

FORSCHUNGSBERICHT AGRARTECHNIK

des Fachausschusses Forschung und Lehre der
Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG)

501

Susanne Ohl

**Ermittlung der Biogas- und Methanausbeute
ausgewählter Nawaro**

Aus dem Institut für landwirtschaftliche Verfahrenstechnik
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
Prof. Dr. Eberhard Hartung

Ermittlung der Biogas- und Methanausbeute ausgewählter Nawaro

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Agrar- und Ernährungswissenschaftlichen Fakultät
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

vorgelegt von
Dipl.-Biol. Susanne Ohl
aus Berlin

Kiel 2011

Dekanin:	Prof. Dr. Karin Schwarz
1. Berichterstatter:	Prof. Dr. Eberhard Hartung
2. Berichterstatter:	Prof. Dr. Thomas Amon
Tag der mündlichen Prüfung:	14. Juli 2011

Die vorliegende Arbeit wurde am 25. Mai 2011 von der Agrar- und Ernährungswissenschaftlichen Fakultät der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel als „Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Agrarwissenschaften“ angenommen.

Tag der mündlichen Prüfung: 14. Juli 2011

Dekanin: Prof. Dr. Karin Schwarz
1. Berichterstatter: Prof. Dr. Eberhard Hartung
2. Berichterstatter: Prof. Dr. Thomas Amon

Mündliche Prüfung: Prof. Dr. Eberhard Hartung
Prof. Dr. Thomas Amon
PD Dr. Klaus Sieling
Prof. Dr. Hartmut Roweck

Gedruckt mit Genehmigung der Agrar- und Ernährungswissenschaftlichen Fakultät der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.

Alle Rechte vorbehalten. Die Verwendung von Texten und Bildern, auch auszugsweise, ist ohne Zustimmung des Autors urheberrechtswidrig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigung, Übersetzung, Mikroverfilmung sowie die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

© 2011

Im Selbstverlag: Susanne Ohl
Bezugsquelle: Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
Institut für landwirtschaftliche Verfahrenstechnik
Olshausenstr. 40
24098 Kiel
Deutschland

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für landwirtschaftliche Verfahrenstechnik der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel. Mein Dank gilt ...

...Herrn Prof. Dr. Eberhard Hartung für die Überlassung des Themas, das entgegengebrachte Vertrauen, die wissenschaftliche und menschliche Unterstützung, sowie für die Möglichkeit, diese Arbeit unter seiner hervorragenden Betreuung an der Christian-Albrechts-Universität anfertigen zu können.

...Herrn Prof. Dr. Thomas Amon für die Übernahme des Koreferats und für die Mitwirkung an der mündlichen Prüfung.

...Herrn Prof. Dr. Hartmut Roweck und Herrn PD Dr. Klaus Sieling für die Mitwirkung an der mündlichen Prüfung.

...dem Ministerium für Wissenschaft, Wirtschaft und Verkehr für die Finanzierung des Projektes und dem Forschungs- und Entwicklungszentrum der FH Kiel GmbH als Projektträger.

...den Kolleginnen und Kollegen von BIOGAS-EXPERT für die Anlegung und Durchführung der Feldversuche.

...den Kolleginnen und Kollegen vom ILV für fachlichen Rat, Anregungen und Diskussionen, die entspannte Arbeitsatmosphäre und tatkräftige Unterstützung bei kleineren und größeren Problemen, besonders am „braunen Freitag“.

...Renate Birnstein Hahnewald für ein immer offenes Ohr, Wegweisung in allen Fragen der Verwaltungsarbeit und Versorgung mit Ordnern, Papier und anderen kleinen wichtigen Dingen des Alltags.

...Herrn Dr. Johannes Thaysen und Herrn Stefan Lange von der Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein für die intensive Einführung in die Herstellung von Laborsilagen.

...den Versuchstechnikern Rolf Hamann und Wolfgang Lieder sowie dem Team der Werkstatt des ILV, allen voran Rainer Lauritzen und seinen Azubis für die Konstruktion und den Aufbau der Versuchsanlagen und der Messtechnik und Boje Musfeldt, der immer zur Stelle war, wenn es galt, größere Mengen Gärreste zu be- oder entsorgen.

...dem Biogaslaborteam, insbesondere Bastian Soltau, Anita Cembolista, Astrid Stoffers, Jörn Peter Lorenzen, Annika Hold, Hannes Oeverdieck, Ritva Brandt, Marion Meyer, Daniela Biernoth, Ulrike Kath-Petersen, Anna Tamm, Henning Brandt von Lindau und Laura Jahn, die mit großer Einsatzbereitschaft und persönlichem Engagement die Versuchsbetreuung vor allem nachts und an den Wochenenden übernommen haben und auch vor dem Umgang mit Klärschlamm, Gärresten und übelriechenden Silagen nie zurückschreckten.

...meiner perfekt funktionierenden Großfamilie, besonders meinem Mann Malte Ohl und meinen Söhnen Yanneck und Jori dafür, dass sie immer für mich da waren und sind, für ihre Unterstützung und Entbehrungsbereitschaft vor allem während der Endphase der Entstehung dieser Arbeit, meinen Schwiegereltern Babette Ohl und Fritz Bartel, unserer Tante Marianne Ohl und meinem Schwager Helge Ohl für die jederzeit bereitwillige Übernahme der Kinderbetreuung und meinen Eltern Roswitha und Dr. Martin Fischer, die in der Ferne die Daumen gedrückt haben.

...allen Nichtgenannten, die in irgendeiner Weise zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Kiel, im November 2011

Susanne Ohl

Für Malte,
Yanneck und Jori

INHALTSVERZEICHNIS

Abbildungsverzeichnis	X
Tabellenverzeichnis	XIV
Textverzeichnis Anhang	XVII
Abbildungsverzeichnis Anhang	XVIII
Tabellenverzeichnis Anhang	XIX
Abkürzungsverzeichnis	XXIII
Formelzeichenverzeichnis	XXVI
1 Einleitung	1
2 Problemstellung und Zielsetzung	3
3 Kenntnisstand	5
3.1 Biologische Grundlagen des Biogasprozesses	5
3.2 Bestimmung des Biogasertrages mittels Gärtests.....	8
3.3 Berechnung des theoretischen Biogasertrags.....	14
3.3.1 Bestimmung der pflanzlichen Inhaltsstoffe	14
3.3.2 Korrektur des Trockensubstanzgehaltes von Silagen nach Weißbach	16
3.3.3 Theoretische Biogasausbeute nach Buswell.....	18
3.3.4 Theoretische Biogasausbeute nach Boyle	19
3.3.5 Theoretische Biogasausbeute nach Keymer.....	20
3.3.6 Methanenergiewert nach Amon	21
3.3.7 Theoretische Biogasausbeute nach Weißbach	22
3.4 Konservierung von Energiepflanzen.....	23
3.4.1 Gärungsbiologische Grundlagen der Silagebereitung.....	24
3.4.2 Silagemängel	26
3.4.3 Beurteilung der Gärqualität	26
3.5 Spezifische Gaserträge verschiedener Substrate	27
3.5.1 Spezifischer Gasertrag von Weizen	28
3.5.2 Spezifischer Gasertrag von Mais	29
3.5.3 Spezifischer Gasertrag von Gras	32
4 Material und Methode	35
4.1 Gärtestapparaturen	35
4.1.1 Hohenheimer Biogasertragstest.....	35
4.1.2 Batch-Versuchsapparatur (DIN 38414-8).....	37
4.2 Gasanalyse	39

4.3	Pflanzensubstrate.....	41
4.3.1	Substratprobenaufbereitung.....	44
4.3.1.1	HBT.....	45
4.3.1.2	Batch.....	45
4.3.2	Inhaltsstoffanalyse	46
4.3.3	Bestimmung des Trockenmasseertrages.....	49
4.4	Inokulum.....	51
4.5	Referenzsubstrat.....	51
4.6	Versuchsablauf.....	52
4.6.1	HBT.....	52
4.6.2	Batch.....	54
4.6.3	Begleitende Untersuchungen.....	57
4.6.3.1	Auswahl des Impfschlammes.....	57
4.6.3.2	Einfluss der Steckplatzverteilung im HBT	58
4.6.3.3	Siebung des Inokulums und Kopfraumkorrektur	60
4.6.3.4	Fehlerbetrachtung.....	61
4.7	Datenaufbereitung.....	63
4.7.1	Plausibilitätsprüfung	63
4.7.2	Berechnete Parameter	63
4.7.3	Statistische Auswertung.....	65
5	Ergebnisse.....	66
5.1	Begleitende Untersuchungen.....	66
5.1.1	Auswahl des Impfschlammes.....	66
5.1.2	Einfluss der Steckplatzverteilung im HBT	69
5.1.3	Siebung des Inokulums und Kopfraumkorrektur im Batch-Versuch	73
5.1.4	Fehlerbetrachtung.....	75
5.2	Substratcharakterisierung	78
5.2.1	Frischsubstrate.....	79
5.2.1.1	Substratcharakterisierung Weizen	79
5.2.1.2	Substratcharakterisierung Mais.....	82
5.2.1.3	Substratcharakterisierung Deutsches Weidelgras	85
5.2.2	Silagen.....	87
5.2.2.1	Weizen.....	88
5.2.2.2	Mais	90

5.3	Substratspezifische Gasausbeuten	93
5.3.1	HBT	93
5.3.1.1	Weizen	93
5.3.1.2	Mais	101
5.3.1.3	Deutsches Weidelgras	109
5.3.2	Batch	119
5.3.2.1	Weizen	120
5.3.2.2	Mais	128
5.3.3	Vergleich mit den theoretischen Berechnungen	134
5.4	Vergleich der Gärtestapparaturen	138
5.4.1	Cellulose	139
5.4.2	Weizen	140
5.4.3	Mais	142
5.4.4	Zusammenfassender Vergleich	144
5.5	Fermentationskinetik	146
5.5.1	HBT	147
5.5.2	Batch	150
5.5.3	Vergleich Fermentationskinetik HBT und Batch	152
6	Diskussion	154
7	Fazit	173
8	Zusammenfassung	175
9	Summary	178
10	Literaturverzeichnis	181
11	Anhang	193

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1:	Entwicklung der Anzahl Biogasanlagen und der gesamten installierten elektrischen Leistung in Megawatt [MW].....	2
Abb. 2:	Schematische Darstellung des Fermentationsprozesses nach SCHOLWIN et al. (2009).....	6
Abb. 3:	Spezifische Methanproduktion verschiedener Getreidesorten nach Literaturangaben ohne Unterscheidung Frisch oder Silage	28
Abb. 4:	Spezifische Methanproduktion von Mais nach Literaturangaben mit Unterscheidung Frisch oder Silage	30
Abb. 5:	Spezifische Methanproduktion von verschiedenen Grassorten nach Literaturangaben mit Unterscheidung Frisch oder Silage.....	33
Abb. 6:	Aufbau Kolbenprober für Hohenheimer Biogasertragstest (HBT)	36
Abb. 7:	Schematischer Aufbau des am ILV weiterentwickelten und aufgebauten Hohenheimer Biogasertragstests	37
Abb. 8:	Schematische Zeichnung einer aus Standflasche und Eudiometerrohr bestehenden Versuchseinheit nach DIN 38414-8 (links) und Foto der am ILV aufgebauten Batch-Versuchsanlage (rechts).....	39
Abb. 9:	Schematische Zeichnung NDIR-Gasanalysegerät.....	40
Abb. 10:	Foto des Methananalysegeräts und des Kalibriersystems.....	41
Abb. 11:	Anordnung der Kolbenprober im HBT-Rotor für die Voruntersuchungen zum Einfluss der Steckplatzverteilung nach STOFFERS (2009).....	59
Abb. 12:	Verwendung des Impfschlammes (n=32) verändert nach SOLTAU (2008).....	67
Abb. 13:	Bezugsquellen für Impfschlamm verändert nach SOLTAU (2008).....	68
Abb. 14:	TS- und oTS-Gehalt der in den befragten Laboren verwendeten Impfschlämme in % verändert nach SOLTAU (2008)	69
Abb. 15:	Verlauf der substratspezifischen Methanproduktion der Cellulose als Boxplot über die Position im Rotor (STOFFERS, 2008)	70
Abb. 16:	Verlauf der substratspezifischen Methanproduktion des Weizens als Boxplot über die Position im Rotor (STOFFERS, 2008)	71
Abb. 17:	Boxplot der spezifischen Methanproduktion der Cellulose aus den beiden Vorversuchen (STOFFERS, 2008).....	72
Abb. 18:	Boxplot der spezifischen Methanproduktion der Cellulose aus dem 1. Vorversuch im Vergleich mit allen auf den 2. Vorversuch folgenden Versuchen	73
Abb. 19:	Boxplot der spezifischen Biogasproduktion der Cellulose in Abhängigkeit von der Siebung verändert nach OEVERDIECK (2010).....	74
Abb. 20:	Boxplot der spezifischen Methanproduktion der Cellulose in Abhängigkeit von der Kopfraumkorrektur verändert nach OEVERDIECK (2010)	75
Abb. 21:	Weizen, Düngerart Kas, 240 kgN/ha, Inhaltsstoffe und Trockenmasseertrag im Vergleich mit Angaben aus einer Futterwerttabelle (DLG, 1997).....	81
Abb. 22:	Mais, Düngerart Kas, 240 kgN/ha, Inhaltsstoffe und Trockenmasseertrag im Vergleich mit Angaben aus einer Futterwerttabelle (DLG, 1997).....	84

Abb. 23:	Deutsches Weidelgras, Düngerart Kas, 320 kgN/ha, Inhaltsstoffe und Trockenmasseertrag im Vergleich mit Angaben aus einer Futterwerttabelle (DLG, 1997).....	87
Abb. 24:	Weizen, beide Versuchsjahre – Ergebnisse aus dem HBT zur substratspezifischen Biogas- und Methanproduktion in Abhängigkeit von der Düngerart.....	94
Abb. 25:	Weizen Düngerart Kas und Biomix, beide Versuchsjahre – Ergebnisse aus dem HBT zur substratspezifischen Biogas- und Methanproduktion in Abhängigkeit von der Düngestufe.....	96
Abb. 26:	Weizen Düngerart Kas und Biomix, beide Versuchsjahre – Ergebnisse aus dem HBT zum Methanhektarertrag in Abhängigkeit von der Düngestufe.....	97
Abb. 27:	Weizen Düngerart Kas und Biomix, beide Versuchsjahre – Ergebnisse aus dem HBT zur substratspezifischen Biogas- und Methanproduktion in Abhängigkeit vom EC-Stadium / Erntetermin.....	99
Abb. 28:	Weizen Düngerart Kas und Biomix, beide Versuchsjahre – Ergebnisse aus dem HBT zum Methanhektarertrag in Abhängigkeit vom EC-Stadium / Erntetermin.....	100
Abb. 29:	Mais, beide Versuchsjahre – Ergebnisse aus dem HBT zur substrat-spezifischen Biogas- und Methanproduktion in Abhängigkeit von der Düngerart.....	102
Abb. 30:	Mais, Düngerart Kas und Biomix, beide Versuchsjahre – Ergebnisse aus dem HBT zur substratspezifischen Biogas- und Methanproduktion in Abhängigkeit von der Düngestufe.....	104
Abb. 31:	Mais, Düngerart Kas und Biomix, beide Versuchsjahre – Ergebnisse aus dem HBT zum Methanhektarertrag in Abhängigkeit von der Düngestufe.....	105
Abb. 32:	Mais, Düngerart Kas und Biomix, beide Versuchsjahre – Ergebnisse aus dem HBT zur substratspezifischen Biogas- und Methanproduktion in Abhängigkeit vom Erntetermin.....	107
Abb. 33:	Mais, Düngerart Kas und Biomix, beide Versuchsjahre – Ergebnisse aus dem HBT zum Methanhektarertrag in Abhängigkeit vom Erntetermin.....	108
Abb. 34:	Deutsches Weidelgras, beide Versuchsjahre – Ergebnisse aus dem HBT zur substratspezifischen Biogas- und Methanproduktion in Abhängigkeit von der Düngerart.....	110
Abb. 35:	Deutsches Weidelgras, beide Versuchsjahre, Ergebnisse aus dem HBT zum Methanhektarertrag in Abhängigkeit von der Düngerart.....	111
Abb. 36:	Deutsches Weidelgras Düngerart Kas und Biomix, beide Versuchsjahre – Ergebnisse aus dem HBT zur substratspezifischen Biogas- und Methanproduktion in Abhängigkeit von der Düngestufe.....	112
Abb. 37:	Deutsches Weidelgras Düngerart Kas und Biomix, beide Versuchsjahre – Ergebnisse aus dem HBT zum Methanhektarertrag in Abhängigkeit von der Düngestufe.....	114
Abb. 38:	Deutsches Weidelgras Düngerart Kas und Biomix – Ergebnisse aus dem HBT zur substratspezifischen Biogas- und Methanproduktion in Abhängigkeit vom Schnitt.....	116

Abb. 39:	Deutsches Weidelgras Düngerart Kas und Biomix, beide Versuchsjahre – Ergebnisse aus dem HBT zum Methanhektarertrag in Abhängigkeit vom Schnitt.....	118
Abb. 40:	Weizen, frische Substrate und Silage, beide Versuchsjahre – Ergebnisse aus dem Batch zur spezifischen Biogas- und Methanproduktion in Abhängigkeit von der Düngestufe.....	122
Abb. 41:	Weizen, frische Substrate, beide Versuchsjahre– Ergebnisse aus dem Batch zum Methanhektarertrag in Abhängigkeit von der Düngestufe.....	123
Abb. 42:	Weizen frische Substrate und Silage, beide Versuchsjahre – Ergebnisse aus dem Batch zur spezifischen Biogas- und Methanproduktion in Abhängigkeit vom Entwicklungsstadium.....	124
Abb. 43:	Weizen, frische Substrate– Ergebnisse aus dem Batch zum Methanhektarertrag in Abhängigkeit vom Entwicklungsstadium.....	126
Abb. 44:	Mais, frische Substrate und Silage, beide Versuchsjahre – Ergebnisse aus dem Batch zur spezifischen Biogas- und Methanproduktion in Abhängigkeit von der Düngestufe.....	129
Abb. 45:	Mais, frische Substrate, beide Versuchsjahre– Ergebnisse aus dem Batch zum Methanhektarertrag in Abhängigkeit von der Düngestufe.....	131
Abb. 46:	Mais, frische Substrate und Silage, beide Versuchsjahre – Ergebnisse aus dem Batch zur spezifischen Biogas- und Methanproduktion in Abhängigkeit vom Erntetermin.....	132
Abb. 47:	Mais, frische Substrate, beide Versuchsjahre – Ergebnisse aus dem Batch zum Methanhektarertrag in Abhängigkeit vom Erntetermin.....	133
Abb. 48:	Cellulose, Quotient der Methanproduktion gemessen / berechnet....	135
Abb. 49:	Weizen, frische Substrate, Quotient der Methanproduktion gemessen / berechnet.....	136
Abb. 50:	Mais, frische Substrate, Quotient der Methanproduktion gemessen / berechnet.....	137
Abb. 51:	Deutsches Weidelgras, frische Substrate, Quotient der Methanproduktion gemessen / berechnet.....	138
Abb. 52:	Cellulose spezifische Biogas- und Methanproduktion im Vergleich der Gärtestapparaturen.....	140
Abb. 53:	Weizen, spezifische Biogas- und Methanproduktion Vergleich der Gär-testapparaturen.....	141
Abb. 54:	Weizen, Methanhektarertrag Vergleich der Gärtestapparaturen.....	142
Abb. 55:	Mais, spezifische Biogas- und Methanproduktion im Vergleich der Gärtestapparaturen.....	143
Abb. 56:	Mais, Methanhektarertrag im Vergleich der Gärtestapparaturen.....	144
Abb. 57:	Weizen, Mais, Cellulose spezifische Biogas- und Methanproduktion Vergleich der Gärtestapparaturen.....	145
Abb. 58:	Vergleich der Ergebnisse beider Untersuchungsmethoden zur Bestimmung der Biogas- und Methanproduktion auf der Basis der Verhältnisse der Mittelwerte.....	146
Abb. 59:	HBT, Summenkurve der spezifischen Biogasproduktion am Beispiel von GPS-Weizen, Mais 1 und Cellulose.....	147
Abb. 60:	Anteil an der Summe der Biogasproduktion mit logarithmischer Trendlinie, Gleichung und Bestimmtheitsmaß am Beispiel von GPS-Weizen.....	148

Abb. 61:	Batch, Summenkurve der spezifischen Biogasproduktion am Beispiel von Weizen, Mais und Cellulose.....	150
Abb. 62:	Batch, Anteil an der Summe der Biogasproduktion mit logarithmischer Trendlinie, Gleichung und Bestimmtheitsmaß am Beispiel von -Weizen.....	151
Abb. 63:	Vergleich der Ertragskinetik von Weizen (ohne EC 69) und Mais (ohne T7) im HBT und Batch anhand der benötigten Zeit bis zum Erreichen von 10%, 50%, 75% und 90% der gesamten Biogasmenge	153
Abb. 64:	Verhältnis zwischen der spezifischen Methanproduktion basierend auf volumetrischer Kopfraumkorrektur zur über das CH ₄ /CO ₂ -Verhältnis berechneten spezifischen Methanproduktion	156
Abb. 65:	Spezifische Methanproduktion verschiedener Getreidesorten nach Literaturangaben ohne Unterscheidung Frisch oder Silage im Vergleich mit den eigenen Ergebnissen.....	158
Abb. 66:	Spezifische Methanproduktion von Mais nach Literaturangaben mit Unterscheidung Frisch oder Silage im Vergleich mit den eigenen Ergebnissen	159
Abb. 67:	Spezifische Methanproduktion von verschiedenen Grassorten nach Literaturangaben mit Unterscheidung Frisch oder Silage im Vergleich mit den eigenen Ergebnissen.....	160
Abb. 68:	GPS-Weizen, frische Substrate und Silagen, beide Versuchsjahre – Ergebnisse aus dem Batch zum Methanhektarertrag in Abhängigkeit vom Entwicklungsstadium	167
Abb. 69:	Mais 1, frische Substrate und Silagen, beide Versuchsjahre – Ergebnisse aus dem Batch zum Methanhektarertrag in Abhängigkeit vom Erntetermin	167

TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 1:	Spezifische Gasbildungsrate und Methangehalt der verdaulichen Inhaltsstoffe nach BASERGA (1998)	21
Tab. 2:	Regressionskoeffizienten verschiedener Substrate für das Methanenergiewertsystem nach AMON et al. (2007b).....	22
Tab. 3:	Untersuchte Substratvarianten HBT.....	43
Tab. 4:	Untersuchte Substratvarianten Batch.....	44
Tab. 5:	Untersuchungen an Pflanzensubstraten	47
Tab. 6:	Beispiel für Tabellenblatt zur Bestimmung der Substrateinwaage	53
Tab. 7:	Beispiel für Tabellenblatt zur Datenerhebung der Gasproduktion eines Kolbenprobers im HBT	54
Tab. 8:	Beispiel für Tabellenblatt zur Datenerhebung der Gasproduktion eines Fermenters im Batch-Versuch	57
Tab. 9:	Statistische Kennzahlen zur spezifischen Methanproduktion von Cellulose aus dem 1. und 2. Vorversuch sowie aus allen folgenden HBT-Versuchen.....	72
Tab. 10:	Weizen, Düngerart Kas, beide Versuchsjahre - Inhaltsstoffe und Trockenmasseertrag	80
Tab. 11:	Mais, Düngerart Kas, beide Versuchsjahre - Inhaltsstoffe und Trockenmasseertrag	83
Tab. 12:	Entwicklungsstadien des Deutschen Weidelgrases zu den Schnittterminen	85
Tab. 13:	Deutsches Weidelgras, Düngerart Kas, beide Versuchsjahre - Inhaltsstoffe und Trockenmasseertrag	86
Tab. 14:	Weizen, Ergebnisse der Silageausgangsuntersuchungen der LUFA ITL GmbH Kiel	88
Tab. 15:	Weizen, Ergebnisse der Untersuchungen zur Gärqualität	89
Tab. 16:	Weizen, Verluste durch die Silierung	90
Tab. 17:	Mais, Ergebnisse der Silageausgangsuntersuchungen der LUFA ITL GmbH Kiel.....	91
Tab. 18:	Mais, Ergebnisse der Untersuchungen zur Gärqualität.....	92
Tab. 19:	Mais, Masse-Verluste durch die Silierung	92
Tab. 20:	Weizen, Düngerart Kas und Biomix, beide Versuchsjahre – Ergebnisse aus dem HBT zur substratspezifischen Biogas- und Methanproduktion, zum durchschnittlichen Methangehalt des Biogases und zum Methanhektarertrag	95
Tab. 21:	Weizen, HBT, signifikante Unterschiede in der spezifischen Biogasproduktion zwischen den Düngevarianten nach dem Kruskal-Wallis-Test	96
Tab. 22:	Weizen, HBT, signifikante Unterschiede im Methanhektarertrag (basierend auf manueller Beprobung) zwischen den einzelnen Düngegestufen.....	98
Tab. 23:	Weizen, HBT, signifikante Unterschiede in der spezifischen Biogas- und Methanproduktion zwischen den einzelnen EC-Stadien.....	99
Tab. 24:	Weizen, HBT, signifikante Unterschiede im Methanhektarertrag (basierend auf manueller Beprobung) zwischen den einzelnen EC-Stadien.....	101

Tab. 25:	Mais, Düngerart Kas und Biomix, beide Versuchsjahre – Ergebnisse aus dem HBT zur substratspezifischen Biogas- und Methanproduktion, zum durchschnittlichen Methangehalt des Biogases und zum Methanhektarertrag	103
Tab. 26:	Mais, HBT, signifikante Unterschiede in der spezifischen Biogas- und Methanproduktion zwischen den Düngevarianten nach dem Kruskal-Wallis-Test	104
Tab. 27:	Mais, HBT, signifikante Unterschiede im Methanhektarertrag (basierend auf manueller Beprobung) zwischen den Düngevarianten nach dem Kruskal-Wallis-Test	106
Tab. 28:	Mais, HBT, signifikante Unterschiede in der spezifischen Biogas- und Methanproduktion zwischen den Ernteterminen nach dem Kruskal-Wallis-Test	107
Tab. 29:	Mais, HBT, signifikante Unterschiede im Methanhektarertrag (basierend auf manueller Beprobung) zwischen den Ernteterminen nach dem Kruskal-Wallis-Test	109
Tab. 30:	Deutsches Weidelgras Düngerart Kas und Biomix, beide Versuchsjahre – Ergebnisse aus dem HBT zur substratspezifischen Biogas- und Methanproduktion, zum durchschnittlichen Methangehalt des Biogases und zum Methanhektarertrag	112
Tab. 31:	Deutsches Weidelgras, HBT, signifikante Unterschiede in der spezifischen Biogas- und Methanproduktion zwischen den Düngevarianten nach dem Kruskal-Wallis-Test	113
Tab. 32:	Deutsches Weidelgras, HBT signifikante Unterschiede im Methanhektarertrag (basierend auf maschineller Beprobung) zwischen den Düngevarianten nach dem Kruskal-Wallis-Test.....	115
Tab. 33:	Deutsches Weidelgras, HBT, signifikante Unterschiede in der spezifischen Biogas- und Methanproduktion zwischen Varianten aus den verschiedenen Schnitten nach dem Kruskal-Wallis-Test.....	117
Tab. 34:	Deutsches Weidelgras, HBT, signifikante Unterschiede im Methanhektarertrag (basierend auf maschineller Beprobung) zwischen den Düngevarianten nach dem Kruskal-Wallis-Test.....	118
Tab. 35:	Weizen, Düngerart Kas, beide Versuchsjahre – Ergebnisse aus dem Batch zur substratspezifischen Biogas- und Methanproduktion, zum durchschnittlichen Methangehalt des Biogases und zum Methanhektarertrag	121
Tab. 36:	Weizen, Batch, signifikante Unterschiede in der spezifischen Biogas- und Methanproduktion zwischen den Düngevarianten nach dem Kruskal-Wallis-Test.....	122
Tab. 37:	Weizen, Batch, signifikante Unterschiede in der spezifischen Biogas- und Methanproduktion zwischen den Entwicklungsstadien nach dem Kruskal-Wallis-Test.....	125
Tab. 38:	Weizen, Batch, signifikante Unterschiede im Methanhektarertrag zwischen den Entwicklungsstadien nach dem Kruskal-Wallis-Test...	126
Tab. 39:	Weizen, Batch, signifikante Unterschiede in der spezifischen Biogas- und Methanproduktion zwischen frischen Substraten und Silagen nach dem Kruskal-Wallis-Test.....	127

Tab. 40:	Mais, Düngerart Kas, beide Versuchsjahre – Ergebnisse aus dem Batch zur substratspezifischen Biogas- und Methanproduktion, zum durchschnittlichen Methangehalt des Biogases und zum Methanhektarertrag.....	128
Tab. 41:	Mais, frische Substrate, Batch, signifikante Unterschiede in der spezifischen Biogas- und Methanproduktion zwischen den Düngevarianten nach dem Kruskal-Wallis-Test	130
Tab. 42:	Mais, frische Substrate, Batch, signifikante Unterschiede im Methanhektarertrag zwischen den Düngevarianten nach dem Kruskal-Wallis-Test	131
Tab. 43:	Cellulose spezifische Biogas- und Methanproduktion im Vergleich der Gärtestapparaturen.....	139
Tab. 44:	Weizen spezifische Biogas- und Methanproduktion im Vergleich der Gärtestapparaturen.....	140
Tab. 45:	Mais, spezifische Biogas- und Methanproduktion im Vergleich der Gärtestapparaturen	142
Tab. 46:	Kennzahlen der Fermentationskinetik ausgewählter Substratvarianten im HBT	149
Tab. 47:	Kennzahlen der Fermentationskinetik ausgewählter Substratvarianten im Batch	152

TEXTVERZEICHNIS ANHANG

Text A 1: Berechnung der spezifischen Biogas- und Methanproduktion.....199

ABBILDUNGSVERZEICHNIS ANHANG

Abb. A 1:	Normvolumen der Nullproben eines beispielhaften Versuches mit Trendlinie und Bestimmtheitsmaß.....	201
Abb. A 2:	Normmethanvolumen der Nullproben eines beispielhaften Versuches mit Trendlinie und Bestimmtheitsmaß	203
Abb. A 3:	Boxplot der spezifischen Methanproduktion der Cellulose (basierend auf volumetrischer Kopfraumkorrektur) in Abhängigkeit von der Siebung verändert nach OEVERDIECK (2010)	204
Abb. A 4:	Boxplot der spezifischen Methanproduktion der Cellulose (basierend auf CH ₄ /CO ₂ -Verhältnis) in Abhängigkeit von der Siebung verändert nach OEVERDIECK (2010)	204
Abb. A 5:	Weizen Silage, nach Jahren getrennt – Ergebnisse aus dem Batch zur spezifischen Biogas- und Methanproduktion in Abhängigkeit vom EC-Stadium	227
Abb. A 6:	Mais, Silage, nach Jahren getrennt – Ergebnisse aus dem Batch zur spezifischen Biogas- und Methanproduktion in Abhängigkeit vom EC-Stadium	229

TABELLENVERZEICHNIS ANHANG

Tab. A 1:	Spezifische Biogas- und Methanproduktion verschiedener Getreideganzpflanzen nach Literaturangaben	193
Tab. A 2:	Spezifische Biogas- und Methanproduktion von Mais nach Literaturangaben	194
Tab. A 3:	Spezifische Biogas- und Methanproduktion verschiedener Gräser nach Literaturangaben	196
Tab. A 4:	Zusammensetzung der Sperrflüssigkeit	197
Tab. A 5:	Entwicklungsstadien (EC-Stadien) im Getreide (LEIVERMANN, 2011).....	197
Tab. A 6:	Erntetermine und Entwicklungsstadien (EC-Stadien) der untersuchten Energiepflanzen.....	198
Tab. A 7:	Untersuchungen an Pflanzensubstraten bei der LUFA ITL Kiel	198
Tab. A 8:	Statistische Kennzahlen zur substratspezifischen Biogas- und Methanproduktion von Cellulose (Tag 17) und Weizen (Tag 28) verändert nach STOFFERS (2008).....	204
Tab. A 9:	Statistische Kennzahlen der spezifischen Biogasproduktion der Cellulose bei verschiedenen Siebungen	205
Tab. A 10:	Weizen, Düngerart Kas, 2007 - Inhaltsstoffe und Trockenmasseertrag	205
Tab. A 11:	Weizen, Düngerart Kas, 2008 - Inhaltsstoffe und Trockenmasseertrag	206
Tab. A 12:	Weizen, Düngerart Biomix, 2007 - Inhaltsstoffe und Trockenmasseertrag	206
Tab. A 13:	Weizen, Düngerart Biomix, 2008 - Inhaltsstoffe und Trockenmasseertrag	207
Tab. A 14:	Weizen, Düngerart Biomix, beide Versuchsjahre - Inhaltsstoffe und Trockenmasseertrag	207
Tab. A 15:	Mais, Düngerart Kas, 2007 - Inhaltsstoffe und Trockenmasseertrag	208
Tab. A 16:	Mais, Düngerart Kas, 2008 - Inhaltsstoffe und Trockenmasseertrag	208
Tab. A 17:	Mais, Düngerart Biomix, 2007 - Inhaltsstoffe und Trockenmasseertrag	209
Tab. A 18:	Mais, Düngerart Biomix, 2008 - Inhaltsstoffe und Trockenmasseertrag	209
Tab. A 19:	Mais, Düngerart Biomix, beide Versuchsjahre - Inhaltsstoffe und Trockenmasseertrag	210
Tab. A 20:	Deutsches Weidelgras, Düngerart Kas, 2007 - Inhaltsstoffe und Trockenmasseertrag	210
Tab. A 21:	Deutsches Weidelgras, Düngerart Kas, 2008 - Inhaltsstoffe und Trockenmasseertrag	211
Tab. A 22:	Deutsches Weidelgras, Düngerart Biomix, 2007 - Inhaltsstoffe und Trockenmasseertrag	211
Tab. A 23:	Deutsches Weidelgras, Düngerart Biomix, 2008 - Inhaltsstoffe und Trockenmasseertrag	212
Tab. A 24:	Deutsches Weidelgras, Düngerart Biomix, beide Versuchsjahre - Inhaltsstoffe und Trockenmasseertrag	212

Tab. A 25:	GPS-Weizen, Düngerart Kas, 2007 – Ergebnisse aus dem HBT zur substratspezifischen Biogas- und Methanproduktion, zum durchschnittlichen Methangehalt des Biogases und zum Methanhektarertrag.....	213
Tab. A 26:	GPS-Weizen, Düngerart Kas, 2008 – Ergebnisse aus dem HBT zur substratspezifischen Biogas- und Methanproduktion, zum durchschnittlichen Methangehalt des Biogases und zum Methanhektarertrag.....	213
Tab. A 27:	GPS-Weizen, Düngerart Biomix, 2007 – Ergebnisse aus dem HBT zur substratspezifischen Biogas- und Methanproduktion, zum durchschnittlichen Methangehalt des Biogases und zum Methanhektarertrag.....	214
Tab. A 28:	GPS-Weizen, Düngerart Biomix, 2008 – Ergebnisse aus dem HBT zur substratspezifischen Biogas- und Methanproduktion, zum durchschnittlichen Methangehalt des Biogases und zum Methanhektarertrag.....	214
Tab. A 29:	Mais, Düngerart Kas, 2007 – Ergebnisse aus dem HBT zur substratspezifischen Biogas- und Methanproduktion, zum durchschnittlichen Methangehalt des Biogases und zum Methanhektarertrag.....	215
Tab. A 30:	Mais, Düngerart Kas, 2008 – Ergebnisse aus dem HBT zur substratspezifischen Biogas- und Methanproduktion, zum durchschnittlichen Methangehalt des Biogases und zum Methanhektarertrag.....	215
Tab. A 31:	Mais, Düngerart Biomix, 2007 – Ergebnisse aus dem HBT zur substratspezifischen Biogas- und Methanproduktion, zum durchschnittlichen Methangehalt des Biogases und zum Methanhektarertrag.....	216
Tab. A 32:	Mais, Düngerart Biomix, 2008 – Ergebnisse aus dem HBT zur substratspezifischen Biogas- und Methanproduktion, zum durchschnittlichen Methangehalt des Biogases und zum Methanhektarertrag.....	216
Tab. A 33:	Deutsches Weidelgras, Düngerart Kas, 2007 – Ergebnisse aus dem HBT zur substratspezifischen Biogas- und Methanproduktion, zum durchschnittlichen Methangehalt des Biogases und zum Methanhektarertrag	217
Tab. A 34:	Deutsches Weidelgras, Düngerart Kas, 2008 – Ergebnisse aus dem HBT zur substratspezifischen Biogas- und Methanproduktion, zum durchschnittlichen Methangehalt des Biogases und zum Methanhektarertrag	217
Tab. A 35:	Deutsches Weidelgras, Düngerart Biomix, 2007 – Ergebnisse aus dem HBT zur substratspezifischen Biogas- und Methanproduktion, zum durchschnittlichen Methangehalt des Biogases und zum Methanhektarertrag	218
Tab. A 36:	Deutsches Weidelgras, Düngerart Biomix, 2008 – Ergebnisse aus dem HBT zur substratspezifischen Biogas- und Methanproduktion, zum durchschnittlichen Methangehalt des Biogases und zum Methanhektarertrag	218

Tab. A 37:	Weizen, HBT, Signifikanzniveaus Unterschiede im Methanhektarertrag (basierend auf manueller Beprobung) zwischen den einzelnen Düngevarianten nach dem Kruskal-Wallis-Test.....	219
Tab. A 38:	Weizen, HBT, Signifikanzniveaus Unterschiede im Methanhektarertrag (basierend auf manueller Beprobung) zwischen den einzelnen EC-Stadien nach dem Kruskal-Wallis-Test.....	219
Tab. A 39:	Mais, HBT, Signifikanzniveaus Unterschiede in der spezifischen Biogas- und Methanproduktion zwischen den Düngevarianten nach dem Kruskal-Wallis-Test.....	220
Tab. A 40:	Mais, HBT, Signifikanzniveaus Unterschiede im Methanhektarertrag (basierend auf manueller Beprobung) zwischen den Düngevarianten nach dem Kruskal-Wallis-Test.....	220
Tab. A 41:	Mais, HBT, Signifikanzniveaus Unterschiede in der spezifischen Biogas- und Methanproduktion zwischen den Ernteterminen nach dem Kruskal-Wallis-Test.....	221
Tab. A 42:	Mais, HBT, Signifikanzniveaus Unterschiede im Methanhektarertrag (basierend auf manueller Beprobung) zwischen den Ernteterminen nach dem Kruskal-Wallis-Test.....	221
Tab. A 43:	Deutsches Weidelgras, HBT, Signifikanzniveaus Unterschiede in der spezifischen Biogas- und Methanproduktion zwischen den Düngevarianten nach dem Kruskal-Wallis-Test.....	222
Tab. A 44:	Deutsches Weidelgras, HBT, signifikante Unterschiede im Methanhektarertrag (basierend auf maschineller Beprobung) zwischen den Düngevarianten nach dem Kruskal-Wallis-Test.....	222
Tab. A 45:	Deutsches Weidelgras, HBT, Signifikanzniveaus Unterschiede in der spezifischen Biogas- und Methanproduktion zwischen den Varianten aus den verschiedenen Schnitten nach dem Kruskal-Wallis-Test.....	223
Tab. A 46:	Deutsches Weidelgras, HBT, Signifikanzniveaus Unterschiede im Methanhektarertrag (basierend auf maschineller Beprobung) zwischen den Varianten aus den verschiedenen Schnitten nach dem Kruskal-Wallis-Test.....	224
Tab. A 47:	Weizen, Düngerart Kas, 2007– Ergebnisse aus dem Batch zur substratspezifischen Biogas- und Methanproduktion, zum durchschnittlichen Methangehalt des Biogases und zum Methanhektarertrag.....	224
Tab. A 48:	Weizen, Düngerart Kas, 2008– Ergebnisse aus dem Batch zur substratspezifischen Biogas- und Methanproduktion, zum durchschnittlichen Methangehalt des Biogases und zum Methanhektarertrag.....	225
Tab. A 49:	Mais, Düngerart Kas, 2007– Ergebnisse aus dem Batch zur substratspezifischen Biogas- und Methanproduktion, zum durchschnittlichen Methangehalt des Biogases und zum Methanhektarertrag.....	226
Tab. A 50:	Mais, Düngerart Kas, 2008– Ergebnisse aus dem Batch zur substratspezifischen Biogas- und Methanproduktion, zum durchschnittlichen Methangehalt des Biogases und zum Methanhektarertrag.....	226

Tab. A 51:	Weizen, Batch, Signifikanzniveaus Unterschiede in der spezifischen Biogas- und Methanproduktion zwischen den Düngevarianten nach dem Kruskal-Wallis-Test	227
Tab. A 52:	Weizen, Batch, Signifikanzniveaus Unterschiede in der spezifischen Biogas- und Methanproduktion zwischen den Entwicklungsstadien nach dem Kruskal-Wallis-Test	228
Tab. A 53:	Weizen, Batch, Signifikanzniveaus Unterschiede im Methanhektarertrag zwischen den Entwicklungsstadien nach dem Kruskal-Wallis-Test	228
Tab. A 54:	Weizen, Batch, Signifikanzniveaus Unterschiede in der spezifischen Biogas- und Methanproduktion zwischen frischen Substraten und Silagen nach dem Kruskal-Wallis-Test	229
Tab. A 55:	Mais, frische Substrate, Batch, Signifikanzniveaus Unterschiede in der spezifischen Biogas- und Methanproduktion zwischen den Düngevarianten nach dem Kruskal-Wallis-Test	230
Tab. A 56:	Mais, frische Substrate, Batch, Signifikanzniveaus Unterschiede im Methanhektarertrag zwischen den Düngevarianten nach dem Kruskal-Wallis-Test	230
Tab. A 57:	Weizen, Signifikanzniveaus Unterschiede in der spezifischen Biogas- und Methanproduktion zwischen HBT und Batch nach dem Kruskal-Wallis-Test	230
Tab. A 58:	Mais, Signifikanzniveaus Unterschiede in der spezifischen Biogas- und Methanproduktion zwischen HBT und Batch nach dem Kruskal-Wallis-Test	231

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

%	Prozent
*	signifikanter Unterschied
**	hoch signifikanter Unterschied
***	höchst signifikanter Unterschied
°C	Grad Celsius
ADF	Acid Detergent Fiber
ADL	Acid Detergent Lignin
AGM	Advanced Gasmitter
ATB	Agrartechnischen Forschung Bornim
B	Batch
Biomix	Gärrest aus einer Biogasanlage mit Kofermentation
BS	Buttersäure
bzw.	beziehungsweise
CH ₄	Methan
cm	Zentimeter
CO ₂	Kohlendioxid
d	Tag
DIN	Deutsche Industrie Norm
EC	Entwicklungsstadium von Getreide
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
ES	Essigsäure
EulOS	Enzymunlösliche organische Substanz
F	Frisches Substrat
FM	Frischmasse
FoTS	Fermentierbare organische Substanz
g	Gramm
GPS	Ganzpflanzensilage
H ₂	Wasserstoff
H ₂ O	Wasser
H ₂ S	Schwefelwasserstoff
HBT	Hohenheimer Biogasertragstest
HCO ₃	Hydrogencarbonat

hPa	Hektopascal
HS	Hohenschulen
ILV	Institut für landwirtschaftliche Verfahrenstechnik
K	Kelvin
Kas	Kalkammonsalpeter
KbE	Kolonie bildende Einheiten
KD	Karkendamm
kg	Kilogramm
l	Liter
l _N	Normliter
LUFA	LUFA ITL GmbH Kiel
m	Meter
M	Masse
m ²	Quadratmeter
m ³	Kubikmeter
m ³ _N	Normkubikmeter
MEW	Methanenergiewert
MHE	Methanhektarertrag
mm	Millimeter
MS	Milchsäure
MW	Mittelwert
[MW]	Megawatt
n	Anzahl
n.s.	nicht signifikant
N ₂ , N	Stickstoff
Nawaro	Nachwachsende Rohstoffe
NDF	Neutral Detergent Fiber
NDIR	nichtdispersives Infrarotmessverfahren
NfE, XX	Stickstofffreie-Extraktstoffe
NO ₃	Nitrat
Nr.	Nummer
O ₂	Sauerstoff
ODM	organic dry matter
oTM	organische Trockenmasse

oTS	organische Trockensubstanz
p	Signifikanzniveau
pH	pH-Wert
S	Silage
t	Tonne
T1, T2, T3, T4	Erntetermin bei Deutschem Weidelgras
T7, T8, T9	Erntetermin bei Mais
T10, T50, T75, T90	Kennzahlen der Ertragsdynamik, Zeit bis 10%, 50%, 75%, 90% der gesamten Biogasmenge gebildet sind
TS	Trockensubstanz
TS ¹⁾	Trockensubstanz, bestimmt durch Trocknung bei 58°C
TS ²⁾	Trockensubstanz, bestimmt durch Trocknung des vorgetrock- neten Materials bei 105°C
V	Volumen
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VK	Variationskoeffizient
VQ	Verdauungsquotient
XA	Rohasche
XF	Rohfaserfraktion
XL	Rohfett
XP	Rohprotein
XX, NfE	Stickstofffreie-Extraktstoffe
z. B.	zum Beispiel

FORMELZEICHENVERZEICHNIS

ΣV_{IS}	Summe der Gasvolumina des Versuchs mit Klärschlamm für die betrachtete Verweilzeit
ΣV_n	Netto-Gasproduktion des Substrates für die betrachtete Verweilzeit
<i>A</i>	Gehalt an Alkohol
<i>AA</i>	Summe aller Alkohole (C ₂ bis C ₄) außer 1,2-Propandiol und 2,3-Butandiol
<i>BD</i>	Gehalt an 2,3-Butandiol
$C_aH_bO_c$	Kohlenhydrat
$C_aH_bO_cN_dS_e$	Protein
$C_{CH_4 (CO_2)}$	gemessene Konzentration des Methans (Kohlendioxids) im trockenen Gas
$C_{CH_4}^f$	Methankonzentration im feuchten Gas
$C_{CH_4}^{tr}$	Methankonzentration im trockenen Gas
C_{korr}^{tr}	korrigierte Konzentration des Methans im trockenen Gas
C^{tr}	gemessene Konzentration des Methans im trockenen Gas
<i>FFS</i>	Gehalt an flüchtigen Fettsäuren
H_2S	Schwefelwasserstoff
<i>m</i>	Masse des eingewogenen Substrats
m_{FM}	Frischmasse
m_{GR}	Masse des Glührückstandes
M_{IS}	Masse des für die Mischung aus Substrat und Klärschlamm benutzten Klärschlammes
m_M	Masse des im Kontrollversuch benutzten Klärschlammes
<i>MS</i>	Gehalt an Milchsäure
m_{TS}	Trockenmasse
NH_3	Gehalt an Ammoniak
<i>p</i>	Druck der Gasphase zum Zeitpunkt der Ablesung in hPa
p_0	Normdruck; $p_0 = 1013$ hPa
<i>PD</i>	Gehalt an 1,2-Propandiol
p_w	Dampfdruck des Wassers in Abhängigkeit von der Temperatur des umgebenen Raumes

T	Temperatur des Biogases oder des umgebenen Raumes
t	Messzeitpunkt ($t_2 > t_1$)
T_0	Normtemperatur; $T_0 = 273 \text{ K}$
TM_k	korrigierter Trockenmassegehalt
TM_n	unkorrigierter Trockenmassegehalt
V	abgelesenes Volumen des Gases
V_0^{tr}	Normgasvolumen des trockenen Gases
V_B	Volumen des produzierten Biogases
$V_{CH_4}^{tr}$	Normmethanvolumen
$V_{IS(korr.)}$	Eigengasanteil des Klärschlammes
V_K	Kopfraumvolumen
V_n	Netto-Gasvolumen des Substrates im Normzustand
V_S	spezifische, auf die Glühverlustmasse bezogene Biogasproduktion während der Verweilzeit
w_T	Trockensubstanzgehalt des Substrats
w_V	Anteil organischer Trockensubstanz (oTS) an der Trockenmasse des Substrats

1 EINLEITUNG

Die zunehmende Klimaerwärmung und die Verknappung fossiler Energieträger erfordern ein grundlegendes Umdenken in der Energieversorgung sowie politisches Handeln. Der Klimaschutz ist ein wichtiger Bestandteil der deutschen Politik geworden. Während die Europäische Union im Kyoto-Protokoll zugesagt hat, die Treibhausgasemissionen im Zeitraum von 2008 bis 2012 um 8 % gegenüber dem Stand von 1990 zu reduzieren, versprach Deutschland eine Senkung um 21 %. Bis zum Jahr 2020 sollen die Treibhausgasemissionen in Deutschland sogar um 40 % gesenkt werden, bis 2050 sollen die Kohlendioxidemissionen (CO₂) auf ein Minimum reduziert werden. Um diese ehrgeizigen Ziele zu erreichen, sollen die erneuerbaren Energien einen verstärkten Ausbau erfahren (DIE BUNDESREGIERUNG, 2011) und dadurch den Hauptanteil an der Energieversorgung ausmachen. Dazu ist es vorgesehen, dass die regenerativen Energien bis 2020 einen Anteil von mindestens 30 % des Bruttostromverbrauches decken, danach soll dieser kontinuierlich erhöht werden. Der Anteil an der Wärmeversorgung soll ebenfalls bis zum Jahr 2020 um 14 % erhöht werden (BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELTSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT, 2010). Ein wichtiges Instrument zum Ausbau der erneuerbaren Energien ist das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), welches im Jahr 2000 erstmalig in Kraft trat und bereits zwei Novellierungen (2004 und 2009) erfahren hat. Eine weitere Novellierung befindet sich in Vorbereitung. Das EEG verpflichtet die Netzbetreiber, vorrangig Strom aus regenerativen Energien anzunehmen und zu vergüten.

Als regenerative Energien können Wind-, Wasser- und Sonnenenergie, Geothermie sowie Biomasse genutzt werden. Dabei kam im Jahr 2009 der Biomassenutzung zur Strom- und Wärmeproduktion bereits ein Anteil von 70 % an den erneuerbaren Energien zu (FNR, 2011). Die Biomassenutzung ist CO₂-neutral, das heißt bei der Umsetzung der nachwachsenden Rohstoffe (Energiepflanzen) wird nur soviel Kohlendioxid freigesetzt, wie die Pflanzen während ihres Wachstums durch Photosynthese gebunden haben. Biomasse wird in verschiedenen Formen genutzt, so z. B. als Festbrennstoffe, zur Bioethanol-, Biodiesel- oder Pflanzenölproduktion und zur Biogasproduktion. Gerade der Biogassektor hat seit der Einführung des EEG ein starkes Wachstum zu verzeichnen. So wuchs die Zahl der Biogasanlagen bis Ende 2010 nach Prognosen, wie in Abb. 1 dargestellt, auf 6000 an (FACHVERBAND

BIOGAS E.V., 2011). Damit verbunden ist eine Zunahme der Flächen, auf denen Energiepflanzen für die Biogasproduktion angebaut werden, laut Prognosen der FNR belief sich dieser Zuwachs im Jahr 2010 gegenüber dem Vorjahr auf 120.000 ha (FNR, 2011).

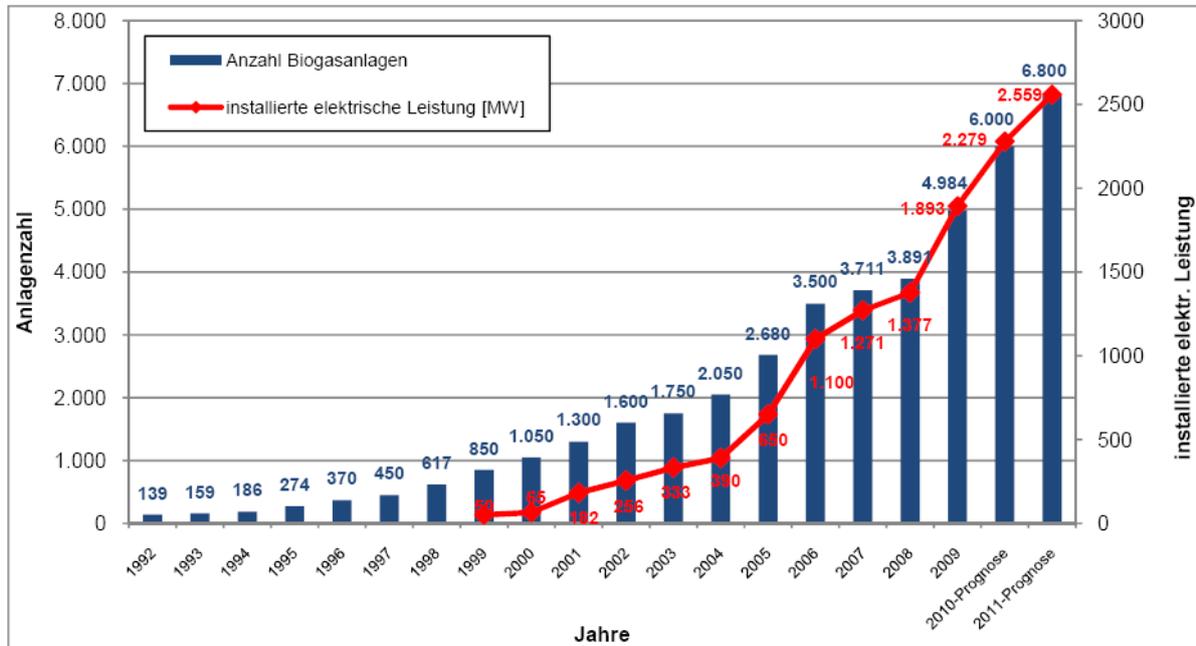


Abb. 1: Entwicklung der Anzahl Biogasanlagen und der gesamten installierten elektrischen Leistung in Megawatt [MW]
Stand: 11/2010 (FACHVERBAND BIOGAS E.V., 2011)

2 PROBLEMSTELLUNG UND ZIELSETZUNG

Für den Agrarstandort Schleswig-Holstein ist die Nutzung von Biomasse zur Energiegewinnung ein wichtiges Segment in landwirtschaftlichen Produktionsprozessen. Wie im gesamten Bundesgebiet ist ein verstärkter Trend zur Installation von Biogasanlagen zu beobachten. Bereits im Jahr 2009 betrug die Anzahl der Biogasanlagen 275 (FACHVERBAND BIOGAS E.V., 2011).

Für die Planung und den Betrieb von Biogasanlagen ist eine genaue Kenntnis der Vergärungseigenschaften der verfügbaren Substrate sowie der zu erwartenden Gaserträge erforderlich. Bisher liegen umfangreiche Studien zu möglichen Biogassubstraten beispielsweise aus Bayern (KAISER, 2007), Baden-Württemberg (LEMMER, 2005), Brandenburg (HEIERMANN et al., 2009) und Österreich (AMON et al., 2007b) vor. Je nach Fragestellung wurden die Untersuchungen unter stark variierenden methodischen Gesichtspunkten durchgeführt. Die Vergleichbarkeit der Ergebnisse ist daher nur sehr bedingt möglich.

Nach SCHOLWIN et al. (2009) ist die generelle Abbaubarkeit der organischen Substanz vom Gehalt an Nährstoffen und Gerüstsubstanzen abhängig. Der Gehalt an Gerüstsubstanzen bestimmt nicht nur die Abbaufähigkeit sondern auch die Geschwindigkeit, mit der die organische Substanz abgebaut wird. Die Höhe der Methanausbeute aus der Biomasse wird im Wesentlichen durch den Gehalt an Eiweiß, Fett, Rohfaser und stickstofffreien Extraktstoffen bestimmt. Die Konzentration dieser wertgebenden Inhaltsstoffe ändert sich jedoch mit dem Alter der Pflanzen, kann aber auch sortenspezifischen Charakter haben. Der Zeitpunkt, an dem die eingesetzten pflanzlichen Rohstoffe geerntet werden und Sorteneigenschaften sind deshalb in Bezug auf die Methanausbeute aus der Biomasse und auf die Methanmenge, die pro Hektar erzielt werden kann, von entscheidender Bedeutung. Diesbezügliche systematische Untersuchungen an Energiepflanzen aus Schleswig-Holstein existieren bislang nicht.

Hieraus leitet sich das übergreifende Ziel der vorliegenden Arbeit ab, nämlich die Charakterisierung von Substratqualität und Methanausbeute von in Schleswig-Holstein angebauten Energiepflanzen. Um dieses Hauptziel zu erreichen waren die nachfolgenden Teilziele zu bearbeiten:

- Planung, Aufbau und Validierung eines Biogaslabors bestehend aus Hohenheimer Biogasertragstest (HBT) und Batch-Versuchsanlage;

- Bestimmung des maximalen Gasertrages in Form von spezifischem Methanertrag und den Methanhektarertrag für verschiedene Pflanzenarten (Weizen, Mais, Deutsches Weidelgras) sowie Variation dieser Pflanzensubstrate über Düngemittel, Intensität der Stickstoffdüngung (N-Düngeintensität), Erntetermin und Konservierung;
- Vergleich der experimentell im Biogaslabor ermittelten Gaserträge mit dem nach KEYMER und SCHILCHER (1999) sowie WEIßBACH (2008) berechneten theoretischen Methanertrag;
- Vergleich der eingesetzten Gärtests;
- Vergleichende Beschreibung der Kinetik der Fermentation der untersuchten Substrate.

Die vorliegende Arbeit war eingegliedert in das Verbundprojekt „BIOGAS-EXPERT“ (<http://www.biogas-expert.uni-kiel.de/>), welches sich seit November 2006 in mehreren Teilprojekten mit der umfassenden Untersuchung und Bewertung des Systems „Boden-Pflanze-Fermenter“ beschäftigte. Hierbei wurden die in der vorliegenden Arbeit untersuchten Substrate vom Teilprojekt „Optimierung der Ertragsleistung und Nährstoffnutzungseffizienz in Systemen zur Produktion von Biomasse für Biogasanlagen unter den Klimabedingungen Schleswig-Holsteins“ bereitgestellt.

3 KENNTNISSTAND

Da sich die vorliegende Untersuchung mit der Bestimmung von Biogaserträgen verschiedener pflanzlicher Substrate befasst, werden zunächst die biologischen Grundlagen des Biogasprozesses zusammenfassend erläutert (Kap. 3.1). Für weiterreichende Informationen zur Prozessbiologie, Einflussgrößen und Verfahrenstechnik bei Biogasanlagen wird auf bewährte Standardliteratur, wie z. B. SCHOLWIN et al. (2009), EDER und SCHULZ (2006), SCHATTAUER und WEILAND (2006), MAURER und WINKLER (1982) und WELLINGER et al. (1991) verwiesen.

Die Bestimmung der Biogaserträge kann zum Einen mit Hilfe von Gärtests erfolgen, wobei in diskontinuierliche und kontinuierliche Gärtests unterschieden wird. Auf die verschiedenen Varianten der Gärtests wird in Kapitel 3.2 näher eingegangen. Zum Anderen bieten verschiedene Autoren (WEIßBACH, 2008, 2009b; KEYMER und SCHILCHER, 1999; AMON et al., 2003b) unterschiedliche Ansätze zur theoretischen Berechnung der Biogas- und Methanproduktion an, die auf der Inhaltsstoffzusammensetzung der Substrate beruhen. Die verschiedenen Berechnungsansätze werden in Kapitel 3.3 vorgestellt.

Die pflanzlichen Substrate müssen für den Betrieb von Biogasanlagen ganzjährig in gleichbleibender Qualität vorgehalten werden. Um dieses zu gewährleisten, werden die Substrate in der Regel durch Silierung haltbar gemacht. Die während der Silierung ablaufenden Prozesse beeinflussen die Gärqualität der Silagen und die auftretenden Verluste an Trockenmasse. Kapitel 3.4 gibt hierzu einen Überblick.

Im Hinblick auf die Biogas- und Methanerträge verschiedener pflanzlicher Substrate wurden in den vergangenen Jahren viele Untersuchungen verschiedener Forschungsinstitute mit diversen Fragestellungen durchgeführt. Eine Zusammenstellung dieser Untersuchungsergebnisse findet sich in Kapitel 3.5.

3.1 Biologische Grundlagen des Biogasprozesses

Bei anaeroben Abbauprozessen von organischer Substanz im feuchten Milieu entsteht als Stoffwechselprodukt der Bakterien ein Gasgemisch, das so genannte Biogas. Dieses setzt sich aus den Hauptkomponenten Methan (CH_4) und Kohlenstoffdioxid (CO_2) zusammen, sowie aus Wasser (H_2O), Schwefelwasserstoff

(H₂S), Stickstoff (N₂), Sauerstoff (O₂) und Wasserstoff (H₂). In natürlicher Umgebung entsteht dieses Gas vor allem in den Verdauungstrakten von Wiederkäuern, in Mooren und am Grund von stehenden Gewässern (SCHATTAUER und WEILAND, 2006). In Biogasanlagen wird diese Umsetzung von organischer Substanz unter Luftabschluss gezielt gesteuert, um das energiehaltige Gas Methan zu nutzen (SCHOLWIN et al., 2009). Hierzu wird das Gas aufgefangen und entweder durch Verbrennung zur Energiegewinnung genutzt oder nach erfolgter Aufbereitung ins Erdgasnetz eingespeist.

Der anaerobe Abbau der organischen Substanz lässt sich, wie in Abb. 2 dargestellt, in vier aufeinander folgende Phasen unterteilen. An diesen Phasen sind jeweils unterschiedliche, in Wechselwirkung miteinander stehende Bakteriengruppen beteiligt.

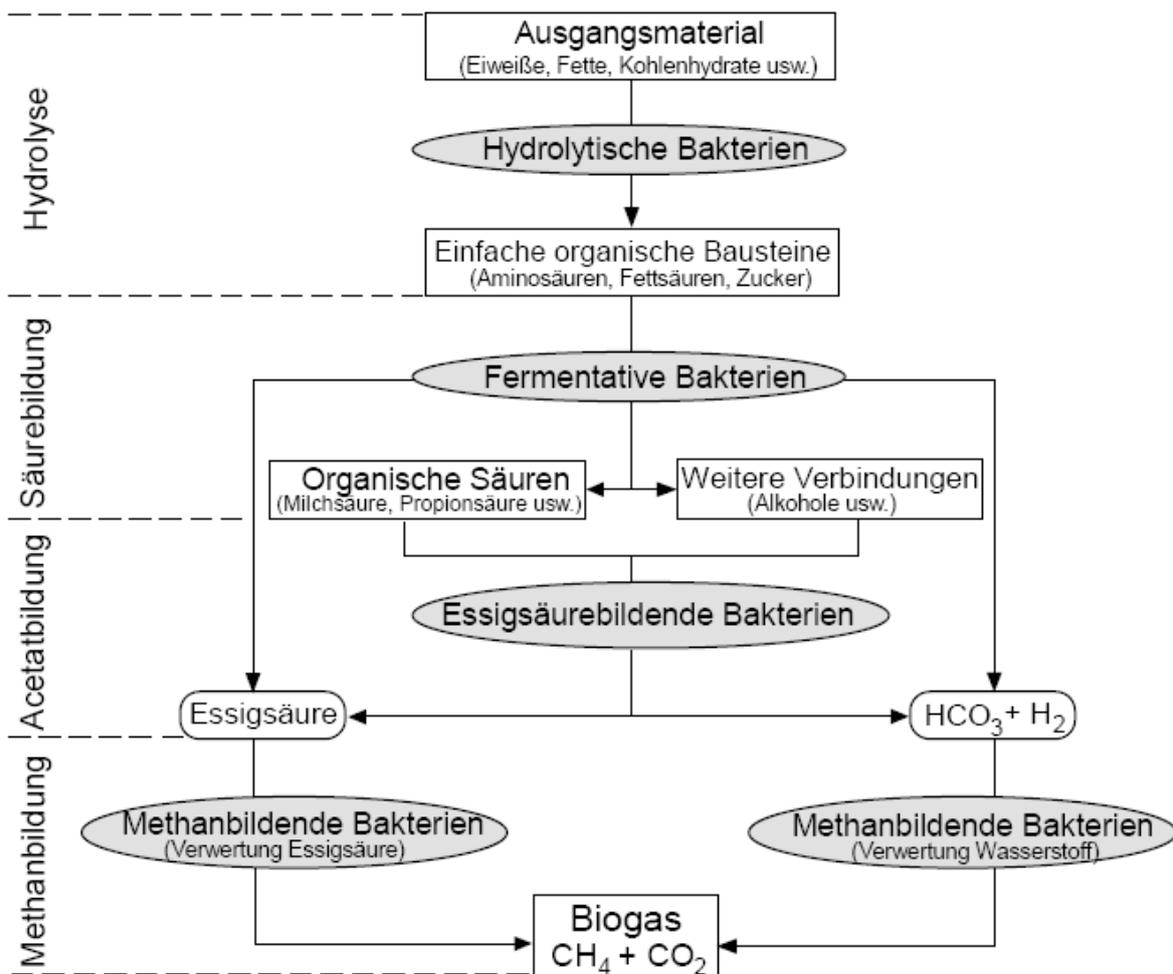


Abb. 2: Schematische Darstellung des Fermentationsprozesses nach SCHOLWIN et al. (2009)

Der erste Schritt der Umsetzung ist die so genannte Hydrolyse, in der die hochmolekularen organischen Substanzen Eiweiß, Kohlenhydrate und Fett mit Hilfe von extrazellulären Enzymen in niedermolekulare Verbindungen wie Aminosäuren, Einfachzucker und Fettsäuren umgewandelt werden. Diese Exoenzyme werden von hydrolytischen, fakultativ anaeroben Bakterien ausgeschieden. Da diese Reaktionen am langsamsten ablaufen, ist die Hydrolyse der geschwindigkeitsbegrenzende Prozess (KARPENSTEIN-MACHAN, 2005).

Die Produkte der Hydrolyse werden anschließend von fakultativ anaeroben, acidogenen Bakterien zu reduzierten Verbindungen wie organische Säuren (Essig-, Ameisen-, Butter-, Propionsäure), Alkoholen und Gasen (Kohlenstoffdioxid, Wasserstoff, Schwefelwasserstoff, Ammoniak) abgebaut. Diese Phase des Abbaus wird wegen des absinkenden pH- Wertes Versäuerung oder Acidogenese genannt (EDER und SCHULZ, 2006).

Da nicht alle Stoffwechselprodukte von den methanogenen Mikroorganismen (Archaea) verwertet werden können, verknüpft die Acetogenese bzw. Essigsäurebildung die Methanogenese mit der Acidogenese. Dabei werden kurzkettige Fettsäuren wie Butter- und Propionsäure zusammen mit Milchsäure, Alkoholen und Glycerin zu Essigsäure, Wasserstoff und Kohlendioxid umgewandelt.

In der letzten Phase des Fermentationsprozesses (Methanogenese) wird auf zwei verschiedenen Reaktionswegen von streng anaeroben, methanogenen Bakterien Methan gebildet. Die acetogenotrophen Methanbakterien nutzen als Energiequelle die in der Acetogenese gebildete Essigsäure. Im Gegensatz dazu nutzen hydrogenotrophe Methanbakterien Kohlenstoffdioxid und Wasserstoff (ASCHMANN et al., 2007; EDER und SCHULZ, 2006; BAUER et al., 2009). In der Standardliteratur (EDER und SCHULZ, 2006; SCHOLWIN et al., 2009; WELLINGER et al., 1991) wird der Anteil des aus der Essigsäure gebildeten Methans mit etwa 70 % beziffert. Aktuellere Untersuchungen zeigen, dass bei landwirtschaftlichen Biogasanlagen mit relativ hoher Raumbelastung (ab 2,5 bis 3 kg_{oTS} m⁻³d⁻¹) bzw. geringen Verweilzeiten, die hydrogenotrophen Methanogenen überwiegen und bei noch höheren Raumbelastungen keine acetogenotrophen Methanogenen mehr nachweisbar sind (BAUER et al., 2009). Auch KLOCKE et. al. (2009) belegen das Vorherrschen der hydrogenotrophen Methanogenen in den meisten von ihnen untersuchten Biogasanlagen. Jedoch können sie keinen Zusammenhang zwischen Raumbelastung bzw. Verweilzeit und der Zusammensetzung der methanogenen

Lebensgemeinschaft herstellen. Sie gehen davon aus, dass das Wachstum der acetogenotrophen Archaea durch hohe Gesamt-Ammoniumgehalte inhibiert wird.

Kennzeichnend für die verschiedenen Abbauprozesse sind die unterschiedlichen Milieuanforderungen. Für den Biogasprozess gibt es hinsichtlich des pH-Wertes unterschiedliche Optimalbereiche. Die Substrathydrolyse läuft nach BRAUN (1982) im schwach sauren Bereich ab. Das pH-Optimum der säurebildenden Bakterien liegt noch tiefer, wobei pH-Werte unterhalb von 4,5 bis 5 zu einem Aktivitätsverlust führen. Im Gegensatz dazu liegt das pH-Optimum der Methanbildner zwischen 6,8 und 7,4. Da die Methanbildner stärker auf ihr Optimum angewiesen sind als die Säurebildner, ist ein pH-Wert im neutralen bzw. schwach alkalischen Bereich anzustreben. Ein pH-Wert außerhalb des Bereiches von 6,6 bis 8,0 kann zu einer Hemmung des Gärprozesses führen bzw. die Bakterienpopulationen negativ beeinflussen (BRAUN, 1982).

Nach SCHMELZ (2000) gibt es für jede Mikroorganismenart ein Temperaturoptimum, in der die jeweiligen Mikroorganismen ihren höchsten Stoffumsatz haben. Es werden im Allgemeinen drei Temperaturstufen für Biogasprozesse unterschieden, die den temperaturabhängigen Aktivitätsoptima der jeweiligen Bakterienstämme entsprechen:

- psychrophile Stämme bei Temperaturen unter 25°C
- mesophile Stämme bei Temperaturen von 25-35°C
- thermophile Stämme bei Temperaturen über 45°C

Je höher die Optimumtemperatur der Stämme, desto empfindlicher reagieren die Bakterien auf Temperaturschwankungen (EDER und SCHULZ, 2006).

In Biogasanlagen werden verschiedene Gärsubstrate eingesetzt. Das Spektrum reicht von tierischen Exkrementen sowie anderen Rest- und Abfallstoffen aus der Landwirtschaft oder Nahrungsmittelindustrie bis hin zu extra für die Energieproduktion angebauten Pflanzen, den nachwachsenden Rohstoffen (Nawaro).

3.2 Bestimmung des Biogasertrages mittels Gärtests

Um den Biogas- und Methanertrag eines Biogassubstrates in der Realität zu bestimmen, kommen Gärversuche zum Einsatz. Die Durchführung solcher Gärversuche ist in der VDI Richtlinie 4630 (2006) geregelt. Hinsichtlich der

Versuchsdurchführung wird nach diskontinuierlichen und kontinuierlichen Gärversuchen unterschieden.

Diskontinuierliche Gärversuche, auch Batch-Versuche genannt, zeichnen sich dadurch aus, dass die Versuchsreaktoren (Fermenter) zu Versuchsbeginn mit einer bestimmten Menge Impfschlamm (Inokulum) und dem zu untersuchenden Substrat befüllt werden und der Versuch so lange fortgesetzt wird, bis davon ausgegangen werden kann, dass das Substrat vollständig umgesetzt worden ist. Während des Versuchsverlaufes findet weder eine Zugabe noch eine Entnahme von Stoffen statt. Batch-Versuche erlauben deshalb Aussagen zum theoretisch möglichen maximalen Biogas- und Methanertrag eines Stoffes bzw. Stoffgemisches, zur Beurteilung der Geschwindigkeit des anaeroben Abbaus sowie zu möglichen Hemmwirkungen. Im Gegensatz dazu geben sie jedoch keine Auskunft über die Prozessstabilität, zur Biogasausbeute unter Praxisbedingungen, zur Monovergärbarkeit des Substrates sowie zu Grenzen der organischen Raumbelastung. Eine Untersuchung dieser Parameter bzw. Einflüsse ist nur in einem kontinuierlichen Gärversuch möglich. Die Anforderungen an die Versuchsanlage und die Versuchsdurchführung sind jedoch weitaus höher als bei einem Batch-Versuch. Da es sich bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen um diskontinuierliche Versuche handelt, beschränken sich die folgenden Betrachtungen nur auf diesen Gärtesttyp.

Eine Versuchsanlage zur Durchführung von diskontinuierlichen Gärtests muss laut VDI 4630 (2006) folgende Anforderungen erfüllen:

- Gasdichtigkeit;
- Temperierbarkeit auf mesophile bzw. thermophile Bedingungen;
- Vorrichtung zur mechanischen Durchmischung bei Substraten, die zu Schwimmschichtbildung neigen;
- Größe der Gärtestgefäße entsprechend der Homogenität der Substrate;
- Dimensionierung der gasfassenden Apparatur (Gasspeicher, Volumenmessung, Gasanalyse) entsprechend den zu erwartenden Biogasmengen;
- regelmäßige Messung der Zusammensetzung des gebildeten Biogases.

Um eine gleichmäßige Temperierung der Fermenter zu gewährleisten, kommen im Labormaßstab vor allem Wasserbäder (MÄHNERT et al., 2005; AMON et al., 2007a),

Mantelheizungen (SCHUHMACHER, 2008) und Klimakammern bzw. Wärmeschränke (KAISER et al., 2004; HELFFRICH und OECHSNER, 2003) zum Einsatz. Als gaserfassende Systeme werden häufig Kolbenprober (HELFFRICH und OECHSNER, 2003), Eudiometer (DIN 38414-8), (AMON et al., 2007a), Gasmäuse (HERTWIG und HEIERMANN, 2006) oder Gasspeichersäcke (SCHUHMACHER, 2008; KAISER, 2007) eingesetzt. Die Volumenmessung erfolgt entweder direkt über die Skalierung des gaserfassenden Systems oder bei der Zwischenspeicherung in Gassäcken über Milligascounter (KAISER, 2007) oder Massendurchflussmesser (SCHUHMACHER, 2008). Zur qualitativen Analyse des Biogases auf die Hauptbestandteile Methan und Kohlendioxid, die in der Regel mehrmals während des Versuchszeitraumes durchgeführt wird, werden photometrische Gasanalysegeräte (Infrarot-Messung) (AMON et al., 2007b; PROCHNOW et al., 2005; KAISER, 2007; SCHUHMACHER, 2008) oder Gaschromatographen (LINKE und SCHELLE, 2001; NEVES et al., 2004) verwendet.

Die wichtigste Komponente für die erfolgreiche Durchführung der Laborversuche ist der Impfschlamm, da dieser die Grundlage der Gärversuche bildet. Die Qualität des Impfschlammes trägt ganz entscheidend zum Ergebnis der Gärversuche bei. Insbesondere die mikrobiologische Aktivität des Impfschlammes nimmt einen großen Einfluss auf das Ergebnis der Gärversuche (VDI, 2006). In der Literatur wird aber meist nur wenig über die Lagerung und Aufbereitung des Impfschlammes erwähnt. Aber auch über die Herkunft des Impfschlammes sowie über die verwendeten Mengen ist teilweise nur wenig in der Literatur beschrieben (LOPES et al., 2004). Nach AMON et al. (2003a) sind Kenntnisse über die Herkunft und die Aufbereitung des Impfschlammes wichtig, um Gärtests vergleichbar zu machen. Auch nach GRONAUER et al. (2005) ist für die Vergleichbarkeit paralleler Gärtests ein homogenes Impfmateriale, welches nur geringen Schwankungen unterliegt, von entscheidender Bedeutung.

Als Impfschlamm für Gärversuche werden ausgefaulte Rindergülle oder Schweinegülle (MÄHNERT et al., 2005; HERTWIG und HEIERMANN, 2006; OECHSNER et al., 2003; PROCHNOW et al., 2005; LINKE und VOLLMER, 2002), ausgefaulte Rinder- und Schweinegülle (TORRES-CASTILLO et al., 1995), Gärgut aus Biogasanlagen (AMON et al., 2007a), Rinderfestmist (SPRENGER et al., 2006) oder Gärreste aus vorangegangenen Batch-Versuchen (MÄHNERT et al., 2005) verwendet.

Auch wenn durchaus die gleichen Materialien als Impfschlamm für die Verwendung in Laborversuchen wie zum Anfahren von Biogasanlagen zum Einsatz kommen, so sind sie von ihren für den Einsatz gewünschten Eigenschaften gegensätzlich. Zum Anfahren von Biogasanlagen ist ein Impfschlamm mit hoher biologischer Aktivität gewünscht, um die Anlage schnell im oberen Leistungsbereich nutzen zu können. Für Laborversuche hingegen darf die biologische Aktivität nicht zu hoch sein, da eine hohe Eigengasproduktion des Impfschlammes zu einem größeren Versuchsfehler führen kann. Ideal ist ein an die Versuche adaptierter Impfschlamm, der eine geringe Eigengasproduktion aufweist, da zu hohe Gasproduktionsraten des Impfschlammes die Genauigkeit des Tests gefährden könnten (HELFFRICH und OECHSNER, 2003). Hinsichtlich der Eigengasproduktion muss darauf geachtet werden, dass diese nicht zu schwach ist, da eine ausreichende Vitalität des Impfschlammes wichtig für einen erfolgreichen Versuchsverlauf ist. Es sollten jedoch maximal 20 % der Gaserträge aus dem Impfschlamm stammen und der organische Trockensubstanzgehalt sollte bei über 50 % des Trockensubstanzgehaltes liegen (VDI 4630, 2006).

Nach den Richtlinien der VDI 4630 (2006) sollte bevorzugt unbehandelter Faulschlamm einer kommunalen Kläranlage verwendet werden, da dieser an eine Vielzahl von Substanzen adaptiert ist oder aber Impfschlamm aus landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Die DIN 38414 Teil 8 (1985) fordert, dass der Impfschlamm keiner messbaren Hemmung während der Faulung unterlegen sein darf.

Werden allerdings Gärtests mit schwer abbaubaren Substanzen durchgeführt, ist eventuell eine Adaption des Impfschlammes an dieses Substrat durch einen vorgezogenen Gärtest in Erwägung zu ziehen. Schon PAGGA UND BEIMBORN (1993) stellten fest, dass eine Adaption des Impfschlammes an die zu vergärenden Substanzen die Versuchsdauer reduziert und auch die Streuung der Ergebnisse verkleinert. Eine Adaption des Impfschlammes an das zu vergärende Substrat erst während des Gärversuchs, kann zu einer deutlichen Verlängerung der Versuchsdauer führen. Ein gut an das Substrat adaptierter Impfschlamm gewährleistet, dass der anaerobe Substratabbau im Gärtest zügig einsetzt und nach einer akzeptablen Zeit abgeschlossen ist. Ein zeitlich verspätet einsetzender Abbau kann zu verfälschten Versuchsaussagen führen (SCHERTLER und KÜBLER, 1996).

In aller Regel wird der zu verwendende Impfschlamm kurz vor dem Ansatz eines Batch-Versuches frisch aus einer Biogasanlage oder dem Klärwerk geholt und einer ca. einwöchigen Hungerphase unterzogen, um die Eigengasproduktion weit genug

abzusenken. Diese kurze Lagerungsdauer ist im Vergleich mit einer kontinuierlichen Impfschlamm Lagerung mit einem deutlich geringeren Arbeitsaufwand verbunden. Ein Nachteil, den diese Methode mit sich bringt, ist, dass der Impfschlamm jahreszeitlichen Schwankungen unterliegen kann. Gerade Impfschlamm aus Kläranlagen kann je nach Belastung in seiner Gäraktivität beeinflusst werden.

Die Lagerung erfolgt je nach Temperaturbereich der durchzuführenden Versuche im angepassten Temperaturmilieu (mesophil oder thermophil), um den Impfschlamm bereits vor Versuchsbeginn an die entsprechenden Versuchsbedingungen zu adaptieren und damit eine möglicherweise verzögerte Gasbildung im Versuch zu vermeiden.

Grundsätzlich besteht auch die Möglichkeit, den Impfschlamm über einen längeren Zeitraum zu lagern und zu füttern, um möglichen Qualitätsschwankungen des Impfschlammes vorzubeugen. Nach der DIN 38414 (1985) ist ca. alle 2 Wochen eine Fütterung mit faulfähigem Schlamm vorzunehmen. HELLFRICH und OECHSNER (2003) sprechen von einer 1-2 maligen wöchentlichen Fütterung des Impfschlammes mit hemmstofffreier Rindergülle. Dabei ist auf eine angepasste Fütterung zu achten, um die Eigengasproduktion des Impfschlammes nicht zu steigern.

Vor Versuchsbeginn ist der Impfschlamm auf Verunreinigungen zu überprüfen und gegebenenfalls zu sieben. Des Weiteren ist auf eine ausreichende Durchmischung direkt vor Versuchsbeginn zu achten, um eine repräsentative Probe zu erhalten (VDI 4630, 2006). Um die Eigengasproduktion des Impfschlammes erfassen zu können, sollten Nullproben (Impfschlamm ohne Substratzugabe) im Versuch eingesetzt werden. Außerdem empfiehlt sich der Einsatz eines Referenzsubstrates, dessen Biogaspotenzial bekannt ist, beispielsweise mikrokristalline Cellulose (VDI 4630, 2006), um sicher zu gehen, dass der Impfschlamm eine ausreichende mikrobiologische Aktivität aufweist.

Hinsichtlich der Anzahl der Wiederholungen für Null-, Referenz- und Substratproben sollten mindestens Doppel oder besser Dreifachbestimmungen durchgeführt werden. Der Probenaufbereitung kommt ein besonderer Stellenwert zu. Eine Vergrößerung der Materialoberfläche kann zu einer verbesserten anaeroben Abbaubarkeit führen (SCHOLWIN et al., 2006; PALMOWSKI, 2000). Um die Ergebnisse aus Gärversuchen vergleichbarer zu machen, gibt die VDI 4630 (2006) als Orientierungshilfe Partikelgrößen <10 mm an, wobei je nach verwendeter Versuchsausrüstung und zu beantwortender Fragestellung des Gärtests auch Abweichungen erforderlich sind. So

ist beispielsweise für den Hohenheimer Biogasertragstest (HBT) eine schonende Trocknung der Substrate bei 58 °C und Mahlen auf einen Siebdurchgang von 1 mm erforderlich (HELFFRICH und OECHSNER, 2003). Soll der Gärversuch jedoch Aussagen zur Abbaukinetik liefern, so empfiehlt es sich, Partikelgrößen zu verwenden, die in etwa der Praxis entsprechen. Darüber hinaus muss beachtet werden, dass sich nicht jede Gärtestapparatur für jedes Substrat eignet. So enthalten beispielsweise Silagen mehr oder weniger große Anteile flüchtiger Fettsäuren und Alkohole, die bei einer Probentrocknung verloren gehen (WEIßBACH und STRUBELT, 2008c). Eine Untersuchung von Silagen im Hohenheimer Biogasertragstest erscheint wegen der erforderlichen Probenaufbereitung daher nicht sinnvoll zu sein.

Bei der Einwaage der Substrate in die Versuchsfermenter ist auf eine repräsentative Probenahme zu achten, da einige Substrate zu Entmischung neigen. Außerdem darf die einzusetzende Probenmenge nicht zu hoch sein, um eine Hemmung im Gäransatz zu vermeiden. Das Verhältnis der organischen Trockensubstanz aus dem Substrat zur organischen Trockensubstanz aus dem Inokulum sollte höchstens 0,5 betragen (VDI 4630, 2006).

