



Das Lebensministerium



Biomasseaufbereitung zur Vergärung

Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft

Heft 19/2008

Freistaat  Sachsen

Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft

Aufarbeitung landwirtschaftlicher Biomasse für den Vergärungsprozess

Daniel Weiß, Dr. Claudia Brückner

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Ziel des Forschungsprojektes	1
3	Material und Methoden	2
3.1	Beschreibung der Laboranlage und verwendeter Geräte	2
3.1.1	Laborfermenter	2
3.1.2	Mess- und Steuerungstechnik	6
3.2	Beschreibung der eingesetzten Aufarbeitungstechnik	9
3.2.1	Extruder	9
3.2.2	Multischroter	10
3.2.3	Erntetechnik	11
3.2.4	Enzyme	12
3.3	Beschreibung des Gärsubstrates	12
3.3.1	Animpfkulturen	12
3.3.2	Substrateinsatz	13
3.4	Methoden zur Bestimmung relevanter Parameter	13
3.4.1	Versuche zur Bestimmung der physikalischen Materialeigenschaften der mechanisch bearbeiteten Gärsubstrate	13
3.4.2	Berechnungsgrundlage für Versuchsauswertung	15
4	Durchführung	17
4.1	Aufarbeitung der verwendeten Substrate	17
4.2	Durchführung der Batch - Gärversuche	17
4.3	Durchführung der kontinuierlichen Gärversuche	18
4.4	Prozessüberwachung	18
4.4.1	Batch-Gärversuche	18
4.4.2	Kontinuierliche Gärversuche	19
5	Diskussion Ergebnisse	19
5.1	Optische Substratbewertung	20
5.2	Substratanalyse	27
5.2.1	Maissilage	27
5.2.2	Grassilage	31
5.2.3	Futterreste	35
5.2.4	Gerste	38
5.2.5	Weizen	40
5.2.6	Maissilage Häcksler	41
5.3	Ergebnisse der Gärversuche aus mechanischer Substrataufarbeitung	43
5.3.1	Maissilage Original/Extruder	43
5.3.2	Grassilage Original/Extruder	47
5.3.3	Futterreste Original/Extruder	51
5.3.4	Luzernesilage Original/Extruder	55
5.3.5	Kleegrassilage Original/Extruder	59

5.3.6	Moorgrassilage Original/Extruder	62
5.3.7	Gerste Original/Multischroter	66
5.3.8	Weizen Original/Multischroter	70
5.4	Erntetechnik Claas Jaguar 870	74
5.5	Ergebnisse der Gärversuche durch Enzymzugabe	77
5.5.1	Maissilage und Grassilage Original/Enzym	77
5.5.2	Maissilage und Grassilage fein aufgearbeitet/Enzym	81
5.6	Kontinuierliche Gärversuche	85
6	Betrachtungen zur Wirtschaftlichkeit	87
6.1	Das Erneuerbare-Energien-Gesetz	87
6.2	Ökonomische Wertung der Substratbehandlung	88
6.3	Energieeinsatz bei Substrataufarbeitung	90
6.4	Wirtschaftliche Relevanz der Vorbehandlung von Gärsubstraten in Praxisanlagen	91
7	Zusammenfassung und Schlussfolgerung	97

Abkürzungen

AHK	Anschaffungs- und Herstellungskosten
BHKW	Blockheizkraftwerk
dest.	destilliert
EEG	Erneuerbaren-Energien-Gesetz
Extr.	Extruder
F	Fermenter
FM	Frischmasse
GV	Glühverlust
GS	Grassilage
GE	Gerste
HMGS	Heide/Moorgrassilage
IS	Impf Schlamm
KGS	Klee grassilage
LS	Luzernesilage
ML	Mundloch
MS	Maissilage
MW	Mittelwert
MW _{el}	Mega-Watt elektrisch
MultiSchr.	Multischroter
N	Normbedingungen (0 °C; 1013,25 mbar)
NawaRo	nachwachsender Rohstoff gemäß EEG Definition
oTS-Gehalt	Gehalt an organischer Trockensubstanz [% der TS bzw. % der FM]
Subs.	Substrat
StVP	Stromeinspeisevergütungspauschale
StK	Strombezugskosten
TS-Gehalt	Trockensubstanzgehalt
TM	Trockenmasse
WE	Weizen
Vol%	Volumenprozent
Y _{oTS}	Biogasausbeute bezogen auf organische Trockensubstanz [l/kg oTS]
ZKA	Zentrale Kläranlage Leipzig

Tiefgestellte Indizes

abgeb	abgebaut
el	elektrisch
orig	original
th	thermisch
zu	zugeführt

Chemische Formeln

CO ₂	Kohlendioxid
CH ₄	Methan
H ₂ S	Schwefelwasserstoff

Begriffserklärung

Cofermentation	Fermentation mit Substrat und Hilfsstoff
Input	zugeführtes Material
Output	abgeführtes Material
Mini-Batch	Batch-Fermenter mit 1 l Füllvolumen
Monofermentation	Fermentation mit einem Substrat
Nullversuch	Erfassung der Restgärung des Impfschlammes
30 l Fermenter	Batch-Fermenter mit 30 l Füllvolumen

Formelzeichen

<i>Formelzeichen</i>	<i>Einheit</i>	<i>Benennung</i>
m	[g]; [kg]	Masse
P	[kW]	Leistung
p	[bar]	Druck
p ₁	[bar]	statischer Druck am Eingang der Restriktion (Durchflussmessung)
p ₂	[bar]	statischer Druck am Ausgang der Restriktion (Durchflussmessung)
Q	[l/h]	Volumenstrom
r	[mm]	Radius der Restriktion (Durchflussmessung)
r _p	[mm]	Radius der mittleren Partikelgröße
t	[s]	Zeit
S _v	[m ⁻¹]	volumenbezogene Oberfläche
t _{Mess}	[s]	Messzeit
T	[°C]	Temperatur
w	[mm]	Maschenweite
η	[Pa s]	Dynamische Viskosität
ρ	[g/cm ³]	Dichte

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Vereinfachtes Schema des Versuchsablaufs	2
Abbildung 2:	Schematischer Aufbau der Batch-Versuchsgäranlage	3
Abbildung 3:	Batch-Vergärungsanlage.....	4
Abbildung 4:	1-Liter-Batch-Fermenter	4
Abbildung 5:	Schematischer Aufbau der kontinuierlichen-Vergärungsanlage	5
Abbildung 6:	30-Liter-Fermenteranlage.....	6
Abbildung 7:	Biogasanalysegerät.....	7
Abbildung 8:	Ablauf des Milligaszahlers	8
Abbildung 9:	Extruder.....	9
Abbildung 10:	Substratförderschnecken	10
Abbildung 11:	Extruder Mundloch	10
Abbildung 12:	Multischroter.....	11
Abbildung 13:	Mahlwalzen	11
Abbildung 14:	Claas Typ Jaguar 870	12
Abbildung 15:	Substratanalyse mittels Scannermethode	14
Abbildung 16:	Fotografische Darstellung der Maissilage-Aufarbeitung	21
Abbildung 17:	Fotografische Darstellung der Grassilage-Aufarbeitung.....	21
Abbildung 18:	Fotografische Darstellung der Luzernesilage-Aufarbeitung.....	22
Abbildung 19:	Fotografische Darstellung der Kleegrassilage-Aufarbeitung	23
Abbildung 20:	Fotografische Darstellung der Moorgrassilage-Aufarbeitung	24
Abbildung 21:	Fotografische Darstellung der Gerste-Aufarbeitung	25
Abbildung 22:	Fotografische Darstellung der Weizen-Aufarbeitung	26
Abbildung 23:	Fotografische Darstellung der Maissilage-Zerkleinerung im Häcksler.....	27
Abbildung 24:	Maissilage - original - grob zerkleinert - fein zerkleinert	28
Abbildung 25:	Grassilage - original - grob zerkleinert - fein zerkleinert	31
Abbildung 26:	Futterreste original sowie fein zerkleinert.....	35
Abbildung 27:	Aufbau der Extruderanlage	91

Diagrammverzeichnis

Diagramm 1:	Summenverteilung der Fläche von Maissilage.....	28
Diagramm 2:	Summenverteilung des Umfanges von Maissilage.....	29
Diagramm 3:	Summenverteilung der Dicke von Maissilage.....	29
Diagramm 4:	Summenverteilung der Länge von Maissilage.....	30
Diagramm 5:	Summenverteilung der Fläche von Grassilage.....	32
Diagramm 6:	Summenverteilung des Umfanges von Grassilage	32
Diagramm 7:	Summenverteilung der Dicke von Grassilage	33
Diagramm 8:	Summenverteilung der Länge von Grassilage	33
Diagramm 9:	Summenverteilung der Fläche von Futterreste	35
Diagramm 10:	Summenverteilung des Umfanges von Futterreste	36
Diagramm 11:	Summenverteilung der Dicke von Futterreste	36
Diagramm 12:	Summenverteilung der Länge von Futterreste	37
Diagramm 13:	Ergebnisse der Durchgangshäufigkeit aus Siebung von aufgearbeiteter Gerste im Multischroter	38
Diagramm 14:	Ergebnisse der relativen Häufigkeit aus Siebung von aufgearbeiteter Gerste im Multischroter	39
Diagramm 15:	Ergebnisse der Durchgangshäufigkeit aus Siebung von aufgearbeitetem Weizen im Multischroter.....	40
Diagramm 16:	Ergebnisse der relativen Häufigkeit aus Siebung von aufgearbeitetem Weizen im Multischroter.....	40
Diagramm 17:	Ergebnisse der Durchgangshäufigkeit aus Siebung von Maissilage im Häcksler	41
Diagramm 18:	Ergebnisse der relativen Häufigkeit aus Siebung von Maissilage im Häcksler.....	42
Diagramm 19:	Biogausbeute der Maissilage-Vergärung nach unterschiedlicher Aufarbeitung....	44
Diagramm 20:	Methanausbeute der Maissilage-Vergärung nach unterschiedlicher Aufarbeitung...	44
Diagramm 21:	Biogausbeute der Maissilagevergärung im Batch-Versuch nach 30 Tagen	46
Diagramm 22:	Methangausbeuten der Maissilagevergärung im Batch-Versuch nach 30 Tagen	46
Diagramm 23:	Biogausbeute der Grassilage-Vergärung nach unterschiedlicher Aufarbeitung ...	48
Diagramm 24:	Methanausbeute der Grassilage-Vergärung nach unterschiedlicher Aufarbeitung ..	48
Diagramm 25:	Zusammenfassung der Ausbeuten der Grassilagevergärung im Batch-Versuch nach 30 Tagen	50
Diagramm 26:	Zusammenfassung der Ausbeuten der Grassilagevergärung im Batch-Versuch nach 30 Tagen	50
Diagramm 27:	Biogausbeute der Futterreste-Vergärung nach unterschiedlicher Aufarbeitung ...	52
Diagramm 28:	Methanausbeute der Futterreste-Vergärung nach unterschiedlicher Aufarbeitung ..	52
Diagramm 29:	Zusammenfassung der Biogausbeuten der Futterrestevergärung im Batch- Versuch.....	54
Diagramm 30:	Zusammenfassung der Methanausbeuten der Futterrestevergärung im Batch-Versuch.....	54

Diagramm 31: Biogasausbeute der Luzernesilage-Vergärung nach unterschiedlicher Aufarbeitung.....	56
Diagramm 32: Methanausbeute der Luzernesilage-Vergärung nach unterschiedlicher Aufarbeitung.....	56
Diagramm 33: Biogasausbeuten der Luzernesilagevergärung im Batch-Versuch nach 30 Tagen ..	58
Diagramm 34: Methanausbeuten der Luzernesilagevergärung im Batch-Versuch nach 30 Tagen .	58
Diagramm 35: Biogasausbeute der Kleegrassilage-Vergärung nach unterschiedlicher Aufarbeitung.....	60
Diagramm 36: Methanausbeute der Kleegrassilage-Vergärung nach unterschiedlicher Aufarbeitung.....	60
Diagramm 37: Zusammenfassung der Ausbeuten der Kleegrassilagevergärung im Batch-Versuch nach 30 Tagen.....	61
Diagramm 38: Zusammenfassung der Ausbeuten der Kleegrassilagevergärung im Batch-Versuch nach 30 Tagen.....	61
Diagramm 39: Biogasausbeute der Heide/Moorgrassilage-Vergärung nach Aufarbeitung.....	63
Diagramm 40: Methanausbeute der Heide/Moorgrassilage-Vergärung nach Aufarbeitung.....	63
Diagramm 41: Zusammenfassung der Ausbeuten der Heide/Moorgrassilage - Vergärung im Batch-Versuch nach 30 Tagen.....	64
Diagramm 42: Zusammenfassung der Ausbeuten der Heide/Moorgrassilage - Vergärung im Batch-Versuch nach 30 Tagen	65
Diagramm 43: Biogasausbeute der Gerste-Vergärung nach unterschiedlicher Aufarbeitung.....	67
Diagramm 44: Methanausbeute der Gerste-Vergärung nach unterschiedlicher Aufarbeitung.....	67
Diagramm 45: Zusammenfassung der Ausbeuten der Gerstevergärung im Batch-Versuch nach 30 Tagen	69
Diagramm 46: Zusammenfassung der Ausbeuten der Gerstevergärung im Batch-Versuch nach 30 Tagen	69
Diagramm 47: Biogasausbeute der Weizen-Vergärung nach unterschiedlicher Aufarbeitung.....	71
Diagramm 48: Methanausbeute der Weizen-Vergärung nach unterschiedlicher Aufarbeitung.....	71
Diagramm 49: Zusammenfassung der Ausbeuten der Weizenvergärung im Batch-Versuch nach 30 Tagen	73
Diagramm 50: Zusammenfassung der Ausbeuten der Weizenvergärung im Batch-Versuch nach 30 Tagen	73
Diagramm 51 : Biogasausbeute der Maissilage-Vergärung nach unterschiedlicher Häckslerlänge	74
Diagramm 52: Methanausbeute der Maissilage-Vergärung nach unterschiedlicher Häckslerlänge	75
Diagramm 53: Zusammenfassung der Ausbeuten der Maissilagevergärung im Batch-Versuch nach 30 Tagen	76
Diagramm 54: Zusammenfassung der Ausbeuten der Maissilagevergärung im Batch-Versuch nach 30 Tagen	76
Diagramm 55: Biogasausbeute der Maissilage- und Grassilage-Vergärung Original mit und ohne Enzym	78

Diagramm 56: Methanausbeute der Maissilage- und Grassilage-Vergärung Original mit und ohne Enzym	78
Diagramm 57: Zusammenfassung der Biogasausbeuten der Maissilage- und Grassilage-Vergärung im Batch-Versuch mit und ohne Enzymzusatz	80
Diagramm 58: Zusammenfassung der Methanausbeuten der Maissilage- und Grassilage-Vergärung im Batch-Versuch mit und ohne Enzymzusatz	80
Diagramm 59: Biogasausbeute der Maissilage- und Grassilage-Vergärung fein mit und ohne Enzym	82
Diagramm 60: Methanausbeute der Maissilage- und Grassilage-Vergärung fein mit und ohne Enzym	82
Diagramm 61: Zusammenfassung der Biogasausbeuten der Maissilage- und Grassilage-Vergärung im Batch-Versuch fein mit und ohne Enzymzusatz.....	84
Diagramm 62: Zusammenfassung der Methanausbeuten der Maissilage- und Grassilage-Vergärung im Batch-Versuch fein mit und ohne Enzymzusatz.....	84
Diagramm 63: Biogasproduktion von Maissilage im kontinuierlichen Versuch	85
Diagramm 64: Biogasausbeute von Maissilage im kontinuierlichen Versuch	86

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Sensoren des Mehrkanal-Gasanalytators der Firma Sewerin.....	7
Tabelle 2:	Übersicht der Zerkleinerung von Maissilage in Bezug auf Fläche, Umfang, Dicke,	31
Tabelle 3:	Übersicht der Zerkleinerung von Grassilage im Bezug auf Fläche, Umfang, Dicke, Länge und volumenbezogene spezifische Oberfläche	34
Tabelle 4:	Übersicht der Zerkleinerung von Futterresten in Bezug auf Fläche, Umfang, Dicke, Länge und volumenbezogene spezifischer Oberfläche	37
Tabelle 5:	Zusammenfassung der Ergebnisse aus der Siebanalyse Gerste	39
Tabelle 6:	Zusammenfassung der Ergebnisse aus der Siebanalyse Weizen	41
Tabelle 7:	Zusammenfassung der Ergebnisse aus der Siebanalyse Maissilage	42
Tabelle 8:	TS- und oTS-Werte des Impfschlammes und der aufgearbeiteten Substrate.....	43
Tabelle 9:	pH-Werte vom Gärversuch Ansatz und Abbruch	43
Tabelle 10:	Berechnete Parameter der Maissilage-Vergärungsversuche, Extruder Aufarbeitung	45
Tabelle 11:	TS und oTS-Werte des Impfschlammes und der aufgearbeiteten Substrate.....	47
Tabelle 12:	pH-Werte vom Gärversuch Ansatz und Abbruch	47
Tabelle 13:	Berechnete Parameter der Grassilage-Vergärungsversuche, Extruder Aufarbeitung	49
Tabelle 14:	TS- und oTS-Werte des Impfschlammes und der aufgearbeiteten Substrate.....	51
Tabelle 15:	pH-Werte vom Gärversuch Ansatz und Abbruch	51
Tabelle 16:	Berechnete Parameter der Futterreste-Vergärungsversuche, Extruder Aufarbeitung	53
Tabelle 17:	TS- und oTS-Werte des Impfschlammes und der aufgearbeiteten Substrate.....	55
Tabelle 18:	pH-Werte vom Gärversuch Ansatz und Abbruch	55
Tabelle 19:	Berechnete Parameter der Luzernesilage-Vergärungsversuche, Extruder Aufarbeitung	57
Tabelle 20:	TS- und oTS-Werte des Impfschlammes und der aufgearbeiteten Substrate.....	59
Tabelle 21:	pH-Werte vom Gärversuch Ansatz und Abbruch	59
Tabelle 22:	Parameter der Kleegrassilage-Vergärungsversuche, Extruder Aufarbeitung	59
Tabelle 23:	TS- und oTS-Werte des Impfschlammes und der aufgearbeiteten Substrate.....	62
Tabelle 24:	pH-Werte vom Gärversuch Ansatz und Abbruch	62
Tabelle 25:	Berechnete Parameter der Moorgrassilage-Vergärungsversuche, Extruder Aufarbeitung	64
Tabelle 26:	TS- und oTS-Werte des Impfschlammes und der aufgearbeiteten Substrate.....	66
Tabelle 27:	pH-Werte vom Gärversuch Ansatz und Abbruch	66
Tabelle 28:	Berechnete Parameter der Gerste-Vergärungsversuche, Multischroter	68
Tabelle 29:	TS- und oTS-Werte des Impfschlammes und der aufgearbeiteten Substrate.....	70
Tabelle 30:	pH-Werte vom Gärversuch Ansatz und Abbruch	70
Tabelle 31:	Berechnete Parameter der Weizen-Vergärungsversuche, Multischroter	72
Tabelle 32:	TS- und oTS-Werte des Impfschlammes und der aufgearbeiteten Substrate.....	74
Tabelle 33:	pH-Werte vom Gärversuch Ansatz und Abbruch	74

Tabelle 34:	Berechnete Parameter der Maissilage-Vergärungsversuche	75
Tabelle 35:	TS- und oTS-Werte des Impfschlammes und der Substrate	77
Tabelle 36:	pH-Werte vom Gärversuch Ansatz und Abbruch.....	77
Tabelle 37:	Berechnete Parameter der Maissilage Vergärungsversuche mit und ohne Enzym	79
Tabelle 38:	Berechnete Parameter der Grassilage Vergärungsversuche mit und ohne Enzym....	79
Tabelle 39:	TS- und oTS-Werte des Impfschlammes und der aufgearbeiteten Substrate.....	81
Tabelle 40:	pH-Werte vom Gärversuch Ansatz und Abbruch.....	81
Tabelle 41:	Berechnete Parameter der Maissilage fein, Versuche mit und ohne Enzym	83
Tabelle 42:	Berechnete Parameter der Grassilage fein - Batchversuche mit und ohne Enzym	83
Tabelle 43:	Ergebnisse der Ausbeuten aus kontinuierlichen Gärversuchen über die Gesamtdauer	87
Tabelle 44 :	Vergütung von Strom aus Biogasanlagen nach EEG	88
Tabelle 45:	Zusätzliche Vergütungsmöglichkeiten für Strom aus Biogasanlagen	88
Tabelle 46:	Substratkosten pro erzeugter kWh _{el} im Original und nach Aufarbeitung.....	89
Tabelle 47a:	Wirtschaftliches Ergebnis bei Vergärung unbehandelter und aufgearbeiteter	93
Tabelle 48:	Veränderung des wirtschaftlichen Ergebnisses (Gewinn/Verlust) der Biogasproduktion (BGA mit 500 kWh _{el})in Abhängigkeit von Inputzusammen- setzung und Substrataufarbeitung (Beispiel Moorgrassilage).....	96

1 Einleitung

Das Aufkommen an fossilen Energieträgern unserer Erde ist begrenzt. Daher ist das Interesse an alternativen Energien in den letzten 10 bis 20 Jahren deutlich gestiegen. Die gezielte Umwandlung von organischem Material in Methan und Kohlendioxid mit Hilfe von Mikroorganismen und die damit verbundene energetische Nutzung des erzeugten Biogases ist keine Erfindung des 21. Jahrhunderts, sondern wird schon seit knapp 100 Jahren im Bereich der Klärtechnik und seit mehr als 50 Jahren in der Landwirtschaft für die Behandlung von Wirtschaftsdünger eingesetzt. Besonders in der Landwirtschaft, dem Anlagenbau und in der Energiewirtschaft hat das Interesse an dieser Technik sprunghaft zugenommen. Man hat erkannt, dass sich mit einer Entwicklung im Energie-, Abfall- und Umweltbereich neue Lösungen eröffnen und gleichzeitig mit dem Einsatz einer solchen Technik neue Einkommensquellen für die Landwirtschaft erschlossen werden können.

Trotz aller Begeisterung darf dabei nicht übersehen werden, dass ein wirtschaftlicher Anlagenbetrieb nur unter bestimmten Rahmenbedingungen möglich ist. Hierzu kommt, dass für die Nutzung einzelner Substrate und Techniken noch ein erheblicher Entwicklungs- und Optimierungsbedarf besteht. Seit Anfang der 1990er-Jahre erlebt die Vergärung einen kontinuierlichen Aufschwung. Insbesondere seit dem Inkrafttreten des Erneuerbare-Energien-Gesetzes wird die Produktion von Biogas in der Landwirtschaft als eine zusätzliche Einkommensquelle betrachtet. Zusätzlich können dadurch die mit der Güllewirtschaft verbundenen Akzeptanzprobleme der Landwirtschaft gelöst werden.

Die Besonderheit der Biogastechnik gegenüber anderen Methoden der Energieerzeugung wie Wind- bzw. Solarenergie besteht darin, dass zur Produktion von Biogas biogene Reststoffe wie Gülle, Ernterückstände und Bioabfälle sowie eine Vielzahl von nachwachsenden Rohstoffen geeignet sind. Diese Stoffe können sowohl einzeln als auch gemeinsam als Cofermente verwendet werden und somit unabhängig von Wind und Sonne zur Energiegewinnung genutzt werden. Weil weder der Wassergehalt, die spezifische stoffliche Zusammensetzung noch die Struktur der Stoffe die Anwendbarkeit einschränken, steht mengenmäßig ein kaum überschaubares, bisher unerschlossenes Energiepotenzial zur Verfügung. Durch die Möglichkeit, Rohstoffe und Reststoffe einzeln oder zusammen zur Biogaserzeugung zu nutzen, besteht eine Vielzahl von Varianten, die Biogasproduktion an die jeweils am Standort vorliegenden Substratbedingungen anzupassen.

2 Ziel des Forschungsprojektes

Aufgrund der stetig steigenden Nachfrage an nachwachsenden Rohstoffen, die sowohl der Ernährungssicherung als auch der Verwirklichung der Klimaschutzziele dienen, werden Möglichkeiten gesucht, die Effizienz von Biogasanlagen sowie den Biogasertrag aus den eingesetzten nachwachsenden Rohstoffen zu steigern. Dies soll durch eine mechanische Zerkleinerung der Substrate über einen Extruder bei Silagen und einem Multischroter bei Getreide bzw. anderen Varianten erfolgen.

Gesamtziel des Forschungsvorhabens ist die Untersuchung von Gaserträgen und deren Verlauf bei der Cofermentation von unterschiedlich aufgearbeiteten Substraten in Versuchsfermentern. Dabei sollten auch Fragen der Übertragbarkeit von Ergebnissen aus Laborfermentern auf Praxisanlagen geklärt werden. Deshalb wurden die Versuche der Substrataufarbeitung unter praxisnahen Bedin-

gungen durchgeführt, um die erhaltenen Daten für den Betrieb landwirtschaftlicher Biogasanlagen verwenden zu können. Um dies zu gewährleisten, erfolgte eine Bearbeitung dieses Forschungsvorhabens im engen Dialog mit den Betreibern von Biogasanlagen sowie den Herstellern solcher Substrataufarbeitungsmaschinen.

