 (1/3), S. 27-30.
- Helffrich, D., A. Lemmer, M. Morar, H. Oechsner und H. Steingäß: Hohenheimer Biogasertragstest (HBT). Patent-Nr. 10227685

- Herrmann, C., M. Heiermann, C. Idler und V. Scholz, 2007: Parameters influencing substrate quality and biogas yield. In: Maniatis, K. et al. (eds.) Proceedings, 15th European Biomass Conference & Exhibition "From Research to Market Deployment", 7.-11. Mai 2007, Berlin, Deutschland, pp. 809-819
- Hügler, T., 2007: Schriftliche Mitteilung, Fa. Biomasseverwertung, 26.09.2007
- Igelspacher, R., 2006: Methode zur integrierten Bewertung von Prozessketten am Beispiel der Ethanolherzeugung aus Biomasse. Hrsg. von: Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, Technische Universität München, 1. Aufl., Herrsching, E und M, Energie-und-Management-Verl.-Ges., ISBN 978-3-933283-43-6
- ISO 14040, 2006: Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen, Deutsche und Englische Fassung, DIN EN ISO 14040:2006, 10/2006
- ISO 14044, 2006: Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen, Deutsche und Englische Fassung, DIN EN ISO 14044: 2006, 10/2006
- Jeroch, H. et al. (Hrsg.), 1993: Futtermittelkunde, G. Fischer Verlag, Jena; Stuttgart, ISBN 3-334-00384-1
- Jonk, G., 2002: European Environmental Bureau (EEB) background paper 18-03-2002 on the use of biofuels for transport.  
<http://www.eeb.org/publication/2002/EEB-Biofuels-background-18-03-02.pdf>
- Jungbluth, T., W. Büscher und M. Krause, 2005: Technik Tierhaltung. Grundwissen Bachelor. Eugen Ulmer Verlag, Hohenheim, ISBN 3-8001-2837-3
- Kaiser, F. und A. Gronauer, 2007: Methanproduktivität nachwachsender Rohstoffe in Biogasanlagen. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, LfL-Information, Juli 2007  
[http://www.lfl.bayern.de/publikationen/daten/informationen/p\\_27455.pdf](http://www.lfl.bayern.de/publikationen/daten/informationen/p_27455.pdf)
- Kaltschmitt, M. und H. Hartmann (Hrsg.), 2001: Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren. Springer-Verlag, Berlin. ISBN 3-540-64853-4
- Kaltschmitt, M., 1996: Energiegewinnung aus Biomasse. In: Eyerer, P., 1996: Ganzheitliche Bilanzierung. Werkzeug zum Planen und Wirtschaften in Kreisläufen. Springer-Verlag, Berlin. ISBN 3-540-59356-X
- Karpenstein-Machan, M., 2005: Energiepflanzenbau für Biogasanlagenbetreiber. Frankfurt am Main : DLG-Verl., ISBN 3-7690-0651-8
- Katzen, R., P.W. Madson and D.A. Monceaux, 1999: Lignocellulosic feedstock for ethanol production: the ultimate renewable energy source. The Alcohol Textbook, Third Edition, Chapter 8, 107-116, Nottingham University Press
- Keymer, U., 1999: Beispielhafte Berechnung der theoretischen Gasausbeute in Biogasanlagen; In: Jahresbericht 1999, Bayrische Landesanstalt für Betriebswirtschaft und Agrarstruktur, S. 22-24

- Kirchgeßner, M., 2004: Tierernährung: Leitfaden für das Studium, Beratung und Praxis. 11. überarb. Aufl., Frankfurt am Main, DLG-Verlag, ISBN 3-7690-0594-5
- Kling, M. (Begr.), W. Wöhlbier (Hrsg.), 1983: Handelsfuttermittel, Bd. 2, Teil A 2A, Futtermittel pflanzlicher Herkunft, Stuttgart, Ulmer, ISBN 3-8001-3055-6
- Klocke, M., P. Mähnert, K. Mundt, K. Souidi und B. Linke, 2007: Microbial community analysis of a biogas-producing completely stirred tank reactor fed continuously with fodder beet silage as mono-substrate. *Systematic and Applied Microbiology* 30 (2), pp. 139-151
- Konstandt, H.G., 1982: Biogasanlagen, verfahrenstechnische und sicherheitstechnische Probleme und Maßnahmen. In: Stadlbauer, E.A. et al.: Biogasanlagen. Grafenau/Württ.: expert Verlag, ISBN 3-88508-810-X
- KTBL, 2005: Gasausbeuten in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), KTBL-Schriften-Vertrieb im Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster
- Kusch, S., 2007: Methanisierung stapelbarer Biomasse in diskontinuierlich betriebenen Feststofffermentationsanlagen. Dissertation, Universität Hohenheim
- Kutschera, U., 1995: Kurzes Lehrbuch der Pflanzenphysiologie. Wiesbaden, Quelle & Meyer, ISBN 3-8252-1861-9; 3-494-02222-4
- KWS, o.J.: KWS-Mais-Anbauplaner, o.J.; Stand: 28.08.2007  
[http://www.kws.de/global/show\\_document.asp?id=aaaaaaaaaabydgw](http://www.kws.de/global/show_document.asp?id=aaaaaaaaaabydgw)
- Langhans, G., 2007: Agrarreststoffe und Abprodukte der Biotreibstoffproduktion als Gärsubstrate. In: Biogas – Energieträger der Zukunft, Tagung Berlin, Deutschland, 14. u. 15. Juni 2007, VDI Wissensforum IWB GmbH, VDI-Berichte Nr. 1983, S. 47-60, ISBN 978-3-18-091983-6
- Lemmer, A. und D. Preißler, 2007: Gärprozess: Auf die Säuren achten! In: top agrar - Das Magazin für moderne Landwirtschaft, Jahrbuch 2007, Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster, S. 14-16
- Lemmer, A., 2005: Kofermentation von Grüngut in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Dissertation, Universität Hohenheim
- Mähnert, P., M. Heiermann, M. Plöchl, H. Schelle und B. Linke, 2002: Verwertungsalternativen für Grünlandbestände - Futtergräser als Kosubstrat für die Biomethanisierung. In: *Landtechnik* 57, H. 5, S. 60-61
- Mähnert, P., 2007: Kinetik der Biogasproduktion aus nachwachsenden Rohstoffen und Gülle. Dissertation, Humboldt-Universität zu Berlin
- Maurer, M. und J.-P. Winkler, 1982: Biogas – Theoretische Grundlagen, Bau und Betrieb von Anlagen, 2., überarb. u. erw. Aufl., Karlsruhe, Mueller, ISBN 3-7880-7199-0

- Misselhorn, K., 2004: Gärungsalkohol. In: Heiss, R.: Lebensmitteltechnologie. Biotechnologische, chemische, mechanische und thermische Verfahren der Lebensmittelverarbeitung, Völlig überarb. 6. Aufl., Berlin; Heidelberg (u.a.): Springer, ISBN 3-540-00476-9
- Morar, M., 2003: Verfahrenstechnische Untersuchungen zur anaeroben Behandlung von Brennereischlempen. Dissertation Universität Hohenheim, Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG); 405, Im Selbstverlag, Stuttgart
- Mukengele, M. und H. Oechsner, 2007: Einfluss der Silierung auf den spezifischen Methanertrag bei Mais. In: Landtechnik 61, H. 1, S. 20-21
- M+W Instruments Manual deutsch 51xx.pdf:  
<http://www.mw-instruments.com/userguide.htm> (Stand: 16.07.2007)
- Nitsch, J., W. Krewitt, M. Nast, P. Viebahn, S. Gärtner, M. Pehnt, G. Reinhardt, R. Schmidt, A. Uihlein, K. Scheurlen, C. Barthel, M. Fishedick und F. Merten 2004: Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland. Hrsg: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)
- N.N., 2003: GaBi 4 – Get ready for tomorrow! Handbuch GaBi 4, IKP, Universität Stuttgart, Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde, Abteilung GaBi, PE Europe GmbH, Leinfelden-Echterdingen, Deutschland
- N.N., o.J.: Grundlagen der Ganzheitlichen Bilanzierung, Unterlagen Softwareschulung 1, PE Europe GmbH, Leinfelden-Echterdingen, Deutschland
- N.N., 2004: Gesetz zur Neuregelung des Rechts der Erneuerbaren Energien im Strombereich vom 21. Juni 2004. Bundesgesetzblatt Jg. 2004, Teil I, Nr. 40, S. 1918 ff.
- N.N., 2004 a: Versuchsfeldführer 2003/2004. Bioinformatik / Grünland / Pflanzenbau. Band I, Ihinger Hof, Stand: 25.05.2004
- N.N., 2004 b: Versuchsfeldführer 2003/2004. Bioinformatik / Grünland / Pflanzenbau. Band II, Oberer Lindenhof, Kleinhohenheim, Hohenheim (Goldener Acker), Außenstandorte, Stand: 27.05.2004
- N.N., 2005 a: Versuchsfeldführer 2004/2005. Bioinformatik / Grünland / Pflanzenbau. Band I, Ihinger Hof, Stand: 04.07.2005
- N.N., 2005 b: Versuchsfeldführer 2004/2005. Bioinformatik / Grünland / Pflanzenbau. Band II, Oberer Lindenhof, Kleinhohenheim, Hohenheim (Goldener Acker), Außenstandorte, Stand: 04.07.2005
- N.N., 2006 a: Versuchsfeldführer 2005/2006. Agrartechnik / Bioinformatik / Grünland / Pflanzenbau / Pflanzenzüchtung / Phytomedizin. Ihinger Hof, Stand: 31.03.2006

- N.N., 2006 b: Versuchsfeldführer 2005/2006. Grünland / Pflanzenbau. Oberer Lindenhof, Kleinhohenheim, Hohenheim (Goldener Acker), Außenstandorte, Stand: 13.06.2006
- Noack, W., 1955: Biogas in der Landwirtschaft. Otto Elsner Verlagsgesellschaft, Darmstadt
- Nussbaum, H., 1998: Siliereignung von Wiesenaufwüchsen verschiedenen physiologischen Alters in Verbindung mit dem Einsatz ausgewählter Silierzusatzmittel. Dissertation Universität Hohenheim. Verlag Ulrich E. Grauer, Stuttgart. ISBN 3-86186-214-X
- Oechsner, H. und A. Lemmer, 2007: Biogas. Vorlesung M 41 252, SS 2007, Agrartechnik / Landesanstalt für Landwirtschaftliches Maschinen- und Bauwesen, Universität Hohenheim
- Oechsner, H., 2005: Technische Anforderungen an Biogasanlagen bei der Vergärung nachwachsender Rohstoffe, 3. Fachtagung VDI „Biogas – Energieträger der Zukunft“, Osnabrück, 12./13.04.2005
- Oechsner, H., A. Lemmer und C. Neuberg, 2003: Feldfrüchte als Gärsubstrat in Biogasanlagen. In: Landtechnik 58, H. 3, S. 146-147
- Öhgren, K., R. Bura, J. Saddler und G. Zacchi, 2007: Effect of hemicellulose and lignin removal on enzymatic hydrolysis of steam pretreated corn stover. *Bioresource Technology* 2007; 98(13): 2503-2510
- Öhgren, K., Vehmaanperä, J., Siika-Aho, M., Galbe, M., Viikari, L. Zacchi, G., 2007: High temperature enzymatic prehydrolysis prior to simultaneous saccharification and fermentation of steam pretreated corn stover for ethanol production, *Enzyme and Microbial Technology*, 40, S. 607-613
- Öhgren K., 2006: Fuel ethanol production from corn stover: Optimization of steam pretreatment and improvement of simultaneous saccharification and fermentation (Ph.d. thesis) (p.64). Lund: Department of Chemical Engineering, Lund University
- Öhgren, K., Galbe, M. and Zacchi, G., 2005: Optimization of steam pretreatment of SO<sub>2</sub>-impregnated corn stover for fuel ethanol production, *Applied Biochemistry and Biotechnology*, Vol. 121-124, S. 1055-1067
- Ohly, N., 2006: Verfahrenstechnische Untersuchungen zur Optimierung der Biogaserzeugung aus nachwachsenden Rohstoffen. Dissertation, Technischen Universität Bergakademie Freiberg
- Piepho, H.-P., 2006: Statistik für Studierende der Agrarbiologie an der Universität Hohenheim, 3. Semester, Institut für Pflanzenbau und Grünland, Fachgebiet Bioinformatik, Universität Hohenheim
- Pieper H.J. und K. Bohner, 1985: Energiebedarf, Energiekosten und Wirtschaftlichkeit verschiedener Alkoholproduktionsverfahren für Kornbranntwein unter besonderer Berücksichtigung des Schlempe-Recyclingverfahrens (SRV). *Die Branntweinwirtschaft*, 1. Septemberheft 1985, S. 286-293

- Pieper, H.-J., 1983: Gärungstechnologische Alkoholproduktion. In: Kling, M. [Begr.]; Wöhlbier, W. [Hrsg.]: Handelsfuttermittel, Bd. 2, Teil A 2A, Futtermittel pflanzlicher Herkunft, Stuttgart, Ulmer, ISBN 3-8001-3055-6
- Pouech, P., H. Fruteau and H. Bewa, 1998: Agricultural crops for biogas production on anaerobic digestions plants. In: N.N., 1998: 10th European Conference and Technology Exhibition Biomass for Energy and Industry: proceedings of the International Conference, Würzburg, Germany, 8 - 11 June 1998, Commission of the European Communities. C.A.R.M.E.N., Rimpär, Ed. by H. Kopetz, S. 163-165
- Prechtel, S., D. Schieder, R. Igelspacher, D. Antoni; W.H. Schwarz, Th. Kroner, M. Faulstich, U. Wagner, W. Russ, W. Staudenbauer und W. Bauer, 2005 a: Machbarkeitsstudie zur Produktion von Ethanol durch Biokonversion an einem Standort in Bayern. Auftragsstudie des bayrischen Landwirtschaftsministeriums, unveröffentlicht; München 2005, Nach: Igelspacher 2006
- Prechtel, S., D. Schieder und M. Faulstich, 2005 b: Erste Praxiserfahrungen der dezentralen Produktion von Bioethanol aus LCB14. Symposium Bioenergie, OTTI-Tagung Kloster-Banz 24./25. November 2005
- Prechtel, S., R. Höfler and F. Bischof, 1998: Anaerobic treatment of liquid products produced by thermal hydrolysis in fixed bed reactors. In: N.N., 1998: 10th European Conference and Technology Exhibition Biomass for Energy and Industry: proceedings of the International Conference, Würzburg, Germany, 8 - 11 June 1998, Commission of the European Communities. C.A.R.M.E.N., Rimpär, Ed. by H. Kopetz, S. 660-661
- Pronova, 2002: Advanced Gasmitter® – Betriebsanleitung, Stand: 03/2002
- Radke, H.-D., 2006: Statistik mit Excel. Für Praktiker. Statistiken aufbereiten und präsentieren. Markt+Technik Verlag, München, ISBN 3-8272-6999-7
- Reinhardt, G.A. und G. Zemanek, 2000: Ökobilanz Bioenergieträger. Basisdaten, Ergebnisse, Bewertungen: Deutsche Bundesstiftung Umwelt. Initiativen zum Umweltschutz 17. Erich Schmidt Verlag, Berlin 2000
- Richter, G., 1998: Stoffwechselphysiologie der Pflanzen: Physiologie und Biochemie des Primär- und Sekundärstoffwechsels. 6., völlig Neubearb. Aufl., Stuttgart, New York, Thieme, ISBN 3-13-442006-6
- Sahm, H., 1981: Biologie der Methan-Bildung. Chem.-Ing.-Tech. 53, Nr. 11, S. 854-863
- Saur, K. und P. Eyerer, 1996: Methodische Vorgehensweise bei Bilanzierungen. In: Eyerer, P., 1996: Ganzheitliche Bilanzierung. Werkzeug zum Planen und Wirtschaften in Kreisläufen. Springer-Verlag: Berlin. ISBN 3-540-59356-X
- Schlegel, H. G., G. Fuchs und T. Eitinger, 2007: Allgemeine Mikrobiologie, 8., vollst. überarb. und erw. Aufl., Thieme: Stuttgart (u.a.), 3-13-444608-1; 978-3-13-444608-1