Auch hinsichtlich der Versuchsdauer macht die VDI 4630 (2006) Angaben. Das Abbruchkriterium ist erfüllt, wenn die tägliche Biogasbildungsrate nur noch 1 % der gesamten gebildeten Biogasmenge beträgt.

Obwohl die VDI 4630 (2006) klare Vorgaben zur Durchführung von diskontinuierlichen Gärtests macht, sind den einzelnen Forschungseinrichtungen hinsichtlich der technischen Ausführung gewisse Spielräume gegeben, z.B. die Wahl der Gärtestapparatur und des Impfschlamm (Herkunft, Aktivität, Adaptation), Substrataufbereitung und Versuchsdauer. Dementsprechend sind die Ergebnisse mit Unsicherheiten behaftet (HEUWINKEL et al., 2009). Um festzustellen, wie vergleichbar die Ergebnisse verschiedener Labore sind, wurden in den Jahren 2006 bis 2008 vom KTBL Ringversuche durchgeführt, an denen mehr als 30 Labore teilnahmen (MEßNER et al., 2009; WULF et al., 2011). Diese Ringversuche beseitigten eine Vielzahl von Problemen auch im Bereich der Datenauswertung, die Vergleichbarkeit wurde erhöht. So kann eine Variation der Versuchsergebnisse von 8 bis 10% im letzten Durchgang durchaus als zufriedenstellend angesehen werden (HEUWINKEL et al., 2009).

Aussagen zur Variation der Messungen und deren Ursachen innerhalb eines Labors sind bisher selten veröffentlicht worden. Als Beispiel sei zunächst der Vergleich des

Hohenheimer Biogasertragstestes mit großvolumigeren Batch-Apparaturen (250 ml-Fermenter mit Eudiometer, 2 l-Erlenmeyerkolben mit Gasmaus, stehende und liegende Fermenter mit 16 bzw. 32 l) genannt (HELFFRICH und OECHSNER, 2003; FISCHER, 2007). HELFFRICH und OECHSNER (2003) ermittelten einen Variationskoeffizient von 7,1 % zwischen den Gärtestapparaturen. FISCHER (2007) berichtet von geringen Abweichungen zwischen dem HBT und dem Eudiometerverfahren, jedoch von Abweichungen von bis zu 10 % zwischen HBT und der aus Erlenmeyerkolben und Gasmaus bestehenden Apparatur, die auf Undichtigkeiten dieser Apparatur zurückzuführen sind. GRONAUER und KAISER (2007) konnten keine signifikanten Unterschiede im Methanertrag der von ihnen in zwei verschiedenen Batch-Versuchsanlagen (2 l und 36 l) untersuchten Substrate nachweisen. Bei diesen Versuchen wurde eine größere Streuung der Ergebnisse in der 36l-Versuchsanlage im Vergleich mit der kleinen Anlage beobachtet, die auf Probleme wie Wiederholbarkeit der Befüllmengen, Konstanz der Milieubedingungen und Homogenität sowie Gasundichtigkeiten zurückgeführt wurde.

3.3 Berechnung des theoretischen Biogasertrags

Da Gärtests zeit-, kosten- und arbeitsaufwändig sind, wurden von verschiedenen Autoren (BUSWELL, 1936; BOYLE, 1977; KEYMER und SCHILCHER, 1999; AMON et al., 2003b; WEIßBACH, 2008, 2009b) Lösungsansätze entwickelt, die es ermöglichen, den zu erwartenden Biogasertrag eines Substrates zu berechnen. Die Berechnungsmodelle, die in Kapitel 3.3.3 bis 3.3.7 in chronologischer Reihenfolge vorgestellt werden, beruhen auf der Kenntnis der Inhaltsstoffe des jeweiligen Gärsubstrates.

3.3.1 Bestimmung der pflanzlichen Inhaltsstoffe

Die Inhaltsstoffe von Pflanzen können mit Hilfe des Verfahrens der Weender Analyse in verschiedene Fraktionen unterteilt werden. Dabei wird zunächst eine zerkleinerte Probe des Gärsubstrates bei einer Temperatur von 105°C bis zur Massekonstanz getrocknet, um das in der Frischmasse enthaltene Wasser herauszutrennen. Die dadurch erhaltene Trockenmasse besteht sowohl aus anorganischen als auch aus organischen Stoffen. Der Parameter Trockensubstanz (TS) gibt an, welchen

prozentualen Anteil die Trockenmasse an der Frischmasse ausmacht (KIRCHGEßNER et al., 2008; JEROCH et al., 2008).

Um den organischen Anteil zu analysieren, wird die Trockenmasse bei rund 550°C verbrannt. Die Gewichts Differenz der nachbleibenden Rohasche (XA) zur Trockenmasse ergibt den organischen und damit aus Kohlenstoff-Verbindungen bestehenden Anteil des Substrates (oTS organische Trockensubstanz) (KIRCHGEßNER et al., 2008; JEROCH et al., 2008).

In der Fraktion Rohprotein (XP) werden alle Verbindungen zusammengefasst, die Stickstoff (N) enthalten. Zur Bestimmung des Rohproteinanteils wird zunächst der Stickstoffgehalt der Probe ermittelt (z. B. durch Kjeldahlsche Stickstoffbestimmung). Anschließend wird das Ergebnis mit einem Faktor multipliziert, der den reziproken Wert des typischen N-Gehaltes von Rohprotein darstellt. Dieser beträgt bei pflanzlichen Proteinen 6,25, da von einem mittleren N-Gehalt des Rohproteins von 16 % ausgegangen wird. Unter diese Fraktion fallen nicht nur Proteine, sondern ebenfalls stickstoffhaltige Nicht-Protein-Verbindungen, wie freie Aminosäuren, Säureamide, stickstoffhaltige Glykoside, Harnstoff und sonstige organische Verbindungen mit dreiwertigem Stickstoff (KIRCHGEßNER et al., 2008; JEROCH et al., 2008).

Bei dem Rohfett (XL) handelt es sich um eine Ansammlung von Stoffen, die als charakteristisches Merkmal die Löslichkeit in Etherextrakt besitzen, was für die Analyse genutzt wird (KIRCHGEßNER et al., 2008; JEROCH et al., 2008).

Die Rohfaserfraktion (XF) enthält organische Verbindungen, die in schwachen Säuren und schwachen Laugen unlöslich, sowie frei von Fett, Stickstoff und Asche sind. Größtenteils sind sie den pflanzlichen Gerüstsubstanzen zuzuordnen und setzen sich aus Cellulose, Lignin, Pentosanen, etc. zusammen (KIRCHGEßNER et al., 2008; JEROCH et al., 2008).

Als letzte Gruppe der Nährstoffanalyse werden die Stickstoff-freien-Extraktstoffe (NfE) rechnerisch erfasst und bilden die Differenz aus Rohprotein, Rohfett und Rohfaser zur organischen Masse. Diese Fraktion enthält alle Verbindungen, die bei den anderen Bestimmungen nicht erfasst wurden. Sie besteht vor allem aus den leicht löslichen Kohlenhydraten wie Stärke, Glycogen und Zucker, als auch aus den leicht löslichen Anteilen pflanzlicher Gerüstsubstanzen, wie Pectine, Pentosane und Beta-Glucane (KIRCHGEßNER et al., 2008; JEROCH et al., 2008).

Da die Weender Futtermittelanalyse laut KIRCHGEßNER et al. (2008) in der Fraktion der Rohfaser und der Stickstoff-freien-Extraktstoffe einen Schwachpunkt aufgrund mangelnder Differenzierung der Kohlenhydrate aufweist, wurde von van Soest ein erweitertes Analysensystem zur Differenzierung der Kohlenhydrate und ihrer Begleitsubstanzen (z. B. Lignin) entwickelt. Hierbei wird durch das Kochen der Probe in neutraler Detergentienlösung die Summe der Gerüstsubstanzen (Cellulose, Hemicellulose, Lignin) erhalten (NDF, Neutral Detergent Fiber). Nach anschließendem Kochen in schwefelsaurer Detergentienlösung entsteht ein weiterer Rückstand, der im Wesentlichen nur noch Cellulose und Lignin enthält (ADF, Acid Detergent Fiber). Durch Hydrolyse der Cellulose mit 72%iger Schwefelsäure aus diesem Rückstand wird der Lignin-Anteil gewonnen (ADL, Acid Detergent Lignin) (KIRCHGEßNER et al., 2008).

3.3.2 Korrektur des Trockensubstanzgehaltes von Silagen nach Weißbach

Die Gärsubstrate werden für den ganzjährigen Einsatz in der Biogasanlage in der Regel durch Silieren konserviert. Während des Silierprozesses, auf den in Kapitel 3.4.1 näher eingegangen wird, entstehen als Gärprodukte niedere flüchtige Fettsäuren, Alkohole und Ammoniak. Da diese Gärprodukte bei der Trocknung entweichen, ist eine Korrektur des Trockensubstanzgehaltes erforderlich (WEIßBACH und KUHLA, 1995; JEROCH et al., 2008). Hierzu haben WEIßBACH und KUHLA bereits 1995 erste Ergebnisse aus Untersuchungen veröffentlicht. Entgegen der in Kapitel 3.3.1 beschriebenen Vorgehensweise zur Bestimmung der Trockenmasse findet in der Untersuchungspraxis bei Silagen zunächst eine Vortrocknung der Proben bei 60 bis 65 °C und anschließend eine Trocknung bei 105 °C statt (WEIßBACH und KUHLA, 1995). Ausgehend von diesem Verfahren wurden die Flüchtigkeitsquoten der einzelnen in Silagen auftretenden Substanzen (Essig-, Propion-, Butter-, Valerian-, Capron-, Milchsäure, Ammoniak, Alkohole) beim Trocknen bestimmt. Es ergaben sich für einige Verbindungen erhebliche Schwankungen der Flüchtigkeitsquoten, deren Ursache in der Azidität der Silagen zu suchen war. Je höher der pH-Wert der Silage, desto weniger Fettsäuren und desto mehr Ammoniak verdampften während der Trocknung, wobei sich die verschiedenen Fettsäuren in ihren Flüchtigkeitsquoten kaum unterschieden. Die Flüchtigkeit von Milchsäure und Alkohol wird nicht durch den pH-Wert beeinflusst. Entsprechend den

ermittelten Flüchtigkeitsquoten wurden pH-Wert abhängige Korrekturgleichungen (Formel 1 bis 5, WEIßBACH und KUHLA, 1995) aufgestellt, wobei die Anteile der Gärprodukte in der Silage durch Analyse bestimmt werden müssen. Die Dimension der Gehalte erfolgt in der Einheit % der Frischmasse.

$$\text{pH bis 4,0} \quad : \quad TM_k = TM_n + 0,94 \text{ FFS} + 0,08 \text{ MS} + A + 0,16 \text{ NH}_3 \quad (1)$$

$$\text{pH 4,01 bis 4,5} \quad : \quad TM_k = TM_n + 0,80 \text{ FFS} + 0,08 \text{ MS} + A + 0,32 \text{ NH}_3 \quad (2)$$

$$\text{pH 4,51 bis 5,0} \quad : \quad TM_k = TM_n + 0,68 \text{ FFS} + 0,08 \text{ MS} + A + 0,48 \text{ NH}_3 \quad (3)$$

$$\text{pH 5,01 bis 5,5} \quad : \quad TM_k = TM_n + 0,58 \text{ FFS} + 0,08 \text{ MS} + A + 0,64 \text{ NH}_3 \quad (4)$$

$$\text{pH über 5,51} \quad : \quad TM_k = TM_n + 0,50 \text{ FFS} + 0,08 \text{ MS} + A + 0,80 \text{ NH}_3 \quad (5)$$

mit

TM_k : korrigierter Trockenmassegehalt

TM_n : unkorrigierter Trockenmassegehalt

FFS : Gehalt an flüchtigen Fettsäuren

MS : Gehalt an Milchsäure

A : Gehalt an Alkohol

NH_3 : Gehalt an Ammoniak

Da in der Praxis häufig zur Kosteneinsparung keine umfassenden chemischen Analysen der Silagen durchgeführt werden, kann der Trockensubstanzgehalt über eine Schätzgleichung korrigiert werden. Davon ausgehend, dass Maissilagen eher eine gute Gärqualität und andere Silagen, z.B. Grassilagen eher eine schlechtere Gärqualität aufweisen, berechnet sich der korrigierte Trockensubstanzgehalt über folgende Gleichungen (Formel 6 und 7, WEIßBACH und KUHLA, 1995):

$$\text{Maissilage:} \quad TM_k = 2,22 + 0,960 \text{ TM}_n \quad (6)$$

$$\text{alle anderen Silagen:} \quad TM_k = 2,08 + 0,975 \text{ TM}_n \quad (7)$$

Aufgrund weiterführender Untersuchungen zu dieser Thematik wurden die Korrekturgleichungen futterartspezifisch weiterentwickelt (WEIßBACH und STRUBELT, 2008b), so dass nun nach Mais- und Grassilage unterschieden wird. Auch hier existieren genauere Gleichungen (Formel 8 und 9, WEIßBACH und STRUBELT, 2008b), die die chemische Analyse der Silagen voraussetzen und

Schätzformeln (Formel 10 und 11, WEIßBACH und STRUBELT, 2008b). Die Angabe der Gehalte erfolgt in der Einheit g/kg Frischmasse.

$$\text{Maissilage: } TM_k = TM_n + 0,95 \text{ FFS} + 0,08 \text{ MS} + 0,77 \text{ PD} + 1,00 \text{ AA} \quad (8)$$

$$\text{Grassilage: } TM_k = TM_n + (1,05 - 0,059 \text{ pH}) \text{ FS} + 0,08 \text{ MS} + 0,77 \text{ PD} + 0,87 \text{ BD} + 1,00 \text{ AA} \quad (9)$$

$$\text{Schätzformel Maissilage: } TM_k = 24,5 + 0,980 \text{ TM}_n \quad (10)$$

$$\text{Schätzformel Grassilage: } TM_k = 26,2 + 0,970 \text{ TM}_n \quad (11)$$

mit

TM_k : korrigierter Trockenmassegehalt

TM_n : unkorrigierter Trockenmassegehalt

FS: Summe der Gehalte an niederen Fettsäuren (C_2 bis C_6)

MS: Gehalt an Milchsäure

PD: Gehalt an 1,2-Propandiol

BD: Gehalt an 2,3-Butandiol

AA: Summe aller anderen Alkohole (C_2 bis C_4)

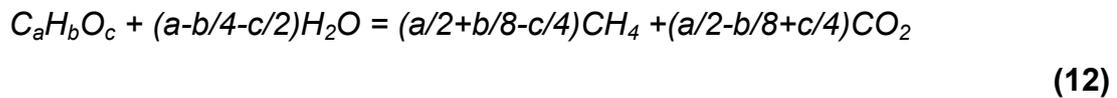
In neueren Veröffentlichungen (WEIßBACH und STRUBELT, 2008c, 2008a) wird von einer Korrektur über Schätzgleichungen (Formel 6, 7, 10 und 11) abgeraten, da diese zu großen Fehlern führen können.

Im Anschluss an die Trockensubstanzkorrektur müssen alle direkt in der getrockneten Probe gemessenen und üblicherweise auf die Trockensubstanz bezogenen Inhaltstoffangaben, z.B. der Aschegehalt, durch Multiplikation mit den Quotienten aus TM_n/TM_k korrigiert werden. Alle Differenzfraktionen, z.B. die organische Trockensubstanz, müssen mit Hilfe der auf TM_k bezogenen Messgrößen neu berechnet werden.

3.3.3 Theoretische Biogasausbeute nach Buswell

Der erste Ansatz zur Berechnung der potenziellen Gasausbeute stammt aus dem Jahr 1936 (BUSWELL, 1936). Zur Berechnung der theoretischen Gasausbeute dient allein die chemische Summenformel. Davon ausgehend dass Kohlenstoffdioxid und Methan die Endprodukte der Fermentation von organischen Substraten sind, wenn Wasser die einzige Sauerstoffquelle ist, wurde die Formel von BUSWELL (1936) wie

in Gleichung 12 formuliert. Dabei wird vorausgesetzt, dass eine chemische Verbindung a mol Kohlenstoff (C), b mol Wasserstoff (H) und c mol Sauerstoff (O) enthält.



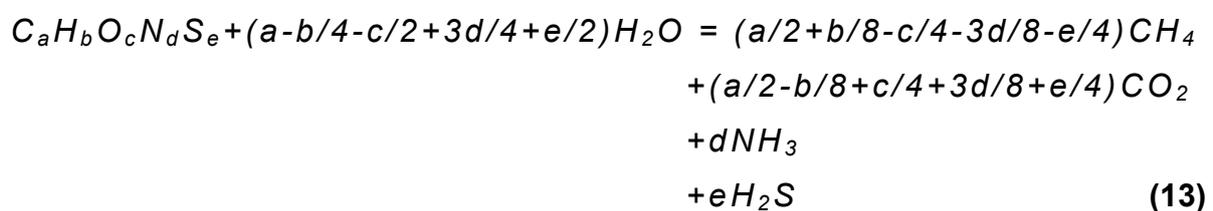
mit

$C_aH_bO_c$	<i>Kohlenhydrate</i>
H_2O	<i>Wasser</i>
CH_4	<i>Methan</i>
CO_2	<i>Kohlenstoffdioxid</i>

Diese Gleichung definiert das Gasverhältnis von Methan zu Kohlenstoffdioxid und das Ergebnis wird in Prozent des Gewichtes des vergorenen Substrates angegeben.

3.3.4 Theoretische Biogasausbeute nach Boyle

BOYLE (1977) erweiterte die Gleichung von BUSWELL (1936), um auch Stickstoff (N) und Schwefel (S) in die Berechnung mit einbeziehen zu können, was bei der Vergärung von Proteinen von Bedeutung ist. Diese erweiterte Formel ist in der Gleichung 13 dargestellt. Dabei wird vorausgesetzt, dass eine chemische Verbindung a mol Kohlenstoff (C), b mol Wasserstoff (H), c mol Sauerstoff (O), d mol Stickstoff (N) und e mol Schwefel (S) enthält.



mit

$C_aH_bO_cN_dS_e$	<i>Proteine</i>
H_2O	<i>Wasser</i>
CH_4	<i>Methan</i>
CO_2	<i>Kohlenstoffdioxid</i>
NH_3	<i>Ammoniak</i>

H_2S *Schwefelwasserstoff*

Werden Proteine in anaerober Fermentation abgebaut, kann anhand dieser Formel die theoretische Biogaszusammensetzung berechnet werden.

3.3.5 Theoretische Biogasausbeute nach Keymer

Die Überlegungen von KEYMER und SCHILCHER (1999) beruhen einerseits auf der Annahme, dass die Umsetzungen in einem Gärbehälter ähnlich verlaufen, wie in einem Rindermagen. Andererseits hängt der theoretisch mögliche Biogas- und Methanertrag eines Substrats von den Gehalten an Inhaltsstoffen und deren Verdaulichkeit ab.

Zur Berechnung der theoretischen Biogasproduktion werden die Rohnährstoffgehalte [g/kg_{TS}] mit der jeweiligen Verdaulichkeitsrate (VQ Verdaulichkeitsquotient [%]) wie in den Gleichungen 14 bis 16 multipliziert, wobei sowohl die Rohnährstoffgehalte als auch die Verdaulichkeitsquotienten aus Futterwerttabellen entnommen werden können. Die Kohlenhydrate werden noch in die Stickstofffreien Extraktstoffe (XX) und Rohfaser (XF) unterschieden.

$$\text{Verdauliche Kohlenhydrate [g]} = (XF * VQ_{XF}) + (XX * VQ_{XX}) \quad (14)$$

$$\text{Verdauliches Rohfett [g]} = XL * VQ_{XL} \quad (15)$$

$$\text{Verdauliches Rohprotein [g]} = XP * VQ_{XP} \quad (16)$$

Die Ergebnisse werden mit der spezifischen Gasbildungsrate entsprechend Tab. 1 multipliziert (BASERGA, 1998).

Tab. 1: Spezifische Gasbildungsrate und Methangehalt der verdaulichen Inhaltsstoffe nach BASERGA (1998)

mit XP: Rohprotein, XL: Rohfett, XF und XX: Kohlenhydrate

	Gasbildungsrate [l/g]	Methangehalt [%]
Verdauliches Rohprotein	0,7	71
Verdauliches Rohfett	1,25	68
Verdauliche Kohlenhydrate	0,79	50

Die einzelnen Gaserträge werden aufsummiert und auf die organische Trockensubstanz umgerechnet.

3.3.6 Methanenergiewert nach Amon

AMON (2003b) entwickelte basierend auf den Ergebnissen aus Batch-Versuchen eine Methode, um den Methanenergiewert (MEW [l_N/kg_{oTS}]) für Energiepflanzensilagen, wie Mais- oder Kleegrassilage zu berechnen. Folgende Inhaltsstoffe fließen in die Berechnung ein: Rohfaser (XF) unterteilt in Cellulose, Hemicellulose und Lignin, Rohfett (XL), Rohprotein (XP) und Stickstofffreie Extraktstoffe (XX). Die Gleichungen (Gleichung 17 und 18, AMON et al., 2003b) lauten:

$$\begin{aligned}
 \text{MEW Maissilage } [l_NCH_4/kg_{oTS}] = & -9589,88 + 105,05 \cdot XP[\%] + 88,5 \cdot XL[\%] + \\
 & 102,98 \cdot XF[\%] + 99,27 \cdot XX[\%] + 17,04 \cdot \text{Cellulose}[\%] \\
 & + 4,68 \cdot \text{Hemicellulose}[\%] + 2,17 \cdot \text{Lignin}[\%]
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

$$\begin{aligned}
 \text{MEW Kleegrassilage } [l_NCH_4/kg_{oTS}] = & -959,1 + 19,37 \cdot XP[\%] + 20,14 \cdot XL[\%] + \\
 & 33,31 \cdot XF[\%] + 10,28 \cdot XX[\%] + \\
 & (-2,74) \cdot \text{Cellulose}[\%] + (-6,75) \cdot \text{Hemicellulose}[\%] \\
 & + 1,59 \cdot \text{Lignin}[\%]
 \end{aligned}
 \tag{18}$$

In den folgenden Jahren wurde das Methanenergiewertsystem weiterentwickelt (AMON et al., 2007b) und auch an andere Energiepflanzen wie Getreide-GPS, Grassilage angepasst. Die Anzahl der für die Berechnung benötigten Inhaltsstoffe ist

in dem aktuellen Modell geringer. Dessen allgemeine Gleichung (Gleichung 19, AMON et al., 2007b) lautet:

$$MEW [l_N/kg_{oTS}] = x_1 * XP[\%] + x_2 * XL[\%] + x_3 * XF[\%] + x_4 * XX[\%] \quad (19)$$

wobei die Regressionskoeffizienten für die einzelnen Substrate Tab. 2 entnommen werden können.

Tab. 2: Regressionskoeffizienten verschiedener Substrate für das Methanenergiewertsystem nach AMON et al. (2007b)

Substrat	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄
Maissilage	15,27	28,38	4,54	1,12
Getreide-GPS	5,904		3,791	1,352
Grassilage	2,19	31,38	1,48	1,85

3.3.7 Theoretische Biogasausbeute nach Weißbach

WEIßBACH (2008) zeigt die Schwächen der Berechnung der theoretischen Biogasausbeute nach der Methode von KEYMER und SCHILCHER (1999) auf, die seiner Ansicht nach darin liegen, dass die am Tier gemessene scheinbare Verdaulichkeit mit der biologischen Abbaubarkeit gleichgesetzt wird. Basierend auf den Ergebnissen einer großen Anzahl von standardisierten Verdauungsversuchen an Schafen, führt er den Parameter fermentierbare organische Substanz (FoTS) ein und definiert diese als die „Menge organischer Trockensubstanz, die unter anaeroben Bedingungen potenziell durch Mikroorganismen abgebaut werden kann und die sich deshalb unter optimalen Prozessbedingungen und bei ausreichend langer Prozessdauer in Biogasanlagen biologisch nutzen lässt“ (WEIßBACH, 2008). Zur Berechnung der fermentierbaren organischen Substanz [g/kgTS] verschiedener als Substrate für Biogasanlagen in Frage kommender nachwachsender Rohstoffe werden Schätzgleichungen aufgestellt. In diese Schätzgleichungen gehen lediglich der Aschegehalt (XA), der Rohfasergehalt (XF) sowie bei Gräsern der Parameter enzymunlösliche organische Substanz (EuOS) ein. Sie gelten sowohl für frisches Erntegut als auch für schonend getrocknetes Material oder Silagen, unter der

Voraussetzung, dass der Trockensubstanzgehalt um flüchtige Gärprodukte korrigiert wurde (vgl. Kap. 3.3.2). Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden an dieser Stelle nur die Schätzgleichungen für die in der vorliegenden Arbeit betrachteten Substrate wiedergegeben (Gleichungen 20 bis 23, WEIßBACH, 2008).

$$\text{Mais:} \quad FoTS = 984 - (XA) - 0,47 (XF) - 0,00104 (XF)^2 \quad (20)$$

$$\text{Weizen:} \quad FoTS = 982 - (XA) - 0,53 (XF) - 0,00102 (XF)^2 \quad (21)$$

Gras, intensive Nutzung (1. und 2. Aufwuchs):

$$FoTS = 969 - (XA) - 0,26 (XF) - 0,00300 (XF)^2 \quad (22)$$

Gras, alle Intensitätsstufen und Aufwüchse:

$$FoTS = 1000 - (XA) - 0,62 (EuIOS) - 0,000221 (EuIOS)^2 \quad (23)$$

Ausgehend von stöchiometrischen Berechnungen (WEIßBACH, 2009b, 2009c) und mit Hilfe eines Praxisversuches bestätigt, kann zur Berechnung des theoretischen Biogas- und Methanertrages davon ausgegangen werden, dass je kg fermentierbarer organischer Substanz 800 l Biogas mit 420 l Methan gebildet werden.

3.4 Konservierung von Energiepflanzen

Um eine ganzjährige Beschickung der Biogasanlage mit Energiepflanzen zu gewährleisten, ist eine Konservierung der Ernteguts notwendig. Bei Vorliegen von aeroben Bedingungen werden Nährstoffe relativ schnell durch pflanzeneigene Enzyme und aerobe Mikroorganismen mittels Atmung umgesetzt. Dabei geht Energie als Wärme verloren, Kohlendioxid und Wasser werden freigesetzt und der Verderb des Futters wird eingeleitet (JEROCH et al., 2008). Um die wertgebenden Inhaltsstoffe zu erhalten und den Verderb zu verhindern, ist das gängige Verfahren der Konservierung von Futter- wie auch Energiepflanzen die Silierung. Dabei wandeln Milchsäurebakterien unter anaeroben Bedingungen Kohlenhydrate in organische Säuren um, was mit einer pH-Wert-Absenkung einhergeht. Der Prozess läuft normalerweise spontan ab, wenn das Ausgangsmaterial einen ausreichenden Feuchtigkeitsgehalt hat, genügend vergärbaren Zucker und siliertaugliche Milchsäurebakterien enthält und anaerobe Verhältnisse gewährleistet sind (SPIEKERS, 2006). Auf den Silierprozess wird in Kapitel 3.4.1 näher eingegangen.

Hinsichtlich der Verfahrenstechnik kann auf die gängigen Verfahren der Futtermittelkonservierung zurückgegriffen werden. Die Siliertechnik hat zum Ziel, anaerobe Verhältnisse zu schaffen, also molekularen Sauerstoff vom Silierprozess auszuschließen. Dazu sind eine gleichmäßige Zerkleinerung des Siliergutes, eine Verwendung von geeigneten Silos, eine rasche Einlagerung mit ausreichender Verdichtung sowie ein gasdichtes Verschließen erforderlich. Hinsichtlich der Zerkleinerung des Siliergutes empfehlen sich kurze Partikel, da diese die Silierbarkeit und Verdichtbarkeit erhöhen (SPIEKERS, 2006). Die Silos müssen folgenden Anforderungen genügen: Schutz des Futters vor Verschmutzung, Luftzutritt, Witterungseinflüssen, säurebeständiges und gasdichtes Material, vollständige Erfassung des anfallenden Gärsafts. Durch rasche Einlagerung können Nährstoffverluste durch Atmung der Bakterien und das Massewachstum der Mikroorganismen minimiert werden. Die Verdichtung dient dem Beseitigen der Luftkanäle im Futterstock, was ein Nachsickern von Sauerstoff verhindert, wobei der Grad der Verdichtung vom Trockenmassegehalt des Ausgangsmaterials abhängig ist (SPIEKERS, 2006).

3.4.1 Gärungsbiologische Grundlagen der Silagebereitung

Der Silierprozess gliedert sich in vier Phasen: die aerobe Phase, die Hauptgärphase, die Lagerphase und die Entnahmephase. Die einzelnen Phasen des Silierprozesses werden nachfolgend kurz erläutert, wobei auf die Darstellung von chemischen Reaktionsgleichungen verzichtet wird. Hier wird auf die entsprechende Fachliteratur (JEROCH et al., 2008; MCDONALD, 1981) verwiesen.

Die aerobe Phase dauert so lange an (wenige Stunden), bis der Restsauerstoff im Siliergut vollständig verbraucht ist. Während dieser Zeit betreiben die Pflanzenzellen und die auf den Pflanzen vorhandenen Mikroorganismen (Epiphyten) Atmungsstoffwechsel, es kommt zu einer Massenvermehrung der Mikroorganismen. Das Siliergut erwärmt sich.

Die Hauptgärphase dauert nach PAHLOW (2006) bei Temperaturen oberhalb von 15 °C normalerweise eine Woche, nach JEROCH et al. (2008) bis zu zwei Wochen. Durch das Absterben des Pflanzengewebes werden die Zellinhaltsstoffe frei und stehen der Silagemikroflora (vor allem homo- und heterofermentative Milchsäurebakterien, Enterobakterien, Clostridien, Listerien, Hefepilze) zur

Verfügung. Die Mikroorganismen konkurrieren um die begrenzt verfügbaren Pflanzenzucker, als Stoffwechselprodukte entstehen neben Kohlendioxid und Wasser organische Säuren (Milchsäure, Essigsäure, Propionsäure, Buttersäure), die zu einer Absenkung des pH-Wertes führen, sowie Alkohole. Im Idealfall überwiegt die Bildung der Milchsäure durch die Milchsäurebakterien, wodurch der pH-Wert soweit gesenkt wird, dass die Aktivitätsgrenze der anderen Bakterien unterschritten wird (JEROCH et al., 2008).

Schließlich werden die Milchsäurebakterien durch die Anreicherung ihres eigenen Stoffwechselprodukts in ihrer Aktivität gehemmt (pH<3,0 bis 3,6). Lediglich Hefen tolerieren einen noch geringeren pH-Wert. Sobald das Stadium nachlassender Intensität des Gärungsprozesses erreicht wird, beginnt die Lagerungsphase. In dieser Phase sind nur noch wenige besonders säuretolerante Enzyme aktiv, die die Speicher- und Gerüstsubstanzen weiterhin in geringem Umfang abbauen, wodurch die Silage jedoch nur noch unwesentlich verändert wird. Bei Gewährleistung des totalen Luftabschlusses kann diese Phase theoretisch unbegrenzt lange Zeit dauern. Die Entnahmephase beginnt mit der Öffnung des Silos zur Entnahme der Silage, wodurch die Anschnittsfläche und die dahinter liegenden Silageschichten wieder der Luft ausgesetzt sind. Bei ausreichender Verdichtung wird das Eindringen von Sauerstoff durch das geringe Porenvolumen auf Eindringtiefen von etwa 1 m begrenzt (PAHLOW, 2006). Der bis dorthin eindringende Luftsauerstoff regt das Wachstum der im Ruhestadium befindlichen Mikroorganismen (Hefen, aerobe Bakterien und Schimmelpilze) an, welche dann Milchsäure oxidativ abbauen. Das führt zu einem Anstieg des pH-Wertes und weiteren Verderbprozessen. Es kann zu Nacherwärmung und Schimmelbildung kommen. Je nach Qualität der Silage, kann diese dem aeroben Stoffabbau widerstehen und verfügt über eine ausreichende aerobe Stabilität. Diese kann durch verschiedene Verfahrenstechniken schon in der Einlagerungs- und Hauptgärphase maßgeblich beeinflusst werden, z.B. durch Verringerung der Keimbelastung durch Reduktion der Sauerstoffverfügbarkeit oder Einsatz von Siliermitteln (JEROCH et al., 2008; KALZENDORF, 2006).

Während des Silierprozesses kommt es zu einem Verlust an Trockenmasse und Energie, welcher im Falle der Restatmung und Gärung auch unter optimalen Bedingungen unvermeidbar ist. Während der Lagerungs- und Entnahmephase lassen sich durch verfahrenstechnische Maßnahmen Verluste minimieren, trotzdem

muss von Trockensubstanzverlusten in Höhe von mindestens 10 % ausgegangen werden (THAYSEN, 2006).

3.4.2 Silagemängel

Silagemängel treten auf, wenn das Ausgangsmaterial schwer silierbar ist oder Verfahrensfehler begangen werden.

Wenn das Ausgangsmaterial nicht genügend vergärbare Kohlenhydrate enthält oder der Besatz mit aktiven Milchsäurebakterien zu gering ist, sinkt der pH-Wert während der Hauptgärphase zu langsam und nicht tief genug ab. Die Stoffwechselaktivität der Clostridien führt in diesem Fall zu Fehlgärungen. Dabei wird zunächst die gebildete Milchsäure entweder direkt (nitratarmes Ausgangsmaterial) oder über das Zwischenprodukt Essigsäure (nitratreiches Ausgangsmaterial) zu Buttersäure abgebaut, große Mengen Kohlendioxid werden gebildet. Nach vollständigem Abbau der Milchsäure beginnt der Proteinabbau, wobei teilweise sehr große Mengen Ammoniak gebildet werden, was zu einem totalen Verderb der Silage führen kann (PAHLOW, 2006).

Ein weiterer Silagemangel tritt auf, wenn der kritische Besatz von etwa 100.000 Hefen pro Gramm Silage überschritten ist, was beispielweise durch zu lange Befüllzeiten, verzögerte Abdeckung oder Undichtigkeiten hervorgerufen werden kann. Bei erneutem Luftzutritt vermehren sich die Hefen sprunghaft und bauen die Gärsäuren zu Kohlendioxid und Wasser ab. Die dadurch bedingte pH-Wert-Erhöhung ermöglicht im weiteren Verlauf den bakteriellen Verderb, z.B. durch alkoholabbauende Essigsäurebakterien (PAHLOW, 2006).

3.4.3 Beurteilung der Gärqualität

Anhand der Art und des Ausmaßes von in der Silage nachweisbaren unerwünschten Stoffabbauprodukten kann der Erfolg der Konservierung, also die Gärqualität, bemessen werden. Bei den nicht erwünschten Abbauprodukten handelt es sich in erster Linie um Essigsäure und Buttersäure, deren Gehalte maßgeblich in die Bewertung der Gärqualität nach dem DLG-Schlüssel (KAISER, 2006) eingehen. Daneben findet auch der pH-Wert in Kombination mit dem Trockenmassegehalt

Eingang in die Beurteilung. Die Bewertung der Gärqualität erfolgt in einem Punktesystem, die maximal erreichbare Punktzahl beträgt 100. Eine Silage erhält die Note „sehr gut“ bei 90 bis 100 Punkten (KAISER, 2006), die Note „gut“ bei 72 bis 89 Punkten, „verbesserungswürdig“ bei 52 bis 71 Punkten. Im Bereich von 30 bis 51 Punkten ist es eine schlechte, unter 30 Punkten sehr schlechte Silage. Darüber hinaus stellt die sensorische Bewertung der Silagen eine Plausibilitätskontrolle dar und erfasst Silagemängel wie beispielsweise Schimmelbefall.

3.5 Spezifische Gaserträge verschiedener Substrate

Seit einigen Jahren befassen sich verschiedene Forschungseinrichtungen mit der Bestimmung des Biogas- und Methanertrages möglicher Biogassubstrate. Entsprechend der Praxisrelevanz beschäftigen sich die meisten Studien mit dem Substrat Mais gefolgt von Untersuchungen an Gräsern bzw. Grünlandaufwüchsen. Die Datenbasis zu Methanerträgen von Getreideganzpflanzen insbesondere von Weizen ist relativ klein. Darüber hinaus muss festgestellt werden, dass die meisten Untersuchungen an siliertem Material durchgeführt wurden, Ergebnisse zu frischen Nawaro liegen nur in geringem Umfang vor. Die Hauptschwerpunkte der nachfolgenden Studien liegen zum Einen auf dem Vergleich der Methanerträge verschiedener Sorten (LEMMER, 2005; EDER et al., 2008; AMON et al., 2002; AMON et al., 2007b), zum Anderen auf dem Einfluss des Erntetermins bzw. des Vegetationsstadiums (EDER et al., 2008; AMON et al., 2002; AMON et al., 2003a; AMON et al., 2007b). Auf einen Vergleich der Methanproduktion zwischen dem frischen Ausgangsmaterial und den daraus hergestellten Silagen wird seltener fokussiert (AMON et al., 2003c; KAISER, 2007; KAISER und GRONAUER, 2007; PLÖCHL et al., 2009). In den folgenden Kapiteln 3.5.1 bis 3.5.3 werden die Ergebnisse der verschiedenen Studien zusammengestellt, wobei darauf geachtet wurde, dass alle Daten aus diskontinuierlichen Gärversuchen stammen und auf Normbedingungen bezogen sind. Aus Gründen der Übersichtlichkeit beschränken sich die Angaben auf den Parameter spezifische Methanproduktion.

3.5.1 Spezifischer Gasertrag von Weizen

Da sich nur wenige Studien mit der Untersuchung der spezifischen Methanproduktion von Weizen als Ganzpflanze bzw. Ganzpflanzensilage (GPS) befassen, werden an dieser Stelle auch die Ergebnisse zu anderen Getreidearten zusammengestellt (Abb. 3). Die zugrunde liegenden Daten (Mittelwerte bzw. Minimal- und Maximalwerte) und Angaben, ob es sich um frisches oder siliertes Probenmaterial handelt, können dem Anhang entnommen werden (Tab. A 1).

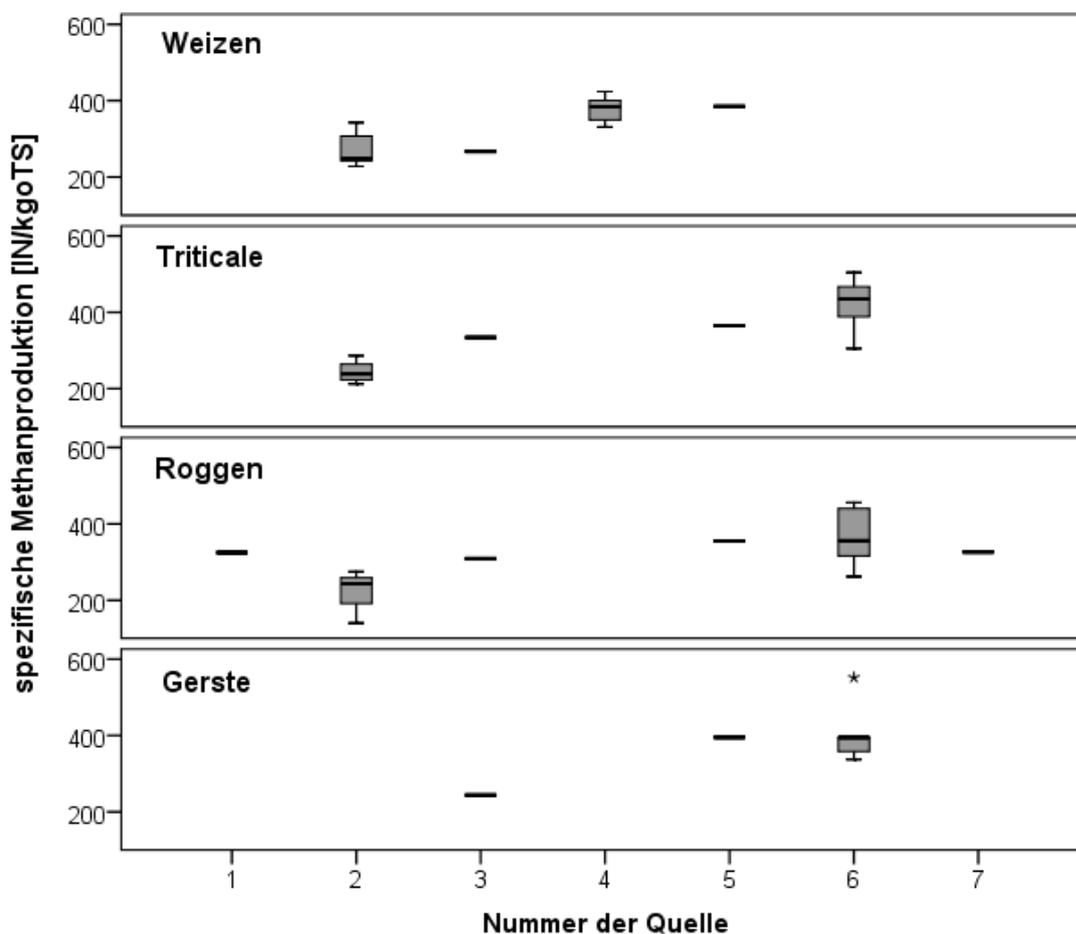


Abb. 3: Spezifische Methanproduktion verschiedener Getreidesorten nach Literaturangaben ohne Unterscheidung Frisch oder Silage
 Nummer der Quelle 1: AMON et al. (2007a), 2: AMON et al. (2007b), 3: AMON et al. (2005), 4: GRONAUER et al. (2008), 5: STICKSEL (2010), 6: HEIERMANN et al. (2009), 7: KTBL (2010)

Die Schwankungsbreite der spezifischen Methanproduktion von Weizen-GPS reicht von 228 bis 424 I_N/kg_{oTS}, damit liegt der Weizen im mittleren Bereich der anderen

Getreideganzpflanzen, deren spezifische Methanproduktion zwischen 140 und 552 l_N/kg_{oTS} schwankt.

HEIERMANN et al. (2009) untersuchten den Einfluss des Erntetermins bzw. des Vegetationsstadiums auf die spezifische Methanproduktion, die bei Triticale im Stadium der Blüte und bei Roggen und Gerste im Stadium der Milchreife am größten ist. Im Stadium der Teigreife ist die Methanproduktion am geringsten. Auch AMON et al. (2007b) kommen zu dem Ergebnis, dass die spezifische Methanproduktion von Getreide-GPS im Laufe der Vegetationsperiode abnimmt, im Gegensatz zur Zunahme der Biomasse und des Trockenmasseertrages.

Die einzigen Aussagen zum Vergleich zwischen frischen und silierten Getreideganzpflanzen (Triticale, Roggen, Gerste) in der Literatur stammen von HEIERMANN et al. (2009), wobei die frischen Substrate deutlich geringere Methanerträge erzielen als die Silagen.

3.5.2 Spezifischer Gasertrag von Mais

Für das am häufigsten in der Praxis zum Einsatz kommende Biogassubstrat Mais liegen Ergebnisse aus einer Vielzahl von Studien vor (Abb. 4). Die zugrunde liegenden Daten (Mittelwerte bzw. Minimal- und Maximalwerte), können dem Anhang entnommen werden (Tab. A 2). Auch hier ist auffällig, wie wenige Untersuchungen zu frischem Mais vorliegen, bis auf eine Ausnahme (EDER et al., 2009) handelt es sich um Einzelwerte.

Die Werte für die spezifische Methanproduktion weisen eine große Schwankungsbreite (195 bis 700 l_N/kg_{oTS}) auf.

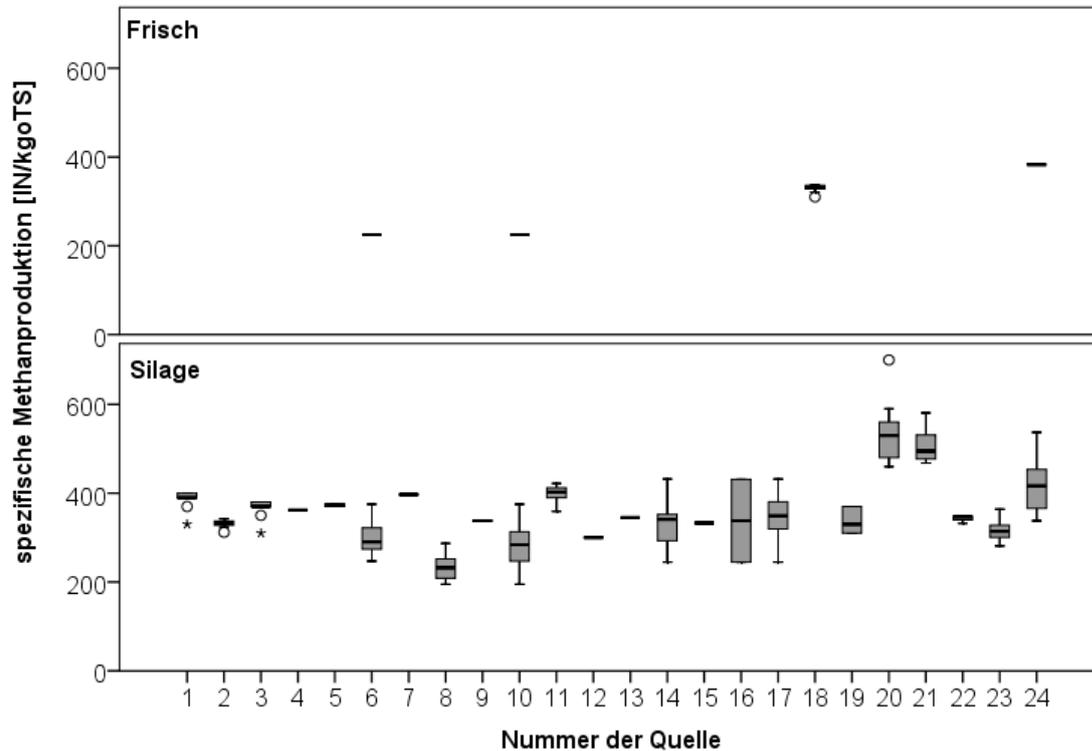


Abb. 4: Spezifische Methanproduktion von Mais nach Literaturangaben mit Unterscheidung Frisch oder Silage

Nummer der Quelle 1: OECHSNER et al. (2003), 2: EDER et al. (2008), 3: LEMMER (2005), 4: CZEPUCK (2005), 5: FISCHER (2007), 6: AMON et al. (2002), 7: MUKENGELE et al. (2006), 8: AMON et al. (2003a), 9: AMON et al. (2007a), 10: AMON et al. (2003c), 11: AMON et al. (2007b), 12: AMON et al. (2005), 13: BAUER et al. (2010), 14: KAISER (2007), 15: GRONAUER et al. (2005), 16: KAISER und GRONAUER (2007), 17: GRONAUER et al. (2008), 18: EDER et al. (2009), 19: MÄHNERT (2007), 20: HERTWIG und HEIERMANN (2006), 21: HEIERMANN et al. (2009), 22: KTBL (2010), 23: PLÖCHL et al. (2009), 24: NEUREITER et al. (2005)

Die spezifische Methanproduktion von Mais wird durch die Wahl der Sorte, d.h. über das sortenspezifische Nährstoffmuster beeinflusst. So zeichnet sich beispielweise die Sorte Sandrina im Vergleich mit der Sorte PR 39G12 durch einen höheren spezifischen Methanertrag aus, der auf den höheren Fettgehalt zurückzuführen ist (AMON et al., 2002). Weitere Nachweise für Sorteneffekte finden sich bei AMON et al. (2003a), HERTWIG und HEIERMANN (2006) sowie HEIERMANN und PLÖCHL (2004). Zu gegensätzlichen Ergebnissen gelangen jedoch EDER et al. (2008), die trotz erheblicher Unterschiede bei der Nährstoffzusammensetzung keine signifikanten Unterschiede zwischen den von ihnen untersuchten Sorten nachweisen konnten.

Des Weiteren wird die spezifische Methanproduktion durch den Erntezeitpunkt, also über die Veränderungen der Nährstoffzusammensetzung im Vegetationsverlauf beeinflusst. Die höchsten substratspezifischen Methanerträge ließen sich bei Mais in den Stadien Milchreife bis Teigreife nachweisen, danach wurde eine stetige Abnahme beobachtet (AMON et al., 2003a). Dieses bestätigen auch Untersuchungen von AMON et al. (2002) mit Ausnahme der Sorten Clarica und Ribera. HERTWIG und HEIERMANN (2006) untersuchten ebenfalls Mais zu verschiedenen Ernteterminen, zu denen sich die Trockensubstanzgehalte deutlich unterschieden (TS < 30 %, TS zwischen 30 und 35 % und TS > 30 %). Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass die spezifische Methanproduktion mit zunehmender Abreife zunimmt, was auch von HEIERMANN et al. (2009) bestätigt wird.

Im Gegensatz dazu konnten EDER et al. (2008) sowie GRONAUER et al. (2008) keinen Einfluss des Erntetermins auf die spezifische Methanproduktion nachweisen.

Darüber hinaus beeinflusst die Konservierung durch Silieren die spezifische Methanproduktion, beispielsweise ermittelten AMON et al. (2002) bei Maissilage der Sorte Ribera eine um 21 % höhere Methanproduktion im Vergleich zum frischen Ausgangsmaterial. Diese enorme Steigerung beruht darauf, dass durch die Milchsäuregärung einerseits wichtige Vorläufersubstanzen für die Methanogenese erzeugt werden, die dann bereits in der Silage vorliegen. Andererseits wird die Rohfaserfraktion durch den Siliervorgang teilweise voraufgeschlossen, wodurch die Nährstoffe besser verfügbar werden (AMON et al., 2003c). Ähnliche Ergebnisse erzielten NEUREITER et al. (2005), wobei ein positiver Einfluss der Silierung bei längerer Lagerdauer (119 Tage) der Silagen aufgezeigt werden konnte. Nach ihren Untersuchungen ist es aber für eine ökonomische Betrachtung erforderlich, diese positiven Effekte auf den Gasertrag im Zusammenhang mit den bei der Silierung auftretenden Energieverlusten zu sehen.

PLÖCHL et al. (2009) bestimmten die Methanproduktion von frischem Mais und mit verschiedenen Siliermitteln hergestellten Silagen. Hierbei erzielte das Ausgangsmaterial niedrigere bzw. ähnliche Gaserträge wie die Silagen. Dieses Verhältnis kehrte sich bei solchen Silagen um, die zum Test der aeroben Stabilität unter Lufteinfluss gelagert wurden. In Bezug auf die erzielten Methanhektarerträge kompensieren die Silagen teilweise die Silierverluste, nach Lufteinfluss sind die

Trockenmasseverluste jedoch so hoch, dass eine Kompensierung nicht mehr möglich ist. Es besteht jedoch ein Unterschied zwischen Silagen, die ohne bzw. mit biologischen Siliermitteln hergestellt wurden und solchen, denen chemische Mittel zugesetzt wurden. Chemische Silierzusätze erhöhen die aerobe Stabilität, somit fallen die Trockenmasseverluste nach Luftzutritt niedriger aus.

3.5.3 Spezifischer Gasertrag von Gras

Für Gräser als Biogassubstrat liegen Ergebnisse aus diversen Studien vor (Abb. 5). Die zugrunde liegenden Daten (Mittelwerte bzw. Minimal- und Maximalwerte), können dem Anhang entnommen werden (Tab. A 3). Häufige Bezeichnungen für die untersuchten Substrate sind „Grünland“, „Kleegras“, teilweise werden auch die genauen Sortenbezeichnungen genannt. Zur besseren Übersicht werden die verschiedenen Gräser in Tab. A 3 als „Gras“ zusammengefasst, mit der Ausnahme solcher Untersuchungen, die sich explizit auf „Weidelgras“ beziehen. Hier ist auffällig, dass nur wenige Untersuchungen zu frischem Material existieren, teilweise finden sich aber auch keine Angaben darüber, in welcher Konservierungsform das Substrat untersucht wurde. Diese Daten wurden mit dem Hinweis „ohne Differenzierung“ mit in den Literaturüberblick aufgenommen.

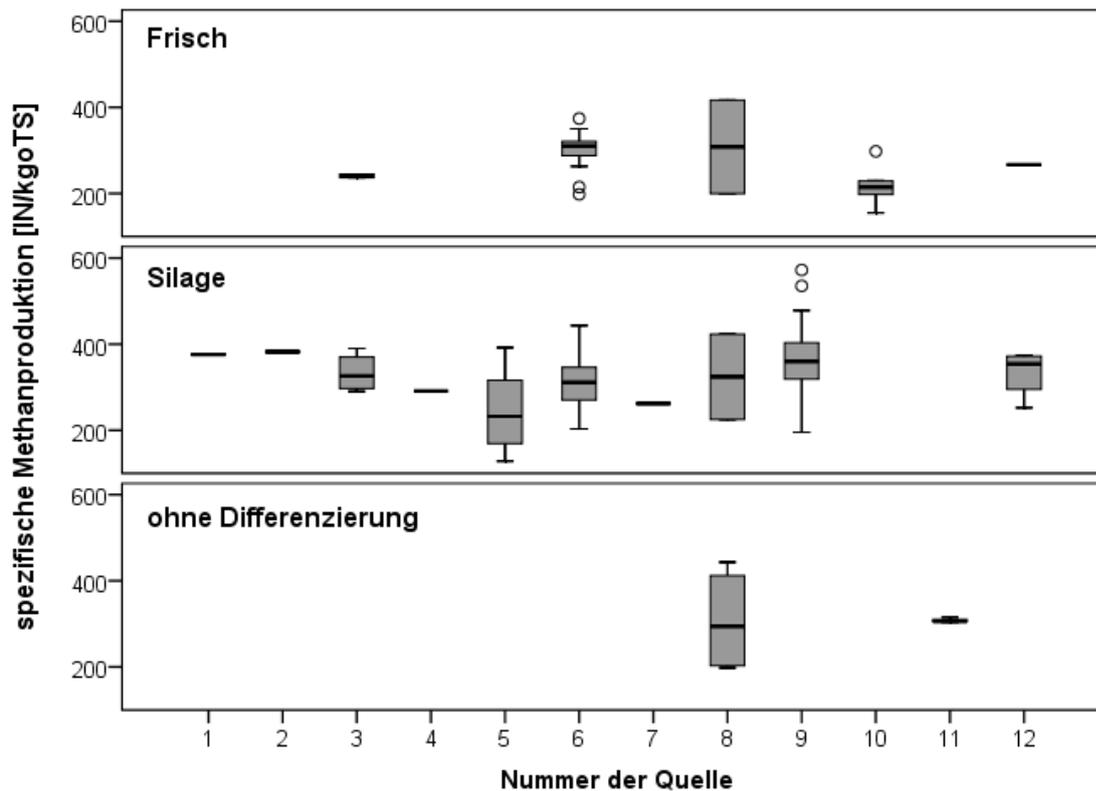


Abb. 5: Spezifische Methanproduktion von verschiedenen Grassorten nach Literaturangaben mit Unterscheidung Frisch oder Silage
 Nummer der Quelle 1: CZEPUCK (2005), 2: MUKENGELE et al. (2006), 3: AMON et al. (2003a), 4: AMON et al. (2007a), 5: AMON et al. (2007b), 6: KAISER (2007), 7: GRONAUER et al. (2005), 8: KAISER und GRONAUER (2007), 9: GRONAUER et al. (2008), 10: PROCHNOW et al. (2005), 11: KTBL (2010), 12: PLÖCHL et al. (2009)

Die Schwankungsbreite der Ergebnisse für die spezifische Methanproduktion der untersuchten Grasvarianten ist groß (128 bis 572 I_N/kg_{oTS}), je nachdem welcher Fragestellung jeweils nachgegangen wurde. Die Ergebnisse zu frischem Gras streuen etwas weniger (155 bis 417 I_N/kg_{oTS}).

Untersuchungen von AMON et al. (2003a) an verschiedenen Klee-grasmischungen, die zu drei Ernteterminen beprobt und sowohl frisch als auch siliert auf ihr Methanbildungsvermögen getestet wurden, zeigten, dass zum Einen Silagen höhere Erträge erzielten als die Frischsubstrate und dass zum Anderen Substrate, die aus dem 3. Erntetermin stammten, eine signifikant geringere Methanproduktion aufwiesen. Des Weiteren stellten AMON et al. (2007b) fest, dass Grassilagen (Grünland) aus Tal-Lagen höhere Methanerträge als Grassilagen (Grünland) aus Berg-Lagen erbrachten.

Weitere sehr umfangreiche Untersuchungen an Gras (verschiedene Standorte, Wiesentypen, Schnitte, frisch, siliert) wurden an der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft durchgeführt. Die Ergebnisse aus den Versuchsjahren 2003 und 2004 werden von KAISER und GRONAUER (2007) bzw. KAISER (2007) dahingehend gedeutet, dass die spezifische Methanproduktion bei Weidelgräsern mit steigendem Trockensubstanzgehalt sowie mit steigendem Rohproteingehalt sinkt, was auf das reduzierte C/N-Verhältnis zurückgeführt wird. Bei der Wiesenrispe der Sorte Lato sowie beim Rotklee Titus wird von Schnitt zu Schnitt ein kontinuierliches Absinken der Methanproduktion beobachtet. Weiterführende Untersuchungen von GRONAUER et al. (2008) aus den Versuchsjahren 2005 und 2006 beziehen die Ergebnisse aus der vorangegangenen Studie mit ein, wodurch eine breitere Datenbasis zur Verfügung steht. Für Grünland werden eine sehr große Schwankungsbreite und ein schwacher positiver Einfluss des Rohproteingehaltes auf die spezifische Methanproduktion festgestellt. Für Grasreinbestände wird der Erntetermin als unkritisch angesehen, da der Einfluss des Trockensubstanzgehaltes auf die Methanproduktion lediglich gering ist, ein Einfluss des Rohproteingehaltes ist nicht nachweisbar.

Eine Studie von PROCHNOW et al. (2005) zum Einfluss des Erntetermins (Zeitpunkt des 1. Schnittes zwischen Juni und Februar) bei Landschaftspflegematerial kommt zu der Erkenntnis, dass die spezifischen Methanerträge mit Fortschreiten der Vegetationsperiode abnehmen.

Einen direkten Vergleich zwischen frischen und silierten Gräsern (ohne bzw. mit verschiedenen Siliermitteln) führten PLÖCHL et al. (2009) durch. Danach erreichen Silagen eher höhere spezifische Methanerträge, die sogar die während der Silierung auftretenden Trockenmasseverluste kompensieren.

4 MATERIAL UND METHODE

Um Energiepflanzen auf die theoretisch mögliche Biogas- und Methanausbeute hin zu untersuchen, wurden in der vorliegenden Arbeit zwei Gärtestapparaturen verwendet. Zum Einen kam der Hohenheimer Biogasertragstest (HBT) zum Einsatz, zum Anderen eine Versuchsanordnung nach DIN 38414-8.

Für die Durchführung der Gärtests wurden die Vorgaben der VDI Richtlinie VDI 4630 (2006) berücksichtigt, wobei der Artikel von HELFFRICH und OECHSNER (2003) als vertiefende Anleitung für den Hohenheimer Biogasertragstest genutzt wurde (vgl. Kapitel 4.1.1 und 4.6.1).

4.1 Gärtestapparaturen

4.1.1 Hohenheimer Biogasertragstest

Als eigentliche Fermenter dienen beim HBT Glasspritzen (Abb. 6), die auch als Kolbenprober bezeichnet werden, mit einem Volumen von 100 ml und einer 1/1 Graduierung. Diese Fermenter bilden sowohl den Gärraum, als auch den Gassammelbehälter für das zwischen zwei Beprobungszeitpunkten entstandene Biogas. Ihr Stopfen ist mit einer farbigen Markierung versehen, die die Ablesung des Füllstandes des Fermenterinhalt ermöglicht. Der Fermenterinhalt setzt sich aus dem Inokulum, dem Substrat und dem gebildeten Biogas zusammen (vgl. Kapitel 4.6.1). Um Austreten von Biogas aus und das Eintreten von Luftsauerstoff in den Kolbenprober zu vermeiden, wird der Spalt zwischen Stopfen und Glaskolben mit einem gegenüber anaerobem Abbau inerten Gleitfett (Baysilone-Paste, mittelviskos) abgedichtet. Auf den Kapillaransatz (Abb. 6) wird ein gasdichtes Schlauchstück gesetzt, welches mit einer Schlauchklemme verschlossen werden kann.

Zu den Beprobungszeitpunkten wird zunächst der Füllstand des Fermenterinhalt an der aufsteigenden Skala abgelesen und notiert. Anschließend wird das Schlauchstück an das Methan-Gasanalysegerät (vgl. Kapitel 4.2) angeschlossen und das Biogas bei geöffneter Klemme in das Gerät gedrückt (vgl. Kapitel 4.6.1). Der gemessene Methangehalt sowie der neu eingestellte Füllstand, der den Basisfüllstand für die nächste Messung darstellt, werden notiert. Das gebildete Biogasvolumen berechnet sich als Differenz zwischen dem Füllstand vor der Gasanalyse und dem Basisfüllstand der vorangegangenen Messung.

Mit einer Raumwetterstation wird der aktuelle lokale Luftdruck mit einer Genauigkeit von ± 3 hPa erfasst.

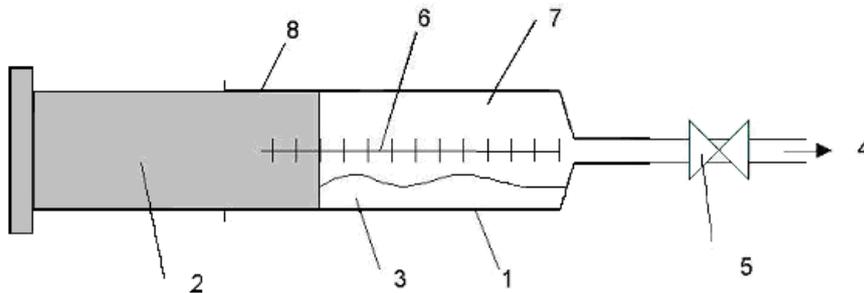


Abb. 6: Aufbau Kolbenprober für Hohenheimer Biogasertragstest (HBT) mit 1: Glasspritze, 2: Stopfen, 3: Gärsubstrat, 4: Öffnung zur Gasanalyse, 5: Schlauchklemme, 6: Graduierung 1/1, 7: Gasraum, 8: Gleitmittel nach HELFFRICH und OECHSNER (2003)

In dem am Institut für landwirtschaftliche Verfahrenstechnik (ILV) weiterentwickelten und aufgebauten HBT können 180 Kolbenprober zeitgleich waagrecht in einem motorbetriebenen Rotor zur Durchmischung des Kolbeninhaltes gesteckt werden (Abb. 7). Der Motor dreht den Rotor mit den Kolben zweimal pro Minute. Um ein Herausrutschen der Kolbenprober zu verhindern, wurde die Rückseite des Rotors mit einer Moosgummiplatte versehen, die an den Stellen, wo die Kolbenprober sitzen, Löcher hat, deren Durchmesser etwas geringer als die der Kolbenprober sind. Dadurch werden die Kolbenprober festgeklemmt.

Der Rotor mit den Steckplätzen für die 180 Kolbenprober befindet sich in einem Wärmeschrank, dessen Temperatur auf 38°C eingestellt und konstant gehalten wird ($\pm 1^{\circ}\text{C}$). Zur gleichmäßigen Temperaturverteilung im Wärmeschrank ist dieser mit einem Umluftgebläse ausgestattet. Zur Kontrolle der Temperaturverteilung wurden in dem Wärmeschrank zwei zusätzliche Temperatursensoren eingebaut, die unabhängig von der Regelungseinrichtung des Schrankes Messdaten an eine separate Messstation senden. Um die Aufrechterhaltung der Temperatur auch während des Beprobens und damit bei geöffneten Wärmeschranktüren zu gewährleisten, ist der Wärmeschrank mit zusätzlichen innen befindlichen geteilten Plexiglastüren ausgestattet, so dass zur Beprobung lediglich der untere rechte Teilflügel geöffnet werden muss.

Der HBT eignet sich grundsätzlich für die Untersuchung von frischen Substraten, die vor dem Einsatz bei 58°C getrocknet und auf 1 mm Siebdurchgang vermahlen sind

(vgl. Kapitel 4.3.1.1). Eine Untersuchung von Silagen ist insofern nicht sinnvoll, da beim Trocknungsprozess die flüchtigen Gärssäuren verloren gehen und damit nicht mehr für die Fermentation zur Verfügung stehen (vgl. Kapitel 3.2).

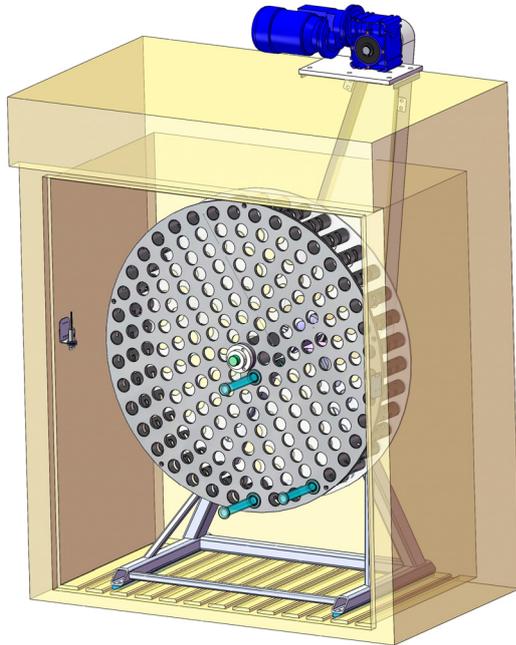


Abb. 7: Schematischer Aufbau des am ILV weiterentwickelten und aufgebauten Hohenheimer Biogasertragstests
Wärmeschrank mit motorbetriebenem Rotor und Kolbenprober

4.1.2 Batch-Versuchsapparatur (DIN 38414-8)

Für die Durchführung der Batch-Versuche wird eine Apparatur nach Abb. 8 verwendet. Die am ILV weiterentwickelte und aufgebaute Batch-Versuchsanlage umfasst sechs Wasserbäder mit jeweils sechs einzelnen Fermentern bzw. Standflaschen d.h. insgesamt 36 Versuchsplätze. Jedes Wasserbad, wird über ein separates Julabo-Einhängethermostat (Typ ED) mit Umwälzpumpe gleichmäßig auf 38 °C temperiert (Anzeigegenauigkeit des Thermostats $\pm 0,03$ °C). Unterhalb eines jeden Wasserbades befindet sich ein Magnetantrieb, der die in den Standflaschen befindlichen Magnetrührstäbchen antreibt, so dass der Fermenterinhalt ständig durchmischt wird. Eine Veränderung der Rührintervalle ist grundsätzlich möglich. Diese Gärtestapparatur wird im Weiteren auch als Batch-Anlage bezeichnet.

Jede Versuchseinheit besteht aus einem Eudiometerrohr mit einem Volumen von 400 ml, das von oben nach unten graduiert ist, der Skalenteilungswert beträgt 1 ml.

Das Eudiometerrohr ist über eine Schraubkappe mit Dichtung auf eine Standflasche, die als Fermenter dient, aufgesetzt. Durch den Boden des Eudiometerrohres geht ein Verbindungsrohr, das dem in der Standflasche entwickeltem Biogas den Eintritt in das Messrohr ermöglicht. Das Verbindungsrohr wird über vierseitig angebrachte Glasstäbe in Position gehalten. Am unteren Ende des Eudiometerrohres ist eine Glas- bzw. Kunststoffolive angebracht, von der eine ausreichend bemessene Schlauchverbindung zu einem Niveaugefäß mit einem Volumen von 1000 ml führt. Am oberen Ende des Eudiometerrohres befindet sich ein Kegelhahn, um Gasproben zu entnehmen und die Nullmarke einzustellen. Die Versuchsfermenter bzw. Standflaschen wurden dahingehend modifiziert, als dass im oberen Bereich ein Glasstutzen mit Gewinde eingearbeitet wurde, der mit einer Schraubkappe gasdicht verschlossen werden kann.

Im Niveaugefäß befindet sich Sperrflüssigkeit. Die Sperrflüssigkeit besteht aus Schwefelsäure und Natriumsulfat-Decahydrat, sie ist durch Zusetzen einiger Tropfen Methylorangelösung rosa gefärbt. Über die genaue Zusammensetzung der Sperrflüssigkeit gibt Tab. A 4 Auskunft.

Zu Versuchsbeginn wird bei geöffnetem Gashahn Niveaugleichheit zwischen der Sperrflüssigkeit im Niveaugefäß und im Eudiometer erreicht. Dieser Pegelstand wird als Nullmarke notiert. Anschließend wird der Gashahn geschlossen. Durch die Gasentwicklung in den Fermentern wird die Sperrflüssigkeit aus dem Eudiometer in das Niveaugefäß zurückgedrückt. Zu den Messungen wird der Pegelstand der Sperrflüssigkeit im Eudiometer abgelesen und das Volumen des gebildeten Biogases wird als Differenz dieses Pegelstandes und der Nullmarke berechnet. Das Biogas wird durch Öffnen des Gashahnes, an den über ein Schlauchstück die Gasanalysegeräte (vgl. Kapitel 4.2) angeschlossen sind, abgelassen, der Methan- und Kohlendioxidgehalt werden gemessen (vgl. Kapitel 4.6.2).

Mit einer Funk-Wetterstation der Firma TFA Dostmann wird die Raumtemperatur mit einer Genauigkeit von $\pm 1^\circ\text{C}$ und der Luftdruck ($\pm 3 \text{ hPa}$) erfasst. Bei Inbetriebnahme dieses Gerätes wird der aktuelle Luftdruck anhand von Daten offizieller Wetterstationen der Umgebung kalibriert und darüber hinaus in regelmäßigen Abständen überprüft.

Die Batch-Versuchsanlage eignet sich grundsätzlich zur Untersuchung von frischen oder silierten Substraten, möglichst mit einer Kantenlänge von maximal 1 cm (vgl. Kapitel 4.3.1.2). Für Untersuchungen zum Einfluss des Aufbereitungs- bzw. Zerkleinerungsgrades können aber auch größere Substrate verwendet werden.

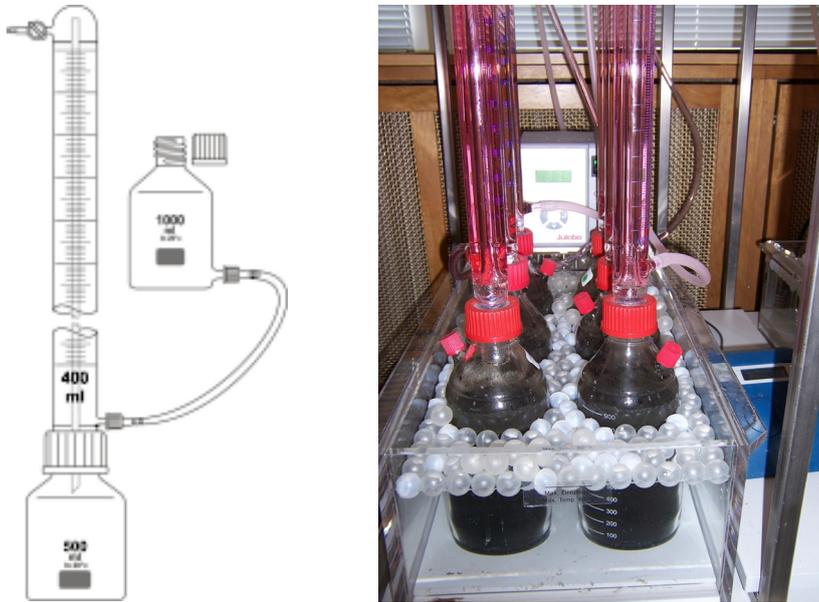


Abb. 8: Schematische Zeichnung einer aus Standflasche und Eudiometerrohr bestehenden Versuchseinheit nach DIN 38414-8 (links) und Foto der am ILV aufgebauten Batch-Versuchsanlage (rechts)
Eudiometerrohr 400 ml, Skalenteilungswert 1 ml, mit Glashahn, Standflasche 1000 ml, Niveaugefäß 1000 ml

4.2 Gasanalyse

Das Biogas, welches in den Fermentern der beiden Versuchsanlagen entsteht, wird nach erfolgter Volumenbestimmung (vgl. Kapitel 4.1.1 und 4.1.2) der Gasanalyse zugeführt. Hierbei wird der Anteil des Methans im Biogas bestimmt. Im Batch erfolgt aufgrund der größeren zur Verfügung stehenden Biogasmengen zusätzlich die Bestimmung des Kohlendioxid-Anteils. Da alle Messungen im feuchten Biogas stattfinden, werden sowohl das Gasvolumen als auch die Konzentrationen der Gase auf trockenes Gas und Normbedingungen (Normtemperatur 273 K, Normdruck 1013 hPa) umgerechnet. Hierzu wird sowohl die Temperatur des Biogases als auch der auf die Gasphase einwirkende Druck benötigt (vgl. Kapitel 4.7.2). Aus der auf diese Weise berechneten Norm-Methankonzentration und dem Normvolumen des Biogases errechnet sich das Methannormvolumen.

Zur Analyse des in den jeweiligen Fermentern der HBT- und/oder Batch-Versuchsanlage entstandenen Methan- und Kohlendioxidkonzentrationen im Biogas kommen zwei baugleiche am ILV weiterentwickelte und aufgebaute Gasanalysegeräte zum Einsatz, deren Hauptkomponente ein Advanced Gasmitter® (Methan AGM 10, Kohlendioxid AGM 32, Firma Sensors europe) ist. Die Gasanalyse beruht auf dem nichtdispersiven Infrarotmessverfahren (NDIR). Der Messbereich liegt für sowohl für Methan als auch für Kohlendioxid zwischen 0% und 100% bei einer Genauigkeit von $\pm 2\%$ des Messbereichsendwerts. Der Advanced Gasmitter® wurde im Institut für landwirtschaftliche Verfahrenstechnik zur Stromversorgung mit einem Akkublock und einem Gehäuse versehen (Abb. 9 und Abb. 10). Zur Gasanalyse beim HBT wird am Gaseinlass ein zusätzlicher Filter angebracht, um Verschmutzungen der Messzelle zu vermeiden.

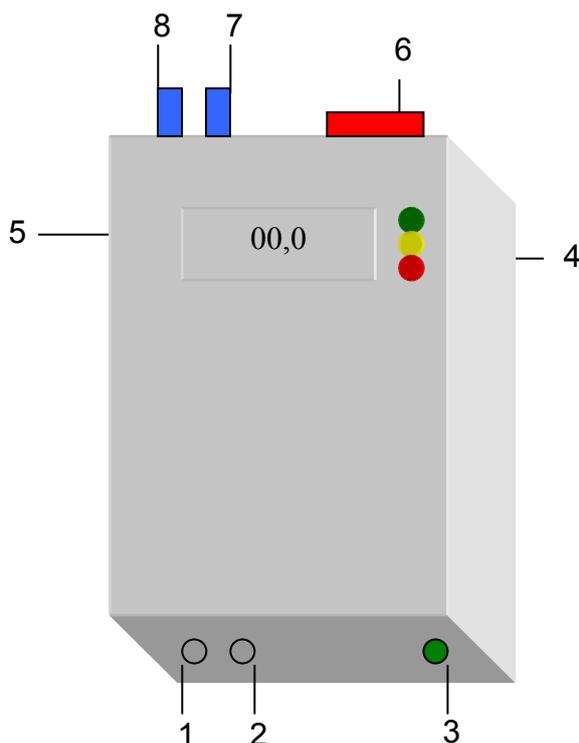


Abb. 9: Schematische Zeichnung NDIR-Gasanalysegerät mit 1: Potentiometer Kalibration Nullwert, 2: Potentiometer Kalibration Methangehalt, 3: Funktionskontrollleuchte Messzelle, 4: Funktionskontrollleuchte Akkuleistung, 5: Display, 6: Hauptschalter, 7: Gaseinlass, 8: Gasauslass

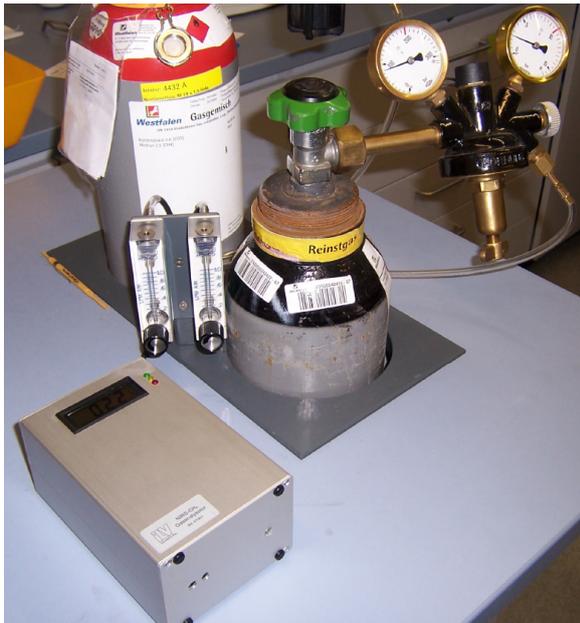


Abb. 10: Foto des Methananalysegeräts und des Kalibriersystems

Die Kalibration des Nullpunktes (0%-Wert) der Gasanalysegeräte erfolgt mit reinem Stickstoff mit der Punktnotation 5.0. Mit einem zweiten Prüfgas, das ein Gemisch aus 60% Methan (Punktnotation 2.5) und 40% Kohlendioxid (Punktnotation 3.0) ist, wird der 60%-Wert des Methananalysegerätes bzw. der 40%-Wert des Kohlendioxidanalysegerätes kalibriert. Die Kalibration findet vor der ersten Inbetriebnahme eines Gasanalysegerätes und ansonsten nach Bedarf bei Gerätedrift statt. Um eine Gerätedrift zu erkennen, werden die Geräte rechtzeitig (15 bis 30 Minuten) vor jeder Gasanalyse eingeschaltet und mit den Prüfgasen überprüft. Die Kontrollwerte werden tabellarisch festgehalten, eine Abweichung von 0,1% absolut beim Nullpunkt und 1% absolut beim 60%-Wert bzw. 40%-Wert wird im Rahmen der Messgerätegenauigkeit toleriert.

4.3 Pflanzensubstrate

Für die Gärversuche wurden Energiepflanzen aus Schleswig-Holstein verwendet, die im Rahmen des Feldversuches des interdisziplinären Projektes BIOGAS-EXPERT auf Flächen der Versuchsgüter „Hohenschulen“ (HS) und „Karkendamm“ (KD) der CAU Kiel in den Jahren 2007 und 2008 angebaut wurden. Im Rahmen des Verbundprojektes durchgeführte Bodenuntersuchungen weisen den Bodentyp des Standortes Hohenschulen als sandigen Lehm und den Bodentyp des Standortes Karkendamm als Sand aus. Der durchschnittliche Jahresniederschlag beträgt auf

beiden Standorten 750 bis 800 mm, die durchschnittliche Jahresmitteltemperatur liegt bei 8,5 °C. Das Jahr 2007 zeichnete sich durch einen erhöhten Jahresniederschlag, eine nicht ganz unerhebliche erhöhte Jahresmitteltemperatur und eine Frühjahrstrockenheit im April aus. Im Gegensatz dazu waren die Niederschlagsmengen im Jahr 2008 durchschnittlich, eine Frühjahrstrockenheit war im Mai zu verzeichnen und die Jahresmitteltemperatur lag ebenfalls höher als im Durchschnitt.

Als für die Region typische Kulturpflanzen wurden für den Feldversuch folgende Pflanzenarten und Fruchtfolgen ausgewählt:

- Mais Monokultur (Sorte Ronaldinio, S240, nachfolgend nur noch Mais genannt),
- Winterweizen zur GPS-Nutzung (Sorte Biscay, nachfolgend nur noch Weizen genannt) in Fruchtfolge mit Welschem Weidelgras (Sorte Gisel) als Winterzwischenfrucht und Mais 2 (Sorte Salgado, S200),
- Winterweizen zur Körner-Nutzung (Sorte Biscay) in Fruchtfolge mit Senf als abfrierender Zwischenfrucht und Mais 3 (Sorte Ronaldinio, S240) und
- Deutsches Weidelgras (50% Fennema, 50% Edda) als Dauergrünland zur 4-Schnitt-Nutzung.

Die Art (N-Düngerform) und die applizierte Stickstoffmenge wurden variiert. Als Stickstoffdünger wurde mineralischer Kalk-Ammon-Salpeter-Dünger (im Weiteren nur noch als Kas bezeichnet), Rinderflüssigmist, Schweineflüssigmist sowie Gärrest aus je einer Biogasanlage mit Mais-Monofermentation bzw. Kofermentation verwendet. Über die Menge an ausgebrachtem Dünger wurden unterschiedliche Düngestufen realisiert: die Kontrollvarianten erhielten keinen Dünger (1. Düngestufe: 0 kg N/ha), alle anderen Varianten (Weizen, Mais) erhielten 120 kg N/ha (2. Düngestufe), 240 kg N/ha (3. Düngestufe) oder 360 kg N/ha (4. Düngestufe). Für das Deutsche Weidelgras wurden 160 kg N/ha (2. Düngestufe), 320 kg N/ha (3. Düngestufe) oder 480 kg N/ha (4. Düngestufe) appliziert.

Auf den beiden Versuchsgütern wurden die verschiedenen Substratvarianten jeweils in einer Blockanlage mit jeweils 4 Wiederholungspartellen angebaut. Jede Parzelle (12 m x 12 m) bestand aus einem Kerndruschstreifen (3 m) und einem Probenahmestreifen (3 m), der beidseits von je einem Randstreifen (3 m) umgeben war.

Die Probenahme (siehe Kapitel 4.3.1) fand zu unterschiedlichen Ernteterminen also in unterschiedlichen Entwicklungsstadien statt. Entsprechend der Handhabung im Feldversuch werden im Weiteren die Erntetermine beim Weizen über die Entwicklungsstadien (EC-Stadien) gekennzeichnet, wobei sich eine Übersicht über die EC-Stadien im Anhang in Tab. A 5 befindet. Beim Mais erfolgt die Angabe über die Nummerierung der Erntetermine, z.B. T7 für den siebenten Erntetermin (T8, T9 analog). Die Probenahmetermine im Gras entsprechen den vier durchgeführten Schnitten (T1 bis T4). Eine Zusammenstellung der jeweiligen Erntetermine ist im Anhang in Tab. A 6 einzusehen.

Da die Anzahl der im Verbundprojekt zur Verfügung stehenden Substratvarianten die Kapazitäten der Versuchsanlagen für die Gärtests weit überschritten, wurde eine Auswahl der Varianten getroffen, die auf den Biogas- und Methanertrag hin untersucht werden sollten. Der HBT ist der durchsatzstärkere Gärtest, deshalb wurde er genutzt, um eine größere Anzahl an Pflanzensubstraten, die in Tab. 3 aufgeführt sind, zu untersuchen. Es wurden die Substratvarianten aller Dünge­stufen ausgewählt, die mit mineralischem Dünger (Kas) bzw. mit Gärrest einer Biogasanlage mit Kofermentation (im Weiteren als Biomix bezeichnet) gedüngt worden waren.

Die Substrate wurden im HBT grundsätzlich nur frisch (getrocknet bei 58 °C, gemahlen) untersucht (vgl. Kapitel 4.1.1). Die Erntetermine im Mais entsprechen trotz unterschiedlicher Nummerierung einander, was dadurch zu Stande kommt, dass die Maiskulturen in 2008 häufiger beprobt wurden (Tab. 3).