3 Material und Methoden

In diesem Kapitel werden die verwendeten Geräte bzw. Apparaturen vorgestellt, die sowohl im Rahmen der Aufarbeitungsversuche als auch der Gärversuche verwendet wurden. Des Weiteren werden die Substrate näher beschrieben und zum Schluss wird auf die eingesetzten analytischen Methoden eingegangen.

In Abbildung 1 sind der schematische Aufbau des Versuchsablaufes und die verwendeten Geräte dargestellt.

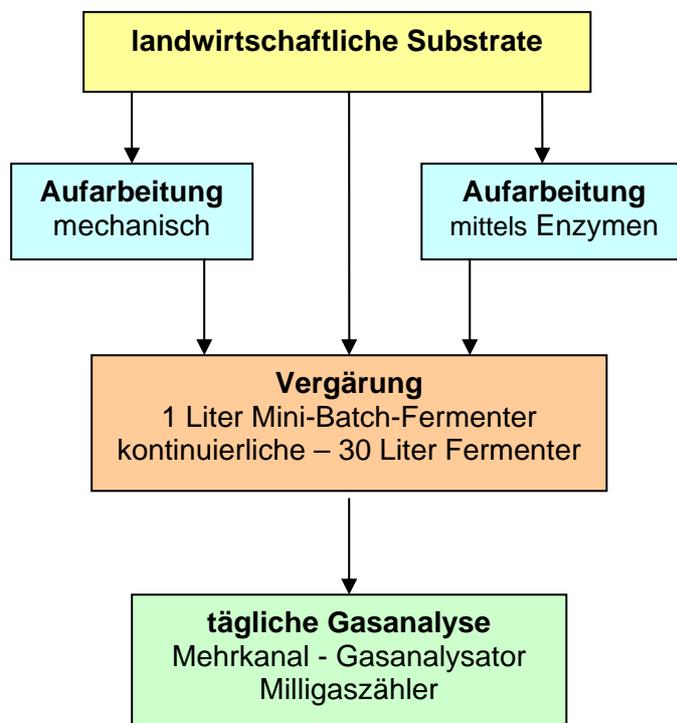


Abbildung 1: Vereinfachtes Schema des Versuchsablaufs

3.1 Beschreibung der Laboranlage und verwendeter Geräte

3.1.1 Laborfermenter

Mini-Batch-Fermenter

Für die durchzuführenden Batch-Gärversuche standen 16 Mini-Batch-Fermenter aus Glas mit einem maximalen Nutzvolumen von 1 Liter zur Verfügung. In Abbildung 2 ist ein vereinfachter Versuchsaufbau dargestellt.

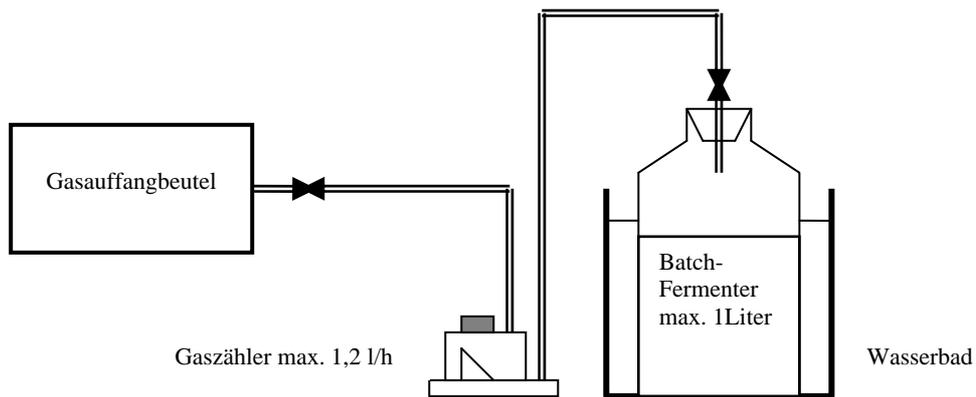


Abbildung 2: Schematischer Aufbau der Batch-Versuchsgäranlage

Die Auswahl des Fermentermaterials Glas begründete sich mit dem Vorhaben, spezifische Vorgänge wie Auftreten von Schwimmschichten, Schaumbildung und Blasenwanderung beobachten zu können.

Die Mini-Batch-Fermenter wurden nach entsprechender Substratbefüllung mit einem Plastikdeckel und dazugehörigem Dichtungsring gasdicht verschraubt. Das entstehende Biogas wird durch einen Gasauslass am Schraubdeckel, über eine Schlauchverbindung aus dem Reaktor geführt und in einem Gasbeutel gesammelt. Um einen zeitlichen, charakteristischen Verlauf der Biogasbildung eines Substrates aufzeichnen zu können, wurden die "Tecobag"-Gasauffangsysteme täglich gewechselt und ausgewertet. Das aufgefangene Biogas wurde mittels eines Biogasanalysators ausgewertet. Temperiert wurde die Batchversuchsanlage über ein Wasserbad, in dem sich ein Thermostat befindet. Die dabei eingestellte Temperatur beträgt 37 °C.

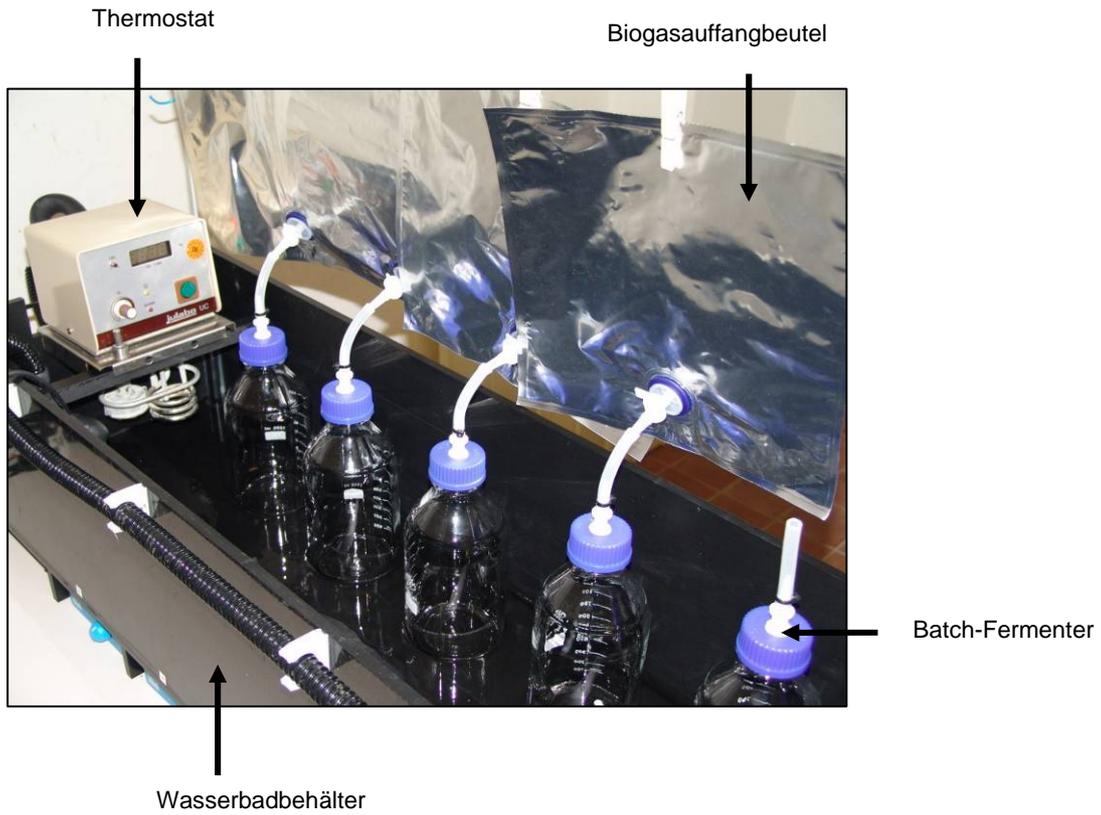


Abbildung 3: Batch-Vergärungsanlage

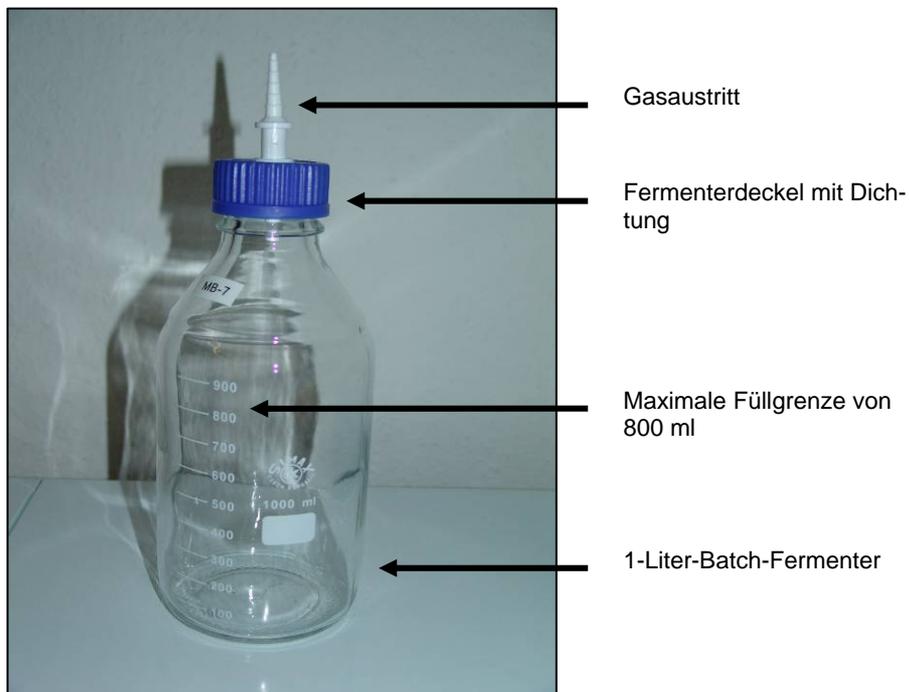


Abbildung 4: 1-Liter-Batch-Fermenter

Kontinuierliche Laborfermenter

Für die kontinuierlichen Gärversuche standen drei Fermenter mit einem maximalen Nutzvolumen von 30 Litern zur Verfügung. Die wesentlichen Komponenten sind in Abbildung 5 vereinfacht dargestellt.

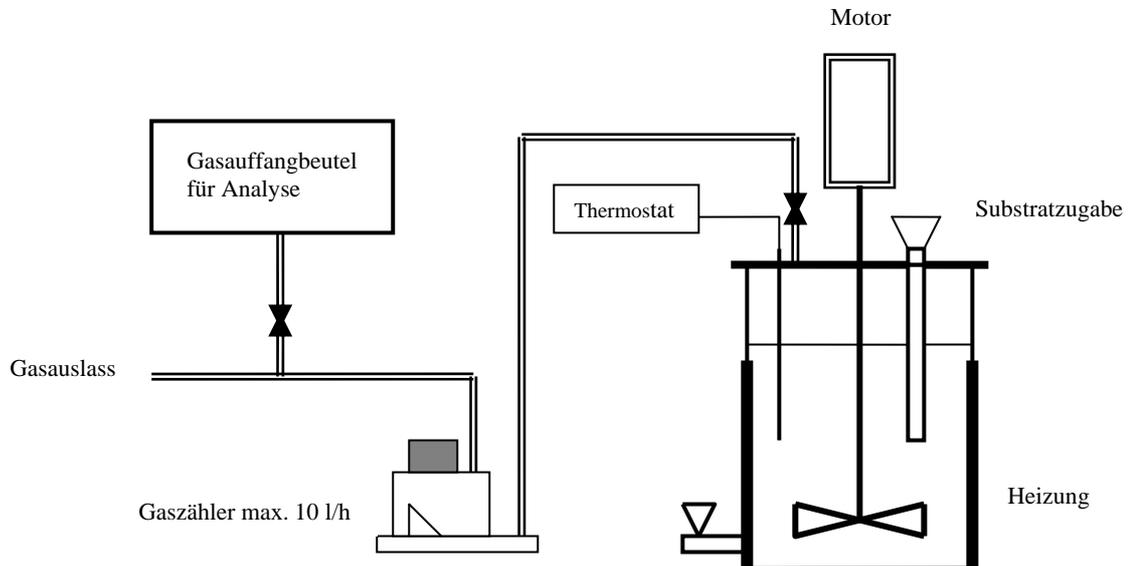


Abbildung 5: Schematischer Aufbau der kontinuierlichen Vergärungsanlage

Für die durchzuführenden kontinuierlichen Gärversuche standen drei Fermenter aus schwarzem PE-Kunststoff mit einem maximalen Fassungsvermögen von 30 Litern zur Verfügung. Das effektiv nutzbare Volumen der Behälter beträgt 20 Liter. Die Fermenter bestehen aus jeweils einem zylindrischen Behälter, welcher nach entsprechender Substratbefüllung mit einer Deckelplatte und dazugehörigem Dichtungsring gasdicht verschraubt werden kann. Die Fermenter wurden mit einem Rührwerk ausgestattet, welches sich nach festgelegter Zeit automatisch zuschaltet. Das entstehende Biogas wird durch einen Gasauslass am Deckel, über eine Schlauchverbindung aus dem Reaktor geführt und ausgewertet. Mit einem Thermostat wird die gewünschte Temperatur des Fermenters eingestellt. Die bei diesen Versuchen eingestellte Temperatur beträgt 37 °C. Der pH-Wert wird manuell über eine pH-Wert-Sonde gemessen. Die Substratzufuhr erfolgt ebenfalls manuell.

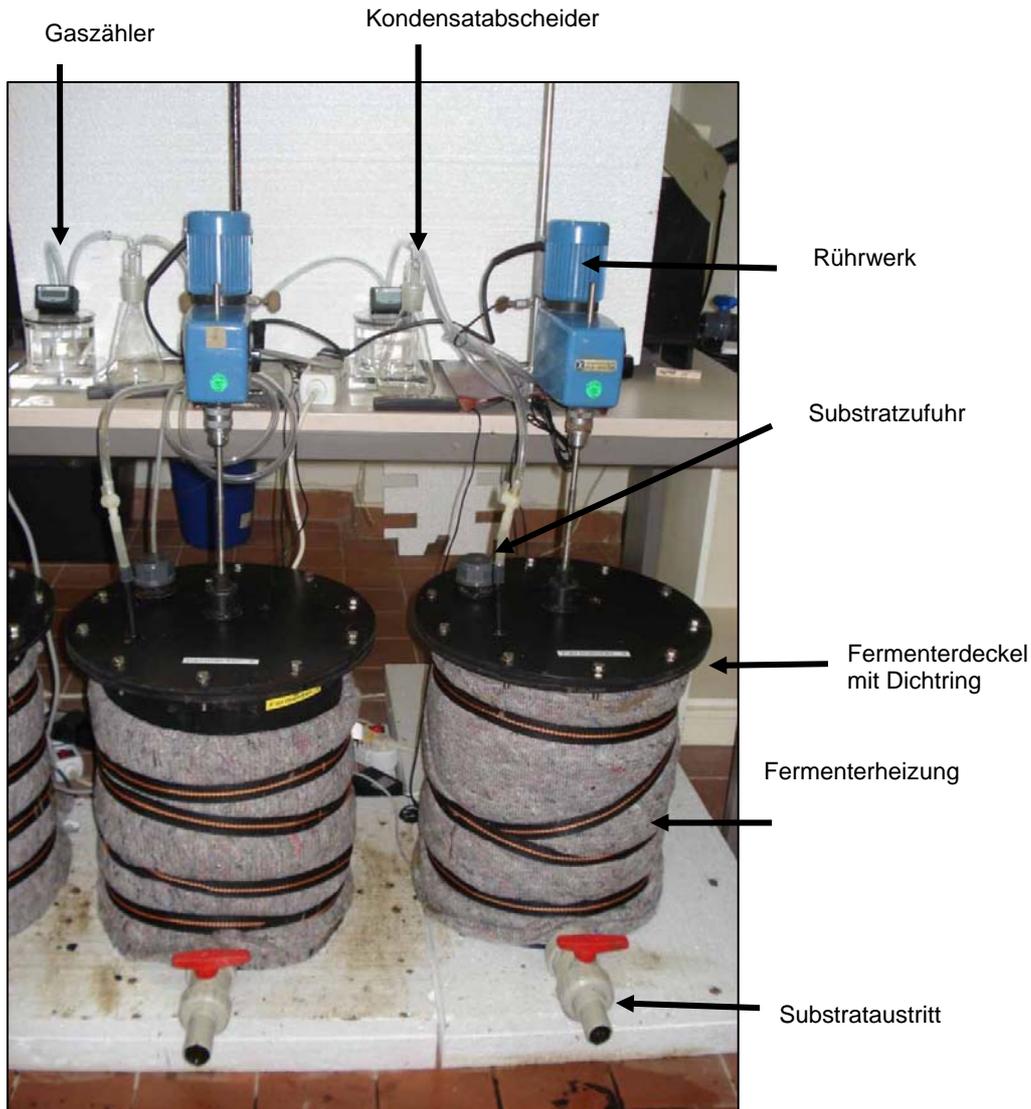


Abbildung 6: 30-Liter-Fermenteranlage

3.1.2 Mess- und Steuerungstechnik

Mehrkanal-Gasanalysator

Die Analyse der Gaszusammensetzung des entstandenen Biogases erfolgte mittels Biogasanalysator SR2-DO. Dieses Messgerät besteht aus einzelnen Kanalkarten, an denen jeweils ein Sensor angeschlossen ist. In dem verwendeten Analysator sind drei Sensoren für folgende Gase im angeführten Messbereich installiert.

Das zu analysierende Messgas wird durch eine Kondensatpumpe aus dem angeschlossenen Gasbeutel gesaugt und an den Sensoren vorbei geführt. Die Kanalkarte nimmt den vom jeweiligen Sensor gemessenen Wert als Sensorstrom über eine 4 - 20 mA Schnittstelle auf und rechnet diesen in einen Konzentrationswert um.

Weil sich zu Beginn der Messung noch eine geringe Menge an Fremdgas in den Verbindungsschläuchen befindet, sind repräsentative Werte über die Zusammensetzung des Biogases erst nach einer Wartezeit messbar bzw. nach Spülung mit Frischluft vor erneutem Gebrauch.

Tabelle 1: Sensoren des Mehrkanal-Gasanalytators der Firma Sewerin

Messgas	Messbereich	Sensor
Methan	0 – 100 Vol. %	Infrarot
Kohlendioxid	0 – 100 Vol. %	Infrarot
Schwefelwasserstoff	0 – 2000 ppm	elektrochemische Messzelle



Abbildung 7: Biogasanalysegerät

Die zur Gasanalyse verwendeten Geräte besitzen ihrerseits nach Herstellerangaben einen Messfehler < 3 % des Messbereichendwertes.

Milligascounter

Die Arbeitsweise des Milligascounters der Firma R.-Apparatebau, entwickelt von der FH Hamburg, entspricht der eines Kippzählers. Die Messkammer, in der sich das Kippwerk befindet, ist mit einer Sperrflüssigkeit gefüllt. Das zu messende Biogas strömt über einen Einlassstutzen in den Gasaufgangbehälter bis der Auftrieb des Gases so hoch ist, dass der Kippvorgang ausgelöst und es zum Umklappen des Kippzählers kommt. Hierbei kann das aufgefangene Gas über einen Gasauslass entweichen. Pro Umklappen wird ein Gasvolumen von 1 ml bei den Batch-Fermentern und 10 ml bei den kontinuierlichen Fermentern gezählt. Somit kann ein Minimal-Volumenstrom von 1ml/Tag bzw. 1,2 l/h und ein Maximal-Volumenstrom von 10 ml/Tag bzw. 12 l/h gemessen werden. Weil der im Biogas enthaltene Wasserdampf nicht in dem Gaszähler kondensieren darf, wurde ein Kondensatabscheider dem Milligascounter vorgeschaltet. Der Kippvorgang ist in Abbildung 8 dargestellt.

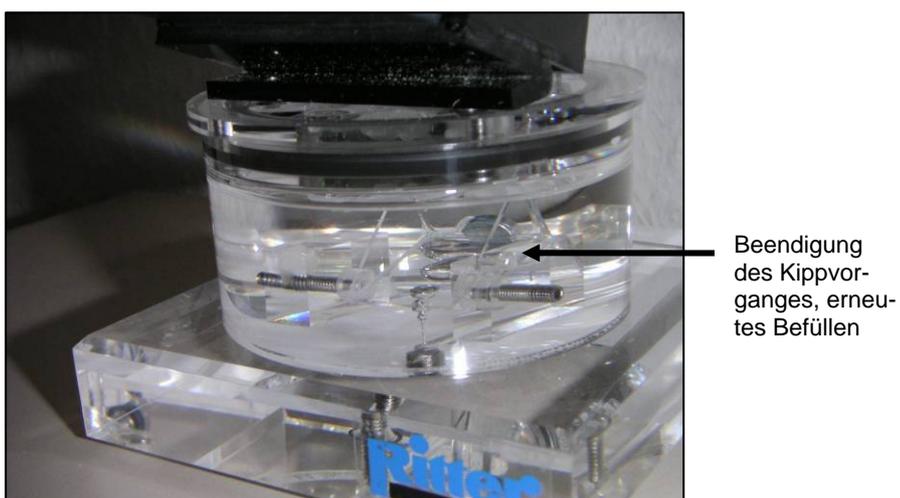
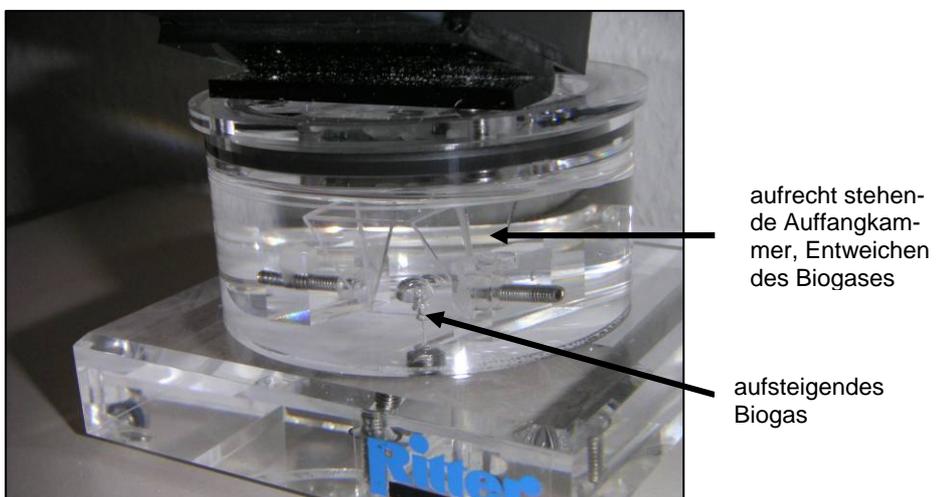
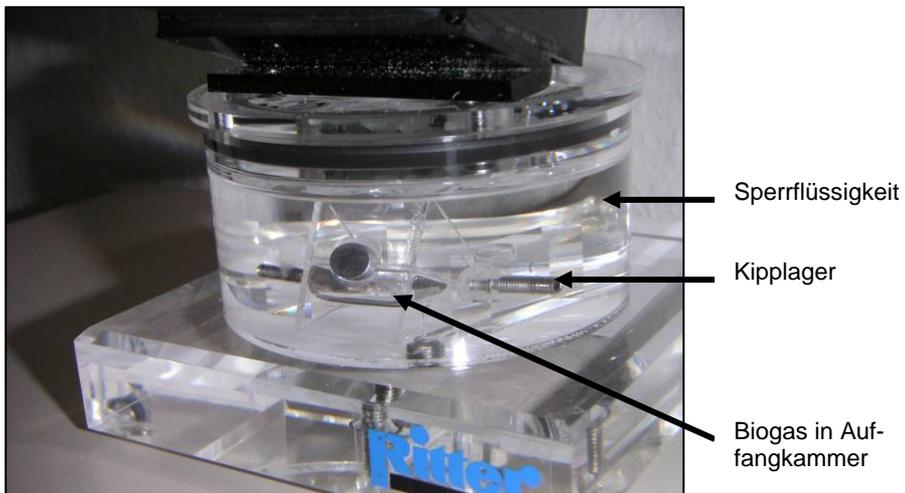


Abbildung 8: Ablauf des Milligaszählers

Rühreinrichtung

Das Rührgerät schaltet sich automatisch über eine Zeitschaltuhr nach vorher festgelegten Intervallen zu und betreibt mit einer am Gerät manuell regelbaren Rührerintensität den in den Fermenter ragenden Rührer. Für die drei Fermenter kommen Rührgeräte der Firma IKA-Werke zum Einsatz. Bei den Batch-Gärversuchen erfolgt die tägliche Durchmischung der Inputstoffe durch mehrmaliges Schütteln per Hand.

Thermostat und pH-Wert-Messung

Über ein elektrisches Thermostat wird die Wärmeregulierung der Batch-Vergärungsanlage realisiert. Für eine optimale Verteilung und somit konstante Temperatur im Wasserbad sorgt eine Umwälzpumpe. Die kontinuierlichen Fermenter werden elektrisch beheizt und werden ebenfalls über ein Thermostat konstant betrieben. Die Bestimmung des pH-Wertes erfolgt manuell über eine pH-Sonde.