- Schmitt, W., H. Wetterau, H. Beyrich, M. Müller, E.-M. Gottschling, W. Günther, W. Wulff und D. Thiele, 1973: Silageherstellung. 2., durchges. Aufl., VEB Dt. Landwirtschaftsverlag: Berlin, S. 130 ff.
- Schmitz, N. (Hrsg.), 2003: Bioethanol in Deutschland : Verwendung von Ethanol und Methanol aus nachwachsenden Rohstoffen im chemisch-technischen und im Kraftstoffsektor unter besonderer Berücksichtigung von Agraralkohol. Meó Consulting Team. [Gesamtleitung: Norbert Schmitz]. Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster. Band 21 in der Reihe „Nachwachsende Rohstoffe“. BMVEL, FNR e.V., ISBN 3-7843-3217-X
- Schmitz, N. (Hrsg.), 2005: Innovationen bei der Bioethanolerzeugung und ihre Auswirkungen auf Energie- und Treibhausgasbilanzen. Neue Verfahren, Optimierungspotentiale, internationale Erfahrungen und Marktentwicklungen. Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster. Band 26 in der Reihe „Nachwachsende Rohstoffe“. 208 Seiten, broschiert. ISBN 3-7843-3354-0
- Schneider, C., 2005: Alkoholbestimmung und Bestimmung säurelöslicher Kohlenhydrate, interne Arbeitsanleitung, Stand Juli 2005, unveröffentlicht
- Schneider, N., 2007: Gärreste aus Biogasanlagen – Nähr- und Schadstoffe, Einsatzmöglichkeiten im Ackerbau. Internationale Konferenz – Progress in Biogas, Stuttgart-Hohenheim. ISBN 978-3-940706-00-3
- Scholwin, F., T. Weidele, H. Gattermann, A. Schattauer und P. Weiland, 2006 a: Anlagentechnik zur Biogasbereitstellung. In: Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. [Hrsg.], ISBN 3-00-014333-5, <http://www.fnr.de>
- Scholwin, F., J. Michel, G. Schröder und M. Kalies, 2006 b: Ökologische Analyse einer Biogasnutzung aus nachwachsenden Rohstoffen. Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe [Auftrag.]
- Schopfer, P. und A. Brennicke, 2006: Pflanzenphysiologie. 6. Aufl., Heidelberg (u.a.) Elsevier, Spektrum Akad. Verl., ISBN 3-8274-1561-6; 978-3-8274-1561-5
- Schumacher, B.; H. Oechsner; T. Jungbluth und T. Senn, 2007 a: Aufbereitung von Nachwachsenden Rohstoffen zur Optimierung der Biogasausbeute - Welche Effekte werden im Biogasprozess durch die Vorbehandlung von Biomasse wie Mais und Triticale erzielt? Biogas – Energieträger der Zukunft, Tagung Berlin, Deutschland, 14. u. 15. Juni 2007, VDI Wissensforum IWB GmbH, S. 157-168, ISBN 978-3-18-091983-6
- Schumacher, B., H. Oechsner, T. Senn und T. Jungbluth, 2007 b: Thermo-mechanischer Aufschluss reifer Triticale zur Biogasgewinnung. In: Landtechnik 62, 03/2007 Juni, H 12772, S. 162-163
- Schumacher, B.; H. Oechsner und T. Senn, 2006 a: Vorbehandlung von Biomasse für die Biogasproduktion. 15. Symposium BIOENERGIE – Festbrennstoffe, Flüssigkraftstoffe, Biogas, Bad Staffelstein 23./24. November 2006, S. 352-357

- Schumacher, B.; C. Böhmel und H. Oechsner, 2006 b: Welchen Energiemais wann ernten für die Biogasgewinnung? In: Landtechnik 61, 2/2006 April, H 12772, S. 84-85
- Schumacher, B. und A. Lemmer, 2007: Gespräch November 2007 Senn, T., 2001 a: Ethanolherzeugung und Nutzung. In: Kaltschmitt, M., H. Hartmann (Hrsg.), 2001: Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren. Springer-Verlag, Berlin. ISBN 3-540-64853-4
- Senn, T., 2003: Die Produktion von Bioethanol als Treibstoff unter dem Aspekt der Energie-, Kosten- und Ökobilanz. Fachtagung – Regenerative Kraftstoffe in Stuttgart am 13./14. November 2003
- Senn, T. und S.F. Lucà, 2002: Studie zur Bioethanolproduktion aus Getreide in Anlagen mit einer Jahres-Produktionskapazität von 2, 5 und 9 Mio. Litern. Erstellt im Auftrag von: Bundesverband landwirtschaftliche Rohstoffe verarbeitende Brennereien e.V. unter Beteiligung des Bundesverbandes Deutscher Kartoffelbrenner e.V.
- Senn, T. und H.J. Pieper, 2001 b: Classical Methods In: Roehr, M. (Hrsg): The biotechnology of ethanol: classical and future applications. WILEY-VCH Weinheim. ISBN 3-527-30199-2
- Shapouri H., J.A. Duffield and M. Wang, 2002: The energy balance of corn ethanol. an update. United States Department of Agriculture, Office of the Chief Economist, Office of Energy Policy and New Uses. Agricultural Economic Report Number 813., 2002.  
<http://www.transportation.anl.gov/pdfs/AF/265.pdf>
- Sluiter, A., B. Hames, R. Ruiz, C. Scarlata, J. Sluiter and D. Templeton, 2004: LAP – Determination of Structural Carbohydrates and Lignin in Biomass, Draft Version 2004, Date: 07/28/04, U.S. Department of Energy, Biomass Program
- Steingass, H. und K.H. Menke, 1986: Schätzung des energetischen Futterwerts aus der in vitro mit Pansensaft bestimmten Gasbildung und der chemischen Analyse. Übersicht der Tierernährung, Nr. 14, S. 251 – 270
- Stelzer, T., 1999: Biokraftstoffe im Vergleich zu konventionellen Kraftstoffen – Lebensweganalysen von Umweltwirkungen. Dissertation, Stuttgart, Universität Stuttgart, Inst. für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Band 57
- Tolan J.S., 1999: Alcohol production from cellulosic biomass: the logen process, a model system in operation. The Alcohol Textbook, Third Edition, Chapter 9, pp.117-127, Nottingham University Press
- VDI-Richtlinie, 2006: Vergärung organischer Stoffe – Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche. VDI 4630, April 2006, Beuth Verlag GmbH

- VDLUFA, 2001: Arbeitsanleitung für NIRS-Untersuchungen an Frischgras, Gras- und Maissilageproben im Rahmen des Qualitätssicherungssystem NIRS/NIT, <http://www.vdlufa.de/nirs>
- VDLUFA, 2002: Arbeitsanleitung für NIRS-Untersuchungen an Silomaisproben (Ganz- und Restpflanze) im Rahmen des Qualitätssicherungssystem NIRS/NIT der VDLUFA, <http://www.vdlufa.de/nirs>
- Vetter, A., 2007: Anbau Nachwachsender Rohstoffe für die Biogasproduktion. In: Biogas – Energieträger der Zukunft, Tagung Berlin, Deutschland, 14. u. 15. Juni 2007, VDI Wissensforum IWB GmbH, VDI-Berichte Nr. 1983, S. 23-33, ISBN 978-3-18-091983-6
- Wagner, U. und R. Igelspacher, 2003: Ganzheitliche Systemanalyse zur Erzeugung und Anwendung von Bioethanol im Verkehrssektor. Gelbes Heft 76, Bayerisches Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten
- Weißbach, F.: Arbeitsanweisung zur Korrektur des Trockensubstanzgehaltes von Silagen. (gültig seit 01.02.1994) Institut für Grünland- und Futterpflanzenforschung der FAL
- Wegener, J., 2006: Treibhausgas-Emissionen in der deutschen Landwirtschaft. Herkunft und technische Minderungspotenziale unter besonderer Berücksichtigung von Biogas. Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen
- Wegener, J., W. Lücke und J. Heinzemann, 2007 a: Treibhausgas-Minderungspotenziale durch die energetische Nutzung von vorhandener landwirtschaftlicher Biomasse. Agricultural Engineering Research 13 (2007), S. 67-76
- Wegener, J., W. Lücke und J. Heinzemann, 2007 b: Optimaler Verwendungszweck von Biogas unter dem Gesichtspunkt des Klimaschutzes in Deutschland. Agricultural Engineering Research 13 (2007), S. 129-140
- Weiland, P., Ch. Rieger, J. Schröder, R. Kissel, H. Bachmaier, V. Plogsties und J. Vogtherr, 2007: Stand der Technik bei der Erzeugung und Nutzung von Biogas unter Einsatz von NawaRo-Anlagen. In: Biogas – Energieträger der Zukunft, Tagung Berlin, Deutschland, 14. u. 15. Juni 2007, VDI Wissensforum IWB GmbH, VDI-Berichte Nr. 1983, S. 89-101, ISBN 978-3-18-091983-6
- Weiland, P., 1998: Cofermentation of Biomass – Technische, organizing and legal possibilities for energy production. In: N.N., 1998: 10th European Conference and Technology Exhibition Biomass for Energy and Industry: proceedings of the International Conference, Würzburg, Germany, 8 - 11 June 1998, Commission of the European Communities. C.A.R.M.E.N., Rimpar, Ed. by H. Kopetz, pp. 698-701
- Wellinger, A., 1991: Biogas-Handbuch: Grundlagen, Planung, Betrieb landwirtschaftlicher Anlagen, 2., stark überarb. Aufl., Aarau, Wirz, ISBN 3-85983-035-X

- Wetter, C. und E. Brüggling, 2004: Machbarkeitsstudie zur Bioethanolproduktion in landwirtschaftlichen Brennereien. Fachhochschule Münster
- Wilfert, R., M. Nill und A. Schattauer, 2004: Biogasgewinnung aus Gülle, organischen Abfällen und aus angebauter Biomasse. Eine technische, ökologische und ökonomische Analyse. Deutsche Bundesstiftung Umwelt [Auftrag.], Institut für Energetik und Umwelt, Leipzig
- Wöhlbier, W., 1983: Strohaufschluß. In: Kling, M. [Begr.] und W. Wöhlbier [Hrsg.]: Handelsfuttermittel, Bd. 2, Teil A 2A, Futtermittel pflanzlicher Herkunft, Stuttgart, Ulmer, ISBN 3-8001-3055-6
- Zubr, J., 1989: Field crops as renewable sources of convertible energy for methanogenic fermentation. In: Wise, D. L.: International biosystems. Teil 3, Boca Raton, Fla. CRC Pr., 1989, S. 159-182, ISBN 0-8493-4853-6

## **9 Anhang**

### **9.1 Spezifische Methanerträge verschiedener Autoren**

Substrat	Substrateigenschaften	Anzahl der Versuche [n]	TS [%]	oTS % der TS [%]	Methanertrag [l <sub>N</sub> CH <sub>4</sub> /kg oTS]	Biogas-ertrag [l <sub>N</sub> /kg oTS]	Variationskoeffizient Biogasertrag [%]	Methan-gehalt [%]	Quelle
<b>Nachwachsende Rohstoffe</b>									
Mais	6 Sorten Silagen		23-30		359-422				Amon et al., 2006 a
Mais	verschiedene Silagen	108	20-45		245-431				Kaiser et al., 2007
Mais	Silage, milchreif	7	21,9	95,7	300	578	14,6	51,9	KTBL, 2005
Mais	Silage, Beginn teigreif	9	27,8	94,8	338	651	9,3	51,9	KTBL, 2005
Mais	Silage, teigreif	17	32,6	94,7	347	642	17,4	54	KTBL, 2005
Mais	Silage, vollreif	29	40,1	96,3	320	593	15,3	54	KTBL, 2005
Mais	Silage, minimal	2	31	94,7	280	592		47,3	Mähnert, 2007
Mais	Silage, maximal	2	31	94,7	370	699		52,9	Mähnert, 2007
Mais	frisch	3	21		351				Mukengele et al., 2007
Mais	Silage	3	21		360				Mukengele et al., 2007
Mais	9 Sorten Silagen	27	19,9-41,6	95,2-97,1	330-400	654		52,5	Oechsner et al., 2003
Mais	Silage 2004			21,6 oTS% der FM	338	654		51,7	Ohly, 2006
Mais	Silage 2004			22,7 oTS% der FM	310	581		53,4	Ohly, 2006
Mais	Batch				407	802			Ohly, 2006
Mais	GP	3	25,49	95,79	397	674		58,9	Pouech et al., 1998
Mais						530-750			Weiland, 1998
Mais	Strängel		24,8	92	257	378	2,1	68	Zubr, 1989
Gras	frisch	17	21,1	89,7	330	596	22,7	55,4	KTBL, 2005
Gras	Silage	19	28,3	89	332	627	22,2	52,9	KTBL, 2005
Gras						520-640			Weiland, 1998
Sudangras	frisch	6	40,7	95,6	228	363	6,3	62,9	KTBL, 2005
Raps		3	21,48	90,62	336	556		60,4	Pouech et al., 1998
Roggen			22-40		140-275				Amon et al., 2006 a
Roggen	Ganzpflanzensilage	3	29,4	92,9		664	23,5	52,3	KTBL, 2005
Roggen	Stroh (bei 30 °C)					259			Noack, 1955
Roggen	Ganzpflanzensilage, min	2	21,8	88,8	330	531		62,2	Mähnert, 2007
Roggen	Ganzpflanzensilage, max	2	21,8	88,8	420	699		60,1	Mähnert, 2007
Triticale			22-40		212-286				Amon et al., 2006 a
Triticale	Ganzpflanzensilage			37,2 oTS% der FM	228	442		51,6	Ohly, 2006
Triticale	Ganzpflanzensilage			34,3 oTS% der FM	234	449		52,1	Ohly, 2006
Triticale	Ganzpflanzensilage, Batch				283	650			Ohly, 2006
Triticale	Schrot			82,5 oTS% der FM	300	623		48	Ohly, 2006

Tab. 9.1.1: Übersicht zu spezifischen Biogas-/Methanerträgen ausgewählter Nawaro und ausgewählter organischer Reste (verschiedene Autoren)