Tab. 3: Untersuchte Substratvarianten HBT
mit HS: Versuchsgut Hohenschulen KD: Versuchsgut Karkendamm, Termine aus 2007 und 2008 entsprechen einander; B: die Variante wurde auch im Batch untersucht

Pflanzenart	Beprobung 2007	Beprobung 2008
Deutsches Weidelgras KD	4 Schnitte	4 Schnitte
Weizen HS	EC 69 (B) EC 73 (B) EC 77 (B) EC 83-85 (B)	EC 69 (B) EC 73 (B) EC 77 (B) EC 83-85 (B)
Mais Monokultur HS Mais Monokultur KD	T5 (B), T6 (B), T7 (B) T5, T6, T7	T7 (B), T8 (B), T9 (B) T7, T8, T9

Der Batch-Versuch ist nicht so durchsatzstark wie der HBT, weshalb nur ein Teil der im HBT untersuchten Substrate in beiden Versuchsanlagen getestet werden konnte.

In der Batch-Anlage wurden die in Tab. 4 aufgeführten Varianten vom Versuchsgut „Hohenschulen“ untersucht und zwar in den Dünge­stufen 0 kg N/ha, 240 kg N/ha und 360 kg N/ha, wobei die Düngung mit mineralischen Kalk-Ammon-Salpeter-Dünger erfolgt war. Alle Substrate wurden frisch untersucht. Zusätzlich wurden von einigen Varianten im Labormaßstab Silagen erzeugt, die dann ebenfalls in der Batch-Anlage untersucht wurden. Sie sind in der Tab. 4 mit einem „S“ versehen. Auf das Vorgehen beim Silieren wird in Kapitel 4.3.1.2 eingegangen. Die Erntetermine im Mais entsprechen trotz unterschiedlicher Nummerierung einander, was dadurch zu Stande kommt, dass die Maiskulturen in 2008 häufiger beprobt wurden.

Tab. 4: Untersuchte Substratvarianten Batch
mit HS: Versuchsgut Hohenschulen, fett gedruckte Termine aus 2007 und 2008 entsprechen einander, S: Silage

Pflanzenart	Beprobung 2007	Beprobung 2008
Weizen HS	EC 69 EC 73 (S) EC 77 (S) EC 83-85 (S)	EC 69 EC 73 (S) EC 77 (S) EC 83-85 (S)
Mais Monokultur HS	T5 T6 (S) T7 (S)	T7 T8 (S) T9 (S)

4.3.1 Substratprobenaufbereitung

Die Probenahme der ausgewählten Weizen- und Mais-Varianten (siehe Kapitel 4.3) erfolgte jeweils als Handerte aus allen vier Wiederholungspartzen. Für den HBT wurde jeweils $\frac{1}{4}$ m², für den Batch 1 m² abgeerntet und das Pflanzenmaterial zu einer Mischprobe vereinigt. Die weitere Aufbereitung erfolgte je nach späterem Einsatz in den Versuchsanlagen getrennt voneinander (siehe Kapitel 4.3.1.1 und 4.3.1.2). Die Probenahme der Varianten des Deutschen Weidelgrases (siehe Kapitel 4.3) fand im Rahmen der maschinellen Ernte mit dem Parzellenhäcksler (siehe Kapitel 4.3.3) zu den Schnittzeitpunkten statt. Hier wurde pro Parzelle automatisch eine Unterprobe ausgegeben, die im weiteren Verlauf jedoch wie alle anderen Substratproben aufbereitet wurde.

4.3.1.1 HBT

Zur Probenaufbereitung für die HBT-Versuche wurden die abgeernteten Weizen-Pflanzen in handliche Stücke zerschnitten (20 cm), die Mais-Pflanzen mit einem handelsüblichen Universalleisehäcksler der Firma Gloria (Milan G4) gehäckselt (1,5 bis 2 cm Kantenlänge), vermischt und bis zur Gewichtskonstanz bei 58°C getrocknet (vgl. Kapitel 4.1.1), wobei Schimmelbildung während des Trocknungsprozesses durch regelmäßiges manuelles Durchmischen vermieden wurde. Nach Zerkleinerung der Pflanzenproben mit einer Grobmühle (Brabender, Zerkleinerungsgrad 5 mm) wurde eine repräsentative Unterprobe (200 g) gezogen und anschließend mit einer Feinmühle (Tecator) auf 1 mm vermahlen. Davon wurden jeweils 100 g zur nasschemischen Untersuchung der Trockensubstanz, der organischen Trockensubstanz der Rohnährstoffe und der Rohfaser in ein externes Labor (LUFÄ ITL GmbH Kiel) gebracht (vgl. Kapitel 4.3.2), mit Ausnahme der Varianten, an denen diese Parameter im Zusammenhang mit der Silageherstellung bereits im frischen, ungetrockneten Zustand untersucht wurden, 100 g wurden jeweils als Ausgangsmenge für die Versuche zurückbehalten.

4.3.1.2 Batch

Zur Probenaufbereitung für die Batch-Versuche wurden die Pflanzen zunächst grob zerkleinert, d.h. bei Weizen und Gras mittels eines Grasschneidegerätes auf eine Länge von ca. 1,5 bis 2 cm gebracht bzw. bei Mais mit einem handelsüblichen Universalleisehäcksler der Firma Gloria (Milan G4) auf eine Kantenlänge von 1,5 bis 2 cm gehäckselt. Anschließend erfolgte eine weitere Zerkleinerung auf Kantenlängen von unter 1 cm mit einem im ILV für diesen Zweck entwickelten und gebauten Probenschneider. Danach wurden die Proben gut durchmischt, anschließend wurden pro Variante jeweils 2 Gefrierbeutel mit ca. 1 kg Material gefüllt und eingefroren, um es bis zum Einsatz im Batch-Versuch zu lagern.

Einige Varianten (vgl. Kapitel 4.3 Tab. 4) wurden den DLG-Richtlinien (DLG, 2000) entsprechend zusätzlich im Labormaßstab in 1 l Silos (Weckgläser) mit dreifacher Wiederholung einsiliert. In 2007 wurden weder bei Mais noch bei Weizen Siliermittel verwendet, hierdurch kam es jedoch beim Weizen zu Fehlgärungen, die im Jahr 2008 durch Applikation des biologischen Zusatzes „Bio-Sil“ (Firma Dr. Pieper) in

empfohlener Menge (1 g Biosil pro 1 t FM entspricht 300.000 Bakterien/ g FM) vermieden werden konnten. Die Einwaage der fertig befüllten Gläser wurde bestimmt.

Eine Probe des Ausgangssubstrates wurde bei der LUFA ITL GmbH Kiel nasschemisch auf die Parameter der Weender-Analyse sowie Nitrat, Pufferkapazität und Anfangbesatz mit Milchsäurebakterien untersucht (vgl. Kapitel 4.3.2).

Nach einer Silierdauer von mindestens 90 Tagen bei einer Raumtemperatur von 25 °C wurde das jeweilige Endgewicht jeder Silage bestimmt, um den Masseverlust beziffern zu können. Anschließend wurden die drei Gläser jeder silierten Substratvariante geöffnet, die Silagen organoleptisch beurteilt und die Messung des pH-Wertes vorbereitet. Dazu wurden 100 g Silage mit 100 ml destilliertem Wasser vermengt. Nach 24 Stunden kann nach nochmaliger Durchmischung der pH-Wert mit einer pH-Elektrode (Testo 14) bestimmt werden (vgl. Kapitel 4.3.2). Zur Vorbereitung der Silagen für den Einsatz im Gärtest wurde nach erfolgtem Vermischen in dreifacher Wiederholung der TS und oTS-Gehalt (ILV) wie in Kapitel 4.3.2 beschrieben bestimmt. Anschließend wurde jede Probe geteilt, eine Teilmenge diente zur Analyse des Gär säuremusters (LUFA), die andere wurde sofort bei -26°C tiefgefroren, um die Silagen bis zum Einsatz im Batch-Versuch zu lagern.

4.3.2 Inhaltsstoffanalyse

Alle Pflanzensubstrate, deren Biogasertrag im Rahmen der vorliegenden Arbeit bestimmt wurde, wurden bei der LUFA ITL GmbH Kiel auf die in Tab. 5 aufgeführten Parameter nasschemisch untersucht (Einfachbestimmung). Im Anhang findet sich in Tab. A 7 eine Übersicht über die dabei verwendeten LUFA-Methoden.

Tab. 5: Untersuchungen an Pflanzensubstraten
mit ILV: Institut für landwirtschaftliche Verfahrenstechnik, LUFA: LUFA ITL
GmbH Kiel

Art des Pflanzensubstrats	Untersuchter Parameter	Ort der Untersuchung
Frisch	Trockensubstanz Organische Trockensubstanz Rohfett Rohstärke bzw. Rohzucker Rohprotein Rohfaser Pufferkapazität Nitrat Anfangbesatz mit Milchsäurebakterien	ILV und LUFA ILV und LUFA LUFA LUFA LUFA LUFA LUFA LUFA LUFA
Frisch, getrocknet und vermahlen	Trockensubstanz Organische Trockensubstanz Rohfett Rohstärke bzw. Rohzucker Rohprotein Rohfaser	ILV und LUFA ILV und LUFA LUFA LUFA LUFA LUFA
Silage	pH Trockensubstanz Organische Trockensubstanz Ammoniak-N Gärsäuren (Essigsäure, Propionsäure, Buttersäure, Milchsäure)	ILV und LUFA ILV und LUFA ILV LUFA LUFA

Zusätzlich zu den bei der LUFA durchgeführten Inhaltsstoffanalysen wurden die Werte für die Trockensubstanz (TS) und die organische Trockensubstanz (oTS) der untersuchten Biogassubstrate und des Impfschlammes im ILV im Labor bestimmt. Hierbei wurden jeweils drei Wiederholungen eines Substrates oder Impfschlammes bis zur Gewichtskonstanz bei 105°C für 24 Stunden getrocknet (DIN EN 12 880 DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V., 2000B) und anschließend für 8 Stunden bei 550°C verascht (DIN EN 12 879 DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V., 2000a).

Der Trockensubstanzgehalt (TS) errechnet sich aus dem Quotienten der Trockenmasse (m_{TS}) und der Frischmasse (m_{FM}) der Probe, multipliziert mit dem Faktor 100 (Gleichung 24).

$$TS = \frac{m_{TS}}{m_{FM}} \cdot 100\% \quad (24)$$

TS Trockensubstanzgehalt der Probe, in Prozent

m_{TS} Masse der Einwaage des Impfschlammes oder des Substrates nach Trocknung, in Gramm

m_{FM} Masse der Einwaage der Probe, in Gramm

Um den Anteil der organischen Trockensubstanz (oTS) also des Glühverlusts an der Trockenmasse zu bestimmen, wird der Quotient der Glühverlustmasse und der Masse der Trockensubstanz mit dem Faktor 100 multipliziert (Gleichung 25). Die Glühverlustmasse entspricht der Differenz der Massen vor und nach der Veraschung.

$$oTS = \frac{m_{TS} - m_{GR}}{m_{TS}} \cdot 100\% \quad (25)$$

oTS Anteil der organischen Trockensubstanz an der Trockensubstanz einer Probe, entspricht dem Glühverlust, in Prozent

m_{TS} Masse der Trockensubstanz der Probe, in Gramm

m_{GR} Masse des Glührückstandes, entspricht der Masse der Trockensubstanz der Probe nach der Veraschung, in Gramm

Bei Silagen wurden nach einer Silierdauer von 90 Tagen die Masseverluste (ILV) und die Gärqualität (LUFA) bestimmt. Die Trockensubstanzbestimmung bei der LUFA ITL GmbH Kiel beinhaltet eine Korrektur nach der vereinfachten Formel nach WEIßBACH (1995) um die bei der Trocknung verlorenen flüchtigen Bestandteile der Silagen (vgl. Kapitel 3.3.2 Gleichung 6 und 7). Da WEIßBACH (2008c; 2008a) von der Verwendung der unspezifischen Korrekturgleichungen abrät (vgl. Kapitel 3.3.2),

wurden in der vorliegenden Arbeit die am ILV bestimmten TS-Gehalte der Silagen verwendet. Diese wurden in Ermangelung der Kenntnis der Alkoholgehalte der Silagen zumindest für die Gärsäuren und den Ammoniakgehalt über die spezielleren von WEIßBACH (1995) vorgeschlagenen Korrekturgleichungen korrigiert (vgl. Kapitel 3.3.2 Gleichungen 1 bis 3).

Zur Bestimmung des pH-Wertes von Silagen wurden 100 g Silage mit 100 ml destilliertem Wasser vermengt. Nach 24 Stunden wurde nach nochmaliger Durchmischung der pH-Wert mit einer pH-Elektrode (Testo 14) ermittelt.

4.3.3 Bestimmung des Trockenmasseertrages

Die Bestimmung der Trockenmasseerträge der verwendeten Pflanzensubstrate wurde im Rahmen des Verbundprojektes BIOGAS-EXPERT von Teilprojekt 5 durchgeführt. Je nach Pflanzenart und Beprobungszeitpunkt kamen unterschiedliche Verfahren zum Einsatz. Grundsätzlich handelt es sich um manuelle, destruktive Beprobungen. Lediglich zu den Schnitten im Deutschen Weidelgras und zu den Haupternteterminen im Mais und Weizen erfolgte eine zusätzliche maschinelle Ernte und Beprobung. Somit gestaltete sich die Bestimmung wie folgt (WIENFORTH, 2010):

- **Manuelle destruktive Beprobung Weizen**

Die Beprobung erfolgte ausschließlich bei den Kas-Parzellen. Es wurden jeweils vier Weizenreihen à 50 cm Länge beprobt, bei einem Reihenabstand von 10 cm entspricht das einer Fläche von 0,2 m². Dazu wurde die Erntefläche mit vier Stäben abgesteckt und die Pflanzen über der Bodenoberfläche abgeschnitten. Die Aufarbeitung der Proben erfolgte im Gewächshaus. Nach Bestimmung der Frischmasse wurden die Proben bei 58 °C im Trockenschrank bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und anschließend das Trockengewicht bestimmt. Der Trockenmasseertrag [g/m²] ergibt sich durch Division der Trockenmasse durch 0,2 m².

- **Manuelle destruktive Beprobung Mais**

Die Beprobung erfolgte ausschließlich bei den Kas-Parzellen. Es wurden jeweils fünf Maispflanzen aus zwei Reihen an einer repräsentativen Stelle des Probenahme-

streifens mit einem Messer direkt über der Bodenoberfläche abgeerntet, also zehn Pflanzen pro Parzelle. Der Reihenabstand betrug 75 cm. Die Aufarbeitung der Proben erfolgte im Gewächshaus.

Bei der Probenahme wurde die Länge des Erntestreifens folgendermaßen bestimmt: Mit einem Zollstock wurde das Stück, aus dem die fünf Pflanzen entnommen wurden, ausgemessen. Dabei wurde der halbe Abstand zur Nachbarpflanze vor der ersten Pflanze und nach der fünften Pflanze mitgemessen, um einen Flächenbezug herstellen zu können. Aus den Längen der Erntereihen wurde die beerntete Fläche mit Gleichung 26 berechnet.

$$\frac{\frac{Erntereihe_{rechts}}{100} + \frac{Erntereihe_{links}}{100}}{2} \cdot 1,5 \quad (26)$$

Die Frischmasse der entnommenen Pflanzen wurde ermittelt. Nach Trocknung bei 58 °C bis zur Gewichtskonstanz wurde rückgewogen und durch Einbeziehung der Fläche der Trockenmasseertrag bestimmt.

- **Manuelle Ernte Mais**

Die Beprobung der Kas-Parzellen erfolgte wie bei der manuellen Beprobung von Mais. Bei den Parzellen, die mit Gärrest aus einer Biogasanlage mit Kofermentation gedüngt wurden, war das Vorgehen analog dazu, es wurden aber nur fünf Pflanzen beprobt. Dadurch ergibt sich der Flächenbezug (Gleichung 27):

$$Fläche_{5Pflanzen} = \frac{Erntereihe}{100} \cdot 0,75 \quad (27)$$

Die Pflanzen wurden nach Bestimmung der Frischmasse bei 58 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet, rückgewogen und der Trockenmasseertrag unter Einbeziehung der Fläche bestimmt.

- **Maschinelle Ernte Weizen, Mais, Deutsches Weidelgras**

Vor der Maschinenernte wurden die Stirnseiten der Parzellen frei geschnitten, um bei der Ernte Randeffekte auszuschließen. Am Erntetag wurde mit einem Parzellenmäher mit einer Schnittbreite von 1,5 m der Kerndruschstreifen beerntet.

Um einen Flächenbezug herzustellen, wurde die Länge des geschnittenen Streifens auf der rechten und linken Seite vermessen. Die Kerndruschfläche wurde folgendermaßen berechnet (Gleichung 28):

$$\frac{Länge_{Kerndrusch_{rechts}} + Länge_{Kerndrusch_{links}}}{2} \cdot 1,5 \quad (28)$$

Die Gesamtfrischmasse wurde vom Parzellenhäcksler erfasst, eine Teilprobe von durchschnittlich 500 g automatisch ausgegeben, deren Frischmasse ebenfalls erfasst wurde. Dieses Probenmaterial wurde bei 58 °C im Trockenschrank bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und rückgewogen. Der Trockensubstanzgehalt wurde nach Gleichung 24 (vgl. Kapitel 4.3.2) bestimmt und darüber die Trockenmasse der Gesamtmasse berechnet. Der Trockenmasseertrag ergibt sich durch Division der Trockenmasse durch die Fläche.

4.4 Inokulum

Zur Durchführung eines Gärtestes bedarf es eines Inokulums, welches die für die Vergärung erforderlichen Bakterien enthält (vgl. Kapitel 3.2). Basierend auf den Ergebnissen von Voruntersuchungen (Kapitel 4.6.3.1 und 5.1.1) wird als Inokulum unbehandelter Faulschlamm (Klärschlamm) aus einer kommunalen Kläranlage verwendet. Dieser lagert vor dem Einsatz im Gärtest 7 Tage bei 38 °C, um seine Eigengasproduktion auf ein Minimum abzusenken.

Zur Vorbereitung der Gärversuche wurde der Klärschlamm mit Hilfe eines 1 mm Siebes grob abgesiebt. Der Gehalt an Trockensubstanz und organischer Trockensubstanz wurde bestimmt.

4.5 Referenzsubstrat

Um beurteilen zu können, ob der in einem Gärversuch verwendete Impfschlamm ausreichend aktiv ist, muss in jedem Versuchsansatz ein Referenzsubstrat mitgeführt werden, dessen spezifische Biogasproduktion bekannt ist, die VDI 4630 (2006) empfiehlt hierzu den Einsatz von mikrokristalliner Cellulose. In jedem Gärtest müssen mindesten 80 % der theoretischen Gasproduktion von 740 l_N/kg_{oTS} bis

750 I_N/kg_{oTS} erreicht werden. Zur Durchführung der Gärversuche wurde diesen Empfehlungen folgend mikrokristalline Cellulose als Referenzsubstrat verwendet.

4.6 Versuchsablauf

4.6.1 HBT

Beim Ansetzen des Hohenheimer Biogasertragstests wird wie nachfolgend beschrieben vorgegangen. Alle Geräte und Substrate befinden sich auf Raumtemperaturniveau. Jede Substratvariante wird in dreifacher Wiederholung eingesetzt, ebenso wie das Referenzsubstrat Cellulose. Außerdem wird auch das reine Inokulum in dreifacher Wiederholung untersucht, um bei der quantitativen Auswertung (vgl. Kapitel 4.7.2) die Eigengasproduktion aus dem Impfschlamm berücksichtigen zu können. Diese reinen Impfschlammproben werden im Folgenden auch als Nullproben bezeichnet.

Von allen leeren Kolbenprobern wird vorab die Masse auf 1/100 g bestimmt (Präzisionswaage Kern PLS 510*3, Linearität ± 0,002 g). Als Erstes wird der Klärschlamm in die Kolbenprober gefüllt, und zwar für die Nullproben jeweils 50 ml mittels eines graduierten Messbechers und für die Substrate jeweils 30 ml mit einer Kippautomatik. Der Klärschlamm im Vorratsgefäß und in der Kippautomatik wird durch regelmäßiges Rühren bzw. Schwenken homogen gehalten. Die Masse der befüllten Kolbenprober wird ebenfalls auf 1/100 g bestimmt und in ein Excel-Tabellenblatt (Tab. 6) eingetragen, die Einwaage des Inokulums wird berechnet.

Der Anteil der organischen Trockensubstanz des Substrates am Gehalt der organischen Trockensubstanz des Klärschlammes soll nicht zu hoch sein, um eine Hemmung des Ansatzes zu vermeiden. Nach den Vorschriften der VDI 4630 (2006) gilt hierfür die Bedingung (Gleichung 29):

$$\frac{oTS_{Substrat}}{oTS_{Klärschlamm}} \leq 0,5 \quad (29)$$

Mit Hilfe einer im Tabellenblatt hinterlegten Gleichung wurde die entsprechende Substrateinwaage auf ein Verhältnis von $oTS_{Substrat}$ zu $oTS_{Klärschlamm}$ von 0,5 bestimmt.

Tab. 6: Beispiel für Tabellenblatt zur Bestimmung der Substrateinwaage mit M: Masse, Spalten mit hinterlegten Berechnungen sind grau hervorgehoben

Inhalt	Nr.	M_{Kolben} [g]	$M_{\text{Kolben+Schlamm}}$ [g]	$M_{30 \text{ ml Schlamm}}$ [g]	TS [%]	oTS [%]	$M_{\text{oTS in 30 ml Schlamm}}$ [g]	M_{Substrat} [g]	Datum, Uhrzeit	Volumen [ml]
Cellulose	1	124,19	154,75	30,56	95,2	99,9	0,646	0,339	26.2.08 14:10	29
Cellulose	2	123,26	154,12	30,86	95,2	99,9	0,652	0,343	26.2.08 14:10	29
Cellulose	3	123,34	153,93	30,59	95,2	99,9	0,647	0,340	26.2.08 14:10	29

Die jeweilige Substrateinwaage wird auf einem Wägepapier mit Hilfe einer Analysenwaage auf 1/1000 g (Kern ALJ 160 4M, Linearität $\pm 0,2$ mg) genau eingewogen und in den mit Klärschlamm befüllten Kolbenprober gegeben. Durch leichtes Schwenken wird das Substrat im Inokulum verteilt. Anschließend wird die Restluft mit dem eingefetteten Stopfen aus dem Kolben gedrängt und dieser mit der Schlauchklemme verschlossen. Der Ausgangsfüllstand wird notiert. Der fertig befüllte Kolben wird in den Rotor gesteckt. Die einzusetzenden Substrate bzw. Kolbenprober werden nach dem Zufallsprinzip randomisiert auf die einzelnen Steckplätze im Rotor des HBT verteilt.

Erst nach Beendigung des Befüllprozesses aller Kolbenprober werden der Wärmeschrank und der Motor eingeschaltet, die Uhrzeit wird als Versuchsbeginn notiert.

Die Gasmessung erfolgt abhängig von der Gasproduktion, da für die Gasanalyse eine bestimmte Menge an Biogas (mindestens 30 ml) zur Verfügung stehen muss. Ist für die Qualitätsbestimmung genügend Biogas produziert, wird der Füllstand an der aufsteigenden Skala des Kolbens bestimmt. Bestehend aus Impfsubstrat, Substrat und Gasphase, wird der Füllstand (Volumen vor Gasanalyse) in einem Tabellenblatt notiert (Tab. 7).

Durch Öffnung der Schlauchklemme am Kapillaransatz, und Einschieben des Stopfens wird das produzierte Biogas der Gasanalyse (vgl. Kapitel 4.2) zugeführt. In dem Gas wird durch NDIR-Messung ausschließlich der Methangehalt ermittelt, da das produzierte Biogasvolumen zu gering ist, um zusätzlich den Kohlendioxidgehalt zu bestimmen. Neben der Methankonzentration werden Druck der Umgebungsluft und das jeweilige Datum, mit Uhrzeit in das Tabellenblatt eingetragen. Nach der Gasanalyse wird der Füllstand (eingestelltes Volumen) erneut notiert. Bestehend aus

Impfslamm und Substrat bildet er den Basisfüllstand für die Ermittlung der nächsten Gasproduktion. Sollten Besonderheiten während des Gasanalyseprozesses oder der Zeit zwischen zwei Analysen aufgefallen sein, werden diese ebenfalls in das Tabellenblatt eingetragen.

Tab. 7: Beispiel für Tabellenblatt zur Datenerhebung der Gasproduktion eines Kolbenprobers im HBT
Spalten mit hinterlegten Berechnungen sind grau hervorgehoben

Nr.	Datum, Uhrzeit	Volumen vor Gasanalyse [ml]	Eingestelltes Volumen [ml]	Gebildetes Volumen [ml]	Luft-Druck [hPa]	Methan-Gehalt [%]	Probleme
1	26.2.08 14:10		29				
1	29.2.08 8:24	77	29	48	1011,7	51,7	
1	29.2.08 18:24	69	29	40	1000,7	40,3	

Das Volumen der Nullproben wird anfangs täglich notiert, um den Verlauf der Gasproduktion des Klärschlammes charakterisieren zu können. Da der Klärschlamm nur noch eine geringe Eigengasproduktion besitzt (vgl. Kapitel 4.4), kommt es in der Regel während der gesamten Verweilzeit nur zu einigen Messzeitpunkten (2 bis 3) zur Gasanalyse.

Die Kolbenprober verweilen solange in dem Wärmeschrank, bis gemäß VDI 4630 (2006) die Gasproduktion eines Tages nur noch 1% der bisher erfassten Gasmenge entspricht. In den durchgeführten Versuchen wurde das Abbruchkriterium immer nach 28 Tagen erfüllt. Nach erfolgter Endablesung und Gasanalyse wird der Versuch beendet.

4.6.2 Batch

Die einzusetzenden Substrate bzw. Fermenter werden nach dem Zufallsprinzip randomisiert auf die einzelnen Plätze in den Wasserbädern verteilt. Jede Variante wird grundsätzlich in fünffacher Wiederholung untersucht. Dabei ist anzumerken, dass während der ersten Untersuchungen im Jahr 2007 mit drei Wiederholungen pro Variante gearbeitet wurde, nach Erweiterung der Versuchsanlage im Januar 2008

wurden immer fünf Wiederholungen pro Variante verwendet. Zusätzlich zu den pflanzlichen Substraten wird als Referenz in dreifacher Wiederholung mikrokristalline Cellulose mitgeführt (vgl. Kapitel 4.5). Drei Fermenter enthalten bei jedem Versuchsansatz ausschließlich Klärschlamm (Nullproben), um den Eigengasanteil des Inokulums (vgl. Kapitel 4.4) bestimmen zu können.

Nach VDI 4630 (2006) hat der Anteil der organischen Trockensubstanz des Substrates am Gehalt der organischen Trockensubstanz des Klärschlammes nicht zu hoch sein, um eine mögliche Hemmung des Ansatzes zu vermeiden. Da jeder Fermenter mit etwa 800 ml Inokulum befüllt wird, wird vorab nach Gleichung 29 (vgl. Kapitel 4.6.1) die Substrateinwaage festgelegt. Die Substrate, die bis zum Einsatz im Batch-Versuch im tief gefrorenen Zustand gelagert werden, werden bei Raumtemperatur aufgetaut (vgl. Kapitel 4.3.1.2). Das Gewicht der leeren Standflaschen (inklusive Deckel und Magnetührstäbchen) wird bestimmt (Waage Sartorius I 24000 P, I 31, Linearität ± 1 g).

Zunächst wird die je Fermenter benötigte Probenmenge auf 1/100 g genau ausgewogen (Präzisionswaage Kern PLS 510*3, Linearität $\pm 0,002$ g) und anschließend in die Standflaschen gefüllt. Um hierbei eine Entmischung zu vermeiden und eine repräsentative Einwaage zu erzielen, wird die Ausgangsmenge nach dem Viertelungsprinzip (VDI 4630, 2006) auf die für den Gärversuch benötigte Endmenge verjüngt.

Um die Homogenität des Inokulums zu gewährleisten, wird der bis zu diesem Zeitpunkt bei 38°C gelagerte Klärschlamm gut aufgerührt, anschließend werden jeweils 800 ml mit einem Messbecher abgemessen und in die Standflaschen gegeben. Hierbei wird durch gleichmäßiges Schwenken sicher gestellt, dass sich Substrat und Klärschlamm vermischen. Die Standflaschen werden mit einem Schraubdeckel verschlossen und die Einwaage bestimmt.

Nach nochmaligem Durchmischen des Fermenterinhaltens durch Schütteln werden die Standflaschen in die Versuchsanordnung eingebaut, die Wasserbäder haben bereits die Solltemperatur von 38°C. Beim Einbau wird chronologisch von Fermenter 1 bis 36 vorgegangen. Hierbei wird darauf geachtet, dass die Gasdichtigkeit gewährleistet ist.

Um die im Kopfraum des Fermenters verbleibende Luft zu entfernen, muss dieser anschließend mit Stickstoff gespült werden. Hierzu dient der seitlich an der Standflasche angebrachte Glasstutzen. Die ihn verschließende Schraubkappe wird

entfernt, das Außenrohr des Eudiometers mit Sperrflüssigkeit gefüllt. Der Stutzen wird mit einer durchbohrten, mit einer Dichtung und einem Schlauch versehenen Schraubkappe verschlossen, der Schlauch ist über einen Durchflussmengenbegrenzer mit einer Druckflasche mit reinem Stickstoff verbunden. Der Gashahn am Eudiometer muss geschlossen sein. Nun wird Stickstoff (400 ml) in den Kopfraum der Standflasche geleitet. Hierbei wird, wenn das System gasdicht verschlossen ist, die Sperrflüssigkeit in das Vorratsgefäß zurück gedrängt. Anhand des Pegels ist ersichtlich, welches Volumen eingeleitet wurde. Das Gasgemisch, welches sich nun im Eudiometer befindet, wird durch Öffnen des Gashahnes abgelassen. Der Gashahn wird geschlossen. Die durchbohrte Schraubkappe am Glasstutzen wird entfernt und durch die geschlossene ersetzt. Hierbei ist wieder darauf zu achten, dass das System gasdicht verschlossen wird. Nun wird Datum und Uhrzeit sowie der Ausgangspegelstand des Eudiometers in einer Tabelle notiert. Auch hierbei wird chronologisch vorgegangen.

Nachdem ein Wasserbad komplett bestückt ist, wird der Magnetantrieb eingeschaltet, so dass ein kontinuierliches Durchmischen des Fermenterinhaltens mittels Magnetrührstäbchens gewährleistet ist.

Die Gasmessung erfolgt abhängig von der Gasproduktion. Ist genügend Biogas (mindestens 70 ml) für die Gasanalyse vorhanden, wird der Pegelstand der Sperrflüssigkeit im Eudiometer notiert (Volumen vor Gasanalyse) und das Biogas durch Öffnen des Gashahnes in die Gasanalysegeräte (vgl. Kapitel 4.2) geleitet. Anschließend wird der Gashahn wieder verschlossen. Der Methan- und der Kohlendioxidgehalt, sowie der neue Füllstand im Eudiometer (eingestelltes Volumen) werden notiert. Für jeden Fermenter wird außerdem Datum und Uhrzeit, Raumtemperatur und Luftdruck zum Zeitpunkt der Messung in ein Tabellenblatt, wie Tab. 8 beispielhaft zeigt, eingetragen. Sollten Probleme zwischen zwei Ablesungen aufgetreten sein, werden diese protokolliert.

Tab. 8: Beispiel für Tabellenblatt zur Datenerhebung der Gasproduktion eines Fermenters im Batch-Versuch

Spalten mit hinterlegten Berechnungen sind grau hervorgehoben

Nr.	Datum, Uhrzeit	Volumen vor Gasanalyse	eingestelltes Volumen	Gebildetes Volumen	Raum- temperatur	Luftdruck
		[ml]	[ml]	[ml]	[K]	[hPa]
F01	14.2.08 13:27		20			
F01	14.2.08 19:58	205	12	185	294	1039,4
F01	15.2.08 0:12	139	12	127	294	1040

Ein Versuch wird jeweils so lange fortgeführt, bis, nach VDI 4630, die Gasproduktion eines Tages nur noch 1% der bisher erfassten Gasmenge entspricht. In den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuchen wurde das Abbruchkriterium immer nach 28 Tagen erfüllt. Nach erfolgter Endablesung und Gasanalyse werden die Standflaschen aus der Versuchsanlage entfernt und gewogen, um das Gewicht der Gärreste zu berechnen. Der pH-Wert sowie der TS- und der OTS-Gehalt der Gärreste werden bestimmt.

4.6.3 Begleitende Untersuchungen

Um die Versuchsdurchführung zu optimieren, wurden begleitende Untersuchungen durchgeführt, mit deren Hilfe der finale Versuchsaufbau und Versuchsablauf festgelegt wurde. Im Nachfolgenden werden zunächst nur die dazu verwendeten Methoden beschrieben.

4.6.3.1 Auswahl des Impfschlammes

Da die Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit von Gärversuchen unter anderem von der (möglichst gleichbleibenden) Aktivität des Impfschlammes abhängt, wurde im Vorfeld der Hauptuntersuchungen ein Schwerpunkt der Voruntersuchungen auf die Wahl eines geeigneten Impfschlammes gelegt. Hierzu wurde ein Fragebogen entwickelt, der an andere Institutionen und Firmen, die in Biogaslaboren Batch-

Versuche durchführen, verschickt wurde (SOLTAU, 2008). Der Fragebogen gliederte sich in die Bereiche Aufbereitung / Lagerung des Impfschlammes sowie Fütterung / Stabilität des Impfschlammes, um in Erfahrung zu bringen, welche Art von Batch-Versuchen durchgeführt wird und welches Inokulum verwendet wird.

Parallel zur Verschickung und Auswertung der Fragebögen wurden Vorversuche zur Selektion einer Impfschlammvariante durchgeführt. Zur Auswahl standen Klärschlamm aus einer kommunalen Kläranlage und Biogasfermentersubstrat, das aus einer Biogasanlage, die mit Rinder- und Schweineflüssigmist und Maissilage betrieben wurde, stammte. Aufgrund des Umstandes, dass das Biogasfermentersubstrat direkt aus dem Fermenter stammte, war dieses recht grob strukturiert. Beim Klärschlamm hingegen handelte es sich um ausgefaulten Klärschlamm direkt aus dem Faulturm, der kaum noch grobes Material aufwies.

Zunächst wurden beide Impfschlammsubstrate durch Sieben auf Partikelgrößen < 1 mm aufbereitet und anschließend der TS- und oTS-Gehalt bestimmt. Das Biogasfermentersubstrat wurde vor dem Sieben mit Hilfe eines Matzerators zerkleinert, um das Sieben zu erleichtern.

Um die Eigengasproduktion der Impfschlämme festzustellen, wurden 1 l Batch-Versuche in der in Kapitel 4.1.2 beschriebenen Versuchsanlage unter mesophilen Bedingungen (38 °C) angesetzt. Hierzu wurden pro Variante drei Standflaschen mit jeweils 500 ml des vorbereiteten Impfschlammes gefüllt. Die Gasentwicklung wurde sieben Tage lang beobachtet.

4.6.3.2 Einfluss der Steckplatzverteilung im HBT

Mit Hilfe eines gezielt angeordneten Versuchsaufbaus wurde in mehreren Schritten untersucht, ob und inwieweit es durch die Anordnung und Verteilung der Kolbenprober im HBT-Rotor zu einer möglichen Beeinflussung der Ergebnisse kommen kann (STOFFERS, 2008).

Für die diesbezüglichen Untersuchungen wurde der Rotor in zwei Hälften eingeteilt (Abb. 11). In der einen Hälfte wurden die Kolbenprober so angeordnet, dass der Abstand der Kolbenprober zueinander möglichst groß war; d.h. kein Kolbenprober sollte direkte Kolbenprober als Nachbarn haben. Die andere Hälfte wurde dagegen komplett bestückt, so dass alle Steckplätze mit Kolbenprobern belegt waren. Darüber hinaus wurde der gesamte Rotor in drei verschiedene Zonen unterteilt, die sich

jeweils im Abstand vom Rotormittelpunkt unterschieden (graue Schraffur, Abb. 11). Um in jeder Zone annähernd gleich viele Datenerhebungen zu haben, wurden die Zonen so gewählt, dass etwa gleich viele Steckplätze einer Zone zugehören.

In der Rotorhälfte, die komplett bestückt wurde (rechte Hälfte in Abb. 11), befanden sich je 21 Kolbenprober mit Weizen und Cellulose, in jeder Zone möglichst 7 Kolbenprober eines Substrates. Um die Rotorhälfte jedoch komplett zu füllen, wurden leere Steckplätze durch wassergefüllte Kolbenprobern besetzt, die lediglich als Platzhalter dienten. In der Rotorhälfte, die ohne direkte Nachbar-Kolbenprober bestückt wurde (linke Rotorhälfte in Abb. 11), befanden sich 21 Kolbenprober mit Cellulose (ebenfalls mit 7 Kolbenprober pro Zone). Die Mittellinie, die als Grenze zwischen den beiden Rotorhälften fungiert, wurde mit Cellulose-Kolbenprober bestückt. Zusätzlich wurden insgesamt 7 Kolbenprober als Nullprobe ausschließlich mit Klärschlamm gefüllt. Sie befanden sich gleichmäßig über den Rotor verteilt und dienten der Ermittlung der Eigengasproduktion des Klärschlammes.

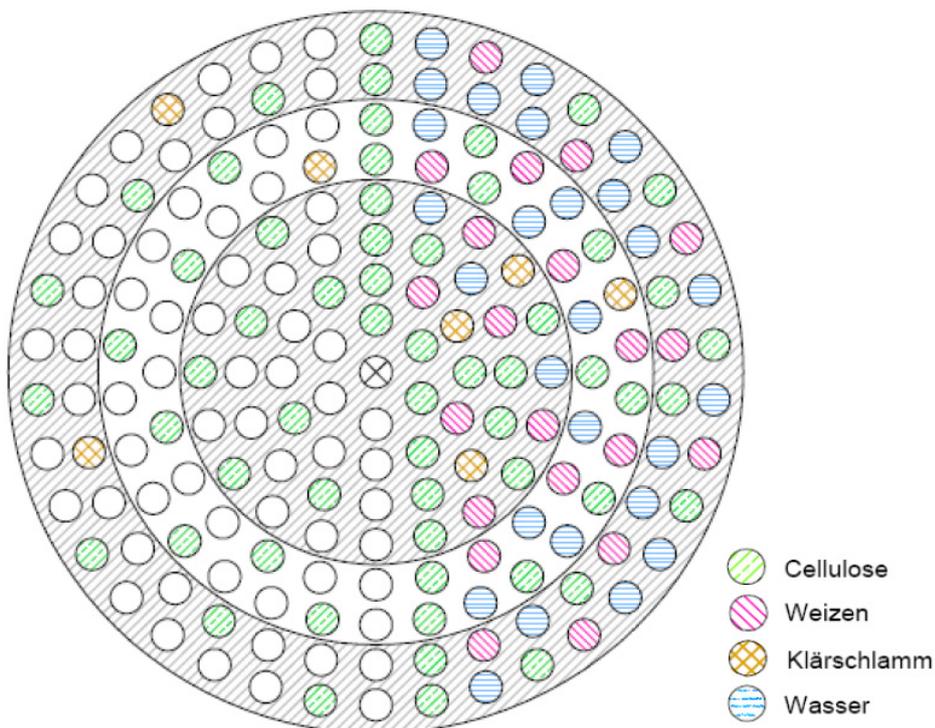


Abb. 11: Anordnung der Kolbenprober im HBT-Rotor für die Voruntersuchungen zum Einfluss der Steckplatzverteilung nach STOFFERS (2009)

Für die Auswertung der erhobenen Daten wurden die Nullproben, nach Überprüfung der Streuung, zu einem arithmetischen Mittel zusammengefasst. Im gesamten Versuchsaufbau waren 114 Kolbenprober im Rotor verteilt. Davon waren 59 ($2 \cdot 21 +$

17) Kolbenprober mit Substrat 1 (Cellulose), 21 Kolbenprober mit Substrat 2 (Weizen), 7 Kolbenprober mit Klärschlamm (Nullprobe) und 27 Kolbenprober mit Wasser befüllt.

Der Versuch wurde grundsätzlich wie in Kapitel 4.6.1 beschrieben durchgeführt, mit der einzigen Abweichung, dass sowohl der Impfschlamm als auch die Kolbenprober auf 38 °C vortemperiert waren und die Kolbenprober gleich nach dem Befüllen in den Rotor eingesteckt wurden, auch der Trockenschrank war bereits temperiert.

In einem weiteren begleitenden Versuch, der der Optimierung der Vorgehensweise beim Versuchsansatz diente, wurde diese dahingehend verändert, als dass alle vorbereitenden Arbeitsschritte wie z.B. das Bestimmen der Leergewichte der Kolbenprober bereits im Vorfeld erledigt werden und so lange bei Raumtemperatur gearbeitet wird, bis alle Kolbenprober fertig befüllt im Rotor sind. Erst nach der kompletten Bestückung des Rotors wird der Trockenschrank auf Versuchstemperatur gebracht.

4.6.3.3 Siebung des Inokulums und Kopfraumkorrektur

Im Batch-Test hat der Kopfraum über dem Fermenterinhalt (vgl. Abb. 8 Kapitel 4.1.2) ein nicht unbeträchtliches Volumen (350 ml), so dass es grundsätzlich zu einer Vermischung des neu gebildeten Gases mit dem Gas im Kopfraum kommt. Um diese unvermeidbare Durchmischung zu berücksichtigen, wird zur quantitativen Auswertung eine sogenannte Kopfraumkorrektur durchgeführt. Nach VDI 4630 (2006) werden zwei alternativ einsetzbare Methoden für die Kopfraumkorrektur unterschieden (Kapitel 4.7.2):

- die volumetrische Methode und
- eine Korrektur über das Verhältnis zwischen Methan und Kohlendioxid.

Obwohl sich die VDI 4630 (2006) nicht auf eine der beiden Möglichkeiten festlegt, wurde auf einem Treffen der Arbeitsgruppe „Ringversuch“ mit allen Ringversuchteilnehmern im Juni 2008 jedoch für die neu zu erarbeitende Verfahrensvorschrift festgelegt, dass die Kopfraumkorrektur ausnahmslos über das Verhältnis der beiden Hauptkomponenten des Biogases durchgeführt werden soll. Die entsprechende Verfahrensvorschrift ist bedauerlicherweise noch nicht veröffentlicht (WULF et al., 2011).

Da zu Beginn der vorliegenden Untersuchungen kein CO₂-Messgerät zur Verfügung stand, wurde für die ersten Versuche umständehalber die Kopfraumkorrektur volumetrisch durchgeführt.

Im Anschluss an die Empfehlung der „Ringversuchsgruppe“ wurde für den weiteren Verlauf des Projektes zusätzlich ein Gasanalysegerät für Kohlendioxid angefertigt. Das heißt von diesem Zeitpunkt an wurde im Batch-Versuch parallel zum Methangehalt des Biogases auch der Kohlendioxidgehalt bestimmt (vgl. Kapitel 4.2). Im Folgenden wurde die Kopfraumkorrektur nun nach beiden Methoden bestimmt.

Um abzuklären, inwieweit sich die spezifische Methanproduktion ändert, je nachdem auf welcher Art der Kopfraumkorrektur sie beruht, wurden begleitende Untersuchungen mit einem Batch-Versuch durchgeführt. Diese Untersuchungen sollten parallel dazu dienen, der Fragestellung nachzugehen, ob die Siebgröße einen Einfluss auf die Aktivität des Impfschlammes hat, da im Batch-Versuch ebenso wie im HBT auf 1 mm gesiebter Klärschlamm als Inokulum eingesetzt wird (OEVERDIECK, 2010).

Um den beiden oben genannten Fragestellungen mit einem Versuchsansatz nachzugehen, wurden drei verschiedene Siebvarianten des Klärschlammes erzeugt: 1 mm, 3 mm und 5 mm. Um statistisch belastbare Ergebnisse zu erzielen, wurden je Siebvariante fünf Nullproben und sieben Proben mit Zusatz von mikrokristalliner Cellulose angesetzt. Die Versuchsdurchführung entsprach der in Kapitel 4.6.2 beschriebenen. Um eine Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen aus allen anderen Batch-Versuchen zu ermöglichen, betrug die Versuchsdauer ebenfalls 28 Tage. Zur Auswertung (vgl. Kapitel 4.7.2), die für jeden Fermenter einzeln erfolgt, wurden für die Kopfraumkorrektur beide Methoden angewendet. Anschließend wurden mittels SPSS 16 statistische Tests durchgeführt (Kapitel 4.7.3).

4.6.3.4 Fehlerbetrachtung

Zur Fehlerbetrachtung beider Versuchsanlagen, d. h. HBT und Batch müssen die Messabweichungen der Messgeräte berücksichtigt werden.

Für die Bestimmung der meisten im Labor erhobenen Massen wurden drei verschiedene Waagen benutzt:

- die Präzisionswaage Kern PLS 510*3 zur Bestimmung der Einwaage von Impfschlamm im HBT, der Einwaage von Substrat im Batch, sowie der

Massen zur Trockenmasse- und organischen Trockenmassebestimmung. Diese hat einen Wägebereich von bis zu 510 g bei einer Ablesbarkeit von 0,001 g. Die Linearität der Waage liegt bei $\pm 0,002$ g, die Reproduzierbarkeit, die der Standardabweichung eines erfassten Prüfungsgewichts entspricht, hat den Wert 0,002 g.

- die Analysenwaage Kern ALJ 160 4M zur Bestimmung der Substrateinwaage im HBT. Diese hat einen Wägebereich von 10 mg bis 160 g bei einer Ablesbarkeit von 0,1 mg. Die Linearität der Waage liegt bei $\pm 0,2$ mg, die Reproduzierbarkeit hat den Wert 0,2 mg.
- die Sartorius Waage I 24000 P, I 31 zur Bestimmung der Klärschlammeinwaage im Batch. Diese hat einen Wägebereich von bis zu 24,2 kg bei einer Ablesbarkeit von 0,1 g. Die Linearität der Waage liegt bei ± 1 g, die Standardabweichung hat einen Wert von $\pm 0,5$ g.

Die zwei Temperatursensoren, die der Überwachung der Temperatur im Wärmeschrank des HBT dienen (vgl. Kapitel 4.1.1), haben jeweils eine Temperaturgenauigkeit von 1°C . Der Sensor sendet die Daten an eine Funk-Wetterstation der Firma TFA Dostmann. Diese Station hat einen eingebauten Sensor mit der Temperaturgenauigkeit von ebenfalls 1°C .

Mit derselben Funk-Wetterstation wird der Druck der Umgebungsluft erfasst. Bei Inbetriebnahme dieses Gerätes wird der aktuelle Luftdruck mithilfe von Daten offizieller Wetterstationen der Umgebung eingestellt. Die Genauigkeit in Abhängigkeit des eingestellten Wertes liegt bei 3 hPa.

Der Methangehalt des produzierten Biogases wird mit einem Advanced Gasmitter® (AGM 10) der Firma Sensors Europe bestimmt. Ein Gassensor erfasst den Methangehalt im Infrarotspektrum. Der Messbereich liegt zwischen 0% und 100% CH₄ bei einer Genauigkeit von $\pm 2\%$ des Messbereichsendwerts. Zur Kalibration des Sensors werden zwei zertifizierte Prüfgase verwendet. Nach Kalibration ist der Sensor über ein halbes Jahr stabil. Die Nullpunktdrift wird täglich mithilfe von Stickstoff (Reinstgas) überprüft. Als Referenz für den Methanwert dient ein Gasgemisch aus 60% CH₄ und 40% CO₂. Der Kohlendioxidgehalt des Biogases wird im Batch-Versuch mit einem Advanced Gasmitter® (AGM 32) der Firma Sensors Europe bestimmt. Die Funktionsweise und Genauigkeiten entsprechen denen des Methananalysegerätes.

Zusätzlich zu den Gerätefehlern kann es beim Ablesen der Volumina der Kolbenprober und Eudiometer zu Fehlern kommen. Sowohl die Kolbenprober als auch die Eudiometer sind geeicht und mit einer Skala von 100 ml bzw. 400 ml versehen, die 1 ml genau abgelesen werden kann. Wenn bei einem Ableseereignis die Markierung am Stopfen der Kolbenprober genau zwischen zwei Skalenstrichen liegt, sind theoretisch drei Werte für das Volumen möglich, und zwar der niedrigere Wert, der höhere Wert und eine Schätzung auf 0,5 ml genau dazwischen. Um den Fehler personenunabhängig immer gleich zu belassen, wurde entschieden, beim HBT in einem solchen Fall, immer den kleineren Wert auf 1 ml genau zu verwenden. Im Batch-Versuch wird immer an der Unterkante des Meniskus abgelesen, wobei der Volumenwert verwendet wird, der am ehesten mit der Meniskusunterkante übereinstimmt.

Die Temperatur im Wasserbad wird durch ein Julabo Einhängethermostat (Typ ED) konstant gehalten. Dieses hat einen Arbeitstemperaturbereich von 20 bis 100 °C bei einer Ablesbarkeit von 0,1 °C und eine Temperaturkonstanz von $\pm 0,03$ °C. Die integrierte Umwälzpumpe fördert 15 l Wasser pro Minute und sorgt somit für eine gleichmäßige Durchmischung.

4.7 Datenaufbereitung

4.7.1 Plausibilitätsprüfung

Nach Versuche werden die Daten auf Plausibilität überprüft. So gehen z.B. Daten eines solchen Fermenters nicht in die weitere Auswertung mit ein, bei dem während des Versuchsverlaufes Auffälligkeiten, wie z. B. Undichtigkeit beobachtet oder für den durch menschliches Versagen fehlerhafte Werte notiert wurden. Alle anderen Daten wurden ausgewertet und bilden die Grundlage dieser Arbeit.

4.7.2 Berechnete Parameter

Um Biogasversuche qualitativ zu bewerten, sollte eine Vergleichbarkeit der Gasertragsdaten gewährleistet sein. Hierzu werden die erhobenen Daten aufbereitet und auf Normbedingungen (Normtemperatur 273 K, Normdruck 1013 hPa) umgerechnet (vgl. Anhang Gleichung A1).

Je nach gewünschter Information, kann die Produktivität eines Fermenters, auf verschiedene Größen bezogen werden. Um Biogas,- und Methanproduktionen verschiedener Fermenter und Fermentertypen miteinander vergleichen zu können, bietet es sich an, als Bezugsgröße das Substrat zu nehmen. Dafür sind nachfolgende Berechnungen nötig, deren Zielgrößen die spezifische Biogasproduktion und die spezifische Methanproduktion sind. Die Grundlage dieser Berechnungen bildet die VDI-Richtlinie 4630 (2006), eine ausführliche Beschreibung der Vorgehensweise ist im Anhang (vgl. Text A 1) zu finden.

Zur Berechnung der spezifischen Biogasproduktion sind fünf Schritte erforderlich.

Berechnung (vgl. Text A 1, Gleichung A 1 bis A 8):

- des Normgasvolumens (V_0^{tr}) des Biogases
- des Eigengasanteils des Impfschlammes in den Nullproben
- der Eigengasproduktion des Impfschlammes ($V_{\text{IS(korr.)}}$) in den Mischungen
- des Netto-Gas-Normvolumens aus dem Substrat (V_n)
- der substratspezifische Biogasproduktion (V_s)

Zur Berechnung der spezifischen Methanproduktion sind bis zu sieben Schritte erforderlich.

Berechnung(vgl. Text A 1, Gleichung A 2 bis A 8):

- der Methankonzentration des trockenen Gases ($C_{\text{CH}_4}^{\text{tr}}$)
- der um den Einfluss des Kopfraumes korrigierten Methankonzentrationen (nicht bei HBT)
- des Methannormvolumens des trockenen Gases
- des Eigenmethananteils des Impfschlammes in den Nullproben
- der Eigenmethanproduktion des Impfschlammes ($V_{\text{IS(korr.)}}$) in den Mischungen
- des Netto-Methan-Normvolumens aus dem Substrat (V_n)
- der substratspezifische Methanproduktion (V_s)

Zur Bestimmung des Methanhektarertrages wird der Mittelwert der Trockenmasseerträge der vier Wiederholungspartellen einer Substratvariante berechnet. In Kombination mit der spezifischen Methanproduktion der Substratvariante ergibt sich der Methanhektarertrag. Dabei muss darauf geachtet werden, dass die spezifische Methanproduktion, die eigentlich auf die organische Trockensubstanz bezogen ist [$\text{l}_N/\text{kgO}_{\text{TS}}$], zunächst in die Dimension $\text{l}_N/\text{kg}_{\text{TS}}$ umgerechnet werden muss.

4.7.3 Statistische Auswertung

Zur statistischen Auswertung der Versuchsergebnisse wurde die Statistik-Datenanalyse-Software SPSS in der 16. Version verwendet.

Die Ergebnisse für jede Gärtestapparatur und jede Pflanzenart wurden gesondert ausgewertet. Hierbei wurde jeweils zuerst überprüft, ob für die einzelnen Varianten Normalverteilung der Parameter substratspezifische Biogas- und Methanproduktion sowie Methanhektarertrag vorlag (Histogramm mit Normalverteilungskurve, Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest), und zwar zunächst für alle Ergebnisse der Pflanzenart, später nach Termin und Düngeintensität aufgeteilt.

Da vor allem auf der Stufe der verschiedenen Düngeintensitäten eines Erntetermins der Stichprobenumfang zu gering war, um von normalverteilten Daten auszugehen, wurden im weiteren Verlauf nichtparametrische Tests nach Kruskal-Wallis angewendet. Mit dem Kruskal-Wallis-Test wurde untersucht, ob signifikante Unterschiede zwischen den vermuteten Gruppen bestehen.

Bei den Begleituntersuchungen zum Einfluss der Kopfraumkorrektur (vgl. Kapitel 4.6.3.3) wurde anstelle des Kruskal-Wallis-Tests der Test nach Wilcoxon und Friedman durchgeführt, da es sich um eine verbundene Stichprobe handelte. Für die Untersuchung des Einflusses der Siebung (vgl. Kapitel 4.6.3.3) wurden ergänzend zum Kruskal-Wallis-Test Mehrfachvergleiche für normalverteilte Daten (Post-Hoc-Tests nach Bonferroni und Tuckey) durchgeführt.

5 ERGEBNISSE

5.1 Begleitende Untersuchungen

Im Rahmen der Inbetriebnahme der Versuchsanlagen wurden begleitende Untersuchungen durchgeführt, und zwar zur Auswahl des Impfschlammes, zum Einfluss der Steckplatzverteilung im Rotor (HBT) und zur Siebung des Inokulums sowie zur Kopfraumkorrektur im Batch-Versuch. Die wichtigsten Ergebnisse dieser Begleituntersuchungen sind in den folgenden Kapiteln 5.1.1 bis 5.1.3 dargestellt. Des Weiteren wurde eine generelle Betrachtung der möglichen auftretenden Fehler durchgeführt (Kapitel 5.1.4).

5.1.1 Auswahl des Impfschlammes

Insgesamt wurden 42 Fragebögen an ausgewählte Adressen versendet, von denen 28 beantwortet wurden. Für die Auswertungen konnten nach Überprüfung der Vollständigkeit und der Plausibilität insgesamt 22 Fragebögen verwendet werden. Für die Fragen im Bereich der Fütterung konnten lediglich 6 Fragebögen verwendet werden.

Im Folgenden wird eine Auswahl der wichtigsten Ergebnisse in Form von Abbildungen einzeln oder zusammengefasst bzw. in Textform dargestellt. Weitere Einzelheiten sind SOLTAU (2008) zu entnehmen.

Zum Verwendungszweck des Impfschlammes gaben 50 % der Befragten an, diesen für Batch-Versuche im Größenbereich von 0,25 l – 5 l zu verwenden, Batch-Versuche sind im Vergleich zu den Versuchen im HBT die gängigste Art der diskontinuierlichen Laborversuche. (Abb. 12).

Die Versuche werden fast ausschließlich (92 %) im mesophilen Temperaturbereich durchgeführt. Lediglich zwei Einrichtungen führen die Versuche im thermophilen bzw. psychrophilen Bereich durch.

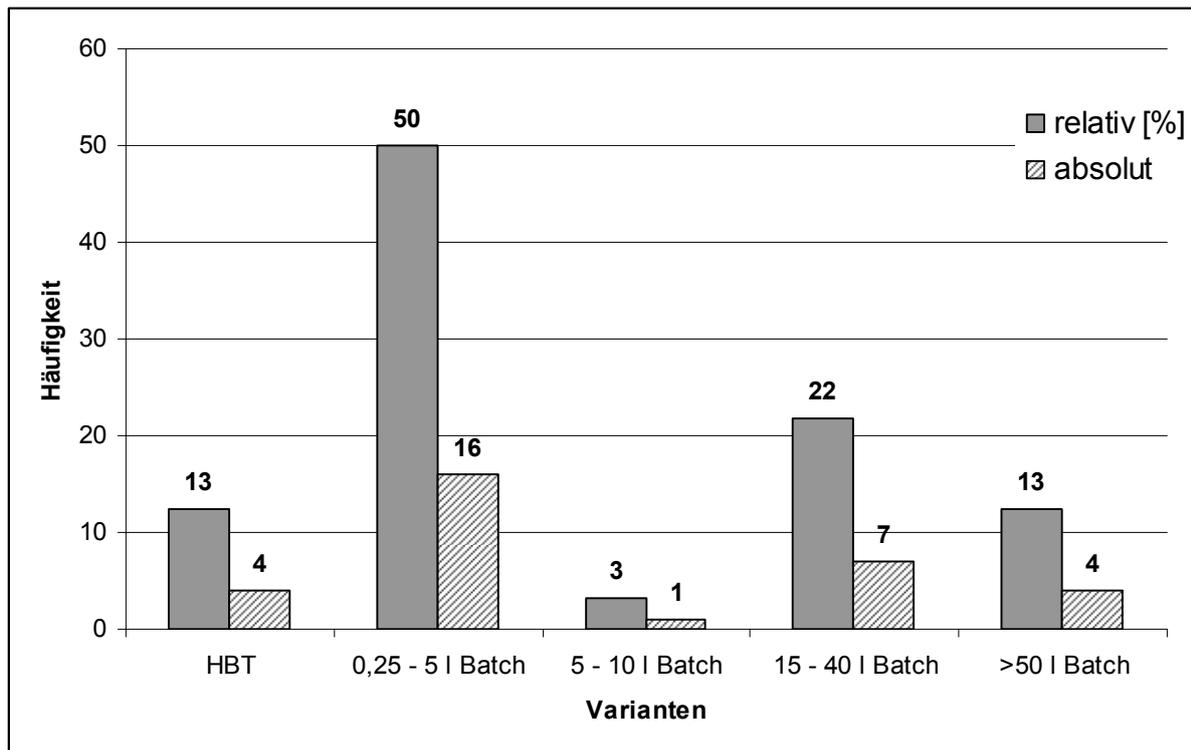


Abb. 12: Verwendung des Impfschlammes (n=32) verändert nach SOLTAU (2008)

Der verwendete Impfschlamm stammt aus verschiedenen Quellen (Abb. 13). Knapp 50 % der Befragten verwenden Klärschlamm, gefolgt von knapp 25% der Befragten, die ihren Impfschlamm aus einer Biogasanlage beziehen. 14 % verwenden Impfschlamm aus vorangegangenen Batch-Versuchen.

Der Impfschlamm wird von 72 % der Labore vor dem Einsatz im Gärversuch nicht aufbereitet, in den anderen wird er gesiebt (18 %) bzw. zerkleinert und gesiebt (10 %), wobei bei den Siebungen vor allem Siebgrößen zwischen 1 und 5 mm verwendet werden.

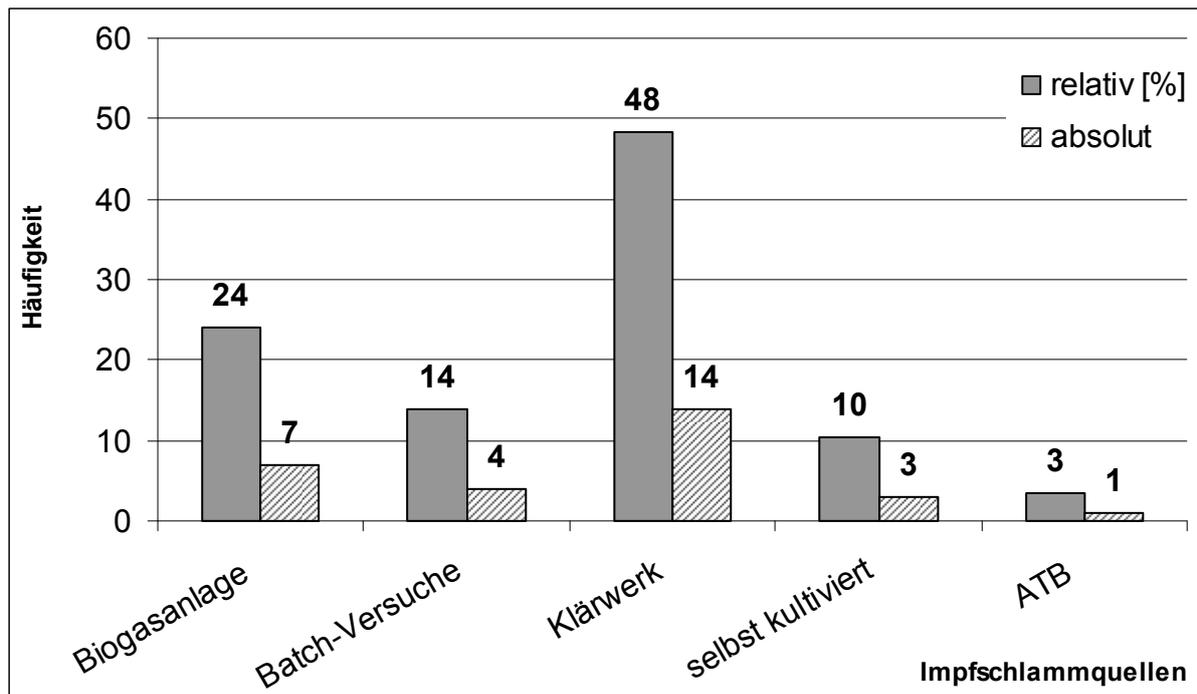


Abb. 13: Bezugsquellen für Impfschlamm verändert nach SOLTAU (2008) mit ATB: Bezug des Impfschlammes von der Agrartechnischen Forschung Bornim

Die Lagerung bis zum Versuchsansatz erfolgt überwiegend bei mesophilen Temperaturen im Thermoschrank oder Klimaraum. Während der Lagerung werden der pH-Wert sowie der TS- und oTS-Gehalt erfasst (Abb. 14).

Die TS-Gehalte der verwendeten Inokuli schwanken zwischen 1,8 % und 6% (Mittelwerte 3,3 %) und die oTS-Gehalte zwischen 40 % und 81 % (Mittelwert 61 %). Die Lagerzeit beträgt in 50 % der Fälle bis zu zwei Wochen bzw. der Impfschlammvorrat wird regelmäßig aufgefüllt (18 %). Teilweise erfolgt die Lagerung auch über mehrere Monate (9 %).

In zwei der befragten Einrichtungen wird das Inokulum selbst kultiviert, vier Labore lagern und füttern das Inokulum, wobei die Fütterungsintervalle von täglich bis zu alle vier Wochen reichen. Als Futterkomponenten werden pflanzliche Substrate, Flüssigmist (Rind/ Schwein) und selbst hergestellte Futtermischungen verwendet.

Hinsichtlich der Aktivität des Impfschlammes bewerteten 80 % der Labore diese als stabil.

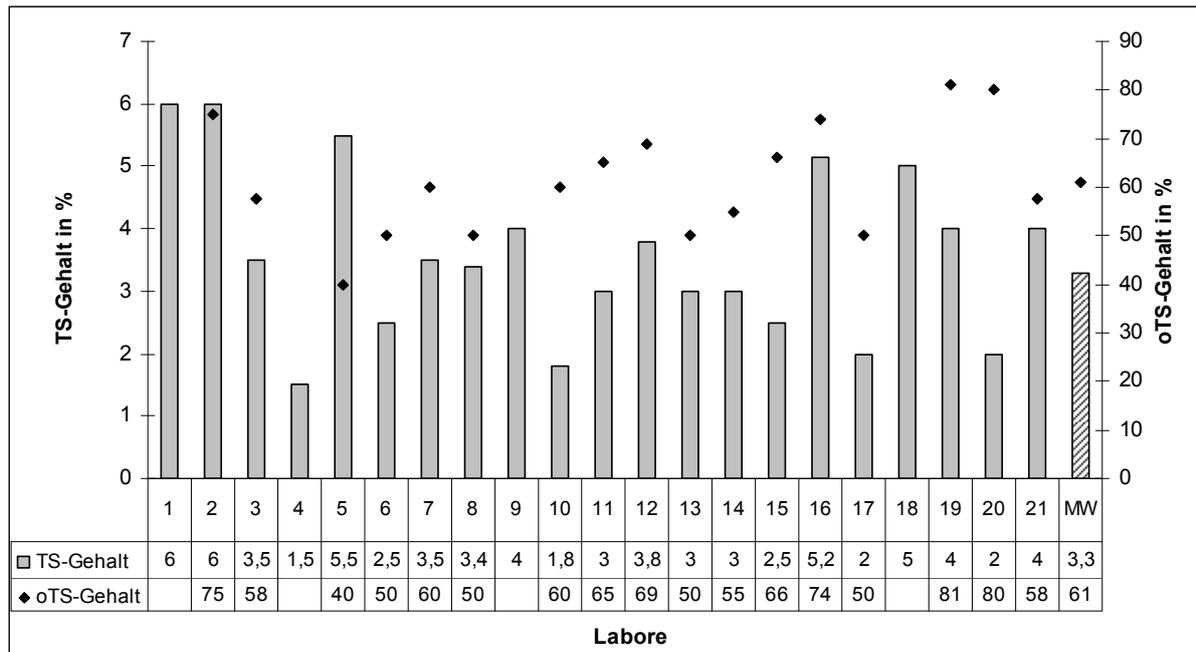


Abb. 14: TS- und oTS-Gehalt der in den befragten Laboren verwendeten Impfschlämme in % verändert nach SOLTAU (2008) mit MW: Mittelwert

Der Vorversuch für die Auswahl des eigenen Inokulums ergab, dass das Biogasfermentersubstrat im Vergleich zum Klärschlamm einen deutlich höheren TS und oTS-Gehalt sowie eine höhere Eigengasproduktion aufwies. Vor Versuchsansatz müsste Biogasfermentersubstrat weitaus aufwändiger aufbereitet und einer längeren Hungerphase unterzogen werden (SOLTAU, 2008). Deshalb wurde in der vorliegenden Untersuchung für alle diskontinuierlichen Gärversuche Klärschlamm als Inokulum ausgewählt.

5.1.2 Einfluss der Steckplatzverteilung im HBT

Die spezifische Methanproduktion der Cellulose liegt in diesem Versuch im Mittel bei $364 \text{ l}_N/\text{kg}_{\text{oTS}}$ (VK = 3%), die des Weizens bei $363 \text{ l}_N/\text{kg}_{\text{oTS}}$ (VK = 2 %). Eine Übersicht über die statistischen Kenngrößen findet sich im Anhang (Tab. A 8).

Um der Frage nachzugehen, ob die Position im Rotor einen Einfluss auf die spezifische Methanproduktion hat, wird deren zeitliche Entwicklung während des Versuchs in Abb. 15 für Cellulose und in Abb. 16 für Weizen aufgezeigt.

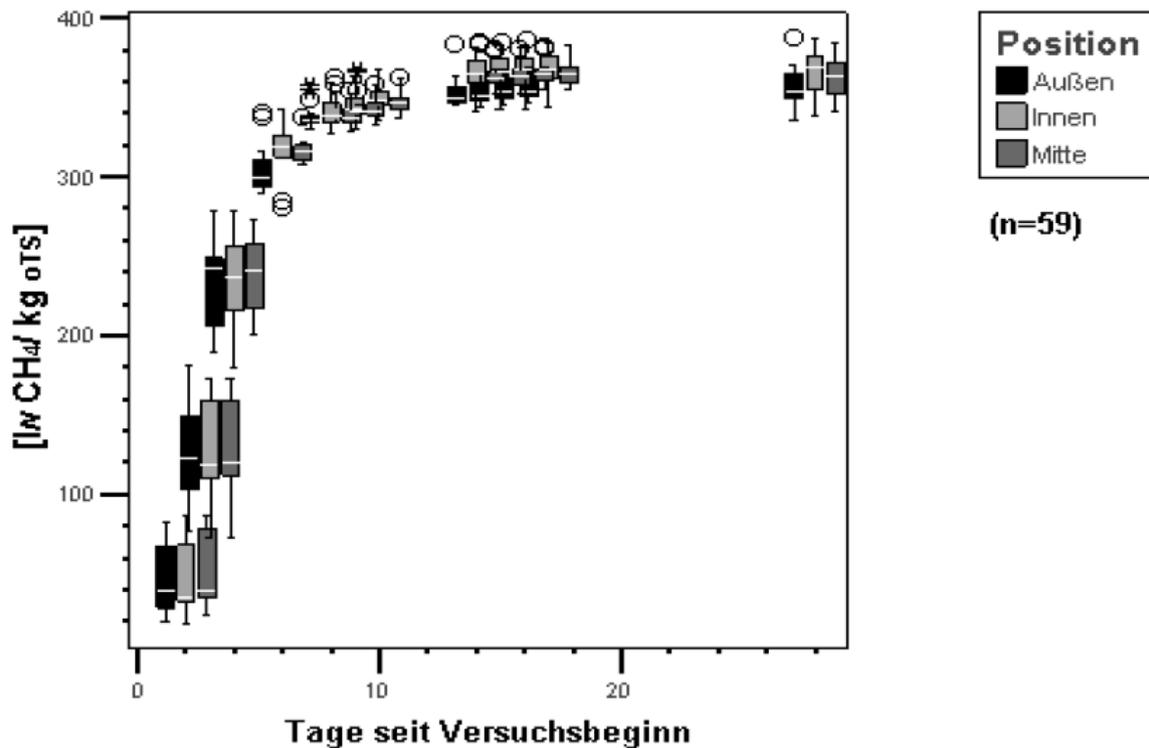


Abb. 15: Verlauf der substratspezifischen Methanproduktion der Cellulose als Boxplot über die Position im Rotor (STOFFERS, 2008)

Bei der Cellulose sind signifikante Unterschiede zwischen den Positionen nur an den Tagen 6 und 14 bis 17 festzustellen. An Tag 17 unterscheiden sich die Ergebnisse der äußeren Zone signifikant zu denen der inneren und mittleren Zone (Kruskal-Wallis-Test, Signifikanzniveau: $p = 0,01$). Zum Ende des Versuchs wird die Variation deutlich geringer, an Tag 28 sind keine signifikanten Unterschiede zwischen den Positionen festzustellen (STOFFERS, 2008).

Beim Weizen unterscheiden sich die Positionen „Innen“ und „Außen“ an den Tagen 2 bis 14 signifikant voneinander (Tag 2 bis 9: $p < 0,01$; Tag 14: $p = 0,03$). Bei einem Signifikanzniveau von $p = 0,05$ treten im gleichen Zeitraum signifikante Unterschiede zwischen den Positionen „Innen“ und „Mitte“ auf. Bei Versuche sind keine signifikanten Unterschiede zwischen den Positionen feststellbar (Kruskal-Wallis-Test).

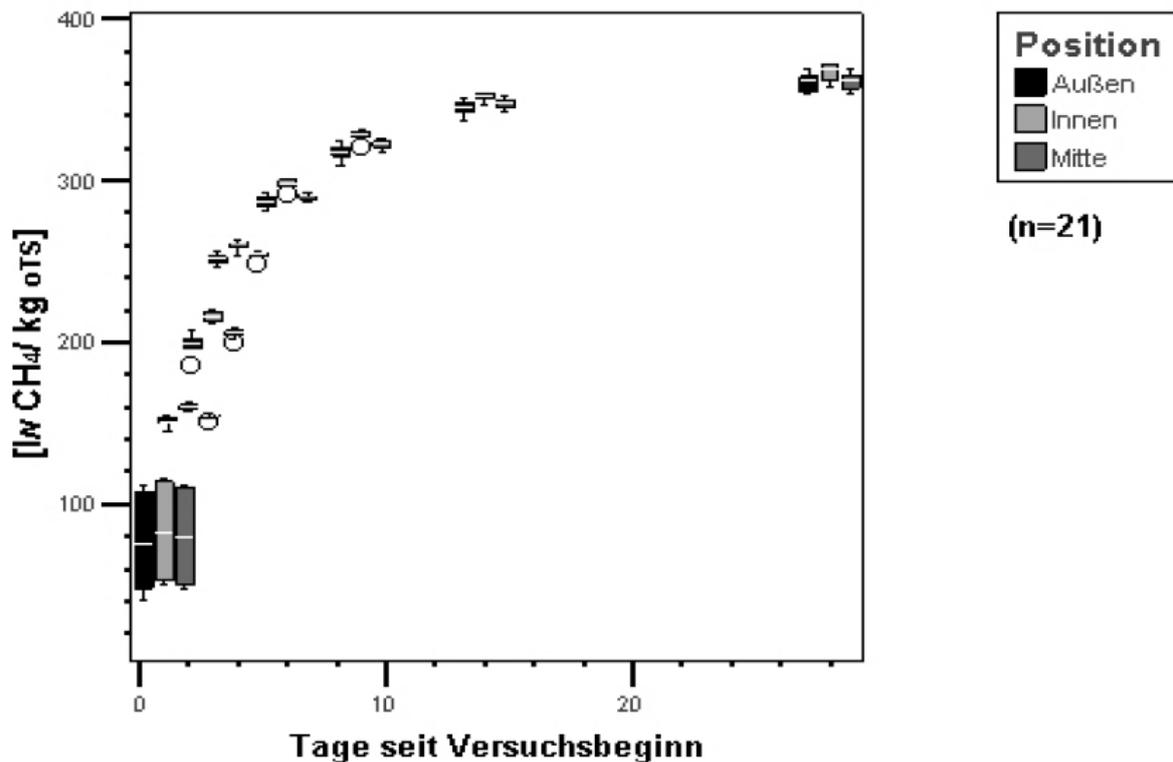


Abb. 16: Verlauf der substratspezifischen Methanproduktion des Weizens als Boxplot über die Position im Rotor (STOFFERS, 2008)

In Bezug auf die zweite Fragestellung des Versuches, ob Nachbareffekte auftreten, zeigen die Ergebnisse des Kruskal-Wallis-Tests keine signifikanten Unterschiede in der spezifischen Methanproduktion der Cellulose zwischen den Kolbenproben „mit Nachbarn“ und „ohne Nachbarn“ auf (STOFFERS, 2008).

Ein zweiter Versuch, der dazu dienen sollte, die Abläufe beim Ansetzen zu optimieren, weist für die spezifische Methanproduktion der Cellulose weitaus geringere Schwankungsbreiten auf (Abb. 17), der Mittelwert liegt in diesem Versuch bei 380 l_N/kg_{oTS} (Tab. 9). Die Verringerung des Variationskoeffizienten auf 1,7 % zeigt, dass die im Folgeversuch gewählte Vorgehensweise beim Ansetzen zu geringeren Schwankungen der Ergebnisse führt.

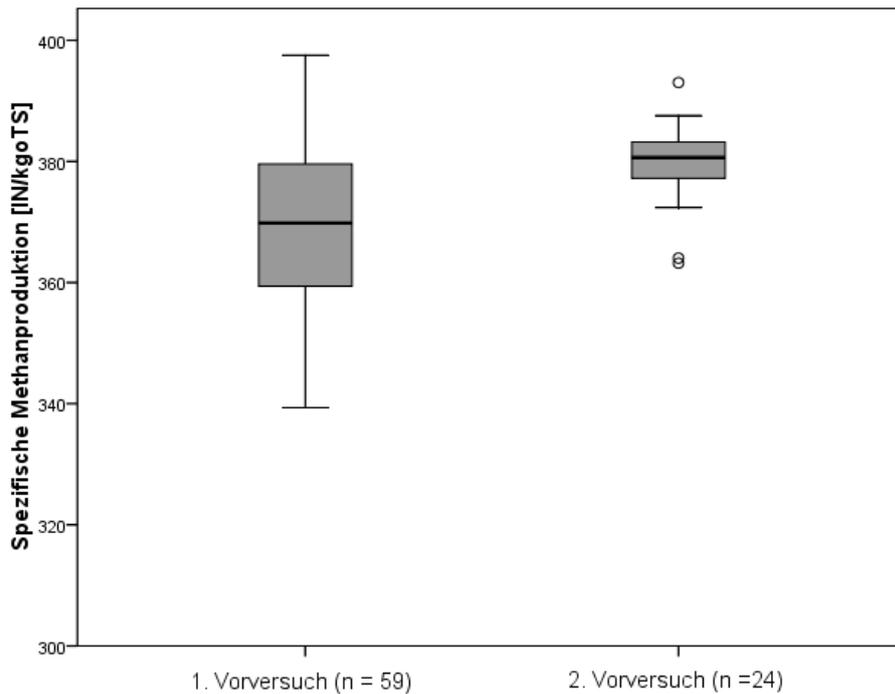


Abb. 17: Boxplot der spezifischen Methanproduktion der Cellulose aus den beiden Vorversuchen (STOFFERS, 2008)

Tab. 9: Statistische Kennzahlen zur spezifischen Methanproduktion von Cellulose aus dem 1. und 2. Vorversuch sowie aus allen folgenden HBT-Versuchen verändert nach STOFFERS (2008)

Spezifische Methanproduktion Cellulose	1. Vorversuch (n = 59)	2. Vorversuch (n = 24)	Alle folgenden Versuche (n = 56)
Mittelwert [l_N/kg_{oTS}]	369	380	386
Minimum [l_N/kg_{oTS}]	339	363	363
Maximum [l_N/kg_{oTS}]	398	393	405
Standardabweichung [l_N/kg_{oTS}]	15	7	9
Variationskoeffizient [%]	3,0	1,8	2,3

Die Vorgehensweise des zweiten Vorversuches, also das Füllen aller Kolbenprober bei Raumtemperatur, wurde nun für alle Versuche als Standard beibehalten. Dieses führte dazu, dass die Ergebnisstreuung (VK = 2,3 %) aller in Rahmen dieser Studie untersuchten Cellulose-Proben minimiert werden konnte (Abb. 18).

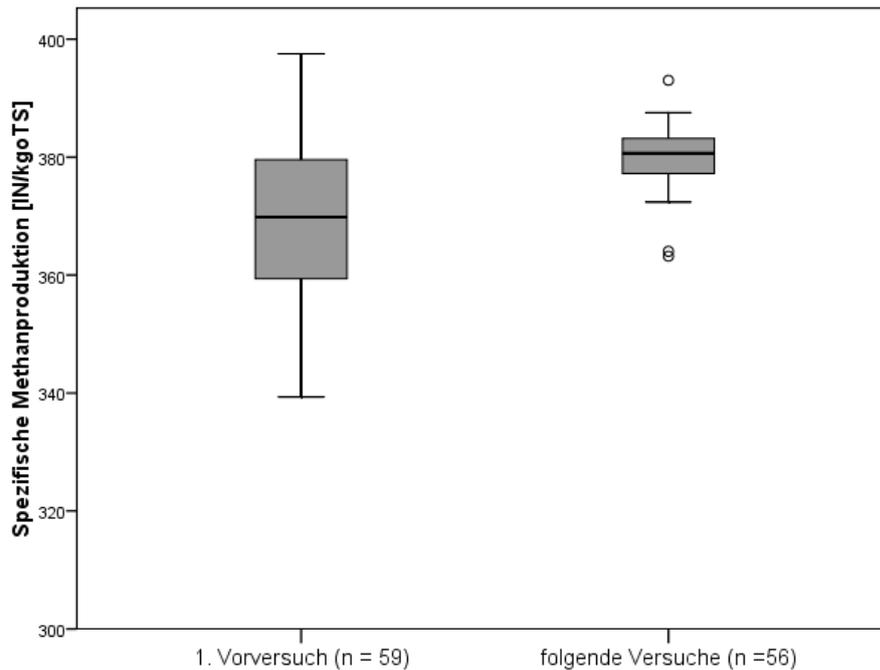


Abb. 18: Boxplot der spezifischen Methanproduktion der Cellulose aus dem 1. Vorversuch im Vergleich mit allen auf den 2. Vorversuch folgenden Versuchen

5.1.3 Siebung des Inokulums und Kopfraumkorrektur im Batch-Versuch

Um die Fragestellung nach dem Einfluss der Siebung / Maschenweite auf die Aktivität des Impfschlammes zu klären, wurden für die Nullproben das kumulierte Norm- und Methannormvolumen zur Auswertung herangezogen, für die Celluloseproben die spezifische Biogas- und Methanproduktion. Sowohl für die Nullproben als auch für die Cellulose liegen für diese Zielgrößen Normalverteilungen vor, sowohl in der Grundgesamtheit als auch in den einzelnen Siebungsvarianten. Deshalb wurden die Post-Hoc-Mehrfachvergleiche nach Tukey und Bonferroni durchgeführt (vgl. Kapitel 4.7.3). Bei den Nullproben ergaben sich mit beiden Tests keine signifikanten Unterschiede zwischen den Siebungsvarianten. Auch bei Anwendung des Kruskal-Wallis-Tests unter der Annahme, die Daten seien wegen des geringen Stichprobenumfangs nicht normal verteilt, ergeben sich keine Unterschiede (OEVERDIECK, 2010).

Für die spezifische Biogasproduktion der Cellulose (Abb. 19) weisen beide Post-Hoc-Tests signifikante Unterschiede zwischen den Siebungsvarianten 3 und 5 mm nach, allerdings nicht zwischen den Siebungsvarianten 1 mm und 3mm bzw. 1 mm und

5 mm. Zum gleichen Ergebnis kommt der Kruskal-Wallis-Test unter der Annahme nicht normal verteilter Daten (OEVERDIECK, 2010). In Abb. 19 sind diese Verhältnisse grafisch dargestellt (spezifische Methanproduktion im Anhang Abb. A 3 und Abb. A 4, statistische Kennzahlen Tab. A 9). Auffällig ist die starke Streuung der Ergebnisse der 1 mm-Siebungsvariante.