3.2 Beschreibung der eingesetzten Aufarbeitungstechnik

3.2.1 Extruder

Für die Aufarbeitung der bei den Gärversuchen eingesetzten Substrate dient ein Doppelschneckenextruder. Dies ist ein Maschinensystem, welches zum Aufschluss von Biomasse, speziell für den Einsatz in Biogasanlagen, entwickelt wurde (Abbildung 9). Durch den erzeugten Aufschluss wird die Bioverfügbarkeit von zum Teil schwerer abbaubaren Stoffen verbessert.

Extruder sind mit einem Fleischwolf vergleichbar, in dem zwei entgegenlaufende Förderschnecken das Material zu zwei Mahlschnecken transportieren (Abbildung 10). Der Grad der Aufarbeitung von Stoffen wird durch die Öffnung des Mundloches am Ausgang beeinflusst (Abbildung 11). Je enger dies ist, desto feiner erfolgt die Substrataufarbeitung.



Abbildung 9: Extruder



Abbildung 10: Substratförderschnecken



Abbildung 11: Extruder Mundloch

3.2.2 Multischroter

Für die Getreideaufarbeitung bei den Gärversuchen diente ein Multischroter. Diese Schrotmühlensysteme mit über 40 cm großen Mahlwalzen (Abbildung 13) sind sowohl als mobile als auch stationäre Maschinen verfügbar. Über eine manuelle Verstellung des Mahlspaltes ist eine optimale Aufarbeitung des Getreides gewährleistet. Multischroter vermahlen Getreide mit geringstem Kraftaufwand.



Abbildung 12: Multischroter



Abbildung 13: Mahlwalzen

3.2.3 Erntetechnik

Eine weitere Möglichkeit der mechanischen Substrataufarbeitung ist die Optimierung der Erntetechnik. Dies kann gleich während des Erntevorganges durch einen entsprechenden Häcksler durchgeführt werden.

Bei diesen Versuchen kam ein Häcksler der Marke CLAAS vom Typ Jaguar 870 zum Einsatz. Hierbei wurde die kleinstmögliche Häckslereinstellung gewählt.



Abbildung 14: Claas Typ Jaguar 870

3.2.4 Enzyme

Enzyme sind eine weitere Möglichkeit, die Biogasausbeute zu steigern. Diese verbessern die Futterverwertung, indem sie die Bakterien bei der Zerlegung der organischen Masse unterstützen. Die komplexen Strukturen der Biomasse z. B. von nachwachsenden Rohstoffen werden damit aufgebrochen und für Bakterien verfügbarer gemacht. Das Gärhilfsmittel greift nicht in die Methanogenese, also in die letzte Abbaustufe des Biogasprozesses ein, sondern wirkt im hydrolisierenden Bereich. Solche Einsatzstoffe bestehen aus Cellulose und Hemicellulose spaltenden Enzymen, welche in speziellen biotechnologischen Herstellungsverfahren mit Mikroorganismen produziert werden.

3.3 Beschreibung des Gärsubstrates

3.3.1 Animpfkulturen

Batch-Gärversuche

Um zeitintensive Vorbereitungen bei Laborversuchen zu vermeiden, kann die Anfahrzeit der Fermenter mit Faulschlamm aus dem Faulturm einer Kläranlage erheblich verkürzt werden. Durch das sehr langsame Wachstum der Anaerobier kann die Startphase einer Anaerobanlage einige Wochen dauern.

Zu diesem Zweck wurde entsprechendes Impfmateriale aus der Umwälzleitung eines der vier Faultürme der Zentralen Kläranlage Leipzig entnommen. Die Kläranlage Leipzig reinigt Abwässer aus Haushalten, Industrie, Gewerbe und öffentlichen Einrichtungen. Das Abwasser durchläuft dabei eine mechanische Reinigungsstufe und gelangt nach biologischer Reinigung im Belebungsbecken und Nachklärbecken in ein Anaerobbecken und anschließend in die Faultürme. Der Impfschlamm wurde

nach der Entnahme keiner weiteren Aufbereitung unterzogen. Die Lagerung bis zum Beginn der Versuchsreihen erfolgte bei Raumtemperatur.

Kontinuierliche Gärversuche

Um eine gute Übertragbarkeit der Ergebnisse aus den kontinuierlichen Gärversuchen zu erhalten, wurde als Animpfsubstrat Rindergülle aus einer naheliegenden Biogasanlage verwendet. Hierbei handelt es sich um Outputmaterial, welches vom Überlauf der Biogasanlage ins Endlager für die Versuchszwecke entnommen wurde. Aufgrund des guten Abbaues in der Biogasanlage wurde das Impfmateriale nach der Entnahme keiner weiteren Aufbereitung unterzogen. Die Lagerung bis zum Beginn der Gärversuche erfolgte bei Raumtemperatur.

3.3.2 Substrateinsatz

Durch die Feststoffeigenschaften nachwachsender Rohstoffe ergeben sich weitere wichtige Einflussfaktoren. Pflanzen weisen Lignin und Cellulose als Stützstoffe auf. Diese Stoffe sind durch die Bakterien der anaeroben Vergärung nicht abbaubar. Umschließen diese Stoffe andere leicht abbaubare organische Stoffe, so können diese von den Bakterien nicht erreicht werden. Die Aufarbeitung, besonders der Zellaufschluss, beeinflusst daher die direkt zur Verfügung stehenden organischen Stoffe und damit die Biogasbildung.

Das Ziel der Untersuchungen besteht in der Erhöhung der Biogasausbeute bzw. Methanausbeute durch Verbesserung des anaeroben Abbaus organischer Materialien. Unter Beachtung der genannten Aspekte wurden folgende landwirtschaftliche Substrate für die Versuche eingesetzt und dementsprechend aufgearbeitet.

- Maissilage
- Grassilage
- Futterreste
- Moorgrassilage aus der Presseler Heide
- Kleegrassilage
- Luzernesilage
- Gerste
- Weizen

Diese genannten Materialien stehen in der Landwirtschaft in größeren Mengen zur Verfügung.

3.4 Methoden zur Bestimmung relevanter Parameter

3.4.1 Versuche zur Bestimmung der physikalischen Materialeigenschaften der mechanisch bearbeiteten Gärsubstrate

Silagen

Die Bestimmung der Partikelgrößenverhältnisse der Substrate Maissilage, Grassilage und Futterreste wurde am Fraunhofer Institut für Keramische Technologien und Systeme in Dresden durchgeführt.

Zur Bestimmung der Verteilung wurden die Silagen in eine Grob- und eine Feinfraktion unterteilt. Der Trennschnitt zwischen den beiden Fraktionen erfolgte bei 1 mm. Die Analyse der Feinfraktion erfolgte mittels Laserbeugungsspektrometer. Für die Untersuchung der Grobfraktion wurde die Bildanalyse-Software Fibreshape der Firma IST herangezogen.



Abbildung 15: Substratanalyse mittels Scannermethode

Getreide

Die Bestimmung der Partikelgrößenverhältnisse bei Weizen und Gerste wurde mittels Siebanalyse durchgeführt. Dies ist die einfachste Methode zur Bestimmung von Verteilungssummenkurven. Bei der Siebanalyse wird eine Probe bekannter Masse in einzelne Fraktionen der Masse zerlegt, deren Partikelgröße durch die Trennkorngröße der entsprechenden Siebe festgelegt ist. Durch die Siebung wird festgelegt, wie viel Prozent der Probe größer dem Rückstand oder kleiner des Durchganges ist als die Siebmaschenweite. Durch die Analyse mit einer Siebfolge wird eine Bestimmung der Massenanteile vorgenommen, die in den einzelnen Korngrößenintervallen zwischen jeweils zwei Sieben verschiedener Maschenweiten enthalten sind. Die Massenanteile können durch Wägung sehr leicht bestimmt werden.

Der Transport der Partikel durch die Sieböffnungen wird durch Trägheitskräfte, durch Scherkraft und/oder Strömungskräfte bewirkt. Man verwendet dazu genormte Siebe. Die Aussagekraft einer Analysesiebung wird durch die Wahl der Siebfolge, die Probenmenge, die Probennahme, die Gutfeuchtigkeit, die Siebdauer und die Siebfrequenz bestimmt.

Um eine bessere Beurteilung des Einflusses der Aufarbeitung des Substrates zu erhalten, wurde eine Partikelgrößenanalyse mittels Siebung durchgeführt. Dabei kamen Drahtsiebböden mit quadratischen Maschen und einem Durchmesser der Siebbodens von 200 mm zum Einsatz. Die Art der Klassierung, die Siebdauer und die Einwaage an Proben wurde anhand von Vorversuchen festgelegt.

Vor Beginn der Siebung sind alle Siebböden einzeln im leeren Zustand auf einer Feinwaage gewogen worden. Dies wurde nach Beendigung der Siebung mit der jeweiligen Materialprobe wiederholt.

Die Oberflächenfeuchtigkeit eines Aufgabegutes kann durch Agglomeration (Anhäufung) der Partikel das Trennergebnis negativ beeinflussen. Aus diesem Grund wurde vor der Analyse entschieden, ob die Probe zuvor nochmals einer Trocknung unterzogen werden muss.

Der Siebsatz zur Trockensiebung von Weizen und Gerste umfasst Siebböden der Nennmaschenweiten $w = 6,3; 1,6; 1; 0,8; 0,5; 0,33; 0,125$ [mm] und der Siebpfanne

Bestimmung der volumenspezifischen Oberfläche

Die volumenspezifische Oberfläche ist sowohl zur Beschreibung des Zerkleinerungserfolges als auch für die Beschreibung des Abbauprozesses von großer Bedeutung. Hierzu wurde die Teilchenoberfläche nach Gleichung 16 berechnet. Dafür erfolgte die Berechnung unter der Annahme, dass es sich um kugelförmige Teilchen handelt und alle Partikel den gleichen Durchmesser besitzen. Hierfür wurde die aus der Siebanalyse erhaltene mittlere Partikelgröße verwendet. Die Berechnung kann deshalb nur als eine grobe Näherung betrachtet werden.

Gleichung 16:
$$S_V = \frac{4\pi \cdot r_p^2}{\frac{4}{3}\pi \cdot r_p^3} = \frac{3}{r_p} \quad [1/\text{mm}]$$

S_V – volumenspezifische Oberfläche

r_p - Radius des mittleren Partikeldurchmessers

3.4.2 Berechnungsgrundlage für Versuchsauswertung

Als Bewertungsgrundlagen für die Auswertung der durchgeführten Vergärungsversuche sind folgende Zusammenhänge wichtig:

- Zeitlicher Verlauf der Gasentstehung,
- Gesamtmenge des entstehenden Biogases,
- Zusammensetzung des entstandenen Biogases.

Für die Auswertung des entstehenden Gases wird die tägliche Biogasausbeute über die Versuchsdauer grafisch dargestellt. Ebenfalls wird die Methanausbeute grafisch belegt. Aus den daraus ergebenden Summenkurven kann die Gesamtausbeute des entstandenen Biogases über der Versuchsdauer entnommen werden. Zudem können aus solchen Kurven Schlussfolgerungen bezüglich des Gärverlaufs bzw. der Hemmung des Gärprozesses gezogen werden.

Die Biogasmenge ist das Volumen an Gas, welches pro Versuchsansatz täglich bzw. während der gesamten Versuchsdauer gebildet wird. Das entstandene Gasvolumen kann in Liter oder Normliter

angegeben werden. Die Einheit Normliter wird für das Volumen bei atmosphärischem Druck (1,013 bar) und 0 °C verwendet. Hierfür wird die ermittelte Gasmenge auf 0 °C umgerechnet. Dies geschieht mit der vereinfachten Form des Gay-Lussacschen Gesetzes.

$$\text{Gleichung 1:} \quad V_2 = V_1 \cdot \frac{T_2}{T_1} = V_1 \cdot \frac{273K}{298K} \quad [l]$$

V_1 = gemessenes Volumen normiert bei 25°C V_2 = Volumen bei 0°C

Die Anteile der täglich entstandenen Volumina an Methan werden bestimmt nach Gleichung 2.

$$\text{Gleichung 2:} \quad V_{3,Methan} = V_{2,Biogas} \cdot C_{CH_4}$$

Als Biogasausbeute wird das Gasvolumen pro kg organische Trockensubstanz bzw. Frischmasse des zugeführten vergorenen Materials bezeichnet. Die Biogasausbeute ist definiert nach

$$\text{Gleichung 3:} \quad Y_{oTS} = \frac{V_{Biogas}}{m_{oTS, zu}} \quad [l/kg \text{ oTS}]$$

Ebenfalls wird bei der Methanausbeute analog der Biogasausbeute vorgegangen.

$$\text{Gleichung 4:} \quad Y_{oTS, CH_4} = \frac{V_{CH_4}}{m_{oTS, zu}} \quad [l/kg \text{ oTS}]$$

Von der Gesamtbiogasmenge, welche bei den verschiedenen Versuchsansätzen ermittelt wurde, ist jeweils die Restgasmenge, die durch den Impfschlamm produziert wurde, zu subtrahieren. Diese Gasmenge werden durch die Nullversuche im Mini-Batch ermittelt. Weil zum Teil nur sehr geringe Mengen entstehen, konnte kein zeitlicher Verlauf der Gasproduktion des Impfmateri als aufgenommen werden. Das durch den Impfschlamm gebildete Biogas bleibt daher beim zeitlichen Verlauf der Biogasbildung unberücksichtigt. Bei der Zusammensetzung des Gases kann es ebenfalls zu einer geringen Beeinflussung kommen. Das für die Auswertung der Gärversuche wichtige Ergebnis der Gesamtgasmenge, welches ausschließlich durch das verwendete Gärsubstrat freigesetzt wurde, wird nach Gleichung 5 um die aus dem Impfmateri resultierende Methanmenge korrigiert.

$$\text{Gleichung 5:} \quad V_{CH_4} = \sum (\phi_{CH_4, Subs+IS} \cdot V_{Biogas, Subs+IS}) - \sum (\phi_{CH_4, IS} \cdot V_{Biogas, IS}) \quad [l]$$

4 Durchführung

4.1 Aufarbeitung der verwendeten Substrate

Die Aufarbeitung der ausgewählten Substrate durch einen Extruder bzw. Multischroter erfolgte jeweils im Vorfeld der Gärversuche im jeweiligen landwirtschaftlichen Betrieb.

Substrate werden zur Verwendung in Biogasanlagen hauptsächlich mit dem Ziel der besseren Handhabbarkeit zerkleinert. Dosier- und Mischvorgänge erfordern zumeist ein geeignetes Aufbereitungsverfahren der Inputmaterialien. Eine gezielte Aufarbeitung der Cofermente auf eine bestimmte Partikelgröße, bei welcher der biologische Abbau am günstigsten verläuft, wird in der Praxis selten praktiziert. Eine Veränderung von bestimmten Stoffeigenschaften wie Partikelgröße, durch Aufarbeitung nimmt einen substratspezifischen Einfluss auf das Abbauverhalten. Im Vergleich mit Originalsubstraten kann mit vorhergehender Aufarbeitung, insbesondere die Bioverfügbarkeit, von zum Teil schwerer abbaubaren Stoffen verbessert werden.

Erhöht sich die Bioverfügbarkeit von eingesetzten Substraten durch dementsprechende Vorbehandlung, so muss sich dieser Sachverhalt mit einer schnelleren Steigung der Biogas- und Methan- ausbeute belegen lassen.

4.2 Durchführung der Batch-Gärversuche

In diesen Versuchsreihen wurden die verwendeten Substrate mit Faulschlamm einer kommunalen Kläranlage angeimpft und unter mesophilen anaeroben Bedingungen bei 37 °C in einem Doppelversuch vergoren. Die Dauer der Batchversuche wurde im Vorfeld mit 30 Tagen festgelegt. Die Grundlage der Untersuchungen bilden die diskontinuierlichen Reaktoren.

Die Versuche werden in Anlehnung an die in der VDI Richtlinie - Vergärung organischer Stoffe VDI 4630 - enthaltenen Vorgaben durchgeführt. Bei der Festlegung des Input-Mischungsverhältnisses von Impfschlamm und Substrat wurden folgende Rahmenbedingungen nach Gleichung 6 eingehalten. Diese dienen in erster Linie dazu, Hemmeinflüsse auf den anaeroben Abbau durch ungenügende Bakterienpopulation im Fermenter auszuschließen.

Gleichung 6:
$$\frac{oTS(IS)}{oTS(Substrat)} \geq 2$$
 Quelle: [VDI 4630]

Das Füllvolumen der Reaktoren dieser Ansätze wurde auf 800 ml festgelegt. Nach dem Befüllen der Batch-Fermenter mit der errechneten Menge an Inputmaterial wurde der Fermenterinhalt vermischt, bis eine Homogenität zu erkennen war. Gleichzeitig zu den Gärversuchen wurde ein Nullversuch mit ebenfalls 800 ml Volumen durchgeführt. Im Nullversuch werden die Restgärung des Impfschlammes und die Zusammensetzung des Gases untersucht.

Anschließend wurden die Mini-Batch-Fermenter gasdicht verschlossen, in ein Wasserbad überführt und mit den Gasbeuteln zum Auffangen des entstehenden Biogases verbunden. Die Messung des pH-Wertes erfolgt immer zu Beginn und am Ende des Versuchsansatzes. Das Aufmischen der Inputstoffe während der Versuchsdauer erfolgte durch mehrmaliges tägliches Schütteln der Mini-Batch-Fermenter. Dies erfolgte solange, bis eine Homogenität zu erkennen war.

Vor dem Beginn der eigentlichen Gärversuche wurde von jeder Substratprobe und dem bei der Vergärung verwendeten Impfschlamm der TS- bzw. oTS-Wert ermittelt. Diese Werte dienen als Grundlage für die Berechnung des Inputmaterials nach Gleichung 6.

4.3 Durchführung der kontinuierlichen Gärversuche

Vor der täglichen Beschickung der Fermenter mit Frischsubstrat wird die entsprechende Menge an ausgefaultem Substrat über den am Boden befindlichen Ablasshahn entnommen. Damit durch den entstehenden Unterdruck im Fermenter beim Ablassen keine Sperrflüssigkeit aus dem Milligasähler angesaugt wird, muss vorher die Gasleitung vom Fermenter mittels Sperrhahn verschlossen werden. Nach Trennung der Gasleitung am Sperrhahn wird ein mit Biogas gefüllter Gasbeutel befestigt. Somit wird verhindert, dass beim Ablassen von Substrat aus dem Fermenter Luft hinein gezogen wird.

Die Zugabe von Substrat erfolgt einmal am Tag manuell über einen Trichter am Fermenterdeckel. Die in den Fermentern befindlichen Rührer dienen der Homogenisierung und Zerstörung von Schwimm- und Sinkschichten. Die Rührer werden über einen Motor mit stufenlosem Getriebe angetrieben. Der Rührbetrieb erfolgt nach vorher festgelegten Intervallen, dem jeweiligen Substrat angepasst. Die TS- bzw. oTS-Werte werden regelmäßig während des Gärversuches ermittelt.

4.4 Prozessüberwachung

4.4.1 Batch-Gärversuche

Eine Vergärung nachwachsender Rohstoffe ohne Zufuhr von Gülle ist aufgrund fehlender Pufferkapazität anfälliger gegenüber einer Produkthemmung als die Vergärung tierischer Exkremente. Es ist daher besonderer Wert auf die Prozessüberwachung während der Vergärung zu legen. Aufgrund der berechneten Zusammensetzung der Inputmenge nach VDI 4630 wurden keine pH-Wertmessungen bzw. Probeentnahmen während der Versuchszeit durchgeführt. Der Fermenter wurde während dieser Zeit nicht geöffnet, wodurch ein Sauerstoffeintrag in den Fermenter vermieden wurde.

Folgende Parameter und Tätigkeiten wurden innerhalb der Versuchsreihe festgelegt:

- Laufzeit des Batch-Versuchs
- Sichtprüfung der Batch-Fermenter und Kontrolle des Wasserbades
- Wechseln der Gas auffangbeutel zu einem vorher festgelegten Zeitpunkt
- tägliches Homogenisieren der Inputmenge
- Ermittlung der täglich produzierten Gasmenge über Gasmengenzähler
- Analyse der Gaszusammensetzung
- Gasmenge auf Normzustand umrechnen
- genormte Methangasmenge ermitteln
- Summe der Normvolumina aus Nullprobe ermitteln
- Netto-Gasnormvolumen des Substrates bestimmen
- Netto-Gasausbeute des Substrates bezogen auf die Masse an organischer Trockensubstanz an Substrat im Ansatz ermitteln
- Summe der Normvolumina an CH₄ aus Nullprobe ermitteln

- Netto-Methangasnormvolumen des Substrates bestimmen
- Netto-Methangasausbeute des Substrates bezogen auf die Masse an organischer Trockensubstanz im Substrat im Ansatz ermitteln
- durchschnittlichen Methangehalt berechnen

4.4.2 Kontinuierliche Gärversuche

Bei einer Vergärung von nachwachsenden Rohstoffen und Gülle ist ausreichend Pufferkapazität vorhanden und somit keine Produkthemmung während der Vergärung zu erwarten. Dennoch ist eine Überfütterung mit Substrat während der Vergärung zu vermeiden. Es ist daher auf den pH-Wert bei der Prozessüberwachung während der Vergärung zu achten. Der Fermenter wurde während dieser Zeit nicht geöffnet, wodurch ein Sauerstoffeintrag in den Fermenter vermieden wurde.

Folgende Parameter und Tätigkeiten wurden innerhalb der Versuchsreihe festgelegt:

- Ermittlung der Versuchslaufzeit des Gärsubstrates im Fermenter
- Festlegung der Verweilzeit, diese gibt die mittlere Aufenthaltsdauer des Substrates im Fermenter an
- Festlegung der Raumbelastung im Fermenter
- Sichtprüfung und Kontrolle der Fermenter
- Zugabe der entsprechenden täglichen Menge an Grund- bzw. Cosubstrat, bei kontinuierlicher Fermenterfahrweise ist Inputmenge gleich Outputmenge
- Ermittlung der täglich produzierten Gasmenge über Gasmengenzähler
- Analyse der Gaszusammensetzung
- Gasmenge auf Normzustand umrechnen
- genormte Methangasmenge ermitteln
- Gasausbeute des Substrates bezogen auf die Masse an organischer Trockensubstanz im Substrat im Ansatz ermitteln
- Methangasausbeute des Substrates bezogen auf die Masse an organischer Trockensubstanz im Substrat im Ansatz ermitteln
- durchschnittlichen Methangehalt berechnen

5 Diskussion Ergebnisse

Die dargestellten Ergebnisse gliedern sich entsprechend der durchgeführten Untersuchungen in zwei Teile. Im ersten Teil werden die Versuchsergebnisse zum Zerkleinerungsverhalten organischer Materialien vorgestellt. Im zweiten Teil werden die Vergärungsergebnisse der aufgearbeiteten Substratproben im Vergleich zu den unbehandelten Substraten aufgezeigt, wodurch Informationen über die Wirkungen der Zerkleinerung bei der Vergärung gewonnen werden können.

5.1 Optische Substratbewertung

Bei einer ersten optischen Bewertung der einzelnen aufgearbeiteten Substratfraktionen konnte ein positiver Effekt bei allen Aufarbeitungsstufen gegenüber dem Original festgestellt werden. Dies spiegelt sich besonders in den Ergebnissen der Substratanalyse wider. In den folgenden Abbildungen sind die einzelnen Substratfraktionen fotografisch zueinander dargelegt.

Maissilage



Maissilage original



Maissilage original nah



Maissilage Extruder grob



Maissilage Extruder grob nah



Maissilage Extruder fein



Maissilage Extruder fein nah

Abbildung 16: Fotografische Darstellung der Maissilage-Aufarbeitung

Grassilage



Grassilage original



Grassilage original nah



Grassilage Extruder



Grassilage Extruder nah

Abbildung 17: Fotografische Darstellung der Grassilage-Aufarbeitung

Luzernesilage



Luzernesilage original



Luzernesilage original nah



Luzernesilage Extruder fein



Luzernesilage Extruder fein nah

Abbildung 18: Fotografische Darstellung der Luzernesilage-Aufarbeitung

Kleegrassilage



Kleegrassilage original



Kleegrassilage original nah



Kleegrassilage Extruder fein



Kleegrassilage Extruder fein nah

Abbildung 19: Fotografische Darstellung der Kleegrassilage-Aufarbeitung

Moorgrassilage



Moorgras original



Moorgras original nah



Moorgrassilage original



Moorgrassilage original nah



Moorgrassilage Extruder fein



Moorgrassilage Extruder fein nah

Abbildung 20: Fotografische Darstellung der Moorgrassilage Aufarbeitung

Gerste



Gerste original



Gerste Multischroter grob



Gerste Multischroter mittel



Gerste Multischroter fein

Abbildung 21: Fotografische Darstellung der Gerste-Aufarbeitung

Weizen



Weizen original



Weizen Multischroter grob



Weizen Multischroter mittel



Weizen Multischroter fein

Abbildung 22: Fotografische Darstellung der Weizen-Aufarbeitung

Maissilage Häcksler



Maissilage original



Maissilage original nah



Maissilage Häcksler fein



Maissilage Häcksler fein nah

Abbildung 23: Fotografische Darstellung der Maissilage-Zerkleinerung im Häcksler

5.2 Substratanalyse

5.2.1 Maissilage

Bei einer ersten Bewertung der eingescannten Substratfraktionen konnte ein positiver Effekt bei allen Zerkleinerungsstufen gegenüber dem Originalsubstrat festgestellt werden. Besonders gut ist auch der Unterschied zwischen grob und fein zu erkennen. Dies spiegelte sich besonders in den Ergebnissen der Substratanalyse wider. In den folgenden Bildern sind die einzelnen Maissilagefraktionen mittels Scannermethode fotografisch dargelegt.