Substrat	Substrateigenschaften	Anzahl der Versuche [n]	TS [%]	oTS % der TS [%]	Methan-ertrag [N CH <sub>4</sub> /kg oTS] [IN/kg oTS]	Biogas-ertrag [IN/kg oTS]	Variationskoeffizient Biogasertrag [%]	Methan-gehalt [%]	Quelle
<b>Fortsetzung Nachwachsende Rohstoffe</b>									
Hirse									
Weidelgras	frisch, siliert	2	31,9	78,3	297	635	0,6	46,7	KTBL, 2005
Weidelgras	Dt., frisch	45	11-33		198-443 (?)	477-846			Kaiser et al., 2007
Weidelgras	Dt., siliert	1	17,6	90,1		859		23-68	Mähnert et al., 2002
Weidelgras	frisch	2	18,7	88,5		914/929		33-68	Mähnert et al., 2002
Weidelgras	siliert	3	21,62	90,94	390	615		63,4	Pouech et al., 1998
Weizen	versch. Erntetermine	3	21,62	90,94	409	681		60,1	Pouech et al., 1998
Weizen	Körner				228-343				Amon et al., 2006 a
Weizen	Schrot	1	86,6	98	367	764		48	KTBL, 2005
Weizen	Schrot			65,2 oTS% der FM	467	903		51,7	Ohly, 2006
Weizen	Schrot			65,2 oTS% der FM	445	859		51,8	Ohly, 2006
Weizen	Stroh	1	90,2	91,8	204	370		55	KTBL, 2005
Weizen	Stroh	3			267				Bauer et al., 2007
Weizen	Stroh, steam exploded	2			396		2,2		Bauer et al., 2007
Weizen	Stroh					275			Noack, 1955
Weizen	Stroh			82,8 oTS% der FM	132	229		57,6	Ohly, 2006
Weizen	Stroh			82,8 oTS% der FM	180	239		53,1	Ohly, 2006
Weizen	Stroh, Batch			82,8 oTS% der FM	393	910			Ohly, 2006
Weizen	GP	3	37,69	97,91	384	641		59,9	Pouech et al., 1998
Winterroggen	Stroh, Batch		87	96	229	333		68,7	Zubr, 1989
<b>Substrate aus der Weiterverarbeitung und organische Reststoffe</b>									
Getreide	Schlempe	3	6,9	94,5	365	673		54,2	KTBL, 2005
Mais	Schlempe	3			347		40,9		Bauer et al., 2007
Triticale	Schlempe	2			502	832			Morar, 2003
Weizen	Schlempe	3			380		17,9		Bauer et al., 2007
Weizen	Schlempe	2			392-534	819-922			Morar, 2003
Rapskuchen	kaltgepresst	2	88,5	88,8	489	900		54,3	KTBL, 2005

Fortsetzung Tab. 9.1.1

Die Mitglieder der KTBL-Arbeitsgruppe (KTBL, 2005) sind im folgenden Anhang genannt.

## **Mitglieder der KTBL-Arbeitsgruppe (KTBL, 2005)**

Prof. Dr. Th. Amon, Universität für Bodenkunde (BOKU), Institut für Land-, Umwelt- und Energietechnik, Wien

Biotechnologie Nordhausen (BTN), Nordhausen

Dr. W. Gruber, Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, Ref. 44 Regenerative Energien, Nachwachsende Rohstoffe, Bonn

Dipl.-Ing. U. Hoffstede, Institut für solare Energieversorgungstechnik (ISET e.V.), Hanau

Dipl.-Ing. agr. P. Jäger, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), Darmstadt

Dr. K. Jäkel, Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, Fachbereich 3, Ländlicher Raum, Betriebswirtschaft und Landtechnik, Leipzig

Dipl.-Ing. agr. M.Sc. F. Kaiser, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Institut für Landtechnik, Bauwesen und Umweltechnik (ILT), Freising

Dipl.-Ing. agr. U. Keymer, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Institut für Strukturentwicklung, Betriebswirtschaft und Informatik, München

Dr. B. Linke, Institut für Agrartechnik (ATB), Potsdam Bornim

Dr. U. Merrettig-Bruns, Fraunhofer-UMSICHT, Oberhausen

Dr. A. Niebaum, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), Darmstadt

Dr. H. Oechsner, Universität Hohenheim, Landesanstalt für Landwirtschaftliches Maschinen- und Bauwesen, Stuttgart

Dr. G. Reinhold (Vorsitzender), Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL), Jena

Dipl.-Ing. agr. M. Schwab (Geschäftsführer), Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), Darmstadt

Dipl.-Ing. D. Telschow, VTI Thüringer Verfahrenstechnisches Institut für Umwelt und Energie e.V., Saalfeld

Prof. Dr. P. Weiland, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Institut für Technologie und Biosystemtechnik, Braunschweig

OAR W. Welsch, Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft, Referat 523, Bonn

Dr. S. Wesolowski, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Wärmetechnik und Thermodynamik, Freiberg

## **9.2 Spezifische Methanerträge eigener Untersuchungen**

Substrat	Substrat-eigenschaften	Reifezahl	Ernte	Anzahl der Versuche	TS [%]	oTS % der TS [%]	Methan-ertrag [Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg oTS]	Biogas-ertrag [Nm <sup>3</sup> /kg oTS]	rel. STD [%]	Methan-gehalt [%]	TM-Ertrag [t/(ha a)]	Methan-hekta-ertrag [Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> / (ha a)]	Energie-ertrag GJ/ (ha a)
<b>Mais, Stuttgart-Hohenheim, 2004</b>													
Gavott	GP	S250	T1 15.09.04	3	36,4	95,2	0,340	0,662	1,6	51,4	217,7	7054	254
PR39F58	GP	S260	T1 15.09.04	3	34,9	95,5	0,341	0,671	1,8	50,9	201,3	6561	236
Eminent	GP	S270	T1 15.09.04	3	30,2	94,7	0,337	0,663	0,7	50,9	182,2	5825	210
Pollen	GP	S300	T1 15.09.04	3	31,2	95,8	0,337	0,670	2,5	50,2	189,4	6105	220
PR37D25	GP	S ca. 330	T1 15.09.04	2	31,8	96,1	0,343	0,673	1,1	50,9	212,5	6999	252
Méridienne	GP	S400-450	T1 15.09.04	3	27,5	95,8	0,340	0,671	0,9	50,7	204,1	6647	239
Mahora	GP	S440	T1 15.09.04	2	28,4	95,1	0,338	0,659	0,2	51,3	208,4	6700	241
Mikado	GP	FAO500	T1 15.09.04	3	24,0	95,0	0,341	0,671	5,1	50,8	222,7	7212	260
Doge	GP	FAO700	T1 15.09.04	3	22,4	94,3	0,307	0,611	3,5	50,2	221,5	6412	231
Gavott	GP	S250	T2 30.09.04	3	43,3	95,7	0,349	0,679	2,9	51,4	211,4	7064	254
PR39F58	GP	S260	T2 30.09.04	2	40,0	95,8	0,334	0,646	5,6	51,7	210,8	6750	243
Eminent	GP	S270	T2 30.09.04	3	39,0	95,4	0,351	0,680	1,1	51,5	228,3	7638	275
Pollen	GP	S300	T2 30.09.04	3	37,4	96,3	0,338	0,664	2,6	50,9	221,4	7203	259
PR37D25	GP	S ca. 330	T2 30.09.04	3	36,4	96,0	0,338	0,663	1,4	51,0	195,1	6336	228
Méridienne	GP	S400-450	T2 30.09.04	3	32,7	96,3	0,339	0,675	1,3	50,3	234,7	7670	276
Mahora	GP	S440	T2 30.09.04	3	33,3	95,2	0,337	0,662	3,1	50,8	226,4	7255	261
Mikado	GP	FAO500	T2 30.09.04	3	26,6	94,4	0,333	0,653	0,5	50,9	199,4	6259	225
Doge	GP	FAO700	T2 30.09.04	3	23,5	94,0	0,322	0,633	2,4	50,8	188,2	5696	205
Gavott	GP	S250	T3 11.10.04	3	45,9	94,5	0,339	0,649	0,9	52,2	211,9	6783	244
PR39F58	GP	S260	T3 11.10.04	2	45,0	94,5	0,357	0,691	0,8	51,6	220,4	7514	270
Eminent	GP	S270	T3 11.10.04	3	44,0	95,2	0,345	0,676	2,7	51,0	213,8	6996	252
Pollen	GP	S300	T3 11.10.04	3	43,1	94,9	0,339	0,668	2,2	50,7	220,2	7110	256
PR37D25	GP	S ca. 330	T3 11.10.04	3	43,9	95,3	0,340	0,673	2,4	50,5	222,9	7262	261
Méridienne	GP	S400-450	T3 11.10.04	3	38,8	95,9	0,345	0,681	2,4	50,7	241,8	8003	288
Mahora	GP	S440	T3 11.10.04	3	37,4	95,8	0,341	0,666	2,6	51,3	212,8	6881	248
Mikado	GP	FAO500	T3 11.10.04	3	30,3	94,7	0,338	0,662	2,6	51,0	231,2	7339	264
Doge	GP	FAO700	T3 11.10.04	3	27,3	93,9	0,342	0,663	2,5	51,6	239,4	7719	278
Gavott	GP	S250	T4 25.10.04	3	48,6	94,2	0,317	0,610	2,0	52,0	199,5	5988	216

Tab. 9.2.1: Methanerträge eigener Untersuchungen

Substrat	Substrat-eigenschaften	Reifezahl	Ernte	Anzahl der Versuche	TS [%]	oTS % der TS [%]	Methan-ertrag [Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg oTS]	Biogas-ertrag [Nm <sup>3</sup> /kg oTS]	rel. STD [%]	Methan-gehalt [%]	TM-Ertrag [tct/(ha a)]	Methan-hektar-ertrag [Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> / (ha a)]	Energie-ertrag GJ/ (ha a)
<b>Mais, Stuttgart-Hohenheim, 2004</b>													
PR39F58	GP	S260	T4 25.10.04	3	49,7	94,2	0,316	0,612	0,6	51,5	211,9	6301	227
Eminent	GP	S270	T4 25.10.04	3	49,6	94,0	0,325	0,630	5,0	51,6	205,4	6281	226
Pollen	GP	S300	T4 25.10.04	3	46,8	95,1	0,323	0,631	1,5	51,2	208,0	6389	230
PR37D25	GP	S ca. 330	T4 25.10.04	3	46,1	95,3	0,314	0,616	4,4	51,0	200,1	5995	216
Méridienne	GP	S400-450	T4 25.10.04	3	41,3	95,6	0,329	0,641	0,4	51,3	248,5	7810	281
Mahora	GP	S440	T4 25.10.04	3	41,0	94,4	0,318	0,614	3,2	51,8	221,7	6659	240
Mikado	GP	FAO500	T4 25.10.04	3	35,1	94,7	0,323	0,632	0,5	51,1	249,0	7610	274
Doge	GP	FAO700	T4 25.10.04	3	28,1	94,3	0,329	0,634	0,2	51,9	234,3	7268	262
Gavott	Korn	S250	T1 21.09.04	3		97,6	0,412	0,786	4,9	52,4			
PR39F58	Korn	S260	T1 21.09.04	3		98,0	0,411	0,780	0,6	52,7			
Eminent	Korn	S270	T1 21.09.04	3		97,6	0,395	0,762	1,8	51,9			
Pollen	Korn	S300	T1 21.09.04	3		97,7	0,386	0,740	0,8	52,2			
PR37D25	Korn	S ca. 330	T1 21.09.04	3		97,9	0,388	0,761	0,4	51,0			
Méridienne	Korn	S400-450	T1 21.09.04	3		97,9	0,399	0,762	2,3	52,3			
Mahora	Korn	S440	T1 21.09.04	3		97,7	0,370	0,715	3,1	51,8			
Mikado	Korn	FAO500	T1 21.09.04	3		97,6	0,378	0,731	0,8	51,7			
Doge	Korn	FAO700	T1 21.09.04	3		98,0	0,365	0,730	1,3	49,9			
Gavott	Korn	S250	T2 29.09.04	3		97,6	0,411	0,783	3,7	52,4			
PR39F58	Korn	S260	T2 29.09.04	3		98,0	0,391	0,743	2,4	52,7			
Eminent	Korn	S270	T2 29.09.04	3		97,6	0,390	0,750	0,5	51,9			
Pollen	Korn	S300	T2 29.09.04	3		98,3	0,397	0,763	3,1	52,1			
PR37D25	Korn	S ca. 330	T2 29.09.04	3		97,9	0,378	0,742	1,8	50,9			
Méridienne	Korn	S400-450	T2 29.09.04	2		97,9	0,386	0,747	0,0	51,7			
Mahora	Korn	S440	T2 29.09.04	3		97,8	0,380	0,720	0,9	52,7			
Mikado	Korn	FAO500	T2 29.09.04	3		97,9	0,398	0,762	3,3	52,2			
Doge	Korn	FAO700	T2 29.09.04	3		98,0	0,366	0,724	3,0	50,6			
Gavott	Korn	S250	T3 13.10.04	3		98,1	0,395	0,749	1,8	52,8			
PR39F58	Korn	S260	T3 13.10.04	3		97,7	0,396	0,744	1,8	53,2			

Tab. 9.2.1: Methanerträge eigener Untersuchungen (Fortsetzung)