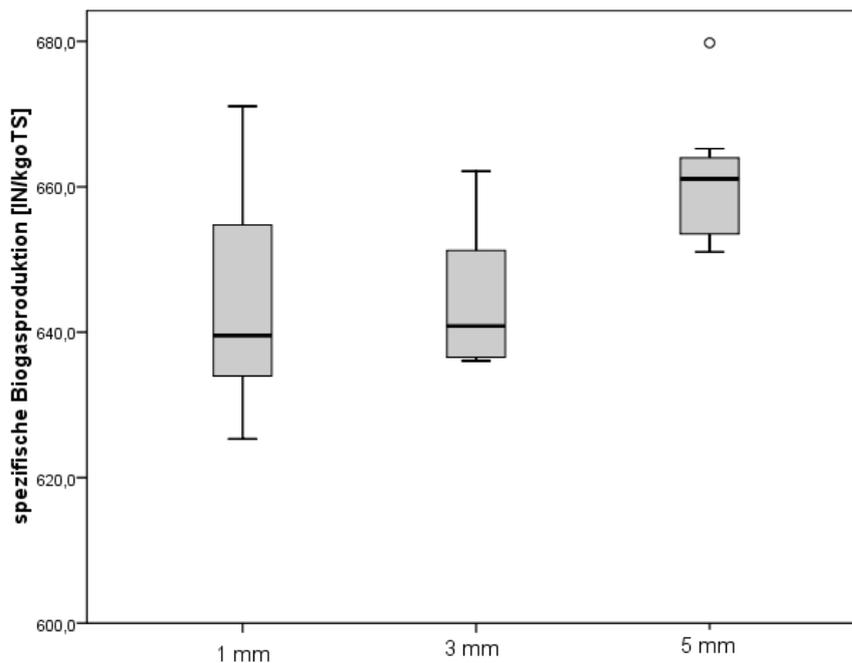


Abb. 19: Boxplot der spezifischen Biogasproduktion der Cellulose in Abhängigkeit von der Siebung verändert nach OEVERDIECK (2010)

Die VDI-Richtlinie 4630 (2006) legt in Bezug auf die Beurteilung der Aktivität des Impfschlammes fest, dass mindestens 80% der theoretischen Gasausbeute des Referenzsubstrates im Versuchsansatz erreicht werden müssen. Als theoretische Gasausbeute von mikrokristalliner Cellulose sind 740 bis 750 I_N/kg_{oTS} angegeben. Dieser Wert wird in allen Siebungsvarianten erreicht, wobei die 1 mm Variante durchschnittlich 87 % der theoretischen Gasausbeute erzielt, in der 3 mm Variante ist es 1 % weniger, die 5 mm Variante erzielt 2 % mehr. Somit sind die Vorgaben der Richtlinie erfüllt, der Impfschlamm ist als hinreichend aktiv anzusehen.

Zum Vergleich der Methoden zur Kopfraumkorrektur wird der Parameter spezifische Methanproduktion herangezogen, da dieser von der Kopfraumkorrektur beeinflusst wird (OEVERDIECK, 2010). Es existieren je Siebungsvariante zwei Datensätze, die durch Berechnung aus einem Messdatensatz hervorgegangen sind, es handelt sich

also um verbundene Stichproben (vgl. Kapitel 4.7.3). Einen Überblick über die Ergebnisse gibt Abb. 20.

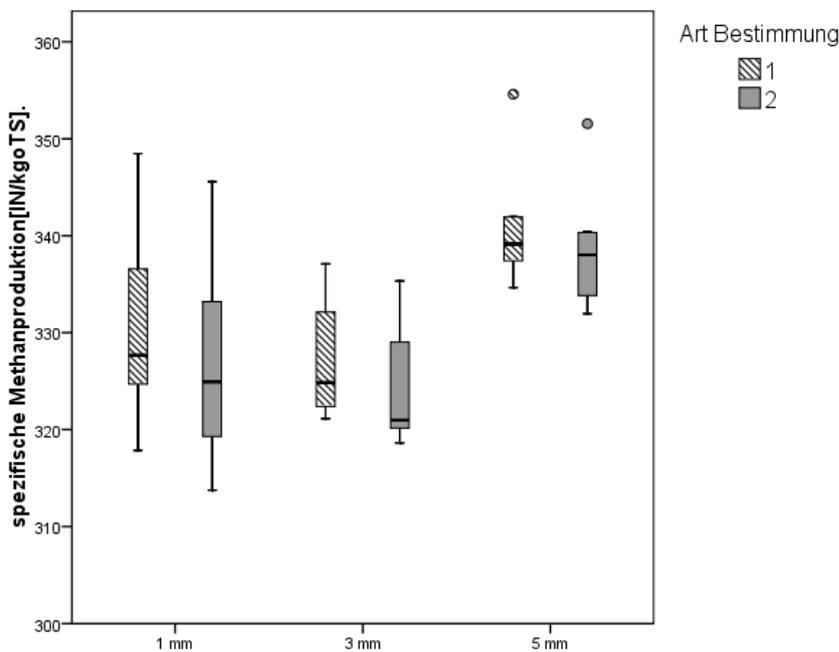


Abb. 20: Boxplot der spezifischen Methanproduktion der Cellulose in Abhängigkeit von der Kopfraumkorrektur verändert nach OEVERDIECK (2010) mit Art der Bestimmung 1: volumetrische Kopfraumkorrektur, 2: Korrektur über das CH₄/CO₂-Verhältnis

Der Signifikanztest nach Wilcoxon ergab signifikante Unterschiede ($p = 0,018$) bedingt durch die Art der Bestimmung der spezifischen Methanproduktion, der Test nach Friedman ($p = 0,008$) konstatierte sogar hoch signifikante Unterschiede (OEVERDIECK, 2010). Allerdings handelt es sich um sehr geringfügige Unterschiede, die Mittelwerte weichen lediglich um 3 bis 4 N/kg_{oTS} voneinander ab, was einer maximalen Abweichung von 1,2 % entspricht.

5.1.4 Fehlerbetrachtung

Die Fehlerbetrachtung wird anhand der verwendeten Geräte und deren Messfehler (vgl. Kapitel 4.6.3.4) durchgeführt, wobei zunächst die Auswirkung auf die Größe betrachtet wird, die direkt durch den Messfehler betroffen ist, sowie die Auswirkungen auf die Gaserträge in den Gärversuchen. Allerdings wird jeder

Messgerätefehler für sich betrachtet mit Ausnahme der Fehler der Gasanalysegeräte beim Batch-Versuch. Für jede Messung wird der maximal mögliche Fehler angenommen.

Die **Präzisionswaage Kern PLS 510*3** hat einen Fehler von $\pm 0,002$ g. Zur Bestimmung der Trockensubstanz und organischen Trockensubstanz werden drei bzw. vier Wägungen der Glühschüsseln durchgeführt. Wenn bei jedem Wiegevorgang der gleiche Fehler auftritt, hat dieses keine Auswirkungen auf den TS- und den oTS-Gehalt der Probe. Treten unterschiedliche Fehler bei den Wiegungen auf, hat das bei Klärschlammproben eine relative Abweichung von 0,5 % bei TS und oTS zur Folge, bei pflanzlichen Substraten beträgt die relative Abweichung lediglich 0,1 %. Auf den Gasertrag wirken sich jedoch nur die Fehler der pflanzlichen Substrate aus, die Abweichungen betragen $\pm 0,2\%$ des spezifischen Biogas- und Methanertrages. Die Waage wird ebenfalls benutzt, um die Schlammeinwaage im HBT zu bestimmen (zwei Wägungen). Hier haben die geringen Wiegefehler jedoch keine Auswirkung auf den Gasertrag. Außerdem kommt die Waage bei der Bestimmung der Einwaage des Substrats im Batch-Versuch zum Einsatz. Die Auswirkungen auf den Gasertrag sind mit maximal 0,1% ebenfalls sehr gering, sind jedoch bei Cellulose größer als bei pflanzlichen Substraten.

Die **Analysenwaage Kern ALJ 160M** hat einen Fehler von $\pm 0,0002$ g. Sie wird zur Bestimmung der Substrateinwaage im HBT benutzt. Auch hier ist die Auswirkung auf den Gasertrag mit maximal 0,1 % bei Cellulose als gering zu bezeichnen (noch geringere Auswirkungen bei pflanzlichen Substraten).

Die **Sartorius-Waage I 24000P** hat einen Fehler von ± 1 g und wird zur Bestimmung der Schlammeinwaage im Batch genutzt. Hierfür werden pro Fermenter zwei Wägungen durchgeführt, ein maximaler Fehler von ± 2 g tritt dann auf, wenn die Fehler bei diesen Wägungen in verschiedene Richtungen gehen (einmal wird zu viel, einmal zu wenig angezeigt). Dieser Fehler wirkt sich jedoch nur geringfügig (0,2 %) auf die Gaserträge aus.

Die **Temperatursensoren** der Raumwetterstation und des HBT-Trockenschrankes haben jeweils einen Fehler von ± 1 °C. Ihre Auswirkungen auf den Gärprozess

können zahlenmäßig nicht erfasst werden, jedoch ist trotz allem ein mesophiler Temperaturbereich gewährleistet. Fehler in der Temperaturmessung wirken sich aber auch auf die Biogas- und Methanerträge aus. Im HBT wird zur Berechnung des Normgasvolumens und des Normmethanvolumens davon ausgegangen, dass die Temperatur des Biogases im Kolben der Prozesstemperatur von 38 °C entspricht. Die Fehler der Temperatursensoren haben eine Über- bzw. Unterschätzung des Biogasertrages um ca. 1 % zur Folge, wohingegen es durch eine leichte Abkühlung des Gases (-2 °C) während eines Analyseprozesses zu einer Unterschätzung des Biogasertrages um maximal 2 % kommt. Die Methanproduktion wird durch Temperaturmessfehler um 0,5 % über- bzw. unterschätzt, eine Abkühlung auf 36 °C hat eine Unterschätzung um 1 % zur Folge.

Im Batch-Versuch wird davon ausgegangen, dass die Temperatur des Biogases der Raumtemperatur entspricht. Hier kommt es bei Fehlern in der Temperaturmessung zu Abweichungen von 1,3 % in der Biogasproduktion und von 0,8 % in der Methanproduktion.

Die **Wetterstation** hat hinsichtlich des **Luftdrucks** einen Fehler von ± 3 hPa. Der Luftdruck geht ebenfalls in die Berechnung der Normvolumina der Gase ein. Beim HBT ruft dieser Messfehler Abweichungen von 0,4% bei der Biogas- und Methanproduktion hervor. Da im Batch-Versuch mehr Messereignisse stattfinden, sind die Abweichungen der Gaserträge mit ca. 0,7 % etwas größer.

Weitaus größere Abweichungen werden von Fehlern der **Gasanalysegeräte** verursacht. Beide Gasanalysegeräte haben einen Fehler von ± 2 %. Im HBT wird lediglich der Methangehalt des Biogases bestimmt. Messfehler können hier zu Abweichungen von bis zu 5 % in der Methanproduktion führen. Im Batch-Versuch ist die Situation etwas komplizierter. Wird die Kopfraumkorrektur (vgl. Kapitel 4.7.2) mit der volumetrischen Methode durchgeführt, beeinflussen ebenfalls nur die Fehler des Methananalysegerätes die Methanproduktion, Abweichungen von bis zu 5 % sind möglich. Bei der Kopfraumkorrektur über das Verhältnis der Gase sind verschiedene Szenarien denkbar:

- a) maximaler Fehler beim Methananalysegerät, Kohlendioxidmessung ist korrekt;
- b) maximaler Fehler beim Kohlendioxidanalysegerät, Methanmessung ist korrekt;

- c) beide Analysegeräte haben den gleichen Fehler und zwar in die gleiche Richtung und
- d) maximaler Fehler bei beiden Analysegeräten, wobei die Fehler in verschiedene Richtungen gehen.

Hinsichtlich der Beeinflussung der Methanproduktion stellt Szenario c) den besten Fall dar, die Abweichungen betragen 1 %, die höchsten Abweichungen treten im Fall d) mit bis zu 6 % auf.

Auch Fehler in der **Volumenmessung** wirken sich stärker auf die Biogas- und Methanproduktion aus, wobei menschliches Versagen nicht mit in die Überlegungen eingeht. Im HBT wurde absprachegemäß (vgl. Kapitel 4.6.3.4) immer der kleinere Wert auf 1 ml genau abgelesen, wenn sich der Eichstrich zwischen zwei Skalenteilen befand. Dieses Vorgehen dient der Fehlerminimierung, es kann pro Gasanalyse von einem maximalen Fehler von 1 ml hinsichtlich des Volumens ausgegangen werden. Die Biogas- und Methanproduktion zeigen in diesem Fall Abweichungen von bis zu 4 %.

Beim Batch sind Ablesefehler von maximal ± 2 ml möglich, wenn der ungünstigste Fall betrachtet wird. Dieser sehe beispielsweise so aus, dass beim Ablesen der Nullmarke 1 ml zu wenig und beim nächsten Ablesen des gebildeten Gases 1 ml zu viel abgelesen worden wäre. Dieses hätte Abweichungen von bis zu 2 % im Biogas- und Methanertrag zur Folge.

5.2 Substratcharakterisierung

Substrate, die mit dem Hohenheimer Biogasertragstest auf ihr Gasbildungspotential hin untersucht wurden, wurden direkt im Anschluss an die Probenahme getrocknet (58°C) und vermahlen. An diesem Material wurden die Inhaltsstoffanalysen durchgeführt (vgl. Kapitel 4.3.2). Die Ergebnisse dieser an den Frischsubstraten durchgeführten Analysen finden sich im Kapitel 5.2.1 (5.2.1.1 bis 5.2.1.3).

Substrate, die in der Batch-Anlage auf das Gasbildungspotential hin untersucht wurden, kamen einerseits frisch und andererseits siliert zum Einsatz (vgl. Kapitel 4.3.1.2). Dieses erfordert sowohl Untersuchungen am Ausgangsmaterial, um die Silierfähigkeit festzustellen, als auch Untersuchungen der Silagen in Bezug auf die

Gärqualität. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen finden sich im Kapitel 5.2.2 (5.2.2.1 bis 5.2.2.2).

5.2.1 Frischsubstrate

Die pflanzlichen Biogassubstrate Weizen, Mais und Deutsches Weidelgras, die als Ganzpflanzen für die Gärversuche herangezogen wurden, sind zum einen über ihren Gehalt an Trockensubstanz und Rohnährstoffen charakterisiert, zum anderen über ihren Trockenmasse-Ertrag. Die Tabellen und Abbildungen in den folgenden Kapiteln 5.2.1.1 bis 5.2.1.3 geben Auskunft über die Mittelwerte dieser Parameter über beide Anbaujahre der mineralisch gedüngten Varianten. Nähere Informationen zu den einzelnen Anbaujahren und zu den mit Gärrest gedüngten Varianten finden sich im Anhang (Tab. A 10 bis Tab. A 24).

5.2.1.1 Substratcharakterisierung Weizen

Eine Steigerung der Stickstoff-Düngeintensität hat nach Tab. 10 in den einzelnen Ertestadien eine Abnahme der Trockensubstanz (TS¹) zur Folge, der Gehalt an Restfeuchte und organischer Trockensubstanz in dem bei 58 °C getrocknetem Material bleibt gleich, ebenso wie der Anteil des Rohfetts. Ein positiver Einfluss auf den Gehalt an Rohprotein ist zu erkennen, wobei dieser sich pro Düngestufe um jeweils ca. 2 % erhöht. Die 4. Düngestufe stellt hier eine Ausnahme dar, im Vergleich zur 240 kgN/ha - Düngung sind nur geringe Zunahmen an Rohprotein zu verzeichnen. Auf den Gehalt an stickstofffreien Extraktstoffen hat die Erhöhung der Düngeintensität mehrheitlich einen negativen Einfluss, wobei dieser in den früheren Entwicklungsstadien EC 69 und EC 73 am ausgeprägtesten ist. Der Rohfasergehalt verändert sich nur geringfügig ohne erkennbare Tendenzen.

Besonders deutlich ist der positive Einfluss der Düngung auf die Entwicklung des Trockenmasse-Ertrages (TM-Ertrag¹) zu erkennen, wobei eine Steigerung der Düngeintensität von 240 kgN/ha auf 360 kgN/ha nur einen geringen (EC 73, EC 85) Ertragszuwachs bzw. einen Ertragsverringerng (EC 69, EC77) nach sich zieht. Deutlich geringer fallen die auf der größeren Fläche basierenden TM-Erträge² aus,

allerdings ist hier auch bei der 4. Dünge­stufe noch ein Ertragszuwachs zu beobachten.

Tab. 10: Weizen, Düngerart Kas, beide Versuchsjahre - Inhaltsstoffe und Trockenmasseertrag

mit TS¹): Trockensubstanz bestimmt durch Trocknung der FM bei 58°C, TS²): Trockensubstanz bestimmt durch Trocknung der vorgetrockneten, gemahlene­n Substrate bei 105°C, oTS: organische Trockensubstanz, XL: Rohfett, XP: Rohprotein, NfE: Stickstofffreie Extraktstoffe, XF: Rohfaser, TM-Ertrag¹): Berechnung basiert auf manueller Beprobung und Trocknung bei 58°C, TM-Ertrag²): Berechnung basiert auf maschineller Beprobung und Trocknung bei 58°C

EC	[kgN/ha] Stufe	[% FM] TS ¹)	[%TS ¹] TS ²)	[% TS ²]					[g/m ²]	
				oTS	XL	XP	NfE	XF	TM-Ertrag ¹)	TM-Ertrag ²)
69	0	32,9	97,6	95,3	1,1	6,5	64,4	23,3	770	
	120	32,8	96,9	95,9	1,1	8,2	61,5	24,8	1281	
	240	29,8	97,1	95,0	1,2	10,1	59,4	24,7	1479	
	360	28,6	97,2	94,8	1,2	11,2	58,3	24,4	1436	
73	0	35,2	97,3	95,8	1,2	6,6	65,8	22,1	792	
	120	33,9	97,1	96,3	1,2	8,5	63,7	22,7	1316	
	240	31,9	97,0	96,1	1,5	10,2	62,6	21,6	1594	
	360	31,5	96,9	95,2	1,5	10,4	61,6	22,0	1598	
77	0	37,3	97,2	95,9	1,3	6,5	66,5	21,2	866	
	120	37,6	96,9	96,3	1,4	8,4	65,6	20,9	1426	
	240	34,4	97,0	96,1	1,4	9,4	66,1	19,4	1740	
	360	34,1	96,5	95,7	1,4	10,1	64,3	20,0	1693	
85	0	43,6	97,3	95,9	1,6	6,5	67,0	20,4	1005	640
	120	42,5	96,9	96,7	1,8	8,2	67,2	19,4	1545	1032
	240	42,0	97,0	96,3	1,7	8,5	68,6	17,8	2035	1289
	360	41,6	97,0	96,1	1,6	8,8	63,5	21,7	2058	1337

Hinsichtlich des Einflusses des Erntetermins auf den Trockensubstanzgehalt entsprechen die Beobachtungen den Erwartungen: ein höheres Entwicklungsstadium und damit einhergehend ein höherer Abreifegrad hat höhere Trockensubstanzgehalte zur Folge. Der Gehalt an organischer Trockensubstanz und Rohfett bleibt annähernd gleich. Ebenso verhält es sich mit dem Rohproteingehalt bei der Kontroll- und 120 kgN/ha - Variante, bei den höheren Dünge­stufen sinkt dieser mit voranschreitender Entwicklung. Der Erntetermin hat einen positiven Einfluss auf den Anteil der stickstofffreien Extraktstoffe (Ausnahme 360 kgN/ha EC 85), parallel dazu nimmt der Rohfasergehalt ab (Ausnahme 360 kgN/ha EC 85). Der Trockenmasseertrag nimmt erwartungsgemäß im Laufe der Entwicklung zu.

Die Aussagen zum Einfluss der Stickstoff-Düngeintensität und des Erntetermins treffen ebenfalls auf die mit Gärrest gedüngten Varianten zu, wobei zum Trockenmasseertrag lediglich Werte zur Haupternte vorliegen. Es werden geringere Erträge als bei den mineralisch gedüngten Varianten erzielt.

Abb. 21 veranschaulicht beispielhaft die Inhaltsstoffzusammensetzung und den TM-Ertrag der 240 kgN/ha Variante über den Entwicklungsverlauf im Vergleich mit Werten aus einer Futterwerttabelle (DLG, 1997), wobei in dieser nicht zu allen untersuchten EC-Stadien Werte angegeben sind.

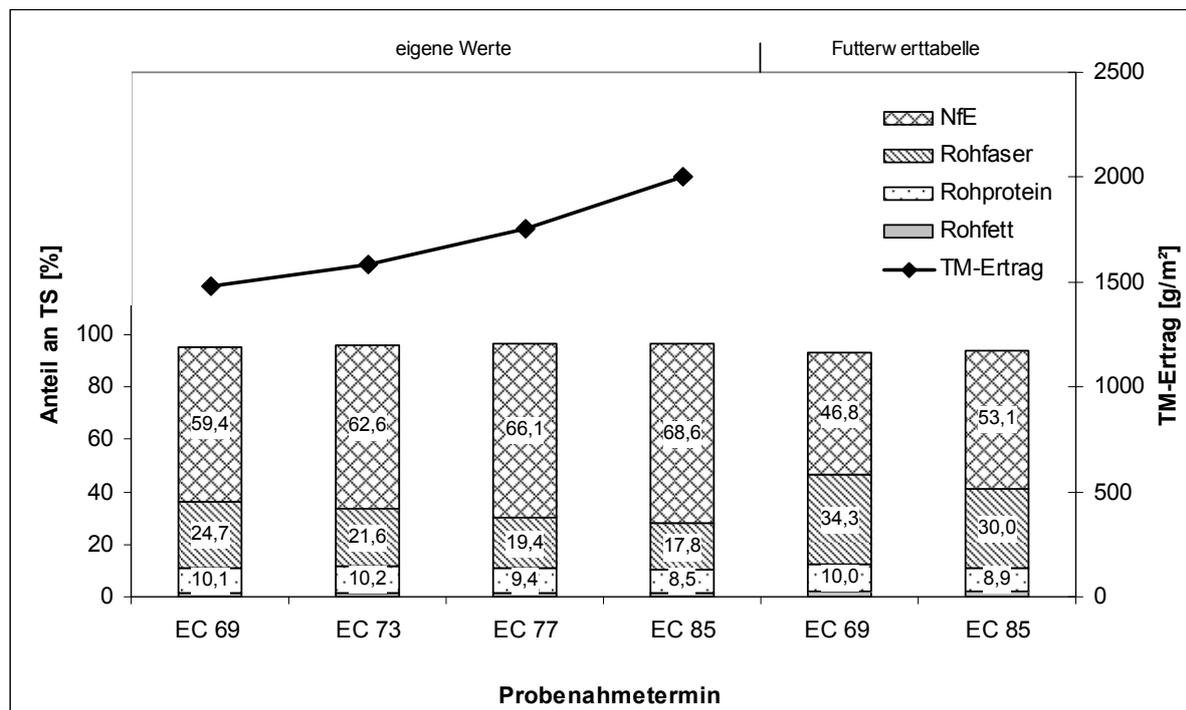


Abb. 21: Weizen, Düngerart Kas, 240 kgN/ha, Inhaltsstoffe und Trockenmasseertrag im Vergleich mit Angaben aus einer Futterwerttabelle (DLG, 1997)

mit NfE: Stickstofffreie Extraktstoffe, TM-Ertrag: Trockenmasseertrag

Der über die Entwicklung gleich bleibende geringe Rohfettgehalt und die leichte Abnahme des Rohproteingehalts von 10,1 % auf 8,5 % entsprechen den Angaben der Futterwerttabelle (DLG, 1997). Das Verhältnis zwischen stickstofffreien Extraktstoffen und Rohfaser ist in den untersuchten Substraten im Vergleich mit den Angaben der Futterwerttabelle deutlich zu Gunsten der stickstofffreien Extraktstoffe verschoben, wobei der positive Trend bei diesen und der negative Trend bei den Rohfasergehalten bestätigt wird.

5.2.1.2 Substratcharakterisierung Mais

Mais wurde im Rahmen des Projektes zum einen in Monokultur (Mais 1) zum anderen in zwei verschiedenen Fruchtfolgen (Mais 2, Mais 3) angebaut (vgl. Kapitel 4.3), wobei nur die Ergebnisse zu Mais 1 in die vorliegende Arbeit eingehen. Um eine bessere Übersichtlichkeit zu gewährleisten, wird die Variante Mais 1 von nun an lediglich mit Mais angesprochen.

Eine Steigerung der Stickstoff-Düngeintensität zieht nach Tab. 11 in den einzelnen Erntestadien eine Abnahme der Trockensubstanz (TS¹) nach sich, wobei kaum Unterschiede zwischen den beiden hohen Düngestufen bestehen. Der Gehalt an Restfeuchte und organischer Trockensubstanz in dem bei 58 °C getrocknetem Material bleibt gleich, ebenso wie der Anteil des Rohfetts (Ausnahme T7, 240 kgN/ha). Ein positiver Einfluss auf den Gehalt an Rohprotein ist zu erkennen, wobei dieser sich pro Düngestufe um jeweils ca. 1 bis 2 % erhöht. Die 4. Düngestufe stellt hier eine Ausnahme dar, im Vergleich zur 240 kgN/ha - Düngung sind keine oder nur geringe Zunahmen an Rohprotein zu verzeichnen. Auf den Gehalt an stickstofffreien Extraktstoffen hat die Erhöhung der Düngeintensität im Termin T7 einen negativen Einfluss, wobei dieser mit der Erhöhung des Rohfasergehaltes einher geht. In den späteren Entwicklungsstadien zu den Terminen T8 und T9 zeichnen sich leicht abnehmende Tendenzen für den Gehalt an stickstofffreien Extraktstoffen ab, wobei die Unterschiede hauptsächlich zwischen der Kontrollvariante und gedüngten Varianten besteht. Der Rohfasergehalt in Termin T8 und T9 verändert sich durch Erhöhung der Düngeintensität nur geringfügig (Ausnahme T8, 120 kgN/ha).

Besonders deutlich ist der positive Einfluss der Düngung auf die Entwicklung des Trockenmasse-Ertrages (TM-Ertrag¹) zu erkennen, wobei eine Steigerung der Düngeintensität von 240 kgN/ha auf 360 kgN/ha nur einen geringen (T8) Ertragszuwachs bzw. eine Ertragsverringerung (T7, T9) nach sich zieht. Deutlich geringer fallen die auf der größeren Fläche basierenden TM-Erträge² aus, allerdings ist hier auch bei der 4. Düngestufe noch ein Ertragszuwachs zu beobachten.

Tab. 11: Mais, Düngerart Kas, beide Versuchsjahre - Inhaltsstoffe und Trockenmasseertrag
 mit TS¹⁾: Trockensubstanz bestimmt durch Trocknung der FM bei 58°C,
 TS²⁾: Trockensubstanz bestimmt durch Trocknung der vorgetrockneten,
 gemahlene Substrate bei 105°C, oTS: organische Trockensubstanz, XL:
 Rohfett, XP: Rohprotein, NfE: Stickstofffreie Extraktstoffe, XF: Rohfaser,
 TM-Ertrag¹⁾: Berechnung basiert auf manueller Beprobung und Trocknung
 bei 58°C, TM-Ertrag²⁾: Berechnung basiert auf maschineller Beprobung
 und Trocknung bei 58°C

T	[kgN/ha]	[% FM] TS ¹⁾	[%TS ¹⁾] TS ²⁾	[% TS ²⁾]					[g/m ²]	
	Stufe			oTS	XL	XP	NfE	XF	TM- Ertrag ¹⁾	TM- Ertrag ²⁾
7	0	19,4	94,6	95,2	0,8	4,4	61,5	27,8	1059	
	120	19,1	95,4	95,7	0,9	7,3	57,6	29,2	1435	
	240	18,1	95,7	95,0	2,7	9,5	52,0	30,1	1508	
	360	17,9	96,1	94,9	0,8	9,6	51,8	32,2	1486	
8	0	25,0	95,7	95,4	1,5	4,6	67,0	22,5	1364	
	120	24,8	96,3	96,0	1,5	6,4	61,9	26,1	1931	
	240	23,5	96,5	95,9	1,8	7,8	63,6	22,9	1955	
	360	23,7	96,5	95,8	1,7	8,1	62,4	23,8	1991	
9	0	28,7	97,0	96,2	2,4	5,0	68,5	20,2	1385	1134
	120	30,6	97,2	96,6	2,6	6,8	66,8	20,5	1997	1567
	240	29,9	96,9	96,6	2,6	7,7	67,7	18,7	2264	1757
	360	30,3	97,2	96,5	2,6	7,5	66,5	19,9	2241	1838

Hinsichtlich des Einflusses des Erntetermins auf den Trockensubstanzgehalt entsprechen die Beobachtungen den Erwartungen: ein späterer Erntetermin und damit einhergehend ein höherer Abreifeegrad hat höhere Trockensubstanzgehalte zur Folge. Der Gehalt an organischer Trockensubstanz und Rohfett steigt minimal an. Ebenso verhält es sich mit dem Rohproteingehalt bei der Kontrollvariante, bei den gedüngten Varianten sinkt dieser mit voranschreitender Entwicklung geringfügig. Der Erntetermin hat einen positiven Einfluss auf den Anteil der stickstofffreien Extraktstoffe, parallel dazu nimmt der Rohfasergehalt ab. Der Trockenmasseertrag nimmt erwartungsgemäß im Laufe der Entwicklung zu, wobei die Trockenmassezuwüchse bei den nicht bzw. gering gedüngten Varianten zwischen den Termine T8 und T9 nur noch gering sind.

Die Aussagen zum Einfluss der Stickstoff-Düngeintensität und des Erntetermins treffen ebenfalls auf die mit Gärrest gedüngten Varianten zu, wobei zum Trockenmasseertrag lediglich Werte zur Haupternte vorliegen. Im Handernteverfahren (kleiner Flächenbezug) werden geringere Erträge als bei den mineralisch gedüngten Varianten erzielt, bei größerem Flächenbezug etwas höhere.

Abb. 22 veranschaulicht beispielhaft die Inhaltsstoffzusammensetzung und den TM-Ertrag der 240 kgN/ha Variante über die Erntetermine im Vergleich mit Werten aus einer Futterwerttabelle (DLG, 1997), wobei in dieser nur für die späteren Entwicklungsstadien, die den beiden letzten Ernteterminen entsprechen, Werte angegeben sind.

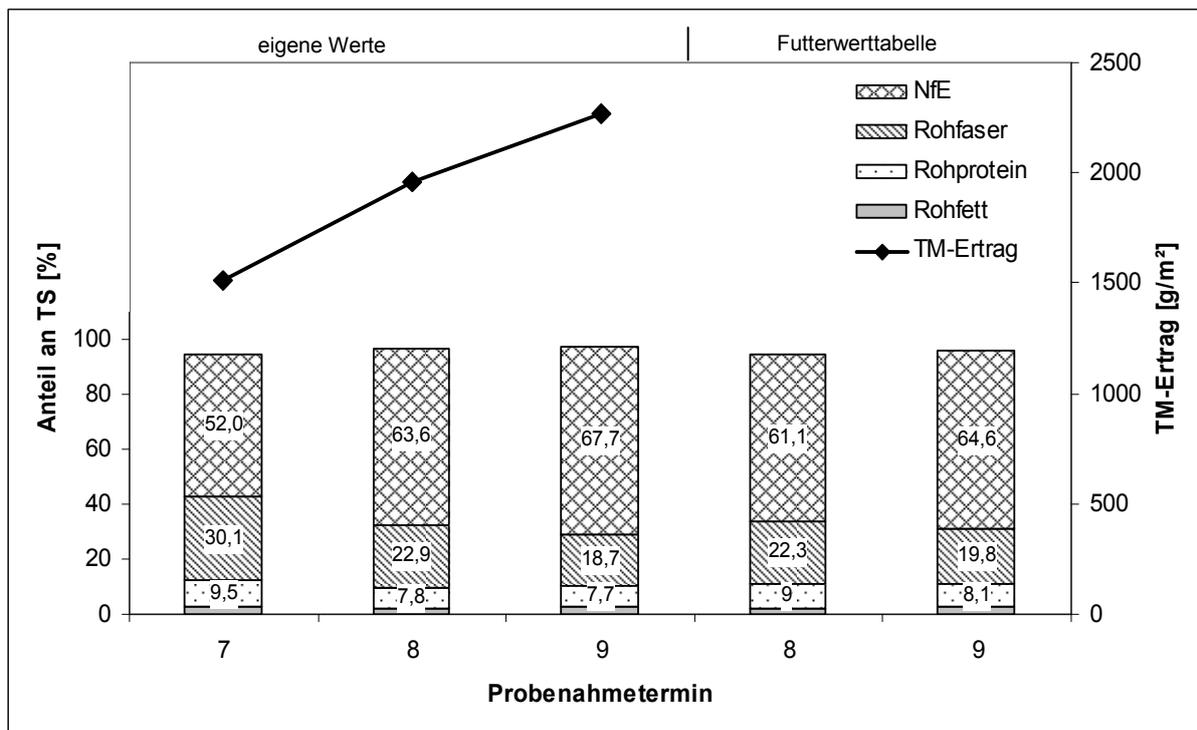


Abb. 22: Mais, Düngerart Kas, 240 kgN/ha, Inhaltsstoffe und Trockenmasseertrag im Vergleich mit Angaben aus einer Futterwerttabelle (DLG, 1997) mit NfE: Stickstofffreie Extraktstoffe, TM-Ertrag: Trockenmasseertrag

Der über die Vegetationsentwicklung gleich bleibende geringe Rohfettgehalt und die leichte Abnahme des Rohproteingehalts von 9,5 % auf 7,7 % entsprechen den Angaben der Futterwerttabelle (DLG, 1997). Der Anteil der stickstofffreien Extraktstoffen und der Rohfaserfraktion ist in den untersuchten Substraten im Vergleich mit den Angaben der Futterwerttabelle geringfügig höher, wobei sich bei fortschreitender Entwicklung sowohl die steigende Tendenz bei den stickstofffreien Extraktstoffen als auch die abfallende Tendenz bei der Rohfaserfraktion in den Daten der Futterwerttabelle wiederfinden.

5.2.1.3 Substratcharakterisierung Deutsches Weidelgras

Das Deutsche Weidelgras wurde immer zu den Schnittzeitpunkten beprobt. Daraus resultieren im Jahresverlauf pro Variante vier Datensätze zur Zusammensetzung der Inhaltsstoffe und zum Trockenmasseertrag.

Die Grasbestände befanden sich zu den verschiedenen Schnittterminen in unterschiedlichen Entwicklungsstadien (Tab. 12). Zum ersten Schnitt in 2007 befand sich der Hauptteil des Bestandes bereits im Stadium des Ährenschiebens (sichtbar), ein geringerer Anteil lag in der Entwicklung etwas zurück (Ährenschieben nicht sichtbar). Im zweiten Versuchsjahr wurde der erste Schnitt in einem früheren Entwicklungsstadium (Ährenschieben nicht sichtbar) durchgeführt. Im zweiten Schnitt lagen noch inhomogenere Verhältnisse vor. Das Spektrum reichte hier von rein vegetativen Stadien bis hin zum Blühbeginn. Im dritten und vierten Schnitt traten nur noch rein vegetative Stadien auf (Tab. 12).

Tab. 12: Entwicklungsstadien des Deutschen Weidelgrases zu den Schnittterminen

Schnitt	2007	2008
1	- Verdickung der obersten Blattscheide, - Ährenschieben	- 3 oder weitere Halmverdickungen sind fühlbar, - Verdickung der obersten Blattscheide
2	- 2. verlängerte Blattscheide - 3. verlängerte Blattscheide - 3 oder weitere Halmverdickungen sind fühlbar, - Verdickung der obersten Blattscheide - Blühbeginn	- 2. verlängerte Blattscheide - 3. verlängerte Blattscheide - 3 oder weitere Halmverdickungen sind fühlbar, - Blühbeginn
3	- 2. verlängerte Blattscheide - 3. verlängerte Blattscheide	- 3. verlängerte Blattscheide
4	- 3. verlängerte Blattscheide	- 2. verlängerte Blattscheide - 3. verlängerte Blattscheide

Eine Steigerung der Stickstoff-Düngeintensität zieht nach Tab. 13 bei Betrachtung der einzelnen Schnitte eine Abnahme der Trockensubstanz (TS¹) nach sich, wobei keine oder nur geringe Unterschiede zwischen den beiden hohen Düngegraden bestehen. Der Gehalt an Restfeuchte und organischer Trockensubstanz in dem bei

58 °C getrocknetem Material bleibt annähernd gleich, ebenso wie der Anteil des Rohfetts. Ein positiver Einfluss auf den Gehalt an Rohprotein ist zu erkennen, Ausnahmen stellen im Schnitt 3 die 160 kgN/ha- Variante und im Schnitt 4 die 160 kgN/ha und 320 kgN/ha- Varianten dar. Damit einhergehend sinkt der Gehalt an stickstofffreien Extraktstoffen bis auf in den eben genannten Varianten. Hinsichtlich des Rohfasergehaltes sind keine klaren Tendenzen auszumachen.

Besonders deutlich ist der positive Einfluss der Düngung auf die Entwicklung des Trockenmasse-Ertrages (TM-Ertrag²⁾) zu erkennen, wobei eine Steigerung der Düngeintensität von 320 kgN/ha auf 480 kgN/ha nur einen geringen (T3, T4) Ertragszuwachs bzw. eine Ertragsverringering (T1, T2) nach sich zieht.

Tab. 13: Deutsches Weidelgras, Düngerart Kas, beide Versuchsjahre - Inhaltsstoffe und Trockenmasseertrag
mit TS¹⁾: Trockensubstanz bestimmt durch Trocknung der FM bei 58°C,
TS²⁾: Trockensubstanz bestimmt durch Trocknung der vorgetrockneten, gemahlene Substrate bei 105°C, oTS: organische Trockensubstanz, XL: Rohfett, XP: Rohprotein, NfE: Stickstofffreie Extraktstoffe, XF: Rohfaser, TM-Ertrag: Berechnung basiert auf maschineller Beprobung und Trocknung bei 58°C

T	[kgN/ha]	[% FM] TS ¹⁾	[%TS ¹⁾ TS ²⁾	[% TS ²⁾					[g/m ²] TM- Ertrag
	Stufe			oTS	XL	XP	NfE	XF	
1	0	26,1	96,6	92,8	2,0	10,9	60,5	19,6	173
	160	23,3	97,0	92,8	2,0	11,3	57,9	21,6	405
	320	20,5	96,7	91,7	2,4	14,9	51,3	23,2	523
	480	20,9	96,0	91,3	2,7	17,9	48,1	22,7	472
2	0	27,3	97,4	93,9	2,5	9,6	54,7	27,0	51
	160	20,8	97,5	91,9	3,4	15,1	48,4	25,0	235
	320	19,0	97,3	91,9	3,1	16,4	47,0	25,4	278
	480	19,0	97,1	91,3	3,0	20,2	42,8	25,3	266
3	0	20,1	97,4	90,5	3,8	14,7	47,9	24,0	34
	160	16,8	97,4	90,2	3,3	13,1	48,4	25,5	189
	320	14,1	97,2	90,2	3,7	18,2	41,7	26,5	295
	480	13,6	97,1	89,9	3,4	22,1	38,6	25,9	312
4	0	17,1	97,2	91,1	3,3	16,5	48,7	22,3	50
	160	18,0	97,3	91,5	2,9	12,0	51,1	25,5	76
	320	14,4	97,3	91,7	2,7	13,5	49,5	25,9	237
	480	12,8	97,1	91,7	3,0	17,9	44,9	25,6	266

In Bezug auf den Einfluss der Schnitttermine ist festzustellen, dass sowohl die Trockenmassegehalte (TS¹⁾) als auch die Trockenmasseerträge (TM²⁾) im ersten Schnitt am höchsten sind und dann mit jedem weiteren Schnitt abnehmen. Bei den

einzelnen Inhaltsstoffen liegen keine einheitlichen Tendenzen vor, jedoch ist der Anteil der stickstofffreien Extraktstoffe im ersten Schnitt am höchsten und der Anteil der Rohfaserfraktion am geringsten.

In Abb. 23 sind beispielhaft die Inhaltsstoffzusammensetzung und der TM-Ertrag der 320 kgN/ha Variante über die Schnitttermine im Vergleich mit Werten aus einer Futterwerttabelle (DLG, 1997) dargestellt. Hinsichtlich der generellen Mengenverteilungen bestätigen sich die eigenen Beobachtungen, der Anteil der stickstofffreien Extraktstoffe ist jedoch laut der Futterwerttabelle im dritten Schnitt am höchsten.

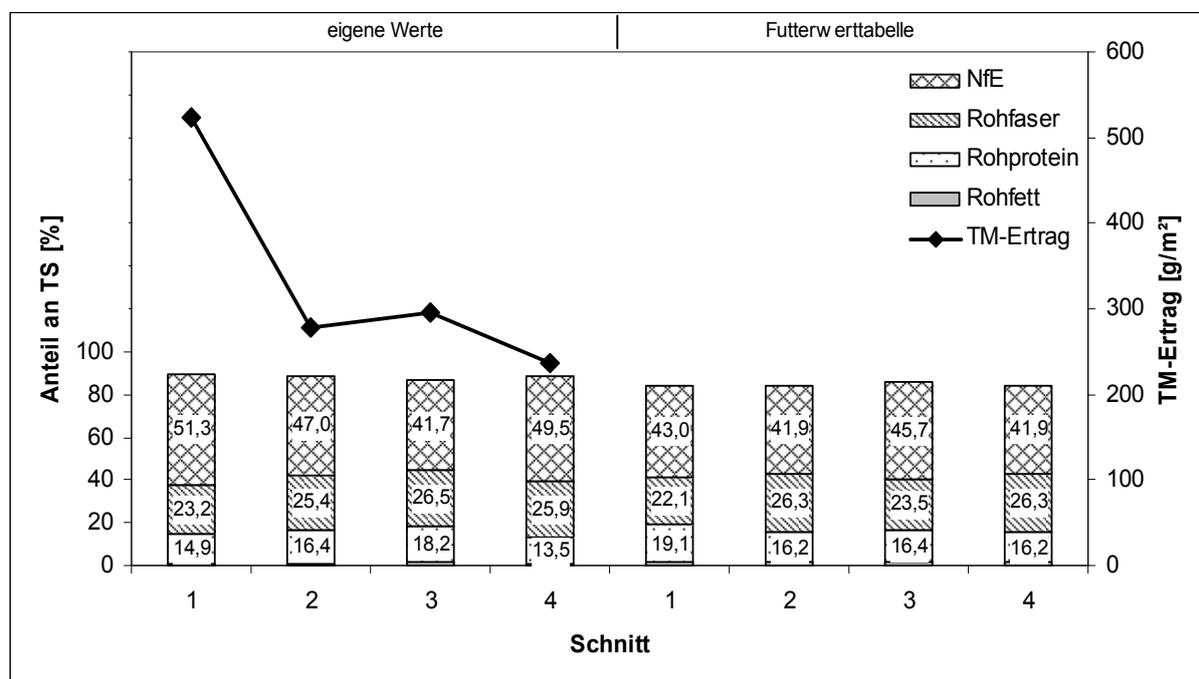


Abb. 23: Deutsches Weidelgras, Düngerart Kas, 320 kgN/ha, Inhaltsstoffe und Trockenmasseertrag im Vergleich mit Angaben aus einer Futterwerttabelle (DLG, 1997)

mit NfE: Stickstofffreie Extraktstoffe, TM-Ertrag: Trockenmasseertrag

5.2.2 Silagen

Wie bereits in Kapitel 5.2 erwähnt, wurden am Ausgangsmaterial, welches zur Herstellung der Silagen verwendet wurde, Untersuchungen bei der LUFA ITL Kiel durchgeführt, deren Ergebnisse Aufschluss über die Silierfähigkeit der Substrate geben können. Zu diesen Ausgangsuntersuchungen zählen die Bestimmung des

Trockensubstanzgehaltes, der Pufferkapazität, des Nitratgehaltes und des Anfangsbesatzes mit Milchsäurebakterien.

5.2.2.1 Weizen

Beim Weizen wurden ab dem Entwicklungsstadium EC 73 Silagen hergestellt. Die Ergebnisse der Silageausgangsuntersuchungen finden sich in Tabelle 14. Der Trockensubstanzgehalt der Ausgangsmaterialien liegt zwischen 32,4 und 43 %. Die Pufferkapazität liegt zwischen 1,7 bis 3,4 g Milchsäure/100g TM. Da Angaben zum Zuckergehalt des Ausgangsmaterials nicht vorliegen, kann der Vergärbarkeitskoeffizient nicht berechnet werden. Der Nitratgehalt ist bei allen Varianten sehr gering und liegt somit unterhalb des günstigen Nitratgehaltes von 1,3 bis 5,8 g NO₃ je kg Frischmasse (JÄNICKE, 2006). Der Anfangsbesatz mit Milchsäurebakterien weist große Unterschiede zwischen den Varianten auf. So sind bei der Kontrollvariante des EC 73 im Jahr 2007 in 1 g Frischsubstrat lediglich 37 koloniebildende Einheiten vorhanden. Dem stehen in der Kontrollvariante des EC 85 im gleichen Jahr 420.000 KbE/g Frischmasse gegenüber.

Tab. 14: Weizen, Ergebnisse der Silageausgangsuntersuchungen der LUFA ITL GmbH Kiel

EC	[kgN/ha] Stufe	Jahr	[% FM] TS	[g MS/100g TM] Pufferkapazität	[g/kg TS] Nitrat	[KbE/g FM] MSB
73	0	2007	37,2	2,0		37
		2008	34,3	2,3	0,2	1400
	240	2007	34,5	3,4	0,4	180
		2008	32,4	2,7	0,2	330
	360	2007	32,7	3,4	0,5	62
		2008	33,7	2,7	1,0	480
77	0	2007	38,7	2,6	0,1	1300
		2008	35,7	2,7		94000
	240	2007	36	3,6	0,7	16000
		2008	33,7	2,7	0,2	7200
	360	2007	33,9	3,4	0,3	17000
		2008	33,3	2,1	0,5	11000
85	0	2007	36,8	1,8	0,2	420000
		2008	43,2	1,7	0,1	550
	240	2007	35,8	2,4	0,3	55000
		2008	40	2,1	0,2	2400
	360	2007	31,4	2,4	0,3	43000
		2008	42	2,9	0,3	2100

In Tabelle 15 sind die Ergebnisse der Untersuchungen zur Gärqualität dargestellt. Auffällig ist die schlechte Silagequalität (Noten schlecht bis sehr schlecht) der frühen Erntestadien (EC 73 und 77) im Jahr 2007, die vor allem auf dem Vorhandensein von Buttersäure einhergehend mit pH-Werten größer als 4 beruht. Lediglich die Silagen des EC 85 sind als sehr gut zu bewerten. Um Fehlgärungen zu vermeiden, wurde im Jahr 2008 das Siliermittel Biosil (vgl. Kapitel 4.3.1.2) verwendet. Die Silagen aller Erntestadien weisen sehr gute Qualitäten mit pH-Werten unterhalb von 4,0 und dem Fehlen von Buttersäure auf. Der Essigsäuregehalt findet ebenfalls Eingang in die Bewertung, ist jedoch bei allen Varianten eher gering (0,2 bis 1,6 % der TS). Der Milchsäuregehalt wird nicht direkt in die Bewertung mit einbezogen. Bei vielen Varianten ist der Milchsäuregehalt der Silagen im Jahr 2008 größer als in 2007, was auf das Beimpfen mit aktiven Milchsäurebakterien zurückzuführen ist. Der Siliermitteleinsatz ist insgesamt als erfolgreich zu bezeichnen.

Tab. 15: Weizen, Ergebnisse der Untersuchungen zur Gärqualität mit ES: Essigsäure, PS: Propionsäure, BS: Buttersäure, MS: Milchsäure; Note: Bewertung nach dem DLG Schlüssel (KAISER, 2006) mit 1: sehr gut, 3. verbesserungsbedürftig, 4: schlecht, 5: sehr schlecht

E C	[kgN/ha]	Jahr	[%FM]	pH- Wert	[mg/kg FM]	[%TS]				Note
	Stufe		TS		NH ₃ -N	ES	PS	BS	MS	
73	0	2007	31,7	4,6	428	0,9	0,03	1,74	2,6	4
		2008	30,3	3,7	115	0,3			5,6	1
	240	2007	27,9	4,9	836	0,3	0,04	3,76	5,1	5
		2008	29,7	3,8	174	0,4			7,5	1
	360	2007	26,7	4,9	880	0,3	0,15	4,56	5,8	5
		2008	30,7	3,8	200	0,4			7,4	1
77	0	2007	33,3	4,7	498	0,1	0,03	2,19	1,3	4
		2008	33,0	3,7	150	0,6			5,5	1
	240	2007	30,8	4,2	928	0,8	0,03	1,30	6,4	3
		2008	30,6	3,7	167	0,6			6,9	1
	360	2007	29,2	4,3	949	0,8	0,03	1,92	6,8	4
		2008	30,3	3,8	185	0,6			7,0	1
85	0	2007	36,1	4,1	239	1,0	0,03	0,03	2,5	1
		2008	41,5	3,8	342	0,2			4,0	1
	240	2007	34,1	4,1	432	1,6	0,03	0,03	3,3	1
		2008	37,9	3,8	529	0,3			5,4	1
	360	2007	30,9	3,9	315	1,3	0,03	0,03	4,7	1
		2008	39,9	3,8	623	0,3			4,6	1

Um den Siliererfolg abschätzen zu können, kommt es aber nicht nur auf die Gärqualität an, sondern auch auf die Masseverluste, die während des Silierens

entstehen. Tab. 16 zeigt die Bilanzierung der Verluste an Frischmasse, Trockenmasse und organischer Trockenmasse. Die Verluste an Frischmasse sind als gering einzustufen, sie liegen zwischen 0,2 bis 4,7 % der Einwaage. Die höchsten Frischmasseverluste treten bei den schlechten und sehr schlechten Silagen im Jahr 2007 auf. Im Gegensatz zu den auf den ersten Blick gering erscheinenden Frischmasseverlusten liegen die Trockenmasseverluste bei 1,0 bis 22,7 % der Einwaage, wobei auch hier wieder eine Korrelation zwischen Gärqualität und Trockenmasseverlusten besteht. Allerdings treten auch bei sehr guten Silagen Trockenmasseverluste von bis zu 11,4 % auf. Die Verluste an organischer Trockenmasse liegen erwartungsgemäß im gleichen Bereich wie die Trockenmasseverluste.

Tab. 16: Weizen, Verluste durch die Silierung
mit FM: Frischmasse, TM: Trockenmasse, oTM: organische Trockenmasse

EC	[kgN/ha] Stufe	Jahr	[% Einwaage] FM-Verlust	[% Einwaage] TM-Verlust	[% Einwaage] oTM-Verlust
73	0	2007	3,3	16,7	17,1
		2008	1,9	11,4	12,1
	240	2007	4,4	21,9	22,8
		2008	0,8	6,8	7,1
	360	2007	4,7	22,7	23,6
		2008	0,3	6,0	6,2
77	0	2007	3,1	15,0	15,7
		2008	0,6	5,1	5,5
	240	2007	2,8	16,9	17,8
		2008	1,0	7,5	7,9
	360	2007	2,8	14,7	15,7
		2008	0,5	7,1	7,6
85	0	2007	0,7	1,1	1,6
		2008	0,9	4,3	5,4
	240	2007	0,8	4,4	4,9
		2008	1,2	6,0	6,0
	360	2007	0,6	1,0	1,4
		2008	0,2	5,8	5,8

5.2.2.2 Mais

Beim Mais wurden ab dem 8. Erntetermin Silagen hergestellt. Die Ergebnisse der Silageausgangsuntersuchungen finden sich in Tabelle 17. Der Trockensubstanzgehalt der Ausgangsmaterialien liegt zwischen 25,3 und 35,3 %. Die Pufferkapazität

liegt zwischen 1,3 bis 3,7 g Milchsäure/100g TM. Da keine Angaben zum Zuckergehalt des Ausgangsmaterials vorliegen, kann der Vergärbarkeitskoeffizient nicht berechnet werden. Nitrat ist teilweise nicht nachweisbar, bei den anderen Varianten sehr gering und liegt somit unterhalb des günstigen Nitratgehaltes von 1,3 bis 5,8 g NO₃ je kg Frischmasse (JÄNICKE, 2006). Der Anfangsbesatz mit Milchsäurebakterien weist große Unterschiede zwischen den Varianten auf (550 bis 100.000 KbE/g FM).

Tab. 17: Mais, Ergebnisse der Silageausgangsuntersuchungen der LUFA ITL GmbH Kiel

T	[kgN/ha]	Jahr	[% FM] TS	[g MS/100g TM] Pufferkapazität	[g/kg TS] Nitrat	[KbE/g FM] MSB
	Stufe					
8	0	2007	26,6	3,7		25000
		2008	26,7	2,7	0,5	13000
	240	2007	25,3	3,3	1,2	92000
		2008	27,5	2,9	1,3	8800
	360	2007	25,3	3,1	1,3	100000
		2008	27,3	2,9	1,0	3600
9	0	2007	35,3	2,1		810
		2008	31,8	2,6	0,2	54000
	240	2007	35,2	2,1	0,7	4200
		2008	37	2,6	0,6	4000
	360	2007	34,1	1,9	1,2	9500
		2008	35,3	2,9	0,6	550

In Tabelle 18 sind die Ergebnisse der Untersuchungen zur Gärqualität dargestellt. Die pH-Werte sind bis auf eine Ausnahme kleiner bzw. gleich 4. Buttersäure konnte lediglich in zwei Silagevarianten nachgewiesen werden, wobei die Konzentrationen mit 0,12 bis 0,47 % noch relativ gering sind. Die Essigsäuregehalte sind ebenfalls eher gering (0,8 bis 3,2 %). Aufgrund dessen können fast alle Silagen nach dem DLG-Schlüssel (KAISER, 2006) als sehr gut bewertet werden (Ausnahme 1x gut). Dieses Bild spiegelt sich auch in der Bilanzierung der bei der Silierung aufgetretenen Masseverluste wieder (Tab. 19).

Tab. 18: Mais, Ergebnisse der Untersuchungen zur Gärqualität
mit ES: Essigsäure, BS: Buttersäure, MS: Milchsäure; Note: Bewertung
nach dem DLG Schlüssel (KAISER, 2006) mit 1: sehr gut, 2: gut

[kgN/ha]									
T	Stufe	Jahr	[%FM] TS	pH- Wert	[mg/kg FM] NH₃-N	ES	[%TS] BS	MS	Note
8	0	2007	24,7	3,7	115	1,6	0,12	6,3	1
		2008	25,4	3,6	161	3,2		6,8	1
	240	2007	24,2	3,7	185	1,7		8,3	1
		2008	25,7	3,7	273	3,0		7,8	1
	360	2007	23,2	3,7	224	1,9		9,1	1
		2008	24,8	3,7	282	3,0		8,3	1
9	0	2007	28,4	3,8	297	1,7		6,5	1
		2008	31,2	4	210	1,7		4,1	1
	240	2007	28,9	3,7	375	0,8		6,9	1
		2008	34,2	3,7	305	1,5		7,0	1
	360	2007	29,1	3,8	426	1,2		6,1	1
		2008	34,4	4,2	345	1,5	0,47	3,0	2

Die Frischmasseverluste betragen maximal 3 %. Demgegenüber stehen Trockenmasseverluste zwischen 0,7 und 18,6%. Die Verluste an organischer Trockensubstanz liegen in einem ähnlichen Bereich wie die Trockenmasseverluste (Tab. 19).

Tab. 19: Mais, Masse-Verluste durch die Silierung
mit FM: Frischmasse, TM: Trockenmasse, oTM: organische Trockenmasse

[kgN/ha]					
T	Stufe	Jahr	[% Einwaage] FM-Verlust	[% Einwaage] TM-Verlust	[% Einwaage] oTM-Verlust
8	0	2007	3,0	10,9	11,1
		2008	1,1	6,0	6,1
	240	2007	0,4	0,9	1,3
		2008	0,6	8,2	8,6
	360	2007	1,3	1,6	3,3
		2008	0,6	5,1	5,6
9	0	2007	1,5	8,5	9,1
		2008	1,0	8,3	8,8
	240	2007	2,2	6,2	6,4
		2008	0,6	15,1	15,5
	360	2007	2,6	0,7	1,2
		2008	1,3	18,6	19,2

5.3 Substratspezifische Gasausbeuten

5.3.1 HBT

Im Hohenheimer Biogasertragstest wurde jede Substratvariante in dreifacher Wiederholung untersucht (vgl. Kapitel 4.6.1). In die folgenden Betrachtungen fließen alle Daten mit ein, für die die Plausibilitätsprüfung (vgl. Kapitel 4.7.1) positiv ausgefallen ist, das sind solche, für die anhand des Versuchsverlaufes keine Ausschlusskriterien festgestellt werden konnten.

Allerdings ist die Datenbasis für statistische Untersuchungen zu gering, deshalb beziehen sich die Darstellungen immer auf die Ergebnisse beider Versuchsjahre und auf beide Düngemittelvarianten, außer wenn es um den Unterschied zwischen den Düngerarten geht. Im Anhang sind die Ergebnisse der Substrate nach Jahren getrennt aufgeführt (Tab. A 25 bis Tab. A 36).

Da im Vegetationsverlauf lediglich die Trockenmasseerträge der mineralisch gedüngten Varianten erhoben wurden, liegen nur für diese Varianten Ergebnisse zum Methanhektarertrag basierend auf manueller Beprobung vor. Zum Haupterntetermin wurde sowohl bei der Hand- als auch bei der Maschinenernte zusätzlich der Trockenmasseertrag der mit Gärrest gedüngten Varianten bestimmt, wodurch hier eine Berechnung des Methanhektarertrages möglich ist.

5.3.1.1 Weizen

Um zu überprüfen, ob es gerechtfertigt ist, die Substratvarianten, die sich hinsichtlich der Art des Düngemittels unterscheiden, für die weiteren Betrachtungen als eine Gruppe zu behandeln, wurden ergänzend zu den Boxplots in Abb. 24 nichtparametrische Tests nach Kruskal-Wallis durchgeführt. Hinsichtlich der spezifischen Biogasproduktion liegen keine signifikanten Unterschiede zwischen den mit mineralischen Dünger und Gärrest gedüngten Varianten vor. Für die spezifische Methanproduktion weist der Test einen signifikanten Unterschied im EC 69 in der zweiten Düngestufe nach (Signifikanzniveau $p = 0,028$). Für den auf manueller Beprobung basierenden Methanhektarertrag weist der Test signifikante Unterschiede im EC 85 in der zweiten und vierten Düngestufe nach ($p = 0,02$), jedoch nicht für den auf maschineller Beprobung beruhenden Methanhektarertrag (Tab. 20).

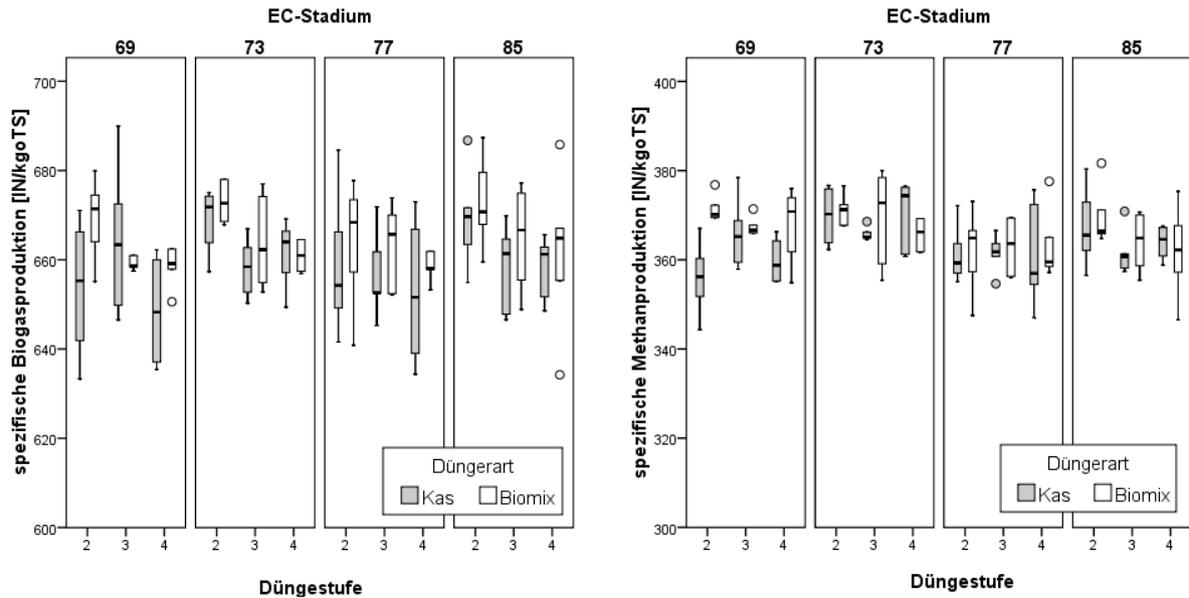


Abb. 24: Weizen, beide Versuchsjahre – Ergebnisse aus dem HBT zur substratspezifischen Biogas- und Methanproduktion in Abhängigkeit von der Düngerart

In Tabelle 20 sind die Mittelwerte für die spezifische Biogas- bzw. Methanproduktion, sowie der durchschnittliche Methangehalt des Biogases als auch die Methanhektarerträge der einzelnen Weizenvarianten dargestellt.

Die Mittelwerte für die spezifische Biogasproduktion liegen in einem engen Bereich von 656 l_N/kg_{oTS} bis 671 l_N/kg_{oTS}, der maximale Unterschied beträgt 15 l_N/kg_{oTS}. Für die spezifische Methanproduktion verhält es sich genauso, hier unterscheiden sich die Mittelwerte um lediglich 12 l_N/kg_{oTS} (Minimum 359 l_N/kg_{oTS}, Maximum 371 l_N/kg_{oTS}). Dementsprechend unterscheiden sich auch die durchschnittlichen Methangehalte im Biogas nur marginal (54 bis 56 %). Im Gegensatz dazu zeigen sich in den Methanhektarerträgen große Spannweiten (Minimum 2674 m³/ha, Maximum 6622 m³/ha).

Tab. 20: Weizen, Düngerart Kas und Biomix, beide Versuchsjahre – Ergebnisse aus dem HBT zur substratspezifischen Biogas- und Methanproduktion, zum durchschnittlichen Methangehalt des Biogases und zum Methanhektarertrag mit MHE¹⁾: Methanhektarertrag Berechnung basiert auf manueller Beprobung, MHE²⁾ Berechnung basiert auf maschineller Beprobung

EC	[kgN/ha]	[l _N /kg _{oTS}]		[%]	[m ³ _N /ha]	
	Düngestufe	Spezifische Biogasproduktion	Spezifische Methanproduktion	CH ₄ -Gehalt des Biogases	MHE ¹⁾	MHE ²⁾
69	0	662	359	54	2674	
	120	661	362	55	4238	
	240	663	366	55	4994	
	360	656	364	55	4763	
73	0	667	365	55	2778	
	120	671	371	55	4548	
	240	661	368	56	5411	
	360	664	370	56	5429	
77	0	659	359	55	2900	
	120	661	362	55	4804	
	240	660	362	55	5906	
	360	658	362	55	5642	
85	0	668	366	55	3423	2186
	120	671	368	55	5163	3408
	240	662	363	55	6622	4233
	360	660	363	55	6579	4253

Um der Fragestellung nachzugehen, ob und inwieweit die Düngeintensität einen Einfluss auf die Parameter spezifische Biogas- und Methanproduktion hat, sind in Abbildung 25 beide Parameter in Bezug auf das Erntestadium in Abhängigkeit von der Düngeintensität als Boxplots dargestellt.

Sowohl für die spezifische Biogas- als auch für die spezifische Methanproduktion liegen die einzelnen Boxen im gleichen Wertebereich (Abb. 25). Einige Varianten weisen größere Boxen als andere auf, was darauf zurückzuführen ist, dass die Werte stärker streuen.

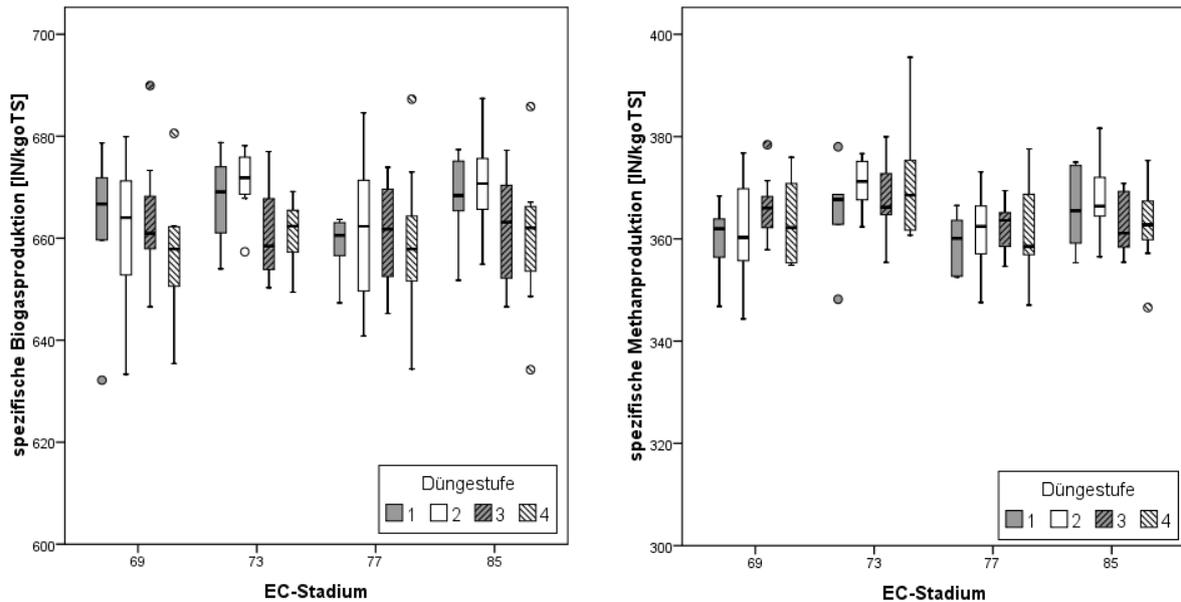


Abb. 25: Weizen Düngerart Kas und Biomix, beide Versuchsjahre – Ergebnisse aus dem HBT zur substratspezifischen Biogas- und Methanproduktion in Abhängigkeit von der Düngestufe

Zur Feststellung von signifikanten Unterschieden zwischen den Gasproduktionen der einzelnen Düngeintensitäten wurde der Kruskal-Wallis-Test durchgeführt. Es können lediglich signifikante Unterschiede ($p = 0,011$) in der spezifischen Biogasproduktion zwischen der 2. und 3. bzw. der 2. und 4. Düngestufe im Stadium EC 73 sowie zwischen den Düngeufen 2 und 4 im Stadium EC 85 nachgewiesen werden (Tab. 21). Signifikante Unterschiede in der spezifischen Methanproduktion bestehen zwischen den verschieden stark gedüngten Weizenvarianten nicht.

Tab. 21: Weizen, HBT, signifikante Unterschiede in der spezifischen Biogasproduktion zwischen den Düngevarianten nach dem Kruskal-Wallis-Test mit n.s.: nicht signifikant, *: signifikanter Unterschied

Parameter	EC	Düngestufe	2	3	4
Spezifische Biogasproduktion	73	1	n.s.	n.s.	n.s.
		2		*	*
		3			n.s.
	85	1	n.s.	n.s.	n.s.
		2		n.s.	*
		3			n.s.

Abb. 26 stellt in Form von Boxplots den Methanhektarertrag bezogen auf das Erntestadium in Abhängigkeit von der Düngeintensität dar. Wie entsprechend den

Ergebnissen zu den Trockenmasseerträgen zu erwarten war (vgl. Kapitel 5.2.1.1), liegen die Methanhektarerträge der ungedüngten Varianten deutlich unter denen der gedüngten Varianten. Die Methanhektarerträge der 120 kgN/ha-Düngevariante sind geringer als die der beiden höheren Dünge­stufen. Eine Steigerung der Düngeintensität von 240 kgN/ha auf 360 kgN/ha hat keine Zunahme des Methanhektarertrags zur Folge. Diese Beobachtungen werden von den Ergebnissen des Kruskal-Wallis-Tests (Tab. 22) unterstützt. Dieser weist für alle Erntetermine signifikante bis höchst signifikante Unterschiede im Methanhektarertrag zwischen den Dünge­stufen nach, außer zwischen der 3. und 4. Dünge­stufe ab dem Stadium EC73. Die genauen Signifikanzniveaus finden sich im Anhang (Tab. A 37).

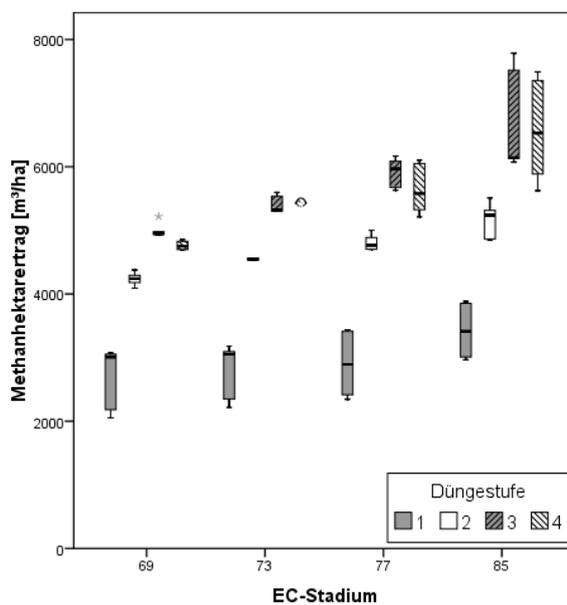


Abb. 26: Weizen Düngerart Kas und Biomix, beide Versuchsjahre – Ergebnisse aus dem HBT zum Methanhektarertrag in Abhängigkeit von der Dünge­stufe

Tab. 22: Weizen, HBT, signifikante Unterschiede im Methanhektarertrag (basierend auf manueller Beprobung) zwischen den einzelnen Düngestufen mit n.s.: nicht signifikant, *: signifikanter, **: hoch signifikanter, ***: höchst signifikanter Unterschied

Parameter	EC	N-Stufe	2	3	4
Methanhektarertrag	69	1	**	**	*
		2		**	*
		3			*
	73	1	*	**	**
		2		*	*
		3			n.s.
	77	1	**	**	**
		2		**	**
		3			n.s.
	85	1	***	***	**
		2		***	***
		3			n.s.

Um der Fragestellung nachzugehen, ob und inwieweit das Entwicklungsstadium bzw. der Erntetermin einen Einfluss auf die Parameter spezifische Biogas- und Methanproduktion hat, sind in Abb. 27 beide Parameter in Bezug auf die Düngestufe in Abhängigkeit vom EC-Stadium als Boxplots dargestellt. Sowohl für die spezifische Biogas- als auch für die spezifische Methanproduktion liegen die einzelnen Boxen im gleichen Wertebereich. Einige Varianten weisen größere Boxen als andere auf, was darauf zurückzuführen ist, dass die Werte stärker streuen. Zur Feststellung von signifikanten Unterschieden zwischen den Gasproduktionen der einzelnen Erntestadien wurde der Kruskal-Wallis-Test durchgeführt (Tab. 23).

Mit dem Kruskal-Wallis-Test konnten einige wenige signifikante Unterschiede in der Biogas- bzw. Methanproduktion zwischen den Ernteterminen nachgewiesen werden und zwar bei den Varianten, deren Boxen in Abb. 27 nicht oder nur geringfügig überlappen. So unterscheidet sich in der Kontrollvariante die spezifische Biogasproduktion des EC 77 signifikant von der des EC 85 ($p = 0,037$). In der zweiten Düngestufe besteht ein signifikanter Unterschied in der Biogasproduktion zwischen den EC-Stadien 73 und 77 ($p = 0,048$). Auch für den Parameter spezifische Methanproduktion ließen sich vereinzelte Unterschiede nachweisen, wie zwischen den EC-Stadien 69 und 73 ($p = 0,041$) sowie 73 und 77 ($p = 0,007$) in der zweiten Düngestufe und zwischen EC 73 und 77 ($p = 0,045$) in der vierten Düngestufe.

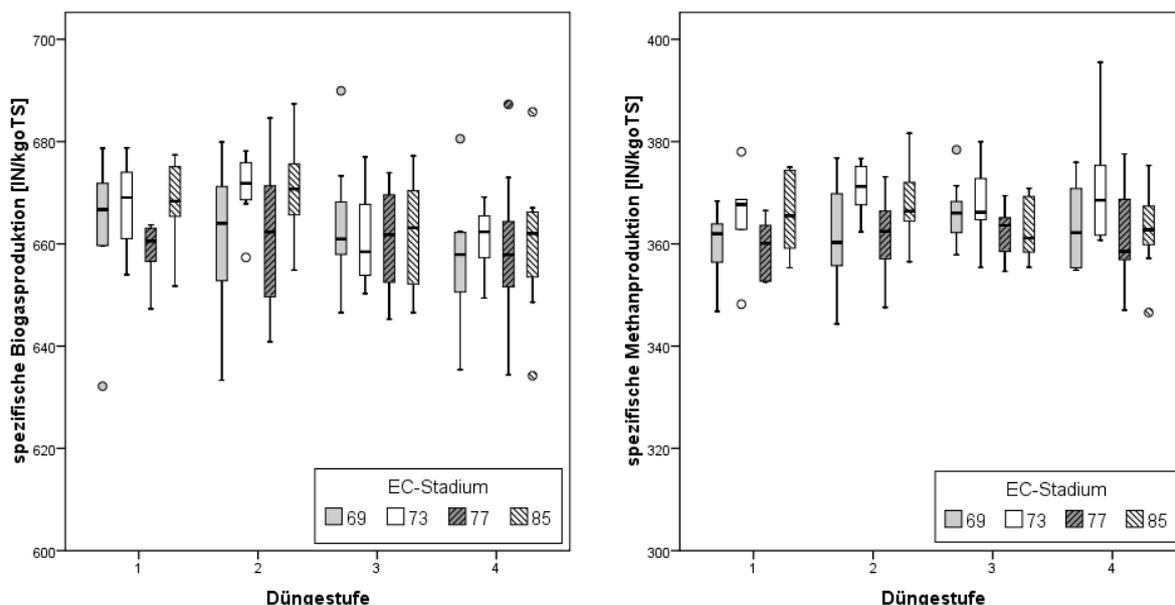


Abb. 27: Weizen Düngerart Kas und Biomix, beide Versuchsjahre – Ergebnisse aus dem HBT zur substratspezifischen Biogas- und Methanproduktion in Abhängigkeit vom EC-Stadium / Erntetermin

Tab. 23: Weizen, HBT, signifikante Unterschiede in der spezifischen Biogas- und Methanproduktion zwischen den einzelnen EC-Stadien mit n.s.: nicht signifikant, *: signifikanter, **: hoch signifikanter, ***: höchst signifikanter Unterschied

Parameter	Düngestufe	EC	73	77	85
Spezifische Biogasproduktion	1	69	n.s.	n.s.	n.s.
		73		n.s.	n.s.
		77			*
	2	69	n.s.	n.s.	n.s.
		73		*	n.s.
		77			n.s.
Spezifische Methanproduktion	2	69	*	n.s.	n.s.
		73		**	n.s.
		77			n.s.
	4	69	n.s.	n.s.	n.s.
		73		*	n.s.
		77			n.s.

Abb. 28 stellt in Form von Boxplots den Methanhektarertrag bezogen auf die Düngeintensität in Abhängigkeit vom Erntestadium dar. Wie entsprechend den Ergebnissen zu den Trockenmasseerträgen zu erwarten war (vgl. Kapitel 5.2.1.1), liegen die Methanhektarerträge der Kontrollvariante deutlich unter denen der gedüngten Varianten. Bei der Kontrollvariante zieht ein späterer Erntetermin nur

geringe Steigerungen des Methanhektarertrages nach sich. Bei den gedüngten Varianten hat ein späterer Erntetermin immer eine Steigerung des Methanhektarertrages zur Folge. Diese Beobachtungen werden von den Ergebnissen des Kruskal-Wallis-Tests (Tab. 24) unterstützt. Dieser weist ausschließlich für die gedüngten Varianten signifikante bis höchst signifikante Unterschiede im Methanhektarertrag zwischen den Entwicklungsstadien nach. Die genauen Signifikanzniveaus finden sich im Anhang (Tab. A 38).

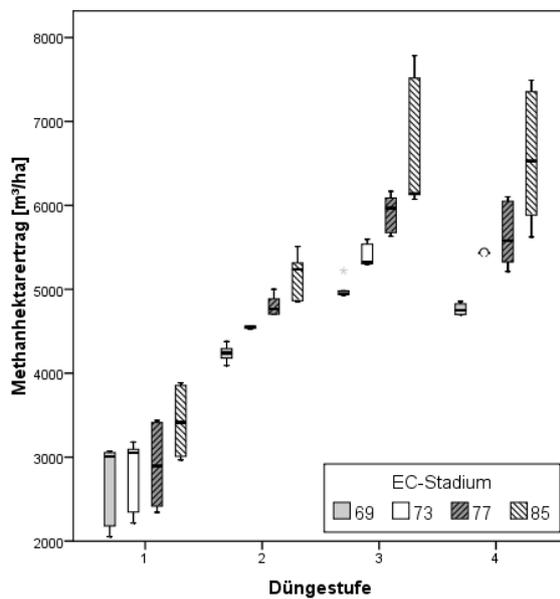


Abb. 28: Weizen Düngerart Kas und Biomix, beide Versuchsjahre – Ergebnisse aus dem HBT zum Methanhektarertrag in Abhängigkeit vom EC-Stadium / Erntetermin

Tab. 24: Weizen, HBT, signifikante Unterschiede im Methanhektarertrag (basierend auf manueller Beprobung) zwischen den einzelnen EC-Stadien mit n.s.: nicht signifikant, *: signifikanter, **: hoch signifikanter, ***: höchst signifikanter Unterschied

Parameter	Düngestufe	EC	73	77	85
Methanhektarertrag	1	69	n.s.	n.s.	n.s.
		73		n.s.	n.s.
		77			n.s.
	2	69	*	**	***
		73		*	**
		77			*
	3	69	**	**	***
		73		**	**
		77			*
	4	69	*	*	**
		73		n.s.	**
		77			**

Zusammenfassend sind folgende Ergebnisse und Tendenzen aus der Untersuchung des GPS-Weizens im HBT festzuhalten:

- Die Art des Düngemittels hat keinen Einfluss auf die spezifische Biogas- und Methanproduktion.
- Die Düngeintensität hat keinen Einfluss auf die spezifische Biogas- und Methanproduktion, jedoch über den Trockenmasseertrag auf den Methanhektarertrag, wobei eine Steigerung der Düngeintensität über 240 kgN/ha zu keiner weiteren Ertragssteigerung führt.
- Das Entwicklungsstadium hat keinen Einfluss auf die spezifische Biogas- und Methanproduktion, jedoch über den Trockenmasseertrag auf den Methanhektarertrag.

5.3.1.2 Mais

Um zu überprüfen, ob es gerechtfertigt ist, die Substratvarianten, die sich hinsichtlich der Art des Düngemittels unterscheiden, für die weiteren Betrachtungen als eine Gruppe zu behandeln, wurden ergänzend zu den Boxplots in Abb. 29 nichtparametrische Tests nach Kruskal-Wallis durchgeführt. Hinsichtlich der spezifischen Biogas- und Methanproduktion liegen bei den beiden frühen

Ernteterminen (T7 und T8) signifikante bis höchst signifikante Unterschiede zwischen den mit mineralischen Dünger und Gärrest gedüngten Varianten vor. Im Haupterntetermin (T9) sind keine signifikanten Unterschiede zwischen den Düngerarten feststellbar. Weder für den auf manueller Beprobung basierenden Methanhektarertrag noch für den auf maschineller Beprobung beruhenden Methanhektarertrag sind Unterschiede zwischen den Düngerarten nachweisbar.

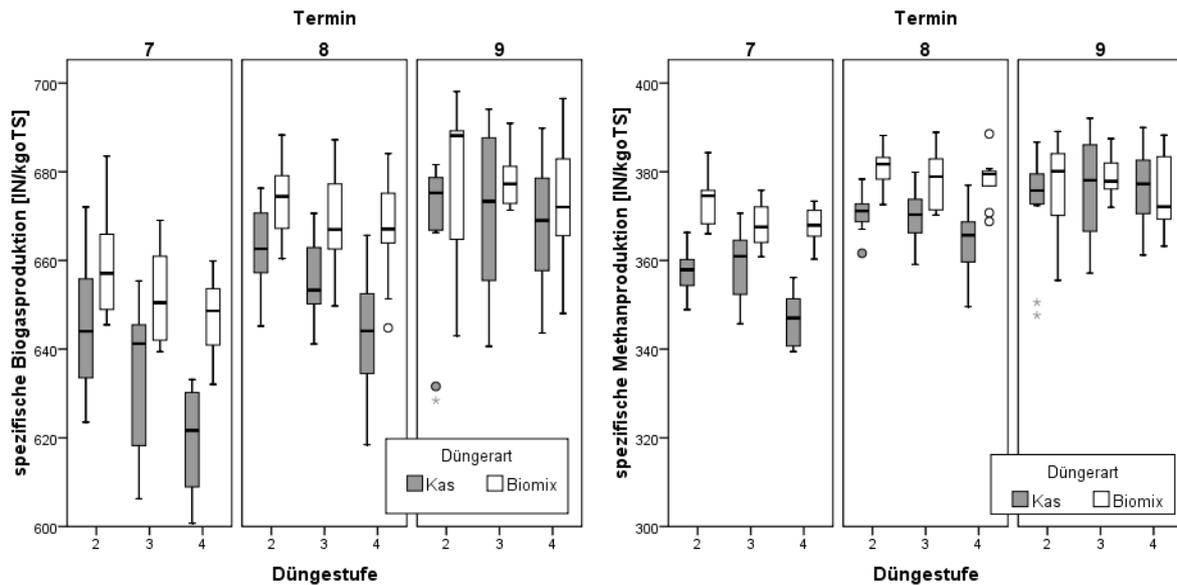


Abb. 29: Mais, beide Versuchsjahre – Ergebnisse aus dem HBT zur substratspezifischen Biogas- und Methanproduktion in Abhängigkeit von der Düngerart

Die Substratvarianten, die sich nur in der Form des Düngemittels unterscheiden, werden im Folgenden zu einer Gruppe zusammengefasst, die Ergebnisse werden als Mittelwerte dargestellt. Die Mittelwerte für die spezifische Biogasproduktion (Tab. 25) liegen in einem Bereich von 634 lN/kg_{oTS} bis 680 lN/kg_{oTS}, der maximale Unterschied beträgt 46 lN/kg_{oTS}. Bei der spezifischen Methanproduktion unterscheiden sich die Mittelwerte um lediglich 20 lN/kg_{oTS} (Minimum 358 lN/kg_{oTS}, Maximum 378 lN/kg_{oTS}). Die im Verhältnis zum Weizen (vgl. Kapitel 5.3.1.1) großen Spannweiten bzw. Unterschiede zwischen den Mittelwerten gehen vor allem auf die geringe Biogas- und Methanproduktion der mineralisch gedüngten Varianten (240 bzw. 360 kgN/ha) im siebten Erntetermin zurück. Die durchschnittlichen Methangehalte im Biogas unterscheiden sich nur marginal (55 bis 57 %). Im Gegensatz dazu zeigen sich in

den Methanhektarerträgen sehr große Spannweiten (Minimum 3519 m³/ha, Maximum 7994 m³/ha).

Tab. 25: Mais, Düngerart Kas und Biomix, beide Versuchsjahre – Ergebnisse aus dem HBT zur substratspezifischen Biogas- und Methanproduktion, zum durchschnittlichen Methangehalt des Biogases und zum Methanhektarertrag mit MHE¹⁾: Methanhektarertrag Berechnung basiert auf manueller Beprobung, MHE²⁾ Berechnung basiert auf maschineller Beprobung

T	[kgN/ha]	[l _N /kg _{oTS}]		[%]	[m ³ _N /ha]	
	Düngestufe	Spezifische Biogasproduktion	Spezifische Methanproduktion	CH ₄ -Gehalt des Biogases	MHE ¹⁾	MHE ²⁾
7	0	675	369	55	3519	
	120	652	365	56	4683	
	240	643	364	57	4946	
	360	634	358	56	4666	
8	0	680	377	56	4582	
	120	668	376	56	6567	
	240	662	374	57	6696	
	360	654	370	57	6703	
9	0	675	374	55	4906	4014
	120	672	375	56	7003	5633
	240	674	378	56	7994	6252
	360	670	376	56	7903	6570

Um der Fragestellung nachzugehen, ob und inwieweit die Düngeintensität einen Einfluss auf die Parameter spezifische Biogas- und Methanproduktion hat, sind in Abb. 30 beide Parameter in Bezug auf das Erntestadium in Abhängigkeit von der Düngeintensität als Boxplots dargestellt.