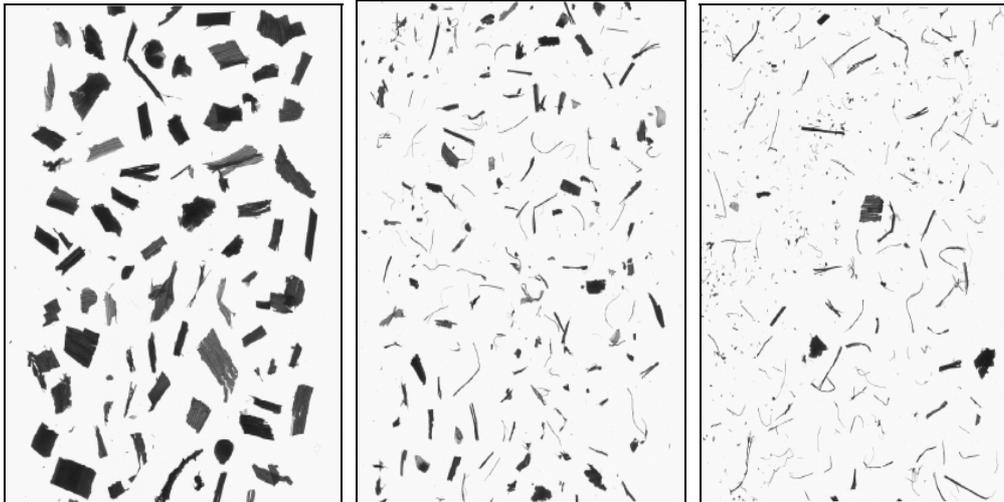


Abbildung 24: Maissilage - original - grob zerkleinert - fein zerkleinert

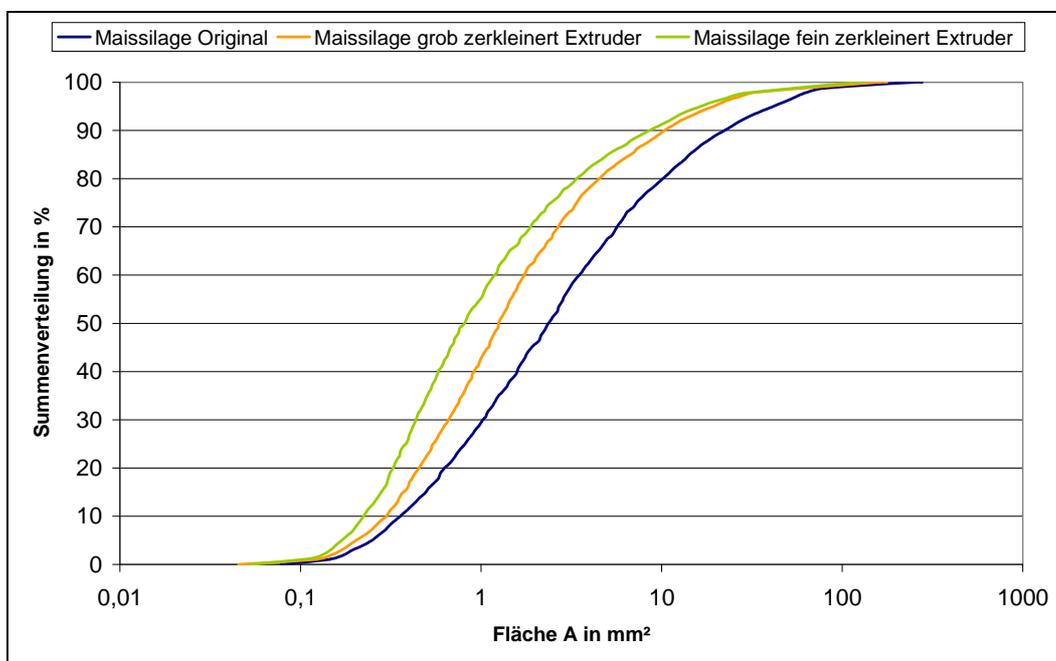


Diagramm 1: Summenverteilung der Fläche von Maissilage



Diagramm 2: Summenverteilung des Umfanges von Maissilage

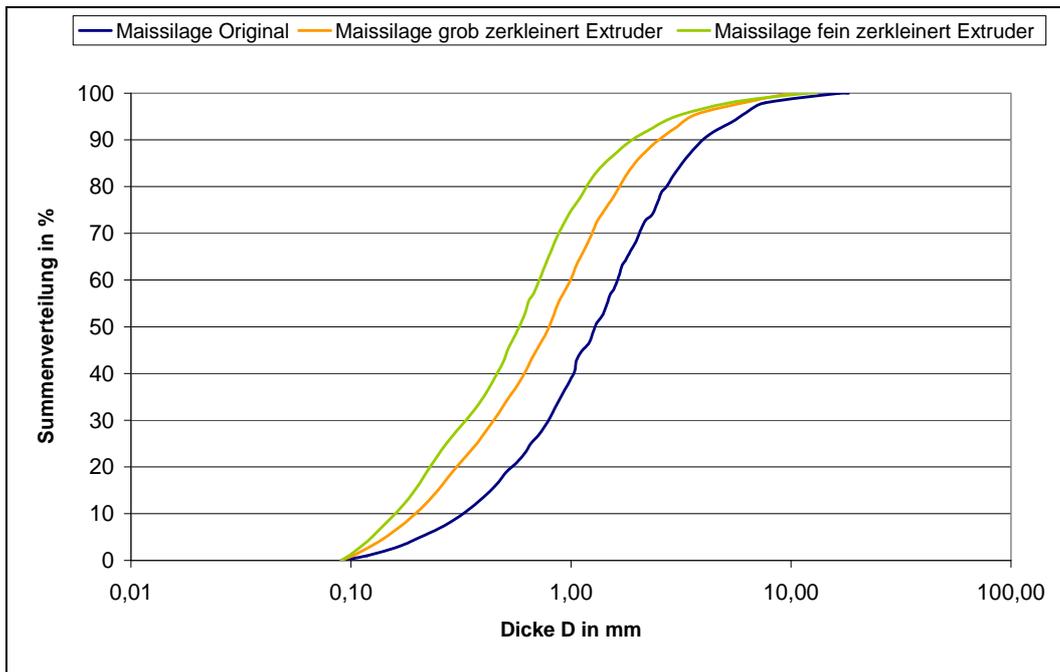


Diagramm 3: Summenverteilung der Dicke von Maissilage



Diagramm 4: Summenverteilung der Länge von Maissilage

Aus den Diagrammen ist deutlich zu erkennen, dass sich durch die Aufarbeitung am Extruder ein positiver Effekt hinsichtlich der Substratzerkleinerung ergibt. Besonders gut ist der Aufarbeitungserfolg im Diagramm 3 zu sehen. Hier ist ein deutlich späterer Abfall der Kurven und somit kleinere Partikel von aufgearbeitetem Substrat gegenüber der Kurve vom Originalsubstrat zu verzeichnen. Dies spiegelt sich auch in den Mittelwerten in Tabelle 2 wider.

Tabelle 2 vermittelt einen Überblick über die gewonnenen Ergebnisse (= Mittelwerte) aus der Substratanalyse der aufgearbeiteten Maissilage. Hierbei konnte der Mittelwert der Fläche um über die Hälfte gegenüber dem Original verringert werden. Auch die Dicke der Partikel konnte durch die Aufarbeitung um die Hälfte verringert werden. Der Partikelumfang wurde um 16 % und die Partikellänge um 10 % gegenüber dem Originalsubstrat verringert. Des Weiteren gibt die volumenbezogene spezifische Oberfläche an, welche Oberfläche ein Kubikmeter eines Pulvers besitzt. Hierbei ist zu erkennen, dass sich der Wert gegenüber dem Originalsubstrat fast verdoppelte (bezogen auf die feine Aufarbeitungsstufe) und somit eine größere Substratoberfläche den Bakterien zur Verfügung gestellt wurde.

Tabelle 2: Übersicht der Zerkleinerung von Maissilage in Bezug auf Fläche, Umfang, Dicke, Länge und volumenbezogene spezifische Oberfläche

Substrate	Fläche in mm ² A _{MW}	Umfang in mm U _{MW}	Dicke in mm D _{MW}	Länge in mm L _{MW}	volumenbez. spez. Oberfläche 1/mm
Maissilage original	8,68	11,18	1,88	4,49	1,80
Maissilage grob zerkleinert im Extruder	4,28	9,57	1,15	4,05	2,59
Maissilage fein zerkleinert im Extruder	3,57	9,38	0,90	4,10	2,83

Durch den Zerkleinerungserfolg kann von einer besseren Bioverfügbarkeit gegenüber dem Originalsubstrat ausgegangen werden, was sich auch in den späteren Gärversuchen widerspiegelt.

5.2.2 Grassilage

Bei der Aufarbeitung der Grassilage wurde ebenfalls ein positives Ergebnis erreicht, wobei aber die Unterschiede zwischen grob und fein nicht so deutlich wie bei der Maissilage zu erkennen sind. Dies spiegelt sich besonders in den Ergebnissen der Substratanalyse wider. In der Abbildung 25 sind die einzelnen Grassilagefraktionen fotografisch dargestellt.

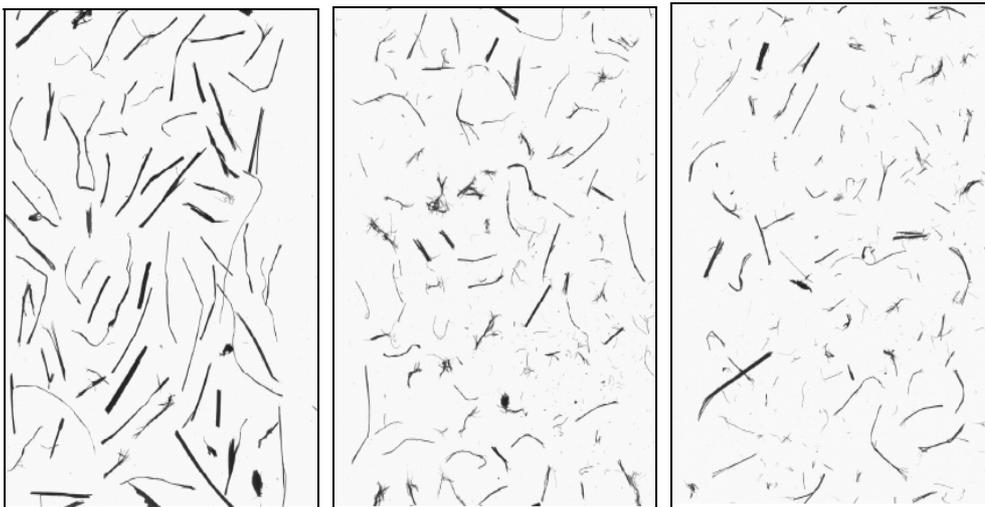


Abbildung 25: Grassilage - original - grob zerkleinert - fein zerkleinert

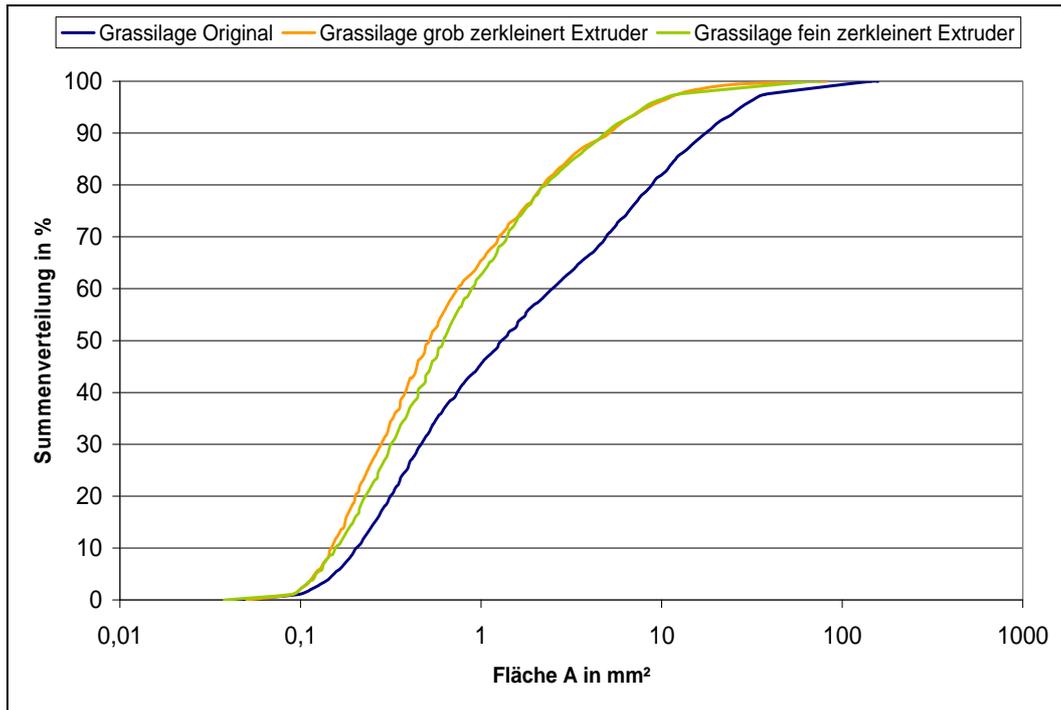


Diagramm 5: Summenverteilung der Fläche von Grassilage

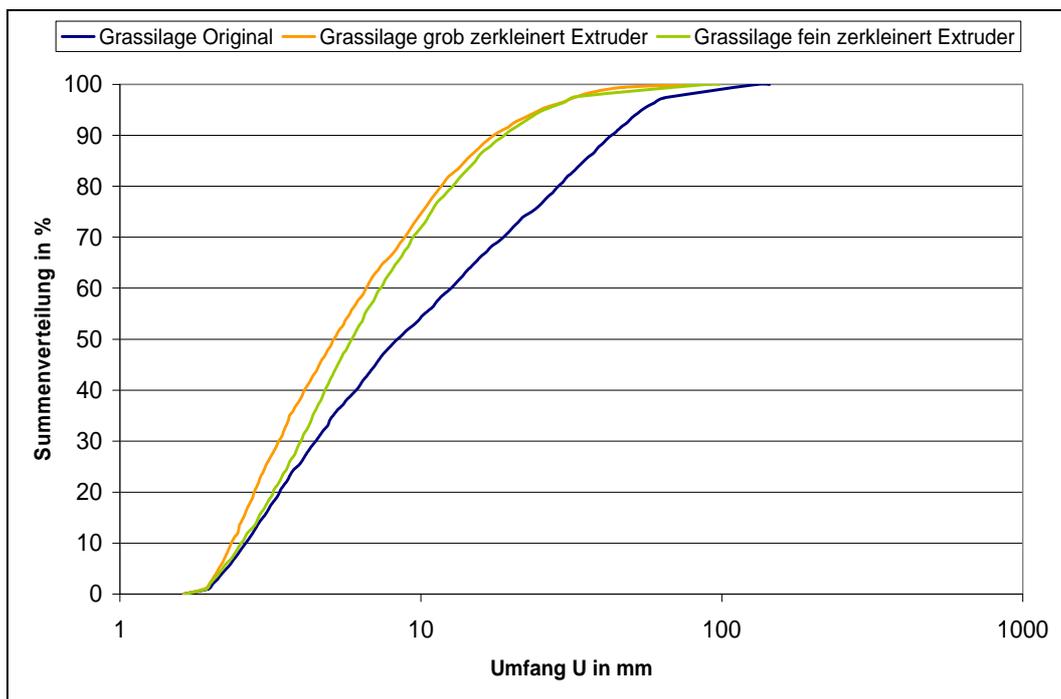


Diagramm 6: Summenverteilung des Umfanges von Grassilage

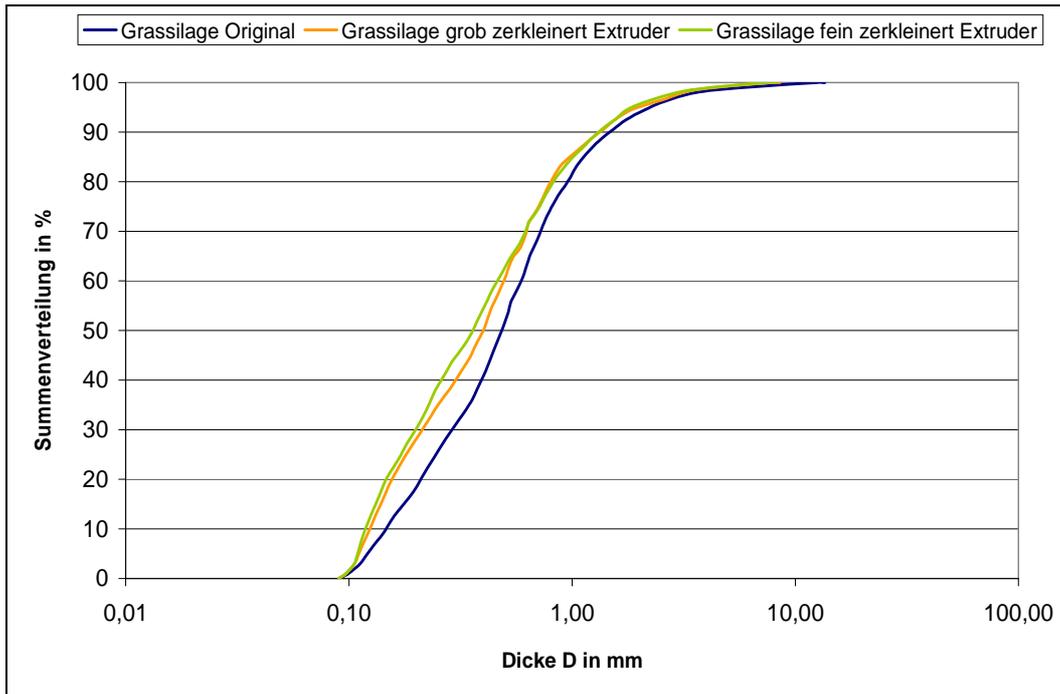


Diagramm 7: Summenverteilung der Dicke von Grassilage

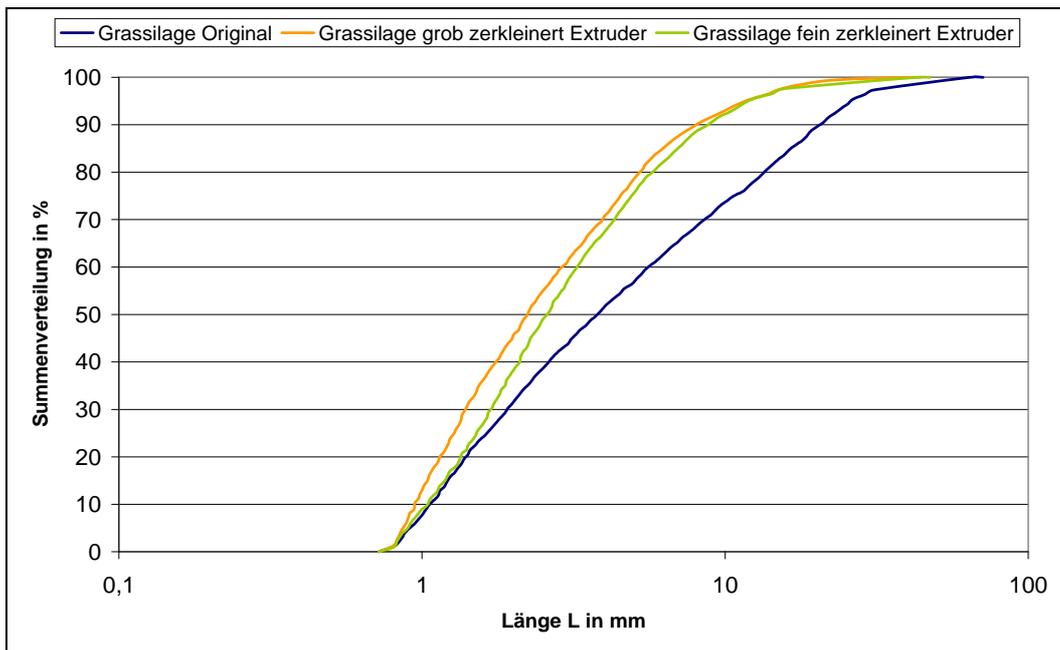


Diagramm 8: Summenverteilung der Länge von Grassilage

Aus den Diagrammen 5 bis 8 ist sehr gut zu erkennen, dass durch die Aufarbeitung am Extruder ein positiver Effekt hinsichtlich der Substratzerkleinerung erzielt wurde, wobei es zwischen der Aufarbeitungsstufe grob und fein zu keinen großen Unterschieden kam. Dies spiegelt sich auch in den Mittelwerten in Tabelle 3 wider. In den Diagrammen 5 und 7 liegen die Kurven für grob und fein aufeinander bzw. eng nebeneinander. Ebenfalls ist in den Diagrammen 5, 6 und 8 deutlich zu sehen, dass verhältnismäßig mehr größere Partikel als kleinere Partikel aufgearbeitet wurden. Bei der Partikeldicke (Diagramm 7) kam es zu keiner großen Veränderung. Die Tabelle 3 vermittelt einen Überblick über die Ergebnisse aus der Substratanalyse der aufgearbeiteten Grassilage, ausgewiesen als Mittelwerte. Die Fläche konnte um 70 % gegenüber dem Original verringert werden. Auch der Wert von Umfang und Länge der Partikel wurde durch die Aufarbeitung um die Hälfte gesenkt. Die Partikeldicke verringerte sich um 16 % gegenüber dem Originalsubstrat.

Des Weiteren wird die volumenbezogene spezifische Oberfläche in Tabelle 3 angegeben. Hierbei ist zu erkennen, dass sich der Wert gegenüber dem Originalsubstrat fast verdoppelt hat (bezogen auf die Aufarbeitungsstufen) und somit eine größere Substratoberfläche den Bakterien zur Verfügung gestellt wurde.

Tabelle 3: Übersicht der Zerkleinerung von Grassilage im Bezug auf Fläche, Umfang, Dicke, Länge und volumenbezogene spezifische Oberfläche

Substrate	Fläche in mm ² A _{MW}	Umfang in mm U _{MW}	Dicke in mm D _{MW}	Länge in mm L _{MW}	volumenbez. spez. Oberfläche 1/mm
Grassilage original	6,10	16,45	0,72	7,66	2,16
Grassilage grob zerkleinert im Extruder	1,94	8,23	0,61	3,69	3,79
Grassilage fein zerkleinert im Extruder	1,95	8,85	0,59	4,01	3,79

Diese verbesserte Bioverfügbarkeit spiegelt sich auch in den späteren Ergebnissen der Gärversuche wider.

5.2.3 Futterreste

Bei der Aufarbeitung der Futterreste wurde bei einem ersten optischen Bewerten kein zufriedenstellendes Ergebnis erreicht. In der Abbildung 26 sind die beiden Futterrestfraktionen fotografisch dargestellt. Dies ist ebenfalls an den Ergebnissen (Tabelle 4) der Substratanalyse zu erkennen.