Substrat	Substrat-eigenschaften	Reifezahl	Ernte	Anzahl der Versuche	TS [%]	oTS % der TS [%]	Methan-ertrag [Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg oTS]	Biogas-ertrag [Nm <sup>3</sup> /kg oTS]	rel. STD [%]	Methan-gehalt [%]	TM-Ertrag [dt/(ha a)]	Methan-hektar-ertrag [Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> / (ha a)]	Energie-ertrag GJ/ (ha a)
<b>Mais, Stuttgart-Hohenheim, 2004</b>													
Eminent	Korn	S270	T3 13.10.04	2		97,4	0,378	0,708	2,3	53,3			
Pollen	Korn	S300	T3 13.10.04	3		97,8	0,403	0,766	1,8	52,7			
PR37D25	Korn	S ca. 330	T3 13.10.04	3		98,0	0,366	0,719	1,6	50,9			
Méridienne	Korn	S400-450	T3 13.10.04	3		97,5	0,398	0,760	1,1	52,3			
Mahora	Korn	S440	T3 13.10.04	3		97,8	0,418	0,788	3,3	53,1			
Mikado	Korn	FAO500	T3 13.10.04	3		97,5	0,378	0,737	4,3	51,3			
Doge	Korn	FAO700	T3 13.10.04	3		97,6	0,393	0,770	4,4	51,0			
Gavott	Korn	S250	T4 27.10.04	3		97,1	0,397	0,752	4,2	52,8			
PR39F58	Korn	S260	T4 27.10.04	3		97,9	0,391	0,741	1,7	52,8			
Eminent	Korn	S270	T4 27.10.04	3		97,5	0,389	0,741	1,5	52,5			
Pollen	Korn	S300	T4 27.10.04	3		97,9	0,384	0,736	1,0	52,2			
PR37D25	Korn	S ca. 330	T4 27.10.04	3		98,0	0,387	0,750	2,8	51,6			
Méridienne	Korn	S400-450	T4 27.10.04	3		97,7	0,383	0,759	3,0	50,5			
Mahora	Korn	S440	T4 27.10.04	3		97,5	0,401	0,770	2,3	52,1			
Mikado	Korn	FAO500	T4 27.10.04	3		97,6	0,399	0,764	3,4	52,3			
Doge	Korn	FAO700	T4 27.10.04	3		97,3	0,390	0,754	1,5	51,8			
Gavott	Rest,L+S	S250	T1 21.09.04	3		92,0	0,322	0,632	0,7	51,0			
PR39F58	Rest,L+S	S260	T1 21.09.04	3		92,0	0,331	0,640	1,8	51,7			
Eminent	Rest,L+S	S270	T1 21.09.04	3		91,2	0,326	0,636	2,2	51,2			
Pollen	Rest,L+S	S300	T1 21.09.04	3		93,9	0,331	0,653	1,6	50,7			
PR37D25	Rest,L+S	S ca. 330	T1 21.09.04	3		93,8	0,328	0,641	1,0	51,2			
Méridienne	Rest,L+S	S400-450	T1 21.09.04	3		92,8	0,328	0,633	1,2	51,7			
Mahora	Rest,L+S	S440	T1 21.09.04	3		92,4	0,316	0,621	0,9	51,0			
Mikado	Rest,L+S	FAO500	T1 21.09.04	3		92,4	0,316	0,612	1,7	51,7			
Doge	Rest,L+S	FAO700	T1 21.09.04	3		92,8	0,326	0,644	1,4	50,6			
Gavott	Rest,L+S	S250	T2 29.09.04	3		92,5	0,323	0,633	1,6	51,0			
PR39F58	Rest,L+S	S260	T2 29.09.04	3		91,8	0,323	0,623	3,8	51,9			
Eminent	Rest,L+S	S270	T2 29.09.04	3		91,4	0,324	0,632	1,1	51,2			

Tab. 9.2.1: Methanerträge eigener Untersuchungen (Fortsetzung)

Substrat	Substrat-eigenschaften	Reifezahl	Ernte	Anzahl der Versuche	TS		oTS % der TS	Methan-ertrag [Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg oTS]	Biogas-ertrag [Nm <sup>3</sup> /kg oTS]	rel. STD [%]	Methan-gehalt [%]	TM-Ertrag [dt/(ha a)]	Methan-hektar-ertrag [Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /(ha a)]	Energie-ertrag G/J (ha a)
					TS [%]	oTS [%]								
<b>Mais, Stuttgart-Hohenheim, 2004</b>														
Pollen	Rest,L+S	S300	T2 29.09.04	3			91,9	0,325	0,641	1,1	50,8			
PR37D25	Rest,L+S	S ca. 330	T2 29.09.04	3			88,8	0,331	0,646	3,5	51,3			
Méridienne	Rest,L+S	S400-450	T2 29.09.04	3			90,8	0,318	0,623	1,9	51,0			
Mahora	Rest,L+S	S440	T2 29.09.04	3			91,3	0,317	0,618	1,5	51,2			
Mikado	Rest,L+S	FAO500	T2 29.09.04	3			92,0	0,330	0,636	2,8	51,8			
Doge	Rest,L+S	FAO700	T2 29.09.04	3			90,9	0,330	0,647	2,1	51,0			
Gavott	Rest,L+S	S250	T3 13.10.04	3			93,0	0,318	0,625	0,9	51,0			
PR39F58	Rest,L+S	S260	T3 13.10.04	3			92,5	0,313	0,611	4,4	51,1			
Eminent	Rest,L+S	S270	T3 13.10.04	3			92,0	0,322	0,624	1,4	51,5			
Pollen	Rest,L+S	S300	T3 13.10.04	2			92,1	0,324	0,643	3,0	50,4			
PR37D25	Rest,L+S	S ca. 330	T3 13.10.04	3			92,8	0,321	0,624	1,3	51,5			
Méridienne	Rest,L+S	S400-450	T3 13.10.04	3			92,7	0,322	0,639	1,6	50,4			
Mahora	Rest,L+S	S440	T3 13.10.04	3			91,5	0,346	0,668	0,9	51,8			
Mikado	Rest,L+S	FAO500	T3 13.10.04	3			92,6	0,324	0,646	2,3	50,1			
Doge	Rest,L+S	FAO700	T3 13.10.04	3			92,3	0,331	0,651	2,4	50,8			
Gavott	Rest,L+S	S250	T4 27.10.04	3			92,1	0,312	0,610	1,3	51,1			
PR39F58	Rest,L+S	S260	T4 27.10.04	3			91,7	0,314	0,600	2,0	52,2			
Eminent	Rest,L+S	S270	T4 27.10.04	3			91,7	0,304	0,592	3,6	51,4			
Pollen	Rest,L+S	S300	T4 27.10.04	3			92,1	0,309	0,601	1,2	51,4			
PR37D25	Rest,L+S	S ca. 330	T4 27.10.04	2			93,4	0,318	0,622	0,7	51,1			
Méridienne	Rest,L+S	S400-450	T4 27.10.04	3			92,5	0,308	0,605	7,9	51,0			
Mahora	Rest,L+S	S440	T4 27.10.04	3			91,5	0,300	0,589	7,7	50,9			
Mikado	Rest,L+S	FAO500	T4 27.10.04	3			91,5	0,317	0,628	1,4	50,6			
Doge	Rest,L+S	FAO700	T4 27.10.04	3			92,3	0,323	0,632	1,8	51,1			

Tab. 9.2: Methanerträge eigener Untersuchungen (Fortsetzung)

Substrat	Substrat-eigenschaften	Reifezahl	Ernte	Anzahl der Versuche	TS [%]	oTS % der TS	Methan-ertrag [Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg oTS]	Biogas-ertrag [Nm <sup>3</sup> /kg oTS]	rel. STD [%]	Methan-gehalt [%]	TM-Ertrag [tdt/(ha a)]	Methan-ektar-ertrag [Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /ha a]	Energie-ertrag GJ/(ha a)
<b>Mais, Stuttgart-Hohenheim, 2005</b>													
Gavott	GP	S250	BMS 24.08.05	2	26,3	95,2	0,334	0,636	0,3	52,6	268,8	8.559	308
KXA 5233	GP	S300	BMS 24.08.05	2	24,3	96,6	0,339	0,652	1,2	52,0	269,0	8.918	321
PR 37 D 25	GP	S330	BMS 24.08.05	3	22,5	94,8	0,338	0,643	2,0	52,6	268,7	8.617	310
KXA 5243	GP	S400	BMS 24.08.05	3	20,7	94,4	0,331	0,629	1,6	52,6	254,6	7.961	287
Gavott	GP	S250	T1 12.09.05	2	35,1	96,1	0,366	0,703	1,2	52,1	264,2	9.301	335
KXA 5226	GP	S260	T1 12.09.05	3	30,7	95,9	0,354	0,681	2,6	52,0	277,8	9.435	340
KXA 5233	GP	S300	T1 12.09.05	2	32,2	96,5	0,349	0,670	3,0	52,1	320,9	10.815	389
PR 37 D 25	GP	S330	T1 12.09.05	3	30,0	96,5	0,352	0,675	1,9	52,1	277,7	9.455	340
Mikado	GP	S370	T1 12.09.05	3	23,2	95,1	0,333	0,654	1,5	50,9	272,8	8.635	311
KXA 5243	GP	S400	T1 12.09.05	3	26,1	95,4	0,348	0,673	2,1	51,7	282,8	9.387	338
Gavott	GP	S250	T2 26.09.05	3	41,3	96,4	0,367	0,678	0,0	54,1	206,9	7.322	264
KXA 5226	GP	S260	T2 26.09.05	3	36,8	96,4	0,350	0,673	2,9	51,9	268,7	9.056	326
KXA 5233	GP	S300	T2 26.09.05	3	37,4	97,1	0,333	0,637	0,4	52,2	254,4	8.219	296
PR 37 D 25	GP	S330	T2 26.09.05	2	36,3	96,5	0,350	0,672	1,5	52,1	245,2	8.289	298
Mikado	GP	S370	T2 26.09.05	3	26,8	95,5	0,342	0,673	1,3	50,9	223,4	7.304	263
KXA 5243	GP	S400	T2 26.09.05	2	31,0	96,5	0,349	0,670	0,9	52,1	237,2	7.983	287
Gavott	GP	S250	T3 10.10.05	2	42,8	96,4	0,369	0,684	0,7	53,9	228,1	8.113	292
KXA 5226	GP	S260	T3 10.10.05	2	37,9	96,4	0,354	0,672	0,2	52,7	297,7	10.169	366
KXA 5233	GP	S300	T3 10.10.05	2	38,1	96,8	0,345	0,671	3,0	51,4	283,6	9.473	341
PR 37 D 25	GP	S330	T3 10.10.05	3	38,5	96,7	0,354	0,675	1,1	52,4	250,5	8.583	309
Mikado	GP	S370	T3 10.10.05	3	27,3	95,6	0,344	0,676	1,7	50,9	301,9	9.921	357
KXA 5243	GP	S400	T3 10.10.05	3	32,3	95,9	0,345	0,663	1,8	52,0	308,4	10.200	367
Gavott	GP	S250	T4 24.10.05	2	47,4	96,0	0,370	0,687	1,0	53,9	282,4	10.043	362
KXA 5226	GP	S260	T4 24.10.05	3	44,5	96,7	0,360	0,697	2,5	51,6	327,4	11.382	410
KXA 5233	GP	S300	T4 24.10.05	3	43,3	96,8	0,370	0,711	1,9	52,1	334,6	11.995	432
PR 37 D 25	GP	S330	T4 24.10.05	3	45,3	96,7	0,368	0,710	1,3	51,9	302,6	10.765	388
Mikado	GP	S370	T4 24.10.05	3	33,2	95,5	0,348	0,682	0,8	51,0	332,7	11.019	397
KXA 5243	GP	S400	T4 24.10.05	2	38,6	96,8	0,360	0,680	1,7	52,9	345,0	12.023	433

Tab. 9.2.1: Methanerträge eigener Untersuchungen (Fortsetzung)

Substrat	Substrat-eigenschaften	Reifezahl	Ernte	Anzahl der Versuche	TS [%]	oTS % der TS [%]	Methan-ertrag [Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg oTS]	Biogas-ertrag [Nm <sup>3</sup> /kg oTS]	rel. STD [%]	Methan-gehalt [%]	TM-Ertrag [dt/(ha a)]	Methan-hektar-ertrag [Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> / (ha a)]	Energie-ertrag GJ/ (ha a)
<b>Mais, Stuttgart-Hohenheim, 2005</b>													
Gavott	Korn	S250	T1 12.09.05	3		97,6	0,410	0,778	0,9	52,7			
Gavott	Lieschen	S250	T1 12.09.05	3		96,7	0,333	0,655	0,4	50,8			
Gavott	Spindel	S250	T1 12.09.05	3		98,3	0,314	0,626	1,7	50,2			
Gavott	Rest	S250	T1 12.09.05	3		93,8	0,319	0,624	0,6	51,0			
Gavott	Korn	S250	T2 26.09.05	3		98,2	0,393	0,763	0,5	51,5			
Gavott	Lieschen	S250	T2 26.09.05	3		95,8	0,326	0,640	0,7	50,9			
Gavott	Spindel	S250	T2 26.09.05	3		98,4	0,303	0,597	3,6	50,7			
Gavott	Rest	S250	T2 26.09.05	3		93,2	0,318	0,613	2,8	51,9			
Gavott	Korn	S250	T3 10.10.05	3		97,6	0,418	0,792	2,0	52,8			
Gavott	Lieschen	S250	T3 10.10.05	3		96,6	0,323	0,634	5,0	51,0			
Gavott	Spindel	S250	T3 10.10.05	3		98,6	0,304	0,599	1,0	50,7			
Gavott	Rest	S250	T3 10.10.05	3		93,6	0,313	0,605	1,7	51,6			
Gavott	Korn	S250	T4 24.10.05	3		97,5	0,415	0,787	0,4	52,8			
Gavott	Lieschen	S250	T4 24.10.05	3		96,0	0,332	0,650	0,8	51,1			
Gavott	Spindel	S250	T4 24.10.05	3		98,6	0,302	0,591	3,5	51,0			
Gavott	Rest	S250	T4 24.10.05	3		92,8	0,320	0,621	1,3	51,5			

Tab. 9.2: Methanerträge eigener Untersuchungen (Fortsetzung)

Substrat	Substrat-eigenschaften	Reifezahl	Ernte	Anzahl der Versuche	TS [%]	oTS % der TS	Methan-ertrag [Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg oTS]	Biogas-ertrag [Nm <sup>3</sup> /kg oTS]	rel. STD [%]	Methan-gehalt [%]	TM-Ertrag [dt/(ha a)]	Methan-hektar-ertrag [Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /(ha a)]	Energie-ertrag GJ/(ha a)
<b>Mais, Stuttgart-Hohenheim, 2005</b>													
KXA 5243	Korn	S400	T1 12.09.05	2		97,9	0,393	0,772	1,5	50,9			
KXA 5243	Lieschen	S400	T1 12.09.05	3		97,1	0,357	0,707	0,2	50,5			
KXA 5243	Spindel	S400	T1 12.09.05	3		98,7	0,329	0,649	3,3	50,7			
KXA 5243	Rest	S400	T1 12.09.05	3		93,5	0,330	0,634	1,1	52,0			
KXA 5243	Korn	S400	T2 26.09.05	3		98,2	0,391	0,763	1,1	51,3			
KXA 5243	Lieschen	S400	T2 26.09.05	3		97,0	0,350	0,691	1,5	50,6			
KXA 5243	Spindel	S400	T2 26.09.05	3		98,8	0,324	0,636	2,3	51,0			
KXA 5243	Rest	S400	T2 26.09.05	3		93,8	0,326	0,633	0,9	51,5			
KXA 5243	Korn	S400	T3 10.10.05	3		98,1	0,398	0,774	1,1	51,4			
KXA 5243	Lieschen	S400	T3 10.10.05	3		96,3	0,347	0,677	1,5	51,3			
KXA 5243	Spindel	S400	T3 10.10.05	3		98,7	0,319	0,622	3,5	51,3			
KXA 5243	Rest	S400	T3 10.10.05	3		93,3	0,319	0,619	0,7	51,6			
KXA 5243	Korn	S400	T4 24.10.05	3		98,3	0,384	0,748	2,2	51,4			
KXA 5243	Lieschen	S400	T4 24.10.05	3		95,8	0,335	0,667	2,5	50,2			
KXA 5243	Spindel	S400	T4 24.10.05	3		98,7	0,299	0,598	2,6	50,0			
KXA 5243	Rest	S400	T4 24.10.05	3		92,9	0,319	0,620	2,5	51,4			

Tab. 9.2.1: Methanerträge eigener Untersuchungen (Fortsetzung)