Sowohl für die spezifische Biogas- als auch für die spezifische Methanproduktion liegen die einzelnen Boxen in einem ähnlichen Wertebereich. Einige Varianten weisen größere Boxen als andere auf, was darauf zurückzuführen ist, dass die Werte stärker streuen. Zur Feststellung von signifikanten Unterschieden zwischen den Gasproduktionen der einzelnen Düngeintensitäten wurde der Kruskal-Wallis-Test durchgeführt (Tab. 26). Es können signifikante Unterschiede (Signifikanzniveaus im Anhang, Tab. A 39) in der spezifischen Biogasproduktion zwischen der Kontrollvariante und den gedüngten Varianten und zwischen der 2. und 4. Düngeintensität in den Ernteterminen 7 und 8 nachgewiesen werden. Signifikante

Unterschiede in der spezifischen Methanproduktion bestehen lediglich zwischen der Kontrollvariante und der 4. Düngestufe im 7. Erntetermin.

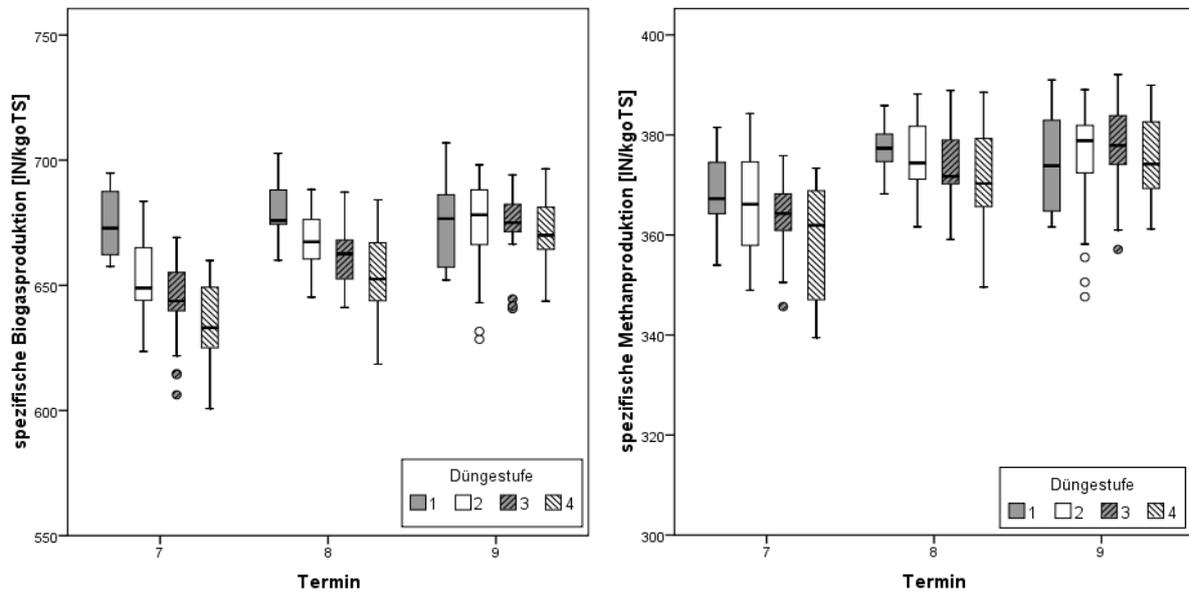


Abb. 30: Mais, Düngerart Kas und Biomix, beide Versuchsjahre – Ergebnisse aus dem HBT zur substratspezifischen Biogas- und Methanproduktion in Abhängigkeit von der Düngestufe

Tab. 26: Mais, HBT, signifikante Unterschiede in der spezifischen Biogas- und Methanproduktion zwischen den Düngevarianten nach dem Kruskal-Wallis-Test

mit n.s.: nicht signifikant, *: signifikanter, **: hoch signifikanter, ***: höchst signifikanter Unterschied

Parameter	Termin	Düngestufe	2	3	4
Spezifische Biogasproduktion	7	1	***	***	***
		2		n.s.	**
		3			n.s.
	8	1	*	***	***
		2		n.s.	**
		3			n.s.
Spezifische Methanproduktion	7	1	n.s.	n.s.	*
		2		n.s.	n.s.
		3			n.s.

Abb. 31 stellt in Form von Boxplots den Methanhektarertrag bezogen auf den Erntetermin in Abhängigkeit von der Düngeintensität dar. Wie entsprechend den Ergebnissen zu den Trockenmasseerträgen zu erwarten war (vgl. Kapitel 5.2.1.2), liegen die Methanhektarerträge der ungedüngten Varianten deutlich unter denen der

gedüngten Varianten. Die Methanhektarerträge der 120 kgN/ha-Düngevariante entsprechen zum 7. und 8. Erntetermin denen der höheren Dünge­stufen, zum Haupterntetermin sind sie jedoch deutlich geringer, wie auch der Kruskal-Wallis-Test (Tab. 27) zeigt. Eine Steigerung der Düngeintensität von 240 kgN/ha auf 360 kgN/ha hat keine Zunahme des Methanhektarertrags zur Folge, im 7. Erntetermin liegt der Methanhektarertrag der 4. Dünge­stufe sogar unter dem der 3. Dünge­stufe. Diese Beobachtungen werden ebenfalls von den Ergebnissen des Kruskal-Wallis-Tests unterstützt. Die genauen Signifikanzniveaus finden sich im Anhang (Tab. A 40).

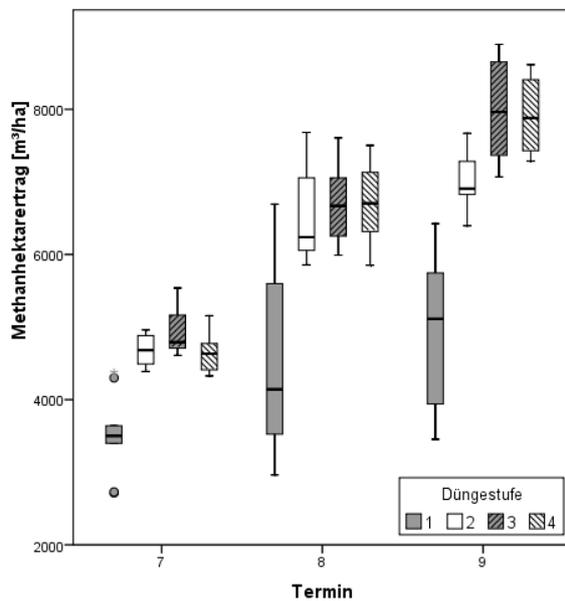


Abb. 31: Mais, Düngerart Kas und Biomix, beide Versuchsjahre – Ergebnisse aus dem HBT zum Methanhektarertrag in Abhängigkeit von der Dünge­stufe

Tab. 27: Mais, HBT, signifikante Unterschiede im Methanhektarertrag (basierend auf manueller Beprobung) zwischen den Düngevarianten nach dem Kruskal-Wallis-Test
mit n.s.: nicht signifikant, *: signifikanter, **: hoch signifikanter, ***: höchst signifikanter Unterschied

Parameter	Termin	N-Stufe	2	3	4
Methanhektarertrag	7	1	***	***	***
		2		n.s.	n.s.
		3			*
	8	1	**	**	***
		2		n.s.	n.s.
		3			n.s.
	9	1	***	***	***
		2		***	**
		3			n.s.

Um der Fragestellung nachzugehen, ob und inwieweit das Entwicklungsstadium bzw. der Erntetermin einen Einfluss auf die Parameter spezifische Biogas- und Methanproduktion hat, sind in Abb. 32 beide Parameter in Bezug auf die Düngestufe in Abhängigkeit vom Erntetermin als Boxplots dargestellt. Sowohl für die spezifische Biogas- als auch für die spezifische Methanproduktion liegen die einzelnen Boxen in einem ähnlichen Wertebereich. Auffällig ist jedoch die Tendenz, dass die Varianten der späteren Erntetermine höhere Gaserträge erzielen, als die Varianten der früheren Erntetermine, was auch durch den Signifikanztest bestätigt wird (Tab. 28). Die spezifische Biogas- und Methanproduktion der im Termin 7 beprobten Varianten unterscheiden sich bis auf wenige Ausnahmen signifikant von den zu den späteren Terminen beprobten Varianten. Bei den Düngestufen 2 und 3 weist der Test auch signifikante Unterschiede in der Biogasproduktion zwischen dem 8. und 9. Erntetermin nach. Die genauen Signifikanzniveaus finden sich im Anhang (Tab. A 41).

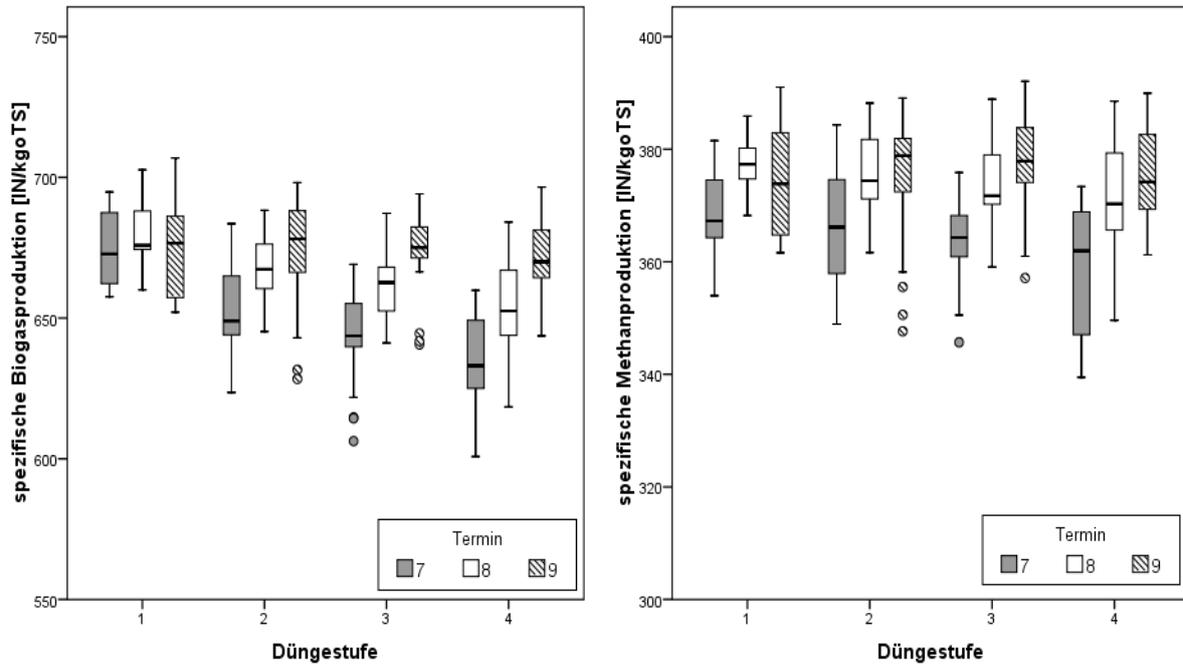


Abb. 32: Mais, Düngerart Kas und Biomix, beide Versuchsjahre – Ergebnisse aus dem HBT zur substratspezifischen Biogas- und Methanproduktion in Abhängigkeit vom Erntetermin

Tab. 28: Mais, HBT, signifikante Unterschiede in der spezifischen Biogas- und Methanproduktion zwischen den Ernteterminen nach dem Kruskal-Wallis-Test
mit n.s.: nicht signifikant, *: signifikanter, **: hoch signifikanter, ***: höchst signifikanter Unterschied

Parameter	Düngestufe	Termin	8	9
Spezifische Biogasproduktion	1	7	n.s.	n.s.
		8		n.s.
	2	7	***	***
		8		n.s.
	3	7	***	***
		8		**
4	7	**	***	
	8		**	
Spezifische Methanproduktion	1	7	*	n.s.
		8		n.s.
	2	7	***	**
		8		n.s.
	3	7	***	***
		8		n.s.
	4	7	**	***
		8		n.s.

Abb. 33 stellt in Form von Boxplots den Methanhektarertrag bezogen auf die Düngeintensität in Abhängigkeit vom Erntetermin dar, Tabelle 29 zeigt die Ergebnisse des Kruskal-Wallis-Tests. Die genauen Signifikanzniveaus finden sich im Anhang (Tab. A 42). Wie entsprechend den Ergebnissen zu den Trockenmasseerträgen zu erwarten war (vgl. Kapitel 5.2.1.2), liegen die Methanhektarerträge der Kontrollvariante deutlich unter denen der gedüngten Varianten. Bei der Kontrollvariante streuen die Werte zum 8. und 9. Erntetermin sehr stark. Es besteht lediglich ein signifikanter Unterschied im Methanhektarertrag zwischen dem 7. und dem 9. Erntetermin. In der zweiten Düngestufe ist eine deutliche Steigerung des Methanhektarertrages (höchst signifikanter Unterschied) vom 7. zum 8. Termin zu erkennen, jedoch nicht zwischen den beiden späteren Terminen. Bei den Varianten der 3. und 4. Düngestufe hat ein späterer Erntetermin immer eine Steigerung des Methanhektarertrages zur Folge.

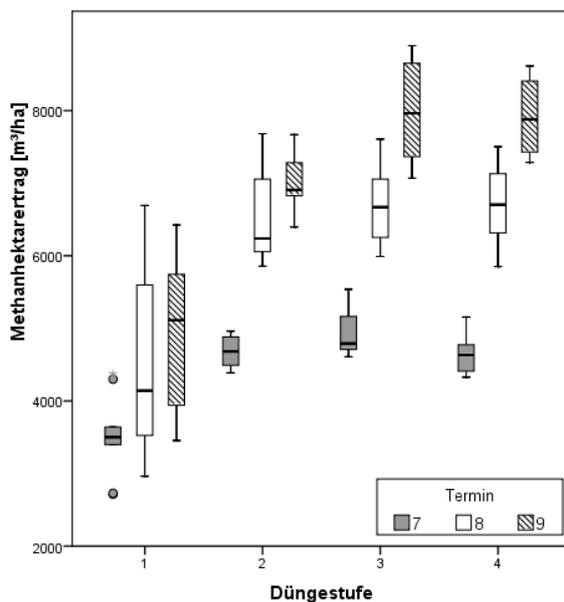


Abb. 33: Mais, Düngerart Kas und Biomix, beide Versuchsjahre – Ergebnisse aus dem HBT zum Methanhektarertrag in Abhängigkeit vom Erntetermin

Tab. 29: Mais, HBT, signifikante Unterschiede im Methanhektarertrag (basierend auf manueller Beprobung) zwischen den Ernteterminen nach dem Kruskal-Wallis-Test
mit n.s.: nicht signifikant, *: signifikanter, **: hoch signifikanter, ***: höchst signifikanter Unterschied)

Parameter	Düngestufe	Termin	8	9
Methanhektarertrag	1	7	n.s.	**
		8		n.s.
	2	7	***	***
		8		n.s.
	3	7	**	***
		8		***
	4	7	**	***
		8		***

Zusammenfassend sind folgende Ergebnisse und Tendenzen aus der Untersuchung der Mais Monokultur im HBT festzuhalten:

- Die Art des Düngemittels hat zumindest in den früheren Erntestadien (T7 und T8) einen Einfluss auf die spezifische Biogas- und Methanproduktion.
- Die Düngeintensität hat in den früheren Erntestadien (T7 und T8) einen Einfluss auf die spezifische Biogasproduktion mit der Tendenz, dass diese mit steigender Düngeintensität abnimmt. Auf die spezifische Methanproduktion hat die Düngeintensität eher keinen Einfluss. Da eine stärkere Stickstoff-Düngung höhere Trockenmasseerträge nach sich zieht, beeinflusst sie auch den Methanhektarertrag, wobei eine Steigerung der Düngeintensität über 240 kgN/ha zu keiner weiteren Ertragssteigerung führt.
- Das Entwicklungsstadium bzw. der Erntetermin hat einen Einfluss auf die spezifische Biogas- und Methanproduktion mit der Tendenz, dass spätere Erntetermine höhere Gaserträge bedingen. Auf jeden Fall beeinflusst der Erntetermin über den Trockenmasseertrag den Methanhektarertrag.

5.3.1.3 Deutsches Weidelgras

Um zu überprüfen, ob es gerechtfertigt ist, die Substratvarianten, die sich hinsichtlich der Art des Düngemittels unterscheiden, für die weiteren Betrachtungen als eine Gruppe zu behandeln, wurden ergänzend zu den Boxplots in Abb. 34 und Abb. 35 nichtparametrische Tests nach Kruskal-Wallis durchgeführt. Hinsichtlich der

spezifischen Biogasproduktion liegen bei den ersten drei Schnitten signifikante bis hoch signifikante Unterschiede zwischen den mit mineralischen Dünger und Gärrest gedüngten Varianten vor, allerdings nur bei Düngestufe 3 (Schnitt 1, 2 und 3) und Düngestufe 4 (Schnitt 1 und 3). Im 4. Schnitt sind keine signifikanten Unterschiede zwischen den Düngerarten feststellbar. Für die spezifische Methanproduktion weist der Test ebenfalls im 3. Schnitt signifikante Unterschiede zwischen den mit mineralischen Dünger und Gärrest gedüngten Varianten der 3. und 4. Düngestufe nach, für die anderen drei Schnitte jedoch nicht. Auch im Methanhektarertrag, der beim Deutschen Weidelgras auf maschineller Beprobung beruht (vgl. Kapitel 4.3.3), finden sich signifikante bis hoch signifikante Unterschiede zwischen den Düngerarten (1. Schnitt: 3. und 4. Düngestufe, 3. Schnitt: alle Düngestufen, 4. Schnitt: 3. Düngestufe).

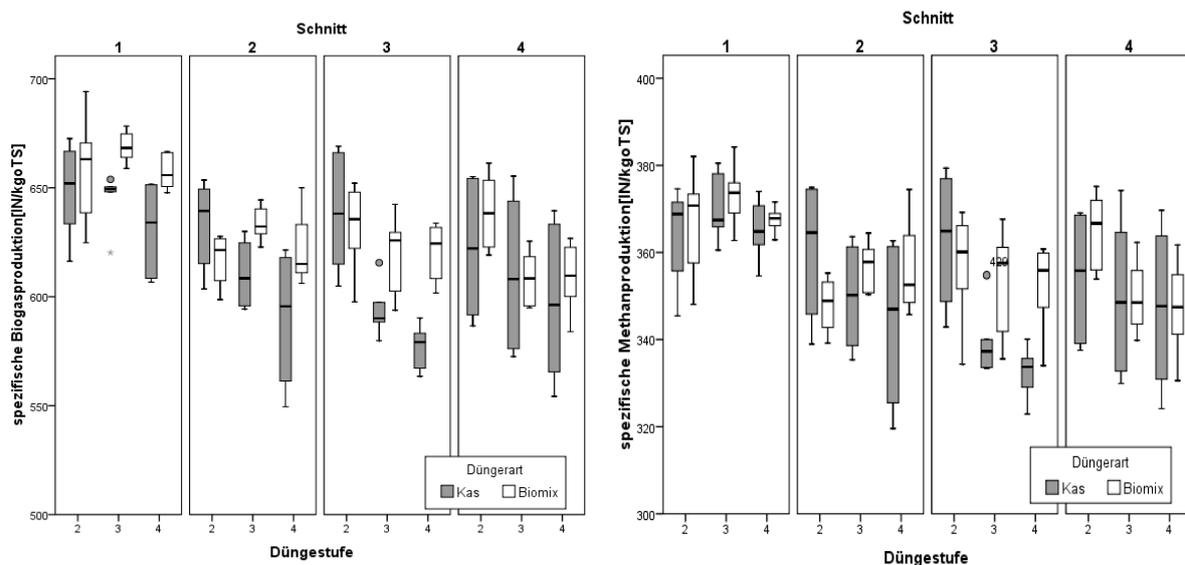


Abb. 34: Deutsches Weidelgras, beide Versuchsjahre – Ergebnisse aus dem HBT zur substratspezifischen Biogas- und Methanproduktion in Abhängigkeit von der Düngerart

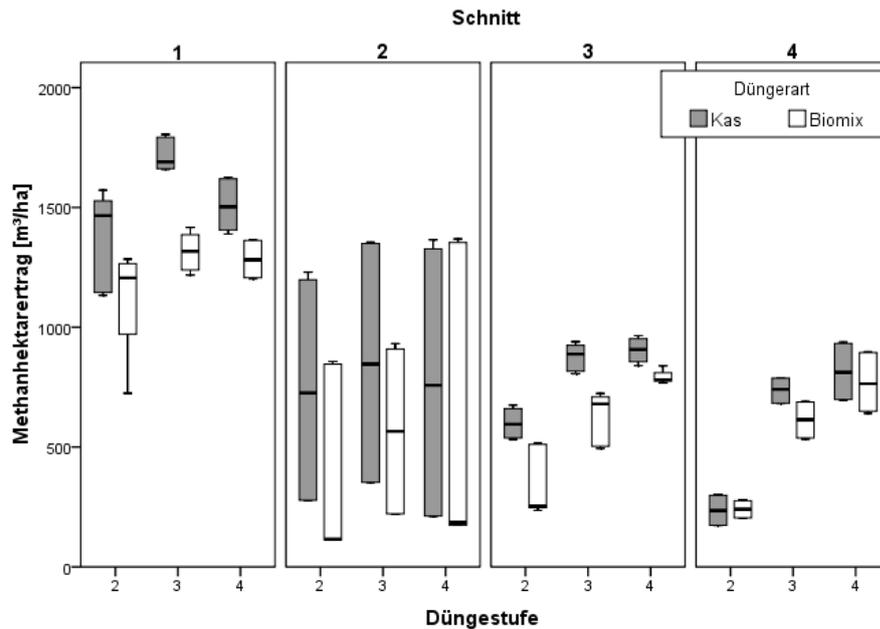


Abb. 35: Deutsches Weidelgras, beide Versuchsjahre, Ergebnisse aus dem HBT zum Methanhektarertrag in Abhängigkeit von der Düngerart

Die Substratvarianten, die sich nur in der Form des Düngemittels unterscheiden, werden im Folgenden zu einer Gruppe zusammengefasst, die Ergebnisse werden als Mittelwerte dargestellt. Die Mittelwerte für die spezifische Biogasproduktion (Tab. 30) liegen in einem Bereich von $599 \text{ l}_N/\text{kg}_{\text{OTS}}$ bis $663 \text{ l}_N/\text{kg}_{\text{OTS}}$, der maximale Unterschied beträgt $64 \text{ l}_N/\text{kg}_{\text{OTS}}$. Bei der spezifischen Methanproduktion unterscheiden sich die Mittelwerte um höchstens $31 \text{ l}_N/\text{kg}_{\text{OTS}}$ (Minimum $341 \text{ l}_N/\text{kg}_{\text{OTS}}$, Maximum $372 \text{ l}_N/\text{kg}_{\text{OTS}}$). Im Verhältnis zum Weizen (vgl. Kapitel 5.3.1.1) und Mais (vgl. Kapitel 5.3.1.2) treten größere Spannweiten bzw. Unterschiede zwischen den Mittelwerten auf, die vor allem auf der geringen Biogas- und Methanproduktion der mineralisch gedüngten Varianten (320 bzw. 480 kgN/ha) in den späteren drei Schnittterminen beruhen. Die durchschnittlichen Methangehalte im Biogas unterscheiden sich nur marginal (55 bis 58 %). Im Gegensatz dazu zeigen sich in den Methanhektarerträgen sehr große Spannweiten (Minimum $150 \text{ m}^3/\text{ha}$, Maximum $1516 \text{ m}^3/\text{ha}$), wobei die höchsten Methanhektarerträge im ersten Schnitt erzielt werden.

Um der Fragestellung nachzugehen, ob und inwieweit die Düngeintensität einen Einfluss auf die Parameter spezifische Biogas- und Methanproduktion hat, sind in Abb. 36 beide Parameter in Bezug auf den Schnitt in Abhängigkeit von der Düngestufe als Boxplots dargestellt.

Tab. 30: Deutsches Weidelgras Düngerart Kas und Biomix, beide Versuchsjahre – Ergebnisse aus dem HBT zur substratspezifischen Biogas- und Methanproduktion, zum durchschnittlichen Methangehalt des Biogases und zum Methanhektarertrag mit MHE²⁾: Methanhektarertrag Berechnung basiert auf maschineller Beprobung

T	[kgN/ha] Düngestufe	[l _N /kg _{oTS}] Spezifische Biogas- produktion	[l _N /kg _{oTS}] Spezifische Methan- produktion	[%] CH ₄ -Gehalt des Biogases	[m ³ _N /ha] MHE ²⁾
1	0	663	370	56	592
	160	653	365	56	1245
	320	657	372	57	1516
	480	644	366	57	1395
2	0	614	341	55	182
	160	624	353	57	540
	320	622	353	57	710
	480	608	351	58	685
3	0	633	359	57	104
	160	635	360	57	455
	320	608	347	57	733
	480	599	342	57	849
4	0	631	362	57	150
	160	630	360	57	239
	320	610	350	57	675
	480	604	347	57	786

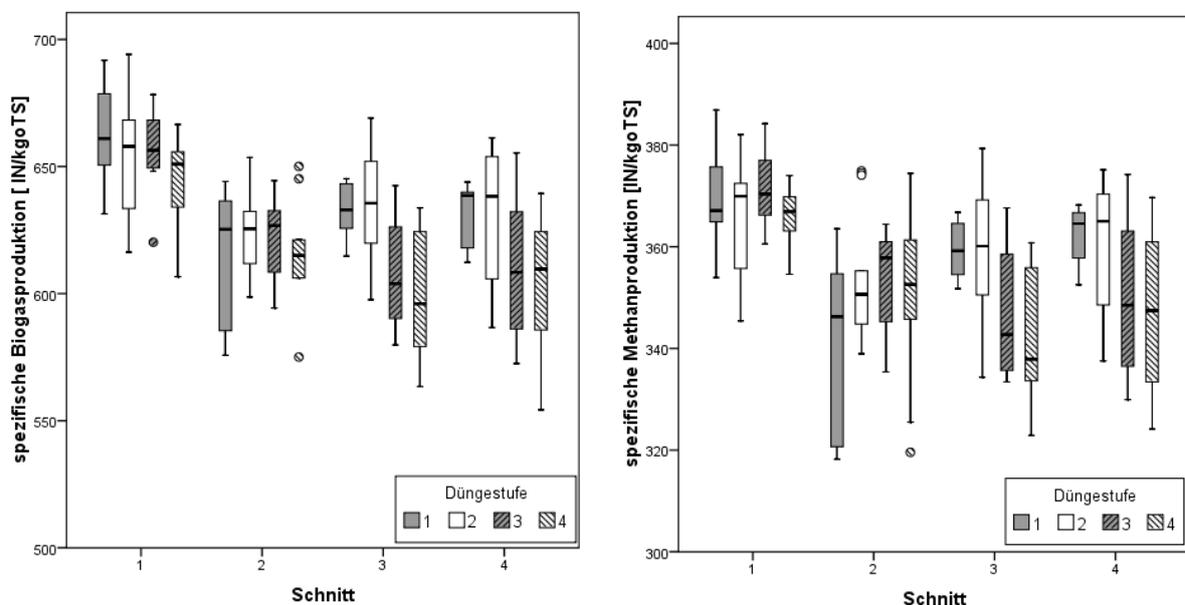


Abb. 36: Deutsches Weidelgras Düngerart Kas und Biomix, beide Versuchsjahre – Ergebnisse aus dem HBT zur substratspezifischen Biogas- und Methanproduktion in Abhängigkeit von der Düngestufe

Sowohl für die spezifische Biogas- als auch für die spezifische Methanproduktion liegen die einzelnen Boxen des ersten Schnitts in einem etwas höheren Wertebereich als die Boxen der weiteren Schnitte, die ihrerseits einen ähnlichen Wertebereich aufweisen. Einige Varianten weisen größere Boxen als andere auf, was darauf zurückzuführen ist, dass die Werte stärker streuen. Zur Feststellung von signifikanten Unterschieden zwischen den Gasproduktionen der einzelnen Düngeintensitäten wurde der Kruskal-Wallis-Test durchgeführt (Tab. 31). In den Bereichen, in denen die Boxen in Abb. 36 wenig oder keine Überlappungen aufweisen, was im 3. und 4. Schnitt zwischen den Varianten der Düngeufen 1 und 2 und den Varianten der 3. und 4. Düngeufe der Fall ist, treten signifikante bis hochsignifikante Unterschiede (Signifikanzniveaus im Anhang, Tab. A 43) in der spezifischen Biogas- und Methanproduktion auf. Für diese Schnitte ist eine leichte Tendenz erkennbar, dass die höher gedüngten Varianten geringere Gaserträge erzielen.

Tab. 31: Deutsches Weidelgras, HBT, signifikante Unterschiede in der spezifischen Biogas- und Methanproduktion zwischen den Düngevarianten nach dem Kruskal-Wallis-Test
mit n.s.: nicht signifikant, *: signifikanter, **: hoch signifikanter, ***: höchst signifikanter Unterschied

Parameter	Schnitt	Düngestufe	2	3	4
Spezifische Biogasproduktion	3	1	n.s.	**	**
		2		**	**
		3			n.s.
	4	1	n.s.	n.s.	*
		2		n.s.	*
		3			n.s.
Spezifische Methanproduktion	3	1	n.s.	n.s.	**
		2		*	**
		3			n.s.
	4	1	n.s.	*	**
		2		n.s.	*
		3			n.s.

Abb. 37 stellt in Form von Boxplots den Methanhektarertrag bezogen auf den Schnitt in Abhängigkeit von der Düngeintensität dar. Wie entsprechend den Ergebnissen zu den Trockenmasseerträgen zu erwarten war (vgl. Kapitel 5.2.1.3), liegen die Methanhektarerträge der ungedüngten Varianten deutlich unter denen der gedüngten

Varianten (Ausnahme 2. Schnitt). Die Methanhektarerträge der 160 kgN/ha-Düngevariante entsprechen im 1. und 2. Schnitt denen der höheren Dünge­stufen, bei den späteren Schnitten sind sie jedoch deutlich geringer, wie auch der Kruskal-Wallis-Test (Tab. 32) zeigt. Eine Steigerung der Düngeintensität von 320 kgN/ha auf 480 kgN/ha hat lediglich im 3. Schnitt eine geringe Zunahme des Methanhektarertrags zur Folge. Diese Beobachtungen werden ebenfalls von den Ergebnissen des Kruskal-Wallis-Tests unterstützt. Die genauen Signifikanzniveaus finden sich im Anhang (Tab. A 44).

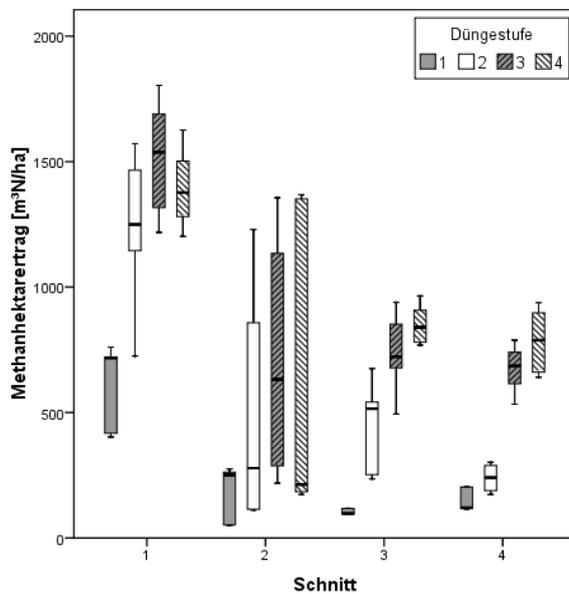


Abb. 37: Deutsches Weidelgras Düngerart Kas und Biomix, beide Versuchsjahre – Ergebnisse aus dem HBT zum Methanhektarertrag in Abhängigkeit von der Dünge­stufe

Tab. 32: Deutsches Weidelgras, HBT signifikante Unterschiede im Methanhektarertrag (basierend auf maschineller Beprobung) zwischen den Düngevarianten nach dem Kruskal-Wallis-Test mit n.s.: nicht signifikant, *: signifikanter, **: hoch signifikanter, ***: höchst signifikanter Unterschied

Parameter	Schnitt	Düngestufe	2	3	4
Methanhektarertrag	1	1	***	***	***
		2		*	n.s.
		3			n.s.
	2	1	n.s.	n.s.	n.s.
		2		n.s.	n.s.
		3			n.s.
	3	1	***	***	***
		2		***	***
		3			*
	4	1	**	***	***
		2		***	***
		3			n.s.

Um der Fragestellung nachzugehen, ob und inwieweit das Entwicklungsstadium bzw. der Schnitt einen Einfluss auf die Parameter spezifische Biogas- und Methanproduktion hat, sind in Abb. 38 beide Parameter in Bezug auf die Düngestufe in Abhängigkeit vom Schnitt als Boxplots dargestellt. Sowohl für die spezifische Biogas- als auch für die spezifische Methanproduktion liegen die Boxen der Varianten des 1. Schnittes in einem höheren Wertebereich als die der weiteren Schnitte. Zur Feststellung von signifikanten Unterschieden zwischen den Gasproduktionen der Varianten aus den verschiedenen Schnitten wurde der Kruskal-Wallis-Test durchgeführt (Tab. 33). Der Signifikanztest bestätigt größtenteils den Eindruck, den die Abb. 38 vermittelt. Die spezifische Biogas- und Methanproduktion der Varianten des ersten Schnittes unterscheiden sich bis auf wenige Ausnahmen signifikant von den Varianten der späteren Schnitte. Bei der Kontrollvariante weist der Test auch signifikante Unterschiede in der Methanproduktion zwischen dem 2. und den folgenden Schnitten nach. Die genauen Signifikanzniveaus finden sich im Anhang (Tab. A 45).

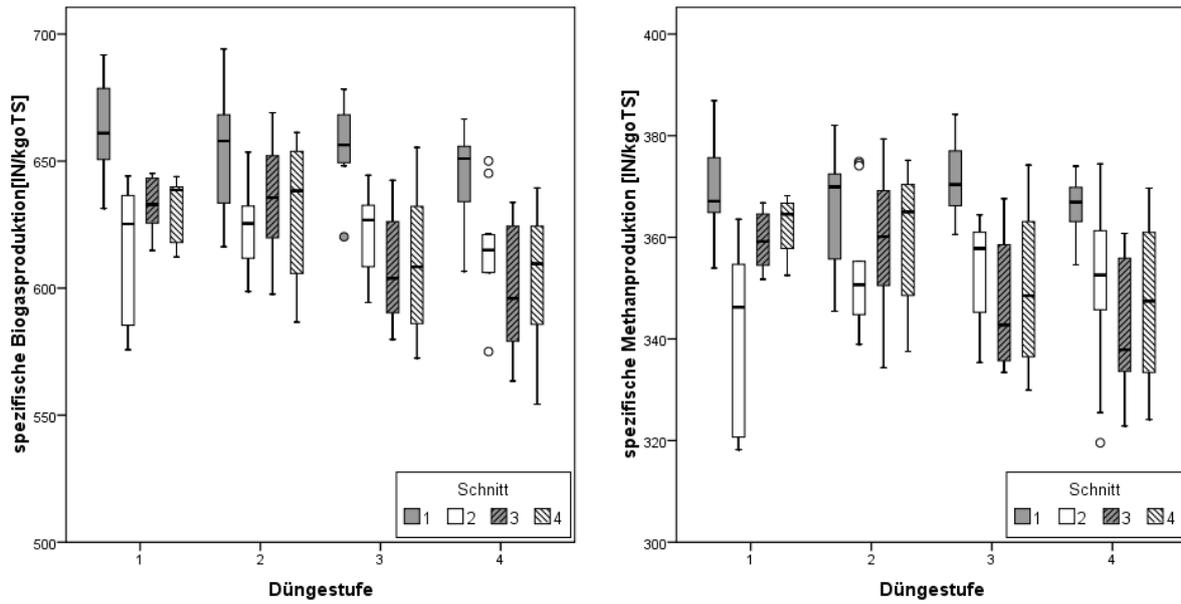


Abb. 38: Deutsches Weidelgras Düngerart Kas und Biomix – Ergebnisse aus dem HBT zur substratspezifischen Biogas- und Methanproduktion in Abhängigkeit vom Schnitt

Tab. 33: Deutsches Weidelgras, HBT, signifikante Unterschiede in der spezifischen Biogas- und Methanproduktion zwischen Varianten aus den verschiedenen Schnitten nach dem Kruskal-Wallis-Test mit n.s.: nicht signifikant, *: signifikanter, **: hoch signifikanter, ***: höchst signifikanter Unterschied

Parameter	Düngestufe	Schnitt	2	3	4
Spezifische Biogasproduktion	1	1	**	**	**
		2		n.s.	n.s.
		3			n.s.
	2	1	**	*	*
		2		n.s.	n.s.
		3			n.s.
	3	1	***	***	***
		2		n.s.	n.s.
		3			n.s.
	4	1	**	***	***
		2		n.s.	n.s.
		3			n.s.
Spezifische Methanproduktion	1	1	***	*	n.s.
		2		*	**
		3			n.s.
	2	1	*	n.s.	n.s.
		2		n.s.	n.s.
		3			n.s.
	3	1	***	***	***
		2		n.s.	n.s.
		3			n.s.
	4	1	**	***	***
		2		n.s.	n.s.
		3			n.s.

Abb. 39 stellt in Form von Boxplots den Methanhektarertrag bezogen auf die Düngintensität in Abhängigkeit vom Schnitt dar,

Tab. 34 zeigt die Ergebnisse des Kruskal-Wallis-Tests. Wie entsprechend den Ergebnissen zu den Trockenmasseerträgen zu erwarten war (vgl. Kapitel 5.2.1.3), liegen die Methanhektarerträge der Kontrollvariante deutlich unter denen der gedüngten Varianten. Bei allen Varianten streuen die Werte zum 2. Schnitt sehr stark, was auf die sehr stark unterschiedlichen Trockenmasseerträge in den beiden Jahren 2007 und 2008 zurückzuführen ist (vgl. Tab. A 33 bis Tab. A 36 im Anhang). Es besteht ein hoch bis höchst signifikanter Unterschied im Methanhektarertrag

zwischen den Varianten des 1. Schnittes zu denen der folgenden Schnitte. In der 1. und 2. Düngestufe ist ein hoch signifikanter Unterschied zwischen dem 3. und 4. Schnitt nachweisbar. Die genauen Signifikanzniveaus finden sich im Anhang (Tab. A 46).

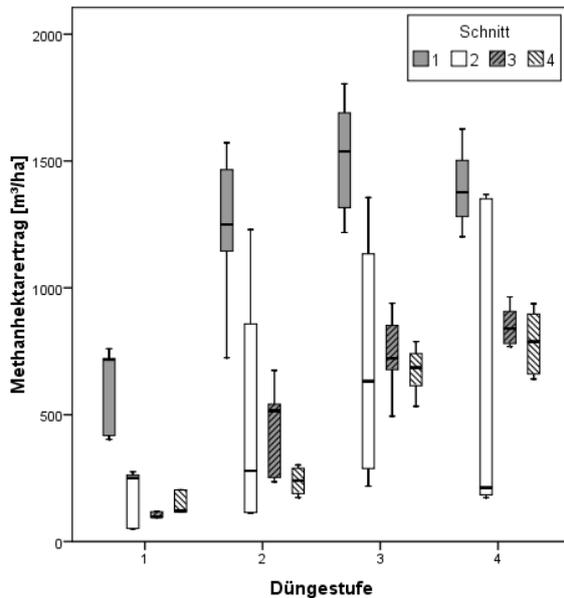


Abb. 39: Deutsches Weidelgras Düngerart Kas und Biomix, beide Versuchsjahre – Ergebnisse aus dem HBT zum Methanhektarertrag in Abhängigkeit vom Schnitt

Tab. 34: Deutsches Weidelgras, HBT, signifikante Unterschiede im Methanhektarertrag (basierend auf maschineller Beprobung) zwischen den Düngevarianten nach dem Kruskal-Wallis-Test mit n.s.: nicht signifikant, *: signifikanter, **: hoch signifikanter, ***: höchst signifikanter Unterschied

Parameter	Düngestufe	Schnitt	2	3	4
Methanhektarertrag	1	1	***	***	***
		2		n.s.	n.s.
		3			**
	2	1	***	***	***
		2		n.s.	n.s.
		3			**
	3	1	***	***	***
		2		n.s.	n.s.
		3			n.s.
	4	1	**	***	***
		2		n.s.	n.s.
		3			n.s.

Zusammenfassend sind folgende Ergebnisse und Tendenzen aus der Untersuchung des Deutschen Weidelgrases im HBT festzuhalten:

- Die Art des Düngemittels hat teilweise (Düngestufe 3 und 4) einen Einfluss auf die spezifische Biogas- und Methanproduktion, wobei die Tendenz dahin geht, dass die mit Gärrest gedüngten Varianten höhere Gaserträge erzielen. Auch der Methanhektarertrag wird durch die Wahl des Düngemittels beeinflusst, allerdings weisen hier die Varianten, die mit mineralischem Dünger gedüngt wurden, höhere Erträge auf.
- Die Düngeintensität hat zumindest im 3. und 4. Schnitt einen Einfluss auf die spezifische Biogas- und Methanproduktion mit der Tendenz, dass diese mit steigender Düngeintensität abnimmt. Da eine stärkere Stickstoff-Düngung höhere Trockenmasseerträge nach sich zieht, beeinflusst sie auch den Methanhektarertrag, wobei eine Steigerung der Düngeintensität über 320 kgN/ha zu keiner weiteren Ertragssteigerung führt.
- Der Schnitt hat einen Einfluss auf die spezifische Biogas- und Methanproduktion sowie auf den Methanhektarertrag mit der Tendenz, dass bei den Varianten des ersten Schnittes höhere Gas- und Flächenerträge erzielt werden.

5.3.2 Batch

Im Batch-Versuch wurde eine Auswahl der zur Verfügung stehenden Pflanzensubstrate (vgl. Kapitel 4.3) im frischen und im silierten Zustand eingesetzt, wobei ein Zerkleinerungsgrad mit Kantenlängen unter 1 cm vorlag (vgl. Kapitel 4.3.1.2). Da zu jeder frischen Ausgangsvariante drei Silagen existierten, wurde aufgrund des geringen Durchsatzes der Versuchsanlage eine Silage für die Versuchsdurchführung ausgewählt. Hierzu galt als Kriterium, dass die Gärqualität (vgl. Kapitel 5.2.2) möglichst gut bewertet sein sollte.

Jede Substratvariante wurde in fünffacher Wiederholung untersucht (vgl. Kapitel 4.6.2). In die folgenden Betrachtungen fließen alle Daten mit ein, für die die Plausibilitätsprüfung (vgl. Kapitel 4.7.1) positiv ausgefallen ist, das sind solche, für die anhand des Versuchsverlaufes keine Ausschlusskriterien festgestellt werden konnten.

Allerdings ist die Datenbasis für statistische Untersuchungen zu gering, deshalb beziehen sich die Darstellungen immer auf die Ergebnisse beider Versuchsjahre. Im Anhang sind die Ergebnisse der Substrate nach Jahren getrennt aufgeführt (Tab. A 47 bis Tab. A 50).

Bei der Berechnung der Trockensubstanzverluste sowie der Parameter spezifische Biogas- und Methanproduktion der Silagen wurde der am ILV gemessene Trockensubstanzgehalt zu Grunde gelegt, der je nach pH-Wert mit den Korrekturgleichungen Gleichung 1 bis 3 (vgl. Kapitel 3.3.2) um die flüchtigen Gärprodukte korrigiert wurde.

Da die Parzellen des Feldversuches im Vegetationsverlauf manuell beprobt wurden, liegen für diese Varianten Ergebnisse zum Methanhektarertrag basierend auf manueller Beprobung vor. Zum Haupterntetermin liegen zusätzlich Ergebnisse zum Methanhektarertrag basierend auf maschineller Beprobung vor.

5.3.2.1 Weizen

In Tab. 35 sind die Mittelwerte für die spezifische Biogas- bzw. Methanproduktion, sowie der durchschnittliche Methangehalt des Biogases als auch die Methanhektarerträge der einzelnen Weizenvarianten dargestellt.

Die Mittelwerte für die spezifische Biogasproduktion der frischen Substrate liegen in einem Bereich von 546 l_N/kg_{oTS} bis 595 l_N/kg_{oTS}, der maximale Unterschied beträgt 49 l_N/kg_{oTS}. Bei der spezifischen Methanproduktion unterscheiden sich die Mittelwerte um 24 l_N/kg_{oTS} (Minimum 307 l_N/kg_{oTS}, Maximum 331 l_N/kg_{oTS}). Dementsprechend unterscheiden sich auch die durchschnittlichen Methangehalte im Biogas nur marginal (55 bis 57 %). Im Gegensatz dazu zeigen sich in den Methanhektarerträgen große Spannweiten (Minimum 2136 m³/ha, Maximum 6506 m³/ha).

Die Silagen erzielen höhere Gaserträge als die frischen Ausgangsmaterialien (Ausnahme EC85, Kontrolle und 360 kgN/ha-Düngevariante). Der spezifische Biogasertrag liegt in einem Bereich von 573 l_N/kg_{oTS} bis 653 l_N/kg_{oTS}, der maximale Unterschied beträgt 80 l_N/kg_{oTS}. Bei der spezifischen Methanproduktion unterscheiden sich die Mittelwerte um 63 l_N/kg_{oTS} (Minimum 323 l_N/kg_{oTS}, Maximum 386 l_N/kg_{oTS}). Auch der durchschnittliche Methangehalt des Biogases ist mit 56 bis 59 % durchweg höher als bei den frischen Substraten.

Tab. 35: Weizen, Düngerart Kas, beide Versuchsjahre – Ergebnisse aus dem Batch zur substratspezifischen Biogas- und Methanproduktion, zum durchschnittlichen Methangehalt des Biogases und zum Methanhektarertrag mit MHE¹⁾: Methanhektarertrag Berechnung basiert auf manueller Beprobung, MHE²⁾ Berechnung basiert auf maschineller Beprobung, F: frisches Substrat, S: Silage

EC	[kgN/ha]	Konser- vierung	[l _N /kg _{OTS}]		[%] CH ₄ -Gehalt des Biogases	[m ³ _N /ha]	
	Dünge- stufe		Spezifische Biogas- produktion	Spezifische Methan- produktion		MHE ¹⁾	MHE ²⁾
69	0	F	559	309	55	2136	
	240	F	546	307	56	4223	
	360	F	550	315	57	4174	
73	0	F	589	323	55	2278	
		S	644	369	57		
	240	F	567	319	56	4758	
		S	653	386	59		
	360	F	568	319	56	4760	
		S	649	383	59		
77	0	F	576	317	55	2428	
		S	630	359	57		
	240	F	595	331	56	5327	
		S	645	373	58		
	360	F	587	326	56	5184	
		S	636	369	58		
85	0	F	577	316	55	2875	1884
		S	577	324	56		
	240	F	581	324	56	6506	4262
		S	595	338	57		
	360	F	570	317	56	6231	4036
		S	573	323	56		

Abb. 40 zeigt mittels Boxplots die spezifische Biogas- und Methanproduktion der frischen Substrate und der Silagen bezogen auf das Entwicklungsstadium in Abhängigkeit von der Dünge- und Düngestufe. Die Boxen der frischen Substrate liegen in einem ähnlichen Wertebereich. Bei den Silagen sind in den EC-Stadien 73 und 77 die Boxen sehr groß, die Werte streuen also stark, was auf den unterschiedlichen Inhaltsstoffen der Silagen aus den Jahren 2007 und 2008 und somit den Silagequalitäten beruht (vgl. Kapitel 5.2.2.1 und Abb. A 5). Darüber hinaus erzielen diese Varianten deutlich höhere Gaserträge als die frischen Substrate.

Um zu überprüfen, in wie weit sich die Düngeintensität auf die Gaserträge auswirkt, wurde der Kruskal-Wallis-Test durchgeführt. Dieser weist nur für sehr wenige Varianten (Tab. 36 und Tab. A 51) signifikante Unterschiede in der spezifischen Biogas- und Methanproduktion nach, und zwar bei den frischen Substraten lediglich zwischen der 1. und der 3. Dünge- und Düngestufe im EC 77. Bei den Silagen bestehen

Unterschiede im Methanertrag im EC 85 zwischen 1. und 3. sowie zwischen der 3. und 4. Düngestufe.

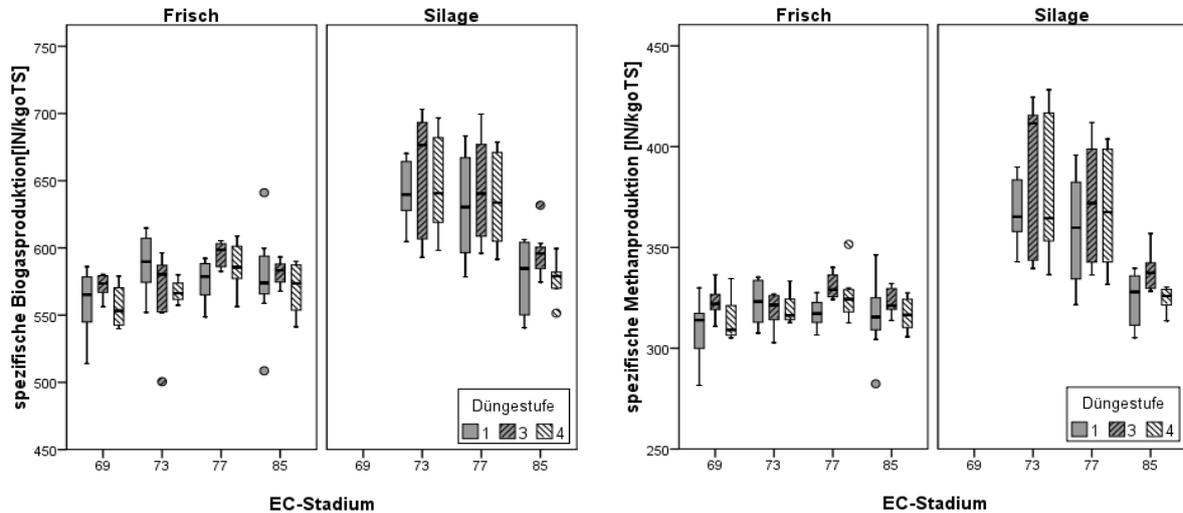


Abb. 40: Weizen, frische Substrate und Silage, beide Versuchsjahre – Ergebnisse aus dem Batch zur spezifischen Biogas- und Methanproduktion in Abhängigkeit von der Düngestufe

Tab. 36: Weizen, Batch, signifikante Unterschiede in der spezifischen Biogas- und Methanproduktion zwischen den Düngevarianten nach dem Kruskal-Wallis-Test

mit n.s.: nicht signifikant, *: signifikanter, **: hoch signifikanter, ***: höchst signifikanter Unterschied, F: frisches Substrat, S: Silage

Parameter	Termin	Zustand	Düngestufe	3	4
Spezifische Biogasproduktion	77	F	1	*	n.s.
			3		n.s.
	85	S	1	n.s.	n.s.
			3		*
Spezifische Methanproduktion	77	F	1	**	n.s.
			3		n.s.
	85	S	1	*	n.s.
			3		***

Abb. 41 stellt in Form von Boxplots den Methanhektarertrag bezogen auf das Entwicklungsstadium in Abhängigkeit von der Düngeintensität dar (frische Substrate). Wie entsprechend den Ergebnissen zu den Trockenmasseerträgen zu erwarten war

(vgl. Kapitel 5.2.1.1), liegen die Methanhektarerträge der ungedüngten Varianten deutlich unter denen der gedüngten Varianten, was vom Kruskal-Wallis-Test für alle Entwicklungsstadien (höchst signifikante Unterschiede $p = 0,001$) bestätigt wird. Eine Steigerung der Düngeintensität von 240 kgN/ha auf 360 kgN/ha hat keine Zunahme des Methanhektarertrags zur Folge, der Signifikanztest kann zwischen den gedüngten Varianten keinen Unterschied feststellen.

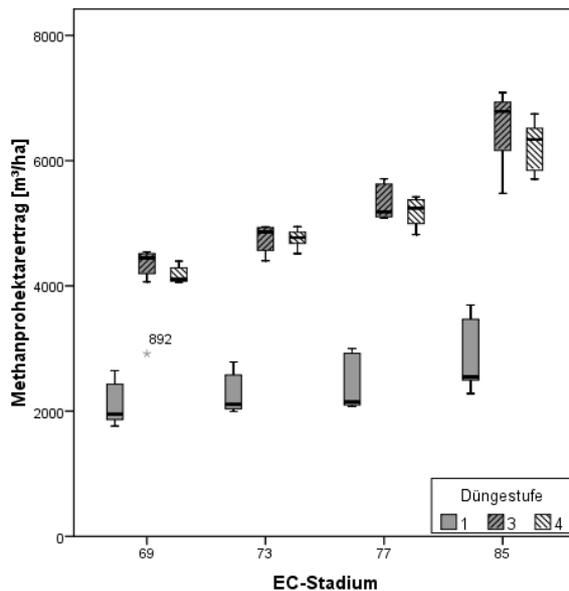


Abb. 41: Weizen, frische Substrate, beide Versuchsjahre– Ergebnisse aus dem Batch zum Methanhektarertrag in Abhängigkeit von der Düngeintensität

Um der Fragestellung nachzugehen, ob und inwieweit das Entwicklungsstadium bzw. der Erntetermin einen Einfluss auf die Parameter spezifische Biogas- und Methanproduktion hat, sind in Abb. 42 beide Parameter in Bezug auf die Düngeintensität in Abhängigkeit vom EC-Stadium als Boxplots dargestellt. Auch hier liegt wie erwartet eine breite Streuung der Werte im EC 73 und 77 vor. Zur Feststellung von signifikanten Unterschieden zwischen den Gasproduktionen der einzelnen Erntestadien wurde der Kruskal-Wallis-Test durchgeführt (Tab. 37).

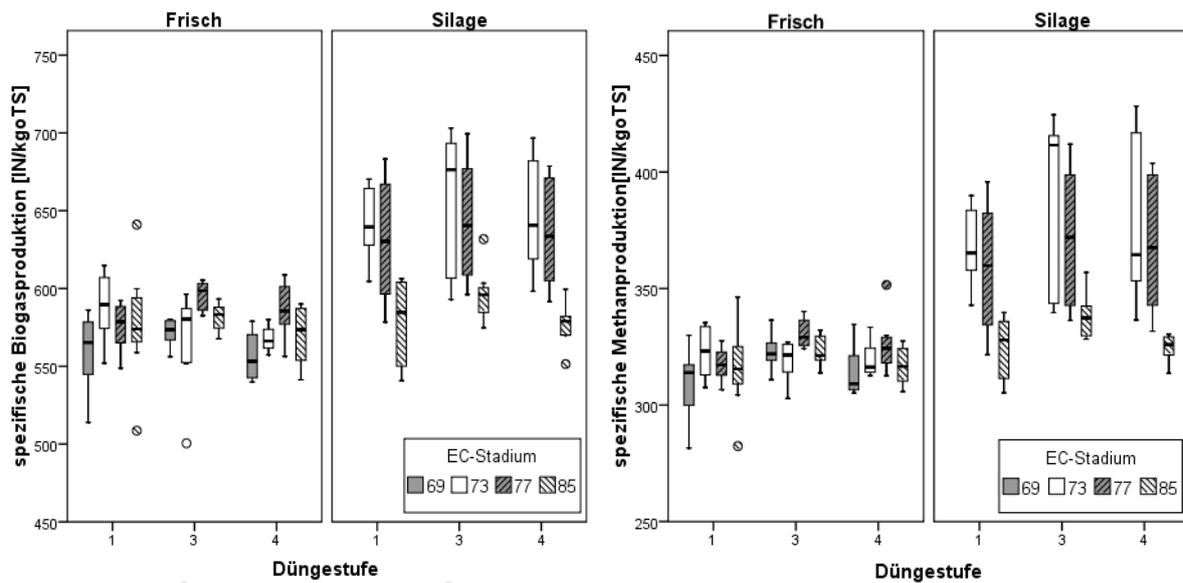


Abb. 42: Weizen frische Substrate und Silage, beide Versuchsjahre – Ergebnisse aus dem Batch zur spezifischen Biogas- und Methanproduktion in Abhängigkeit vom Entwicklungsstadium

Mit dem Kruskal-Wallis-Test konnten für die frischen Substrate einige wenige signifikante Unterschiede in der Biogas- bzw. Methanproduktion zwischen den Ernteterminen nachgewiesen werden und zwar bei den Varianten, deren Boxen in Abb. 42 nicht oder nur geringfügig überlappen, was beim Parameter Biogasproduktion in der 3. und 4. Düngestufe und beim Parameter Methanproduktion in der 3. Düngestufe der Fall ist. Für die Silagen lassen sich in allen Düngestufen signifikante bis höchst signifikante Unterschiede zwischen den beiden frühen Entwicklungsstadien (EC 73 und 77) und dem EC 85 nachweisen. Die genauen Signifikanzniveaus finden sich im Anhang (Tab. A 52).

Tab. 37: Weizen, Batch, signifikante Unterschiede in der spezifischen Biogas- und Methanproduktion zwischen den Entwicklungsstadien nach dem Kruskal-Wallis-Test

mit n.s.: nicht signifikant, *: signifikanter, **: hoch signifikanter, ***: höchst signifikanter Unterschied, F: frisches Substrat, S: Silage

Parameter	Düngestufe	Zustand	EC	73	77	85
Spezifische Biogasproduktion	3	F	69	n.s.	***	*
			73		*	n.s.
			77			*
	4	F	69	n.s.	**	n.s.
			73		*	n.s.
			77			n.s.
	1	S	73		n.s.	***
			77			*
	3	S	73		n.s.	**
			77			**
	4	S	73		n.s.	***
			77			***
Spezifische Methanproduktion	3	F	69	n.s.	*	n.s.
			73		*	n.s.
			77			n.s.
	1	S	73		n.s.	***
			77			**
	3	S	73		n.s.	**
			77			**
	4	S	73		n.s.	***
			77			***

Abb. 43 stellt für die frischen Substrate in Form von Boxplots den Methanhektarertrag bezogen auf die Düngintensität in Abhängigkeit vom Erntestadium dar. Wie entsprechend den Ergebnissen zu den Trockenmasseerträgen zu erwarten war (vgl. Kapitel 5.2.1.1), liegen die Methanhektarerträge der Kontrollvariante deutlich unter denen der gedüngten Varianten. Bei der Kontrollvariante zieht ein späterer Erntetermin nur geringe Steigerungen des Methanhektarertrages nach sich. Bei den gedüngten Varianten hat ein späterer Erntetermin immer eine Steigerung des Methanhektarertrages zur Folge, was auch der Kruskal-Wallis-Test (Tab. 38) bestätigt. Dieser weist bei der Kontrollvariante lediglich einen signifikanten Unterschied zwischen den Methanhektarerträgen des EC 69 und des EC 85 nach. Für die gedüngten Varianten

liegen jedoch signifikante bis höchst signifikante Unterschiede im Methanhektarertrag zwischen allen Entwicklungsstadien vor. Die genauen Signifikanzniveaus finden sich im Anhang (Tab. A 53).

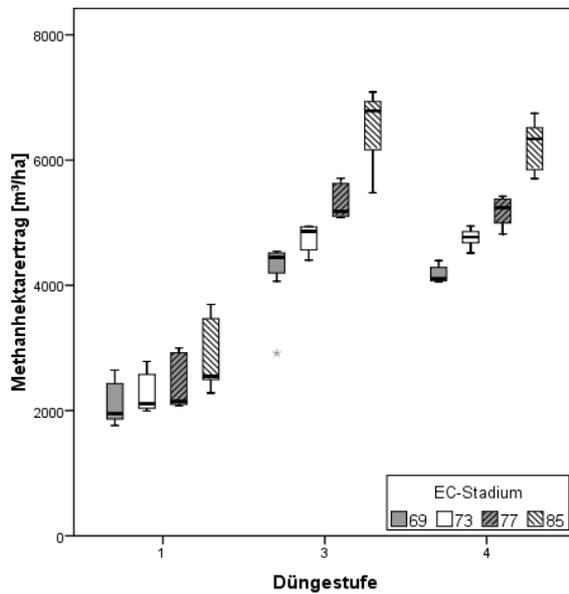


Abb. 43: Weizen, frische Substrate– Ergebnisse aus dem Batch zum Methanhektarertrag in Abhängigkeit vom Entwicklungsstadium

Tab. 38: Weizen, Batch, signifikante Unterschiede im Methanhektarertrag zwischen den Entwicklungsstadien nach dem Kruskal-Wallis-Test mit n.s.: nicht signifikant, *: signifikanter, **: hoch signifikanter, ***: höchst signifikanter Unterschied

Parameter	Düngestufe	EC	73	77	85
Methanhektarertrag	1	69	n.s.	n.s.	*
		73		n.s.	n.s.
		77			n.s.
	3	69	*	***	***
		73		***	***
		77			**
	4	69	***	***	***
		73		**	***
		77			***

Bereits bei der Betrachtung der Tab. 35 sowie der Abb. 40 und Abb. 42 fielen die im Vergleich zu den frischen Substraten höheren Gaserträge der Silagen auf. Um festzustellen, ob diese Unterschiede signifikant sind, wurde der Kruskal-Wallis-Test durchgeführt (Tab. 39 und Tab. A 54). Wie zu erwarten war, liegen für alle

Düngestufen der Entwicklungsstadien EC 73 und EC 77 hoch bis höchst signifikante Unterschiede in der spezifischen Biogas- und Methanproduktion zwischen frischen Substraten und Silagen vor. Im EC 85 existiert lediglich bei der 3. Düngestufe ein hoch signifikanter Unterschied für die Methanproduktion zwischen Frischsubstrat und Silage.

Tab. 39: Weizen, Batch, signifikante Unterschiede in der spezifischen Biogas- und Methanproduktion zwischen frischen Substraten und Silagen nach dem Kruskal-Wallis-Test
mit n.s.: nicht signifikant, *: signifikanter, **: hoch signifikanter, ***: höchst signifikanter Unterschied

Parameter	EC bzw. Düngestufe	73	77	85
Spezifische Biogasproduktion	1	***	***	n.s.
	3	***	**	n.s.
	4	***	**	n.s.
Spezifische Methanproduktion	1	***	***	n.s.
	3	***	***	**
	4	***	**	n.s.

Zusammenfassend sind folgende Ergebnisse und Tendenzen aus der Untersuchung des GPS-Weizens im Batch-Versuch festzuhalten:

- Die Düngeintensität hat keinen Einfluss auf die spezifische Biogas- und Methanproduktion, jedoch über den Trockenmasseertrag auf den Methanhektarertrag, wobei eine Steigerung der Düngeintensität über 240 kgN/ha zu keiner weiteren Ertragssteigerung führt.
- Das Entwicklungsstadium hat bei den frischen Substraten keinen Einfluss auf die spezifische Biogas- und Methanproduktion, jedoch über den Trockenmasseertrag auf den Methanhektarertrag (gedüngte Varianten). Bei den Silagen hat das Entwicklungsstadium einen Einfluss auf die Gasproduktion, die früheren Erntestadien erreichen höhere Erträge als die Varianten des EC 85.
- Silagen erzielen höhere spezifische Biogas- und Methanerträge als die frischen Substrate.

5.3.2.2 Mais

In Tab. 40 sind die Mittelwerte für die spezifische Biogas- bzw. Methanproduktion, sowie der durchschnittliche Methangehalt des Biogases als auch die Methanhektarerträge der einzelnen Maisvarianten dargestellt.

Tab. 40: Mais, Düngerart Kas, beide Versuchsjahre – Ergebnisse aus dem Batch zur substratspezifischen Biogas- und Methanproduktion, zum durchschnittlichen Methangehalt des Biogases und zum Methanhektarertrag mit MHE¹⁾:Methanhektarertrag Berechnung basiert auf manueller Beprobung, MHE²⁾ Berechnung basiert auf maschineller Beprobung, F: frisches Substrat, S: Silage

T	[kgN/ha] Dünge- stufe	Konser- vierung	[l _N /kg _{oTS}]		[%] CH ₄ -Gehalt des Biogases	[m ³ _N /ha]	
			Spezifische Biogas- produktion	Spezifische Methan- produktion		MHE ¹⁾	MHE ²⁾
7	0	F	608	354	58	3734	
	240	F	568	320	56	4277	
	360	F	565	320	57	4389	
8	0	F	603	330	55	4793	
		S	594	334	56		
	240	F	572	318	56	5851	
		S	619	348	56		
	360	F	589	328	56	6454	
		S	631	354	56		
9	0	F	600	327	55	4790	4102
		S	643	358	56		
	240	F	552	307	56	6667	5278
		S	635	356	56		
	360	F	582	325	56	7201	5647
		S	632	355	56		

Die Mittelwerte für die spezifische Biogasproduktion der frischen Substrate liegen in einem Bereich von 552 l_N/kg_{oTS} bis 608 l_N/kg_{oTS}, der maximale Unterschied beträgt 56 l_N/kg_{oTS}. Bei der spezifischen Methanproduktion unterscheiden sich die Mittelwerte um 47 l_N/kg_{oTS} (Minimum 307 l_N/kg_{oTS}, Maximum 354 l_N/kg_{oTS}). Dementsprechend unterscheiden sich auch die durchschnittlichen Methangehalte im Biogas nur marginal (55 bis 58 %). Im Gegensatz dazu zeigen sich in den Methanhektarerträgen große Spannweiten (Minimum 3734 m³/ha, Maximum 7201 m³/ha).

Die Silagen erzielen höhere Gaserträge (Ausnahme Biogasproduktion der Kontrollvariante im 8. Erntetermin). Der spezifische Biogasertrag liegt in einem

Bereich von 594 I_N/kg_{oTS} bis 643 I_N/kg_{oTS}, der maximale Unterschied beträgt 49 I_N/kg_{oTS}. Bei der spezifischen Methanproduktion unterscheiden sich die Mittelwerte um 24 I_N/kg_{oTS} (Minimum 334 I_N/kg_{oTS}, Maximum 358 I_N/kg_{oTS}). Der durchschnittliche Methangehalt des Biogases liegt bei 56 %.

Abb. 44 zeigt mittels Boxplots die spezifische Biogas- und Methanproduktion der frischen Substrate und der Silagen bezogen auf den Erntetermin in Abhängigkeit von der Düngestufe. Die Boxen der frischen Substrate liegen in einem ähnlichen Wertebereich. Bei den Silagen ist die Box der Kontrollvariante des 8. Erntetermins sehr groß, die Werte streuen also stark, was darauf zurückzuführen ist, dass die Silage aus 2007 wesentlich geringere Gaserträge erzielte als wie entsprechende Silage in 2008 (vgl. Abb. A 6). Von dieser Ausnahme abgesehen erzielen die Silagen deutlich höhere Gaserträge als die frischen Substrate.

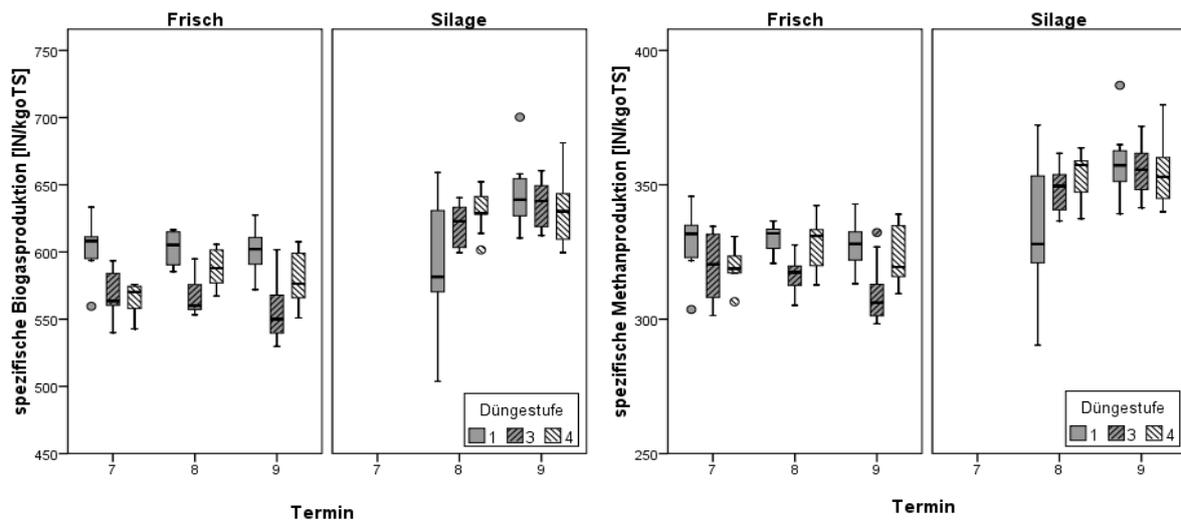


Abb. 44: Mais, frische Substrate und Silage, beide Versuchsjahre – Ergebnisse aus dem Batch zur spezifischen Biogas- und Methanproduktion in Abhängigkeit von der Düngestufe

Um zu überprüfen, inwieweit sich die Düngeintensität auf die Gaserträge auswirkt, wurde der Kruskal-Wallis-Test durchgeführt. Dieser weist nur für einen Teil der frischen Substratvarianten (Tab. 41) signifikante Unterschiede (Signifikanzniveaus siehe Tab. A 55) in der spezifischen Biogas- und Methanproduktion nach, und zwar bei den Varianten, deren Boxen sich nicht bzw. nur geringfügig überlappen. Dieses trifft vor allem für die Kontrollvarianten zu, die in den meisten Fällen höhere Gaserträge als die gedüngten Varianten erzielen. Für die Silagen ergeben sich keine

signifikanten Unterschiede weder für die spezifische Biogas- noch für die Methanproduktion.

Tab. 41: Mais, frische Substrate, Batch, signifikante Unterschiede in der spezifischen Biogas- und Methanproduktion zwischen den Düngevarianten nach dem Kruskal-Wallis-Test mit n.s.: nicht signifikant, *: signifikanter, **: hoch signifikanter, ***: höchst signifikanter Unterschied

Parameter	Termin	Düngestufe	3	4
Spezifische Biogasproduktion	7	1	**	**
		3		n.s.
	8	1	***	*
		3		*
	9	1	***	n.s.
		3		*
Spezifische Methanproduktion	7	1	n.s.	*
		3		n.s.
	8	1	***	n.s.
		3		**
	9	1	**	n.s.
		3		**

Abb. 45 stellt in Form von Boxplots den Methanhektarertrag der frischen Substratvarianten bezogen auf den Erntetermin in Abhängigkeit von der Düngeintensität dar. Wie entsprechend den Ergebnissen zu den Trockenmasseerträgen zu erwarten war (vgl. Kapitel 5.2.1.2), liegen die Methanhektarerträge der ungedüngten Varianten deutlich unter denen der gedüngten Varianten. Die Boxen für den Methanhektarertrag der Kontrollvariante überlappen zum 7. und 8. Erntetermin teilweise mit denen der 240 kgN/ha-Düngevariante, zum Haupterntetermin sind die Methanhektarerträge der gedüngten Varianten jedoch deutlich höher, wie auch der Kruskal-Wallis-Test (Tab. 42) zeigt. Eine Steigerung der Düngeintensität von 240 kgN/ha auf 360 kgN/ha hat ab dem 8. Erntetermin eine Zunahme des Methanhektarertrags zur Folge. Die genauen Signifikanzniveaus finden sich im Anhang (Tab. A 56).

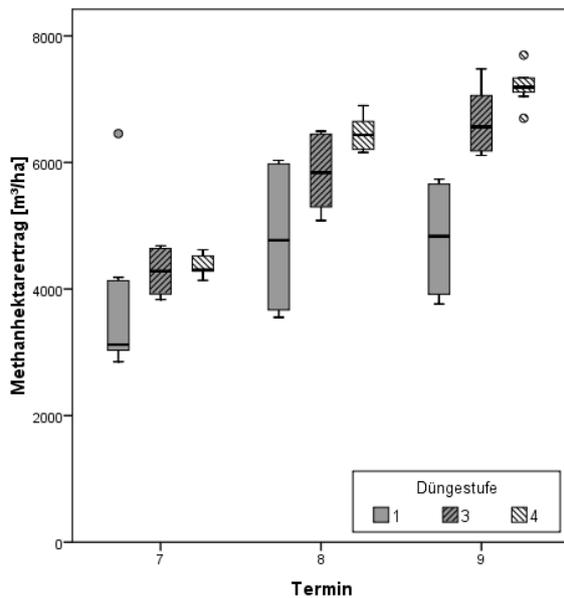


Abb. 45: Mais, frische Substrate, beide Versuchsjahre– Ergebnisse aus dem Batch zum Methanhektarertrag in Abhängigkeit von der Düngestufe

Tab. 42: Mais, frische Substrate, Batch, signifikante Unterschiede im Methanhektarertrag zwischen den Düngevarianten nach dem Kruskal-Wallis-Test mit n.s.: nicht signifikant, *: signifikanter, **: hoch signifikanter, ***: höchst signifikanter Unterschied

Parameter	Termin	Düngestufe	3	4
Methanhektarertrag	7	1	n.s.	*
		3		n.s.
	8	1	n.s.	***
		3		*
	9	1	***	***
		3		*

Um der Fragestellung nachzugehen, ob und inwieweit das Entwicklungsstadium bzw. der Erntetermin einen Einfluss auf die Parameter spezifische Biogas- und Methanproduktion hat, sind in Abb. 46 beide Parameter in Bezug auf die Düngestufe in Abhängigkeit vom Erntetermin als Boxplots dargestellt. Sowohl für die spezifische Biogas- als auch für die spezifische Methanproduktion liegen die einzelnen Boxen in einem ähnlichen Wertebereich, wobei bei den Silagen wiederum die starke Streuung der Werte der Kontrollvariante im 7. Erntetermin auffällig ist. Zur Feststellung von signifikanten Unterschieden zwischen den Gasproduktionen der einzelnen Erntestadien wurde der Kruskal-Wallis-Test durchgeführt. Bei den frischen Substraten liegen lediglich bei der 360 kgN/ha-Düngevariante zwischen dem 7. und

8. Erntetermin hoch signifikante Unterschiede in der Biogasproduktion ($p = 0,003$) und signifikante Unterschiede in der Methanproduktion ($p = 0,05$) vor. Bei den Silagen sind nur bei der Kontrollvariante signifikante Unterschiede in der Biogasproduktion ($p = 0,023$) und der Methanproduktion ($p = 0,034$) zwischen den Ernteterminen nachweisbar.

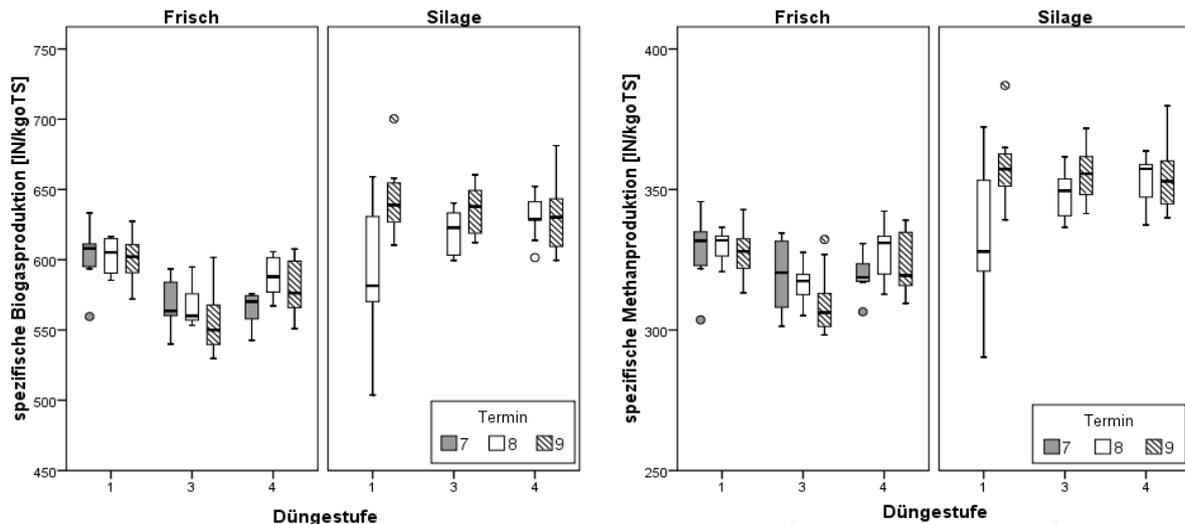


Abb. 46: Mais, frische Substrate und Silage, beide Versuchsjahre – Ergebnisse aus dem Batch zur spezifischen Biogas- und Methanproduktion in Abhängigkeit vom Erntetermin

Abb. 47 stellt in Form von Boxplots den Methanhektarertrag bezogen auf die Düngeintensität in Abhängigkeit vom Erntetermin dar. Bei der Kontrollvariante streuen die Werte zum 8. und 9. Erntetermin sehr stark, deshalb lassen sich bei dieser Variante keine signifikanten Unterschiede nachweisen. Bei den Varianten der 3. und 4. Düngestufe hat ein späterer Erntetermin immer eine Steigerung des Methanhektarertrages zur Folge. Der Signifikanztest weist mit $p = 0,000$ höchst signifikante Unterschiede im Methanhektarertrag zwischen den Ernteterminen nach (Ausnahme 3. Düngestufe zwischen 8. und 9. Erntetermin signifikanter Unterschied mit $p = 0,041$).

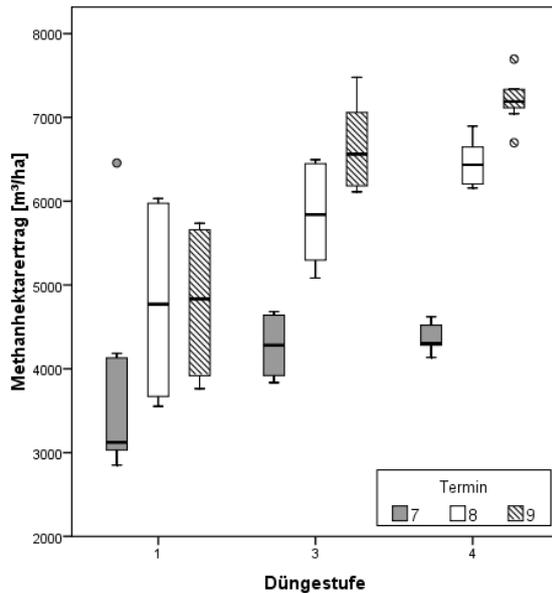


Abb. 47: Mais, frische Substrate, beide Versuchsjahre – Ergebnisse aus dem Batch zum Methanhektarertrag in Abhängigkeit vom Erntetermin

Bereits bei der Betrachtung der Tab. 40 sowie der Abb. 44 und Abb. 46 fielen die im Vergleich zu den frischen Substraten höheren Gaserträge der Silagen auf. Um festzustellen, ob diese Unterschiede signifikant sind, wurde der Kruskal-Wallis-Test durchgeführt. Wie zu erwarten war, liegen für fast alle Düngeufen der beiden Erntetermine 8 und 9 höchst signifikante Unterschiede ($p \leq 0,001$) in der spezifischen Biogas- und Methanproduktion zwischen frischen Substraten und Silagen vor (Ausnahme Kontrollvariante des 8. Erntetermins).

Zusammenfassend sind folgende Ergebnisse und Tendenzen aus der Untersuchung der Mais Monokultur im Batch festzuhalten:

- Die Düngeintensität hat lediglich bei den frischen Substraten einen gewissen Einfluss auf die spezifische Biogas- und Methanproduktion jedoch ohne klar erkennbare Tendenz. Da eine stärkere Stickstoff-Düngung höhere Trockenmasseerträge nach sich zieht, beeinflusst sie auch den Methanhektarertrag, wobei ab dem 8. Erntetermin eine Steigerung der Düngeintensität über 240 kgN/ha sogar zu einer weiteren Ertragssteigerung führt.
- Das Entwicklungsstadium bzw. der Erntetermin hat weder bei frischen Substraten noch bei Silagen einen Einfluss auf die spezifische Biogas- und Methanproduktion. Allerdings beeinflusst der Erntetermin über den Trockenmasseertrag den Methanhektarertrag.

- Die Silagen erzielen höhere Gaserträge als die frischen Substrate.

5.3.3 Vergleich mit den theoretischen Berechnungen

Für jedes Substrat, welches im frischen Zustand auf den Biogas- und Methanertrag hin untersucht wurde, ist die Zusammensetzung der Inhaltsstoffe bekannt (vgl. Kapitel 4.3.2). Dadurch ist es möglich, die Biogas- und Methanproduktion theoretisch nach den in Kapitel 3.3.5 und 3.3.7 beschriebenen Formeln von KEYMER und SCHILCHER (1999) und WEIßBACH (2008; 2009b) zu berechnen, wobei der Übersichtlichkeit halber nur die Methanproduktion dargestellt ist. Da WEIßBACH (2008; 2009b) keinen Anhaltspunkt zur Berechnung der theoretischen Gasausbeute aus dem Reinstoff Cellulose bietet und zur Bestimmung der Gasausbeute aus Gras zusätzlich der Laborparameter EuIOS erforderlich ist, liegen hier lediglich die berechneten Gaserträge für Weizen und Mais vor.

Im Folgenden werden die gemessenen Methanerträge (HBT und Batch) mit den theoretischen berechneten Methanerträgen verglichen. Hierbei ist zu beachten, dass für jede einzelne Variante einem theoretisch berechneten Wert mindestens drei gemessene Werte gegenüberstehen, was auf die Laborwiederholungen und die beiden Gärtestmethoden zurückzuführen ist. Deshalb wurde jeder einzelne gemessene Wert für die spezifische Methanproduktion mit dem entsprechenden Wert der theoretischen Methanproduktion verglichen. Um das Verhältnis zu veranschaulichen, wurden jeweils die Quotienten aus gemessener und theoretisch berechneter Methanproduktion berechnet und nach Substratart getrennt dargestellt (Abb. 48 bis Abb. 51).

Für Cellulose wurde die theoretische Methanproduktion nach der Formel von KEYMER und SCHILCHER (1999) berechnet. Die Quotienten aus gemessener zu berechneter Methanproduktion (Abb. 48) liegen in einem Bereich von 0,8 bis 1,07, wobei zwei Gruppierungen feststellbar sind. Die gemessenen Methanproduktionen liegen im Batch-Versuch unter den theoretisch berechneten (Mittelwert 0,9), im HBT entsprechen die Messungen den Berechnungen (Mittelwert 1,0).