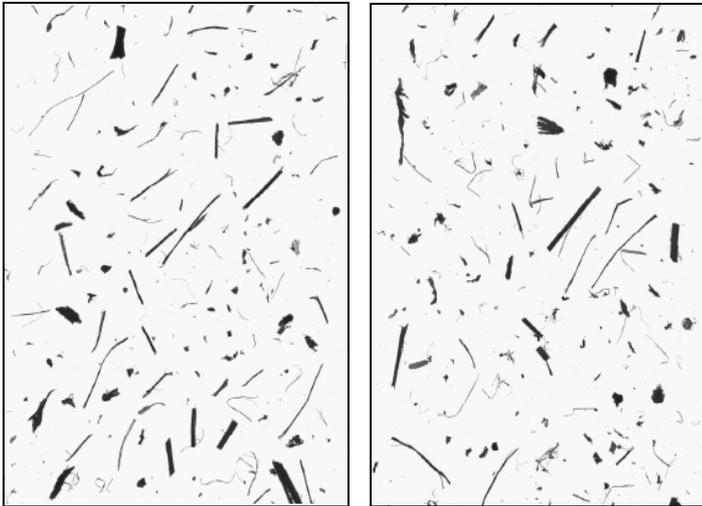


Abbildung 26: Futterreste im Original sowie fein zerkleinert

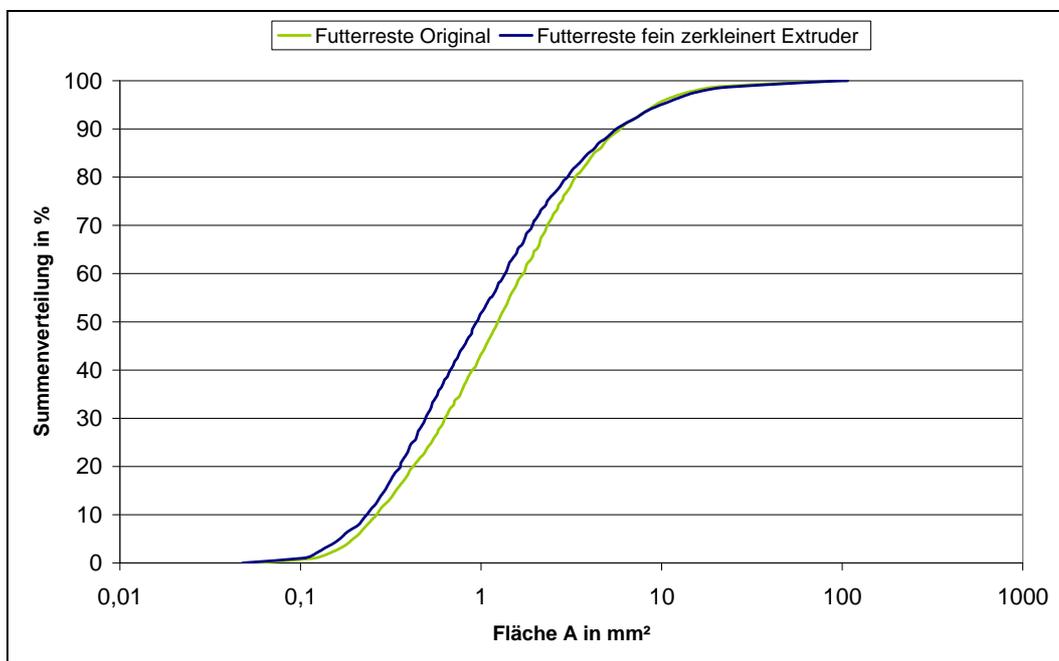


Diagramm 9: Summenverteilung der Fläche von Futterresten

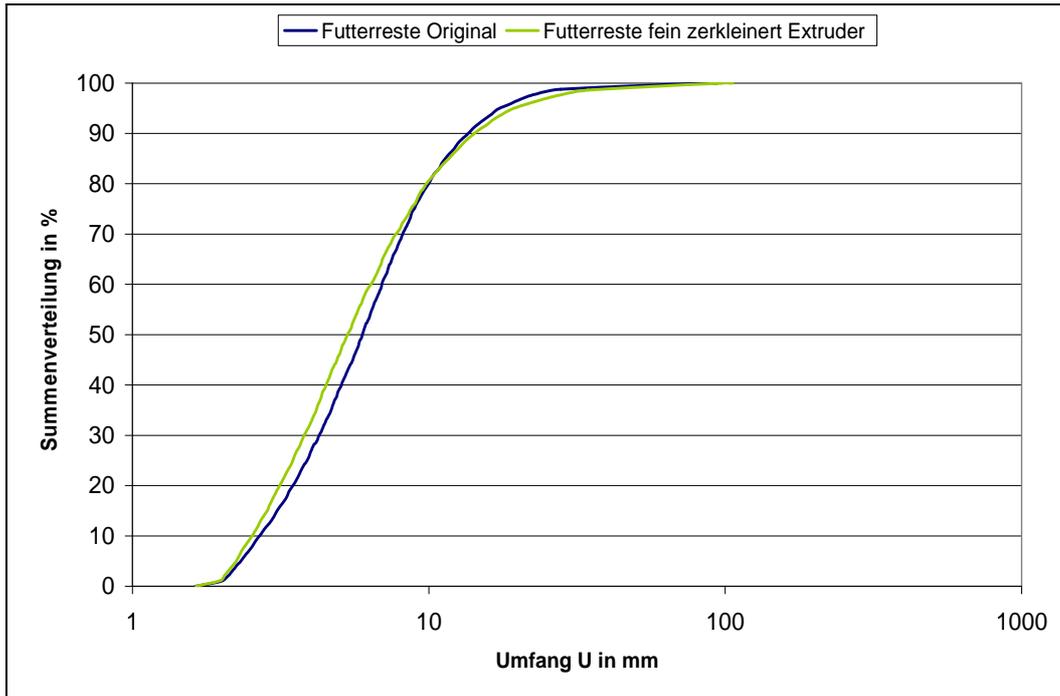


Diagramm 10: Summenverteilung des Umfanges von Futterresten

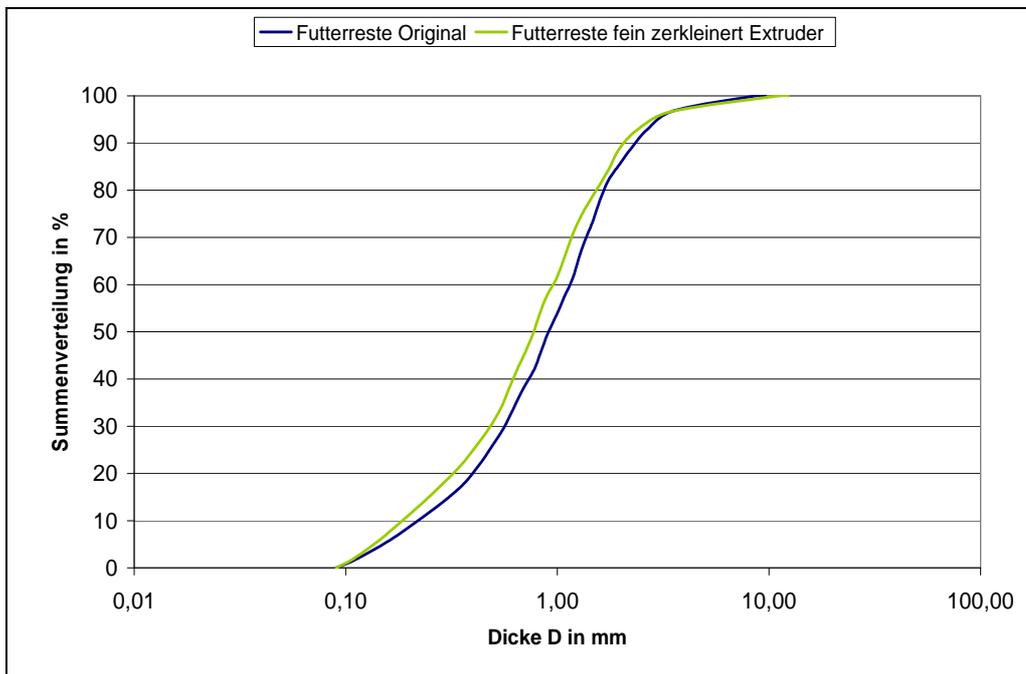


Diagramm 11: Summenverteilung der Dicke von Futterresten

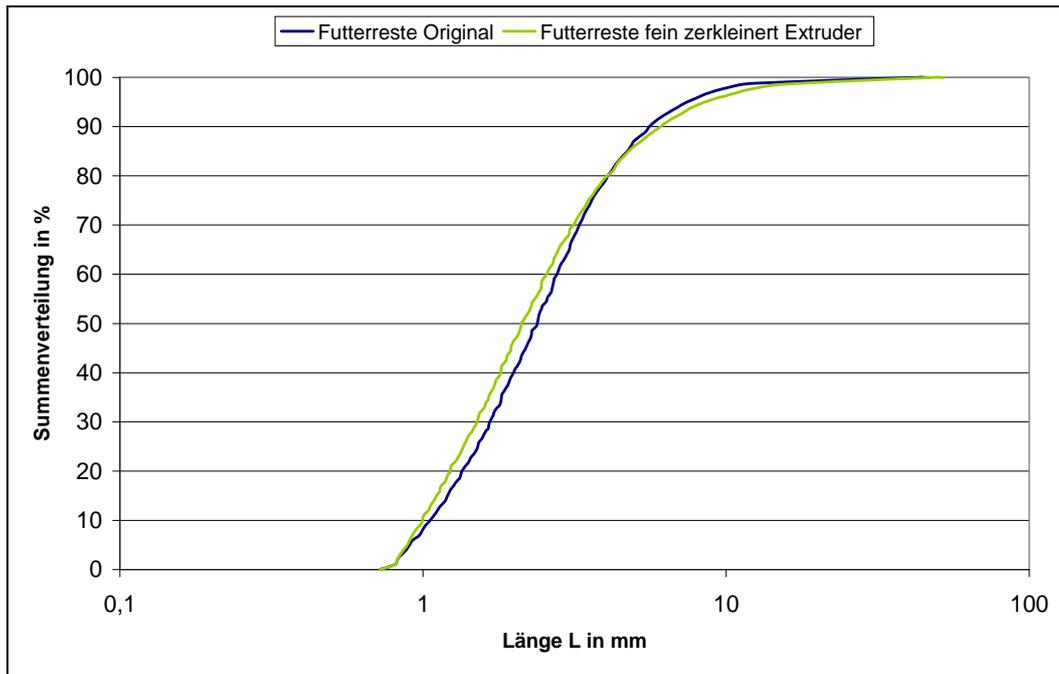


Diagramm 12: Summenverteilung der Länge von Futterresten

Aus den Diagrammen 9 bis 12 ist zu erkennen, dass durch die Aufarbeitung am Extruder ein positiver Effekt hinsichtlich der Substratzerkleinerung erzielt wurde. Der Unterschied zwischen Originalsubstrat und der Aufarbeitungsstufe ist jedoch nicht so groß wie bei den vorherigen Substraten Mais- und Grassilage. Diese Ergebnisse sind auch Tabelle 4 zu entnehmen.

Tabelle 4 vermittelt einen Überblick über die gewonnenen Erkenntnisse aus der Substratanalyse der aufgearbeiteten Futterreste. Bei den dargestellten Mittelwerten aus Original und aufgearbeiteter Form zeigen sich keine großen Unterschiede. Sie bleiben nahezu unverändert zueinander. Ebenso zeigen dies die Werte der volumenbezogenen spezifischen Oberfläche. Hierbei ist zu erkennen, dass sich der Wert gegenüber dem Originalsubstrat nur geringfügig vergrößerte und somit auch nur eine geringfügig größere Substratoberfläche den Bakterien zur Verfügung gestellt wurde. Dieser geringe Unterschied zeigt sich auch bei den späteren Gärversuchen.

Tabelle 4: Übersicht der Zerkleinerung von Futterresten in Bezug auf Fläche, Umfang, Dicke, Länge und volumenbezogene spezifischer Oberfläche

Substrate	Fläche in mm ² A _{MW}	Umfang in mm U _{MW}	Dicke in mm D _{MW}	Länge in mm L _{MW}	volumenbez. spez. Oberfläche 1/mm
Futterreste original	2,66	7,44	1,14	3,04	3,26
Futterreste fein zerkleinert im Extruder	2,58	7,47	1,03	3,11	3,33

5.2.4 Gerste

Die veränderte Partikelgrößenverteilung bei der Aufarbeitung wurde mittels einer Siebanalyse näher bestimmt. Unter einer Korngrößenverteilung versteht man den Zusammenhang zwischen der Menge, mit der eine bestimmte Korngröße oder Kornklasse vorhanden ist und der Größe selbst. Die Verteilungssumme ist immer die auf die Gesamtmenge bezogene Menge aller Teilchen mit Korngrößen kleiner und gleich der jeweiligen betrachteten Korngröße. Sie ist damit immer eine relative Zahl, d.h. dimensionslos. Je nach dem angewendeten Messverfahren erhält man diese Werte sofort oder muss sie wie bei der Siebanalyse aus den Messwerten ermitteln.

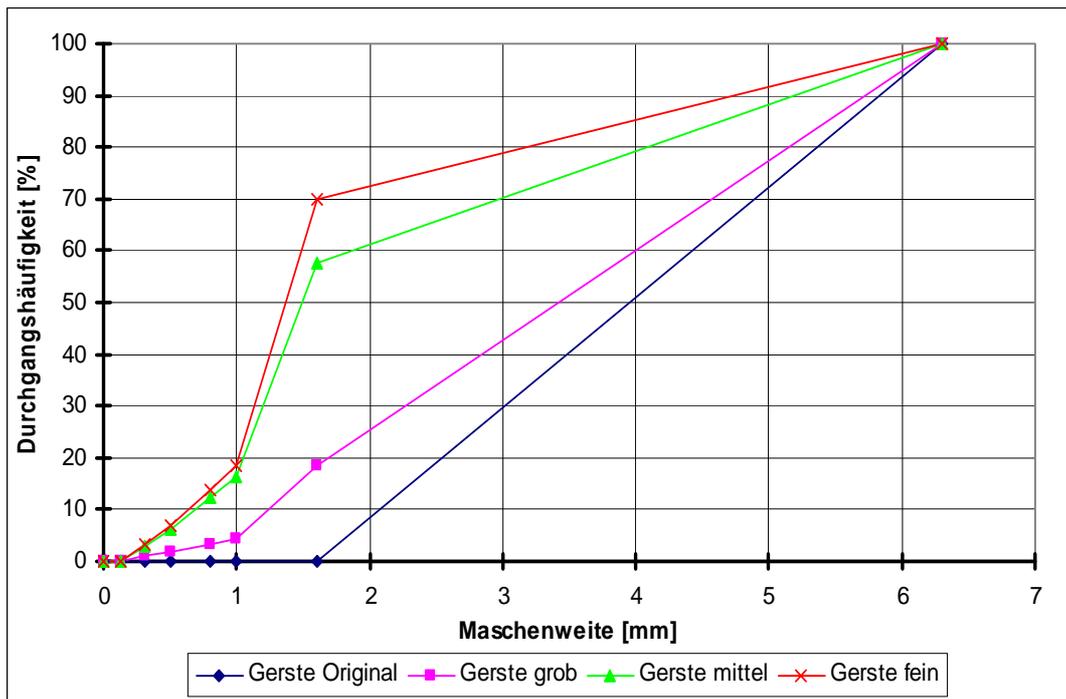


Diagramm 13: Ergebnisse der Durchgangshäufigkeit aus Siebung von aufgearbeiteter Gerste im Multischroter

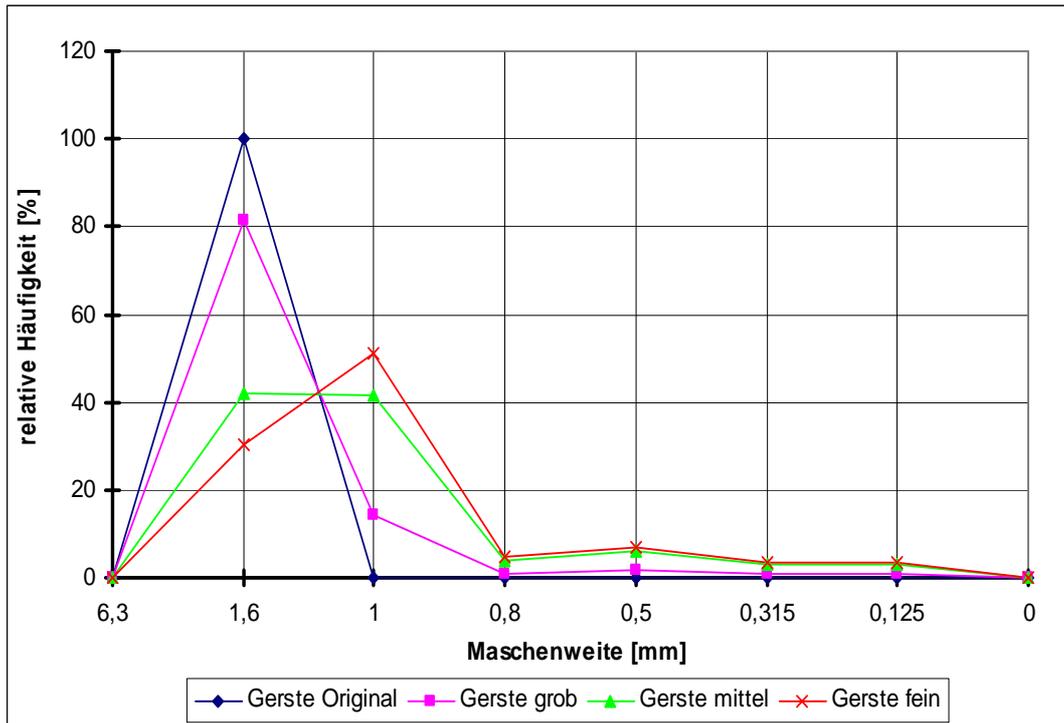


Diagramm 14: Ergebnisse der relativen Häufigkeit aus Siebung von aufgearbeiteter Gerste im Multischroter

Die nachfolgende Tabelle 5 vermittelt an Hand der Mittelwerte einen Überblick über die gewonnenen Erkenntnisse aus der Siebanalyse Gerste.

Tabelle 5: Zusammenfassung der Ergebnisse aus der Siebanalyse Gerste

Substrate	mittlere Partikelgröße [mm]	häufigste Partikelgröße [mm]	volumenbez. spez. Oberfläche [1/mm]
Gerste original	4,00	1,6	1,5
Gerste grob	3,40	1,6	1,76
Gerste mittel	1,50	1,6 – 1,0	4,0
Gerste fein	1,35	1,3 – 0,9	4,44

Durch die unterschiedlichen Aufarbeitungsschritte am Multischroter konnte die mittlere Partikelgröße von Gerste stufenweise von 4,0 mm auf bis zu 1,35 mm verringert werden. Zwischen den beiden Aufarbeitungsstufen mittel und fein kam es zu keinen großen Unterschieden in der mittleren Partikelgröße wie auch in der Häufigkeit der Partikel. Des Weiteren wird die volumenbezogene spezifischer Oberfläche in Tabelle 5 angegeben. Hierbei ist zu erkennen, dass sich der Wert gegenüber dem Originalsubstrat fast verdreifachte (bezogen auf die Aufarbeitungsstufen) und somit eine größere Substratoberfläche den Bakterien zur Verfügung gestellt wurde.

5.2.5 Weizen

Die veränderte Partikelgrößenverteilung bei der Aufarbeitung von Weizen wurde ebenfalls mittels einer Siebanalyse näher bestimmt. Die Ergebnisse dieser Analyse werden in den Diagrammen 15 und 16 dargestellt.

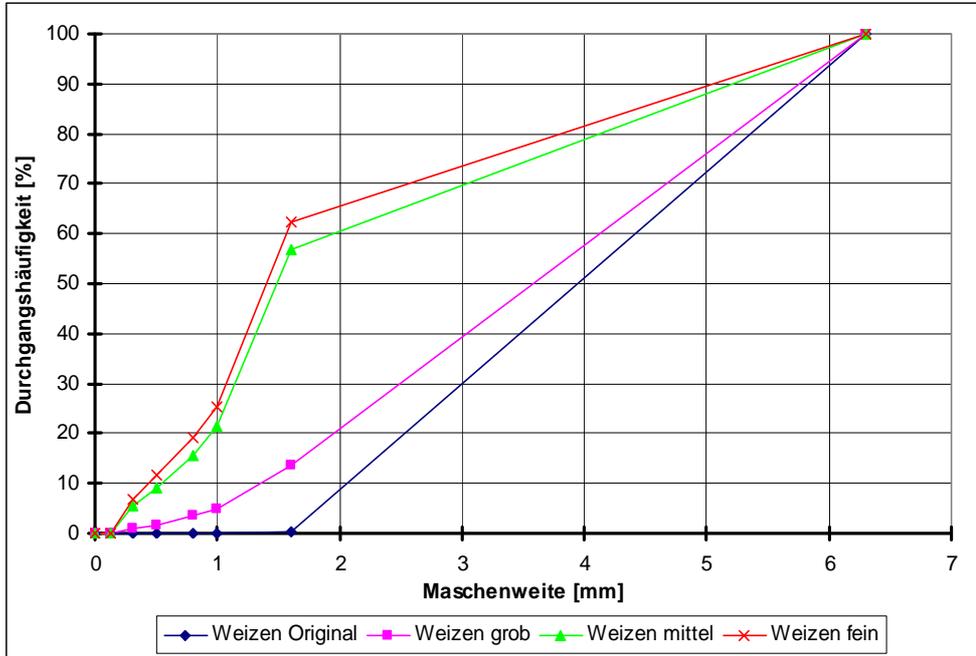


Diagramm 15: Ergebnisse der Durchgangshäufigkeit aus Siebung von aufgearbeitetem Weizen im Multischroter

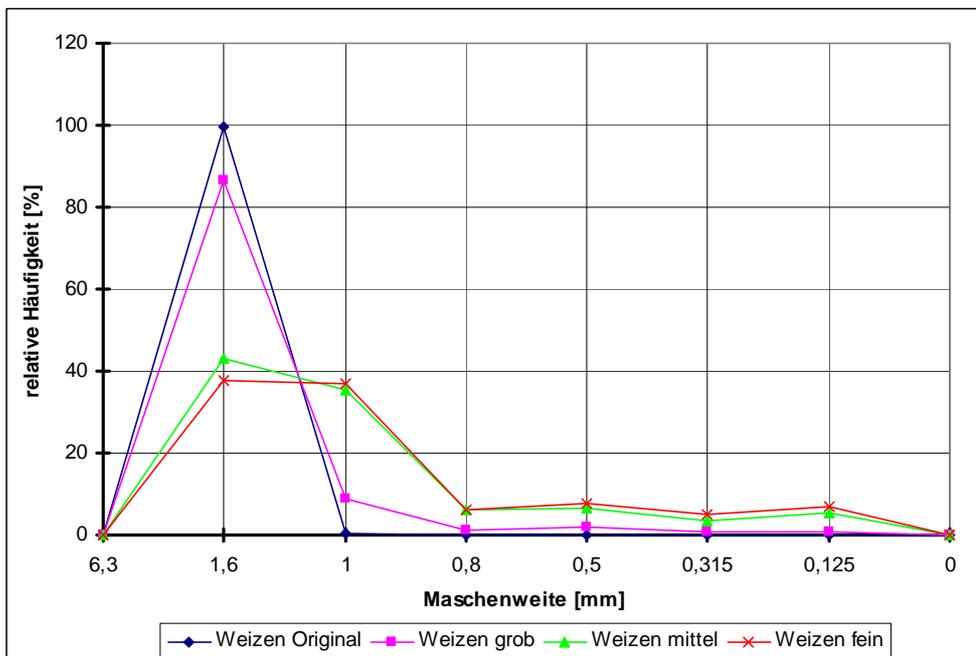


Diagramm 16: Ergebnisse der relativen Häufigkeit aus Siebung von aufgearbeitetem Weizen im Multischroter

Die nachfolgende Tabelle 6 vermittelt einen Überblick über die gewonnenen Erkenntnisse aus der Siebanalyse Weizen.

Tabelle 6: Zusammenfassung der Ergebnisse aus der Siebanalyse Weizen

Substrate	mittlere Partikelgröße [mm]	häufigste Partikelgröße [mm]	volumenbez. spez. Oberfläche [1/mm]
Weizen original	3,90	1,6	1,54
Weizen grob	3,60	1,6	1,67
Weizen mittel	1,50	1,6 – 1,0	4,0
Weizen fein	1,40	1,6 – 0,9	4,29

Durch die unterschiedlichen Aufarbeitungsschritte am Multischroter konnte die mittlere Partikelgröße von Gerste stufenweise von 3,9 auf bis zu 1,40 mm verringert werden. Zwischen den beiden Aufarbeitungsstufen mittel und fein kam es zu keinen größeren Unterschieden in der mittleren Partikelgröße wie auch in der Häufigkeit der Partikel. Ebenso zeigen dies die Werte der volumenbezogenen spezifischen Oberfläche. Hierbei ist zu erkennen, dass sich der Wert gegenüber dem Originalsubstrat fast verdreifachte und somit auch eine größere Substratoberfläche den Bakterien zur Verfügung steht. Dies spiegelt sich auch in den späteren Gärversuchen wider.

5.2.6 Maissilage Häcksler

Die veränderte Partikelgrößenverteilung bei der Erntetechnik Häcksler wurde mittels einer Siebanalyse näher bestimmt. Die Ergebnisse dieser Analyse werden in den Diagrammen 17 und 18 dargestellt.