Substrat	Substrat-eigenschaften	Reifenzahl	Ernte	Anzahl der Versuche	TS [%]	oTS % der TS [%]	Methan-ertrag [Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg oTS]	Biogas-ertrag [Nm <sup>3</sup> /kg oTS]	rel. STD [%]	Methan-gehalt [%]	TM-Ertrag [dt/(ha a)]	Methan-hektar-ertrag [Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> / (ha a)]	Energie-ertrag GJ/ (ha a)
<b>Mais, Stuttgart-Hohenheim, 2006</b>													
Gavott	GP	S250	T1 12.09.06	2	30,0	96,0	0,339	0,658	1,4	51,5	105,3	3421	123
Gavott	GP	S250	T2 28.09.06	3	37,2	96,2	0,349	0,684	1,7	51,1	122,9	4166	150
Gavott	GP	S250	T3 10.10.06	3	43,8	96,3	0,362	0,695	1,5	52,0	139,7	4865	175
Gavott	GP	S250	T4 24.10.06	3	45,3	96,3	0,327	0,629	1,4	52,1	141,5	4460	161
KXA5233	GP	S300	T1 12.09.06	3	28,4	96,1	0,329	0,642	4,3	51,2	135,2	4269	154
KXA5233	GP	S300	T2 28.09.06	3	35,5	96,6	0,343	0,673	3,0	51,0	151,7	5030	181
KXA5233	GP	S300	T3 10.10.06	3	40,0	96,8	0,349	0,682	1,0	51,1	156,3	5276	190
KXA5233	GP	S300	T4 24.10.06	3	43,7	96,4	0,348	0,679	0,7	51,3	146,9	4932	178
Mikado	GP	S500	T1 12.09.06	3	21,8	95,9	0,341	0,670	1,5	50,9	130,2	4263	153
Mikado	GP	S500	T2 28.09.06	3	25,8	96,2	0,334	0,663	2,1	50,3	154,5	4956	178
Mikado	GP	S500	T3 10.10.06	3	29,3	95,7	0,338	0,661	0,5	51,2	165,5	5354	193
Mikado	GP	S500	T4 24.10.06	3	34,3	96,1	0,339	0,661	1,1	51,3	191,4	6244	225

Tab. 9.2.1: Methanerträge eigener Untersuchungen (Fortsetzung)

Substrat	Substrat-eigenschaften	Reifezahl	Ernte	Anzahl der Versuche [n]	TS [%]	oTS % der TS [%]	Methan-ertrag [Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg oTS]	Biogas-ertrag [Nm <sup>3</sup> /kg oTS]	rel. STD [%]	Methan-gehalt [%]	TM-Ertrag [dt/(ha a)]	Methan-ektar-ertrag [Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> / (ha a)]	Energie-ertrag GJ/ (ha a)
<b>Fruchtfolge (Zwischenfrucht, Mais, Weizen) Ihinger Hof, 2004/2005</b>													
W. Weidelgr	GP		TM1 (222 d)	3	21,7	91,8	0,374	0,722	2,1	51,8	13,6	467	17
Grünroggen	GP		TM1 (222 d)	3	19,3	92,8	0,381	0,725	0,8	52,6	39,5	1397	50
Winterrübsen	GP		TM1 (222 d)	3	12,9	90,8	0,343	0,678	2,7	50,6	20,6	641	23
Gavott	GP	S250	TM1 (190 d)	2	41,9	96,2	0,329	0,640	4,2	51,5	207,1	6559	236
Méridienne	GP	S400-450	TM1 (190 d)	3	35,4	96,8	0,349	0,687	1,3	50,8	215,8	7297	263
Mikado	GP	S500	TM1 (190 d)	3	24,2	95,2	0,343	0,679	1,9	50,5	204,8	6690	241
Doge	GP	FAO700	TM1 (190 d)	3	19,9	95,6	0,334	0,653	4,2	51,2	215,6	6888	248
Weizen	Korn		TM1	3	91,2	98,4	0,362	0,692	2,1	52,3	97,4	3161	114
Weizen	Stroh		TM1	3	92,8	94,1	0,288	0,537	0,7	53,5	88,1	2214	80
W. Weidelgr	GP		TM2 (246 d)	3	18,6	92,1	0,371	0,713	0,7	52,0	39,1	1342	48
Grünroggen	GP		TM2 (246 d)	3	18,9	93,2	0,366	0,692	3,0	52,8	71,1	2451	88
Winterrübsen	GP		TM2 (246 d)	3	15,8	91,3	0,353	0,673	4,7	52,5	37,9	1223	44
Gavott	GP	S250	TM2 (155 d)	3	34,3	96,2	0,352	0,692	2,1	50,9	232,4	7877	284
Méridienne	GP	S400-450	TM2 (155 d)	2	25,9	95,3	0,359	0,701	4,7	51,2	201,1	6943	250
Mikado	GP	S500	TM2 (155 d)	3	21,9	95,0	0,357	0,697	2,4	51,3	215,5	7322	264
Doge	GP	FAO700	TM2 (155 d)	2	19,2	94,4	0,351	0,670	5,8	52,4	202,3	6716	242
Weizen	Korn		TM2	2	91,4	98,4	0,365	0,706	1,6	51,7	96,1	3154	114
Weizen	Stroh		TM2	3	92,2	94,2	0,292	0,564	1,3	51,7	98,4	2491	90

Tab. 9.2.1: Methanerträge eigener Untersuchungen (Fortsetzung)

Substrat	Substrat-eigenschaften	Reifezahl	Düngeniveau	Anzahl der Versuche	TS [%]	oTS % der TS [%]	Methan-ertrag [Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg oTS]	Biogas-ertrag [Nm <sup>3</sup> /kg oTS]	rel. STD [%]	Methan-gehalt [%]	TM-Ertrag [dt/(ha a)]	Methan-ektar-ertrag [Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> / (ha a)]	Energie-ertrag GJ/ (ha a)
<b>Mais, Rutenhirse, Schlempe Düngenniveaus 2005</b>													
Rutenhirse	zweischür.	1. Schnitt	N1	2	24,7	93,0	0,324	0,623	1,3	52,0	26,0	785	28
Rutenhirse	zweischür.	1. Schnitt	N2	3	23,0	92,8	0,316	0,608	1,8	52,0	36,7	1078	39
Rutenhirse	zweischür.	1. Schnitt	N3	3	21,8	92,8	0,316	0,609	1,8	51,9	43,4	1274	46
Rutenhirse	zweischür.	2. Schnitt	N1	3	58,8	94,2	0,300	0,588	1,2	51,0	7,1	200	7
Rutenhirse	zweischür.	2. Schnitt	N2	3	49,1	94,8	0,300	0,578	1,4	51,9	26,1	622	22
Rutenhirse	zweischür.	2. Schnitt	N3	3	52,3	94,8	0,296	0,577	2,0	51,3	42,0	1178	42
Rutenhirse	einschürig		N1	3	71,2	95,8	0,250	0,494	4,4	50,5	93,3	2234	80
Rutenhirse	einschürig		N2	3	68,4	96,4	0,248	0,497	10,0	49,8	135,5	3234	116
Rutenhirse	einschürig		N3	3	64,9	95,9	0,260	0,504	6,3	51,5	159,3	3967	143
Mais	GP		N1	3	28,4	95,4	0,342	0,674	1,8	50,7	114,5	3732	134
Mais	GP		N2	3	29,3	95,7	0,338	0,662	0,8	51,1	163,6	5302	191
Mais	GP		N3	3	28,7	95,7	0,342	0,668	1,1	51,2	191,7	6283	226
Rutenhirse	Schlempe	1. Schnitt	N1	3		88,5	0,293	0,545	1,7	53,7			
Rutenhirse	Schlempe	1. Schnitt	N2	3		87,5	0,292	0,549	0,5	53,3			
Rutenhirse	Schlempe	1. Schnitt	N3	3		88,7	0,306	0,572	0,3	53,5			
Rutenhirse	Schlempe	2. Schnitt	N1	3		91,0	0,294	0,558	0,8	52,7			
Rutenhirse	Schlempe	2. Schnitt	N2	3		90,8	0,282	0,541	6,1	52,1			
Rutenhirse	Schlempe	2. Schnitt	N3	3		90,5	0,300	0,563	5,2	53,3			
Rutenhirse	Schlempe	einschürig	N1	3		92,6	0,298	0,570	1,7	52,3			
Rutenhirse	Schlempe	einschürig	N2	3		92,1	0,282	0,536	1,6	52,6			
Rutenhirse	Schlempe	einschürig	N3	3		91,6	0,276	0,529	1,4	52,3			
Mais	Schlempe		N1	3		90,7	0,323	0,611	0,5	52,9			
Mais	Schlempe		N2	3		89,9	0,312	0,579	2,1	53,8			
Mais	Schlempe		N3	3		88,2	0,299	0,557	1,6	53,8			

Tab. 9.2.1: Methanerträge eigener Untersuchungen (Fortsetzung)

Substrat	Substrat-eigenschaften	Reifezahl	Ernte	Anzahl der Versuche	TS [%]	oTS % der TS [%]	Methan-ertrag [Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg oTS]	Biogas-ertrag [Nm <sup>3</sup> /kg oTS]	rel. STD [%]	Methan-gehalt [%]	TM-Ertrag [dt/(ha a)]	Methan-ertrag [Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> / (ha a)]	Energie-ertrag GJ/ (ha a)
<b>Triticale 2005, Schlempe</b>													
Triticale	GP Silage	Ahrensich	T1	3	15,8	92,4	0,357	0,631	2,8	56,5			
Triticale	GP Silage	Milchreife	T2	3	27,6	94,8	0,369	0,678	2,0	54,4			
Triticale	GP Silage	Teigreife	T3	3	36,8	94,0	0,358	0,679	1,0	52,7			
Triticale	GP	Ahrensich	T1	3	16,9	92,8	0,337	0,620	1,5	54,4			
Triticale	GP	Milchreife	T2	3	28,3	95,2	0,311	0,583	5,8	53,3			
Triticale	GP	Teigreife	T3	3	40,7	95,3	0,289	0,546	0,3	52,9			
Triticale	Korn	reif	T4	3		98,0	0,365	0,696	0,5	52,4			
Triticale	Stroh	reif	T4	2		94,0	0,292	0,548	0,3	53,4			
Triticale	Korn	totreif	T5	3		97,9	0,362	0,692	1,4	52,2			
Triticale	Stroh	totreif	T5	2		94,7	0,285	0,536	0,2	53,0			
T.-Schlempe	GP	Ahrensich	T1	3		87,5	0,276	0,511	2,2	54,1			
T.-Schlempe	GP	Milchreife	T2	3		90,8	0,293	0,547	0,7	53,6			
T.-Schlempe	GP	Teigreife	T3	3		90,6	0,298	0,556	1,6	53,6			
T.-Schlempe	Korn	reif	T4	3		94,4	0,340	0,625	1,6	54,4			
T.-Schlempe	Stroh	reif	T4	3		91,0	0,281	0,528	3,3	53,3			
T.-Schlempe	Korn	totreif	T5	3		95,0	0,362	0,674	0,8	53,8			
T.-Schlempe	Stroh	totreif	T5	3		92,4	0,275	0,527	0,5	52,2			

Tab. 9.2.1: Methanerträge eigener Untersuchungen (Fortsetzung)

## 9.3 Ethanolausbeuten eigener Untersuchungen

Substrat	Substrat-eigenschaften	Reifezahl/Düngung	Ernte	Anzahl der Versuche [n]	TS [%]	oTS % der TS [%]	Ethanol-ausbeute [L AMg TS]	rel. STD [%]	Änderung [%]	Energieertrag GJ/ (ha a)
<b>Ethanolausbeute verschiedener Nawaro</b>										
Rutenhirse	GP	N1	2004	2	33,7	94,4	153	12,4	100	
Rutenhirse	GP	N2	2004	2	32,4	94,5	143	0,9	94	
Rutenhirse	GP	N3	2004	2	32,2	94,6	144	1,4	94	
Mais	GP	N1	2004	2	26,7	95,1	263	0,2	100	
Mais	GP	N2	2004	2	24,5	95,2	333	10,2	126	
Mais	GP	N3	2004	2	24,5	94,8	278	6,4	105	
Rutenhirse	GP	N1	2005	2	24,7	93,0	110	9,2	100	
Rutenhirse	GP	N2	2005	2	23,0	92,8	115	6,7	104	
Rutenhirse	GP	N3	2005	2	21,8	92,8	98	7,5	89	
Mais	GP	N1	2005	2	28,4	95,4	234	10,2	100	
Mais	GP	N2	2005	2	29,3	95,7	243	5,1	104	
Mais	GP	N3	2005	2	28,7	95,7	253	5,1	108	
Gavott	GP	S250	T1 12.09.06	2	30,0	96,0	259	2,9	100	64
Gavott	GP	S250	T2 28.09.06	2	37,2	96,2	265	1,5	102	76
Gavott	GP	S250	T3 10.10.06	2	43,8	96,3	269	1,4	104	88
Gavott	GP	S250	T4 24.10.06	2	45,3	96,3	269	0,2	104	89
KXA5233	GP	S300	T1 12.09.06	2	28,4	96,1	251	0,1	100	80
KXA5233	GP	S300	T2 28.09.06	2	35,5	96,6	285	0,8	113	101
KXA5233	GP	S300	T3 10.10.06	2	40,0	96,8	291	2,8	116	106
KXA5233	GP	S300	T4 24.10.06	2	43,7	96,4	288	1,1	115	99
Mikado	GP	S500	T1 12.09.06	2	21,8	95,9	242	0,9	100	74
Mikado	GP	S500	T2 28.09.06	2	25,8	96,2	242	2,3	100	87
Mikado	GP	S500	T3 10.10.06	2	29,3	95,7	250	0,7	103	97
Mikado	GP	S500	T4 24.10.06	2	34,3	96,1	266	6,2	110	119
Grünroggen	GP		T1 2006	2	14,17		130	16,2		
Grünroggen	GP		T2 2006	2	15,41		145	10,7		
Weil. Weidelgras	GP		2006	2	11,81		88	29,3		
Winterrüben	GP		2006	2	8,27		122	34,2		

Tab. 9.3.1: Ethanolausbeuten eigener Untersuchungen

Substrat	Substrat-eigenschaften	Reifezahl/Düngung	Ernte	Anzahl der Versuche [n]	TS [%]	oTS % der TS [%]	Ethanol-ausbeute [L A/Mg TS]	rel. STD [%]	Änderung [%]	Energie-ertrag GJ/(ha a)
<b>Ethanolausbeute verschiedener Nawaro</b>										
Triticale	GP	Ährensch	T1 2005	2	16,9	92,8	136	22,5	100	
Triticale	GP	Milchreife	T2 2005	2	28,3	95,2	179	0,2	132	
Triticale	GP	Teigreife	T3 2005	2	40,7	95,3	223	0,1	164	
Triticale	Korn	reif	T4 2005	2		98,0	490	2,0	360	
Triticale	Stroh	reif	T4 2005	2		94,0	33	13,7	24	
Triticale	Korn	totreif	T5 2005	2		97,9	425	7,3	312	
Triticale	Stroh	totreif	T5 2005	2		94,7	34	2,7	25	
Triticale	GP Silage	Ährensch	T1 2005	2	15,8	92,4	26	3,2	100	
Triticale	GP Silage	Milchreife	T2 2005	2	27,6	94,8	123	5,3	471	
Triticale	GP Silage	Teigreife	T3 2005	2	36,8	94,0	137	5,1	526	
Mikado	GP Silage	Teigreife	2005	2	26,6		187	3,7		