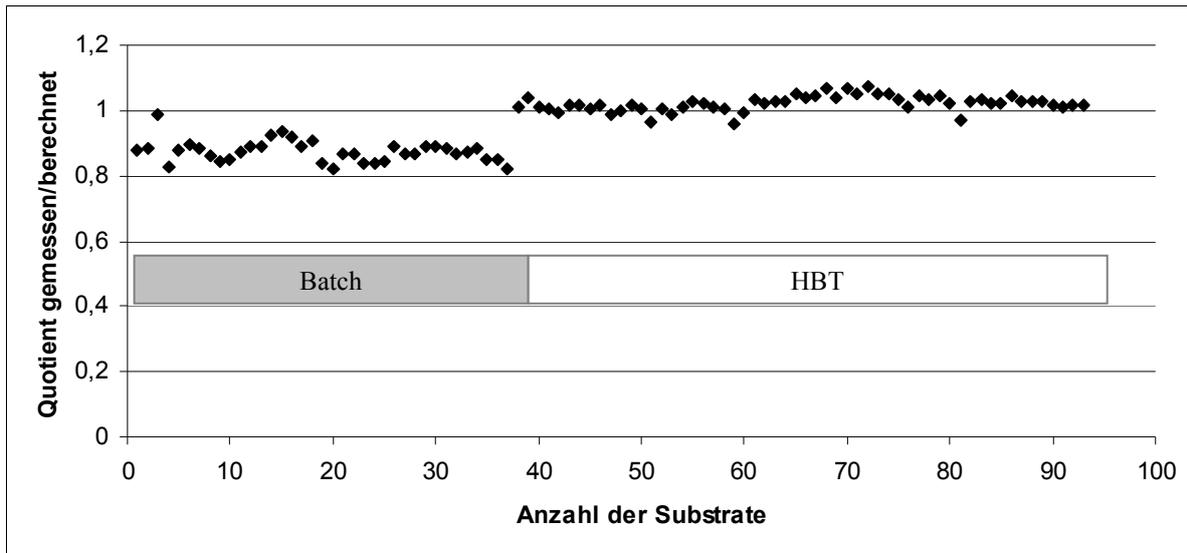


Abb. 48: Cellulose, Quotient der Methanproduktion gemessen / berechnet nach KEYMER und SCHILCHER (1999)

Für Weizen konnte die Methanproduktion sowohl mit der Formel von KEYMER und SCHILCHER (1999) als auch mit der Formel von WEIßBACH (2008; 2009b) theoretisch bestimmt werden. Die Quotienten (Abb. 49) aus gemessenen und mittels der „Keymer-Formel“ berechneten Methanproduktionen liegen in einem Bereich von 1,1 bis 1,5, d.h. die Messwerte sind größer als die berechneten Werte. Auch hier ist wieder eine Gruppierung in Batch und HBT zu erkennen. Die Quotienten, die auf Messungen im Batch zurückgehen, betragen im Durchschnitt 1,2. Die Quotienten, die auf Messungen im HBT beruhen, betragen im Mittel 1,4.

Die Quotienten aus gemessenen und mittels der „Weißbach-Formel“ berechneten Methanproduktionen sind geringer, sie befinden sich in einem Bereich von 0,8 bis 1,2. Die Quotienten, die auf Messungen im Batch zurückgehen, betragen im Durchschnitt 0,9, also liegen die Messwerte unter den Berechnungen. Die Quotienten, die auf Messungen im HBT beruhen, betragen im Mittel 1,2, die Messwerte sind größer als die berechneten Werte.

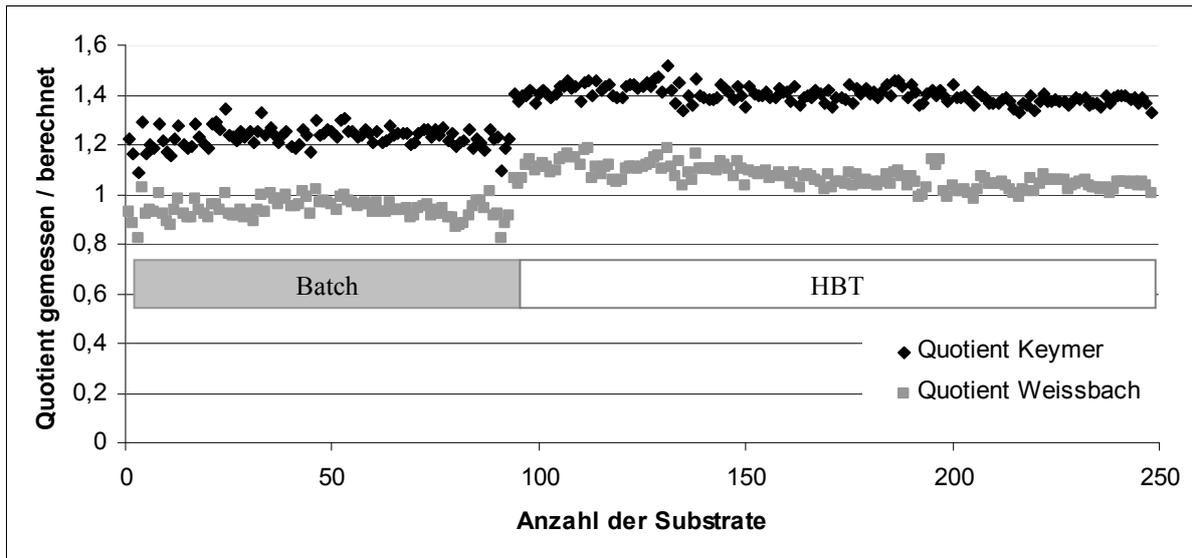


Abb. 49: Weizen, frische Substrate, Quotient der Methanproduktion gemessen / berechnet nach KEYMER und SCHILCHER (1999) sowie WEIßBACH (2008; 2009b)

Auch für Mais kann die theoretische Methanproduktion nach beiden Formeln berechnet werden. Die Quotienten (Abb. 50) aus gemessenen und mittels der „Keymer-Formel“ berechneten Methanproduktionen liegen in einem Bereich von 1,0 bis 1,4, d.h. die Messwerte sind größer als die berechneten Werte. Auch hier ist wieder eine Gruppierung in Batch und HBT zu erkennen. Die Quotienten, die auf Messungen im Batch zurückgehen, betragen im Durchschnitt 1,1. Die Quotienten, die auf Messungen im HBT beruhen, betragen im Mittel 1,3.

Im Gegensatz dazu sind die Quotienten aus gemessenen und mittels der „Weißbach-Formel“ berechneten Methanproduktionen geringer, sie befinden sich in einem Bereich von 0,8 bis 1,4. Die Quotienten, die auf Messungen im Batch zurückgehen, betragen im Durchschnitt 0,9, also liegen die Messwerte unter den Berechnungen. Die Quotienten, die auf Messungen im HBT beruhen, betragen im Mittel 1,1, die Messwerte sind größer als die berechneten Werte.

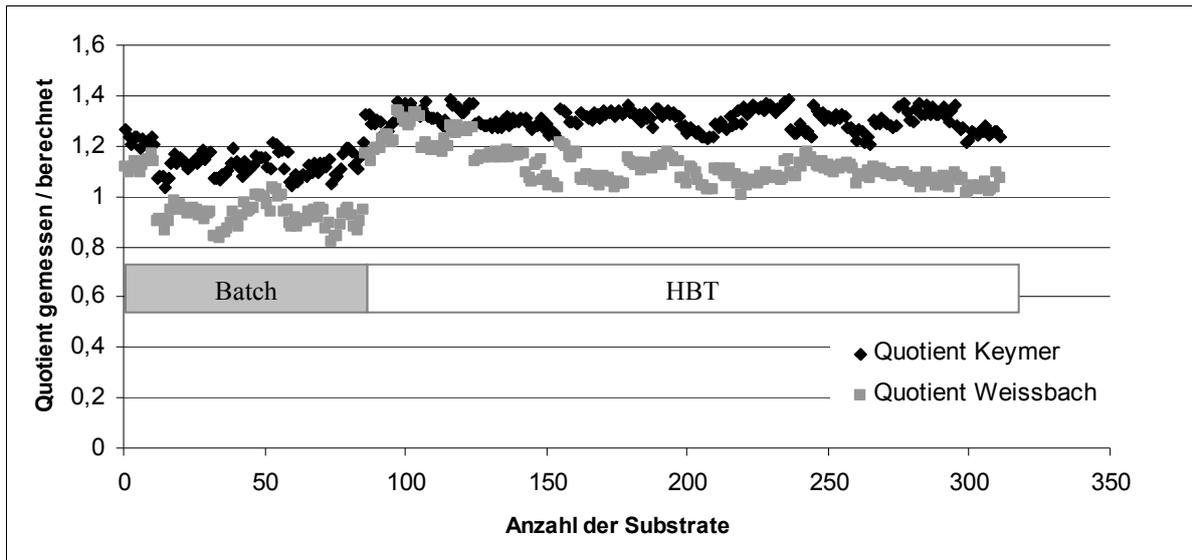


Abb. 50: Mais, frische Substrate, Quotient der Methanproduktion gemessen / berechnet nach KEYMER und SCHILCHER (1999) sowie WEIßBACH (2008; 2009b)

Beim Deutschen Weidelgras liegen die Quotienten aus gemessenen und mit Hilfe der „Keymer-Formel“ berechneten Methanproduktionen (Abb. 51) in einem Bereich von 1,1, bis 1,4, der Mittelwert beträgt 1,3. Auffällig ist auch hier eine gewisse Gruppierung in zwei Bereiche. Die Substrate 1 bis 49 gehören zum 1. Schnitt, die Quotienten weisen nur eine geringe Streuung um den Mittelwert von 1,2 auf. Alle anderen Substrate stammen aus dem 2. bis 4. Schnitt, die Quotienten streuen stärker um den Mittelwert 1,3 (Abb. 51).

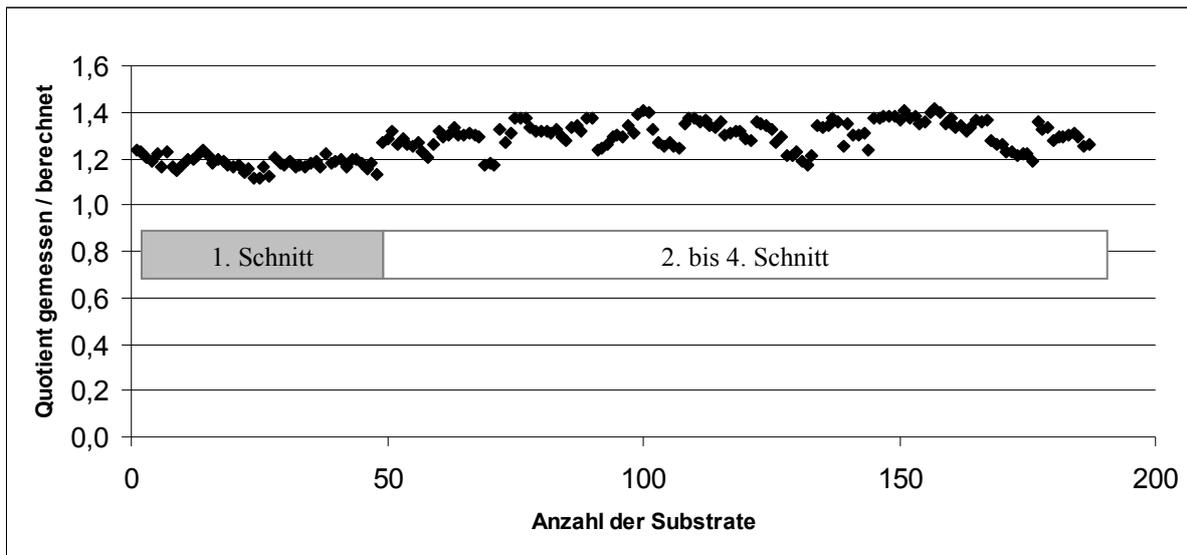


Abb. 51: Deutsches Weidelgras, frische Substrate, Quotient der Methanproduktion gemessen / berechnet nach KEYMER und SCHILCHER (1999)

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass

- die Formel von KEYMER und SCHILCHER (1999) die mit HBT und Batch gemessenen Methanerträge unterschätzt, mit der Ausnahme des Reinstoffs Cellulose,
- die Formel von WEIßBACH (2008; 2009b) für Weizen und Mais eine bessere Übereinstimmung der berechneten mit den mittels HBT und Batch gemessenen Methanproduktionen erzielt.

5.4 Vergleich der Gärtestapparaturen

Bei dem in Kapitel 5.3.3 durchgeführten Vergleich der gemessenen und der theoretisch berechneten spezifischen Methanproduktionen wurde bei den Substraten, die in beiden Gärtestapparaturen untersucht wurden, Gruppierungen der Ergebnisse bzw. der Quotienten festgestellt. Diese Gruppierungen entsprechen den für den Gärversuch verwendeten Apparaturen (HBT und Batch-Versuch). Das legt die Wahrscheinlichkeit nahe, dass die Ergebnisse für die spezifische Biogas- und Methanproduktion und damit auch des Methanhektarertrages je nach verwendeter Versuchsanordnung voneinander abweichen. Diese Fragestellung wird in den folgenden Kapiteln 5.4.1 bis 5.4.4 näher untersucht. Dabei fließen ausschließlich die Ergebnisse der Substratvarianten in die Auswertung mit ein, die in beiden Versuchsanordnungen untersucht wurden, d.h. Cellulose sowie die Frischsubstrate

Weizen und Mais (Standort Hohenschulen), die mit mineralischem Dünger in den Düngeintensitäten 0, 240 und 360 kgN/ha gedüngt wurden (vgl. Kapitel 4.3).

5.4.1 Cellulose

Da Cellulose als Referenzsubstrat in allen Gärversuchen eingesetzt wurde, beträgt die Anzahl der Wiederholungen im HBT $n=56$ und im Batch-Versuch $n=37$ (Tab. 43). Cellulose erreicht im HBT im Mittel eine Biogasproduktion von 738 l_N/kg_{oTS} und eine Methanproduktion von 386 l_N/kg_{oTS}, im Batch-Versuch lediglich 640 l_N/kg_{oTS} Biogasproduktion bzw. 331 l_N/kg_{oTS} Methanproduktion. Die Werte für die spezifische Biogas- und Methanproduktion streuen im Batch-Versuch stärker, was einerseits an den Variationskoeffizienten (Tab. 43), andererseits auch an der Größe der Boxen in Abb. 52 zu erkennen ist. Im Durchschnitt werden im Batch-Versuch nur 87% der Biogasausbeute bzw. 85 % der Methanausbeute des HBT erreicht. Um zu überprüfen, ob es sich um signifikante Unterschiede handelt, wurde der Kruskal-Wallis-Test durchgeführt. Dieser bestätigt höchst signifikante Unterschiede ($p = 0,000$) in der spezifischen Biogas- und Methanproduktion zwischen den Gärtestapparaturen.

Tab. 43: Cellulose spezifische Biogas- und Methanproduktion im Vergleich der Gärtestapparaturen mit Standardabw.: Standardabweichung; Verhältnis gibt an, wie viel % der Gasausbeute im Batch-Versuch in Bezug auf den HBT erreicht werden

Gärtestapparatur	Spezifische Biogasproduktion		Spezifische Methanproduktion	
	HBT	Batch	HBT	Batch
Anzahl	56	37	56	37
Mittelwert [l _N /kgoTS]	738	640	386	331
Minimum [l _N /kgoTS]	706	602	363	310
Maximum [l _N /kgoTS]	759	713	405	373
Standardabw. [l _N /kgoTS]	9,0	21,0	8,8	12,6
Variationskoeffizient [%]	1,2	3,3	2,3	3,8
Verhältnis [%]	100	87	100	85

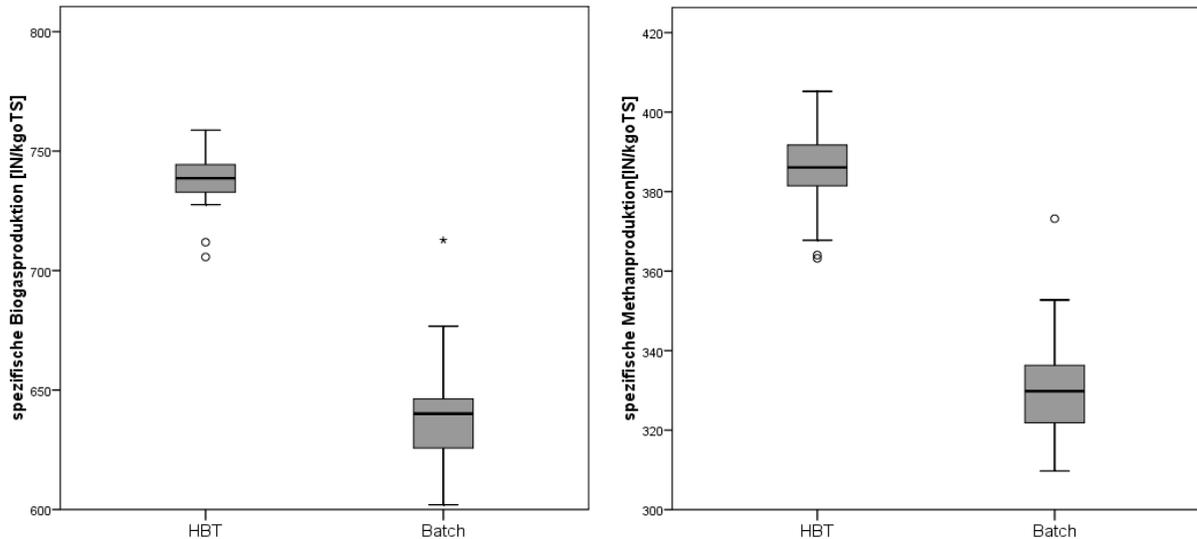


Abb. 52: Cellulose spezifische Biogas- und Methanproduktion im Vergleich der Gärtestapparaturen

5.4.2 Weizen

Weizen wurde als pflanzliches Substrat im HBT jeweils in dreifacher Wiederholung, im Batch-Versuch in fünffacher Wiederholung eingesetzt, so dass die Anzahl der in die Auswertung eingehenden Substratproben (Substratvariante x Wiederholung) im HBT mit $n = 65$ geringer ist als im Batch mit $n = 93$ (Tab. 44).

Tab. 44: Weizen spezifische Biogas- und Methanproduktion im Vergleich der Gärtestapparaturen mit Standardabw.: Standardabweichung; Verhältnis gibt an, wie viel % der Gasausbeute im Batch-Versuch in Bezug auf den HBT erreicht werden

Gärtestapparatur	Spezifische Biogasproduktion		Spezifische Methanproduktion	
	HBT	Batch	HBT	Batch
Anzahl	65	93	65	93
Mittelwert [N/kg _{oTS}]	660	574	363	320
Minimum [N/kg _{oTS}]	632	501	347	282
Maximum [N/kg _{oTS}]	690	641	378	352
Standardabw. [N/kg _{oTS}]	11,5	23,8	7,3	11,6
Variationskoeffizient [%]	1,7	4,1	2,0	3,6
Verhältnis [%]	100	87	100	88

Die Biogasproduktion des Weizens beträgt im HBT durchschnittlich $660 \text{ l}_N/\text{kg}_{\text{OTS}}$ und die Methanproduktion $363 \text{ l}_N/\text{kg}_{\text{OTS}}$, im Batch-Versuch liegt die Biogasproduktion lediglich bei $574 \text{ l}_N/\text{kg}_{\text{OTS}}$ und die Methanproduktion bei $320 \text{ l}_N/\text{kg}_{\text{OTS}}$. Die Werte für die spezifische Biogas- und Methanproduktion streuen im Batch-Versuch stärker, was an den Variationskoeffizienten und den Minimal- und Maximalwerten zu erkennen ist (Tab. 44). Im Durchschnitt werden im Batch-Versuch nur 87 % der Biogasausbeute bzw. 88 % der Methanausbeute des HBT erreicht (Abb. 53). Um zu überprüfen, ob es sich um signifikante Unterschiede handelt, wurde der Kruskal-Wallis-Test durchgeführt. Dieser bestätigt hoch signifikante Unterschiede ($p = 0,002$ bis $p = 0,007$) in der spezifischen Biogas- und Methanproduktion zwischen den Gärtestapparaturen. Diese Unterschiede minimieren sich zumindest teilweise auf der Ebene der Methanhektarerträge (Abb. 54), da die Trockenmasseerträge die verhältnismäßig geringen Unterschiede in der Gasproduktion kompensieren. Die genauen Signifikanzniveaus finden sich im Anhang (Tab. A 57)

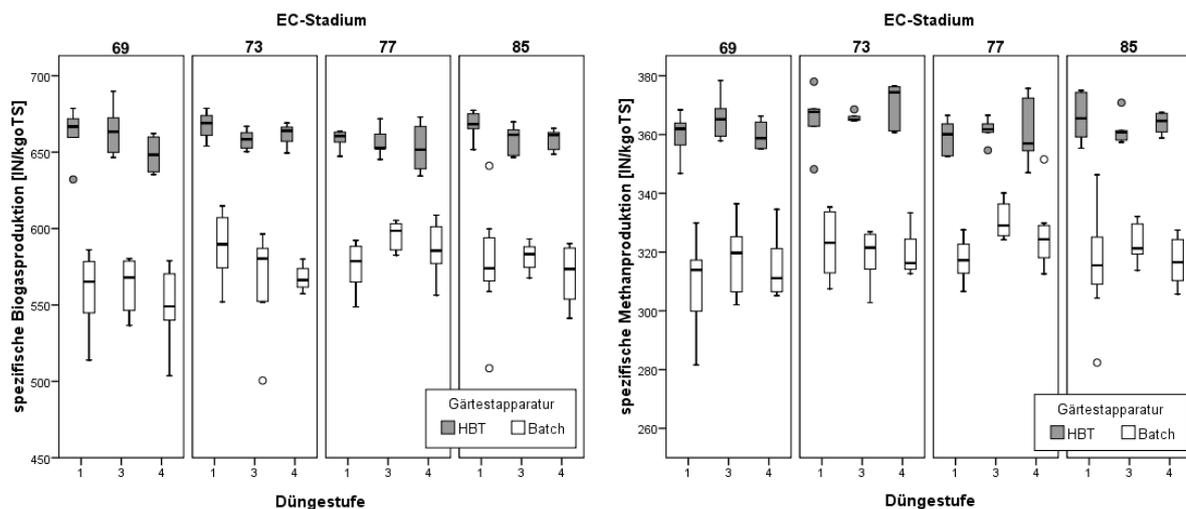


Abb. 53: Weizen, spezifische Biogas- und Methanproduktion Vergleich der Gärtestapparaturen

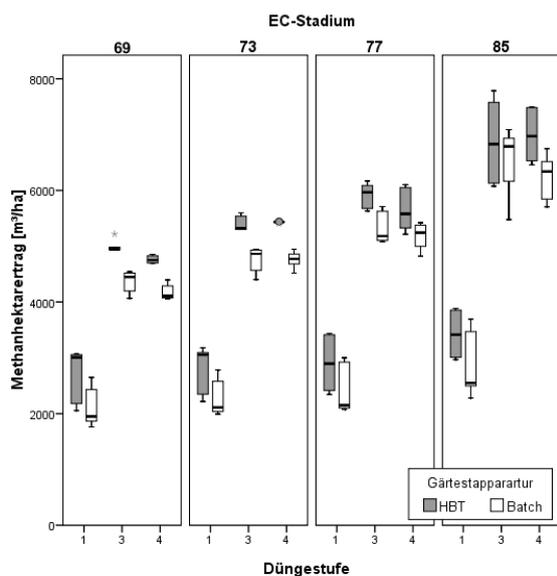


Abb. 54: Weizen, Methanhektarertrag Vergleich der Gärtestapparaturen

5.4.3 Mais

Mais wurde im Batch-Versuch in fünffacher Wiederholung eingesetzt, wodurch die in die Auswertung eingehende Probenanzahl mit $n = 85$ höher ist als die Anzahl der HBT-Proben mit $n = 51$ (Tab. 45).

Tab. 45: Mais, spezifische Biogas- und Methanproduktion im Vergleich der Gärtestapparaturen mit Standardabw.: Standardabweichung; Verhältnis gibt an, wie viel % der Gasausbeute im Batch-Versuch in Bezug auf den HBT erreicht werden

Gärtestapparatur	Spezifische Biogasproduktion		Spezifische Methanproduktion	
	HBT	Batch	HBT	Batch
Anzahl	51	85	51	85
Mittelwert [$\text{I}_\text{N}/\text{kg}_{\text{OTS}}$]	657	581	369	322
Minimum [$\text{I}_\text{N}/\text{kg}_{\text{OTS}}$]	601	530	340	298
Maximum [$\text{I}_\text{N}/\text{kg}_{\text{OTS}}$]	694	633	390	346
Standardabw. [$\text{I}_\text{N}/\text{kg}_{\text{OTS}}$]	21,5	23,7	11,8	11,4
Variationskoeffizient [%]	3,3	4,1	3,2	3,5
Verhältnis [%]	100	88	100	87

Mais erreicht im HBT im Mittel eine Biogasproduktion von 657 l_N/kg_{oTS} und eine Methanproduktion von 369 l_N/kg_{oTS}, im Batch-Versuch lediglich 581 l_N/kg_{oTS} Biogasproduktion bzw. 322 l_N/kg_{oTS} Methanproduktion. Die Werte für die spezifische Biogas- und Methanproduktion streuen in beiden Gärtestapparaturen gleichmäßig stark, was an den nur gering voneinander abweichenden Variationskoeffizienten und der Differenz aus den Maximal- und Minimalwerten zu erkennen ist (Tab. 45). Im Durchschnitt werden im Batch-Versuch nur 88% der Biogasausbeute bzw. 87 % der Methanausbeute des HBT erreicht (Abb. 55). Um zu überprüfen, ob es sich um signifikante Unterschiede handelt, wurde der Kruskal-Wallis-Test durchgeführt. Dieser bestätigt hoch bis höchst signifikante Unterschiede ($p = 0,001$ bis $p = 0,004$) in der spezifischen Biogas- und Methanproduktion zwischen den Gärtestapparaturen. Diese Unterschiede minimieren sich zumindest teilweise auf der Ebene der Methanhektarerträge (Abb. 56), da die Trockenmasseerträge die verhältnismäßig geringen Unterschiede in der Gasproduktion kompensieren. Die genauen Signifikanzniveaus finden sich im Anhang (Tab. A 58).

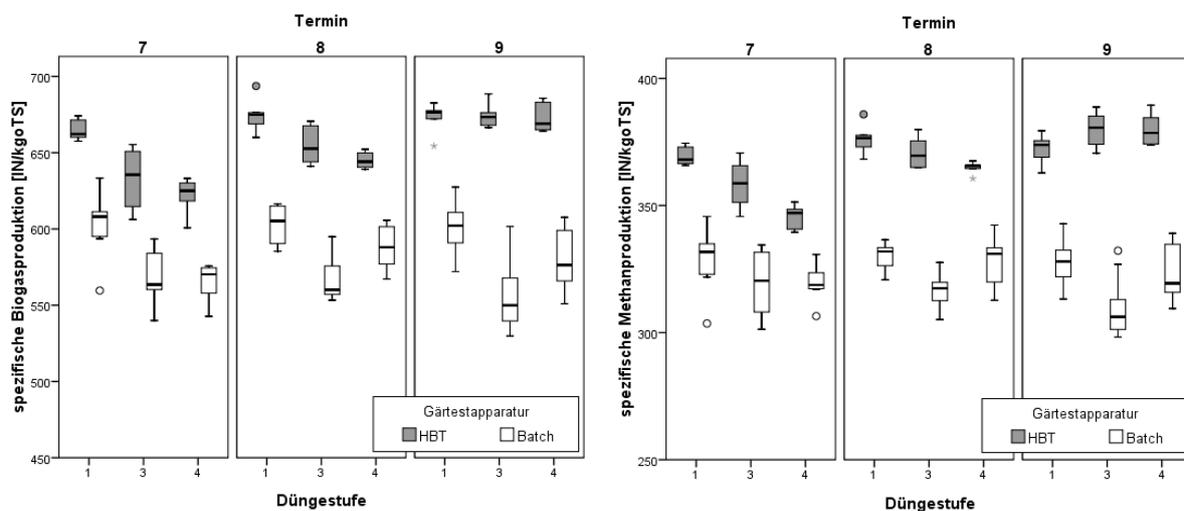


Abb. 55: Mais, spezifische Biogas- und Methanproduktion im Vergleich der Gärtestapparaturen

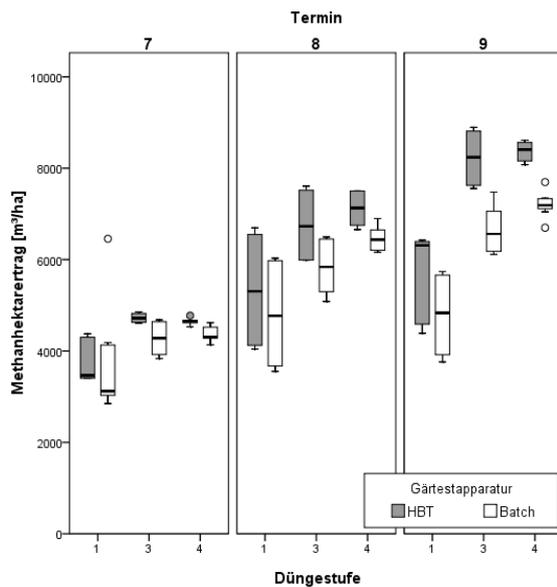


Abb. 56: Mais, Methanhektarertrag im Vergleich der Gärtestapparaturen

5.4.4 Zusammenfassender Vergleich

Nachdem in den Kapiteln 5.4.1 bis 5.4.3 die Substrate, die in beiden Versuchsanlagen auf die spezifische Biogas- und Methanproduktion hin untersucht wurden, einzeln betrachtet wurden, soll nun zusammenfassend der Vergleich der Gärtestapparaturen gemeinsam über alle Substrate erfolgen. Abb. 57 stellt die Ergebnisse aus beiden Versuchsanlagen substratspezifisch in Form von Boxplots dar.

Auch hier wird sofort der Unterschied zwischen den beiden Gärtests deutlich, die Substrate erreichen im Batch-Test wesentlich geringere Gaserträge als im HBT. Darüber hinaus ermöglicht die Abbildung einen guten Vergleich der Gaserträge der Substrate. In beiden Versuchsanlagen erzielen Weizen und Mais ähnliche Gaserträge. Die spezifische Biogas- und Methanproduktion der Cellulose ist etwas höher als die der pflanzlichen Substrate.

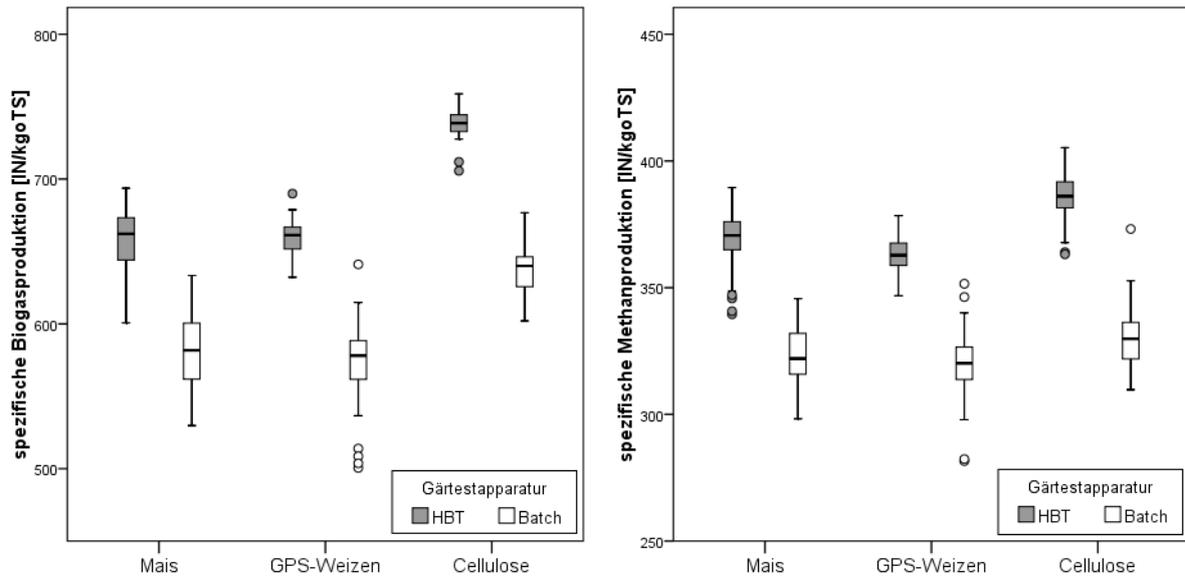


Abb. 57: Weizen, Mais, Cellulose spezifische Biogas- und Methanproduktion Vergleich der Gärtestapparaturen

Um zu überprüfen, ob es eine Korrelation zwischen den im HBT bzw. im Batch-Versuch bestimmten Gaserträgen gibt, wurden die Verhältnisse der Gaserträge aus den Mittelwerten jedes Substrates ($n = 42$) berechnet und in Abb. 58 dargestellt. Die Quotienten der Mittelwerte der Gaserträge (HBT / Batch) befinden sich in einem Bereich von 1,06 bis 1,33, wobei der Mittelwert der Quotienten 1,14 beträgt. Demzufolge sind die im HBT ermittelten Gaserträge durchschnittlich 1,14-mal höher als die im Batch bestimmten Gaserträge.

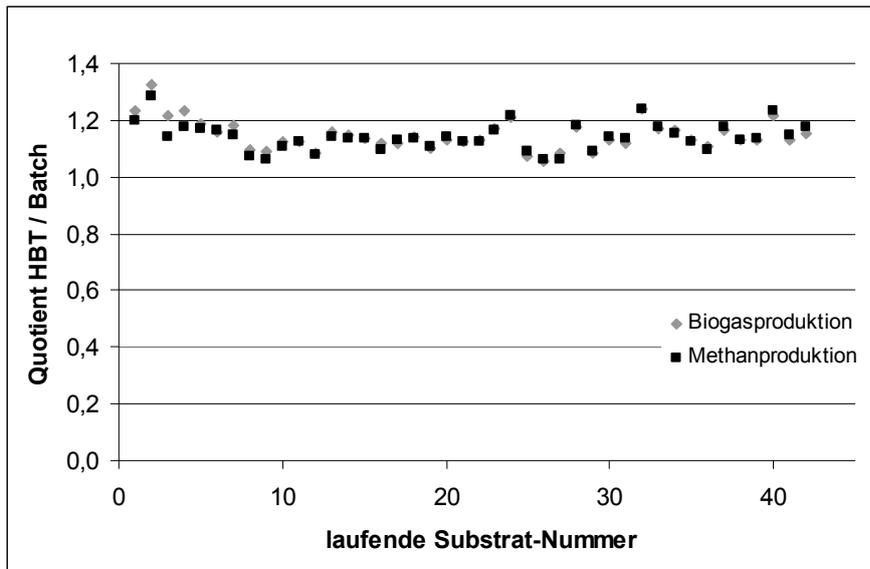


Abb. 58: Vergleich der Ergebnisse beider Untersuchungsmethoden zur Bestimmung der Biogas- und Methanproduktion auf der Basis der Verhältnisse der Mittelwerte mit Substrat 1 bis 24: Weizen, Substrat 25 bis 42 Mais

5.5 Fermentationskinetik

In den vorangegangenen Kapiteln (Kapitel 5.3.1 bis 5.4.4) wurde der Fokus auf die maximal mögliche Biogas- und Methanproduktion der einzelnen Substrate gelegt. Doch nicht nur diese Parameter sind spezifische Kennzeichen der Substrate, sondern auch der Verlauf der Gasbildung, also die Fermentationskinetik. Zur besseren Übersichtlichkeit wird für die Darstellung der Fermentationskinetik lediglich der Parameter Biogasproduktion ausgewählt.

Die Abhängigkeit vom prozentualen Anteil der Biogasproduktion von der Fermentationszeit auf Basis der Versuchsdaten (Abb. 59) wird anhand einer logarithmischen Funktion beschrieben. Mit Hilfe der so erstellten logarithmischen Funktion (Abb. 60) können nachfolgend die Anteile der Biogasproduktion zu einem definierten Zeitpunkt berechnet werden (Tab. 46). In den folgenden Kapiteln 5.5.1 und 5.5.2 wurden nach dieser Vorgehensweise die Kennwerte für Cellulose sowie für die pflanzlichen Substrate bestimmt, wobei jeweils die Varianten der dritten Düngestufe (240 kgN/ha bzw. 320 kgN/ha, mineralischer Dünger) ausgewählt wurden.

5.5.1 HBT

Im Hohenheimer Biogasertragstest kommt es aufgrund der geringen Schlamm- und Substrateinwaagen nur zu einer geringen Anzahl von Ableseereignissen (vgl. Kapitel 4.6.1). Abb. 59 zeigt die Summenkurven der spezifischen Biogasproduktion über den gesamten Versuchszeitraum am Beispiel von Weizen, Mais und Cellulose, wobei jeweils die drei Wiederholungen der Substrate dargestellt sind. Bei den pflanzlichen Substraten beginnt die Biogasbildung sofort und verläuft während der ersten Tage sehr stürmisch, ab etwa dem 5. Tag verlangsamt sie sich. Cellulose ist während der ersten zwei bis drei Tagen durch eine Phase gekennzeichnet, in der fast kein Gas gebildet wird. Erst dann setzt die Gasbildung schlagartig ein und ist am 6. Tag fast vollständig abgeschlossen. Spätestens ab dem 14. Tag nach Versuchsbeginn wird das entstehende Biogas bis zur Endablesung am 28. Tag gesammelt, um genügend Gas zur abschließenden Gasanalyse zur Verfügung zu haben.

Anschließend wurde berechnet, wie groß der Anteil an der Gesamtbioogasproduktion des Substrates an den jeweiligen Versuchstagen war und in Abb. 60 exemplarisch für eine Weizenvariante dargestellt.

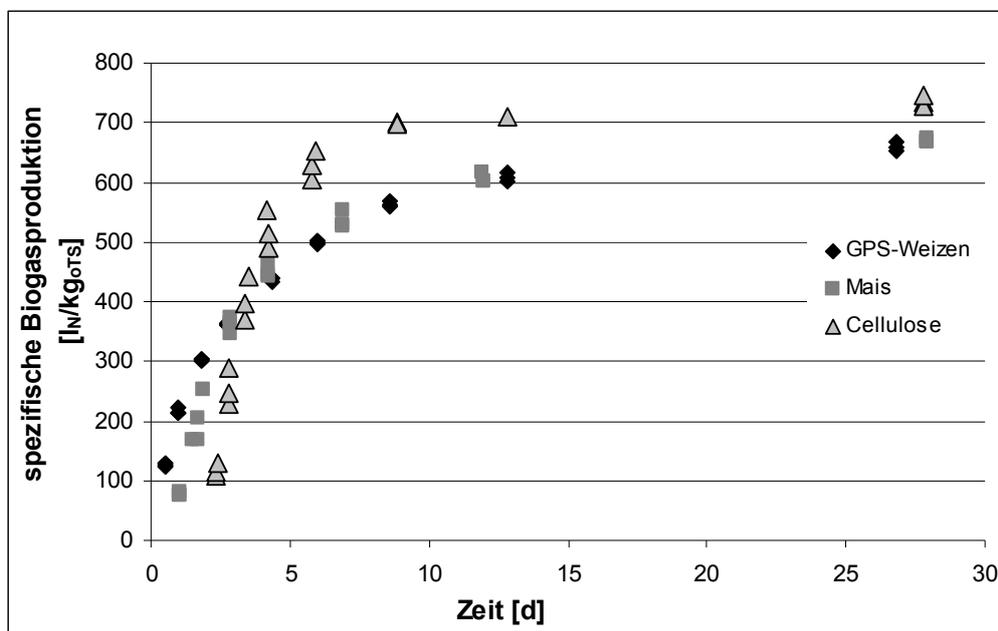


Abb. 59: HBT, Summenkurve der spezifischen Biogasproduktion am Beispiel von GPS-Weizen, Mais 1 und Cellulose
hier Weizen EC 73, Düngeintensität 240kgN/ha, 2007; Mais, Hohenschulen, T9, Düngeintensität 240kgN/ha, 2007

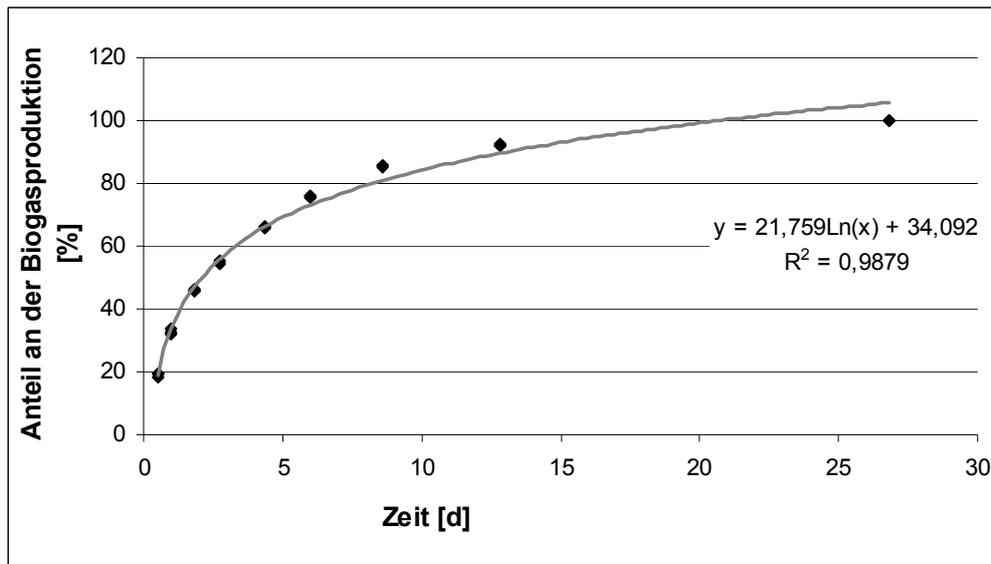


Abb. 60: Anteil an der Summe der Biogasproduktion mit logarithmischer Trendlinie, Gleichung und Bestimmtheitsmaß am Beispiel von GPS-Weizen hier EC 73, Düngeintensität 240kgN/ha, Erntejahr 2007

In Tabelle 46 sind die Kennwerte der Fermentationskinetik für die ausgewählten Substrate (mineralischer Dünger, 240 kgN/ha), die im HBT untersucht wurden, aufgelistet. Die Weizenvarianten erreichen im Durchschnitt nach 2,2 bis 2,7 Tagen 50 % der Biogasproduktion, bei den Mais-Varianten dauert es zwischen 2,5 und 3,8 Tage und beim Deutschen Weidelgras 2,4 bis 3,2 Tage. Bereits nach 12,7 bis 13,2 Tagen haben die Weizenvarianten 90 % der Biogasproduktion erreicht, bei Mais und Deutschem Weidelgras dauert es mit 12,2 bis 16 bzw. 11,8 bis 13,6 Tagen ähnlich lange. Im Gegensatz dazu dauert es bei der Cellulose 2 Tage bis 10 % der Biogasproduktion erreicht sind, was mit der beobachteten Phase geringer Gasproduktion übereinstimmt. Bereits nach 3,3 Tagen sind 50% des Biogases gebildet, was in etwa den pflanzlichen Substraten entspricht. Allerdings beträgt der T90-Wert bei Cellulose 7,2 Tage, d.h. nach dieser Zeit sind bereits 90% des Biogases gebildet. Cellulose wird also von den Bakterien trotz anfänglicher Verzögerungsphase doppelt so schnell abgebaut wie die pflanzlichen Substrate.

Tab. 46: Kennzahlen der Fermentationskinetik ausgewählter Substratvarianten im HBT
 hier Kas, 240 kgN/ha; T10, T50, T75, T90: Zeit in der 10 %, 50 %, 75 %
 bzw. 90 % der Biogasproduktion erreicht werden

Substrat	EC-Stadium/ Termin/ Schnitt	Erntejahr	T10	T50	T75	T90
Weizen	EC 69	2007	0,3	2,0	6,3	12,7
		2008	0,5	2,5	7,0	13,1
		MW	0,4	2,2	6,7	12,9
Weizen	EC 73	2007	0,3	2,1	6,6	13,1
		2008	0,5	2,6	7,2	13,4
		MW	0,4	2,3	6,9	13,2
Weizen	EC 77	2007	0,5	2,6	7,0	12,7
		2008	0,5	2,5	7,1	13,0
		MW	0,5	2,6	7,0	12,9
Weizen	EC 85	2007	0,6	2,7	7,1	12,7
		2008	0,6	2,8	7,2	12,7
		MW	0,6	2,7	7,1	12,7
Mais HS	7	2007	1,1	4,2	10,2	17,2
		2008	0,7	3,3	8,4	14,8
		MW	0,9	3,8	9,3	16,0
Mais KD	7	2007	0,9	3,8	9,5	16,3
		2008	0,8	3,5	8,6	14,8
		MW	0,9	3,7	9,0	15,6
Mais HS	8	2007	0,7	3,2	8,4	14,8
		2008	0,8	3,4	8,3	14,2
		MW	0,8	3,3	8,3	14,5
Mais KD	8	2007	0,8	3,3	8,3	14,5
		2008	0,7	3,1	7,8	13,5
		MW	0,8	3,2	8,1	14,0
Mais HS	9	2007	0,7	3,1	7,6	13,0
		2008	0,6	2,7	6,9	12,1
		MW	0,7	2,9	7,2	12,5
Mais KD	9	2007	0,4	2,3	6,6	12,4
		2008	0,6	2,6	6,8	12,0
		MW	0,5	2,5	6,7	12,2
DW Gras	1	2007	0,6	2,6	6,8	12,0
		2008	0,4	2,2	6,2	11,7
		MW	0,5	2,4	6,5	11,8
DW Gras	2	2007	0,9	3,6	8,7	14,8
		2008	0,5	2,4	6,7	12,3
		MW	0,7	3,0	7,7	13,5
DW Gras	3	2007	0,8	3,2	7,8	13,3
		2008	0,8	3,3	8,1	13,9
		MW	0,8	3,2	7,9	13,6
DW Gras	4	2007	0,7	3,0	7,6	13,3
		2008	0,8	3,3	8,1	13,9
		MW	0,7	3,1	7,8	13,6
Cellulose		MW	2,0	3,3	4,7	7,2

5.5.2 Batch

Im Batch-Versuch kommt es im Gegensatz zum HBT zu einer Vielzahl von Ableseereignissen.

Abb. 61 zeigt die Summenkurven der spezifischen Biogasproduktion über den gesamten Versuchszeitraum am Beispiel von Weizen, Mais und Cellulose, wobei jeweils die Wiederholungen der Substrate dargestellt sind. Bei den pflanzlichen Substraten beginnt die Biogasbildung ebenso wie im HBT sofort und verläuft während der ersten Tage sehr stürmisch, ab etwa dem 5. Tag verlangsamt sie sich. Cellulose ist während der ersten zwei Tage durch eine Phase gekennzeichnet, in der fast kein Gas gebildet wird. Erst dann setzt die Gasbildung schlagartig ein, ab dem 6. Tag verlangsamt sie sich deutlich. Bis zum 10. Tag nach Versuchsbeginn ist noch eine tägliche Messung möglich, danach wird das entstehende Biogas jeweils zwei bis drei Tage gesammelt, um genügend Gas zur Analyse zur Verfügung zu haben.

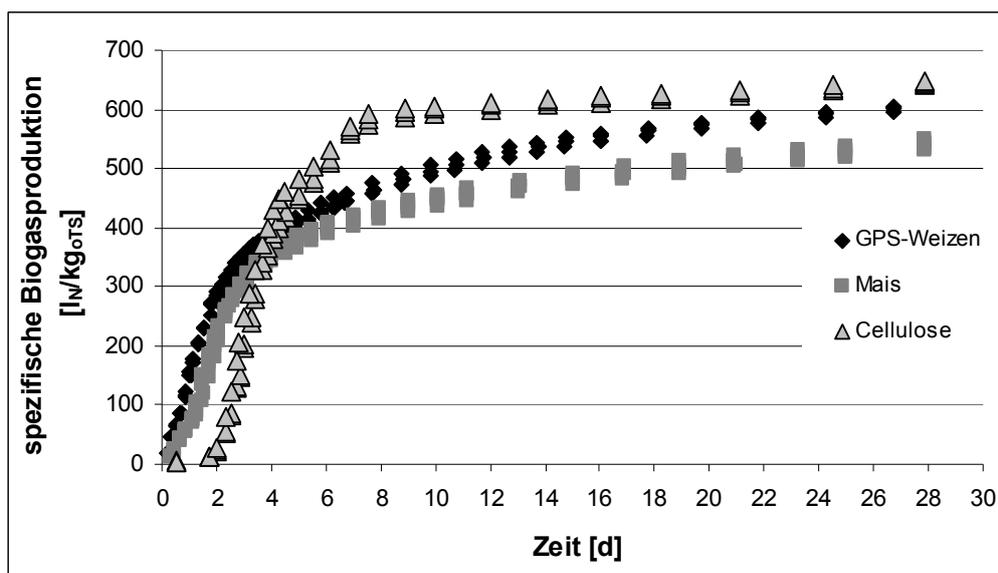


Abb. 61: Batch, Summenkurve der spezifischen Biogasproduktion am Beispiel von Weizen, Mais und Cellulose
hier Weizen EC 77, Kas, Düngintensität 240kgN/ha, 2007; Mais, Hohenschulen, T9, Kas, Düngintensität 240kgN/ha, 2007

Anschließend wurde berechnet, wie groß der Anteil an der Gesamtbogasproduktion des Substrates an den jeweiligen Versuchstagen war und in Abbildung 62 exemplarisch für eine Weizenvariante dargestellt.

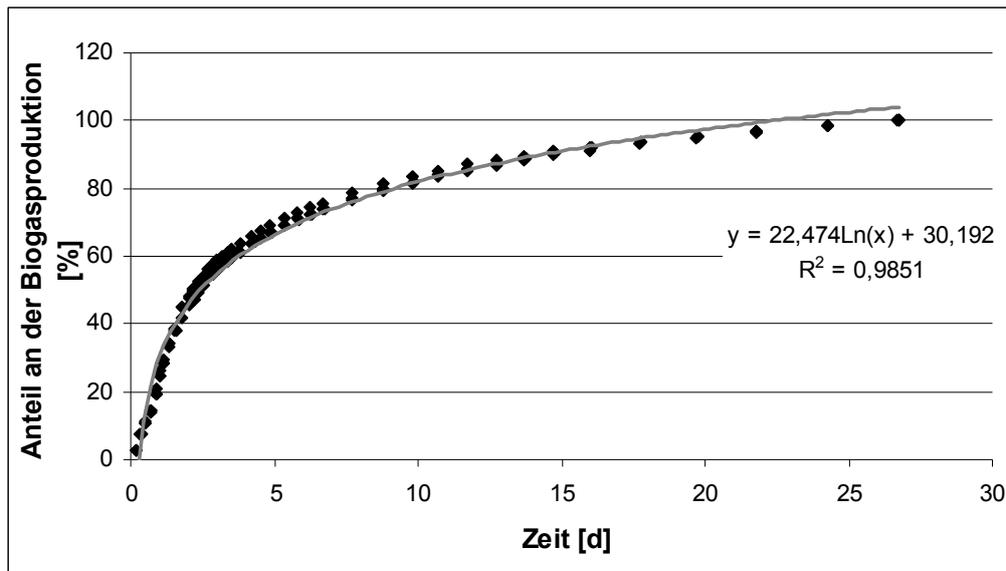


Abb. 62: Batch, Anteil an der Summe der Biogasproduktion mit logarithmischer Trendlinie, Gleichung und Bestimmtheitsmaß am Beispiel von -Weizen hier EC 77, Kas, Düngeintensität 240kgN/ha, 2007

Die Kennwerte der Fermentationskinetik sind in Tab. 47 für die ausgewählten Substrate (mineralischer Dünger, 240 kgN/ha), die im Batch untersucht wurden, aufgelistet.

Die Weizenvarianten erreichen im Durchschnitt nach 2,2 bis 2,7 Tagen 50 % der Biogasproduktion, bei den Mais-Varianten dauert es zwischen 2,6 und 3,0 Tage. Bereits nach 13,2 bis 14,1 Tagen haben die meisten Weizenvarianten 90 % der Biogasproduktion erreicht, lediglich bei der Variante des EC 69 dauert es bis zu 17,1 Tage. Bei Mais dauert es mit 14,1 bis 16,4 Tagen etwas länger, wobei es auffällig ist, dass auch beim Mais die Variante des frühesten Erntetermins (T7) die meiste Zeit benötigt, bis 90 % der gesamten Biogasmenge gebildet sind. Im Gegensatz dazu dauert es bei der Cellulose 2,1 Tage bis 10 % der Biogasproduktion erreicht sind, was mit der beobachteten Phase geringer Gasproduktion übereinstimmt. Bereits nach 3,5 Tagen sind 50% des Biogases gebildet, was in etwa den pflanzlichen Substraten entspricht. Allerdings beträgt der T90-Wert bei Cellulose 7,7 Tage, d.h. nach dieser Zeit sind bereits 90% des Biogases gebildet. Cellulose wird also von den Bakterien trotz anfänglicher Verzögerungsphase etwa doppelt so schnell abgebaut wie die pflanzlichen Substrate.

Tab. 47: Kennzahlen der Fermentationskinetik ausgewählter Substratvarianten im Batch
 hier Kas, 240 kgN/ha; T10, T50, T75, T90: Zeit in der 10 %, 50 %, 75 %
 bzw. 90 % der Biogasproduktion erreicht werden

Substrat	EC-Stadium/ Termin	Erntejahr	T10	T50	T75	T90
Weizen	EC 69	2007	0,3	2,3	7,9	16,5
		2008	0,6	3,2	9,3	17,8
		MW	0,4	2,7	8,6	17,1
Weizen	EC 73	2007	0,4	2,2	7,0	13,9
		2008	0,3	2,2	7,1	14,3
		MW	0,3	2,2	7,0	14,1
Weizen	EC 77	2007	0,4	2,4	7,3	14,3
		2008	0,3	2,1	6,6	13,1
		MW	0,4	2,2	7,0	13,7
Weizen	EC 85	2007	0,4	2,4	7,0	13,4
		2008	0,5	2,7	7,2	13,1
		MW	0,5	2,5	7,1	13,2
Mais HS	7	2007	0,5	2,9	8,5	16,1
		2008	0,6	3,1	8,9	16,7
		MW	0,6	3,0	8,7	16,4
Mais HS	8	2007	0,4	2,6	8,0	15,7
		2008	0,5	2,6	7,8	15,0
		MW	0,4	2,6	7,9	15,3
Mais HS	9	2007	0,6	2,9	7,9	14,2
		2008	0,5	2,5	7,4	14,0
		MW	0,5	2,7	7,6	14,1
Cellulose		MW	2,1	3,5	5,0	7,7

5.5.3 Vergleich Fermentationskinetik HBT und Batch

Um zu überprüfen, ob sich die Substrate bei der Vergärung in den beiden Versuchsanlagen hinsichtlich der Ertragskinetik gleich verhalten, sind die Zeiten bis zum Erreichen von 10 %, 50 %, 75 % und 90 % (Daten aus Tab. 46 und Tab. 47 ohne Weizen EC 69 und Mais T7) der gesamten Biogasmenge in Abbildung 63 für GPS-Weizen und Mais grafisch dargestellt.

In Abbildung 63 wird deutlich, dass die Ertragskinetik der Substrate in beiden Versuchsanlagen nahezu gleich ist, wobei die Biogasbildung im HBT unwesentlich schneller verläuft. Eine Ausnahme stellen allerdings die Varianten der frühen Erntetermine dar, die im Batch-Versuch wesentlich länger brauchen als im HBT bis 90% der gesamten Biogasmenge erreicht sind, weshalb sie auch nicht in die Abb. 63 mit eingegangen sind.

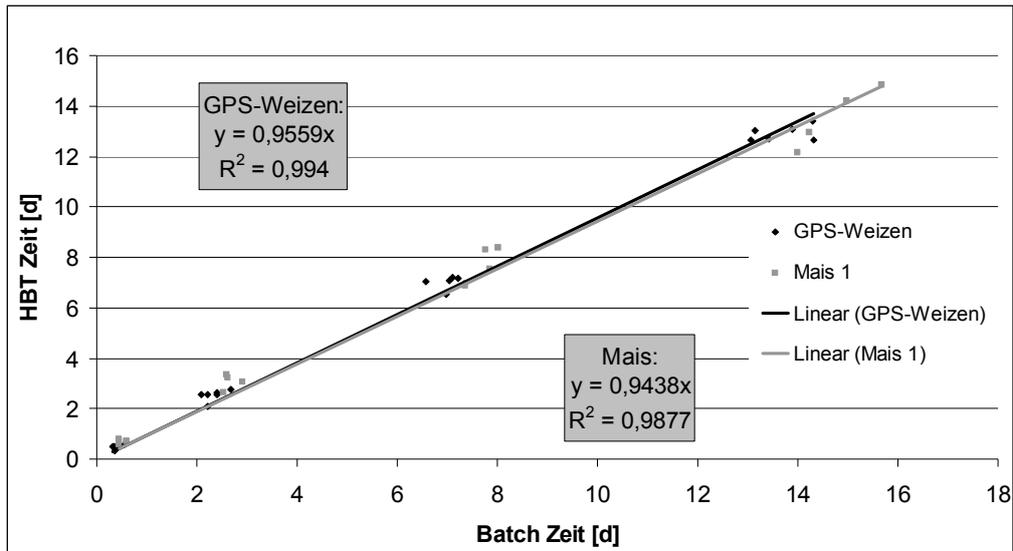


Abb. 63: Vergleich der Ertragskinetik von Weizen (ohne EC 69) und Mais (ohne T7) im HBT und Batch anhand der benötigten Zeit bis zum Erreichen von 10%, 50%, 75% und 90% der gesamten Biogasmenge

6 DISKUSSION

Anforderungen an die Versuchsanlagen

Die am Institut für landwirtschaftliche Verfahrenstechnik im Rahmen des Projekts BIOGAS-EXPERT etablierten Versuchsanlagen (HBT und Batch) für die Durchführung diskontinuierlicher Gärtests entsprechen den Vorschriften der VDI Richtlinie 4630 (2006). Insbesondere erfüllen sie die Anforderungen Gasdichtigkeit sowie Temperierbarkeit und ermöglichen die mechanische Durchmischung des Fermenterinhaltens (vgl. Kapitel 3.2). Die gaserfassende Apparatur ist an die zu erwartenden Biogasmengen angepasst, eine regelmäßige Bestimmung der Biogaszusammensetzung ist möglich, da das Gasanalysegerät auch für kleinste Gasvolumina ($V = 30 \text{ ml}$) ausgelegt ist (vgl. Kapitel 4.2).

Impfschlamm

Als Impfschlamm wurde für alle im Rahmen der Untersuchung durchgeführten Gärtests Klärschlamm aus einem kommunalen Klärwerk verwendet. Ausschlaggebend für diese Wahl waren die Ergebnisse der Voruntersuchung (vgl. Kapitel 5.1.1). Danach ist Klärschlamm ein durchaus gängiges Inokulum. Auch die VDI 4630 (2006) schlägt Klärschlamm als Inokulum vor, da dieser an eine Vielzahl von Substraten adaptiert ist. Außerdem verfügt er nur noch über eine geringe Eigengasproduktion, so dass eine Aushungerungsphase von einer Woche ausreichend ist. Im Gegensatz dazu wies das untersuchte Biogasfermentersubstrat eine weitaus höhere Eigengasproduktion auf und hätte darüber hinaus weitaus aufwändiger aufbereitet werden müssen, da zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit in beiden Versuchsanlagen das gleiche Inokulum verwendet werden sollte. Als Nachteil des Klärschlammes ist allerdings anzuführen, dass seine Zusammensetzung jahreszeitlichen Schwankungen unterliegen kann. Zu jedem Versuchsansatz wurde der TS- und oTS-Gehalt des Impfslammes bestimmt, im Mittel der Versuchsjahre betrug der TS-Gehalt 3,2 % (VK= 11,4 %) und der oTS-Gehalt 58 % (VK= 6,6 %). Da in jedem Versuchsansatz mikrokristalline Cellulose als Referenzsubstrat eingesetzt wurde, war die Möglichkeit gegeben, die Aktivität des Impfslammes zu überprüfen, die entsprechend den Kriterien der VDI 4630 (2006) immer als ausreichend betrachtet werden konnte. So erreichte Cellulose im

Durchschnitt bei allen Versuchen mindestens 86 % der maximalen Biogasausbeute von 740 bis 750 I_N/kg_{OTS} (vgl. Kapitel 4.5).

Der Impfschlamm wurde vor dem Einsatz im Gärtest insofern aufbereitet, als dass er auf einen Siebdurchgang < 1 mm gesiebt wurde (vgl. Kapitel 4.4). Dieses Vorgehen war notwendig, um im HBT Glasbruch der Kolben zu minimieren, könnte jedoch einen Einfluss auf die Aktivität des Impfschlammes haben. Deshalb wurde eine weitere Begleituntersuchung im Batch (vgl. Kapitel 4.6.3.3 und 5.1.3) durchgeführt.

Das Gasbildungspotenzial von Cellulose wurde bestimmt, wobei unterschiedliche Siebungsvarianten des Inokulums (1 mm, 3 mm, 5 mm) zum Einsatz kamen. Auffällig ist die stärkere Streuung der Ergebnisse der 1 mm Siebungsvariante (VK = 2,8%) gegenüber den gröbereren Siebungen (VK = 1,6 % bzw. VK = 1,5 %, vgl. Abb. 19 und Tab. A 9). Außerdem wird bei der gröbsten Siebungsvariante im Mittel eine um 16 I_N/kg_{OTS} höhere Biogasproduktion erzielt. Die erhöhten Gaserträge der 5 mm Siebungsvariante könnten ein Hinweis darauf sein, dass bei geringeren Siebgrößen teilweise doch aktive Bakterienmasse durch den Aufbereitungsprozess verloren geht. Hierdurch ließe sich auch die größere Streuung der Werte der 1 mm Variante erklären: einige Fermenter enthielten demnach weniger aktive Bakterienmasse als andere Fermenter. Da es jedoch für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zwischen Batch-Versuch und Hohenheimer Biogasertragstest nach hiesiger Ansicht unerlässlich ist, dass der Impfschlamm gleich aufbereitet wird, muss mit einer breiteren Streuung der Ergebnisse und eventuell leicht geringerer Aktivität des Impfschlammes vorliebgenommen werden. Um der Streuung der Ergebnisse jedoch Rechnung zu tragen, werden in der Batch-Versuchsanlage alle pflanzlichen Substrate in fünffacher Wiederholung untersucht.

Kopfraumkorrektur

Zu Beginn der Versuchsreihen stand noch kein Gasanalysegerät zur Kohlendioxidbestimmung zur Verfügung (vgl. Kapitel 4.6.3.3), so dass ausschließlich die volumetrische Kopfraumkorrektur durchgeführt wurde. Ab Sommer 2008 wurde der Methangehalt im Biogas zusätzlich über das Verhältnis der Gase korrigiert. Das führte dazu, dass für jede untersuchte Variante zwei Werte für die spezifische Methanproduktion vorliegen, die zwar einander ähneln aber sich nicht zu 100 % entsprechen. Zwischen den beiden Datensätzen für die spezifische

Methanproduktion besteht eine lineare Beziehung und zwar für alle während der Projektlaufzeit untersuchten Substrate (Abb. 64).

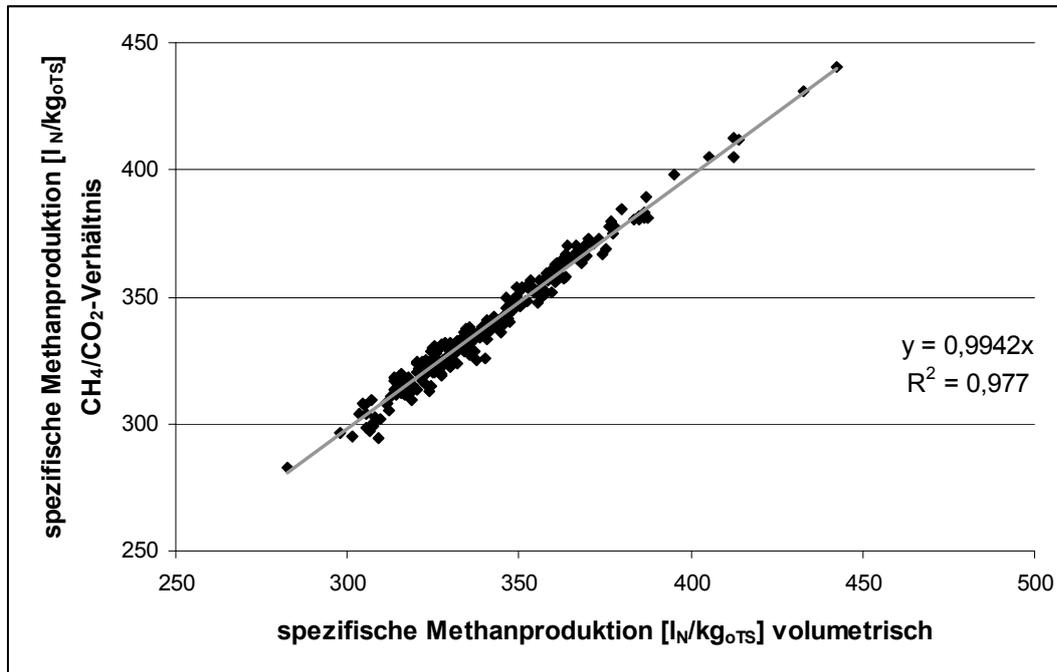


Abb. 64: Verhältnis zwischen der spezifischen Methanproduktion basierend auf volumetrischer Kopfraumkorrektur zur über das CH₄/CO₂-Verhältnis berechneten spezifischen Methanproduktion mit Trendlinie und Bestimmtheitsmaß

Bei einem sehr hohen Determinationskoeffizienten R^2 beträgt die Steigung der Geraden nahezu 1 (Abb. 64). Demnach ist es also möglich, für jedes Substrat, für das die auf volumetrischer Kopfraumkorrektur basierende spezifische Methanproduktion vorliegt, die auf dem Gasverhältnis beruhende Methanproduktion zu berechnen. Daher ist es auch verantwortbar, die vergleichende Auswertung der im Projekt BIOGAS-EXPERT erhobenen Daten anhand der auf volumetrischer Kopfraumkorrektur beruhenden Methanproduktion durchzuführen, da hierfür für alle untersuchten Substrate Daten vorliegen. Insofern beruhen alle Daten zur spezifischen Methanproduktion auf dieser Bestimmungsmethode.

Steckplatzverteilung im HBT

Die Untersuchungen zur Steckplatzverteilung im HBT (vgl. Kapitel 4.6.3.2 und 5.1.2) haben gezeigt, dass Effekte auf die Höhe der Methanproduktion durch die Position nicht vollständig ausgeschlossen werden können. Um diesen Einfluss möglichst gering zu halten, wurden die Kolbenprober der drei Wiederholungen eines

Substrates in allen durchgeführten Versuchen randomisiert über die drei Zonen des Rotors verteilt, so dass jeweils ein Kolben Innen, in der Mitte und Außen platziert wurde. Des Weiteren wurde der Ablauf beim Versuchsansatz für die Folgeversuche dahingehend geändert, dass alle erforderlichen Teilschritte bei Raumtemperatur durchgeführt wurden, was im Vergleich zum ersten Vorversuch zu deutlich verringerten Variationskoeffizienten bzw. Ergebnisstreuungen führte. Die Optimierung der Versuchsdurchführung ist somit als erfolgreich anzusehen. Ergänzend zu den eigenen Untersuchungen erfolgte eine Teilnahme am dritten Durchgang des Ringversuches der VDLUFA (WULF et al., 2011). Im Vergleich mit den Ergebnissen anderer Labore wiesen die am ILV mit dem HBT bestimmten spezifischen Methanerträge geringere Schwankungen auf, lagen aber immer etwas oberhalb des Mittelwertes.

Fehlerbetrachtung

Die Ergebnisse der Fehlerbetrachtung für die verwendeten Messgeräte (vgl. Kapitel 5.1.4) zeigen, dass sich Wägefehler nur gering auf die spezifische Methanproduktion auswirken, ebenso wie Fehler in der Bestimmung des Luftdrucks und der Raumtemperatur. Beim HBT ist eine direkte Messung der Gastemperatur nicht möglich. Deshalb wird bei der Korrektur auf Normbedingungen pauschal davon ausgegangen, dass die Gastemperatur der Betriebstemperatur im Schrank entspricht. Aufgrund dessen ist unbedingt darauf zu achten, dass die Kolbenprober bei den Messereignissen nicht mehr als nötig abkühlen, da sonst ein größerer Fehler auftritt. Dieser Fehler kann nur durch zügiges Durchführen der Gasvolumenmessung und Gasanalyse minimiert werden.

Weitaus schwerwiegender sind Messungenauigkeiten der Gasanalysegeräte und Fehler bei der Volumenmessung. Während die durch die Gasanalyse bedingten Fehler bei beiden Versuchsanlagen gleich groß sind, wirken sich Ablesefehler im HBT doppelt so stark auf die spezifische Methanproduktion aus wie im Batch. Das ist darauf zurückzuführen, dass im HBT ohnehin nur geringe Gasmengen (im Mittel 230 ml, Batch 5,1 l) gebildet werden, die Bezugsgröße also geringer ist. Um die Fehler bei der Volumenmessung so gering wie möglich zu halten, empfiehlt es sich, die Anzahl der Messereignisse auf ein Minimum zu beschränken.

Spezifische Methanproduktion Weizen

Winterweizen erzielt in beiden Versuchsanlagen ähnliche Ergebnisse, wie sie auch von anderen Autoren berichtet werden (Abb. 65). Auffällig ist die geringe Schwankungsbreite im HBT verglichen mit AMON et al. (2007b) und GRONAUER et al. (2008). Die Schwankungsbreite der Ergebnisse im Batch ist größer als im HBT, was darauf zurückzuführen ist, dass in dieser Darstellung nicht zwischen frischen Substraten und Silagen unterschieden wird. Auch im Vergleich mit den anderen Getreidearten liegen die Ergebnisse für Weizen in einem ähnlichen Bereich.

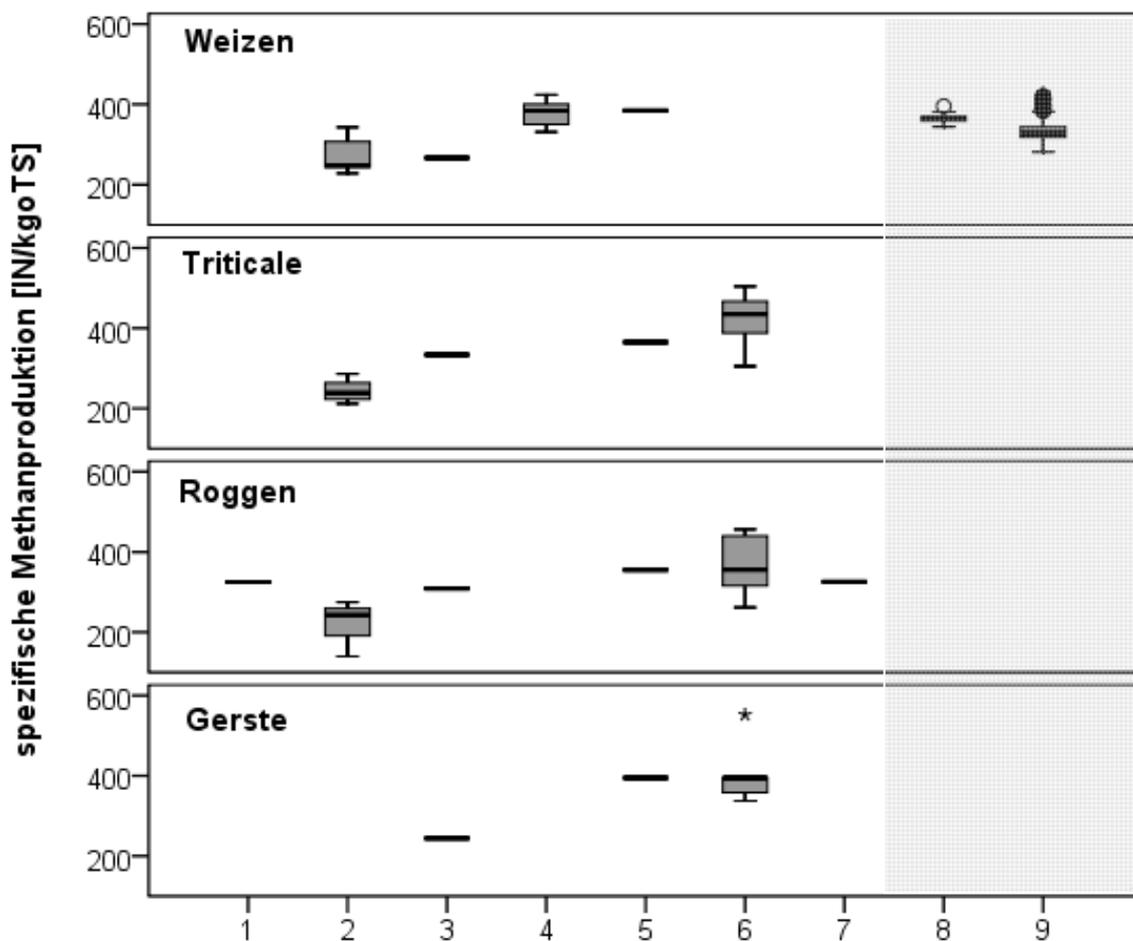


Abb. 65: Spezifische Methanproduktion verschiedener Getreidesorten nach Literaturangaben ohne Unterscheidung Frisch oder Silage im Vergleich mit den eigenen Ergebnissen
 Nummer der Quelle 1: AMON et al. (2007a), 2: AMON et al. (2007b), 3: AMON et al. (2005), 4: GRONAUER et al. (2008), 5: STICKSEL (2010), 6: HEIERMANN et al. (2009), 7: KTBL (2010), eigene Ergebnisse 8: HBT, 9:Batch

Spezifische Methanproduktion Mais

Die Ergebnisse aus dem HBT zur spezifischen Methanproduktion von Mais (Abb. 66) entsprechend annähernd denen von NEUREITER et al. (2005), liegen jedoch über den Ergebnissen, die von AMON et al. (2002; 2003c) und EDER et al. (2009) berichtet werden. Die Methanerträge der frischen Substrate, die mit dem Batch bestimmt wurden, entsprechen in etwa denen von EDER et al. (2009). Die Methanerträge der Silagen fügen sich gut in den Kontext anderer Untersuchungen ein.

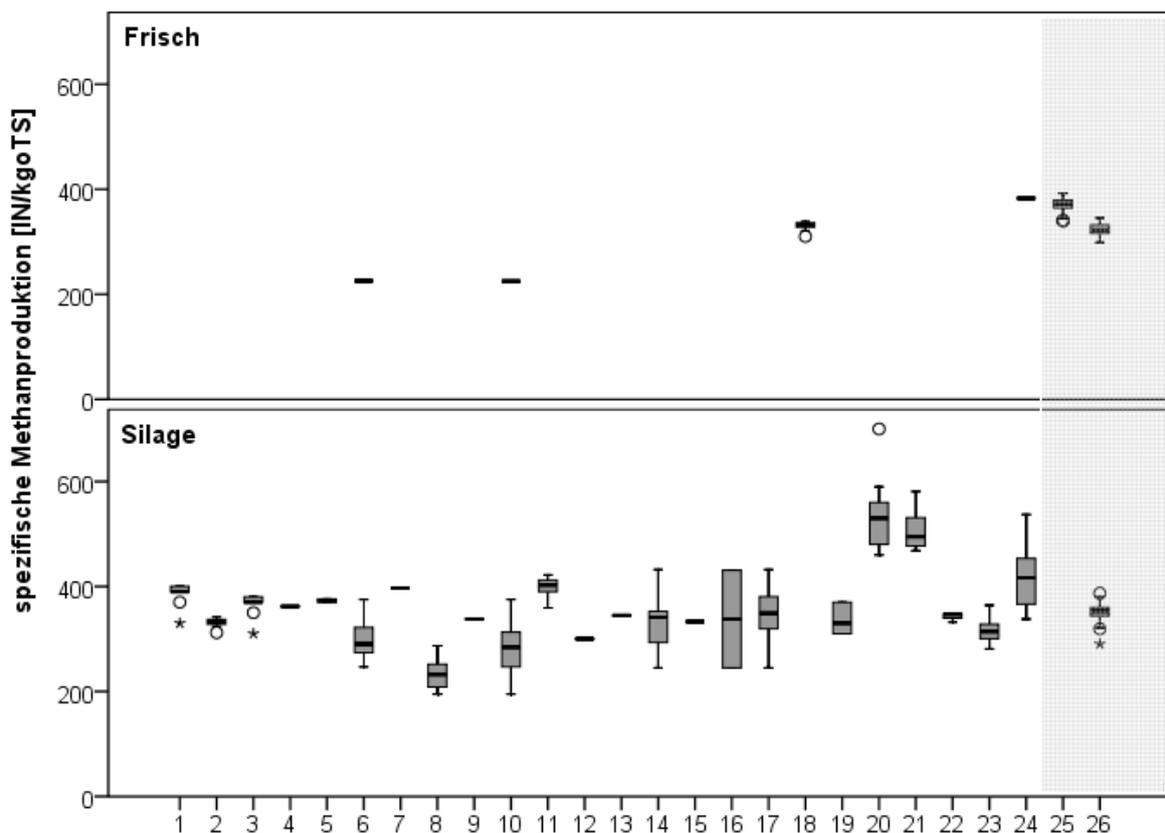


Abb. 66: Spezifische Methanproduktion von Mais nach Literaturangaben mit Unterscheidung Frisch oder Silage im Vergleich mit den eigenen Ergebnissen

Nummer der Quelle 1: OECHSNER et al. (2003), 2: EDER et al. (2008), 3: LEMMER (2005), 4: CZEPUCK (2005), 5: FISCHER (2007), 6: AMON et al. (2002), 7: MUKENGELE et al. (2006), 8: AMON et al. (2003a), 9: AMON et al. (2007a), 10: AMON et al. (2003c), 11: AMON et al. (2007b), 12: AMON et al. (2005), 13: BAUER et al. (2010), 14: KAISER (2007), 15: GRONAUER et al. (2005), 16: KAISER und GRONAUER (2007), 17: GRONAUER et al. (2008), 18: EDER et al. (2009), 19: MÄHNERT (2007), 20: HERTWIG und HEIERMANN (2006), 21: HEIERMANN et al. (2009), 22: KTBL (2010), 23: PLÖCHL et al. (2009), 24: NEUREITER et al. (2005), eigene Ergebnisse 25: HBT, 26 Batch

Spezifische Methanproduktion Deutsches Weidelgras

Die **ausschließlich** mit dem HBT bestimmte Methanproduktion der verschiedenen Varianten des Deutschen Weidelgrases liegt im oberen Bereich der Ergebnisse von KAISER (2007) bzw. KAISER und GRONAUER (2007). Verglichen mit den Angaben von AMON et al. (2003a), PROCHNOW et al. (2005) und PLÖCHL et al. (2009) konnten wesentlich höhere Gaserträge erzielt werden.

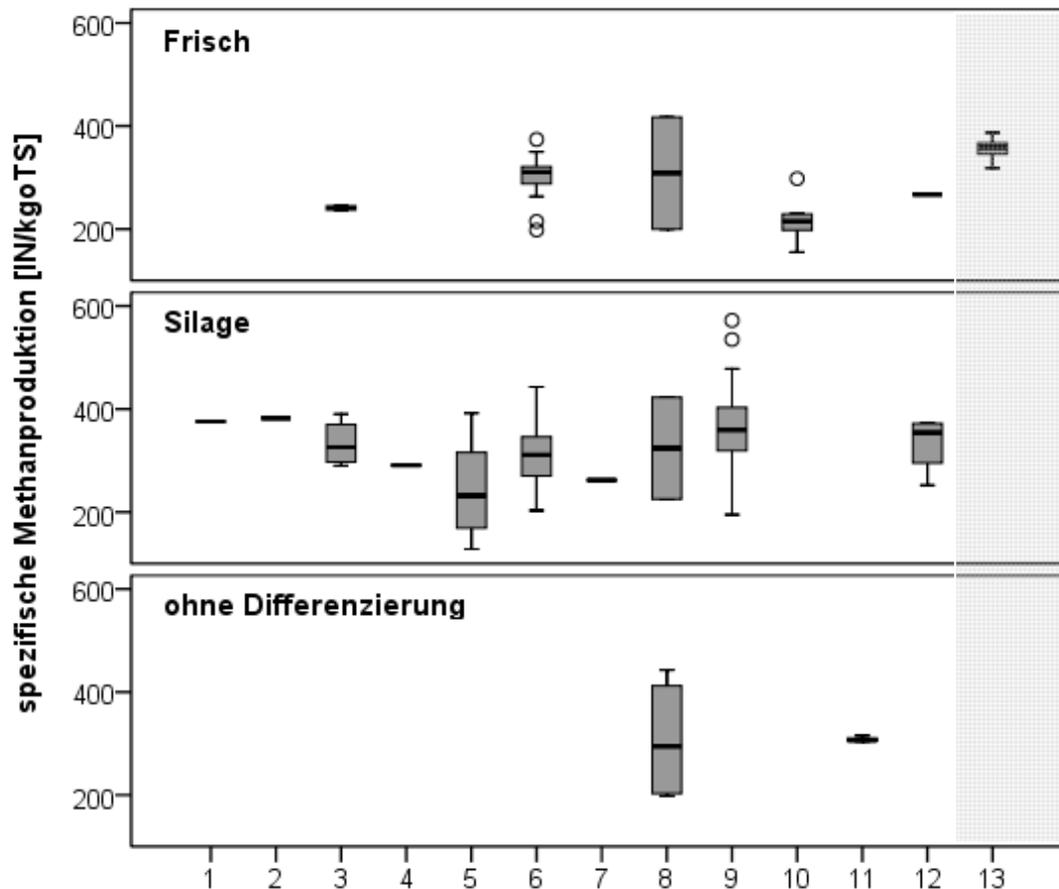


Abb. 67: Spezifische Methanproduktion von verschiedenen Grassorten nach Literaturangaben mit Unterscheidung Frisch oder Silage im Vergleich mit den eigenen Ergebnissen

Nummer der Quelle 1: CZEPUCK (2005), 2: MUKENGELE et al. (2006), 3: AMON et al. (2003a), 4: AMON et al. (2007a), 5: AMON et al. (2007b), 6: KAISER (2007), 7: GRONAUER et al. (2005), 8: KAISER und GRONAUER (2007), 9: GRONAUER et al. (2008), 10: PROCHNOW et al. (2005), 11: KTBL (2010), 12: PLÖCHL et al. (2009), eigene Ergebnisse 13: HBT

Datenbasis

Obwohl teilweise Unterschiede zwischen den einzelnen Substraten in den beiden Versuchsjahren hinsichtlich der Inhaltsstoffe und der Gaserträge bestehen (vgl. Anhang Tab. A 10 bis Tab. A 36), werden die Ergebnisse in der vorliegenden Arbeit

immer in Form der Mittelwerte aus beiden Versuchsjahren zusammengefasst dargestellt (vgl. Kapitel 5.2.1 und 5.3). Die Zusammenfassung der Daten in Form von Mittelwerten wird als notwendig angesehen, um eine möglichst hohe Repräsentativität und Übertragbarkeit der Daten zu gewährleisten. Darüber hinaus wird die grundsätzliche Aussagekraft der statistischen Tests dadurch erhöht, dass eine breitere Datenbasis vorliegt. Aus diesem Grund werden beim Mais auch die einzelnen Varianten der beiden Standorte Hohenschulen und Karkendamm zu einer Gruppe zusammengefasst. Auch das Zusammenfassen der jeweiligen Düngemittelvarianten ist im Hinblick auf die Schaffung einer breiteren Datenbasis zu vertreten.