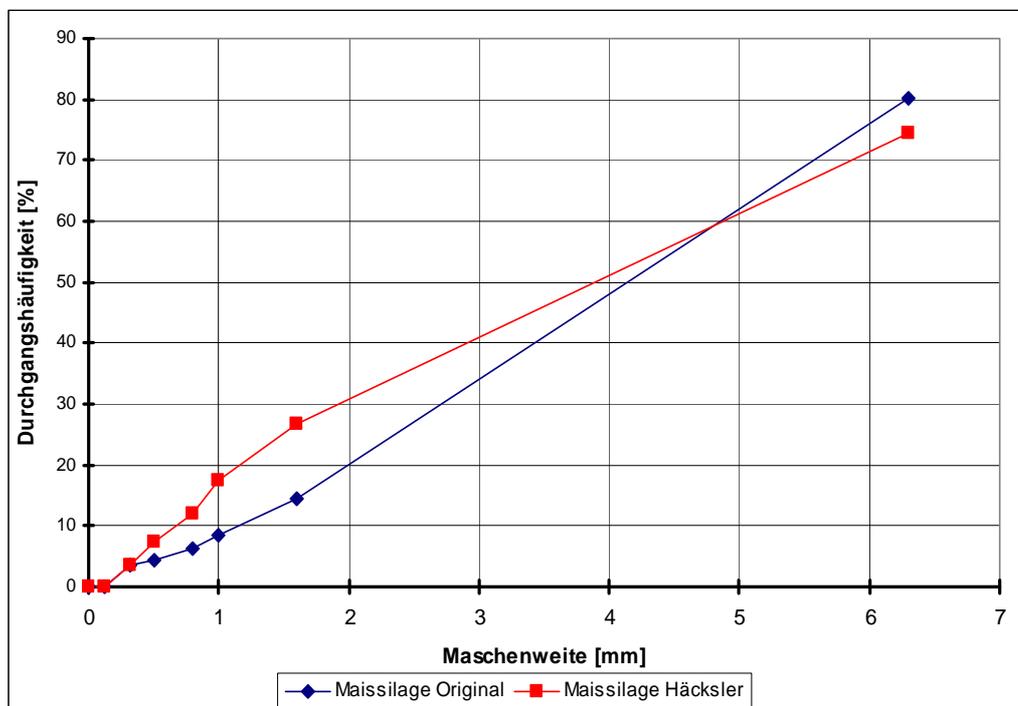


Diagramm 17: Ergebnisse der Durchgangshäufigkeit aus Siebung von Maissilage im Häcksler

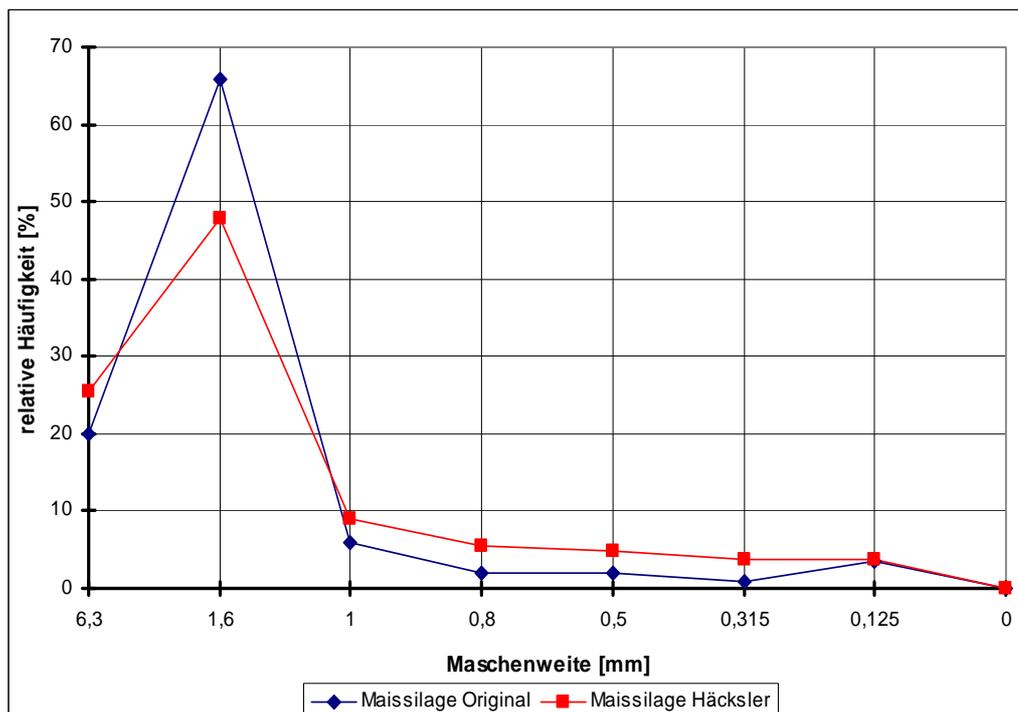


Diagramm 18: Ergebnisse der relativen Häufigkeit aus Siebung von Maissilage im Häcksler

Die nachfolgende Tabelle 7 vermittelt einen Überblick über die gewonnenen Erkenntnisse aus der Siebanalyse Maissilage Häcksler.

Tabelle 7: Zusammenfassung der Ergebnisse aus der Siebanalyse Maissilage

Substrate	mittlere Partikelgröße [mm]	häufigste Partikelgröße [mm]	volumenbez. spez. Oberfläche [1/mm]
Maissilage original	4,15	6,3 – 1,0	1,45
Maissilage Häcksler	3,90	6,3 – 1,0	1,54

Durch die unterschiedliche Erntetechnik konnte die mittlere Partikelgröße von Maissilage stufenweise von 4,15 auf bis zu 3,90 mm verringert werden. Ebenso zeigen dies die Werte der volumenbezogenen spezifischen Oberfläche in Tabelle 7. Hierbei ist zu erkennen, dass sich der Wert gegenüber dem Originalsubstrat nur geringfügig vergrößerte und somit auch nur eine geringfügig größere Substratoberfläche den Bakterien zur Verfügung gestellt wurde.

5.3 Ergebnisse der Gärversuche aus mechanischer Substrataufarbeitung

5.3.1 Maissilage Original/Extruder

Im durchgeführten Batch-Versuch wurde Maissilage aus einem Landwirtschaftsbetrieb aus dem Vogtland untersucht. Vor jedem Versuchsbeginn wurden die TS- bzw. oTS-Werte für die Berechnung des Input-Materials ermittelt (Tabelle 8).

Tabelle 8: TS- und oTS-Werte des Impfschlammes und der aufgearbeiteten Substrate

Material	TS [%]	oTS der TS [%]
Impfschlamm	3,04	58,5
Maissilage original	39,63	95,85
Maissilage Extruder grob	32,56	94,77
Maissilage Extruder fein	35,81	94,76

Die Ermittlung der pH-Werte aus Impfschlamm und Substrat (Tabelle 9) zeigt, dass der Verlauf der Versuche im neutralen Bereich ablief und somit keine Prozesshemmung stattfand.

Tabelle 9: pH-Werte vom Gärversuch Ansatz und Abbruch

Material	pH-Wert Ansatz	pH-Wert Abbruch
Impfschlamm	7,85	7,42
Maissilage original	7,85	7,24
Maissilage Extruder grob	7,85	7,22
Maissilage Extruder fein	7,85	7,23

Zunächst werden die Auswirkungen der Aufarbeitung exemplarisch anhand der Biogas- bzw. Methangasbildung von Maissilage näher betrachtet (Diagramme 19 und 20).

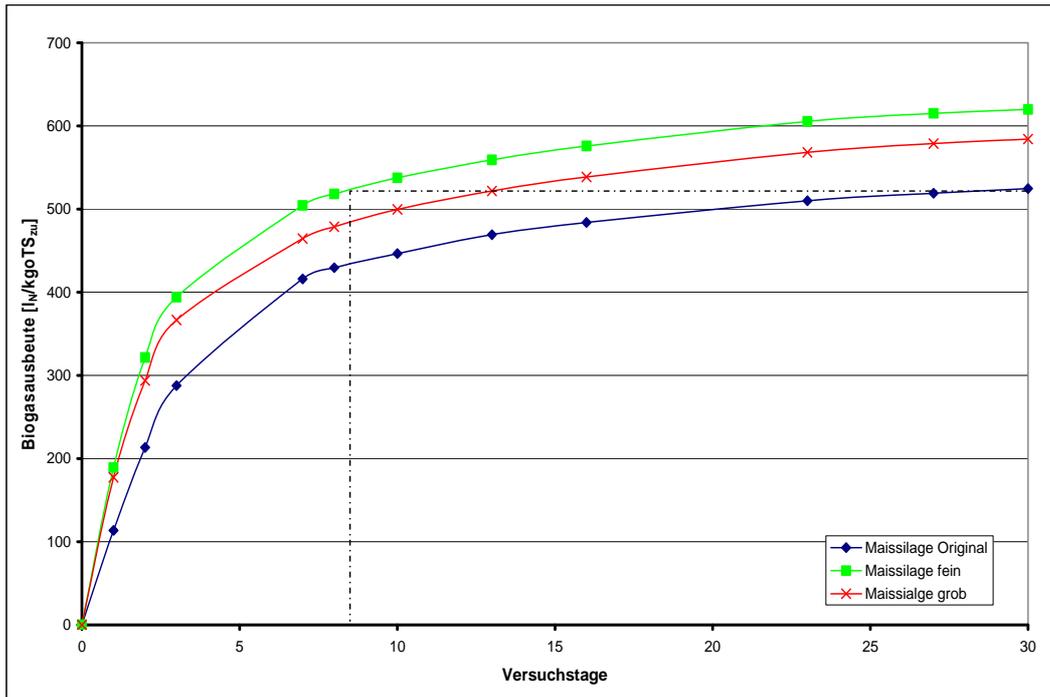


Diagramm 19: Biogasausbeute der Maissilage-Vergärung nach unterschiedlicher Aufarbeitung

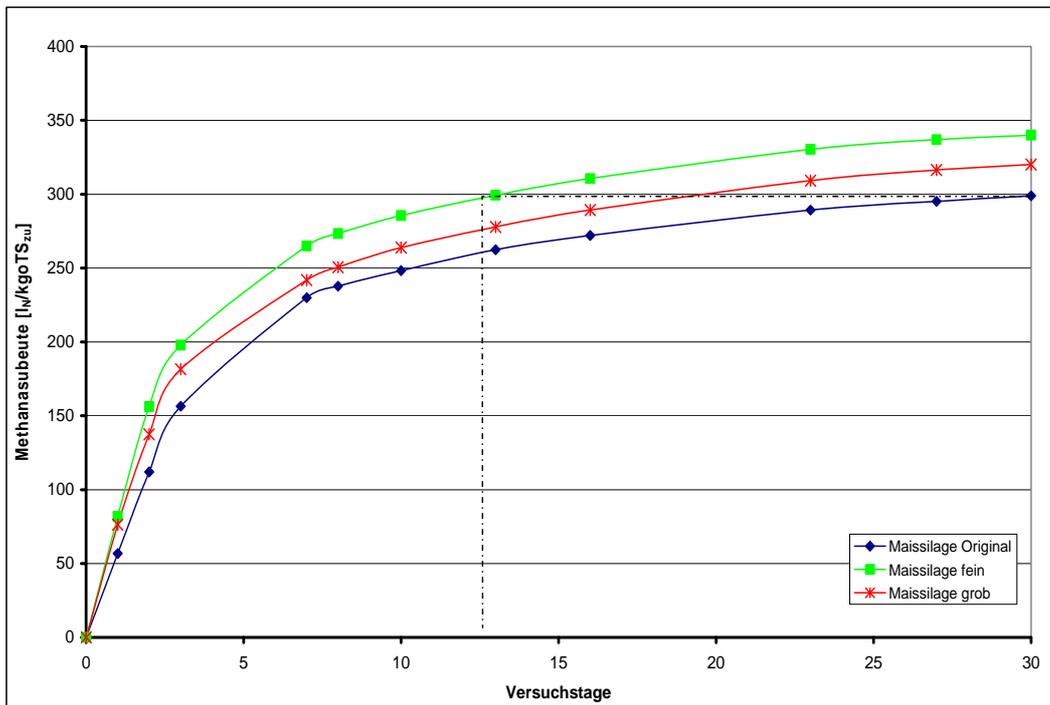


Diagramm 20: Methanausbeute der Maissilage-Vergärung nach unterschiedlicher Aufarbeitung

Wie in den Diagrammen 19 und 20 veranschaulicht wird, kam es durch die Aufarbeitung des Substrates zu einer nennenswerten Steigerung der Biogasausbeute. Des Weiteren wirkte sich die Aufarbeitung des Substrates auf den zeitlichen Verlauf der Biogasproduktion aus. Es ist ein deutlich schnellerer Anstieg der Biogasausbeute bei den zerkleinerten Proben zu verzeichnen.

Gut veranschaulicht wird ebenfalls, dass die Aufarbeitung der Maissilage am Extruder einen längeren exponentiellen Verlauf der Kurve aufweist. Es kommt schneller zu einer höheren Ausbeute gegenüber dem Original in gleicher Zeit. Diese Abbaubeschleunigung führte dazu, dass bereits ab dem 8. von 30 Versuchstagen der Endwert von Maissilage Original durch die Aufarbeitung Extruder fein erreicht wurde (Diagramm 19). Daraus kann man schließen, dass bei besserer Aufarbeitung der Substrate gegenüber dem Original eine höhere Biogasausbeute erzielt wird. Durch die Zerkleinerung wurden organische Stoffe den Bakterien günstiger zur Verfügung gestellt, indem die Angriffsfläche der Partikel vergrößert bzw. organische Stoffe freigesetzt wurden. Dies ist anschaulich aus den Werten der Substratanalyse zu erkennen. Je kleiner die Partikelgröße, desto größer die spezifische Oberfläche und umso besser ist der Verlauf der Vergärung bzw. höher die Ausbeute (Tabelle 2).

Aus den Diagrammen ist ebenfalls ersichtlich, dass innerhalb der Versuchsdauer von 30 Tagen keine vollständige Ausfäulung des Gärsubstrates erreicht wurde und somit das Maximum der Biogasausbeute Maissilage noch nicht festliegt.

Eine Hemmung der Gärprozesse bei allen Kurven ist auf Grundlage des Kurvenverlaufes und des stabilen pH-Wertes bei Versuchsbeginn und Versuchsende (Tabelle 9) auszuschließen.

Auswertung der Gärversuche

Die berechneten Parameter für die Vergärung der Maissilage ist in Tabelle 10 zusammengefasst.

Tabelle 10: Berechnete Parameter der Maissilage-Vergärungsversuche, Extruder Aufarbeitung

Parameter	Dimension	Maissilage Original Mittelwert	Maissilage Extruder grob/MW	Änderung	Maissilage Extruder fein/MW	Änderung
Biogasausbeute	$l_N/kg \text{ oTS}_{zu}$	524,8	568,3	8%	619,9	18%
Methanausbeute	$l_N/kg \text{ oTS}_{zu}$	298,9	320,1	7%	340,0	14%
Methangehalt	Vol.%	56,9	54,8	- 3,7%	54,8	- 3,7%

Die Versuchsergebnisse der aufgearbeiteten Maissilage zeigen, dass sich der durchschnittliche Methangehalt bei allen Versuchsansätzen gegenüber dem Originalsubstrat geringfügig verringerte. Dadurch fällt die Änderung der Biogasausbeute höher aus als die der Methanausbeute.

In den Diagrammen 21 und 22 ist deutlich die Steigerung der Biogasausbeute und der Methanausbeute durch die Aufarbeitung der Substrate zu erkennen. Der Verlauf der Biogasausbeute und die in Tabelle 10 dargelegten Werte bezüglich der gesamten Biogasausbeute bestätigen eindeutig, dass durch eine Aufarbeitung der Maissilage die Gasproduktion erhöht werden kann.

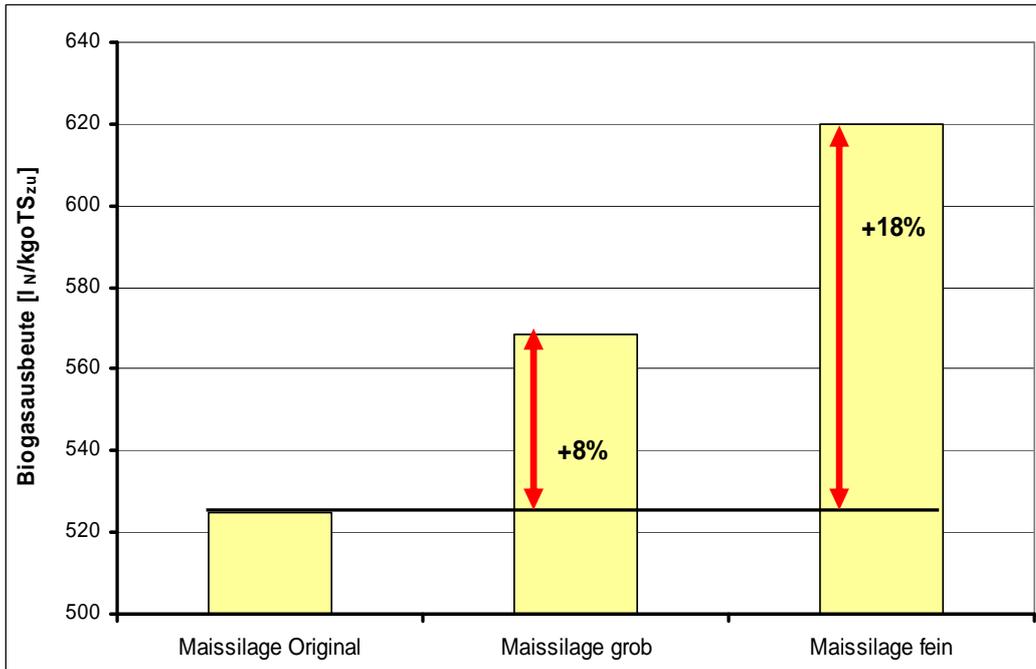


Diagramm 21: Biogasausbeuten der Maissilagevergärung im Batch-Versuch nach 30 Tagen

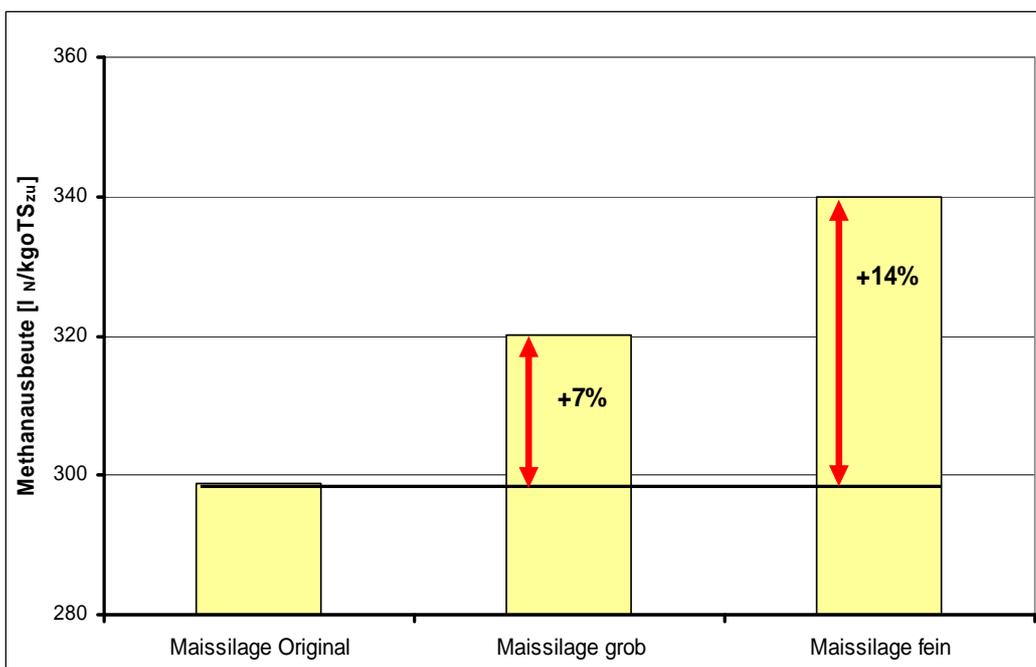


Diagramm 22: Methangasausbeuten der Maissilagevergärung im Batch-Versuch nach 30 Tagen

5.3.2 Grassilage Original/Extruder

Im durchgeführten Batch-Versuch wurde Grassilage eines Landwirtschaftsbetriebes aus dem Vogtland untersucht. Vor dem Versuchsbeginn wurden ebenfalls die TS- bzw. oTS-Werte für die Berechnung des Input-Materials ermittelt.

Tabelle 11: TS und oTS-Werte des Impfschlammes und der aufgearbeiteten Substrate

Material	TS [%]	oTS der TS [%]
Impfschlamm	3,04	58,5
Grassilage original	35,44	89,66
Grassilage Extruder grob	35,83	88,48
Grassilage Extruder fein	35,37	88,17

Aus den ermittelten pH-Werten lässt sich die Stabilität eines Prozesses ablesen. Die pH-Werte aus Tabelle 12 zeigen, dass der Verlauf der Versuche im neutralen Bereich ablief und somit keine Prozesshemmung stattfand.

Tabelle 12: pH-Werte vom Gärversuch Ansatz und Abbruch

Material	pH-Wert Ansatz	pH-Wert Abbruch
Impfschlamm	7,85	7,42
Grassilage original	7,85	7,28
Grassilage Extruder grob	7,85	7,21
Grassilage Extruder fein	7,85	7,21

Nunmehr soll der Einfluss der Grassilageaufarbeitung auf die Biogas- bzw. Methangasbildung betrachtet werden.

Die Diagramme 23 und 24 zeigen den zeitlichen Verlauf der Gasausbeute als Summenkurve. Auch hier zeigt sich ein ähnlich positiver Effekt der Aufarbeitung wie bei der Vergärung von aufgearbeiteter Maissilage, wobei die einzelnen Kurven, anders als beim Substrat Maissilage, weiter auseinander liegen.

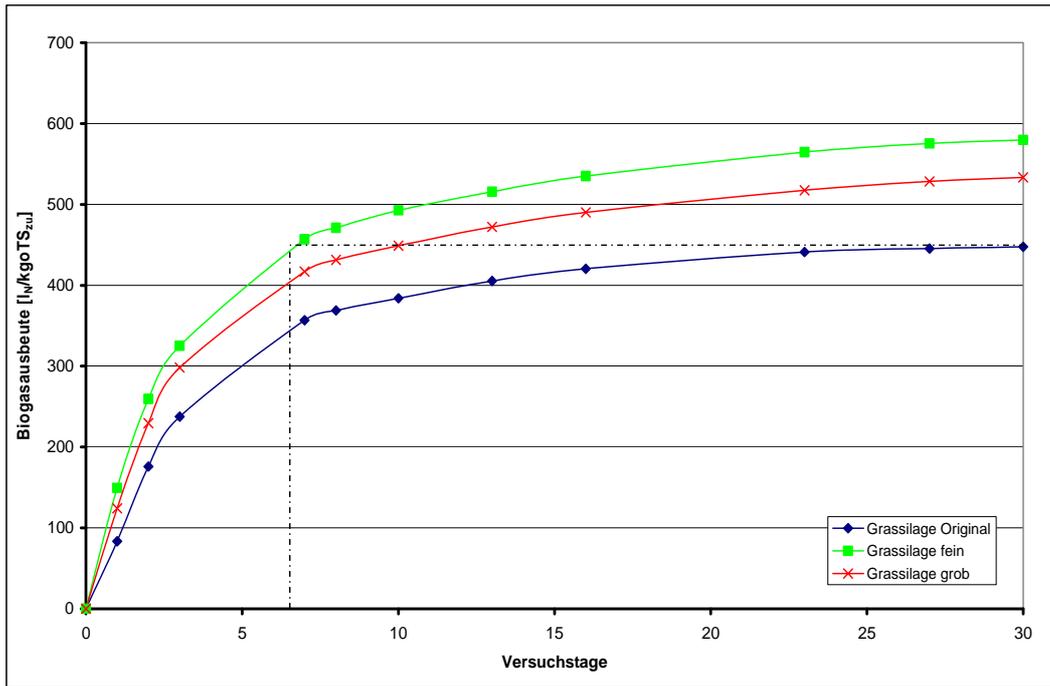


Diagramm 23: Biogasausbeute der Grassilage-Vergärung nach unterschiedlicher Aufarbeitung

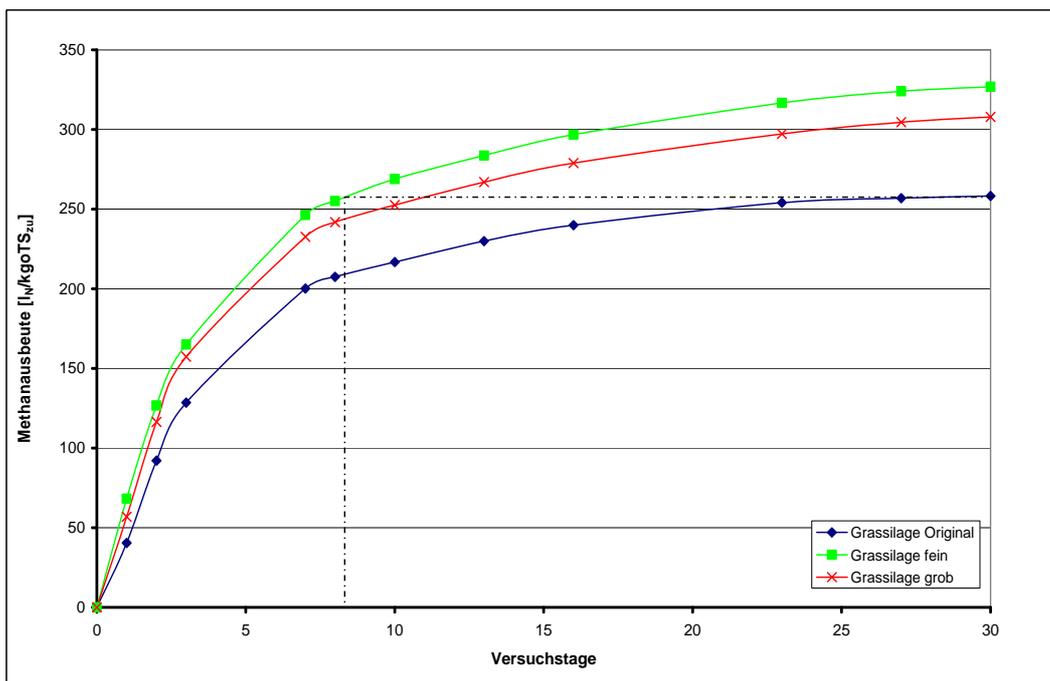


Diagramm 24: Methanausbeute der Grassilage-Vergärung nach unterschiedlicher Aufarbeitung

Bereits ab dem 7. Versuchstag wurde im Versuchsansatz Extruder fein der 30-Tage-Endwert von der originalen Grassilage erreicht (Diagramm 23). Dies zeigt ebenfalls wie beim Gärversuch Maissilage, dass es durch eine Ausarbeitung vom Originalsubstrat zu einer Erhöhung der Ausbeute kommt. Eine Hemmung des Prozesses ist auf Grundlage des Kurvenverlaufes der Gasproduktion und des neutralen pH-Wertes zu Beginn und am Ende der Versuchsreihe auszuschließen. Auch beim Substrat Grassilage wurde keine vollständige Ausfaltung des Gärsubstrates im Versuchszeitraum erreicht. Es ist weiterhin noch ein leichter Kurvenanstieg zu verzeichnen.