Tab. 9.3.1: Ethanolausbeuten eigener Untersuchungen (Fortsetzung)

## 9.4 Fließschemata zur Bilanzierung



Abb. 9.4.1: Szenario 1: Mais in Biogas ohne Gärrestverwertung



Abb. 9.4.2: Szenario 2: Mais in Biogas mit Gärrestverwertung

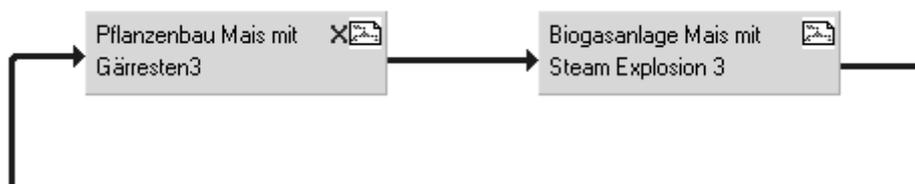


Abb. 9.4.3: Szenario 3: Mais in Biogas mit Gärrestverwertung und Steam Explosion

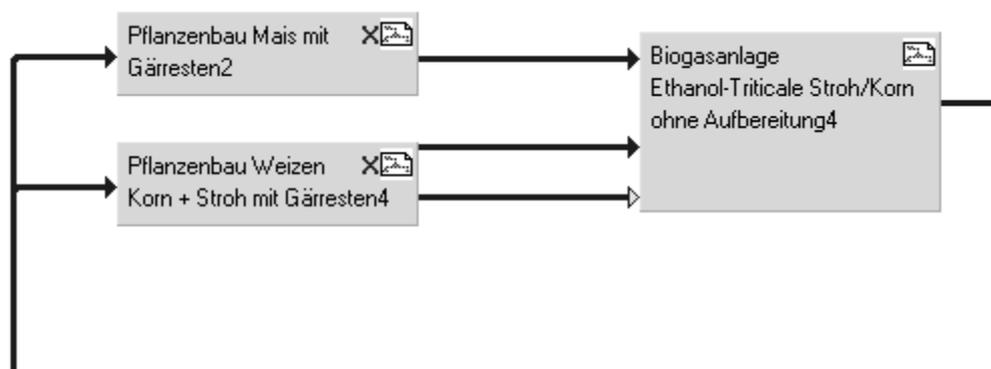


Abb. 9.4.4: Szenario 4: Getreidekorn in Bioethanol und Mais/Getreidestroh/Schlempe in Biogas mit Gärrestverwertung



Abb. 9.4.5: Szenario 5: Maisganzpflanze in Bioethanol und Maisschlempe in Biogas mit Gärrestverwertung

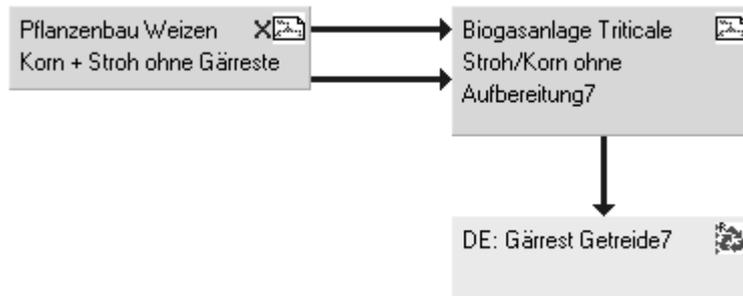


Abb. 9.4.6: Szenario 6: Getreide in Biogas ohne Gärrestverwertung

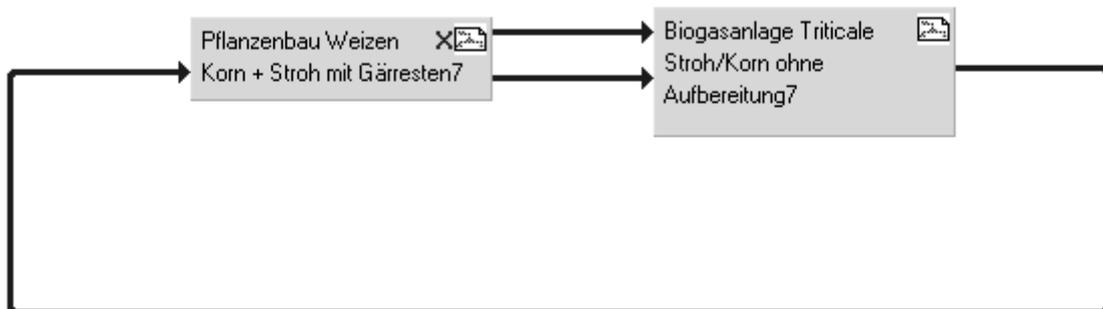


Abb. 9.4.7: Szenario 7: Getreide in Biogas mit Gärrestverwertung



Abb. 9.4.8: Szenario 8: Getreide in Biogas mit Gärrestverwertung und Steam Explosion

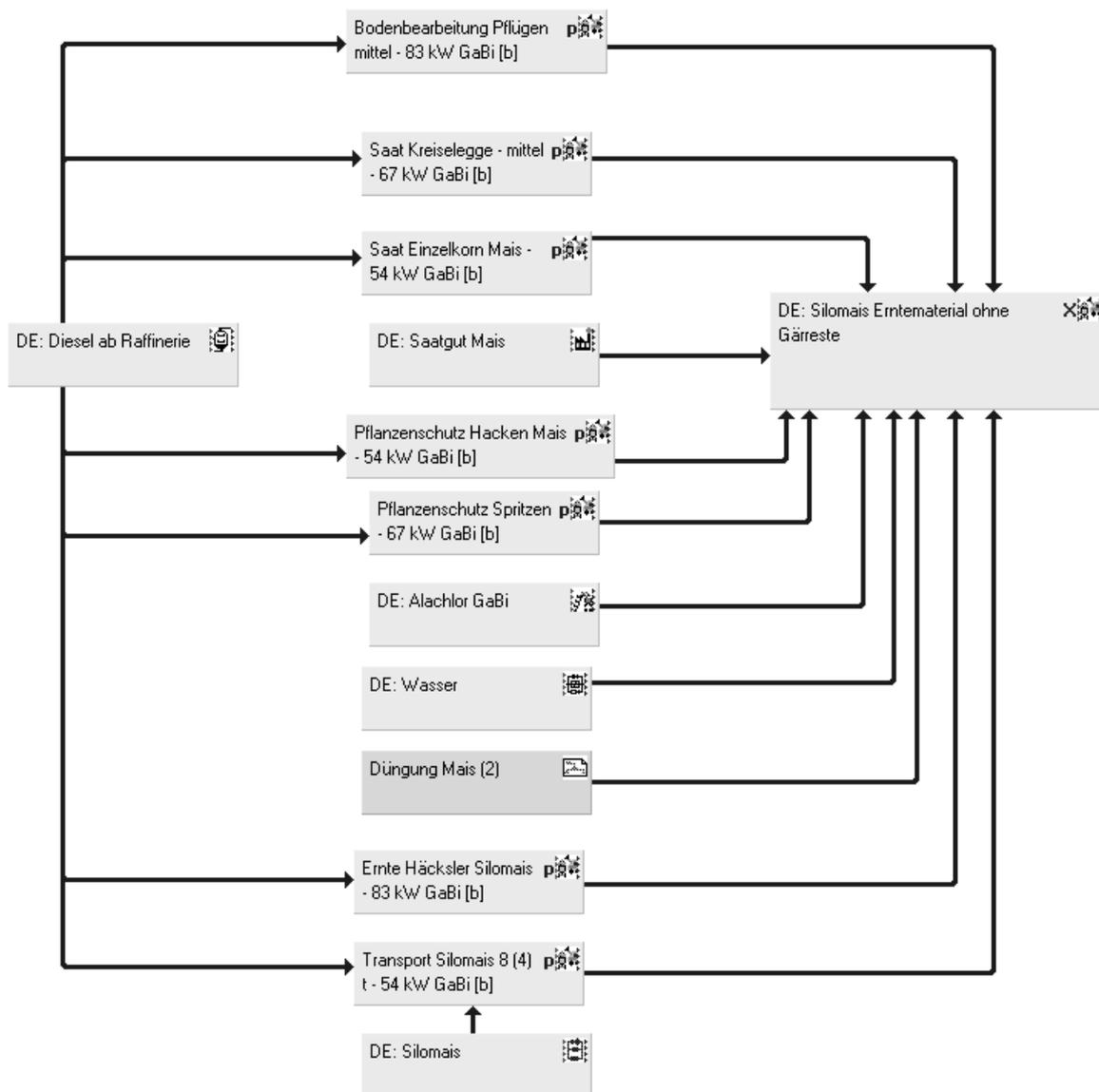


Abb. 9.4.9: Maisanbau ohne Gärrestverwertung (zu 1) (Böhmel)

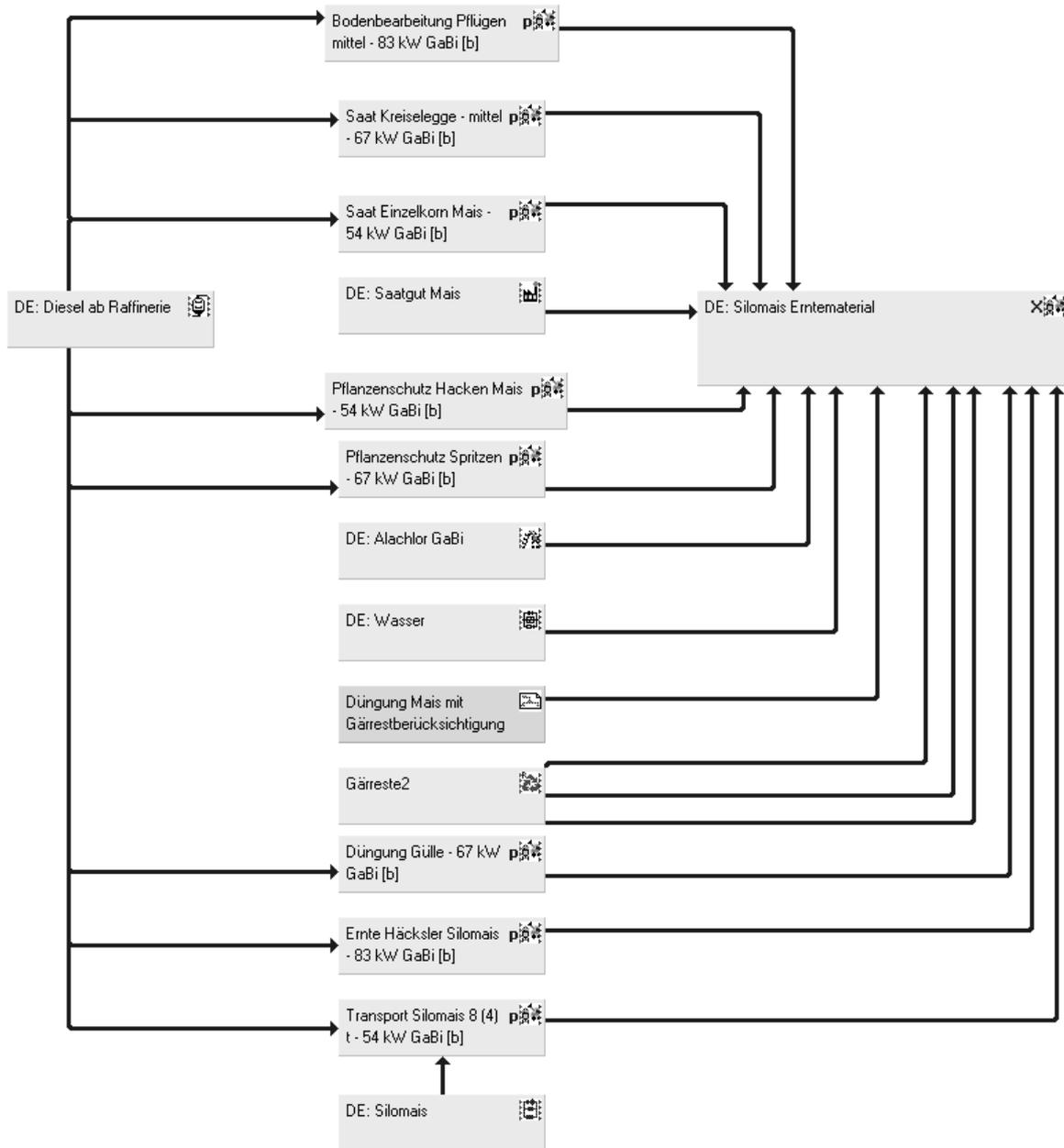


Abb. 9.4.10: Maisanbau mit Gärrestverwertung (zu 2 bis 5) (Böhmel)

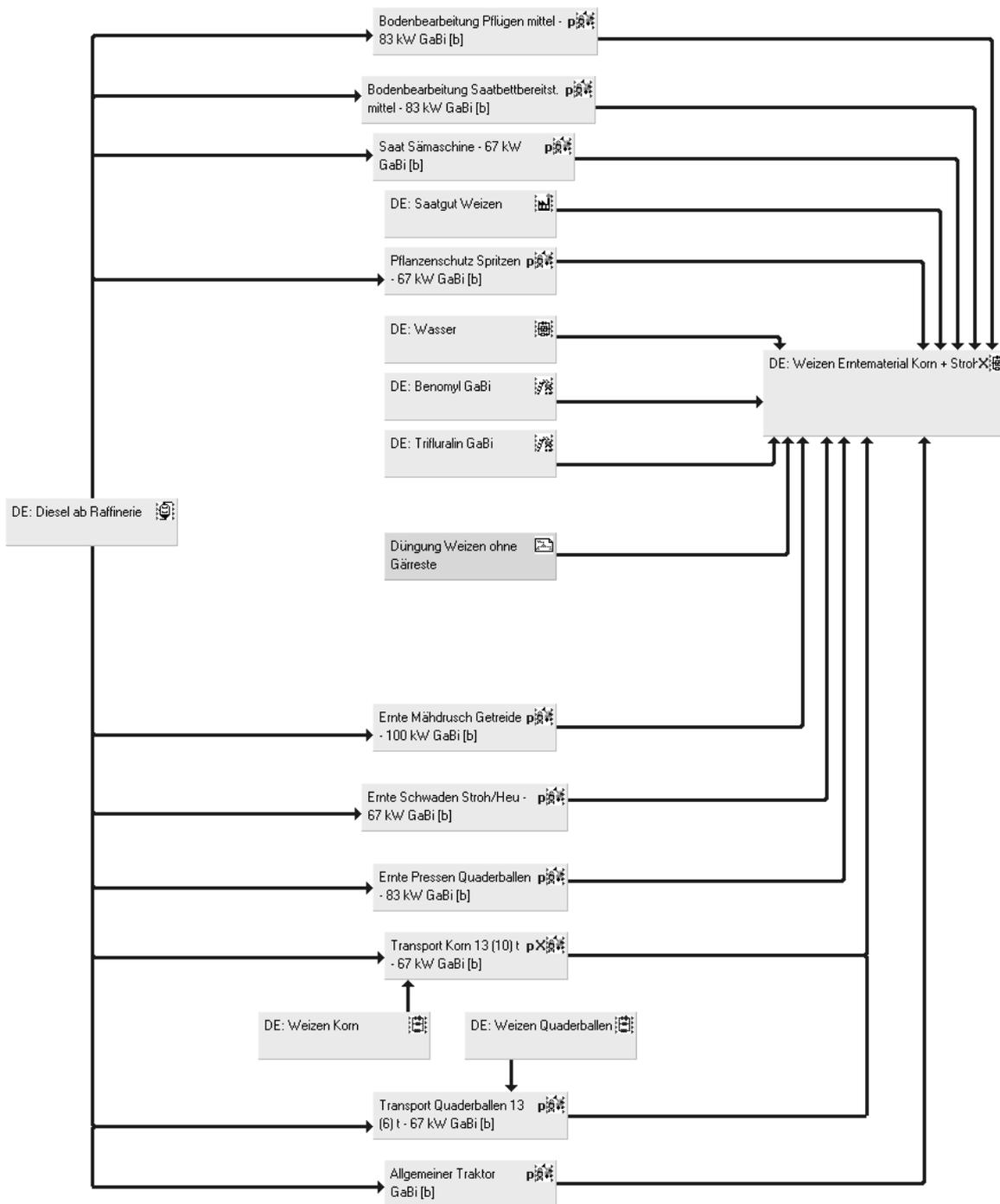


Abb. 9.4.11: Getreideanbau ohne Gärrestverwertung (zu 6) (Böhmel)