Einflüsse auf das Methanbildungsvermögen bei Weizen (frisches Substrat)

Das Methanbildungsvermögen eines Substrates wird maßgeblich durch seine Inhaltsstoffe bestimmt (vgl. Kapitel 3.3). Die Inhaltsstoffe der untersuchten Nawaro ändern sich, die Stickstoffdüngintensität sowie der Erntetermin beeinflussen die Zusammensetzung. Dementsprechend wäre zu erwarten, dass sich die Substrate in ihrer spezifischen Methanproduktion unterscheiden. Da im HBT eine größere Datenbasis besteht, soll zunächst auf die Ergebnisse dieses Gärtests eingegangen werden.

Wie die Ergebnisse aus Kapitel 5.3.1.1 klar zeigen, hat weder die Düngintensität noch der Erntetermin einen Einfluss auf die spezifische Methanproduktion von Weizen. Hier wäre nach AMON et al. (2007b) sowie HEIERMANN et al. (2009) zumindest eine Beeinflussung durch den Erntetermin dahingehend zu erwarten gewesen, dass die Methanproduktion mit fortschreitender Vegetationsperiode abnimmt. Möglicherweise ist die Ursache darin zu suchen, dass es sich um einen Sorteneffekt handelt, d.h. dass die Methanproduktion der in der vorliegenden Studie verwendeten Weizensorte Biscay im Gegensatz zu anderen Weizensorten wie Capo und Levendis (AMON et al., 2007b) nicht vom Erntetermin beeinflusst wird.

Übereinstimmend mit den Untersuchungen von AMON et al. (2007b) sowie HEIERMANN et al. (2009) konnte bei Weizen der Einfluss des Erntetermins auf den Methanhektarertrag deutlich nachgewiesen werden. Da der Trockenmasseertrag im Vegetationsverlauf wie bereits erwähnt ansteigt, nimmt auch der Methanhektarertrag zu. Auch eine Steigerung der Stickstoffdüngintensität wirkt sich über den Trockenmasseertrag deutlich positiv aus. Der Einfluss des Trockenmasseertrages

auf den Methanhektarertrag ist um ein Vielfaches höher als der Einfluss der spezifischen Methanproduktion, so dass letztendlich die Substratvarianten den höchsten Methanhektarertrag erzielen, die auch den höchsten Trockenmasseertrag aufweisen können. In der vorliegenden Arbeit sind es die mit 240 kgN/ha bzw. 360 kgN/ha gedüngten Varianten des EC 85. Eine Steigerung der Düngeintensität über 240 kgN/ha führt zu keiner deutlichen Steigerung des Methanhektarertrages. Die Beobachtungen der mit dem Batch untersuchten frischen Substrate entsprechen denen des HBT.

Einflüsse auf das Methanbildungsvermögen bei Mais (frisches Substrat)

Bei Mais kann ebenso wie beim Weizen kein Einfluss der Düngeintensität auf die spezifische Methanproduktion nachgewiesen werden (vgl. Kapitel 5.3.1.2). Allerdings wirkt sich der Erntetermin bzw. das Entwicklungsstadium signifikant auf die Methanproduktion aus. Zu Termin 7 beprobter Mais (Beginn Kornbildung) erreicht geringere Gaserträge als Mais aus den späteren Ernteterminen (T9 Teigreife), wobei die relativen Unterschiede zwischen den Mittelwerten der Varianten 1 bis 5 % betragen. Die Inhaltsstoffzusammensetzung der Maisvarianten zeigt gerade vom 7. zum 8. Erntetermin große Veränderungen (Zunahme NfE, Abnahme XF), die vermutlich ursächlich für die Unterschiede in der Methanproduktion sind. Die Beeinflussung der Methanproduktion durch den Termin wurde auch von anderen Autoren beobachtet (AMON et al., 2003a; HERTWIG und HEIERMANN, 2006; HEIERMANN et al., 2009).

Die Untersuchungen von GRONAUER et al. (2008) an verschiedenen Maissorten konnten dagegen keinen Einfluss des Erntetermins auf die Methanproduktion nachweisen. Die dort untersuchte Sorte Gavott hat eine ähnliche Reifezahl (S250) wie die hier betrachtete Sorte Ronaldinio (S240, vgl. Kapitel 4.3). Allerdings wurde der Mais bei GRONAUER et al. (2008) etwas später (Ende August) beprobt. Insofern entsprechen die fehlenden Unterschiede in der spezifischen Methanproduktion zwischen den Varianten des 8. und 9. Erntetermins den Beobachtungen von GRONAUER et al. (2008).

Übereinstimmend mit den Untersuchungen von AMON et al. (2002; 2007b) konnte bei Mais wie schon beim Weizen der Einfluss des Erntetermins auf den Methanhektarertrag deutlich nachgewiesen werden. Da der Trockenmasseertrag im Vegetationsverlauf wie bereits erwähnt ansteigt, nimmt auch der Methanhektarertrag

zu. Auch eine Steigerung der Stickstoffdüngintensität wirkt sich über den Trockenmasseertrag deutlich positiv aus. Während im 7. und 8. Termin die drei gedüngten Varianten keinen Unterschied im Methanhektarertrag aufweisen, ist dieser im 9. Termin bei den mit 120kgN/ha gedüngten Varianten deutlich geringer als bei den beiden höheren Düngestufen. Eine stärkere Versorgung mit Stickstoff hat bei diesen Varianten zu einer erhöhten Biomassebildung geführt. Insgesamt betrachtet, ist der Einfluss des Trockenmasseertrages auf den Methanhektarertrag um ein Vielfaches höher als der Einfluss der spezifischen Methanproduktion, so dass letztendlich die Substratvarianten den höchsten Methanhektarertrag erzielen, die auch den höchsten Trockenmasseertrag aufweisen können. Hier sind es die mit 240 kgN/ha bzw. 360 kgN/ha gedüngten Varianten des 9. Erntetermins. Eine Steigerung der Düngintensität über 240 kgN/ha führt zu keiner deutlichen Steigerung des Methanhektarertrages.

Die Beobachtungen der mit dem Batch untersuchten frischen Substrate entsprechen nicht denen des HBT. So lassen sich für einige Varianten signifikante Unterschiede in der spezifischen Methanproduktion zwischen den Düngestufen nachweisen, jedoch ohne erkennbare Tendenz, die sich so nicht erklären lassen. Auch konnte hier kein Einfluss des Erntetermins auf den Gasertrag beobachtet werden. Möglicherweise lässt sich das über die im Batch vorliegende größere Schwankungsbreite erklären. Da die Unterschiede im HBT zwischen den Varianten des T7 und der späteren Termine mit 1 bis maximal 5 % doch relativ gering sind und geringere Streuungen zwischen den jeweiligen Wiederholungen auftreten, bescheinigt der Kruskal-Wallis-Test signifikante Unterschiede. Die größere Ergebnisstreuung überwiegt im Batch möglicherweise den Unterschied zwischen den Gaserträgen der frühen und späteren Maisvarianten. Die Beobachtungen zum Methanhektarertrag entsprechen denen des HBT, mit dem Unterschied, dass die 360 kgN/ha Düngewarriante den höchsten Methanhektarertrag erzielt.

Einflüsse auf das Methanbildungsvermögen bei Deutschem Weidelgras (frisches Substrat)

Die Ergebnisse zum Deutschen Weidelgras (vgl. Kapitel 5.3.1.3) zeigen, dass die Intensität der Stickstoffdüngung zumindest im 3. und 4. Schnitt einen Einfluss auf die spezifische Methanproduktion hat. Hier erreichen die nicht oder nur gering gedüngten Varianten (0 bzw. 120 kgN/ha) höhere spezifische Gaserträge. Diese

Beobachtungen lassen sich nicht eindeutig begründen. Möglicherweise spielt der höhere Gehalt an stickstofffreien Extraktstoffen eine Rolle und kann zur Erklärung der Unterschiede zwischen zumindest einigen Varianten herangezogen werden. Für eine abschließende Beantwortung der Fragestellung nach dem Einfluss der Düngeintensität auf die spezifische Methanproduktion erscheint die in der vorliegenden Arbeit vorhandene Datenbasis zu gering.

Der Erntetermin beeinflusst die spezifische Methanproduktion dahingehend, dass diese bei allen Düngevarianten zum ersten Schnitt ihr Maximum erreicht. Als mögliche Ursache könnten auch hier die gegenüber den Folgeschnitten höheren Gehalte an leicht vergärbaren stickstofffreien Extraktstoffen und geringeren Gehalte an Rohfaser angenommen werden. Auch PROCHNOW et al. (2005) beobachteten bei Gras aus der Landschaftspflege mit geringeren Rohfasergehalten eine höhere Gasbildung als bei Gras mit höheren Rohfaseranteilen. Auch KAISER und Gronauer (2007) stellten bei der Wiesenrispe Lato fest, dass die spezifische Methanproduktion zum ersten Schnitt maximal ist und dann von Schnitt zu Schnitt sinkt.

Sowohl die Düngeintensität als auch der Erntetermin beeinflussen über den Trockenmasseertrag den Methanhektarertrag. Wie auch bei Weizen und Mais erzielt die Variante mit dem höchsten Trockenmasseertrag den höchsten Methanhektarertrag (1. Schnitt, 3. Düngestufe). Unterschiede, die auf Ebene der spezifischen Gaserträge bestehen, werden hierüber kompensiert. Eine Steigerung der Düngeintensität über 320 kgN/ha hinaus, führt nicht zu einem weiteren Ertragszuwachs, ist also als nicht sinnvoll anzusehen. Auch KAISER und Gronauer (2007) konstatierten, dass der Trockenmasseertrag bei Gräsern die entscheidende Rolle spielt, wohingegen Unterschiede in der Zusammensetzung der Inhaltsstoffe und deren Verdaulichkeit bedeutungslos sind.

Trockensubstanzkorrektur bei Silagen

Die während der Silagebereitung ablaufenden Umsetzungsprozesse (vgl. Kapitel 3.4.1) verändern das Pflanzenmaterial und die Zusammensetzung der Inhaltsstoffe. In der Silage sind nun Verbindungen (organische Säuren, Alkohole) enthalten, die im Ausgangsmaterial nicht vorkommen. Bei allen im Rahmen dieser Studie untersuchten Substraten wird bedingt durch die Konservierung eine Abnahme des Trockensubstanzgehaltes sowie ein Masseverlust beobachtet (vgl. Kapitel 5.2.2.1 und 5.2.2.2). Nach WEIßBACH (1995) ist es zwingend erforderlich, den

Trockensubstanzgehalt von Silagen um die flüchtigen Gärprodukte zu korrigieren (vgl. Kapitel 3.3.2), wozu unterschiedliche Möglichkeiten zur Verfügung stehen. Da der Gehalt an Alkoholen der in der vorliegenden Arbeit untersuchten Silagen nicht bekannt ist, kann die genauere Korrekturgleichung (vgl. Kapitel 3.3.2 Gleichung 8) nicht verwendet werden, zumal diese nur für Maissilage anwendbar ist. Die Korrektur mittels der unspezifischen Schätzgleichungen (Gleichung 6, 7 bzw. 10) würden in der Auswertung der Trockenmasseverluste der untersuchten Silagen dazu führen, dass nach der Silierung rein rechnerisch mehr Masse vorhanden wäre. Aufgrund dieses Paradoxons scheidet diese Vorgehensweise ebenfalls aus. Die Trockensubstanzgehalte, die von der LUFA ITL GmbH Kiel bestimmt wurden, kommen ebenfalls nicht in Frage, da diese auch nur über die eben beschriebenen Schätzgleichungen korrigiert wurden. Um wenigstens eine Korrektur um die bekannten flüchtigen Gärprodukte vornehmen zu können, wurden die Trockensubstanzgehalte zumindest für die Gärsäuren und den Ammoniakgehalt über die spezielleren von WEIßBACH (1995) vorgeschlagenen Korrekturgleichungen korrigiert (vgl. Kapitel 3.3.2 Gleichungen 1 bis 3). Diese Methode ist mit Sicherheit nicht optimal, da wegen der fehlenden Kenntnis des Alkoholanteils trotzdem eine Unterschätzung des TS-Gehaltes und daraus folgend eine Überschätzung der Masseverluste sowie der spezifischen Methanproduktion möglich ist.

Spezifische Methanproduktion der Silagen

Die gegenüber dem Ausgangsmaterial veränderte Zusammensetzung der Inhaltsstoffe in den Silagen (vgl. Kapitel 5.2.2.1 und 5.2.2.2) führt sowohl bei Weizen wie auch bei Mais zu Unterschieden in der spezifischen Methanproduktion, wobei die Silagen immer deutlich höhere Gaserträge als die frischen Substrate aufweisen (vgl. Kapitel 5.3.2.1 und 5.3.2.2). Das liegt darin begründet, dass die Milchsäuregärung während des Silierprozesses zur Bildung von Vorläufersubstanzen (z.B. Milchsäure, Essigsäure, Alkohole) führt, die sofort für die Methanogenese zur Verfügung stehen. Darüber hinaus bewirkt die Silierung möglicherweise einen Voraufschluss der Rohfaserfraktion (Cellulose, Hemicellulose), wodurch sich einerseits der Rohfaserabbau und andererseits die Verfügbarkeit der übrigen Nährstoffe verbessert (AMON et al., 2002). Auch andere Autoren bescheinigen den Silagen höhere Gaserträge (HEIERMANN et al., 2009; PLÖCHL et al. 2009).

Die bei der Silierung gebildeten Gärprodukte haben einen entscheidenden Einfluss auf die Methanausbeute. So beträgt das stöchiometrische Methanbildungspotenzial nach WEIßBACH (2009a) von Milchsäure und Essigsäure beispielsweise $355 \text{ l}_\text{N}/\text{kg}_{\text{OTS}}$, von Propionsäure $503 \text{ l}_\text{N}/\text{kg}_{\text{OTS}}$ und von Buttersäure sogar $604 \text{ l}_\text{N}/\text{kg}_{\text{OTS}}$. Das Methanbildungspotenzial der Alkohole beträgt 498 (Methanol) bis $862 \text{ l}_\text{N}/\text{kg}_{\text{OTS}}$ (Butanol), Ethanol liegt bei $693 \text{ l}_\text{N}/\text{kg}_{\text{OTS}}$. Damit haben gerade solche Gärprodukte, die in der Futterkonservierung unerwünscht sind (vgl. Kapitel 3.4.3) einen positiven Einfluss auf die spezifische Methanproduktion.

Besonders deutlich wird dieser Effekt bei den untersuchten Weizensilagen (vgl. Kapitel 5.2.2.1 und 5.3.2.1). In 2007 war die Gärqualität der frühen Weizensilagen (EC73 und EC77) verbesserungsbedürftig bis sehr schlecht. Die Fehlgärungen im Jahr 2007 führten bei den betroffenen Silagen (EC73 und EC77) zu relativ hohen Gehalten an Buttersäure, möglicherweise auch von Alkoholen. Es ist davon auszugehen, dass diese Gärprodukte im Gärtest für die gegenüber den gelungenen Silagen aus 2008 (mit Siliermitteleinsatz) erhöhte spezifische Methanproduktion verantwortlich sind (siehe Abb. A 5).

Vergleich frischer und silierter Biogassubstrate

Beim Vergleich frischer und silierter Biogassubstrate sind die während der Silierung auftretenden Masseverluste zwingend zu berücksichtigen. Insofern müssen die Methanerträge um die Masseverluste korrigiert werden. Das ist einerseits beim Parameter spezifische Methanproduktion möglich, andererseits auf Ebene der Methanhektarerträge. Die Berücksichtigung der Masseverluste der im Rahmen dieser Untersuchung hergestellten Laborsilagen auf Basis der Methanhektarerträge erscheint anschaulicher. Die Methanhektarerträge der frischen Substratvarianten und der Silagen sind für Weizen in Abb. 68 und für Mais in Abb. 69 dargestellt. Trotz teilweise hoher Trockenmasseverluste während der Silierung (bis zu 23 %) liegen die Methanhektarerträge der Silagen im gleichen Bereich wie die der frischen Ausgangssubstrate. Durch die erhöhte spezifische Gasproduktion der Silagen, werden die Trockenmasseverluste größtenteils kompensiert. Ähnliche Beobachtungen berichten PLÖCHL et al. (2009).

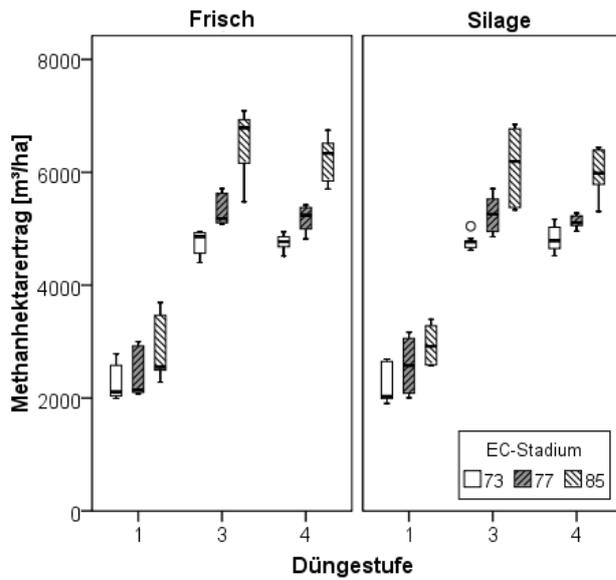


Abb. 68: GPS-Weizen, frische Substrate und Silagen, beide Versuchsjahre – Ergebnisse aus dem Batch zum Methanhektarertrag in Abhängigkeit vom Entwicklungsstadium

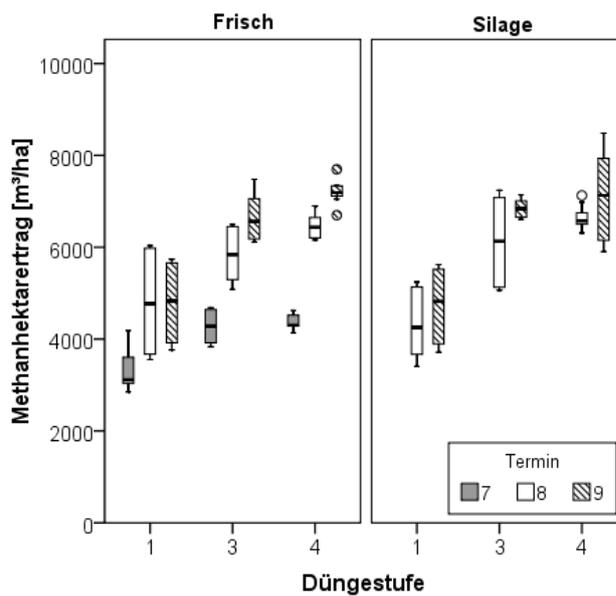


Abb. 69: Mais 1, frische Substrate und Silagen, beide Versuchsjahre – Ergebnisse aus dem Batch zum Methanhektarertrag in Abhängigkeit vom Erntetermin

Die in der vorliegenden Arbeit festgestellte Kompensation ist jedoch nicht uneingeschränkt auf die Praxis übertragbar, da es sich bei den untersuchten Silagen um Laborsilagen handelt, die unter nahezu idealen Bedingungen hergestellt wurden. So kann z.B. davon ausgegangen werden, dass die Verdichtung optimal war und während der gesamten Lagerdauer die Gasdichtigkeit gewährleistet war. Der gesamte anfallende Sickersaft wurde nach dem Öffnen der Silos wieder mit der

Silage vermengt und war dadurch ebenfalls in Gänze der Methangärung zugänglich. Dadurch konnten die Masseverluste minimal gehalten werden, zumal die in der Praxis übliche Entnahmephase und die damit ebenfalls verbundenen Verluste ebenfalls nicht vorhanden waren. In der Praxis ist demnach grundsätzlich mit weitaus höheren Masseverlusten zu rechnen, die dann nicht mehr über die erhöhten Methanerträge der Silagen kompensiert werden können.

Als Konsequenz für die Erzeugung maximaler Methanerträge pro Fläche ergibt sich aus den durchgeführten Untersuchungen, dass

- die Steigerung der Stickstoffdüngintensität bis zur Optimalversorgung (3. Düngestufe) zu einer Erhöhung des Trockenmasseertrages und damit zur Erhöhung des Methanhektarertrages führt,
- der Erntezeitpunkt im Hinblick auf maximale Trockenmasseerträge unter Berücksichtigung der Silierfähigkeit gewählt werden sollte,
- Masseverluste durch eine optimale Siliertechnik so weit wie möglich minimiert werden sollten.

Vergleich der Gärtestapparaturen

Der Vergleich der Gärtestapparaturen hat gezeigt, dass die im HBT ermittelten Gaserträge immer über den Gaserträgen liegen, die im Batch ermittelten wurden (vgl. Kapitel 5.4). Diese Beobachtung trifft sowohl für das Referenzsubstrat Cellulose als auch für Weizen und Mais zu, wobei die spezifische Methanproduktion im Batch je nach Substrat bis zu 15 % geringer ist als im HBT.

Ein Grund hierfür könnte die unterschiedliche Probenaufbereitung sein. Die Substrate werden HBT im getrockneten und gemahlten Zustand eingesetzt (vgl. Kapitel 4.3.1.1), wodurch eine bessere Homogenisierung und Verfügbarkeit der Nährstoffe gewährleistet ist. Im Gegensatz dazu werden die Substrate im Batch im frischen Zustand mit gröberen Partikelgrößen untersucht. Diese Erklärung lässt sich jedoch nur auf die pflanzlichen Substrate anwenden, da Cellulose immer in pulverisierter Form verwendet wird. Deshalb scheint es sich eher um einen systematischen Versatz zwischen den beiden verwendeten Gärtests zu handeln. Es kann ausgeschlossen werden, dass der Batch-Test Gasundichtigkeiten aufweist, da das System regelmäßig auf Gasdichtigkeit untersucht wird (vgl. Kapitel 4.6.2). Des Weiteren kommen Gerätefehler und Messungenauigkeiten als Ursache in Betracht. Die durchgeführte Fehlerbetrachtung hat ergeben, dass sich vor allem Fehler bei der

Gasvolumenmessung und der Gasanalyse auf die Methanproduktion auswirken (vgl. Kapitel 5.1.4). Allerdings wurde in beiden Versuchsanlagen dasselbe Methananalysegerät verwendet, meist liefen die Versuche parallel. Insofern ist davon auszugehen, dass auch bei den jeweiligen Messungen die gleichen Fehler aufgetreten sind. Fehler in der Volumenmessung wirken sich beim HBT stärker auf die Methanproduktion aus. Insofern wäre es theoretisch möglich, dass die Methanproduktion im HBT überschätzt wird. Das ist aber eher als unwahrscheinlich anzusehen, da das übereinkunftsgemäße Vorgehen bei der Volumenmessung im HBT dem entgegenwirkt und zu einer Fehlerminimierung beiträgt.

FISCHER (2007) sowie HELLFRICH und OECHSNER (2003) gingen ebenfalls der Frage nach, ob verschiedene Gärtests (HBT, Batch-Test mit Eudiometer) zu gleichen Ergebnissen führen. Beide Studien bestätigen die eigenen Beobachtungen, wobei die aufgetretenen Unterschiede mit bis zu 5 % geringer ausfallen.

Die Frage nach den Ursachen für die Unterschiede zwischen den verwendeten Gärtests kann nicht abschließend beantwortet werden, sicher ist jedoch, dass in der Praxis häufig die aus Gärversuchen resultierenden Methanerträge insofern korrigiert werden, als dass sie mit dem Faktor verrechnet werden, der sich für das Referenzsubstrat aus dem Verhältnis der theoretischen zur gemessenen Methanproduktion ergibt. Diese Vorgehensweise wurde von HEUWINKEL et al. (2009) näher untersucht. Danach verändert diese Normierung der Daten nicht das Verhältnis der in einem Versuchsansatz untersuchten Substrate sondern ermöglicht erst einen Vergleich zwischen verschiedenen Versuchsansätzen.

Der Variationskoeffizient zwischen den Laborwiederholungen war in der vorliegenden Arbeit substratunabhängig und lag im HBT bei maximal 4 %, im Batch bei etwa 6 %. Der Variationskoeffizient zwischen den einzelnen Messungen in beiden Versuchsanlagen betrug etwa 11 %. Eine Normierung der Gaserträge über das Referenzsubstrat nach der von HEUWINKEL et al. (2009) vorgeschlagenen Methode, hätte eine Verringerung des Variationskoeffizienten auf 5,5 % zur Folge, der absolute Unterschied zwischen den Mittelwerten der spezifischen Methanproduktion eines in beiden Anlagen untersuchten Substrats würde maximal $7 \text{ l}_N/\text{kg}_{\text{OTS}}$ betragen.

Allerdings muss bei der Anwendung und Übertragung dieser Methode auf andere als die hier vorgestellten Substrate beachtet werden, dass Cellulose nicht immer als Referenzsubstrat und zur Normierung der Gaserträge geeignet ist.

Berechnung des theoretischen Methanbildungsvermögens

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden ergänzend zu den Gärtests Berechnungen des theoretischen Methanbildungsvermögens durchgeführt und mit den Laborergebnissen verglichen (vgl. Kapitel 5.3.3). Für die Auswahl der verwendeten Berechnungsmethoden waren entscheidend:

- Einfache Anwendbarkeit auf eine größtmögliche Anzahl der untersuchten Substrate;
- Verfügbarkeit aller zur Berechnung benötigten Parameter, vor allem die Inhaltsstoffgehalte der Substrate.

Da lediglich alle benötigten Parameter (Rohnährstoffe) bei den frischen Substraten vorliegen, waren Berechnungen zu den Silagen nicht möglich. Aufgrund der aufgestellten Kriterien zur Wahl der Berechnungsmethode und den Gegebenheiten wurden die Berechnungen nach KEYMER und SCHILCHER (1999) sowie WEIßBACH (2008; 2009b) durchgeführt.

Beim Vergleich der experimentell ermittelten Methanerträge mit den theoretischen Berechnungen mittels der Quotienten ist der fast konstante Versatz zwischen HBT und Batch auffällig, auf dessen Ursachen bereits eingegangen wurde (vgl. Kapitel 5.3.3). Die mittels der „Keymer-Formel“ für Cellulose berechneten Methanerträge stimmen gut mit den im HBT ermittelten überein. Möglicherweise ist das darauf zurückzuführen, dass Cellulose ein Reinstoff ist.

Für alle pflanzlichen Substrate liegt die mit dem HBT gemessene immer über der theoretisch berechneten Methanproduktion. Um die Methanproduktion der Substrate zu berechnen, muss die Verdaulichkeit der Inhaltsstoffe bekannt sein. Die Verdaulichkeit ist unter anderem vom Erntetermin und vom Kornanteil abhängig. Die Werte wurden für die Verdaulichkeiten aus der Futterwerttabelle (1997) ausgewählt, deren Begleitparameter am besten mit den verwendeten Substraten übereinstimmten.

WEIßBACH (2008) stellte fest, dass die mit der Methode nach KEYMER und SCHILCHER (1999) berechneten Gasausbeuten im Vergleich mit Messungen mittels Gärtests geringer sind. Die Ursache ist in der Gleichsetzung der am Tier gemessenen scheinbaren Verdaulichkeit mit der biologischen Abbaubarkeit der Nährstoffe zu suchen. Deshalb führt er den Begriff bzw. Parameter fermentierbare organische Substanz ein, der die Basis für die Berechnungen der Gasausbeute nach WEIßBACH (2008) darstellt. Der Vergleich der im Labor ermittelten mit den über die

„Weißbach-Formel“ berechneten Methanausbeuten für Weizen und Mais zeigte bessere Übereinstimmungen (vgl. Kapitel 5.3.3), vor allem beim Weizen. Im Verhältnis zum Batch werden die Ergebnisse etwas überschätzt, im Verhältnis zum HBT etwas unterschätzt, liegen also genau zwischen den experimentell ermittelten Methanausbeuten. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Methode von WEIßBACH (2008) besser zur Abschätzung der theoretischen Gasausbeute geeignet ist. Auch im Hinblick auf mögliche Kosten stellt diese Vorgehensweise die bessere Alternative dar, da lediglich die Parameter Aschegehalt und Rohfaser (bei Gras zusätzlich EulOS) benötigt werden. Somit stellt die Methode von WEIßBACH (2008) für den Praxiseinsatz ein gutes und relativ kostengünstiges Mittel dar, die theoretischen Gaserträge von Biogassubstraten abzuschätzen und Gärtests zu vermeiden. Allerdings liegen nicht für alle möglichen Biogassubstrate Formeln zur Berechnung vor. Gerade wenn die Eignung „neuer“ Kulturpflanzen als Biogassubstrat festgestellt werden soll, sind Gärtests unumgänglich. Das trifft auch auf wissenschaftliche Fragestellungen zu, die verschiedene Einflussfaktoren, wie beispielweise Unterschiede zwischen Aufbereitungsarten, auf den Methanertrag herausstellen sollen. Bei solchen Untersuchungen können trotz gleicher Inhaltsstoffzusammensetzung andere Gaserträge gemessen werden (HOPFNER-SIXT et al., 2010; BAUER et al., 2010). Auch um Aussagen zur Fermentationskinetik treffen zu können, sind Gärtests erforderlich.

Fermentationskinetik

Die Fermentationskinetik einer Auswahl der untersuchten Nawaro ist in Kapitel 5.5 ausführlich dargestellt. In Bezug auf die für die Auswertung gewählte Vorgehensweise, können einige Punkte kritisch betrachtet werden.

Die im diskontinuierlichen Gärtest mit einer Versuchsdauer von 28 Tagen bestimmte Gesamtbioogasproduktion (spezifische Biogasproduktion) eines Substrats wurde mit 100 % gleichgesetzt, obwohl bei längerer Versuchsdauer noch eine gewisse Steigerung der Gasproduktion möglich gewesen wäre. Allerdings ist diese mögliche Steigerung im Verhältnis zur gebildeten Biogasmenge als gering anzusehen, zumal das Abbruchkriterium der VDI 4630 (2006) bereits nach 28 Tagen erfüllt war.

Die Fermentationskinetik wird in der vorliegenden Arbeit mittels einer logarithmischen Funktion auf Basis der im HBT und / oder Batch ermittelten Werte zur spezifischen Biogasproduktion statistisch eindeutig beschrieben. Damit ergibt sich die Möglichkeit

der Berechnung des prozentualen Anteils an bereits fermentiertem Substrat zu frei wählbaren definierten Zeitpunkten, bei hinreichender Genauigkeit. Hierdurch ist die Vergleichbarkeit unterschiedlicher Substrate bezüglich der Fermentationskinetik gegeben. Die Kenntnis über die substratspezifische Fermentationskinetik ist für die Beurteilung der Prozessstabilität beispielsweise beim Einsatz von Mischsubstraten unterschiedlicher Kinetik erforderlich.

Der Vergleich der Fermentationskinetik der untersuchten pflanzlichen Substrate hat ergeben, dass sich diese nur geringfügig unterscheiden. Die Gasbildung setzt relativ schnell ein, nach etwa 2 bis 4 Tagen sind bereits 50 % der Biogasmenge gebildet. Nach 12 bis 16 Tagen ist bereits die 90 %-Marke erreicht. Allerdings konnten bei Weizen und Mais zum Teil Unterschiede zwischen den früheren (EC 69, T7) und den späteren Entwicklungsstadien festgestellt werden, die möglicherweise auf ein ungünstigeres Verhältnis von stickstofffreien Extraktstoffen zum Rohfasergehalt in den frühen Entwicklungsstadien zurückzuführen sind. Die Gasbildung im HBT verläuft unwesentlich schneller als im Batch, was auf die stärkere Aufbereitung der Substrate zurückgeführt werden kann, wodurch die Nährstoffe besser verfügbar sind. Die Fermentationskinetik der Cellulose ist mit einem anderen Verlauf gekennzeichnet. Wie erwähnt (vgl. Kapitel 5.5.1 und 5.5.2) setzt die Gasproduktion erst verzögert ein, nimmt dann sehr rasch zu und ist nach maximal 7,7 Tagen zu 90 % abgeschlossen. Das ist auf die komplexe Struktur der Cellulose zurückzuführen, das unverzweigte Polysaccharid besteht aus einigen tausend β -(1,4)-verknüpften D-Glucose-Einheiten. Aufgrund der β -(1,4)-glykosidischen Bindung lässt sich Cellulose mikrobiell nicht so schnell aufschließen wie ein α -glykosidisch verknüpftes Polysaccharid wie beispielsweise Stärke, die aufgrund ihrer Wasserlöslichkeit schneller abgebaut werden kann (JEROCH et al., 2008; KIRCHGEßNER et al., 2008). Dies zeigt sich in einem im Vergleich zu Stärke deutlich verzögerten Beginn („lag-Phase“) des anaeroben Abbaus. Der daran anschließende steile Anstieg der Gasproduktion ist auf die gute Fermentierbarkeit der Monomere (D-Glucose) zurückzuführen. Pflanzliche Substrate enthalten zwar auch einen großen Anteil Cellulose, darüber hinaus jedoch auch besser fermentierbare Stoffe, wie Zucker und Stärke. Diese können von den Bakterien schneller umgesetzt werden, so dass die Gasbildung eher einsetzt und die „lag-Phase“ deutlich verkürzt ist.

7 FAZIT

- Die (weiter-)entwickelten Gärtest-Versuchsanlagen wurden erfolgreich validiert und weisen insgesamt sehr gute Genauigkeiten auf. Hierfür ist auch das genau festgelegte Procedere bei der Versuchsdurchführung entscheidend. Zur erfolgreichen Anpassung des Versuchsprocedures waren die durchgeführten Begleituntersuchungen zwingend erforderlich.
- Um einen Einfluss der Temperatur beim Ansetzen des HBT auszuschließen, müssen sich zunächst alle eingesetzten Substrate und das Inokulum auf Raumtemperatur befinden und darf die Temperatur erst auf 38 °C erhöht werden, nachdem alle Kolbenprober im Rotor sind.
- Die drei Kolbenprober bzw. Wiederholungen pro Behandlung müssen zur Vermeidung von Steckplatzeinflüssen randomisiert über die Zonen des Rotors (Innen, Mitte, Außen) verteilt werden.
- Die Wahl des Klärschlammes als Inokulum und die Siebung auf 1 mm stellen einen guten Kompromiss dar, wenn sowohl der HBT und der Batch-Test parallel betrieben werden.
- Da die größten Fehler bei der Volumenmessung und Gasanalyse auftreten, ist die Anzahl der Messereignisse, vor allem im HBT, soweit wie möglich zu minimieren.
- Die Intensität der Stickstoffdüngung und der Erntetermin beeinflussen in erster Linie den Trockenmasseertrag der Energiepflanzen.
- Mais ist als Biogassubstrat den anderen Substraten Weizen und Deutschem Weidelgras aufgrund der hohen Trockenmasseerträge und Methanhektarerträge deutlich überlegen.
- Um eine Überschätzung der auf den Versuchspartellen ermittelten Trockenmasseerträge zu vermeiden, sollte ein größtmöglicher Flächenbezug sichergestellt werden.
- Die Bestimmung der flüchtigen Gärprodukte, also der Säuren und Alkohole, ist für die Korrektur des Trockensubstanzgehaltes von Silagen unerlässlich.
- Beim Vergleich der Gasproduktion frischer und silierter Biogassubstrate müssen die Trockenmasseverluste während der Silierung unbedingt berücksichtigt werden.
- Der Gärtestvergleich zeigt, dass ein fixer, substratunabhängiger Korrekturfaktor zwischen den eingesetzten Gärtestes HBT und Batch möglich ist.

-
- Die Kenntnis der Fermentationskinetik von Biogassubstraten ist wichtig, um Hinweise zur Gewährleistung der Prozessstabilität beim Einsatz von Mischsubstraten wie z. B. aus Mais und Zuckerrüben zu erhalten. Darüber hinaus sollten solche Substrate aber auch in Durchflussfermentern hinsichtlich ihres Abbauverhaltens getestet werden.

8 ZUSAMMENFASSUNG

Die Einführung des EEG im Jahr 2000 und seine Novellierungen haben in Deutschland zu einem Aufschwung in der Biogasbranche geführt. Bis Ende 2010 wuchs die Zahl der Biogasanlagen bundesweit auf 6000 an. Bereits im Jahr 2009 betrug die Anzahl der Biogasanlagen in Schleswig-Holstein 275.

Die Höhe der Methanausbeute aus der Biomasse wird im Wesentlichen durch die Zusammensetzung der Inhaltsstoffe bestimmt, die sich jedoch mit dem Alter der Pflanzen ändert bzw. sortenspezifischen Charakter haben kann. Deshalb sind der Zeitpunkt, zu dem die pflanzlichen Rohstoffe geerntet werden und Sorteneigenschaften für die Methanausbeute aus der Biomasse und den Methanhektarertrag von entscheidender Bedeutung.

Hieraus leitet sich das übergreifende Ziel der vorliegenden Arbeit ab, nämlich die Charakterisierung von Substratqualität und Methanausbeute von in Schleswig-Holstein angebauten Energiepflanzen. Hierzu waren eine HBT- und Batch-Anlage aufzubauen und zu validieren, die Bestimmungen der spezifischen Methanproduktion durchzuführen, sowie die gemessenen Methanerträge mit theoretisch berechneten Methanerträgen zu vergleichen. Darüber hinaus waren die verwendeten Gärtests miteinander zu vergleichen und die Fermentationskinetik der eingesetzten Pflanzensubstrate zu bestimmen. Die vorliegenden Arbeiten waren eingegliedert in das Verbundprojekt „BIOGAS-EXPERT“, welches sich seit November 2006 in mehreren Teilprojekten mit der umfassenden Untersuchung und Bewertung des Systems „Boden-Pflanze-Fermenter“ beschäftigte.

Am Institut für landwirtschaftliche Verfahrenstechnik wurden zwei Versuchsanlagen zur Durchführung diskontinuierlicher Gärtests etabliert, der Hohenheimer Biogasertragstest (HBT) und ein Batch-Test entsprechend der DIN 38414-8. Der Anbau der in der vorliegenden Arbeit zu untersuchenden Energiepflanzen Winterweizen, Mais und Deutsches Weidelgras erfolgte im Rahmen des Verbundprojektes. Die Stickstoffdüngedichte wurde variiert, als Düngemittel kamen mineralischer Dünger und Gärrest aus einer Biogasanlage mit Kofermentation zum Einsatz. Die Beprobung der Energiepflanzen erfolgte zu unterschiedlichen Erntezeitpunkten.

Eine größtmögliche Vielzahl der angebauten Substratvarianten ($n = 224$) wurde im HBT ausschließlich im frischen Zustand (getrocknet, gemahlen) untersucht. Eine hieraus vorgenommene Substratauswahl ($n = 72$) wurde zusätzlich im Batch-Versuch untersucht und zwar sowohl im frischen, wie auch im silierten Zustand. Die Bestimmung der spezifischen Biogas- und Methanproduktion erfolgte grundsätzlich in dreifacher Wiederholung (Nawaro im Batch fünffach), als Impfschlamm wurde ausgefauter Klärschlamm, als Referenzsubstrat mikrokristalline Cellulose verwendet. Durchgeführte Begleituntersuchungen dienten der Optimierung der Versuchsdurchführung, die bei jedem Versuch einem genau festgelegten Protokoll folgte, um vergleichbare Versuchsbedingungen gewährleisten zu können.

Die Inhaltsstoffanalysen der untersuchten Nawaro und deren Änderung im Vegetationsverlauf entsprechen weitestgehend den Angaben in der Literatur. Der Trockenmasseertrag wird durch die Intensität der Stickstoffdüngung und den Erntetermin maßgeblich beeinflusst.

Die spezifische Methanproduktion (HBT) liegt bei Weizen zwischen 359 und 371 $\text{l}_N/\text{kg}_{\text{OTS}}$, bei Mais zwischen 358 und 378 $\text{l}_N/\text{kg}_{\text{OTS}}$ und bei Deutschen Weidelgras zwischen 341 und 372 $\text{l}_N/\text{kg}_{\text{OTS}}$. Die Ergebnisse zur spezifischen Methanproduktion liegen aufgrund eines systematischen Versatzes im Batch-Versuch immer unter denen des HBT (Weizen 307-331 $\text{l}_N/\text{kg}_{\text{OTS}}$, Mais 307-354 $\text{l}_N/\text{kg}_{\text{OTS}}$), wobei die Silagen höhere Gasausbeuten erzielen (Weizen 323-386 $\text{l}_N/\text{kg}_{\text{OTS}}$, Mais 334-358 $\text{l}_N/\text{kg}_{\text{OTS}}$). Die ermittelten Ergebnisse entsprechen insgesamt den Angaben in der Literatur.

Die auf manueller Beprobung basierenden Methanhektarerträge (HBT) weisen aufgrund der Unterschiede in der Stickstoffdüngung und der Erntetermine große Schwankungsbreiten auf (Weizen 2674 bis 6622 m^3_N/ha , Mais 3519 bis 7994 m^3_N/ha , Deutsches Weidelgras 150 bis 1516 m^3_N/ha). Die Methanhektarerträge (Batch) der frischen Substrate betragen 2163-6506 m^3_N/ha bei Weizen und 3734-7201 m^3_N/ha bei Mais.

Bei Weizen hat weder die Düngeintensität noch der Erntetermin einen Einfluss auf die spezifische Methanproduktion, die Ergebnisse aus HBT und Batch sind übereinstimmend. Die Untersuchungen im HBT ergaben für Mais keine Beeinflussung der Methanausbeute durch die Düngeintensität aber einen Einfluss des Erntetermins, so wiesen früher geerntete Maisvarianten (T7) eine signifikant geringere Methanproduktion als die später geernteten Varianten (T8, T9) auf. Beim

Deutschen Weidelgras hat die Düngeintensität zumindest im 3. und 4. Schnitt einen tendenziellen Einfluss, stärker gedüngte Varianten erzielen geringere Methanerträge. Die spezifische Methanproduktion ist im 1. Schnitt am höchsten.

Die höheren Gasausbeuten der untersuchten Silagen müssen immer im Zusammenhang mit den während der Silierung auftretenden Masseverlusten gesehen werden. In der vorliegenden Untersuchung wurden unter Laborbedingungen die Trockenmasseverluste durch die erhöhte Gasproduktion der Silagen kompensiert. Da jedoch unter Praxisbedingungen die Trockenmasseverluste in der Regel wesentlich größer als im Labor sind, ist davon auszugehen, dass diese dort nicht kompensiert werden können. Deshalb muss es auch bei der Konservierung von Energiepflanzen das Ziel sein, möglichst qualitativ hochwertige Silagen zu erzeugen und alle Arten von Verlusten zu minimieren.

Im Hinblick auf die Flächenerträge erreichen die Substratvarianten mit den höchsten Trockenmasseerträgen die größtmöglichen Methanhektarerträge. Mais ist den anderen Nawaro mit einem Methanhektarertrag von $6570 \text{ m}_N^3/\text{ha}$ deutlich überlegen (Weizen $4253 \text{ m}_N^3/\text{ha}$, Deutsches Weidelgras alles Schnitte zusammen $3715 \text{ m}_N^3/\text{ha}$).

Die Berechnungen des theoretischen Methanertrages der untersuchten Substrate mit der Methode nach WEIßBACH (2008, 2009) ergaben gute Übereinstimmungen mit den experimentell durch HBT und Batch ermittelten Methanerträgen. Trotzdem können Gärtests nicht vollständig durch theoretische Berechnungen ersetzt werden, da sich Fragestellungen, wie z.B. zur Fermentationskinetik, nur experimentell beantworten lassen.

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Methode zur Beschreibung der Fermentationskinetik bei der Biogasbildung über ausgewählte Kennzahlen ermöglicht die Vergleichbarkeit einer Vielzahl von verschiedenen Substraten. Die Kenntnis über die Fermentationskinetik ist für die Beurteilung der Prozessstabilität beispielsweise beim Einsatz von Mischsubstraten unterschiedlicher Kinetik zwingend erforderlich.

9 SUMMARY

The implementation of EEG (Renewable Energy Sources Act) in the year 2000 and its amendments lead to a significant upturn in the field of biogas production. Until the end of 2010, the number of biogas plants increased up to 6,000 in Germany. In 2009, there were already 275 biogas plants in Schleswig-Holstein.

The amount of methane produced is basically determined by the composition of the substrates, which, however, depends on the age and the species of the plants used. Therefore, the time of harvesting and the species-specific characteristics of the plants are decisive for the rate of methane production per biomass used and for the methane yield per hectare.

Thus, the present study aims to characterise the suitability and the methane yield of energy plants in Schleswig-Holstein. To do so, two fermentation tests HBT and Batch had to be developed and validated, methane yields of typical energy crops for Schleswig-Holstein to be determined and the measured methane yields to be compared with theoretical calculated methane yields. Furthermore the two applied fermentation tests had to be compared and the dynamics of fermentation of the tested substrates to be determined.

The current work was incorporated in the joint research project "BIOGAS-EXPERT", which extensively examined the system "Soil-Plant-Fermenter" in several sub-projects.

At the Institute of agricultural engineering, two experimental measuring systems for discontinuous fermentation tests were established, the "Hohenheim biogas yield test (HBT)" and a batch test according to DIN 38414-8. The analysed energy plants wheat, maize and perennial ryegrass were cultivated in the context of the joint research project. The amount of nitrate for fertilisation varied. Furthermore, a mineral fertiliser and the digested substrate from a biogas plant were used and the sampling of energy plants was conducted at different harvesting times.

A highest possible variety of cultivated substrates ($n = 224$) was analysed in HBT, at which the substrates were exclusively fresh (dried and ground). A herefrom selection of substrates ($n = 72$) was also examined in the batch test, fresh and ensiled. The rates of biogas and methane produced were measured with three repetitions (five

repetitions in the batch test). Digested sewage sludge was used as inoculum, microcrystalline cellulose as the reference substrate.

In accompanying experiments, experimental procedures were optimised, the course of experiments standardised providing very reproducible conditions.

The analysis of the ingredients of the tested energy plants and their seasonal changes correspond in general to literature. The yield of the dry mass is significantly dependent on the intensity of nitrate fertilisation and the time of harvesting.

The substrate specific methane yield (HBT) is between 359 and 371 l_N/kg_{ODM} for wheat, between 358 and 378 l_N/kg_{ODM} for maize and between 341 and 372 l_N/kg_{ODM} for perennial ryegrass. The results on the specific methane yield in the Batch test are in general lower than in HBT due to a systematic offset (307-331 l_N/kg_{ODM} for wheat, 307-354 l_N/kg_{ODM} for maize). Silages showed always a higher methane production (323-386 l_N/kg_{ODM} for wheat, 334-358 l_N/kg_{ODM} for maize) compared to the methane production of fresh substrates. These results correspond overall to published literature.

The rates of methane production per hectare (HBT), that are based on manual sampling showed high variations due to differences in nitrate fertilisation and harvesting times (2674 - 6622 m³_N/ha for wheat, 3519 - 7994 m³_N/ha for maize, 150 - 1516 m³_N/ha for grass). The rates of methane production for fresh substrates per hectare (Batch test) are 2163-6506 m³_N/ha for wheat and 3734-7201 m³_N/ha for maize.

For wheat, neither the intensity of fertilisation nor the harvesting time influences the specific methane production. The results of HBT and Batch test are in agreement. For maize, in HBT methane yield was not dependent on the intensity of fertilisation, but on the harvesting time. Thus, the earlier harvested maize variants (T7) yielded significantly lower methane production than the later harvested maize variants (T8, T9). For perennial ryegrass the intensity of fertilisation affected the methane yield (at least in the third and fourth cut), the higher the intensity of fertilisation, the lower was the methane yield. The specific methane yield is highest for the first cut.

The higher gas yields of the tested silages have to be regarded in the context of mass loss during silage making. In the present study under laboratory conditions, the mass loss of the dry solids was compensated by higher gas yields of the silages. Opposite to this under full scale and field conditions, mass loss is usually much higher and therefore it will be not possible to compensate these losses by the in general higher methane yield of the ensiled substrates. Hence the production of high quality silages and the minimisation of all possible losses must be the aim of the conservation of energy plants.

With regard to the methane yield per hectare, the substrates with the highest yields of dry matter have the highest possible methane yield. Maize is superior compared to the other plants tested with a methane yield of 6570 m³_N/ha (4253 m³_N/ha for wheat, 3715 m³_N/ha for grass).

The calculations of the theoretical methane yield of the examined substrates with the WEIßBACH method (2008, 2009) were in agreement with the data experimentally generated in HBT and batch. Nevertheless, the fermentation tests cannot be completely replaced by theoretical calculations, since some questions like the dynamics of fermentation can only be answered by experiments.

The developed method to characterise the dynamics of yields during biogas production in the present study allows the comparison of a multitude of substrates. The knowledge about the dynamics is important to assess the stability of process, if substrates with different dynamics are used.

10 LITERATURVERZEICHNIS

- Amon, T., V. Kryvoruchko, B. Amon, G. Moitzi, S. Buga und W. Zollitsch (2002): Methanbildungsvermögen von Mais Einfluss der Sorte, der Konservierung und des Erntezeitpunktes, Endbericht. Im Auftrag von Pioneer Saaten Ges.m.b.H. Parndorf.
- Amon, T., V. Kryvoruchko, B. Amon, G. Moitzi, S. Buga, D. Fistarol Lyson, E. Hackl, D. Jeremic, W. Zollitsch und E. Pötsch (2003a): Optimierung der Biogaserzeugung aus den Energiepflanzen Mais und Klee gras. Endbericht Forschungsprojekt Nr. 1249 GZ 24.002/59-IIA1/01.
- Amon, T., V. Kryvoruchko, B. Amon, E. Pötsch und W. Zollitsch (2003b): Entwicklung eines "Methanenergiewertsystem (MEWS)" zur Bewertung des Methanbildungsvermögens von Biomasse. In: KTBL (Hrsg.): 6. Internationale Tagung Bau, Technik und Umwelt in der Nutztierhaltung, 527-530.
- Amon, T., V. Kryvoruchko, W. Zollitsch, K. Mayer und A. Amid (2003c): Biogaserzeugung aus Mais - Einfluss der Inhaltsstoffe auf das spezifische Methanbildungsvermögen von früh- bis spätreifen Maissorten. In: BAL Gumpenstein (Hrsg.): Beitrag der 54. Züchertagung der Vereinigung der Pflanzenzüchter und Saatgutkaufleute Österreichs, 1-10.
- Amon, T., V. Kryvoruchko, V. Bodiroza und B. Amon (2005): Das Methanbildungsvermögen und die Biogasqualität bei der Vergärung von Energiepflanzen. Forschungsbericht im Auftrag von Saatbau Linz Gen.m.b.H.
- Amon, T., A. Machmüller, V. Kryvoruchko, D. Milovanovic, R. Hrbek, M. W. Edelmann und B. Stürmer (2007a): Optimierung der Methanausbeute aus Zuckerrüben, Silomais, Körnermais, Sonnenblumen, Ackerfutter, Getreide, Wirtschaftsdünger und Rohglyzerin unter den Standortbedingungen der Steiermark. Forschungsprojekt Nr. 1421 BMLFUW, GZ LE.1.3.2/0050-II/1/2005 FA13B-80.26-1/04-G2 Endbericht.

- Amon, T., B. Amon, V. Kryvoruchko, A. Machmüller, K. Hopfner-Sixt, V. Bodiroza, R. Hrbek, J. K. Friedel, E. Pötsch, H. Wagentristl, M. Schreiner und W. Zollitsch (2007b): Methane production through anaerobic digestion of various energy crops grown in sustainable crop rotations. *Bioresource Technology* 98, 3204-3212.
- Aschmann, V., M. Effenberger, A. Gronauer, F. Kaiser, R. Kissel, H. Mitterleitner, S. Nesper, M. Schlattmann, M. Speckmaier und G. Ziehfrend (2007): Grundlagen und Technik. In: Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.): *Biogashandbuch Bayern. Materialienband*, 4-90.
- Baserga, U. (1998): Landwirtschaftliche Co-Vergärungs-Biogasanlagen Biogas aus organischen Reststoffen und Energiegras. *FAT-Berichte* 512, 1-11.
- Bauer, A., C. Leonhartsberger, P. Bösch, B. Amon, A. Friedl und T. Amon (2010): Analysis of methane yields from energy crops and agricultural by-products and estimation of energy potential from sustainable crop rotation systems in EU-27. *Clean Technologies and Environmental Policy* 12 (2), 153-161.
- Bauer, C., M. Lebuhn und A. Gronauer (2009): Mikrobiologische Prozesse in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. *Schriftenreihe der bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft* (12).
- Boyle, W. C. (1977): Energy recovery from sanitary landfills - a review. In: Schlegel, H. G. & J. BARNEA (Hrsg.): *Microbial energy conversion. The proceedings of a seminar*, 119-138. Pergamon Press, Oxford, New York.
- Braun, R. (1982): *Biogas - Methangärung organischer Abfallstoffe, Grundlagen und Anwendungsbeispiele*. Springer Verlag, Wien.
- Bundesministerium für Umweltschutz und Reaktorsicherheit (2010): *Kurzinfo erneuerbare Energien*.
http://www.bmu.de/erneuerbare_energien/kurzinfo/doc/3988.php (27.04.2011).
- Buswell, A. M. (1936): *Anaerobic fermentations*, Urbana, Ill.

- Czepuck, K. (2005): Gemessener Methanertrag von Reinsubstanzen bei der Biogasvergärung im Vergleich zur theoretischen Gasausbeute. Diplom-Arbeit. Universität Hohenheim. Unveröffentlicht.
- Deutsches Institut für Normung e.V. (1985): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser und Schlammuntersuchung. Schlamm und Sedimente Bestimmung des Faulverhaltens, Berlin (DIN 38414 Teil 8).
- Deutsches Institut für Normung e.V. (2000a): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser und Schlammuntersuchung Schlamm und Sedimente Bestimmung des Glühverlustes der Trockenmasse. Beuth-Verlag GmbH, Berlin (DIN EN 12879).
- Deutsches Institut für Normung e.V. (2000b): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser und Schlammuntersuchung Schlamm und Sedimente Bestimmung des Trockenrückstandes und des Wassergehaltes. Beuth-Verlag GmbH, Berlin (DIN EN 12880).
- Die Bundesregierung (2011): Die Klimapolitik der Bundesregierung.
<http://www.bundesregierung.de/Webs/Breg/un-klimakonferenz/DE/Startseite/startseite.html> (27.04.2011).
- DLG (1997): DLG-Futterwerttabellen. Wiederkäuer. DLG-Verlag, Frankfurt am Main, 7. Aufl.
- DLG (2000): DLG-Richtlinien für die Prüfung von Siliermitteln auf DLG-Gütezeichen-Fähigkeit. DLG-Verlag, Frankfurt am Main (2000). DLG.
- Eder, B., M. Mukengele, C. Papst, B. Darnhofer, H. Oechsner und J. Eder (2008): Der ideale Typ. Biogas Journal (1), 29-35.
- Eder, B. und H. Schulz (2006): Biogas Praxis. Grundlagen, Planung, Anlagenbau, Beispiele, Wirtschaftlichkeit. Ökobuch Verlag, Staufen, 3. Aufl.

- Eder, B., J. Eder, C. Papst, B. Darnhofer, M. Mukengele, H. Heuwinkel und H. Oechsner (2009): Welcher Maissortentyp zur Biogaserzeugung? In: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (Hrsg.): Internationale Wissenschaftstagung Biogas Science 2009, 57-72.
- Fachverband Biogas e.V. (2011): Biogas Branchenzahlen 2010. [http://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE_Branchenzahlen/\\$file/11-01-07_Biogas%20Branchenzahlen%202010_erw.pdf](http://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE_Branchenzahlen/$file/11-01-07_Biogas%20Branchenzahlen%202010_erw.pdf) (24.02.2011).
- Fischer, N. (2007): Untersuchung zur Bestimmung des Methanertrags aus Biomasse, ein Vergleich verschiedener Laborsysteme. Bachelor-Arbeit. Universität Hohenheim. Unveröffentlicht.
- FNR (2011): Daten und Fakten. <http://www.bio-energie.de/daten-und-fakten/bioenergie/strom/#c3371> (17.03.2011).
- Gronauer, A. und F. Kaiser (2007): Evaluierung der Methanproduktivität nachwachsender Rohstoffe in Biogasanlagen als Grundlage für ein EDV-gestütztes Expertensystem für Beratung und Praxis. Endbericht.
- Gronauer, A., S. Laukenmann, H. Heuwinkel und F. Kaiser (2008): Optimierung der standortspezifischen Gasproduktivität durch einen Arten- und Sortenvergleich potenzieller nachwachsender Rohstoffe in Bayern. Endbericht Az. Z3a-0734-1956 II N 0514, Freising.
- Gronauer, A., M. Schlattmann, M. Speckmaier und T. Metzner (2005): Konzeptionierung, Erstellung und Betrieb einer Versuchsfermenteranlage zur Bearbeitung von Fragestellungen im Bereich Inputmaterialien und Mikrobiologie bei landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Schlussbericht FKZ 0330151A.
- Heiermann, M., M. Plöchl, B. Linke, H. Schelle und C. Herrmann (2009): Biogas-Crops Part I: Specific and suitability of field crops for anaerobic digestion. <http://www.cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/viewFile/1087/1193> (17.03.2011).

- Heiermann, M. und M. Plöchl (2004): Biogas aus Pflanzen-Ergebnisse von Gärversuchen. In: 10. Internationale Tagung Energetische Nutzung nachwachsender Rohstoffe, 79-84.
- Helffrich, D. und H. Oechsner (2003): Hohenheimer Biogasertragstest Vergleich verschiedener Laborverfahren zur Vergärung von Biomasse. Agrartechnische Forschung 9 Heft 3, 27-30.
- Hertwig, F. und M. Heiermann (2006): Energetischer Futterwert und Biogasausbeute unterschiedlicher Maissortentypen.
http://www.mil.brandenburg.de/sixcms/media.php/4055/fw_mais.pdf
(17.03.2011).
- Heuwinkel, H., A. Aschmann, R. Gerlach und A. Gronauer (2009): Die Genauigkeit der Gasmessung von Substraten mit der Batchmethode. In: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (Hrsg.): Internationale Wissenschaftstagung Biogas Science 2009, 95-103.
- Hopfner-Sixt, K., T. Amon, A. Bauer, V. Kryvoruchko, B. Amon, V. Bodiroza, M. Ramusch, R. Hrbek, J. K. Friedel, W. Zollitsch und J. Boxberger (2010): Möglichkeiten zur Verbesserung der Gasausbeute aus Gärrohstoffen.
www.nachhaltigwirtschaften.at/pdf/artikel_gasausbeute0605.pdf (21.04.2010).
- Jänicke, H. (2006): Pflanzenbauliche Maßnahmen zur Beeinflussung der Gärqualität. In: DLG - Ausschuss für Futterkonservierung (Hrsg.): Praxishandbuch Futterkonservierung. Silagebereitung, Siliermittel, Dosiergeräte, Silofolien, 35-41. DLG-Verlag, Frankfurt am Main, 7. Aufl.
- Jeroch, H., W. Drochner und O. Simon (2008): Ernährung landwirtschaftlicher Nutztiere. Ulmer, Stuttgart, 2. Aufl.
- Kaiser, E. (2006): Beurteilung der Gärqualität. In: DLG - Ausschuss für Futterkonservierung (Hrsg.): Praxishandbuch Futterkonservierung. Silagebereitung, Siliermittel, Dosiergeräte, Silofolien, 42-49. DLG-Verlag, Frankfurt am Main, 7. Aufl.

- Kaiser, F. (2007): Einfluss der stofflichen Zusammensetzung auf die Verdaulichkeit nachwachsender Rohstoffe beim anaeroben Abbau in Biogasreaktoren. Dissertation. Technische Universität München.
- Kaiser, F., M. Diepolder, J. Eder, S. Hartmann, H. Prestele, R. Gerlach, G. Ziehfrend und A. Gronauer (2004): Ertragspotenziale verschiedener nachwachsender Rohstoffe in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. In: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (Hrsg.): Biogas in Bayern : Tagungsband zur Jahrestagung am 9. Dezember 2004 in Rosenheim, 43-55. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Freising.
- Kaiser, F. und A. Gronauer (2007): Methanproduktivität nachwachsender Rohstoffe in Biogasanlagen. LFL-Information, 1-24.
- Kalzendorf, C. (2006): Siliermittelarten und ihre Wirkungsweisen. In: DLG - Ausschuss für Futterkonservierung (Hrsg.): Praxishandbuch Futterkonservierung. Silagebereitung, Siliermittel, Dosiergeräte, Silofolien, 155-162. DLG-Verlag, Frankfurt am Main, 7. Aufl.
- Karpenstein-Machan (2005): Energiepflanzenanbau für Biogasanlagenbetreiber. DLG-Verlag, Frankfurt/ Main.
- Keymer, U. und A. Schilcher (1999): Beispielhafte Berechnung der theoretischen Gasausbeute in Biogasanlagen. Jahresbericht Bayerische Landesanstalt für Betriebswirtschaft und Agrarstruktur, 30-33.
- Kirchgeßner, M., F. X. Roth, F. J. Schwarz und G. I. Stangl (2008): Tierernährung. DLG-Verl, Frankfurt am Main, 12. Aufl.
- Klocke, M., E. Nettmann und I. Bergmann (2009): Monitoring der methanbildenden Mikroflora in Praxis-Biogasanlagen im ländlichen Raum: Analyse des Ist-Zustandes und Entwicklung eines quantitativen Nachweissystems. Bornimer Agrartechnische Berichte (67).
- KTBL (2010): Gasausbeute in landwirtschaftlichen Biogasanlagen, Darmstadt.

- Leivermann, S. (2011): Entwicklungsstadien im Getreide. http://www.landkreis-oder-spree.de/media/custom/1300_10646_1.PDF (16.05.2011).
- Lemmer, A. (2005): Kofermentation von Grüngut in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Dissertation. Universität Hohenheim.
- Linke, B. und H. Schelle (2001): Biogas aus nachwachsenden Rohstoffen. Energetische Nutzung nachwachsender Rohstoffe : Stand und Perspektiven der Energieträgerbereitstellung, Technologie der Energieträgernutzung, wirtschaftspolitische Bedingungen und Kostenbilanzen sowie Erfahrungsberichte über im Betrieb befindliche Anlagen ; 7. internationale Fachtagung 6. und 7. September 2001, 81-86.
- Linke, B. und G. R. Vollmer (2002): Ergebnisse der Kovergärung von Energiepflanzen und organischen Reststoffen. 5. Dialog "Abfallwirtschaft M-V", 85-95.
- Lopes, W. S., V. D. Leite und S. Prasad (2004): Influence of inoculum on performance of anaerobic reactors for treating municipal solid waste. *Bioresource Technology* 94 (3), 261-266.
- Mähnert, P. (2007): Kinetik der Biogasproduktion aus nachwachsenden Rohstoffen und Gülle. Dissertation. Humboldt- Universität Berlin.
- Mähnert, P., M. Heiermann und B. Linke (2005): Batch and semi-continuous biogas production from different grass species. http://www.atb-potsdam.de/hauptseite-deutsch/Institut/Abteilungen/Abt2/Mitarbeiter/mheiermann/publikation/CIGR_Efinal_Mahnert_2020Dec2005.pdf (16.05.2011).
- Maurer, M. und J.-P. Winkler (1982): Biogas. Theoretische Grundlagen, Bau und Betrieb von Anlagen. Verlag C. F. Müller, Karlsruhe.
- McDonald, P. (1981): *The Biochemistry of silage*. Wiley, Chichester.

- Meßner, H., N. Lütke Entrup, S. Wulf, H. Döhler, R. Baetzel, C. Pfitzner, S. Kaiser, J. Schilf und J.-M. Greef (2009): Bewertung nachwachsender Rohstoffe zur Biogaserzeugung. FNR-Verbundvorhaben "naRoBi" mit ersten Ergebnissen. Mais 36 (3), 96-101.
- Mukengele, M., M. Brulé und H. Oechsner (2006): Einfluss der Substratmischung aus Energiepflanzen auf Abbaukinetik und Methanertrag. Landtechnik 61 (1), 26-27.
- Neureiter, M., J. Teixeira Pereira dos Santos, C. Perez Lopes, H. Pichler, R. Kirchmayr und R. Braun (2005): Effect of silage preparation on methane yield from whole crop maize silages. In: Ahring, B. K. & H. Hartmann (Hrsg.): ADSW 2005 Conference Proceedings, Volume 1 Oral Presentations, 109-115.
- Neves, L., R. Oliveira und M. M. Alves (2004): Influence of inoculum activity on the bio-methanization of a kitchen waste under different waste / inoculum ratios. Process Biochemistry 39 (12), 2019-2024.
- Oechsner, H., A. Lemmer und C. Neuberg (2003): Feldfrüchte als Substrat für Biogasanlagen. Landtechnik 58 (3), 146-147.
- Oeverdick, H. (2010): Auswirkungen verschiedener Siebungen des Inokulums auf den Biogasertrag im Batchversuchsaufbau. Bachelor-Arbeit. Universität Kiel. Unveröffentlicht.
- Pagga, U. und D. B. Beimborn (1993): Anaerobic biodegradation test for organic compounds. Chemosphere 27 (8), 1499-1509.
- Pahlow, G. (2006): Gärungsbiologische Grundlagen und biochemische Prozesse der Silagebereitung. In: DLG - Ausschuss für Futterkonservierung (Hrsg.): Praxishandbuch Futterkonservierung. Silagebereitung, Siliermittel, Dosiergeräte, Silofolien, 11-20. DLG-Verlag, Frankfurt am Main, 7. Aufl.

- Palmowski, L. (2000): Digestion enhancement - Influence of the size reduction of organic waste on their anaerobic digestion. *Water science and technology / the International Association on Water Quality* 41 (3), 155-162.
- Plöchl, M., H. Zacharias, C. Herrmann, M. Heiermann und A. Prochnow (2009): Influence of Silage Additives on Methane Yield and Economic Performance of Selected Feedstock.
<http://www.cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/viewFile/1123/1192>
(18.03.2011).
- Prochnow, A., M. Heiermann, A. Drenckhan und H. Schelle (2005): Seasonal pattern of biomethanisation of grass from landscape management. http://www.atb-potsdam.de/hauptseite-deutsch/Institut/Abteilungen/Abt2/Mitarbeiter/mheiermann/publikation/CIGR_Efinal_Prochnow_2023Dec2005.pdf (17.03.2011).
- Schattauer, A. und P. Weiland (2006): Grundlagen der anaeroben Fermentation. In: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hrsg.): Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung, 25-35, Gülzow.
- Schertler, C. und H. Kübler (1996): Gärtest zur Bestimmung des Biogasbildungspotentials. *Entsorgungspraxis* 9, 33-36.
- Schmelz, K.-G. (2000): Co-Vergärung von Klärschlamm und Bioabfällen. Rhombos-Verlag, Berlin.
- Scholwin, F., J. Liebetrau und W. Edelmann (2009): Biogaserzeugung und -nutzung. Grundlagen. In: Kaltschmitt, M., H. HARTMANN & H. HOFBAUER (Hrsg.): Energie aus Biomasse Grundlagen, Techniken und Verfahren, 852-874. Springer, Berlin Heidelberg.
- Scholwin, F., T. Weidele, H. Gattermann, A. Schattauer und P. Weiland (2006): Anlagentechnik und Biogasbereitstellung. In: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hrsg.): Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung, 45-86, Gülzow.

- Schuhmacher, B. (2008): Untersuchungen zur Aufbereitung und Umwandlung von Energiepflanzen in Biogas und Bioethanol. Dissertation. Mensch und Buch Verlag. Universität Hohenheim.
- Soltau, B. (2008): Herstellung eines homogenen Impfschlammes für die Verwendung diskontinuierlicher Laborversuche. Master-Arbeit. Universität Kiel.
- Spiekers, H. (2006): Grundlagen; Einleitung und Zielgrößen. In: DLG - Ausschuss für Futterkonservierung (Hrsg.): Praxishandbuch Futterkonservierung. Silagebereitung, Siliermittel, Dosiergeräte, Silofolien, 7-10. DLG-Verlag, Frankfurt am Main, 7. Aufl.
- Sprenger, B., N. Engler und R. Matzmohr (2006): Laborversuche zur Trockenfermentation – Erste Ergebnisse. In: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hrsg.): Trockenfermentation – Stand der Entwicklungen und weiterer F+E-Bedarf, 50-58.
- Stickel, E. (2010): Wintergetreide zur Erzeugung von Ganzpflanzensilage für die Biogasproduktion.
http://www.biogas-forum-bayern.de/publikationen/Wintergetreide.zur.Erzeugung.von.Ganzpflanzensilage.fuer.die.Biogasproduktion_2.Auflage.pdf (15.04.2011).
- Stoffers, A. (2008): Untersuchung zur Blockbildung und grundsätzliche Fehlerbetrachtung beim Hohenheimer Biogasertragstest. Bachelor-Arbeit. Universität Kiel. Unveröffentlicht.
- Stoffers, A. (2009): Untersuchung zur Blockbildung und grundsätzliche Fehlerbetrachtung beim Hohenheimer Biogasertragstest. Landtechnik 64 (5), 308.
- Thaysen, J. (2006): Allgemeine Grundsätze der Silierung. In: DLG - Ausschuss für Futterkonservierung (Hrsg.): Praxishandbuch Futterkonservierung. Silagebereitung, Siliermittel, Dosiergeräte, Silofolien, 51-65. DLG-Verlag, Frankfurt am Main, 7. Aufl.

- Torres-Castillo, R., P. Llabrés-Luengo und J. Mata-Alvarez (1995): Temperature effect on anaerobic digestion of bedding straw in a one phase system at different inoculum concentration. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 54 (1-2), 55-66.
- VDI (2006): VDI-Richtlinien, VDI 4630: Vergärung organischer Stoffe Substratcharakterisierung, Probennahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche. Beuth-Verlag GmbH, Düsseldorf (2006).
- Weißbach, F. (2008): Zur Bewertung des Gasbildungspotenzials von nachwachsenden Rohstoffen. *Landtechnik* 63 (6), 356-358.
- Weißbach, F. (2009a): Das Gasbildungspotenzial von frischen und silierten Zuckerrüben bei der Biogasgewinnung. *Landtechnik* 64 (6), 394-397.
- Weißbach, F. (2009b): Das Gasbildungspotenzial von Halm- und Körnerfrüchten bei der Biogasgewinnung. *Landtechnik* 64 (5), 317-321.
- Weißbach, F. (2009c): Die Bewertung von nachwachsenden Rohstoffen für die Biogasgewinnung. Teil1. das Gasbildungspotenzial der fermentierbaren Nährstoffe. *Pflanzenbauwissenschaften* 13 (2), 72-85.
- Weißbach, F. und S. Kuhla (1995): Stoffverluste bei der Bestimmung des Trockemassegehaltes von Silagen und Grünfütter: entstehende Fehler und Möglichkeiten der Korrektur. *Übersichten Tierernährung* 23 (2), 189-214.
- Weißbach, F. und C. Strubelt (2008a): Die Korrektur des Trockensubstanzgehaltes von Grassilagen als Substrat für Biogasanlagen. *Landtechnik* 63 (4), 210-211.
- Weißbach, F. und C. Strubelt (2008b): Die Korrektur des Trockensubstanzgehaltes von Silagen als Substrat für Biogasanlagen. In: Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (Hrsg.): *Erhöhte Biomassenachfrage - eine neue Herausforderung für die Landwirtschaft*, 29-31. VDLUFA-Verlag, Darmstadt.

- Weißbach, F. und C. Strubelt (2008c): Die Korrektur des Trockensubstanzgehaltes von Maissilagen als Substrat für Biogasanlagen. *Landtechnik* 63 (2), 82-83.
- Wellinger, A., U. Baserga, W. Edelmann, K. Egger und B. Seiler (1991): *Biogas-Handbuch. Grundlagen-Planung-Betrieb landwirtschaftlicher Anlagen*. Verlag Wirz AG, Aarau, 2. Aufl.
- Wienforth, B. (2010): Mündliche Mitteilung zur Bestimmung des Trockenmasseertrages im Projekt BIOGAS-EXPERT. B. Wienforth ist Doktorandin im Institut für Acker- und Pflanzenbau der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel und bearbeitet das Teilprojekt 5 von BIOGAS-EXPERT.
- Wulf, S., H. Döhler und U. Roth (2011): Assessment of methane potentials-significance of batch-tests. In: Fördergesellschaft für nachhaltige Biogas- und Bioenergienutzung (FnBB e.V.) (Hrsg.): *Progress in Biogas II. Biogasproduktion aus landwirtschaftlicher Biomasse und organischen Reststoffen*, 229-234.

11 ANHANG

Tab. A 1: Spezifische Biogas- und Methanproduktion verschiedener Getreideganzpflanzen nach Literaturangaben mit *: berechnet

Substrat	Gärtest	Temperatur [°C]	Zeit [d]	Biogas [l _N /kg _{oTS}]	Methan [l _N /kg _{oTS}]	CH ₄ -Gehalt [%]	Quelle
Weizen Silage	Eudiometer	38	42		228-343		AMON et al. (2007b)
Weizen Silage	Eudiometer	38	35	500	267	55	AMON et al. (2005)
Weizen Silage	Batch		35-40	643-733	331-424	51-59	GRONAUER et al. (2008)
Weizen Silage	Batch		35-40		385		STICKSEL (2010)
Triticale Frisch	Batch	35	28	545-806*	305-435	56-59	HEIERMANN et al. (2009)
Triticale Silage	Batch	35	28	753-826*	467-504	61-62	HEIERMANN et al. (2009)
Triticale Silage	Batch		35-40		365		STICKSEL (2010)
Triticale Silage	Eudiometer	38	35	592	334	56	AMON et al. (2005)
Triticale Silage	Eudiometer	38	42		212-286		AMON et al. (2007b)
Roggen Frisch	Batch	35	28	452-614*	262-356	57-58	HEIERMANN et al. (2009)
Roggen Silage	Batch	35	28	746-748*	440-456	59-61	HEIERMANN et al. (2009)
Roggen Silage	Eudiometer	38	42		140-275		AMON et al. (2007b)
Roggen Silage	Eudiometer	38	35	559	309	55	AMON et al. (2005)
Roggen Silage	Batch		35-40		355		STICKSEL (2010)
Grünroggen Silage	Eudiometer	38	40	573	291		AMON et al. (2007a)
Grünroggen Silage	Batch			582	326	56	KTBL (2010)
Gerste Frisch	Batch	35	28	602-718*	337-395	55-57	HEIERMANN et al. (2009)
Gerste Silage	Batch	35	28	705-936*	395-552	56-59	HEIERMANN et al. (2009)
Gerste Silage	Eudiometer	38	35	432	244	57	AMON et al. (2005)
Gerste Silage	Batch		35-40		395		STICKSEL (2010)

Tab. A 2: Spezifische Biogas- und Methanproduktion von Mais nach Literaturangaben mit *: berechnet, Fortsetzung nächste Seite

Substrat	Gärtest	Temperatur	Zeit	Biogas	Methan	CH4-Gehalt	Quelle
		[°C]	[d]	[l _N /kg _{OTS}]	[l _N /kg _{OTS}]	[%]	
Mais Frisch	Eudiometer	37-39	60-63	351	225*	64	AMON et al. (2002)
Mais Frisch	Eudiometer	38			225		AMON et al. (2003c)
Mais Frisch	Batch				310-338		EDER et al. (2009)
Mais Frisch	Batch	35			383		NEUREITER et al. (2005)
Mais Silage	HBT	37	36		370-400		OECHSNER et al. (2003)
Mais Silage	HBT				312-342		EDER et al. (2008)
Mais Silage	Batch	37	36	653-728*	310-380	47,5-53,9	LEMMER (2005)
Mais Silage	HBT	37	35	713	362	51*	CZEPUCK (2005)
Mais Silage	HBT	37	35		370		FISCHER (2007)
Mais Silage	Eudiometer	37	35		376		FISCHER (2007)
Mais Silage	Eudiometer	37-39	60-63	393-535	247-375	62-69	AMON et al. (2002)
Mais Silage	HBT	37	35		397		MUKENGELE et al. (2006)
Mais Silage	Eudiometer	37-39	60	383-539	195-287	49-57	AMON et al. (2003b)
Mais Silage	Eudiometer	38	40	627	338	53,2	AMON et al. (2007a)
Mais Silage	Eudiometer	38			289	48-70	AMON et al. (2003c)
Mais Silage	Eudiometer	38	42		359-422		AMON et al. (2007b)
Mais Silage	Eudiometer	38	35	567	300	53	AMON et al. (2005)

Substrat	Gärtest	Temperatur [°C]	Zeit [d]	Biogas [l _N /kg _{orts}]	Methan [l _N /kg _{orts}]	CH4-Gehalt [%]	Quelle
Mais Silage	Eudiometer	37,5		673	345	51	BAUER et al. (2010)
Mais Silage	Batch		35-40	517-840	245-432	44-52	KAISER (2007)
Mais Silage	Batch		33	614	333	54	GRONAUER et al. (2005)
Mais Silage	Batch				245-431		KAISER und GRONAUER (2007)
Mais Silage	Batch		35-40	517-840	245-432	44-61	GRONAUER et al. (2008)
Mais Silage	Batch		28-42	567-703*	310-370	53-55	MÄHNERT (2007)
Mais Silage	Batch	35	29	717-1052	460-700	64-69	HERTWIG und HEIERMANN (2006a)
Mais Silage	Batch	35	28	807-1038*	468-581	54-58	HEIERMANN et al. (2009)
Mais Silage	Batch			571-603	304-315	50-53	KTBL (2010)
Mais Silage	Batch	35	35		281-364	55-57	PLÖCHIL et al. (2009)
Mais Silage	Batch	35			338-537		NEUREITER et al. (2005)

Tab. A 3: Spezifische Biogas- und Methanproduktion verschiedener Gräser nach Literaturangaben mit k.D.: keine Differenzierung, *: berechnet

Substrat	Gärtest	Temperatur	Zeit	Biogas	Methan	CH4-Gehalt	Quelle
		[°C]	[d]	[l _N /kg _{orts}]	[l _N /kg _{orts}]	[%]	
Gras Frisch	Batch		35-40	477-712	198-374	42-53	KAISER (2007)
Gras Frisch	Batch	35	35		268		PLÖCHL et al. (2009)
Grünland Frisch	Eudiometer	37-39	58		237-246		AMON et al. (2003b)
Grünland Frisch	Batch				200-417		KAISER und GRONAUER (2007)
Grünland Frisch	Batch	35	28	547-299	155-298	48-55*	PROCHNOW et al. (2005)
Gras Silage	Batch		35-40	382-847	203-443	46-56	KAISER (2007)
Gras Silage	Batch	38	40	485	262	54	GRONAUER et al. (2005)
Gras Silage	Batch		35-40	584-767	315-458	52-63	GRONAUER et al. (2008)
Gras Silage	Batch	35	35		252-374		PLÖCHL et al. (2009)
Gras k.D.	Batch				208-381		KAISER und GRONAUER (2007)
Gras k.D.	Batch			571-603	304-315	50-53	KTBL (2010)
Grünland Silage	Eudiometer	37-39	58		237-390		AMON et al. (2003b)
Grünland Silage	Eudiometer	38	42		128-392		AMON et al. (2007b)
Grünland Silage	Batch				225-423		KAISER und GRONAUER (2007)
Grünland Silage	Batch		35-40	360-859	195-572	44-70	GRONAUER et al. (2008)
Kleegras Silage	Eudiometer	38	40	544	291	55	AMON et al. (2007a)
Kleegras Silage	HBT	37	35	664	376	57	CZEPUCK (2005)
Kleegras Silage	HBT	37	35		382		MUKENGELE et al. (2006)
Weidelgras Silage	Batch		35-40	410-686	223-427	52-63	GRONAUER et al. (2008)
Weidelgras k.D.	Batch			477-846	198-443		KAISER und GRONAUER (2007)

Tab. A 4: Zusammensetzung der Sperrflüssigkeit

Reihenfolge	Substanz	Volumen bzw. Masse
1.	Destilliertes Wasser	1000 ml
2.	Schwefelsäure (95-97 %)	30 ml
3.	Natriumsulfat-Decahydrat	200 g
4.	Methylorange-Lösung (0,1 %)	einige Tropfen

Tab. A 5: Entwicklungsstadien (EC-Stadien) im Getreide (LEIVERMANN, 2011)

Code	EC Stadium	Beschreibung	Bemerkung
0 Keimung	0-9	Keimung bis Auflaufen	
1 Blattentwicklung	10	Blatt spitzen	Blattspitzen des nächsten Blattes jeweils sichtbar
	11	1. Blatt entfaltet	
	12	2. Blatt entfaltet	
	13 - 19	3. Laubblatt entfaltet usw.	
2 Bestockung	21	1. Bestockungstrieb sichtbar	Bestockung kann ab Stadium 13 erfolgen
	22	2. Bestockungstrieb sichtbar	
	23	3. Bestockungstrieb sichtbar usw.	
3 Schossen (Haupttrieb)	30	Haupttriebe beginnen sich zu strecken	Ähre min. 1 cm vom Bestockungsknoten entfernt
	31	1-Knoten-Stadium	1. Knoten min. 1 cm vom Bestockungsknoten entfernt
	32 - 34	2-Knoten-Stadium usw.	2. Knoten min. 2 cm vom 1. Knoten entfernt
	37	Erscheinen des letzten Blattes (Fahnenblatt)	letztes Blatt noch eingerollt
	39	Fahnenblatt voll entwickelt	Blatthäutchen sichtbar
4 Ährenscheiden	45	Blattscheide geschwollen	
	49	Grannenspitzen	
5 Ährenschieben	51	Beginn Ährenschieben	Ähre vollständig sichtbar
	59	Ende Ährenschieben	
6 Blüte	61	Beginn der Blüte	
	65	Mitte der Blüte	
	69	Ende der Blüte	
7 Fruchtbildung	71	Beginn Kornbildung	Korninhalt wässrig
	75	Mitte Milchreife	Korninhalt milchig
8 Reife	85	Teigreife	Korninhalt weich und trocken
	87	Gelbreife	Fingernageleindruck bleibt
	89	Vollreife	Korn hart; kaum zu brechen
9 Absterben	92	Totreife	Körner nicht mehr zu brechen
	97	Pflanzen abgestorben	Halme brechen zusammen

Tab. A 6: Erntetermine und Entwicklungsstadien (EC-Stadien) der untersuchten Energiepflanzen
mit DW: Deutsches Weidelgras, HS: Hohenschulen, KD: Karkendamm, T: Termin,
H: Handernte, M: Maschinenernte

Kultur	Termin (EC-Stadium)	Probenahme	Zeitraum Probenahme 2007	Zeitraum Probenahme 2008
Weizen	T7 (EC69)	H	05.+ 07.06.2007	09.+11.06.2008
Weizen	T8 (EC73)	H	12.+ 14.06.2007	16.06.2008
Weizen	T9 (EC77)	H	19.+20.06.2007	23.+24.06.2008
Weizen	T10 (EC85)	H	25.+27.06.2007	10.+14.07.2008
Weizen	T10 (EC85)	M	26 -29.06.2007	10.07.2008
Mais 1 HS	T5 (2007) / T7 (2008)	H	14.08.2007	12.+20.08.2008
Mais 1 HS	T6 82007) / T8 (2008)	H	04.+05.09.2007	02.+03.09.2008
Mais 1 HS	T7 (2007) / T9 (2008)	H	25.09.2007	07.+09.10.2008
Mais 1 HS	T7 (2007) / T9 (2008)	M	05.10.2007	09.10.2008
Mais 1 KD	T5 (2007) / T7 (2008)	H	13.08.2007	13.+21.08.2008
Mais 1 KD	T6 82007) / T8 (2008)	H	03.09.2007	02.+04.09.2008
Mais 1 KD	T7 (2007) / T9 (2008)	H	05.10.2007	09.10.2008
Mais 1 KD	T7 (2007) / T9 (2008)	M	05.10.2007	09.10.2008
DW	1.Schnitt	M	15.05.2007	16.05.2008
DW	2.Schnitt	M	06.07.2007	01.07.2008
DW	3.Schnitt	M	16.08.2007	05.08.2008
DW	4.Schnitt	M	01.10.2007	30.09.2008

Tab. A 7: Untersuchungen an Pflanzensubstraten bei der LUFA ITL Kiel

Art des Pflanzensubstrats	Untersuchter Parameter	Methode
Frisch	Trockensubstanz Organische Trockensubstanz Rohfett Rohstärke bzw. Rohzucker Rohprotein Rohfaser Pufferkapazität Nitrat Anfangbesatz mit Milchsäurebakterien	VDLUFA III 3.1 VDLUFA III 8.1 VDLUFA III / 5.1.1B VDLUFA III / 7.2.1 bzw .VDLUFA III / 7.1.1 VDLUFA III / 4.1.1 VDLUFA III / 6.1.1 Photometrie MRS (pH 5,4)72h/37°C (O2-Spannung)
Frisch, getrocknet und vermahlen	Trockensubstanz Organische Trockensubstanz Rohfett Rohstärke bzw. Rohzucker Rohprotein Rohfaser	VDLUFA III 3.1 VDLUFA III 8.1 VDLUFA III / 5.1.1B VDLUFA III / 7.2.1 bzw .VDLUFA III / 7.1.1 VDLUFA III / 4.1.1 VDLUFA III / 6.1.1
Silage	pH Trockensubstanz Ammoniak-N Gärsäuren (Essigsäure, Propionsäure, Buttersäure, Milchsäure)	VD LUFA III 18.1 VD LUFA III 3.1 Photometrie Ionenchromatographie

Text A 1: Berechnung der spezifischen Biogas- und Methanproduktion

Die Grundlage der Berechnungen bildet die VDI-Richtlinie 4630 (2006).