Der Verlauf der Kurven ist auch analog der Werte der Substratanalyse Tabelle 3 zu deuten. Je kleiner bzw. feiner das aufgearbeitete Substrat, desto besser ist der Verlauf der Vergärung, wie man eindeutig in den Diagrammen 23 und 24 erkennen kann und umso höher ist die Ausbeute nach dem Vergärungszeitraum gegenüber dem Originalsubstrat.

Auswertung der Gärversuche

Die berechneten Parameter für die Vergärung von Grassilage sind in Tabelle 13 zusammengefasst.

Tabelle 13: Berechnete Parameter der Grassilage-Vergärungsversuche, Extruder Aufarbeitung

Parameter	Dimension	Grassilage Original Mittelwert	Grassilage Extruder grob/MW	Änderung	Grassilage Extruder fein/MW	Änderung
Biogausausbeute	l _N /kg oTS _{zu}	447,5	533,4	19%	579,7	29%
Methanausbeute	l _N /kg oTS _{zu}	258,2	307,8	19%	326,8	26%
Methangehalt	Vol.%	57,7	57,7	0%	56,4	- 2,3%

Aus der Tabelle 13 (Grassilage im Batch-Versuch) ist ersichtlich, dass der mittlere Methangehalt beim aufgearbeiteten Versuchsansatz Grassilage fein gegenüber dem Original um 2,3 % kleiner ausfiel.

Aus den Diagrammen 25 und 26 kann man eindeutig den positiven Einfluss der Zerkleinerung des Substrates erkennen, wodurch organische Stoffe den Bakterien günstiger und schneller zur Verfügung gestellt wurden. Das ist ebenso aus den Werten der Partikelgrößenveränderung (Tabelle 3) aus der Substratanalyse analog zu den Erkenntnissen der Maissilageversuche erkennbar.

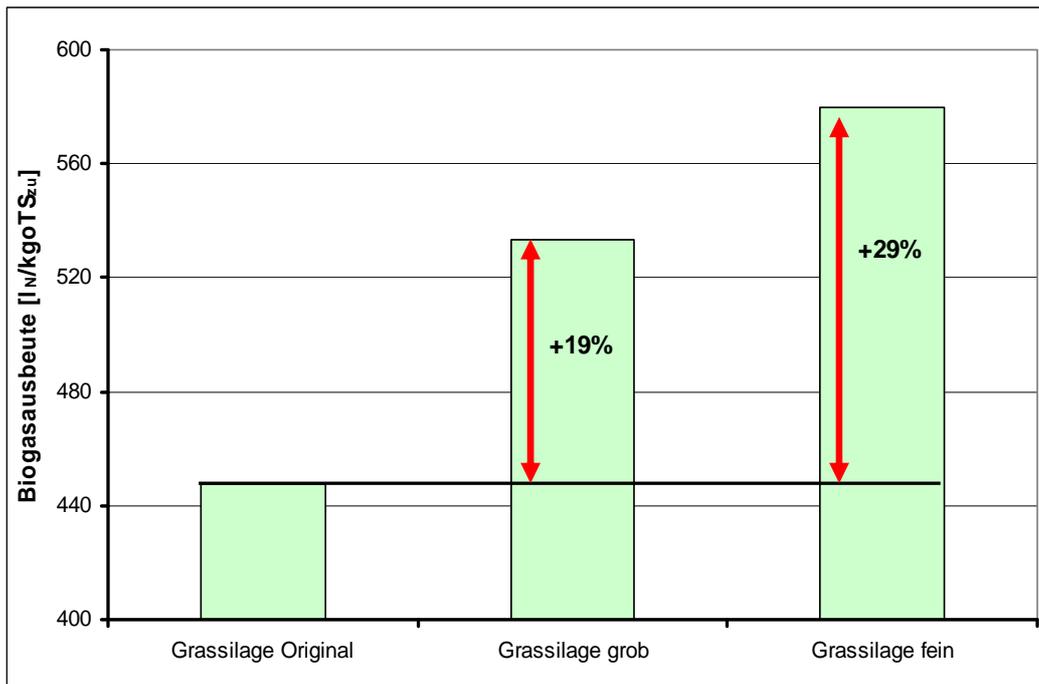


Diagramm 25: Zusammenfassung der Ausbeuten der Grassilagevergärung im Batch-Versuch nach 30 Tagen

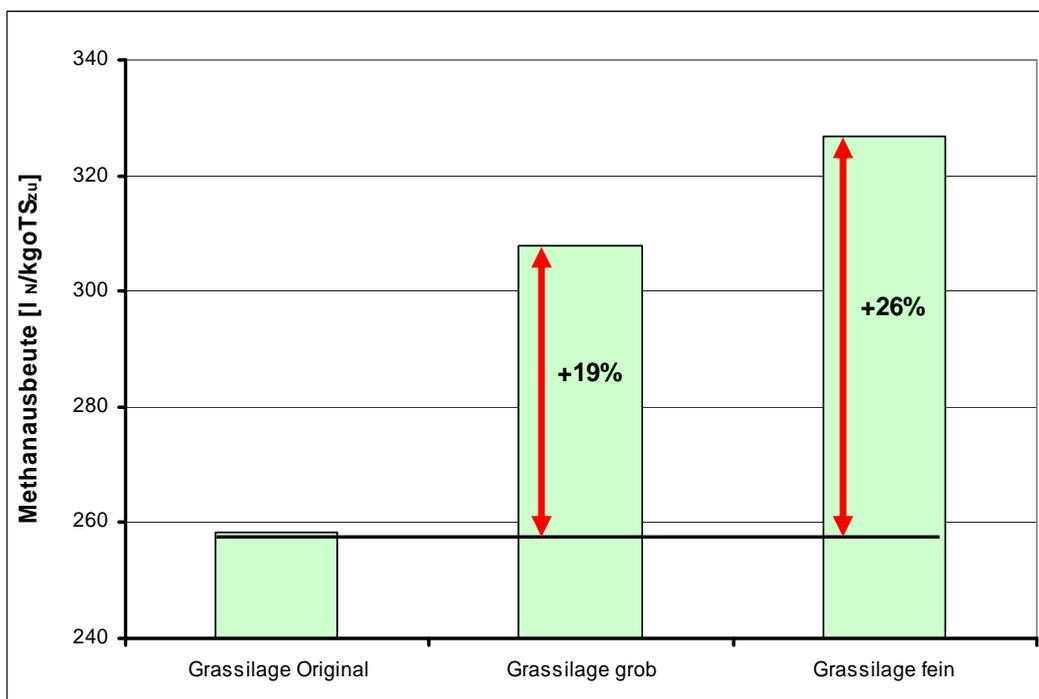


Diagramm 26: Zusammenfassung der Ausbeuten der Grassilagevergärung im Batch-Versuch nach 30 Tagen

5.3.3 Futterreste Original/Extruder

In Tabelle 14 sind die Ergebnisse der TS- bzw. oTS-Werte dargelegt. Sie dienen als Berechnungsgrundlage für das Input-Material.

Tabelle 14: TS- und oTS-Werte des Impfschlammes und der aufgearbeiteten Substrate

Material	TS [%]	oTS der TS [%]
Impfschlamm	3,30	60,70
Futterreste original	20,12	89,70
Futterreste Extruder fein	20,05	89,64

Die pH-Werte aus Tabelle 15 zeigen, dass der Verlauf der Versuche im neutralen Bereich abließ und somit keine Prozesshemmung stattfand.

Tabelle 15: pH-Werte vom Gärversuch Ansatz und Abbruch

Material	pH-Wert Ansatz	pH-Wert Abbruch
Impfschlamm	7,88	7,95
Futterreste original	7,88	7,85
Futterreste Extruder fein	7,88	7,90

Zunächst werden die Auswirkungen der Aufarbeitung exemplarisch anhand der Biogas- bzw. Methangasbildung von den Futterresten näher betrachtet (Diagramme 27 und 28). Wie in den Diagrammen veranschaulicht wird, kam es durch die Aufarbeitung des Substrates zu einer nennenswerten Steigerung der Biogasausbeute. Des Weiteren wirkte sich die Aufarbeitung des Substrates auf den zeitlichen Verlauf der Biogasproduktion aus. Es ist ein deutlich schnellerer Anstieg der Biogasausbeute bei der zerkleinerten Probe zu verzeichnen.

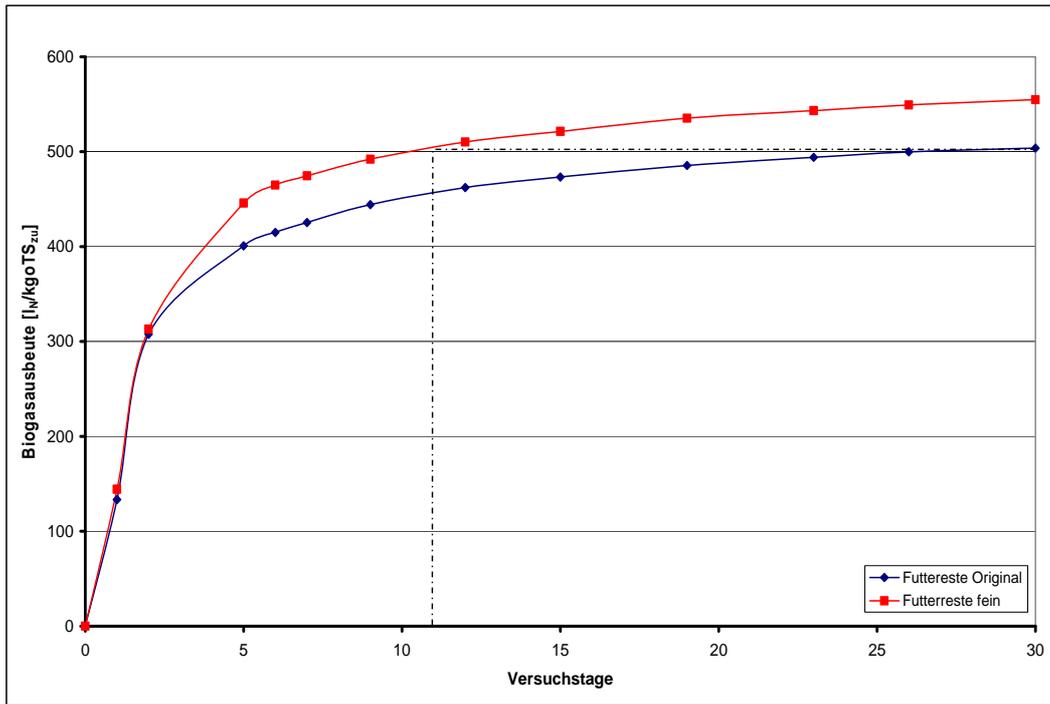


Diagramm 27: Biogasausbeute der Futterreste-Vergärung nach unterschiedlicher Aufarbeitung

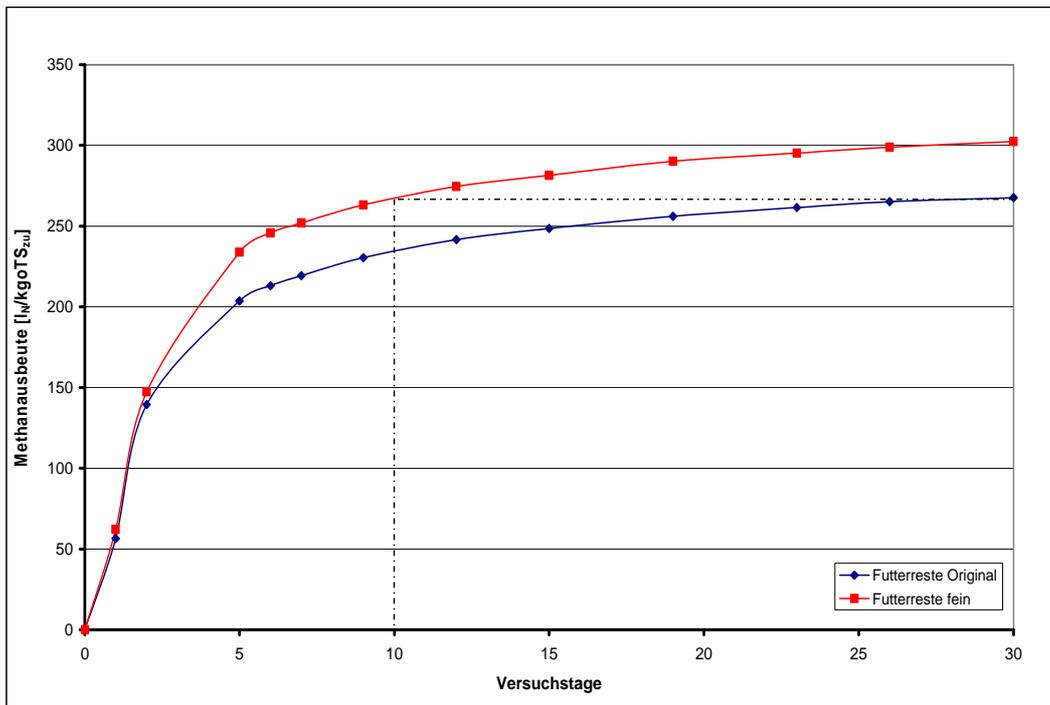


Diagramm 28: Methanausbeute der Futterreste-Vergärung nach unterschiedlicher Aufarbeitung

Gut veranschaulicht wird ebenfalls, dass die Aufarbeitung der Futterreste am Extruder einen längeren exponentiellen Verlauf der Kurve aufweist. Dadurch wird schneller eine höhere Ausbeute gegenüber dem Original bei gleicher Zeit erreicht. Diese Abbaubeschleunigung führte dazu, dass bereits ab dem 11. von 30 Versuchstagen der Endwert vom Futterrest Original durch die Aufarbeitung Extruder erreicht wurde (Diagramm 27). Durch eine bessere Aufarbeitung der Futterreste kann eine höhere Biogasausbeute gegenüber dem Originalsubstrat erzielt werden.

Durch die Aufarbeitung wurden organische Stoffe den Bakterien günstiger zur Verfügung gestellt. Die Werte der Substratanalyse lassen erkennen: Je kleiner die Partikelgröße, desto besser ist der Verlauf der Vergärung und umso höher die Ausbeute (Tabelle 4).

Eine Hemmung der Gärprozesse bei allen Kurven ist auf Grundlage des Kurvenverlaufes und des stabilen pH-Wertes bei Versuchsbeginn und Versuchsende (Tabelle 15) auszuschließen. Des Weiteren wurde keine vollständige Ausfäulung des Gärsubstrates im Versuchszeitraum erreicht. Es ist immer noch ein Kurvenanstieg zu verzeichnen.

Auswertung der Gärversuche

Die berechneten Parameter für die Vergärung der Futterreste sind in der folgenden Tabelle 16 zusammengefasst.

Tabelle 16: Berechnete Parameter der Futterreste-Vergärungsversuche, Extruder Aufarbeitung

Parameter	Dimension	Futterreste Original Mittelwert	Futterreste Extruder fein/MW	Änderung
Biogasausbeute	$l_N/kg \text{ oTS}_{zu}$	503,7	554,7	+ 10%
Methanausbeute	$l_N/kg \text{ oTS}_{zu}$	267,6	302,4	+ 13%
Methangehalt	Vol.%	53,4	54,4	+ 2%

Aus der Tabelle 16 mit den Versuchsergebnissen von aufgearbeiteten Futterresten ist ersichtlich, dass der durchschnittliche Methangehalt bei allen Versuchsansätzen sich geringfügig erhöhte gegenüber dem Originalsubstrat. Dadurch fällt die Änderung der Methanausbeute höher als die der Biogasausbeute aus.

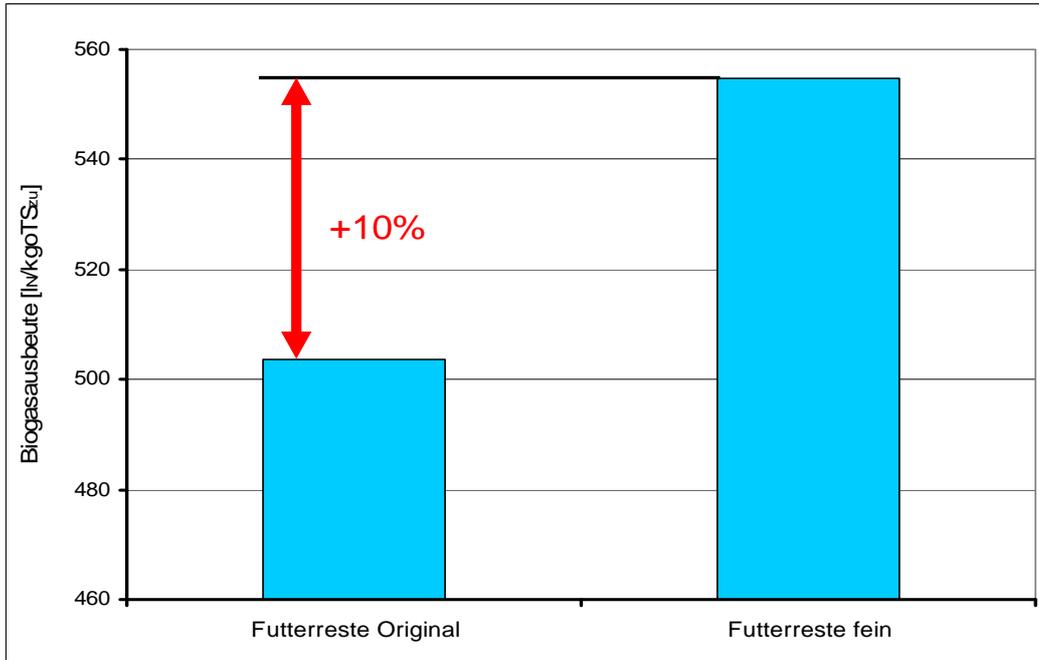


Diagramm 29: Zusammenfassung der Biogasausbeuten der Futterrestevergärung im Batch-Versuch

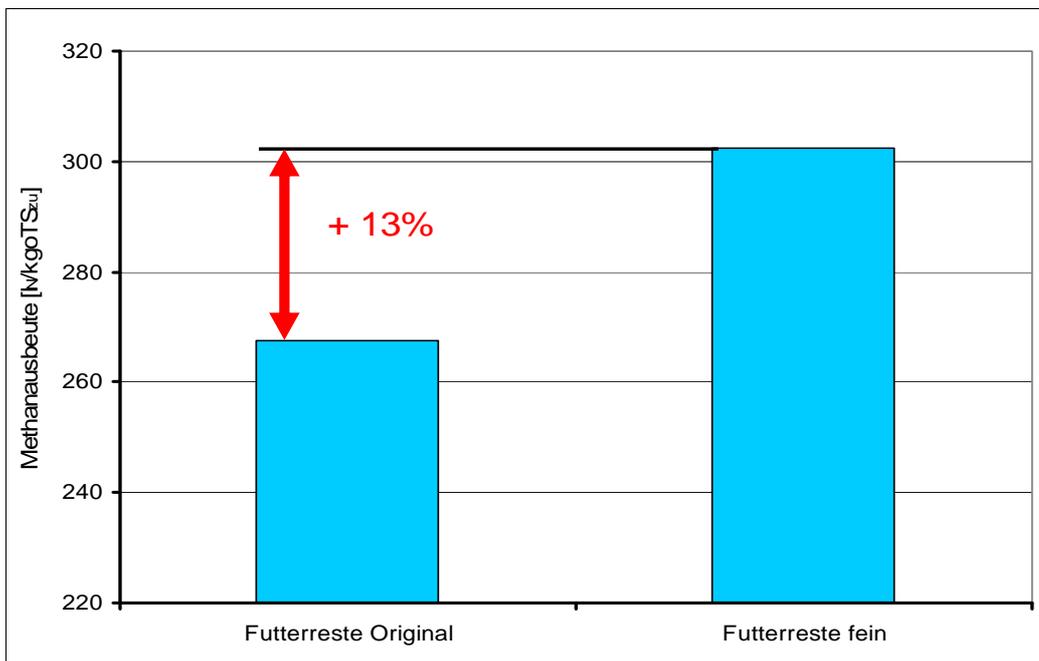


Diagramm 30: Zusammenfassung der Methanausbeuten der Futterrestevergärung im Batch-Versuch

In den Diagrammen 29 und 30 ist deutlich die Steigerung der Biogasausbeute und der Methanausbeute durch die Extruderaufarbeitung der Substrate zu sehen.

5.3.4 Luzernesilage Original/Extruder

Vor jedem Versuchsbeginn wurden die TS- bzw. oTS-Werte für die Berechnung des Input-Materials ermittelt (Tabelle 17).

Tabelle 17: TS- und oTS-Werte des Impfschlammes und der aufgearbeiteten Substrate

Material	TS [%]	oTS der TS [%]
Impfschlamm	2,49	58,70
Luzernesilage original	32,50	89,44
Luzernesilage Extruder fein	37,56	89,96

Aus den ermittelten pH-Werten lässt sich die Stabilität eines Prozesses ablesen. Die pH-Werte aus Tabelle 18 zeigen, dass der Verlauf der Versuche im neutralen Bereich ablief und somit keine Prozesshemmung stattfand.

Tabelle 18: pH-Werte vom Gärversuch Ansatz und Abbruch

Material	pH-Wert Ansatz	pH-Wert Abbruch
Impfschlamm	7,65	7,37
Luzernesilage Original	7,65	7,24
Luzernesilage Extruder fein	7,65	7,23

Zunächst werden die Auswirkungen der Aufarbeitung exemplarisch anhand der Biogas- bzw. Methangasbildung von Luzernesilage näher betrachtet (Diagramme 31 und 32).

Wie in den Diagrammen 31 und 32 veranschaulicht wird, kam es durch die Aufarbeitung des Substrates zu einer Steigerung der Ausbeuten. Des Weiteren wirkte sich die Aufarbeitung des Substrates auf den zeitlichen Verlauf der Biogasproduktion aus. Es ist ein deutlicher Anstieg der Biogausausbeute bei den zerkleinerten Proben zu verzeichnen.

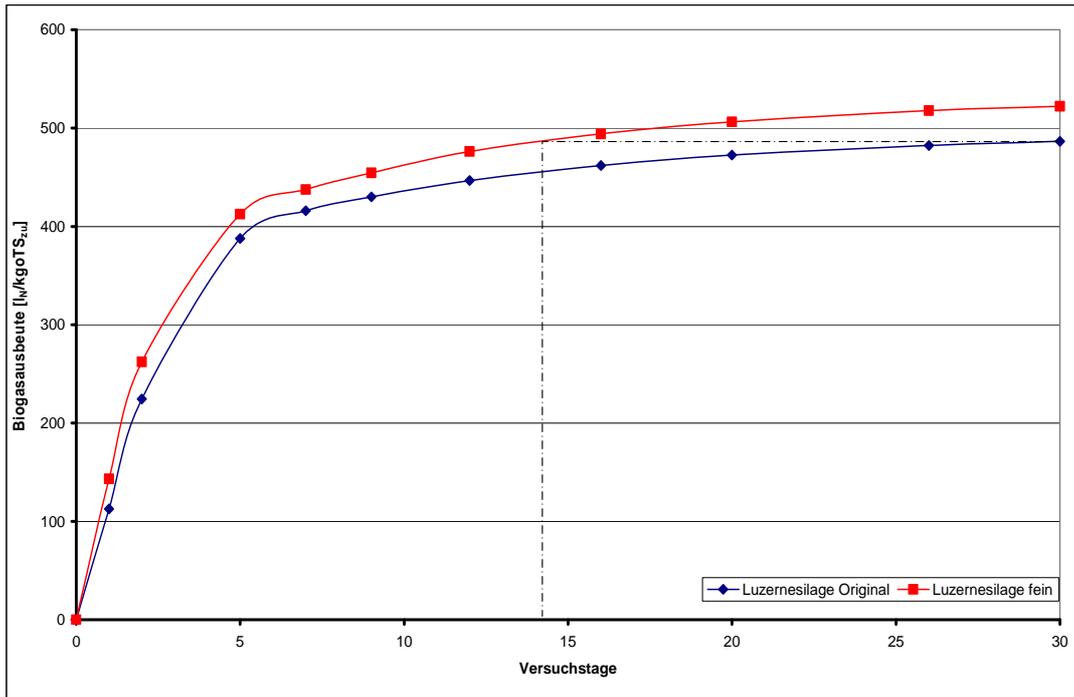


Diagramm 31: Biogasausbeute der Luzernesilage-Vergärung nach unterschiedlicher Aufarbeitung

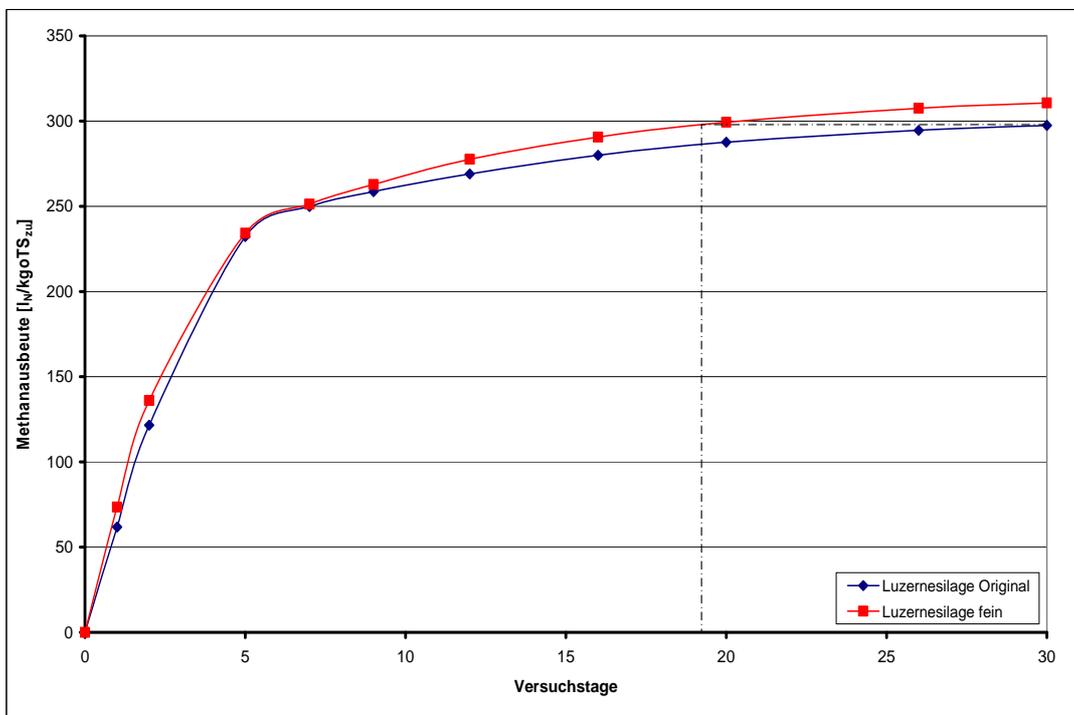


Diagramm 32: Methanausbeute der Luzernesilage-Vergärung nach unterschiedlicher Aufarbeitung

Durch den längeren exponentiellen Verlauf der Kurve Luzerne Extruder wird schneller eine höhere Ausbeute gegenüber dem Original bei gleicher Zeit erreicht. Diese Abbaubeschleunigung führte dazu, dass bereits ab dem 14. von 30 Versuchstagen der Endwert von Luzerne original durch die Aufarbeitung Extruder fein erreicht wurde (Diagramm 31). Daraus kann man schließen, dass bei besserer Aufarbeitung der Substrate gegenüber dem Original eine höhere Biogasausbeute erzielt wird. Durch die Zerkleinerung wurden organische Stoffe den Bakterien günstiger zur Verfügung gestellt, indem die Angriffsfläche der Partikel vergrößert bzw. organische Stoffe freigesetzt wurden.