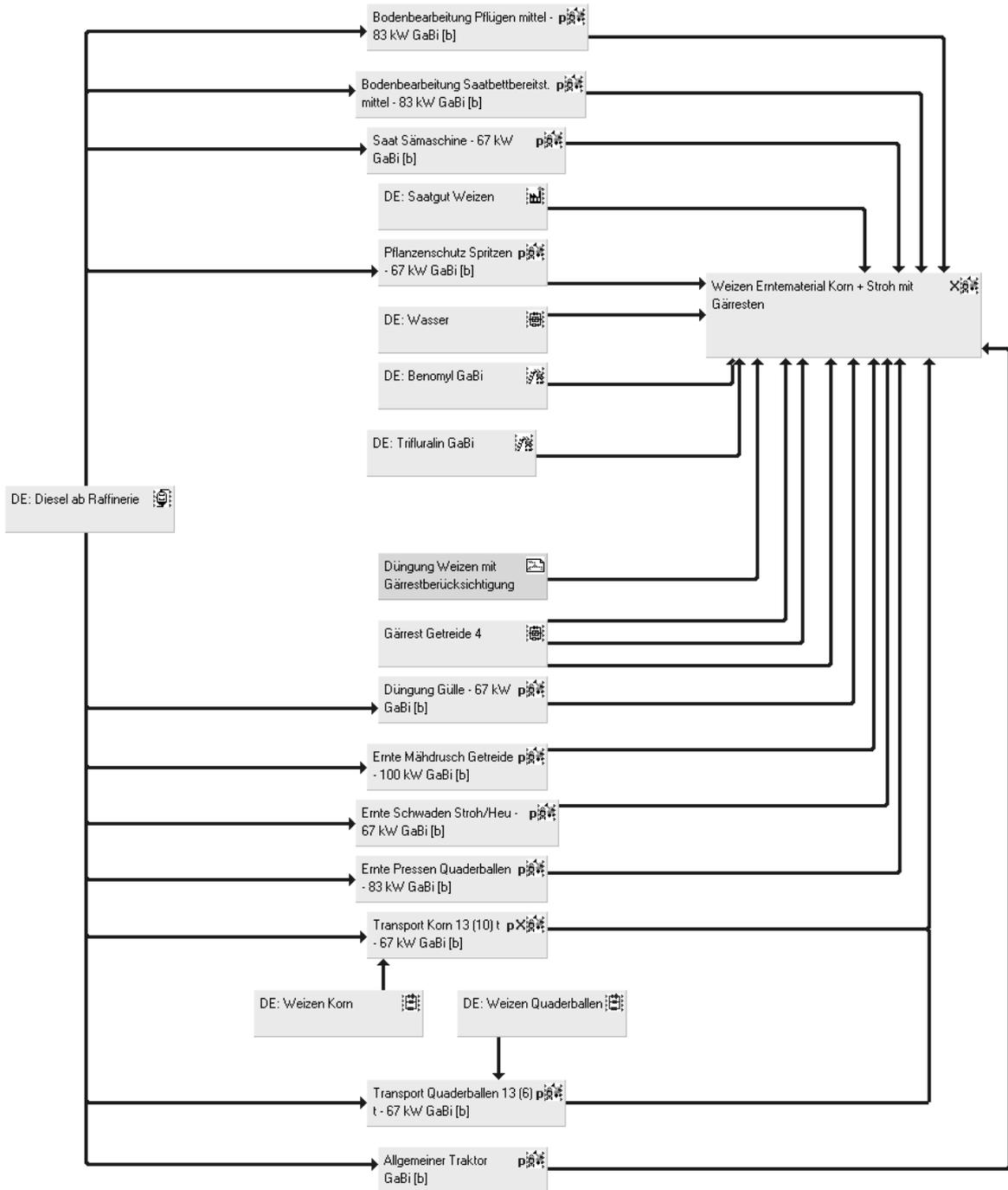


Abb. 9.4.12: Getreideanbau mit Gärrestverwertung (zu 4, 7, 8) (Böhmel)

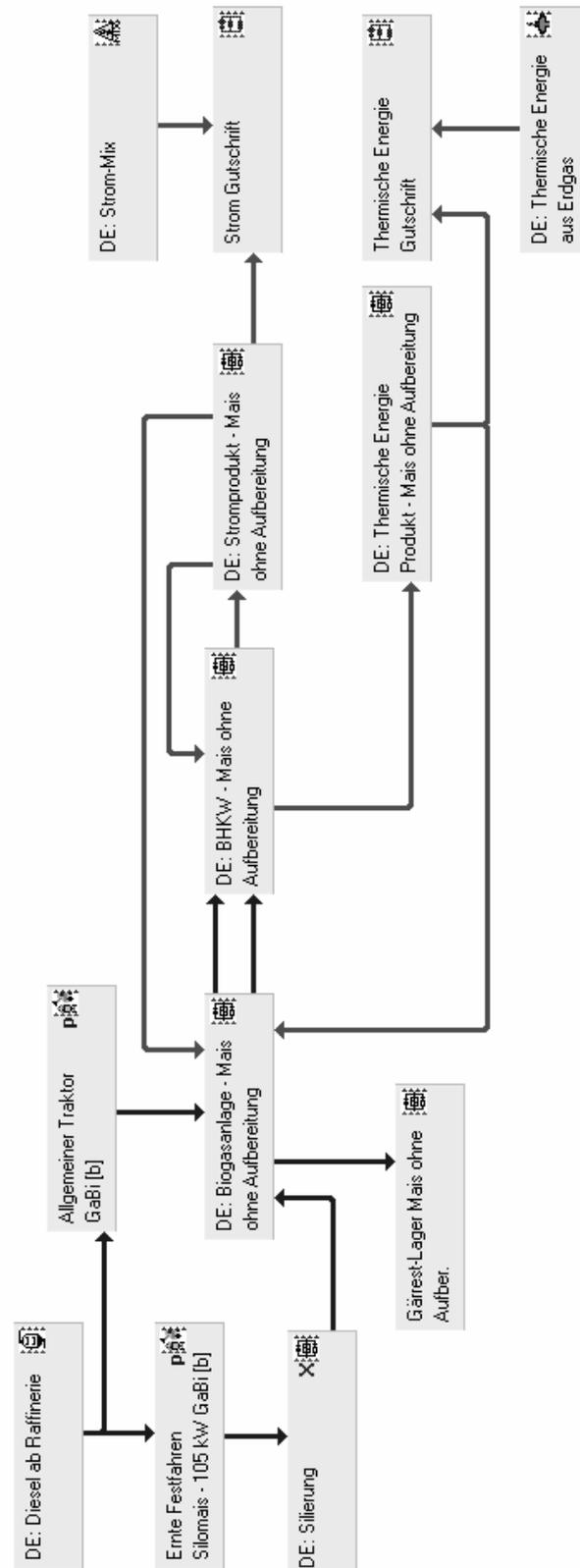


Abb. 9.4.13: Mais in Biogas (zu 1 und 2)

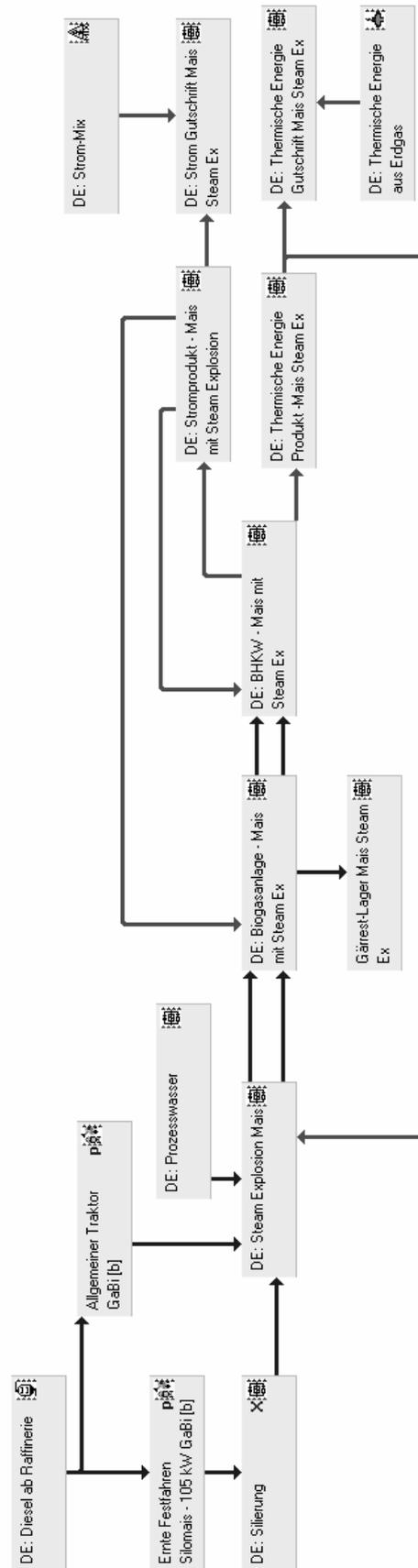


Abb. 9.4.14: Mais in Biogas mit Steam Explosion (zu 3)

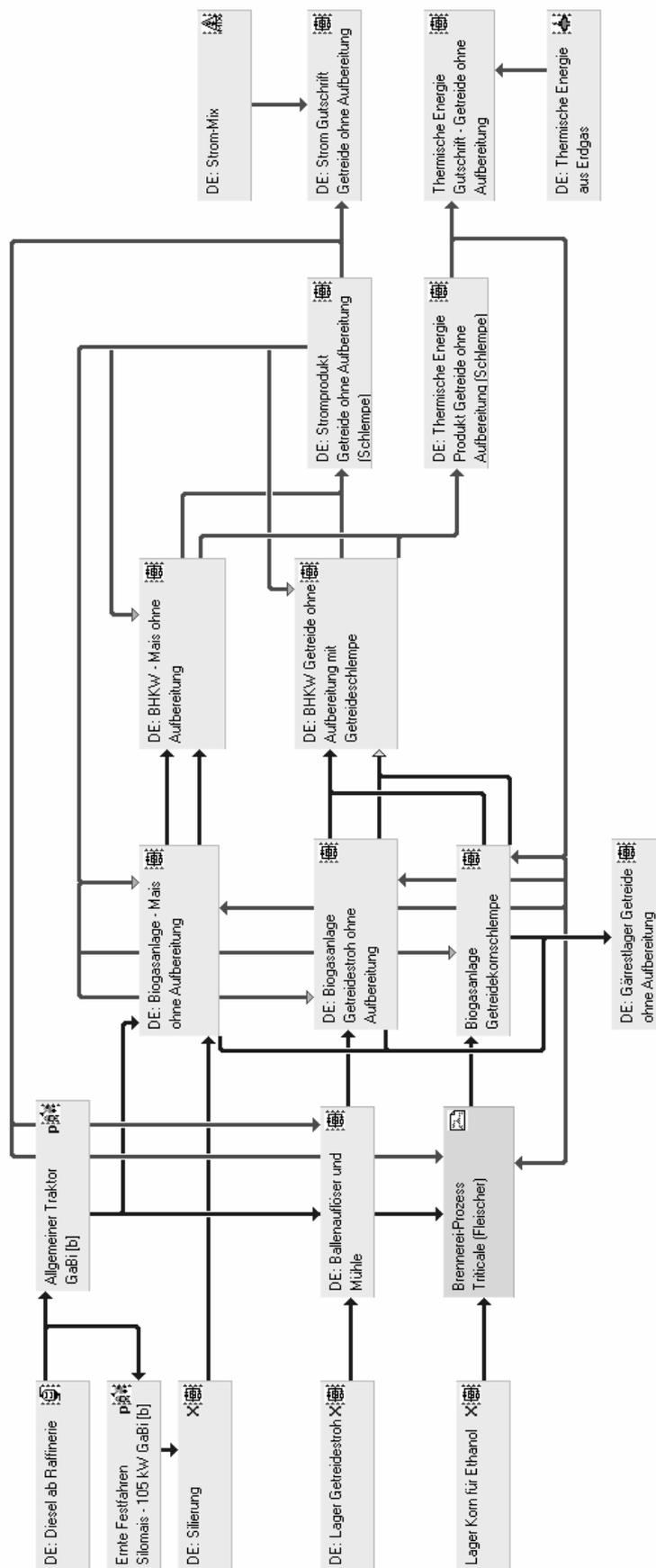


Abb. 9.4.15: Getreidekorn in Bioethanol und Mais/Getreidestroh/Schlempe in Biogas (zu 4)