Als erster Schritt der quantitativen Auswertung wird aus der notierten Gasproduktion das **Normgasvolumen** (V_0^{tr}) des Biogases berechnet, welches zwischen zwei Analyseereignissen produziert worden ist (Gleichung A 1). Es wird auch als Volumen des trockenen Gases im Normzustand bezeichnet. Die Biogasproduktion wird auf Temperatur, Druck und den Gehalt an Wasserdampf in Abhängigkeit der Temperatur korrigiert.

$$V_0^{\text{tr}} = V \cdot \frac{(p - p_w) \cdot T_0}{p_0 \cdot T} \quad (\text{A 1})$$

V_0^{tr}	Volumen des trockenen Gases im Normzustand in ml_N
V	abgelesenes Volumen des Gases in ml
p	Druck der Gasphase zum Zeitpunkt der Ablesung in hPa
p_w	Dampfdruck des Wassers in Abhängigkeit von der Temperatur des umgebenen Raumes in hPa
T_0	Normtemperatur; $T_0 = 273 \text{ K}$
p_0	Normdruck; $p_0 = 1013 \text{ hPa}$
T	Temperatur des Biogases oder des umgebenen Raumes in Kelvin

Da der Methangehalt ebenfalls im feuchten Gas gemessen worden ist, wird auch hier um den Gehalt an Wasserdampf korrigiert. Die **Methankonzentration** des trockenen Gases ($C_{\text{CH}_4}^{\text{tr}}$) wird mit Hilfe von Gleichung A 2 berechnet.

$$C_{\text{CH}_4}^{\text{tr}} = C_{\text{CH}_4}^{\text{f}} \cdot \frac{p}{p - p_w} \quad (\text{A 2})$$

$C_{\text{CH}_4}^{\text{tr}}$	Methankonzentration im trockenen Gas in Vol.-%
$C_{\text{CH}_4}^{\text{f}}$	Methankonzentration im feuchten Gas in Vol.-%
p	Druck der Gasphase zum Zeitpunkt der Ablesung in hPa
p_w	Dampfdruck des Wassers in Abhängigkeit von der Raumtemperatur in hPa

Da das Gasvolumen in der Versuchsanordnung nach DIN 38414-8 zu Beginn des Gärtests eine relevante Größe im Vergleich zum gebildeten Biogasvolumen hat, der sogenannte Kopfraum beträgt hier 350 ml , müssen die gemessenen **Methankonzentrationen einer Kopfraumkorrektur** unterzogen werden. Die korrigierten Konzentrationen ($C_{\text{korrr}}^{\text{tr}}$) können mit Gleichung A 3 berechnet werden.

$$C_{korr}^{tr} = C_{t2}^{tr} + (C_{t2}^{tr} - C_{t1}^{tr}) \cdot \frac{V_K}{V_B}$$

(A 3)

C_{korr}^{tr} korrigierte Konzentration des Methans im trockenen Gas in Vol.-%

C^{tr} gemessene Konzentration des Methans im trockenen Gas in Vol.-%

V_K Kopfraumvolumen in ml

V_B Volumen des produzierten Biogases in ml

t Messzeitpunkt ($t_2 > t_1$)

Die VDI 4630 (2006) bietet noch eine andere Möglichkeit, die **Zusammensetzung des trockenen Biogases** ohne Feuchte und Kopfraumkorrektur zu berechnen, unter der Voraussetzung, dass die beiden Hauptkomponenten des Biogases, Methan und Kohlendioxid zeitgleich analysiert werden. Die Berechnungen der Gleichungen A 2 und A 3 werden durch Gleichung A 4 ersetzt.

$$C_{korr}^{tr} = C_{CH_4(CO_2)} * \frac{100}{C_{CH_4} + C_{CO_2}}$$

(A 4)

C_{korr}^{tr} korrigierte Konzentration des Methans im trockenen Gas in Vol.-%

$C_{CH_4(CO_2)}$ gemessene Konzentration des Methans im trockenen Gas in Vol.-%

Beim Hohenheimer Biogasertragstest existiert kein Kopfraumvolumen, deshalb ist die obige Korrektur nicht erforderlich.

Die Normgasvolumina eines Fermenters werden schrittweise in Reihenfolge der Ableseprozesse aufsummiert. Um den **Eigengasanteil des Impfschlamm**s aus der Normgasproduktion der Substrat-Impfschlamm-Mischung zu bestimmen, wird zuerst die Gasproduktion des Impfschlammes (V_{IS}) auf Normbedingungen gebracht (vgl. Gleichung (3)) und anschließend in Abhängigkeit von der Zeit graphisch dargestellt (Tab. A 1). Um für jeden Ablesezeitpunkt der Gasproduktion der Substrat-Klärschlamm-Mischung den Anteil der Eigengasproduktion über Interpolation bestimmen zu können, wurde mithilfe einer Trendlinie eine Funktion aufgestellt. Als Variable wird die jeweilige Verweilzeit (seit Versuchsbeginn) im Fermenter, in Tagen, eingesetzt.

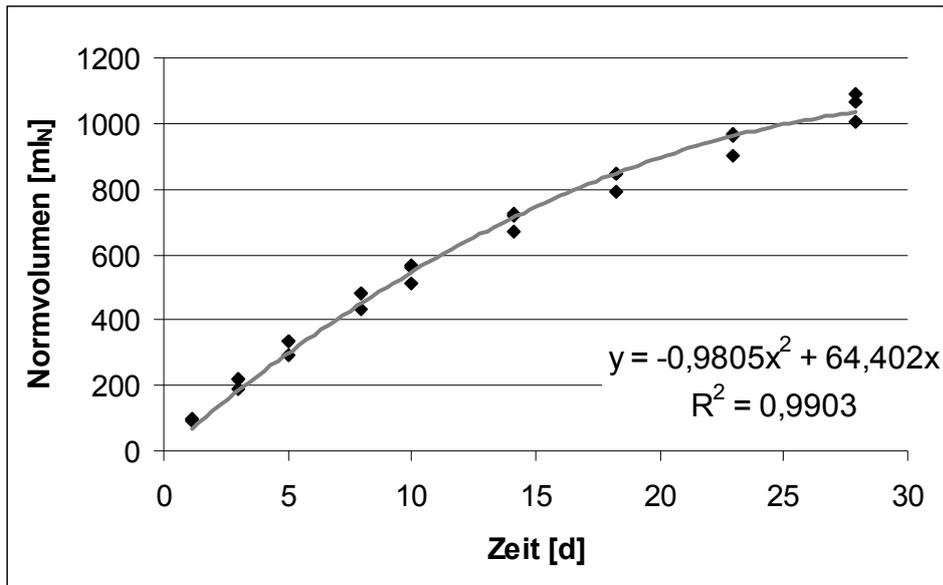


Abb. A 1: Normvolumen der Nullproben eines beispielhaften Versuches mit Trendlinie und Bestimmtheitsmaß

Nun wird die **Eigengasproduktion des Klärschlammes** ($V_{IS(korr.)}$) in den Mischungen auf die jeweilige Klärschlammleinwaage des Substrat-Klärschlamm-Gemischs korrigiert (Gleichung A 5).

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

(A 5)

$V_{IS(korr.)}$ Gasvolumen, das aus dem Klärschlamm entwickelt wurde in ml_N

$\sum V_{IS}$ Summe der Gasvolumina des Versuchs mit Klärschlamm für die betrachtete Versuchsdauer in ml_N

m_{IS} Masse des für die Mischung aus Substrat und Klärschlamm benutzten Klärschlammes in g

m_M Masse des im Kontrollversuch benutzten Klärschlammes in g

Das **Netto-Gas-Normvolumen** (Gleichung A 6) des Substrats (V_n) im Versuch ergibt sich für die gleichen Versuchszeiten als Differenz von Normgasvolumen (V_0^{tr}) abzüglich des auf die jeweilige Einwaage korrigierten Eigengasvolumens des Klärschlammes ($V_{IS(korr.)}$).

$$V_n = V_0^{tr} - V_{IS(korr.)}$$

(A 6)

- V_n Netto-Gasvolumen des Substrates im Normzustand in ml_N
 V_0^{tr} Normgasvolumen des trockenen Gases in ml_N
 $V_{IS(korr.)}$ Eigengasanteil des Klärschlammes in ml_N

Die **substratspezifische Biogasproduktion** (V_S) in Abhängigkeit der jeweiligen Verweilzeit wird von Ablesung zu Ablesung schrittweise berechnet. Hierbei wird die Netto-Gasproduktion des Substrats auf die jeweilige Glühverlustmasse (Masse der oTS) bezogen (Gleichung A 7).

$$V_S = \frac{\sum V_n \cdot 10^4}{m \cdot w_T \cdot w_V}$$

(A 7)

- V_S spezifische, auf die Glühverlustmasse bezogene Biogasproduktion während der Verweilzeit in l_N / kg oTS
 $\sum V_n$ Netto-Gasproduktion des Substrates für die betrachtete Verweilzeit in ml_N
 m Masse des eingewogenen Substrats in g
 w_T Trockensubstanzgehalt des Substrats in %
 w_V Anteil organischer Trockensubstanz (oTS) an der Trockenmasse des Substrats in %

Das Methannormvolumen des trockenen Gases ergibt sich aus Multiplikation des Normgasvolumens (V_0^{tr}) mit dem Methangehalt des trockenen Gases ($C_{CH_4}^{tr}$) (Gleichung A 8).

$$V_{CH_4}^{tr} = \frac{V_0^{tr} \cdot C_{CH_4}^{tr}}{100\%}$$

(A 8)

- $V_{CH_4}^{tr}$ Normmethanvolumen (trockenes Gas) in ml_N
 V_0^{tr} Normgasvolumen des trockenen Gases in ml_N
 $C_{CH_4}^{tr}$ Methankonzentration im trockenen Gas in Vol.-%

Der Anteil der Methanproduktion aus dem Klärschlamm wird analog zur Berechnung des Eigengasanteils des Klärschlammes bestimmt. Es wird ein Mittelwert der kumulativen Methanproduktion gebildet. Mithilfe einer Trendlinie wird eine Funktion aufgestellt, die als Variable die Versuchszeit seit Beginn hat (Abb. A 2).

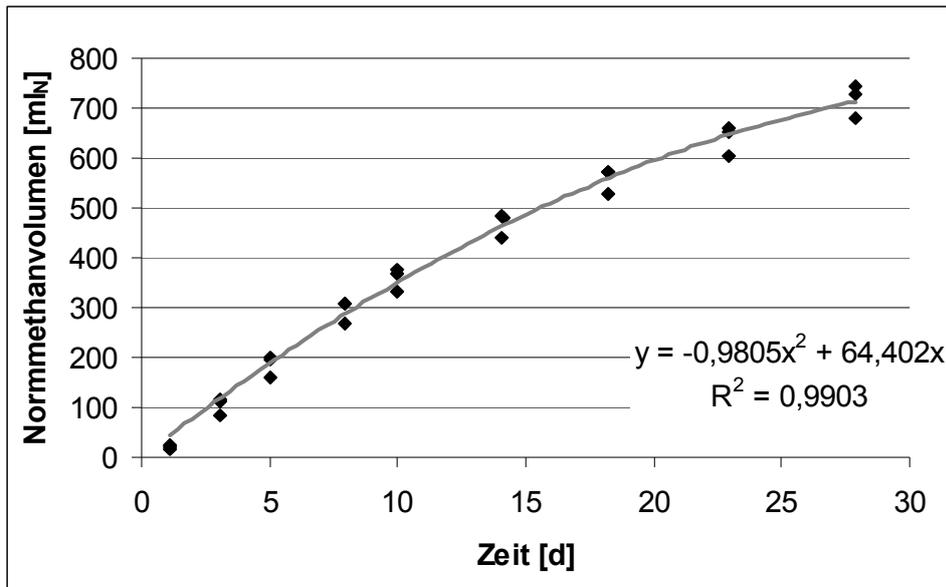


Abb. A 2: Normmethanvolumen der Nullproben eines beispielhaften Versuches mit Trendlinie und Bestimmtheitsmaß

Mittels dieser Funktion kann für jeden beliebigen Ablesezeitpunkt die Eigen-Methanproduktion des Klärschlammes interpoliert werden, die allerdings wie in Gleichung A 5 um die jeweilige Klärschlammleinwaage korrigiert werden muss.

Das Netto-Methannormvolumen des Substrates ergibt sich auch analog zu der Berechnung des Netto-Gas-Normvolumens (Gleichung A 6), durch die Differenz von Methannormvolumen und Methannormvolumen der Nullprobe.

In Anlehnung an die Berechnung der substratspezifischen Biogasproduktion (Gleichung A 7) wird die substratspezifische Methanproduktion bestimmt.

Die Werte der spezifischen Biogasproduktion und der spezifischen Methanproduktion werden als Summenkurven in Abhängigkeit von der Zeit aufgetragen. Aus dem Verhältnis von substratspezifischer Methanproduktion zur substratspezifischen Biogasproduktion kann der durchschnittliche Methangehalt bestimmt werden.

Tab. A 8: Statistische Kennzahlen zur substratspezifischen Biogas- und Methanproduktion von Cellulose (Tag 17) und Weizen (Tag 28) verändert nach STOFFERS (2008)

	Cellulose (n= 59)		Weizen (n= 21)	
	Biogas	Methan	Biogas	Methan
Mittelwert [$\text{l}_\text{N}/\text{kg}_{\text{OTS}}$]	700	364	665	363
Median [$\text{l}_\text{N}/\text{kg}_{\text{OTS}}$]	700	363	665	363
Minimum [$\text{l}_\text{N}/\text{kg}_{\text{OTS}}$]	670	345	650	354
Maximum [$\text{l}_\text{N}/\text{kg}_{\text{OTS}}$]	728	387	679	372
Standardabweichung [$\text{l}_\text{N}/\text{kg}_{\text{OTS}}$]	16	11	9	6
Variationskoeffizient [%]	2,28	3,02	1,3	1,7

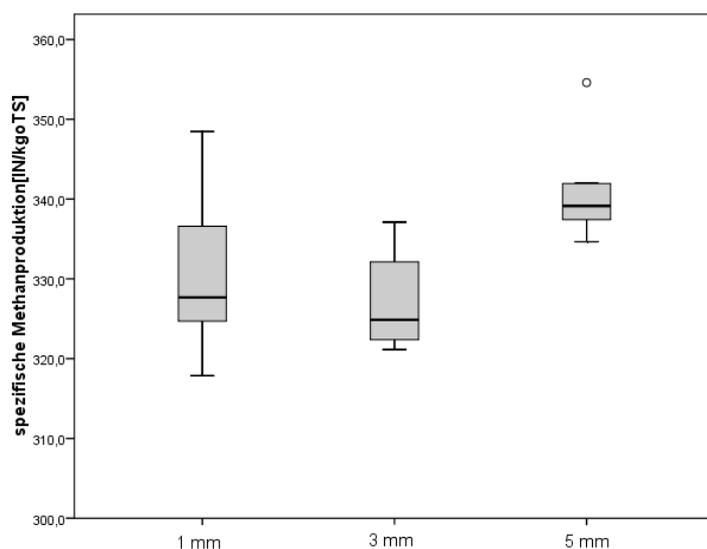


Abb. A 3: Boxplot der spezifischen Methanproduktion der Cellulose (basierend auf volumetrischer Kopfraumkorrektur) in Abhängigkeit von der Siebung verändert nach OEVERDIECK (2010)

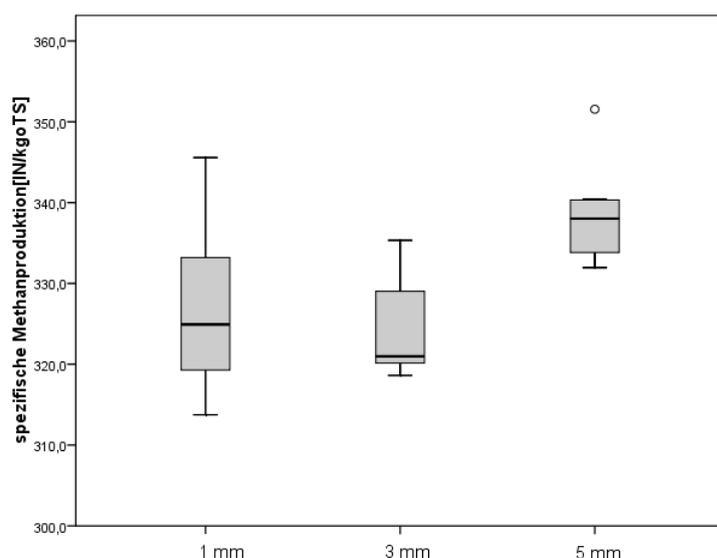


Abb. A 4: Boxplot der spezifischen Methanproduktion der Cellulose (basierend auf CH_4/CO_2 -Verhältnis) in Abhängigkeit von der Siebung verändert nach OEVERDIECK (2010)

Tab. A 9: Statistische Kennzahlen der spezifischen Biogasproduktion der Cellulose bei verschiedenen Siebungen

	1 mm	3 mm	5 mm
Mittelwert [l_N/kg_{oTS}]	645	644	661
Median [l_N/kg_{oTS}]	640	641	661
Standardabweichung [l_N/kg_{oTS}]	17,8	10,1	9,9
Minimum [l_N/kg_{oTS}]	625	636	651
Maximum [l_N/kg_{oTS}]	671	662	680
Variationskoeffizient [%]	2,8	1,6	1,5
Anteil erreicht von 745 l_N/kg_{oTS} [%]	87	86	89

Tab. A 10: Weizen, Düngerart Kas, 2007 - Inhaltsstoffe und Trockenmasseertrag
mit TS¹): Trockensubstanz bestimmt durch Trocknung der FM bei 58°C, TS²):
Trockensubstanz bestimmt durch Trocknung der vorgetrockneten, gemahlene
Substrate bei 105°C, oTS: organische Trockensubstanz, XL: Rohfett, XP:
Rohprotein, NfE: Stickstofffreie Extraktstoffe, XF: Rohfaser, TM-Ertrag¹):
Berechnung basiert auf manueller Beprobung und Trocknung bei 58°C, TM-
Ertrag²): Berechnung basiert auf maschineller Beprobung und Trocknung bei
58°C

EC	[kgN/ha] Stufe	[% FM] TS ¹	[%TS ¹] TS ²	[% TS ²]					[g/m ²]	
				oTS	XL	XP	NfE	XF	TM- Ertrag ¹	TM- Ertrag ²
69	0	33,9	98,0	96,6	1,0	6,4	67,1	21,6	891	
	120	33,0	96,7	95,9	1,1	9,9	58,4	25,9	1286	
	240	30,7	97,3	95,4	1,3	11,5	58,3	24,3	1456	
	360	28,7	97,5	95,2	1,2	11,7	59,4	23,2	1428	
73	0	37,3	97,4	96,5	1,1	6,4	66,9	21,7	895	
	120	35,1	97,1	96,3	1,5	10,5	61,4	22,4	1294	
	240	34,4	97,0	96,1	1,6	10,9	63,1	20,3	1558	
	360	33,4	97,1	95,4	1,4	10,5	61,9	21,8	1560	
77	0	39,0	97,5	96,1	1,3	6,1	65,8	22,2	1015	
	120	39,1	97,3	96,2	1,5	9,6	63,6	21,0	1408	
	240	35,9	97,3	96,4	1,5	9,9	66,4	18,5	1795	
	360	34,8	97,2	95,7	1,4	10,6	64,1	19,3	1614	
85	0	40,8	97,7	96,4	1,5	6,1	68,6	20,0	1140	634
	120	38,7	96,9	96,6	1,7	9,2	64,6	20,6	1546	962
	240	37,8	97,0	96,4	1,6	9,0	66,8	19,2	1816	1099
	360	35,5	97,0	96,0	1,4	9,8	66,8	17,8	1933	1233

Tab. A 11: Weizen, Düngerart Kas, 2008 - Inhaltsstoffe und Trockenmasseertrag
 mit TS¹): Trockensubstanz bestimmt durch Trocknung der FM bei 58°C, TS²):
 Trockensubstanz bestimmt durch Trocknung der vorgetrockneten, gemahlene
 Substrate bei 105°C, oTS: organische Trockensubstanz, XL: Rohfett, XP:
 Rohprotein, NfE: Stickstofffreie Extraktstoffe, XF: Rohfaser, TM-Ertrag¹):
 Berechnung basiert auf manueller Beprobung und Trocknung bei 58°C, TM-
 Ertrag²): Berechnung basiert auf maschineller Beprobung und Trocknung bei
 58°C

EC	[kgN/ha] Stufe	[% FM] TS ¹)	[%TS ¹] TS ²)	[% TS ²)					[g/m ²]	
				oTS	XL	XP	NfE	XF	TM- Ertrag ¹)	TM- Ertrag ²)
69	0	32,0	97,1	94,0	1,1	6,5	61,7	25,0	648	
	120	32,7	97,2	95,8	1,1	6,4	64,6	23,6	1276	
	240	29,0	97,0	94,6	1,1	8,6	60,5	25,1	1503	
	360	28,7	96,9	94,4	1,2	10,6	57,1	25,6	1445	
73	0	33,1	97,1	95,1	1,2	6,8	64,6	22,4	690	
	120	32,8	97,1	96,3	0,9	6,4	66,0	23,0	1337	
	240	29,3	97,0	96,0	1,4	9,4	62,1	9,4	1630	
	360	29,5	96,8	95,1	1,5	10,2	61,2	22,2	1636	
77	0	35,6	97,0	95,6	1,2	6,9	67,1	20,2	716	
	120	36,0	96,6	96,3	1,3	7,2	67,5	20,7	1445	
	240	33,0	96,6	95,9	1,3	8,8	65,8	20,2	1685	
	360	33,4	95,9	95,6	1,3	9,5	64,4	20,6	1771	
85	0	46,5	96,8	95,5	1,7	6,8	65,3	20,7	869	646
	120	46,2	97,0	96,8	1,8	7,1	69,7	18,1	1543	1102
	240	46,2	96,9	96,1	1,7	7,9	70,4	16,4	2255	1480
	360	47,7	96,9	96,3	1,8	7,8	60,2	25,5	2184	1441

Tab. A 12: Weizen, Düngerart Biomix, 2007 - Inhaltsstoffe und Trockenmasseertrag
 mit TS¹): Trockensubstanz bestimmt durch Trocknung der FM bei 58°C, TS²):
 Trockensubstanz bestimmt durch Trocknung der vorgetrockneten, gemahlene
 Substrate bei 105°C, oTS: organische Trockensubstanz, XL: Rohfett, XP:
 Rohprotein, NfE: Stickstofffreie Extraktstoffe, XF: Rohfaser, TM-Ertrag¹):
 Berechnung basiert auf manueller Beprobung und Trocknung bei 58°C, TM-
 Ertrag²): Berechnung basiert auf maschineller Beprobung und Trocknung bei
 58°C

EC	[kgN/ha] Stufe	[% FM] TS ¹)	[%TS ¹] TS ²)	[% TS ²)					[g/m ²]	
				oTS	XL	XP	NfE	XF	TM- Ertrag ¹)	TM- Ertrag ²)
69	120		97,5	95,6	1,2	9,5	59,1	25,4		
	240		96,9	94,6	1,4	11,6	55,3	26,0		
	360		97,1	95,3	1,2	12,1	55,0	26,5		
73	120		97,3	96,0	1,1	8,0	64,2	22,7		
	240		97,1	95,4	1,3	9,6	60,2	24,0		
	360		97,2	96,1	1,2	10,0	61,3	23,3		
77	120		97,2	95,6	1,4	8,0	64,9	21,2		
	240		97,2	94,9	1,7	9,5	61,7	22,2		
	360		97,2	95,7	1,5	9,9	62,1	22,0		
85	120	40,0	97,1	96,1	1,6	7,3	67,6	19,7	1421	940
	240	37,7	96,9	95,9	1,2	8,9	64,6	21,0	1838	1224
	360	39,2	96,9	96,0	1,6	9,1	64,6	20,4	1745	1110

Tab. A 13: Weizen, Düngerart Biomix, 2008 - Inhaltsstoffe und Trockenmasseertrag mit TS¹⁾: Trockensubstanz bestimmt durch Trocknung der FM bei 58°C, TS²⁾: Trockensubstanz bestimmt durch Trocknung der vorgetrockneten, gemahlene Substrate bei 105°C, oTS: organische Trockensubstanz, XL: Rohfett, XP: Rohprotein, NfE: Stickstofffreie Extraktstoffe, XF: Rohfaser, TM-Ertrag¹⁾: Berechnung basiert auf manueller Beprobung und Trocknung bei 58°C, TM-Ertrag²⁾: Berechnung basiert auf maschineller Beprobung und Trocknung bei 58°C

EC	[kgN/ha] Stufe	[% FM] TS ¹⁾	[%TS ¹⁾] TS ²⁾	[% TS ²⁾					[g/m ²]	
				oTS	XL	XP	NfE	XF	TM-Ertrag ¹⁾	TM-Ertrag ²⁾
69	120		96,7	95,6	1,2	7,1	63,1	24,3		
	240		96,3	95,8	1,3	8,3	62,8	23,3		
	360		96,2	95,6	1,4	8,9	60,6	24,5		
73	120		96,2	95,9	1,3	7,6	66,1	21,2		
	240		96,3	96,0	1,3	7,4	66,9	20,7		
	360		96,8	95,9	1,3	8,9	63,2	22,5		
77	120		96,0	96,1	1,3	7,8	68,0	18,9		
	240		96,1	96,4	1,2	7,3	69,1	19,0		
	360		96,3	96,1	1,3	8,5	66,9	19,5		
85	120	38,5	96,8	96,4	2,1	7,1	72,6	14,8		952
	240	39,3	96,5	97,0	2,0	6,9	72,2	15,9		1199
	360	36,7	96,3	97,0	1,6	8,1	72,3	15,1		1241

Tab. A 14: Weizen, Düngerart Biomix, beide Versuchsjahre - Inhaltsstoffe und Trockenmasseertrag mit TS¹⁾: Trockensubstanz bestimmt durch Trocknung der FM bei 58°C, TS²⁾: Trockensubstanz bestimmt durch Trocknung der vorgetrockneten, gemahlene Substrate bei 105°C, oTS: organische Trockensubstanz, XL: Rohfett, XP: Rohprotein, NfE: Stickstofffreie Extraktstoffe, XF: Rohfaser, TM-Ertrag¹⁾: Berechnung basiert auf manueller Beprobung und Trocknung bei 58°C, TM-Ertrag²⁾: Berechnung basiert auf maschineller Beprobung und Trocknung bei 58°C

EC	[kgN/ha] Stufe	[% FM] TS ¹⁾	[%TS ¹⁾] TS ²⁾	[% TS ²⁾					[g/m ²]	
				oTS	XL	XP	XX	XF	TM-Ertrag ¹⁾	TM-Ertrag ²⁾
69	120		97,1	95,6	1,2	8,3	61,1	24,9		
	240		96,6	95,2	1,4	10,0	59,1	24,7		
	360		96,6	95,4	1,3	10,5	57,8	25,5		
73	120		96,7	96,0	1,2	7,8	65,2	22,0		
	240		96,7	95,7	1,3	8,5	63,6	22,4		
	360		97,0	96,0	1,3	9,5	62,3	22,9		
77	120		96,6	95,8	1,4	7,9	66,5	20,1		
	240		96,6	95,7	1,5	8,4	65,4	20,6		
	360		96,7	95,9	1,4	9,2	64,5	20,8		
85	120	39,2	97,0	96,3	1,9	7,2	70,1	17,3		946
	240	36,0	96,7	96,4	1,6	7,9	68,4	18,5		1212
	360	38,0	96,6	96,5	1,6	8,6	68,5	17,8		1176

Tab. A 15: Mais, Düngerart Kas, 2007 - Inhaltsstoffe und Trockenmasseertrag mit TS¹): Trockensubstanz bestimmt durch Trocknung der FM bei 58°C, TS²): Trockensubstanz bestimmt durch Trocknung der vorgetrockneten, gemahlene Substrate bei 105°C, oTS: organische Trockensubstanz, XL: Rohfett, XP: Rohprotein, NfE: Stickstofffreie Extraktstoffe, XF: Rohfaser, TM-Ertrag¹): Berechnung basiert auf manueller Beprobung und Trocknung bei 58°C, TM-Ertrag²): Berechnung basiert auf maschineller Beprobung und Trocknung bei 58°C

T	[kgN/ha] Stufe	[% FM] TS ¹)	[%TS ¹] TS ²)	[% TS ²]					[g/m ²]	
				oTS	XL	XP	NfE	XF	TM-Ertrag ¹)	TM-Ertrag ²)
7	0	19,1	94,1	95,2	0,8	4,6	59,3	29,8	1190	
	120	18,5	94,9	95,5	0,9	7,0	55,5	31,5	1443	
	240	17,4	95,6	94,7	4,4	9,4	47,4	32,8	1595	
	360	17,2	96,2	94,6	1,0	10,3	48,6	33,9	1548	
8	0	24,6	95,1	95,7	1,4	4,8	66,5	23,3	1702	
	120	24,5	95,9	96,0	1,2	6,6	61,3	26,8	2090	
	240	22,9	96,3	95,9	1,7	7,6	62,8	24,0	2062	
	360	24,0	96,3	95,8	1,7	8,1	61,7	24,4	1970	
9	0	28,1	97,0	96,0	2,2	5,0	67,2	21,8	1678	1365
	120	27,7	97,4	96,1	2,4	6,9	65,2	21,8	1960	1698
	240	27,0	97,0	96,0	2,3	7,3	66,4	20,3	2157	1782,5
	360	27,8	97,3	95,9	2,2	7,5	66,2	20,4	2308	1889

Tab. A 16: Mais, Düngerart Kas, 2008 - Inhaltsstoffe und Trockenmasseertrag mit TS¹): Trockensubstanz bestimmt durch Trocknung der FM bei 58°C, TS²): Trockensubstanz bestimmt durch Trocknung der vorgetrockneten, gemahlene Substrate bei 105°C, oTS: organische Trockensubstanz, XL: Rohfett, XP: Rohprotein, NfE: Stickstofffreie Extraktstoffe, XF: Rohfaser, TM-Ertrag¹): Berechnung basiert auf manueller Beprobung und Trocknung bei 58°C, TM-Ertrag²): Berechnung basiert auf maschineller Beprobung und Trocknung bei 58°C

T	[kgN/ha] Stufe	[% FM] TS ¹)	[%TS ¹] TS ²)	[% TS ²]					[g/m ²]	
				oTS	XL	XP	NfE	XF	TM-Ertrag ¹)	TM-Ertrag ²)
7	0	19,7	95,2	95,2	0,7	4,3	63,7	25,9	928	
	120	19,6	96,0	95,9	1,0	7,6	59,8	26,8	1428	
	240	18,8	95,8	95,3	1,1	9,6	56,7	27,5	1421	
	360	18,5	95,9	95,2	0,7	8,8	54,9	30,5	1424	
8	0	25,3	96,3	95,1	1,7	4,4	67,5	21,7	1025	
	120	25,0	96,6	96,1	1,8	6,2	62,5	25,3	1771	
	240	24,1	96,6	95,9	2,0	8,1	64,5	21,8	1849	
	360	23,4	96,7	95,7	1,7	8,1	63,1	23,2	2012	
9	0	28,1	96,9	96,4	2,7	5,1	69,9	18,7	1678	1365
	120	33,5	97,1	97,2	2,7	6,7	68,5	19,3	2033	1435
	240	32,7	96,9	97,1	2,9	8,1	69,1	17,1	2371	1732
	360	32,8	97,0	97,0	3,0	7,6	66,8	19,3	2174	1786

Tab. A 17: Mais, Düngerart Biomix, 2007 - Inhaltsstoffe und Trockenmasseertrag
mit TS¹⁾: Trockensubstanz bestimmt durch Trocknung der FM bei 58°C, TS²⁾:
Trockensubstanz bestimmt durch Trocknung der vorgetrockneten, gemahlene
Substrate bei 105°C, oTS: organische Trockensubstanz, XL: Rohfett, XP:
Rohprotein, NfE: Stickstofffreie Extraktstoffe, XF: Rohfaser, TM-Ertrag¹⁾:
Berechnung basiert auf manueller Ernte und Trocknung bei 58°C, TM-Ertrag²⁾:
Berechnung basiert auf maschineller Beprobung und Trocknung bei 58°C

T	[kgN/ha] Stufe	[% FM] TS ¹⁾	[%TS ¹⁾ TS ²⁾	[% TS ²⁾					[g/m ²]	
				oTS	XL	XP	NfE	XF	TM- Ertrag ¹⁾	TM- Ertrag ²⁾
7	120		95,9	94,7	1,1	7,4	51,2	34,3		
	240		96,6	95,0	0,9	8,1	51,6	34,0		
	360		96,8	94,7	0,9	8,9	49,6	34,9		
8	120		97,2	95,4	1,8	6,8	59,2	27,6		
	240		97,4	95,5	1,9	7,9	58,4	27,0		
	360		97,4	95,4	1,8	7,9	58,0	27,7		
9	120	29,1	97,2	96,1	2,4	6,4	66,0	21,5	2071	1691
	240	28,4	96,5	96,5	2,6	7,1	65,6	21,0	2094	1854
	360	28,0	96,6	96,4	2,4	7,7	63,3	22,7	2418	1945

Tab. A 18: Mais, Düngerart Biomix, 2008 - Inhaltsstoffe und Trockenmasseertrag
mit TS¹⁾: Trockensubstanz bestimmt durch Trocknung der FM bei 58°C, TS²⁾:
Trockensubstanz bestimmt durch Trocknung der vorgetrockneten, gemahlene
Substrate bei 105°C, oTS: organische Trockensubstanz, XL: Rohfett, XP:
Rohprotein, NfE: Stickstofffreie Extraktstoffe, XF: Rohfaser, TM-Ertrag¹⁾:
Berechnung basiert auf manueller Ernte und Trocknung bei 58°C, TM-Ertrag²⁾:
Berechnung basiert auf maschineller Beprobung und Trocknung bei 58°C

T	[kgN/ha] Stufe	[% FM] TS ¹⁾	[%TS ¹⁾ TS ²⁾	[% TS ²⁾					[g/m ²]	
				oTS	XL	XP	NfE	XF	TM- Ertrag ¹⁾	TM- Ertrag ²⁾
7	120		96,3	96,1	1,2	6,5	62,9	25,3		
	240		96,3	95,3	1,1	7,1	59,4	27,5		
	360		96,4	95,7	1,3	8,2	60,0	26,0		
8	120		96,3	96,3	2,1	5,8	66,0	22,3		
	240		96,4	96,2	2,1	7,1	65,0	19,4		
	360		96,4	96,3	2,3	7,8	64,9	21,0		
9	120	38,4	96,9	97,2	3,0	6,0	70,2	17,8	1655	1603
	240	37,6	96,8	97,0	2,9	6,5	68,0	19,4	2128	1719
	360	35,1	96,7	96,8	2,9	7,5	67,5	18,7	2174	1858

Tab. A 19: Mais, Düngerart Biomix, beide Versuchsjahre - Inhaltsstoffe und Trockenmasseertrag
 mit TS¹⁾: Trockensubstanz bestimmt durch Trocknung der FM bei 58°C, TS²⁾:
 Trockensubstanz bestimmt durch Trocknung der vorgetrockneten, gemahlene
 Substrate bei 105°C, oTS: organische Trockensubstanz, XL: Rohfett, XP:
 Rohprotein, NfE: Stickstofffreie Extraktstoffe, XF: Rohfaser, TM-Ertrag¹⁾:
 Berechnung basiert auf manueller Ernte und Trocknung bei 58°C, TM-Ertrag²⁾:
 Berechnung basiert auf maschineller Beprobung und Trocknung bei 58°C

T	[kgN/ha] Stufe	[% FM] TS ¹⁾	[%TS ¹⁾ TS ²⁾	[% TS ²⁾					[g/m ²]	
				oTS	XL	XP	XX	XF	TM- Ertrag ¹⁾	TM- Ertrag ²⁾
7	120		96,1	95,4	1,1	6,9	57,1	29,8		
	240		96,4	95,1	1,0	7,6	55,5	30,7		
	360		96,6	95,2	1,1	8,5	54,8	30,4		
8	120		96,7	95,8	1,9	6,3	62,6	25,0		
	240		96,9	95,8	2,0	7,5	61,7	24,4		
	360		96,9	95,9	2,1	7,8	61,4	24,3		
9	120	33,8	97,1	96,6	2,7	6,2	68,1	19,6	1863	1647
	240	33,0	96,6	96,7	2,7	6,8	66,8	20,2	2111	1787
	360	31,6	96,7	96,6	2,6	7,6	65,4	20,7	2296	1902

Tab. A 20: Deutsches Weidelgras, Düngerart Kas, 2007 - Inhaltsstoffe und Trockenmasseertrag
 mit TS¹⁾: Trockensubstanz bestimmt durch Trocknung der FM bei 58°C, TS²⁾:
 Trockensubstanz bestimmt durch Trocknung der vorgetrockneten, gemahlene
 Substrate bei 105°C, oTS: organische Trockensubstanz, XL: Rohfett, XP:
 Rohprotein, NfE: Stickstofffreie Extraktstoffe, XF: Rohfaser, TM-Ertrag:
 Berechnung basiert auf maschineller Beprobung und Trocknung bei 58°C

T	[kgN/ha] Stufe	[% FM] TS ¹⁾	[%TS ¹⁾ TS ²⁾	[% TS ²⁾					[g/m ²] TM- Ertrag
				oTS	XL	XP	NfE	XF	
1	0	26,5	96,3	93,4	1,9	8,9	62,2	20,3	219
	160	20,5	97,3	92,2	2,1	12,2	55,0	22,6	468
	320	16,9	96,8	90,8	2,5	16,4	48,5	23,1	539
	480	16,7	97,1	90,5	2,6	19,8	45,0	22,9	509
2	0	21,4	97,3	93,7	2,8	7,8	54,0	28,7	86
	160	16,7	97,5	92,1	3,0	10,2	48,9	29,6	386
	320	15,2	97,5	91,5	2,6	11,8	46,6	30,5	447
	480	13,4	97,2	90,0	2,4	16,7	41,0	30,0	466
3	0	17,5	97,3	90,5	3,4	15,1	47,3	24,6	31
	160	15,7	97,4	90,5	3,0	12,6	48,7	26,1	162
	320	12,3	97,5	89,2	3,2	17,2	41,4	27,2	276
	480	10,9	97,7	89,0	3,2	21,5	36,4	27,6	326
4	0	13,9	97,0	90,2	3,7	20,9	43,7	21,7	37
	160	16,8	97,0	91,2	3,0	12,5	50,0	25,5	53
	320	13,3	97,2	90,9	3,0	13,8	47,7	25,9	212
	480	11,6	97,2	90,8	3,2	17,9	43,6	25,8	218

Tab. A 21: Deutsches Weidelgras, Düngerart Kas, 2008 - Inhaltsstoffe und Trockenmasseertrag

mit TS¹): Trockensubstanz bestimmt durch Trocknung der FM bei 58°C, TS²): Trockensubstanz bestimmt durch Trocknung der vorgetrockneten, gemahlene Substrate bei 105°C, oTS: organische Trockensubstanz, XL: Rohfett, XP: Rohprotein, NfE: Stickstofffreie Extraktstoffe, XF: Rohfaser, TM-Ertrag: Berechnung basiert auf maschineller Beprobung und Trocknung bei 58°C

T	[kgN/ha] Stufe	[% FM] TS ¹	[%TS ¹] TS ²	[% TS ²] oTS	[g/m ²] XL	XP	NfE	XF	TM- Ertrag
1	0	25,8	96,9	92,3	2,0	12,8	58,7	18,9	127
	160	26,1	96,8	93,4	1,8	10,3	60,7	20,5	341
	320	24,0	96,6	92,6	2,2	13,4	54,0	23,3	507
	480	25,1	94,9	92,0	2,8	15,9	51,1	22,5	435
2	0	32,2	97,6	94,0	2,1	11,4	55,3	25,2	16
	160	24,9	97,4	91,8	3,7	20,0	47,9	20,3	83
	320	22,8	97,2	92,3	3,6	21,0	47,3	20,3	109
	480	24,6	97,0	92,5	3,6	23,6	44,5	20,5	65
3	0	22,8	97,4	90,5	4,1	14,3	48,4	23,4	37
	160	18,0	97,4	89,8	3,6	13,6	48,1	24,9	216
	320	15,9	97,0	91,1	4,2	19,1	41,9	25,8	314
	480	16,3	96,6	90,7	3,6	22,7	40,8	24,1	297
4	0	20,3	97,5	91,9	2,9	12,0	53,6	22,9	62
	160	19,2	97,5	91,7	2,7	11,4	52,1	25,5	98
	320	15,5	97,3	92,6	2,4	13,1	51,3	25,9	262
	480	13,9	97,0	92,7	2,8	17,9	46,2	25,3	313

Tab. A 22: Deutsches Weidelgras, Düngerart Biomix, 2007 - Inhaltsstoffe und Trockenmasseertrag

mit TS¹): Trockensubstanz bestimmt durch Trocknung der FM bei 58°C, TS²): Trockensubstanz bestimmt durch Trocknung der vorgetrockneten, gemahlene Substrate bei 105°C, oTS: organische Trockensubstanz, XL: Rohfett, XP: Rohprotein, NfE: Stickstofffreie Extraktstoffe, XF: Rohfaser, TM-Ertrag: Berechnung basiert auf maschineller Beprobung und Trocknung bei 58°C

T	[kgN/ha] Stufe	[% FM] TS ¹	[%TS ¹] TS ²	oTS	XL	[% TS ²] XP	NfE	XF	[g/m ²] TM- Ertrag
1	160	22,7	97,3	92,7	1,9	10,5	58,6	21,6	381
	320	21,3	97,3	92,3	1,8	10,7	58,2	21,5	411
	480	21,6	97,3	92,0	2,3	12,8	55,4	21,1	367
2	160	20,2	97,5	93,0	2,2	8,8	54,6	27,3	266
	320	18,1	97,3	92,5	2,3	9,4	52,4	28,2	288
	480	16,8	97,2	91,7	2,4	10,9	47,9	30,0	439
3	160	16,1	97,8	90,5	3,0	12,6	48,0	26,6	158
	320	14,4	97,8	88,5	3,1	14,3	43,5	27,0	233
	480	12,6	97,6	89,2	3,2	15,4	43,2	26,9	249
4	160	16,3	97,6	90,5	3,1	14,2	48,0	25,0	62
	320	12,9	97,0	89,9	2,9	14,5	45,1	27,2	173
	480	11,3	97,1	89,5	3,1	14,8	45,5	26,1	211

Tab. A 23: Deutsches Weidelgras, Düngerart Biomix, 2008 - Inhaltsstoffe und Trockenmasseertrag
 mit TS¹): Trockensubstanz bestimmt durch Trocknung der FM bei 58°C, TS²):
 Trockensubstanz bestimmt durch Trocknung der vorgetrockneten, gemahlene
 Substrate bei 105°C, oTS: organische Trockensubstanz, XL: Rohfett, XP:
 Rohprotein, NfE: Stickstofffreie Extraktstoffe, XF: Rohfaser, TM-Ertrag:
 Berechnung basiert auf maschineller Beprobung und Trocknung bei 58°C

T	[kgN/ha]	[% FM] TS ¹	[%TS ¹] TS ²	[% TS ²]					[g/m ²] TM- Ertrag
	Stufe			oTS	XL	XP	NfE	XF	
1	160	27,0	96,6	93,7	1,7	9,0	63,3	19,4	216
	320	24,7	96,5	92,8	1,8	9,6	59,6	21,6	375
	480	27,1	95,7	91,2	2,1	11,5	55,9	21,7	424
2	160	29,7	97,5	93,6	2,8	12,6	53,9	24,2	36
	320	28,5	97,5	92,7	2,6	12,8	53,7	23,6	68
	480	24,1	97,0	91,6	3,9	21,0	45,6	21,2	55
3	160	20,8	97,3	89,7	4,5	13,9	49,3	22,1	81
	320	18,2	97,3	89,1	4,0	14,6	46,4	24,1	159
	480	15,8	97,1	88,6	3,8	17,0	42,2	25,3	271
4	160	18,2	97,5	91,4	3,0	13,1	51,8	23,0	87
	320	15,5	97,5	91,0	2,8	12,9	49,6	25,4	226
	480	14,5	97,7	90,2	2,5	13,0	48,7	25,9	296

Tab. A 24: Deutsches Weidelgras, Düngerart Biomix, beide Versuchsjahre - Inhaltsstoffe und Trockenmasseertrag
 mit TS¹): Trockensubstanz bestimmt durch Trocknung der FM bei 58°C, TS²):
 Trockensubstanz bestimmt durch Trocknung der vorgetrockneten, gemahlene
 Substrate bei 105°C, oTS: organische Trockensubstanz, XL: Rohfett, XP:
 Rohprotein, NfE: Stickstofffreie Extraktstoffe, XF: Rohfaser, TM-Ertrag:
 Berechnung basiert auf maschineller Beprobung und Trocknung bei 58°C

T	[kgN/ha]	[% FM] TS ¹	[%TS ¹] TS ²	[% TS ²]					[g/m ²] TM- Ertrag
	Stufe			oTS	XL	XP	NfE	XF	
1	160	24,9	96,9	93,2	1,8	9,8	61,0	20,5	299
	320	23,0	96,9	92,5	1,8	10,2	58,9	21,6	393
	480	24,4	96,5	91,6	2,2	12,2	55,7	21,4	395
2	160	25,0	97,5	93,3	2,5	10,7	54,3	25,8	151
	320	23,3	97,4	92,6	2,5	11,1	53,1	25,9	178
	480	20,5	97,1	91,6	3,2	16,0	46,8	25,6	247
3	160	18,4	97,5	90,1	3,8	13,3	48,7	24,4	119
	320	16,3	97,6	88,8	3,6	14,5	45,0	25,6	196
	480	14,2	97,3	88,9	3,5	16,2	42,7	26,1	260
4	160	17,2	97,6	90,9	3,1	13,7	49,9	24,0	75
	320	14,2	97,3	90,4	2,9	13,7	47,4	26,3	200
	480	12,9	97,4	89,8	2,8	13,9	47,1	26,0	253

Tab. A 25: GPS-Weizen, Düngerart Kas, 2007 – Ergebnisse aus dem HBT zur substrat-spezifischen Biogas- und Methanproduktion, zum durchschnittlichen Methangehalt des Biogases und zum Methanhektarertrag mit MHE¹): Methanhektarertrag Berechnung basiert auf manueller Beprobung, MHE²) Berechnung basiert auf maschineller Beprobung

EC	[kgN/ha]	[l _N /kg _{OTS}]		[%]	MHE ¹)	[m ³ _N /ha] MHE ²)
	Düngestufe	Spezifische Biogasproduktion	Spezifische Methanproduktion	CH ₄ -Gehalt des Biogases		
69	0	670	361	54	3044	
	120	660	360	55	4291	
	240	666	366	55	4949	
	360	660	364	55	4827	
73	0	667	370	55	3109	
	120	673	376	56	4548	
	240	659	365	55	5307	
	360	667	376	56	5424	
77	0	660	358	54	3401	
	120	653	359	55	4722	
	240	660	361	55	6074	
	360	646	353	55	5298	
85	0	661	359	54	3850	2144
	120	665	361	54	5222	3248
	240	662	360	54	6115	3699
	360	659	363	55	6526	4163

Tab. A 26: GPS-Weizen, Düngerart Kas, 2008 – Ergebnisse aus dem HBT zur substrat-spezifischen Biogas- und Methanproduktion, zum durchschnittlichen Methangehalt des Biogases und zum Methanhektarertrag mit MHE¹): Methanhektarertrag Berechnung basiert auf manueller Beprobung, MHE²) Berechnung basiert auf maschineller Beprobung

EC	[kgN/ha]	[l _N /kg _{OTS}]		[%]	MHE ¹)	[m ³ _N /ha] MHE ²)
	Düngestufe	Spezifische Biogasproduktion	Spezifische Methanproduktion	CH ₄ -Gehalt des Biogases		
69	0	649	358	55	2117	
	120	648	352	54	4184	
	240	662	365	55	5038	
	360	637	355	56	4699	
73	0	668	358	54	2282	
	120	665	364	55	4547	
	240	657	367	56	5567	
	360	653	361	55	5437	
77	0	657	361	55	2398	
	120	664	364	55	4886	
	240	653	362	56	5654	
	360	660	368	56	5985	
85	0	674	373	55	2997	2227
	120	674	373	55	5408	3862
	240	655	363	55	7627	5006
	360	658	365	55	7442	4911

Tab. A 27: GPS-Weizen, Düngerart Biomix, 2007 – Ergebnisse aus dem HBT zur substrat-spezifischen Biogas- und Methanproduktion, zum durchschnittlichen Methangehalt des Biogases und zum Methanhektarertrag mit MHE¹⁾: Methanhektarertrag Berechnung basiert auf manueller Beprobung, MHE²⁾ Berechnung basiert auf maschineller Beprobung

EC	[kgN/ha]	[l _N /kg _{oTS}]		[%]	MHE ¹⁾	[m ³ _N /ha] MHE ²⁾
	Düngestufe	Spezifische Biogasproduktion	Spezifische Methanproduktion	CH ₄ -Gehalt des Biogases		
69	120	672	372	55		
	240	658	367	56		
	360	657	368	56		
73	120	671	373	56		
	240	666	376	56		
	360	674	378	56		
77	120	655	356	54		
	240	658	359	55		
	360	656	358	55		
85	120	674	366	54	4859	3214
	240	656	358	55	6125	4079
	360	651	355	55	5769	3669

Tab. A 28: GPS-Weizen, Düngerart Biomix, 2008 – Ergebnisse aus dem HBT zur substrat-spezifischen Biogas- und Methanproduktion, zum durchschnittlichen Methangehalt des Biogases und zum Methanhektarertrag mit MHE¹⁾: Methanhektarertrag Berechnung basiert auf manueller Beprobung, MHE²⁾ Berechnung basiert auf maschineller Beprobung

EC	[kgN/ha]	[l _N /kg _{oTS}]		[%]	MHE ¹⁾	[m ³ _N /ha] MHE ²⁾
	Düngestufe	Spezifische Biogasproduktion	Spezifische Methanproduktion	CH ₄ -Gehalt des Biogases		
69	120	665	366	55		
	240	664	365	55		
	360	669	366	55		
73	120	675	369	55		
	240	662	363	55		
	360	659	362	55		
77	120	673	369	55		
	240	669	367	55		
	360	675	371	55		
85	120	672	373	55		3307
	240	674	370	55		4148
	360	673	368	55		4270

Tab. A 29: Mais, Düngerart Kas, 2007 – Ergebnisse aus dem HBT zur substratspezifischen Biogas- und Methanproduktion, zum durchschnittlichen Methangehalt des Biogases und zum Methanhektarertrag mit MHE¹⁾: Methanhektarertrag Berechnung basiert auf manueller Beprobung, MHE²⁾ Berechnung basiert auf maschineller Beprobung

T	[kgN/ha]	[l _N /kg _{OTS}]		[%]	MHE ¹⁾	[m ³ _N /ha]
	Düngestufe	Spezifische Biogasproduktion	Spezifische Methanproduktion	CH ₄ -Gehalt des Biogases		MHE ²⁾
7	0	674	365	54	3896	
	120	654	358	55	4681	
	240	628	357	57	5159	
	360	620	350	56	4930	
8	0	679	377	56	5828	
	120	664	373	56	7175	
	240	658	373	57	7100	
	360	653	369	56	6702	
9	0	667	368	55	5761	4686
	120	658	365	55	6679	5784
	240	656	367	56	7378	6097
	360	658	369	56	7958	6511

Tab. A 30: Mais, Düngerart Kas, 2008 – Ergebnisse aus dem HBT zur substratspezifischen Biogas- und Methanproduktion, zum durchschnittlichen Methangehalt des Biogases und zum Methanhektarertrag mit MHE¹⁾: Methanhektarertrag Berechnung basiert auf manueller Beprobung, MHE²⁾ Berechnung basiert auf maschineller Beprobung

T	[kgN/ha]	[l _N /kg _{OTS}]		[%]	[m ³ _N /ha]	
	Düngestufe	Spezifische Biogasproduktion	Spezifische Methanproduktion	CH ₄ -Gehalt des Biogases	Methanhektarertrag ¹⁾	Methanhektarertrag ²⁾
7	0	675	373	55	3142	
	120	636	357	56	4685	
	240	638	361	57	4689	
	360	619	345	56	4490	
8	0	681	378	56	3544	
	120	661	369	56	6060	
	240	652	367	56	6292	
	360	632	359	57	6704	
9	0	685	382	56	3880	3208
	120	675	379	56	7274	5129
	240	685	386	56	8609	6289
	360	678	384	57	7849	6447

Tab. A 31: Mais, Düngerart Biomix, 2007 – Ergebnisse aus dem HBT zur substratspezifischen Biogas- und Methanproduktion, zum durchschnittlichen Methangehalt des Biogases und zum Methanhektarertrag mit MHE¹⁾: Methanhektarertrag Berechnung basiert auf manueller Ernte, MHE²⁾ Berechnung basiert auf maschineller Beprobung

T	[kgN/ha]	[l _N /kg _{oTS}]		[%]	MHE ¹⁾	[m ³ _N /ha]
	Düngestufe	Spezifische Biogasproduktion	Spezifische Methanproduktion	CH ₄ -Gehalt des Biogases		
7	120	652	371	57		
	240	650	369	57		
	360	642	367	57		
8	120	669	381	57		
	240	659	376	57		
	360	657	375	57		
9	120	667	370	55	7148	5861
	240	676	376	56	7322	6485
	360	663	369	56	8318	6689

Tab. A 32: Mais, Düngerart Biomix, 2008 – Ergebnisse aus dem HBT zur substratspezifischen Biogas- und Methanproduktion, zum durchschnittlichen Methangehalt des Biogases und zum Methanhektarertrag mit MHE¹⁾: Methanhektarertrag Berechnung basiert auf manueller Ernte, MHE²⁾ Berechnung basiert auf maschineller Beprobung

T	[kgN/ha]	[l _N /kg _{oTS}]		[%]	MHE ¹⁾	[m ³ _N /ha]
	Düngestufe	Spezifische Biogasproduktion	Spezifische Methanproduktion	CH ₄ -Gehalt des Biogases		
7	120	665	376	57		
	240	654	367	56		
	360	653	369	57		
8	120	680	381	56		
	240	677	380	56		
	360	674	381	57		
9	120	690	385	56	6001	5811
	240	680	382	56	7627	6161
	360	686	382	56	7777	6646

Tab. A 33: Deutsches Weidelgras, Düngerart Kas, 2007 – Ergebnisse aus dem HBT zur substratspezifischen Biogas- und Methanproduktion, zum durchschnittlichen Methangehalt des Biogases und zum Methanhektarertrag mit MHE: Methanhektarertrag Berechnung basiert auf maschineller Beprobung

T	[kgN/ha] Düngestufe	[l _N /kg _{OTS}]		[%] CH ₄ -Gehalt des Biogases	[m ³ _N /ha] MHE
		Spezifische Biogasproduktion	Spezifische Methanproduktion		
1	0	672	374	56	735
	160	637	360	57	1512
	320	639	373	58	1769
	480	612	360	59	1611
2	0	599	331	55	260
	160	617	347	56	1201
	320	595	338	57	1347
	480	562	327	58	1331
3	0	627	356	57	96
	160	663	377	57	537
	320	600	343	57	825
	480	585	336	57	954
4	0	625	361	58	118
	160	654	369	56	173
	320	646	368	57	689
	480	633	365	58	702

Tab. A 34: Deutsches Weidelgras, Düngerart Kas, 2008 – Ergebnisse aus dem HBT zur substratspezifischen Biogas- und Methanproduktion, zum durchschnittlichen Methangehalt des Biogases und zum Methanhektarertrag mit MHE: Methanhektarertrag Berechnung basiert auf maschineller Beprobung

T	[kgN/ha] Düngestufe	[l _N /kg _{OTS}]		[%] CH ₄ -Gehalt des Biogases	[m ³ _N /ha] MHE
		Spezifische Biogasproduktion	Spezifische Methanproduktion		
1	0	650	364	56	414
	160	669	370	55	1141
	320	651	367	56	1664
	480	650	370	57	1404
2	0	639	357	56	51
	160	650	374	58	278
	320	625	362	58	354
	480	618	361	58	212
3	0	642	365	57	118
	160	614	349	57	661
	320	587	335	57	929
	480	569	329	58	855
4	0	641	365	57	203
	160	590	340	58	299
	320	575	332	58	785
	480	562	329	59	928

Tab. A 35: Deutsches Weidelgras, Düngerart Biomix, 2007 – Ergebnisse aus dem HBT zur substratspezifischen Biogas- und Methanproduktion, zum durchschnittlichen Methangehalt des Biogases und zum Methanhektarertrag mit MHE: Methanhektarertrag Berechnung basiert auf maschineller Beprobung

T	[kgN/ha] Düngestufe	[l _N /kg _{oTS}]		[%] CH ₄ -Gehalt des Biogases	[m ³ _N /ha] MHE
		Spezifische Biogasproduktion	Spezifische Methanproduktion		
1	160	646	362	56	1243
	320	672	379	56	1396
	480	652	368	57	1209
2	160	626	352	56	850
	320	629	354	56	916
	480	613	348	57	1359
3	160	649	367	57	513
	320	610	347	57	701
	480	630	358	57	776
4	160	655	373	57	205
	320	619	357	58	540
	480	622	356	57	651

Tab. A 36: Deutsches Weidelgras, Düngerart Biomix, 2008 – Ergebnisse aus dem HBT zur substratspezifischen Biogas- und Methanproduktion, zum durchschnittlichen Methangehalt des Biogases und zum Methanhektarertrag mit MHE: Methanhektarertrag Berechnung basiert auf maschineller Beprobung

T	[kgN/ha] Düngestufe	[l _N /kg _{oTS}]		[%] CH ₄ -Gehalt des Biogases	[m ³ _N /ha] MHE
		Spezifische Biogasproduktion	Spezifische Methanproduktion		
1	160	684	376	55	736
	320	666	368	55	1235
	480	662	367	55	1357
2	160	612	346	56	113
	320	638	360	57	221
	480	627	361	58	178
3	160	623	352	56	248
	320	633	363	57	500
	480	612	347	57	809
4	160	623	357	57	277
	320	598	343	57	686
	480	595	339	57	885

Tab. A 37: Weizen, HBT, Signifikanzniveaus Unterschiede im Methanhektarertrag (basierend auf manueller Beprobung) zwischen den einzelnen Düngestufen nach dem Kruskal-Wallis-Test

Parameter	EC	N-Stufe	2	3	4
Methanhektarertrag	69	1	0,006	0,006	0,014
		2		0,004	0,011
		3			0,011
	73	1	0,014	0,009	0,009
		2		0,014	0,014
		3			n.s.
	77	1	0,004	0,006	0,004
		2		0,006	0,004
		3			n.s.
	85	1	0,001	0,001	0,001
		2		0,000	0,000
		3			n.s.

Tab. A 38: Weizen, HBT, Signifikanzniveaus Unterschiede im Methanhektarertrag (basierend auf manueller Beprobung) zwischen den einzelnen EC-Stadien nach dem Kruskal-Wallis-Test

Parameter	Düngestufe	EC	73	77	85
Methanhektarertrag	1	69	n.s.	n.s.	n.s.
		73		n.s.	n.s.
		77			n.s.
	2	69	0,011	0,004	0,001
		73		0,011	0,005
		77			0,013
	3	69	0,006	0,006	0,001
		73		0,009	0,003
		77			0,039
	4	69	0,014	0,011	0,005
		73		n.s.	0,003
		77			0,025

Tab. A 39: Mais, HBT, Signifikanzniveaus Unterschiede in der spezifischen Biogas- und Methanproduktion zwischen den Düngevarianten nach dem Kruskal-Wallis-Test

Parameter	Termin	Düngestufe	2	3	4
Spezifische Biogasproduktion	7	1	0,001	0,000	0,000
		2		n.s.	0,005
		3			n.s.
	8	1	0,022	0,001	0,000
		2		n.s.	0,005
		3			n.s.
Spezifische Methanproduktion	7	1	n.s	n.s.	0,042
		2		n.s	n.s.
		3			n.s.

Tab. A 40: Mais, HBT, Signifikanzniveaus Unterschiede im Methanhektarertrag (basierend auf manueller Beprobung) zwischen den Düngevarianten nach dem Kruskal-Wallis-Test

Parameter	Termin	N-Stufe	2	3	4
Methanhektarertrag	7	1	0,000	0,000	0,000
		2		n.s.	n.s.
		3			0,041
	8	1	0,009	0,002	0,001
		2		n.s.	n.s.
		3			n.s.
	9	1	0,000	0,000	0,000
		2		0,001	0,002
		3			n.s.

Tab. A 41: Mais, HBT, Signifikanzniveaus Unterschiede in der spezifischen Biogas- und Methanproduktion zwischen den Ernteterminen nach dem Kruskal-Wallis-Test

Parameter	Düngestufe	Termin	8	9	
Spezifische Biogasproduktion	1	7	n.s.	n.s.	
		8		n.s.	
	2	7	0,000	0,000	
		8		n.s.	
	3	7	0,000	0,000	
		8		0,003	
	4	7	0,002	0,000	
		8		0,003	
	Spezifische Methanproduktion	1	7	0,014	n.s.
			8		n.s.
		2	7	0,001	0,004
			8		n.s.
3		7	0,000	0,000	
		8		n.s.	
4		7	0,002	0,000	
		8		n.s.	

Tab. A 42: Mais, HBT, Signifikanzniveaus Unterschiede im Methanhektarertrag (basierend auf manueller Beprobung) zwischen den Ernteterminen nach dem Kruskal-Wallis-Test

Parameter	Düngestufe	Termin	8	9
Methanhektarertrag	1	7	n.s.	0,006.
		8		n.s.
	2	7	0,000	0,000
		8		n.s.
	3	7	0,000	0,000
		8		0,000
	4	7	0,000	0,000
		8		0,001

Tab. A 43: Deutsches Weidelgras, HBT, Signifikanzniveaus Unterschiede in der spezifischen Biogas- und Methanproduktion zwischen den Düngevarianten nach dem Kruskal-Wallis-Test

Parameter	Schnitt	Düngestufe	2	3	4
Spezifische Biogasproduktion	3	1	n.s.	0,009	0,004
		2		0,005	0,003
		3			n.s.
	4	1	n.s.	n.s.	0,017
		2		n.s.	0,026
		3			n.s.
Spezifische Methanproduktion	3	1	n.s.	n.s.	0,009
		2		0,024	0,005
		3			n.s.
	4	1	n.s.	0,031	0,010
		2		n.s.	0,033
		3			n.s.

Tab. A 44: Deutsches Weidelgras, HBT, signifikante Unterschiede im Methanhektarertrag (basierend auf maschineller Beprobung) zwischen den Düngevarianten nach dem Kruskal-Wallis-Test

Parameter	Schnitt	Düngestufe	2	3	4
Methanhektarertrag	1	1	0,000	0,000	0,000
		2		0,013	n.s.
		3			n.s.
	2	1	n.s.	n.s.	n.s.
		2		n.s.	n.s.
		3			n.s.
	3	1	0,000	0,000	0,000
		2		0,001	0,000
		3			0,035
	4	1	0,003	0,000	0,000
		2		0,000	0,000
		3			n.s.

Tab. A 45: Deutsches Weidelgras, HBT, Signifikanzniveaus Unterschiede in der spezifischen Biogas- und Methanproduktion zwischen den Varianten aus den verschiedenen Schnitten nach dem Kruskal-Wallis-Test

Parameter	Düngestufe	Schnitt	2	3	4
Spezifische Biogasproduktion	1	1	0,002	0,005	0,005
		2		n.s.	n.s.
		3			n.s.
	2	1	0,002	0,040	0,036
		2		n.s.	n.s.
		3			n.s.
	3	1	0,000	0,000	0,000
		2		n.s.	n.s.
		3			n.s.
	4	1	0,002	0,001	0,001
		2		n.s.	n.s.
		3			n.s.
Spezifische Methanproduktion	1	1	0,001	0,034	n.s.
		2		0,021	0,006
		3			n.s.
	2	1	0,050	n.s.	n.s.
		2		n.s.	n.s.
		3			n.s.
	3	1	0,000	0,000	0,001
		2		n.s.	n.s.
		3			n.s.
	4	1	0,003	0,000	0,000
		2		n.s.	n.s.
		3			n.s.

Tab. A 46: Deutsches Weidelgras, HBT, Signifikanzniveaus Unterschiede im Methanhektarertrag (basierend auf maschineller Beprobung) zwischen den Varianten aus den verschiedenen Schnitten nach dem Kruskal-Wallis-Test

Parameter	Düngestufe	Schnitt	2	3	4
Methanhektarertrag	1	1	0,001	0,001	0,001
		2		n.s.	n.s.
		3			0,009
	2	1	0,000	0,000	0,000
		2		n.s.	n.s.
		3			0,005
	3	1	0,000	0,000	0,000
		2		n.s.	n.s.
		3			n.s.
	4	1	0,002	0,000	0,000
		2		n.s.	n.s.
		3			n.s.

Tab. A 47: Weizen, Düngerart Kas, 2007– Ergebnisse aus dem Batch zur substratspezifischen Biogas- und Methanproduktion, zum durchschnittlichen Methangehalt des Biogases und zum Methanhektarertrag mit F: frisches Substrat, S:Silage, MHE¹⁾ Methanhektarertrag Berechnung basiert auf manueller Beprobung, MHE²⁾ Berechnung basiert auf maschineller Beprobung

EC	[kgN/ha]	Konservierung	[l _N /kg _{OTS}]		[%]	[m ³ _N /ha]	
	Düngestufe		Spezifische Biogasproduktion	Spezifische Methanproduktion	CH ₄ -Gehalt des Biogases	MHE ¹⁾	MHE ²⁾
69	0	F	542	300	55	2504	
	240	F	503	285	56	3838	
	360	F	541	319	59	4188	
73	0	F	574	317	55	2647	
		S	681	394	58		
	240	F	535	310	58	4512	
		S	715	433	60		
	360	F	560	321	57	4643	
S	714	438	61				
77	0	F	560	311	56	2948	
		S	680	392	58		
	240	F	602	337	56	5654	
		S	699	412	59		
	360	F	593	332	56	4988	
S	690	409	59				
85	0	F	610	332	54	3543	1967
		S	556	315	57		
	240	F	590	326	55	5553	3421
		S	604	343	57		
	360	F	585	322	55	5798	3688
S	574	326	57				

Tab. A 48: Weizen, Düngerart Kas, 2008– Ergebnisse aus dem Batch zur substratspezifischen Biogas- und Methanproduktion, zum durchschnittlichen Methangehalt des Biogases und zum Methanhektarertrag mit F: frisches Substrat, S:Silage, MHE¹⁾ Methanhektarertrag Berechnung basiert auf manueller Beprobung, MHE²⁾ Berechnung basiert auf maschineller Beprobung

EC	[kgN/ha]	Konservierung	[l _N /kg _{OTS}]		[%]	[m ³ _N /ha]	
	Düngestufe		Spezifische Biogasproduktion	Spezifische Methanproduktion		CH ₄ -Gehalt des Biogas	MHE ¹⁾
69	0	F	571	315	55	1861	
	240	F	573	320	56	4454	
	360	F	555	312	56	4165	
73	0	F	597	326	55	2057	
		S	631	359	57		
	240	F	586	324	55	4906	
		S	613	349	57		
	360	F	572	318	56	4830	
		S	625	356	57		
77	0	F	585	321	55	2115	
		S	600	336	56		
	240	F	592	327	55	5130	
		S	615	347	56		
	360	F	583	322	55	5301	
		S	610	345	57		
85	0	F	558	306	55	2473	1834
		S	607	338	56		
	240	F	578	323	56	6888	4598
		S	601	341	57		
	360	F	561	314	56	6491	4245
		S	586	327	56		

Tab. A 49: Mais, Düngerart Kas, 2007– Ergebnisse aus dem Batch zur substratspezifischen Biogas- und Methanproduktion, zum durchschnittlichen Methangehalt des Biogases und zum Methanhektarertrag
mit F: frisches Substrat, S:Silage, MHE¹⁾ Methanhektarertrag Berechnung basiert auf manueller Beprobung, MHE²⁾ Berechnung basiert auf maschineller Beprobung

T	[kgN/ha] Düngestufe	Konservierung	[l _N /kg _{oTS}]		[%] CH ₄ -Gehalt des Biogases	[m ³ _N /ha]	
			Spezifische Biogas- produktion	Spezifische Methan- produktion		MHE ¹⁾	MHE ²⁾
7	0	F	623	341	55	4130	
	240	F	581	330	57	4614	
	360	F	563	326	58	4551	
8	0	F	606	333	55	5580	
		S	571	323	57		
	240	F	563	316	56	6416	
		S	648	364	56		
	360	F	597	335	56	6236	
		S	653	366	56		
9	0	F	605	329	54	5660	4787
		S	656	366	56		
	240	F	539	302	56	6198	5163
		S	643	361	56		
	360	F	571	319	56	7341	5606
		S	638	359	56		

Tab. A 50: Mais, Düngerart Kas, 2008– Ergebnisse aus dem Batch zur substratspezifischen Biogas- und Methanproduktion, zum durchschnittlichen Methangehalt des Biogases und zum Methanhektarertrag
mit F: frisches Substrat, S:Silage, MHE¹⁾ Methanhektarertrag Berechnung basiert auf manueller Beprobung, MHE²⁾ Berechnung basiert auf maschineller Beprobung

T	[kgN/ha] Düngestufe	Konservierung	[l _N /kg _{oTS}]		[%] CH ₄ -Gehalt des Biogases	[m ³ _N /ha]	
			Spezifische Biogas- produktion	Spezifische Methan- produktion		MHE ¹⁾	MHE ²⁾
7	0	F	594	323	54	3032	
	240	F	556	310	56	3939	
	360	F	566	316	56	4260	
8	0	F	599	326	54	3613	
		S	653	366	56		
	240	F	575	317	55	5236	
		S	630	354	56		
	360	F	580	321	55	6672	
		S	648	364	56		
9	0	F	596	326	55	3920	3418
		S	659	367	56		
	240	F	571	315	55	6861	5393
		S	649	363	56		
	360	F	595	331	56	7028	5698
		S	650	364	56		

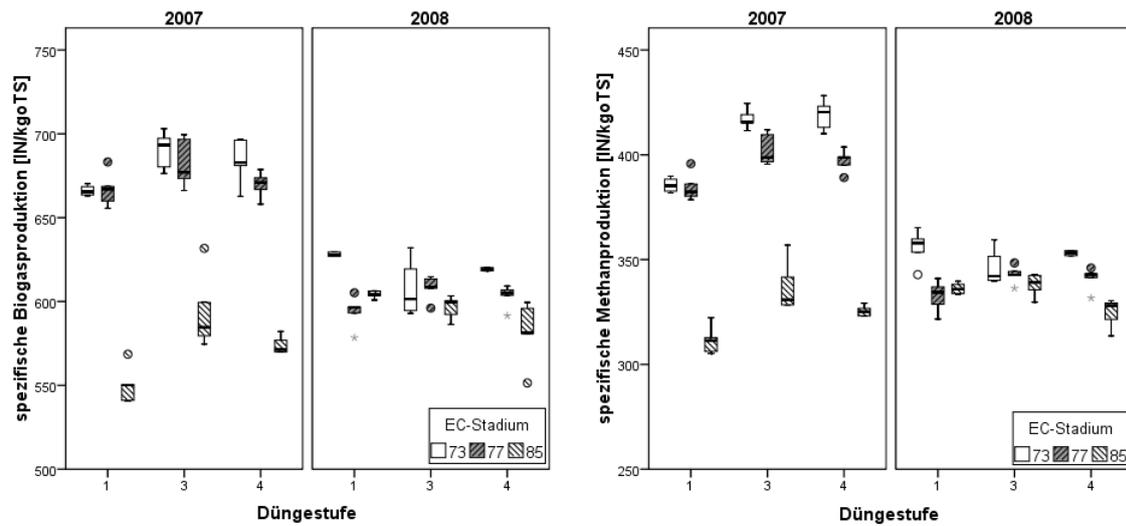


Abb. A 5: Weizen Silage, nach Jahren getrennt – Ergebnisse aus dem Batch zur spezifischen Biogas- und Methanproduktion in Abhängigkeit vom EC-Stadium

Tab. A 51: Weizen, Batch, Signifikanzniveaus Unterschiede in der spezifischen Biogas- und Methanproduktion zwischen den Düngevarianten nach dem Kruskal-Wallis-Test mit F: frisches Substrat, S: Silage

Parameter	Termin	Zustand	Düngestufe	3	4
Spezifische Biogasproduktion	77	F	1	0,021	n.s.
			3		n.s.
	85	S	1	n.s.	n.s.
			3		0,016
Spezifische Methanproduktion	77	F	1	0,006	n.s.
			3		n.s.
	85	S	1	0,049	n.s.
			3		0,001

Tab. A 52: Weizen, Batch, Signifikanzniveaus Unterschiede in der spezifischen Biogas- und Methanproduktion zwischen den Entwicklungsstadien nach dem Kruskal-Wallis-Test
mit F: frisches Substrat, S: Silage

Parameter	Düngestufe	Zustand	EC	73	77	85
Spezifische Biogasproduktion	3	F	69	n.s.	0,001	0,037
			73		0,016	n.s.
			77			0,028
	4	F	69	n.s.	0,005	n.s.
			73		0,027	n.s.
			77			n.s.
	1	S	73		n.s.	0,000
			77			0,034
	3	S	73		n.s.	0,006
			77			0,002
	4	S	73		n.s.	0,000
			77			0,000
Spezifische Methanproduktion	3	F	69	n.s.	0,021	n.s.
			73		0,021	n.s.
			77			n.s.
	1	S	73		n.s.	0,000
			77			0,010
	3	S	73		n.s.	0,003
			77			0,003
	4	S	73		n.s.	0,000
			77			0,000

Tab. A 53: Weizen, Batch, Signifikanzniveaus Unterschiede im Methanhektarertrag zwischen den Entwicklungsstadien nach dem Kruskal-Wallis-Test

Parameter	Düngestufe	EC	73	77	85
Methanhektarertrag	1	69	n.s.	n.s.	0,021
		73		n.s.	n.s.
		77			n.s.
	3	69	0,012	0,001	0,001
		73		0,001	0,001
		77			0,008
	4	69	0,001	0,001	0,001
		73		0,003	0,001
		77			0,001

Tab. A 54: Weizen, Batch, Signifikanzniveaus Unterschiede in der spezifischen Biogas- und Methanproduktion zwischen frischen Substraten und Silagen nach dem Kruskal-Wallis-Test

Parameter	EC bzw. Düngestufe	73	77	85
Spezifische Biogasproduktion	1	0,001	0,001	n.s.
	3	0,001	0,002	n.s.
	4	0,000	0,003	n.s.
Spezifische Methanproduktion	1	0,001	0,001	n.s.
	3	0,001	0,001	0,011
	4	0,000	0,002	n.s.

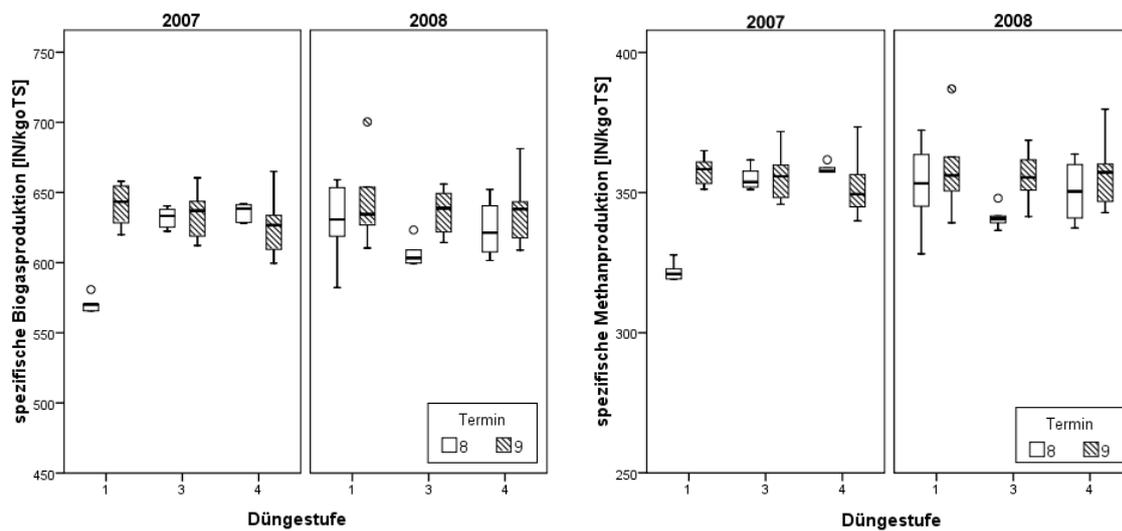


Abb. A 6: Mais, Silage, nach Jahren getrennt – Ergebnisse aus dem Batch zur spezifischen Biogas- und Methanproduktion in Abhängigkeit vom EC-Stadium

Tab. A 55: Mais, frische Substrate, Batch, Signifikanzniveaus Unterschiede in der spezifischen Biogas- und Methanproduktion zwischen den Düngevarianten nach dem Kruskal-Wallis-Test

Parameter	Termin	Düngestufe	3	4
Spezifische Biogasproduktion	7	1	0,004	0,004
		3		n.s.
	8	1	0,001	0,034
		3		0,011
	9	1	0,001	n.s.
		3		0,017
Spezifische Methanproduktion	7	1	n.s.	0,043
		3		n.s.
	8	1	0,001	n.s.
		3		0,009
	9	1	0,003	n.s.
		3		0,007

Tab. A 56: Mais, frische Substrate, Batch, Signifikanzniveaus Unterschiede im Methanhektarertrag zwischen den Düngevarianten nach dem Kruskal-Wallis-Test

Parameter	Termin	Düngestufe	3	4
Methanhektarertrag	7	1	n.s.	0,012
		3		n.s.
	8	1	n.s.	0,000
		3		0,034
	9	1	0,000	0,000
		3		0,027

Tab. A 57: Weizen, Signifikanzniveaus Unterschiede in der spezifischen Biogas- und Methanproduktion zwischen HBT und Batch nach dem Kruskal-Wallis-Test

Parameter	EC bzw. Düngestufe	69	73	77	85
Spezifische Biogasproduktion	1	0,004	0,003	0,002	0,002
	3	0,002	0,003	0,003	0,003
	4	0,007	0,003	0,002	0,002
Spezifische Methanproduktion	1	0,004	0,003	0,002	0,002
	3	0,002	0,003	0,003	0,003
	4	0,007	0,003	0,003	0,002

Tab. A 58: Mais, Signifikanzniveaus Unterschiede in der spezifischen Biogas- und Methanproduktion zwischen HBT und Batch nach dem Kruskal-Wallis-Test

Parameter	Termin bzw. Düngestufe	T7	T8	T9
Methanhektarertrag	1	n.s.	n.s.	n.s.
	3	0,001	0,007	0,000
	4	0,014	n.s.	0,002

Lebenslauf

Susanne Ohl, geb. Fischer

geboren am 04. Mai 1976 in Berlin, verheiratet, 2 Kinder

Staatsangehörigkeit: deutsch

SCHULBILDUNG

31.05.1995	Abitur Katholische Schule Salvator, Berlin
1990 – 1995	Gymnasium Katholische Schule Salvator, Berlin
1986 – 1990	Polytechnische Oberschule Käthe Kollwitz in Mühlenbeck (Land Brandenburg)
1982 – 1986	Teiloberschule in Zühlsdorf (Land Brandenburg)

STUDIUM UND DIPLOMARBEIT

23.02.2006	Diplom in Biologie
Januar 2005 – Januar 2006	Diplomarbeit am Institut für Zoologie / Haustierkunde der Universität Kiel Thema: „ <i>Untersuchungen an Tierknochenfunden einer Siedlung der vorrömischen Eisenzeit und der römischen Kaiserzeit bei Brunn, Landkreis Mecklenburg-Strelitz</i> “
November 2004	Diplomprüfungen in Biologie
Oktober 1998 – Oktober 2004	Erziehungspause und nebenberufliche Tätigkeit als Pflegeassistentin bei der Stiftung Kieler Stadtkloster
28.10.1997	Vordiplom in Biologie
Oktober 1995 – Februar 2006	Studium der Biologie an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

BERUFLICHE TÄTIGKEIT

Seit August 2011	Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für landwirtschaftliche Verfahrenstechnik der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
November 2006 – Juli 2011	Wissenschaftliche Mitarbeiterin und Doktorandin am Institut für landwirtschaftliche Verfahrenstechnik der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel Promotionsthema: „ <i>Ermittlung der Biogas- und Methanausbeute ausgewählter Nawaro</i> “

WEITERE BERUFLICHE TÄTIGKEIT

August 2002 – Oktober 2007	Pflegeassistentin im Haus Schwentineblick der Stiftung Kieler Stadtkloster
August 1996 – September 1998	Pflegeassistentin im Lisa-Hansen-Haus der Stiftung Kieler Stadtkloster, danach Erziehungspause
Juli – August 1996	Schwesternhelferkurs

ISSN 0931-6264