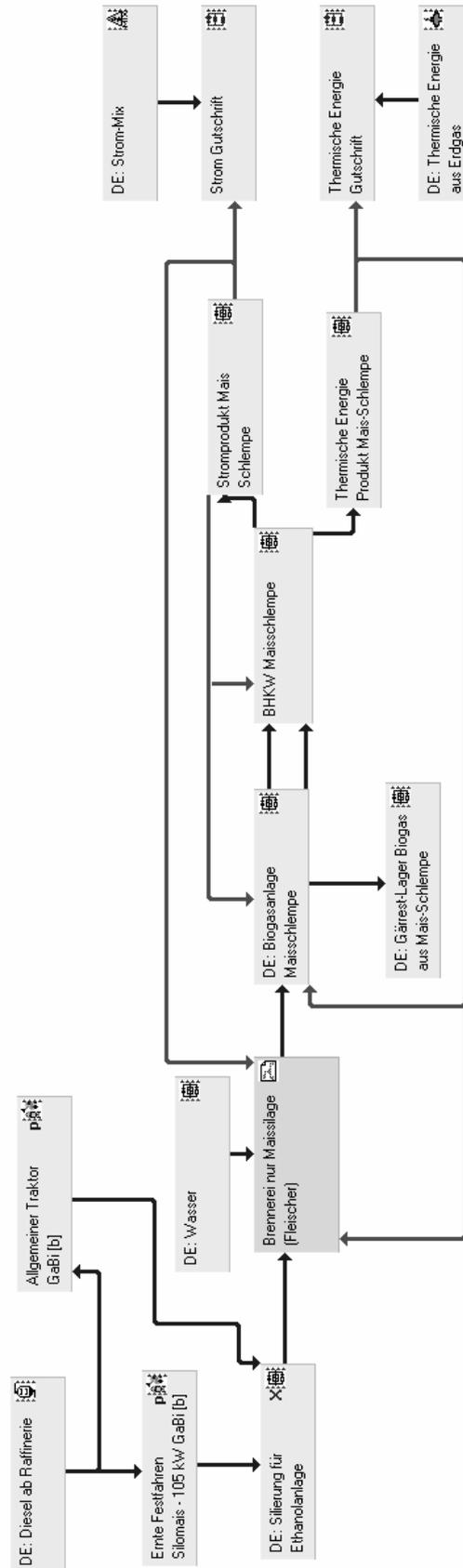


Abb. 9.4.16: Maisganzpflanze in Bioethanol und Maisschlempe in Biogas (zu 5)

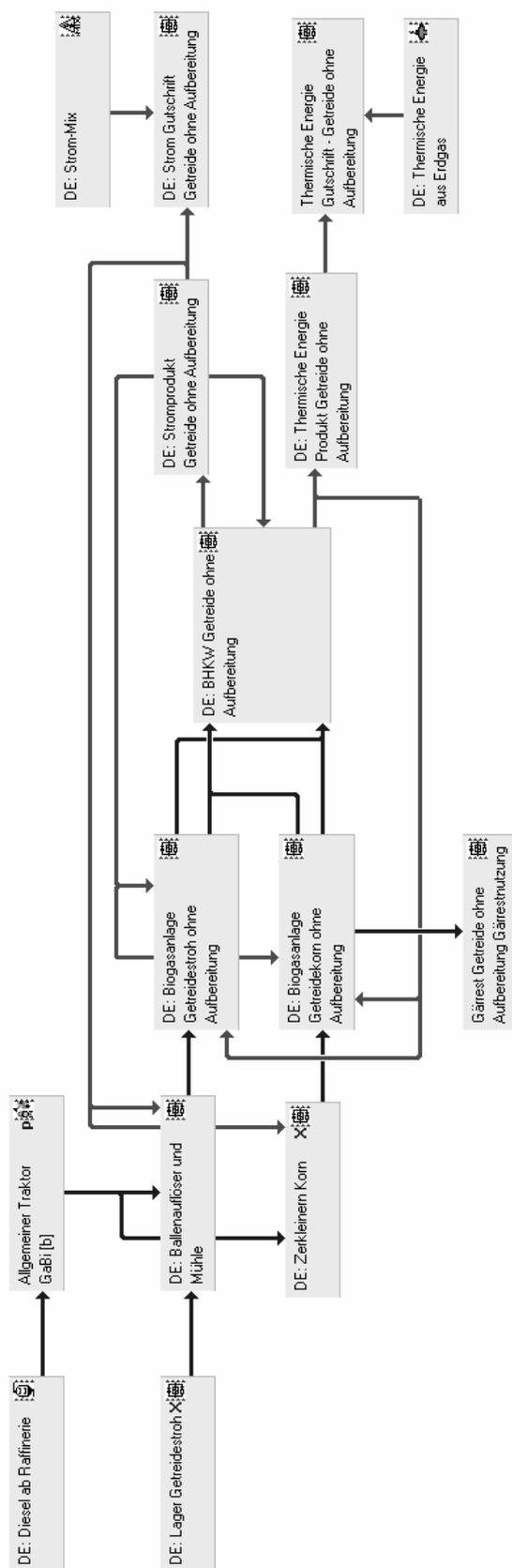


Abb. 9.4.17: Getreide in Biogas (zu 6 und 7)

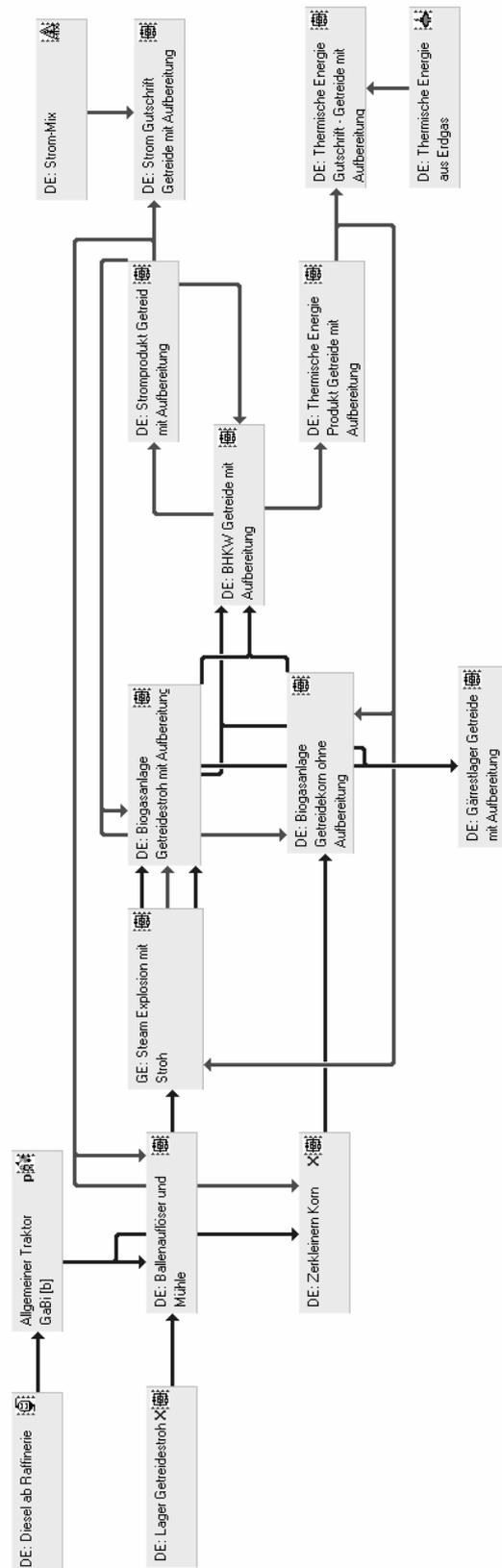


Abb. 9.4.18: Getreide in Biogas (zu 8)

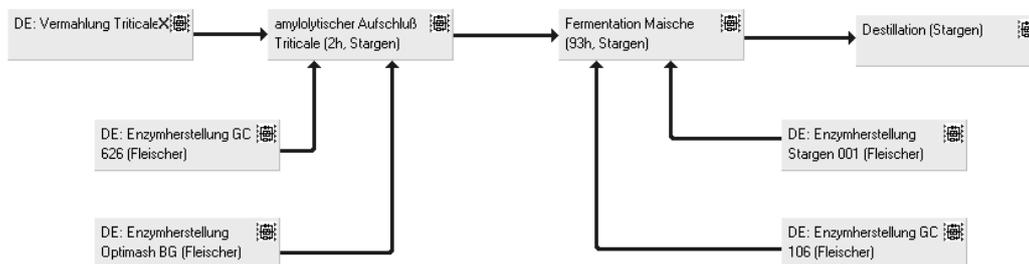


Abb. 9.4.19: Getreide in Ethanol (zu 4) (Fleischer)

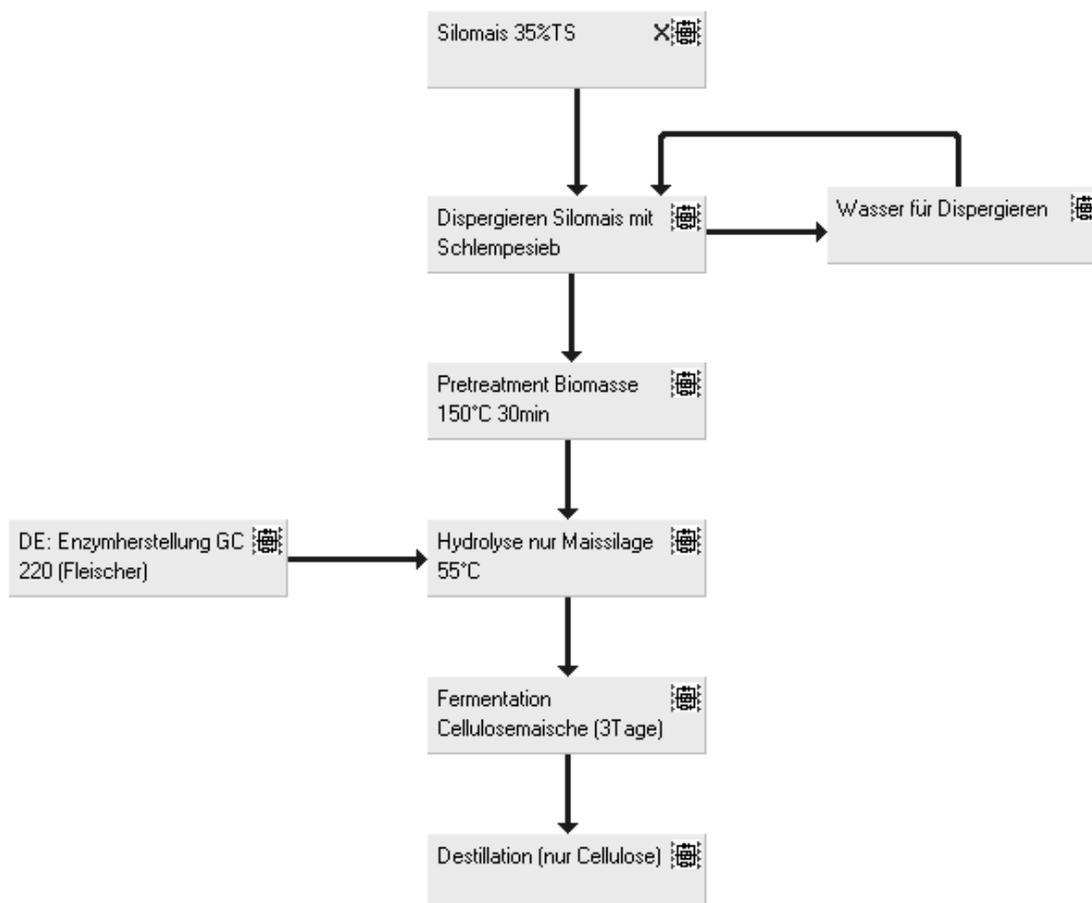


Abb. 9.4.20: Mais in Ethanol (zu 4 und 5) (Fleischer)

## **Abstract: Investigations of the pre-treatment and the conversion of energy crops into biogas and bioethanol**

Due to finite fossil resources, one opportunity for the future is to increase the supply of energy out of renewable energy sources.

One of many opportunities is the use of biomass, which offers plenty combinations of different kinds of biomass, paths of utilization and conversion techniques for a flexible adaptation to natural local and regional frameworks as well as the anthropogenic needs.

For an efficient utilization of the limited arable land for the supply of bioenergy, there is a need of up-to-date and proof data about specific energy yields and yields per hectare.

The aim of this investigation was to determine these data for the biogas and bioethanol sectors. Batch-tests were carried out in laboratory scaled digesters to investigate specific biogas and bioethanol yields. Additionally the testing of different techniques of pre-treatment for energy crops and their effects on the biogas yield and the progression of the formation of methane were focused.

The conversion of maize silage and full ripe triticale into biogas and bioethanol was compared by an energy and environmental balance. The steam explosion technique was included.

### ***Pre-treatment***

The steam explosion pre-treatment of biomass increases the speed of formation of methane and partly increases the methane yields. The effects differ depending on the kind of biomass and the stage of ripening. Other techniques of pre-treatment like microwaving and cooking did not show significant or partly negative effects. A variation of parameters in the trial setup might be interesting.

Besides the positive effects of the steam explosion technique there are some arguments like the additional costs of investment, the diminished concentration of nutrients respectively the increase of material flow against it. The additional energy consumption, mostly thermal energy, can be supplied from waste heat out of the combined heat and power plant (CHP).

The screening and the production of technical enzymes for the efficient pre-degradation of raw materials containing high amounts of lignocellulose should be the subject of research and development in the future. The combination of biological

(enzymatic), chemical, thermal and mechanical pre-treatment techniques need to be investigated with the focus on energy efficiency.

### ***Methane yields of energy crops and stillage***

A broad number of biogas tests had been carried out on various maize cultivars. The specific methane yields of the maize cultivars varied over the harvesting date differently. The cultivars with a low ripening number reached higher specific methane yields. The dominant factor for the energy yield per hectare was the dry matter yield, not the specific methane yield. In general it is recommended to use well adapted cultivars with high dry matter yields and a good ensilaging behaviour. The catch crops increased the methane yields per hectare just partly. But for reasons of soil conservation the cultivation is recommended.

The nitrogen fertilizer had mostly a positive effect on the dry matter yields and the energy yields per hectare, respectively. Maize gained higher energy yields per hectare than switch grass.

The utilization of stillage out of whole maize plants or triticale's grain from the ethanol production as well as the utilization of by-products like straw in the biogas production could double the energy output per hectare compared to the simple ethanol production.

Further options for the optimization of the biogas production under conditions of practice are digester systems well-adapted on the substrate, the use of multi step systems and the development of analytic methods in order to gain effective process control.

### ***Correlation between chemical components and measured methane yields***

The specific methane yields calculated out of the neutral detergents fibre, starch, sugar, raw proteins and its substrate-specific factors were very close to the experimentally determined yields of the maize cultivars for the four harvesting times. But the measured and calculated values showed no correlation.

Whether the biogas tests can be replaced, by other methods or techniques of analysis of the components and the determination of additional components for the estimation of the potential of new cultivars, should be subject of further investigations.

### ***Bioethanol yields***

The energy yields on the conversion pathway bioethanol without using the by-products are lower than the yields via conversion into biogas, because the ethanol fermentation is limited on material that can be converted into sugar first. The advantage of the ethanol production is a fluid fuel as result of the process. Combining the ethanol production with a biogas plant, the by-products also can be used energetically and a gaseous energy carrier can be produced.

There are high potentials for the bioprocess engineering, for instance in breeding of microorganisms for the degradation of lignocellulosic biomass or of C5-sugar. Furthermore a process optimization of water and energy input is recommended.

### ***Energy and environmental balance***

Biogas as well as bioethanol (combined with biogas) is able to reduce the consumption of non-renewable energy carrier and its emission under the investigated scenarios and the scoop set.

A future task will be the development of differentiated and well-adapted concepts on the basis of a decision between (liquid) fuels or stationary supply of thermal and electrical energy out of biomass. The aim is an efficient use of the limited areas of arable land and forests for the supply with bioenergy carriers by a useful combination of biomass, paths of utilization and conversion technique depending on natural local and regional conditions as well as the anthropogenic needs.