Aus den Diagrammen ist ebenfalls ersichtlich, dass innerhalb der Versuchsdauer von 30 Tagen keine vollständige Ausfäulung des Gärsubstrates erreicht wurde und somit das Maximum der Biogasausbeute Luzernesilage noch nicht festliegt.

Eine Hemmung der Gärprozesse bei beiden Kurven ist auf Grundlage des Kurvenverlaufes und des stabilen pH-Wertes bei Versuchsbeginn und Versuchsende (Tabelle 18) auszuschließen.

Auswertung der Gärversuche

Die berechneten Parameter für die Vergärung der Luzernesilage sind in Tabelle 19 zusammengefasst.

Tabelle 19: Berechnete Parameter der Luzernesilage-Vergärungsversuche, Extruder Aufarbeitung

Parameter	Dimension	Luzerne Mittelwert original	Luzerne Extruder fein Mittelwert	Änderung
Biogasausbeute	$l_N/kg \text{ oTS}_{zu}$	486,5	522,1	7%
Methanausbeute	$l_N/kg \text{ oTS}_{zu}$	297,5	310,7	4,4%
Methangehalt	Vol.%	61	59	- 3%

Die Versuchsergebnisse der aufgearbeiteten Luzernesilage zeigen, dass sich der durchschnittliche Methangehalt bei allen Versuchsansätzen gegenüber dem Originalsubstrat verringerte. Dadurch fällt die Änderung der Biogasausbeute höher als die der Methanausbeute aus.

In den Diagrammen 33 und 34 ist deutlich die Steigerung der Biogasausbeute und der Methanausbeute durch die Aufarbeitung der Substrate zu sehen. Der Verlauf der Biogasausbeute und die in Tabelle 19 dargelegten Werte bezüglich der gesamten Biogasausbeute bestätigen eindeutig, dass durch eine Aufarbeitung der Luzernesilage die Gasproduktion erhöht werden kann.

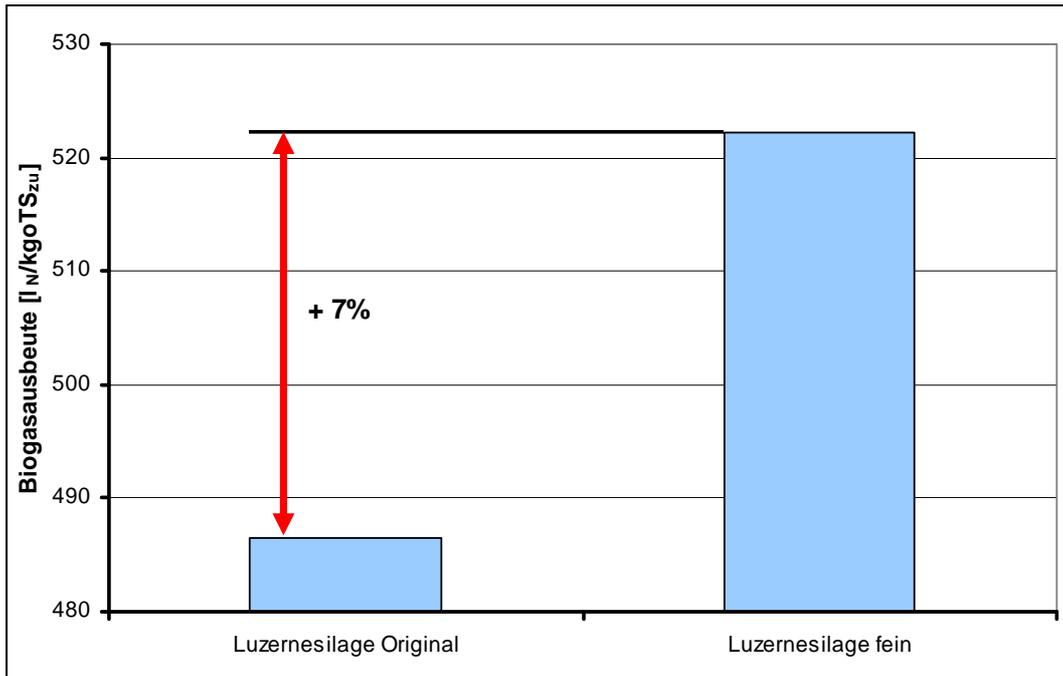


Diagramm 33: Biogasausbeuten der Luzernesilagevergärung im Batch-Versuch nach 30 Tagen

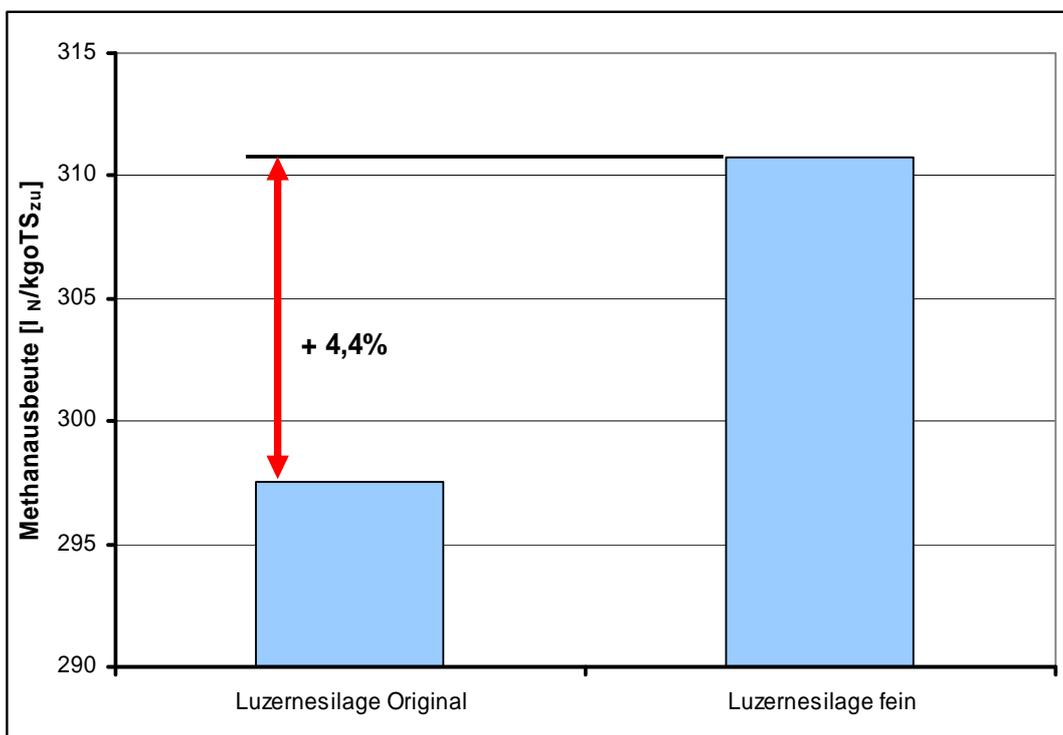


Diagramm 34: Methanausbeuten der Luzernesilagevergärung im Batch-Versuch nach 30 Tagen

5.3.5 Kleegrassilage Original/Extruder

Vor jedem Versuchsbeginn wurden die TS- bzw. oTS-Werte für die Berechnung des Input-Materials ermittelt (Tabelle 20).

Tabelle 20: TS- und oTS-Werte des Impfschlammes und der aufgearbeiteten Substrate

Material	TS [%]	oTS der TS [%]
Impfschlamm	2,49	58,70
Kleegrassilage original	37,16	89,48
Kleegrassilage Extruder fein	46,99	88,11

Die pH-Werte aus Tabelle 21 zeigen, dass der Verlauf der Versuche im neutralen Bereich abließ und somit keine Prozesshemmung stattfand.

Tabelle 21: pH-Werte vom Gärversuch Ansatz und Abbruch

Material	pH-Wert Ansatz	pH-Wert Abbruch
Impfschlamm	7,65	7,37
Kleegrassilage original	7,65	7,24
Kleegrassilage Extruder fein	7,65	7,23

Zunächst werden die Auswirkungen der Aufarbeitung exemplarisch anhand der Biogas- bzw. Methan-gasbildung von Kleegrassilage näher betrachtet. Wie in den Diagrammen 35 und 36 veranschaulicht wird, kam es durch die Aufarbeitung des Substrates zu keiner Steigerung der Biogasausbeute. Bei einer mikrobiologischen Untersuchung der Silage wurde ein überdurchschnittlicher Wert an Clostridien sowie Hefen festgestellt. Dies könnte eine Hemmung verursacht haben und somit ein Grund für die geringe Biogasausbeute sein.

Aus den Diagrammen ist ebenfalls ersichtlich, dass innerhalb der Versuchsdauer von 30 Tagen keine vollständige Ausfäulung des Gärsubstrates erreicht wurde und somit das Maximum der Biogasausbeute Kleegrassilage noch nicht festliegt.

Eine Hemmung des Prozessverlaufes ist bei diesem Gärversuch auf Grund des Kurvenverlaufes und des stabilen pH-Wertes bei Versuchsbeginn und Versuchsende (Tabelle 21) auszuschließen.

Auswertung der Gärversuche

Die berechneten Parameter für die Vergärung der Kleegrassilage ist in Tabelle 22 zusammengefasst. Aus den Versuchsergebnissen ist zu erkennen, dass sich der durchschnittliche Methangehalt bei beiden Versuchsansätzen gleicht.

Tabelle 22: Parameter der Kleegrassilage-Vergärungsversuche, Extruder Aufarbeitung

Parameter	Dimension	Kleegrassilage Mittelwert original	Kleegrassilage Extruder fein / MW	Änderung
Biogasausbeute	l _N /kg oTS _{zu}	287,5	286,7	0%
Methanausbeute	l _N /kg oTS _{zu}	178,2	177,3	0%
Methangehalt	Vol. %	62	62	0%

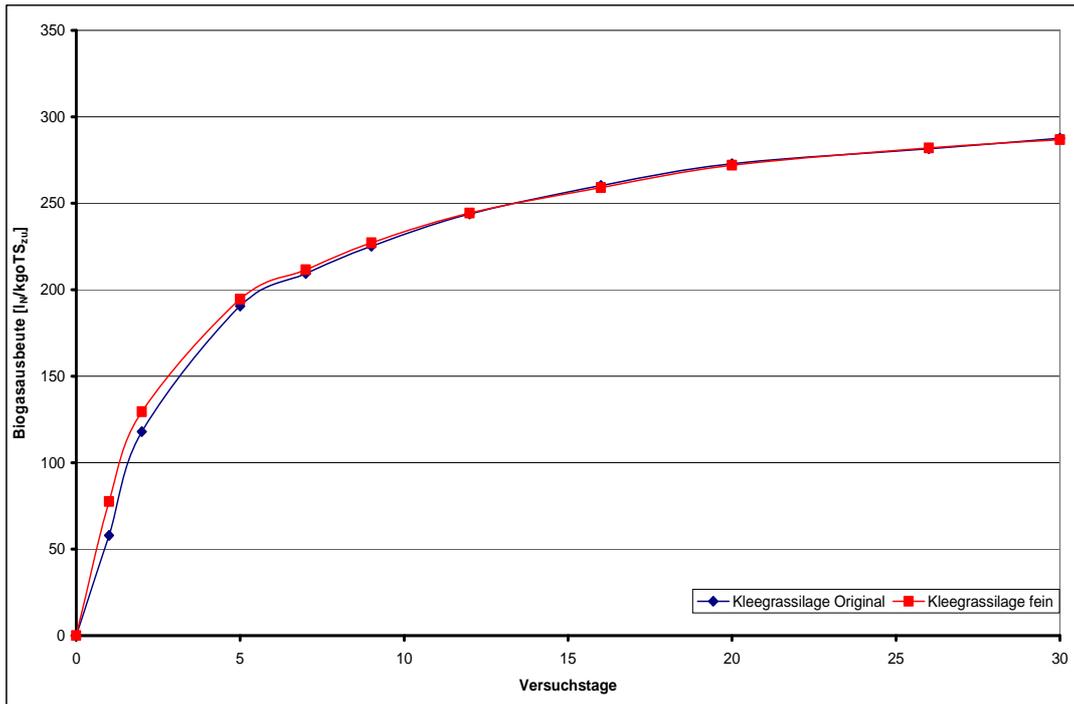


Diagramm 35: Biogasausbeute der Kleegrassilage-Vergärung nach unterschiedlicher Aufarbeitung

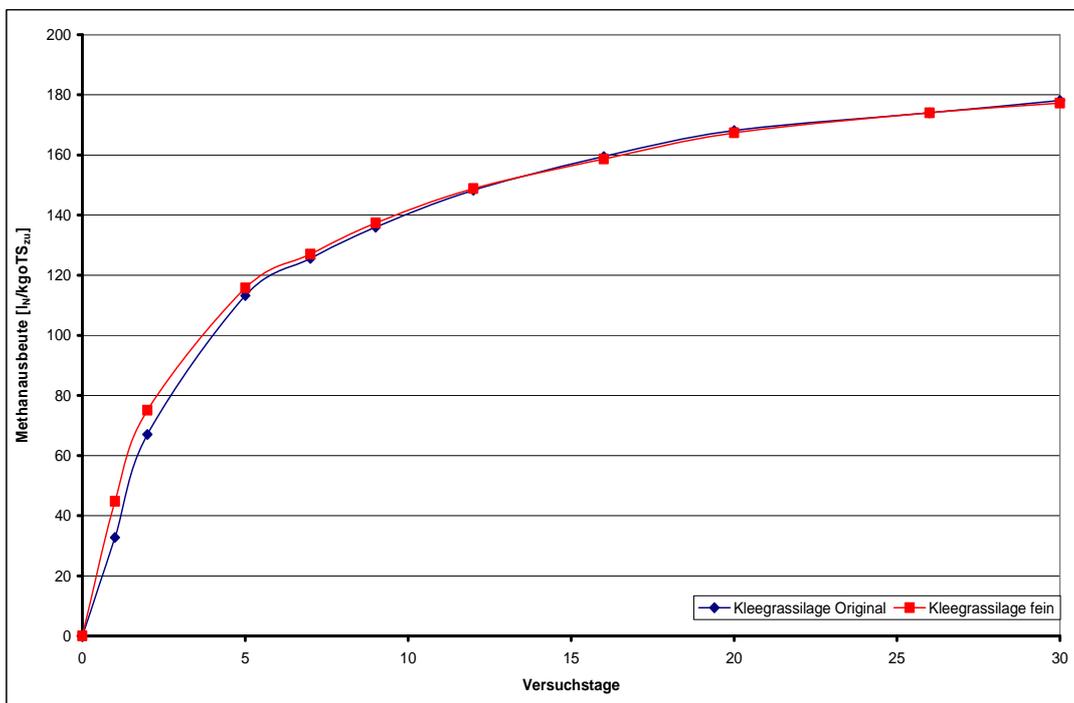


Diagramm 36: Methanausbeute der Kleegrassilage-Vergärung nach unterschiedlicher Aufarbeitung

In den Diagrammen 37 und 38 ist die Biogas- und die Methanausbeute der Kleegrassilagevergärung zu sehen.

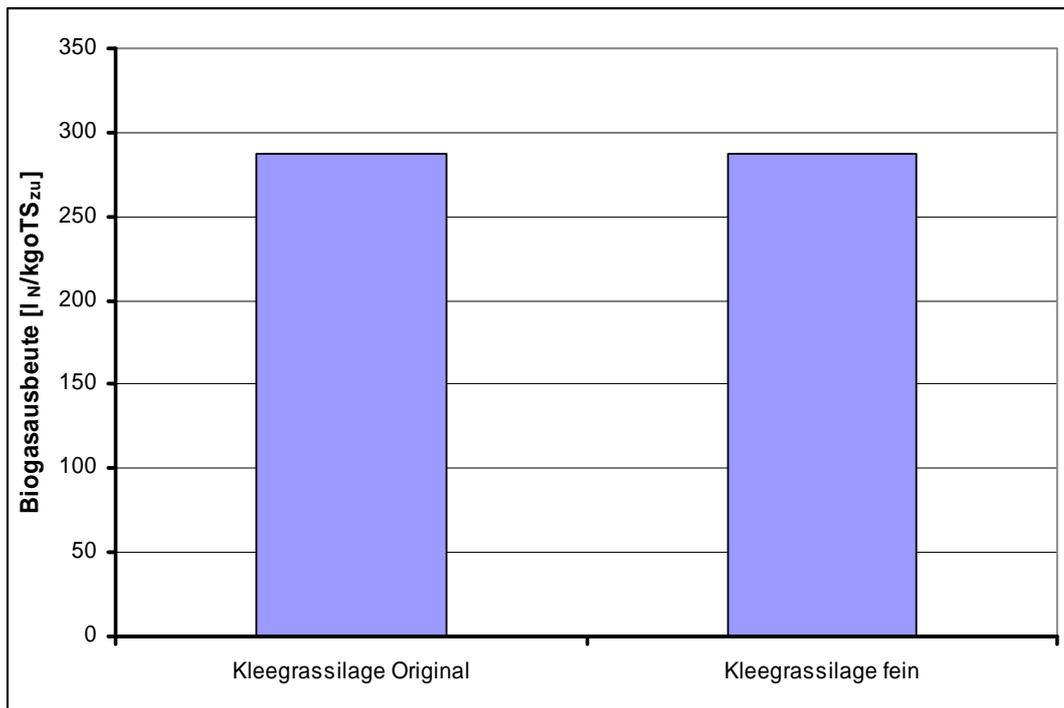


Diagramm 37: Biogasausbeute der Kleegrassilagevergärung im Batch-Versuch nach 30 Tagen

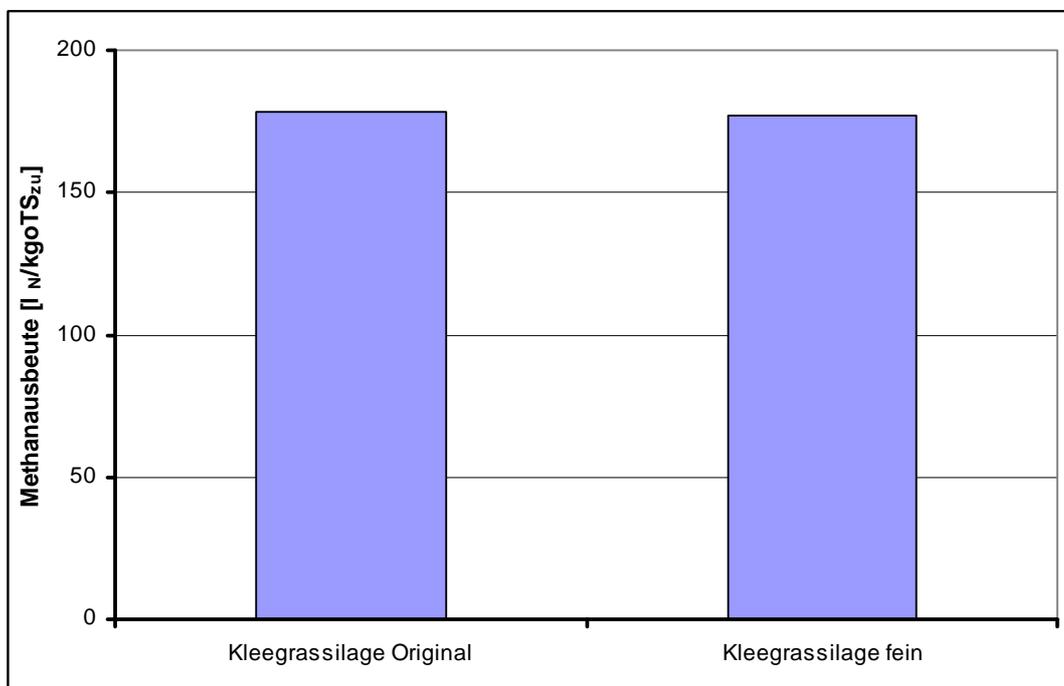


Diagramm 38: Methanausbeute der Kleegrassilagevergärung im Batch-Versuch nach 30 Tagen

5.3.6 Moorgrassilage Original/Extruder

Vor jedem Versuchsbeginn wurden die TS- bzw. oTS-Werte für die Berechnung des Input-Materials ermittelt (Tabelle 23).

Tabelle 23: TS- und oTS-Werte des Impfschlammes und der aufgearbeiteten Substrate

Material	TS [%]	oTS der TS [%]
Impfschlamm	2,49	58,7
Moorgrassilage original	25,07	92,21
Moorgrassilage Extruder fein	28,37	92,81

Die pH-Werte aus Tabelle 24 zeigen, dass der Verlauf der Versuche im neutralen Bereich abließ und somit keine Prozesshemmung stattfand.

Tabelle 24: pH-Werte vom Gärversuch Ansatz und Abbruch

Material	pH-Wert Ansatz	pH-Wert Abbruch
Impfschlamm	7,65	7,36
Moorgrassilage original	7,65	7,21
Moorgrassilage Extruder fein	7,65	7,22

Zunächst werden die Auswirkungen der Aufarbeitung exemplarisch anhand der Biogas- bzw. Methangasbildung von Moorgrassilage näher betrachtet. Wie in den Diagrammen 39 und 40 veranschaulicht wird, kam es durch die Aufarbeitung des Substrates zu einer nennenswerten Steigerung der Biogasausbeute. Des Weiteren wirkte sich die Aufarbeitung des Substrates auf den zeitlichen Verlauf der Biogasproduktion aus. Es ist ein deutlich schnellerer Anstieg der Biogasausbeute bei den zerkleinerten Proben zu verzeichnen.

Gut veranschaulicht wird ebenfalls, dass die Aufarbeitung der Moorgrassilage am Extruder einen längeren exponentiellen Verlauf der Kurve aufweist. Dadurch wird schneller eine höhere Ausbeute gegenüber dem Original bei gleicher Zeit erreicht. Diese Abbaubeschleunigung führte dazu, dass bereits ab dem 9. von 30 Versuchstagen der Endwert von Moorgrassilage original durch die Aufarbeitung Extruder fein erreicht wurde (Diagramm 39). Daraus ist zu schlussfolgern, dass bei besserer Aufarbeitung der Substrate gegenüber dem Original eine höhere Biogasausbeute erzielt wird. Durch die Zerkleinerung wurden organische Stoffe den Bakterien günstiger zur Verfügung gestellt, indem die Angriffsfläche der Partikel vergrößert bzw. organische Stoffe freigesetzt wurden. Dies ist analog der Grassilagevergärung unter Punkt 5.3.2 zu sehen.

Aus den Diagrammen ist ebenfalls ersichtlich, dass innerhalb der Versuchsdauer von 30 Tagen keine vollständige Ausfäulung des Gärsubstrates erreicht wurde und somit das Maximum der Biogasausbeute Moorgrassilage noch nicht festliegt.

Eine Hemmung der Gärprozesse bei allen Kurven ist auf Grundlage des Kurvenverlaufes und des stabilen pH-Wertes bei Versuchsbeginn und Versuchende (Tabelle 24) auszuschließen.

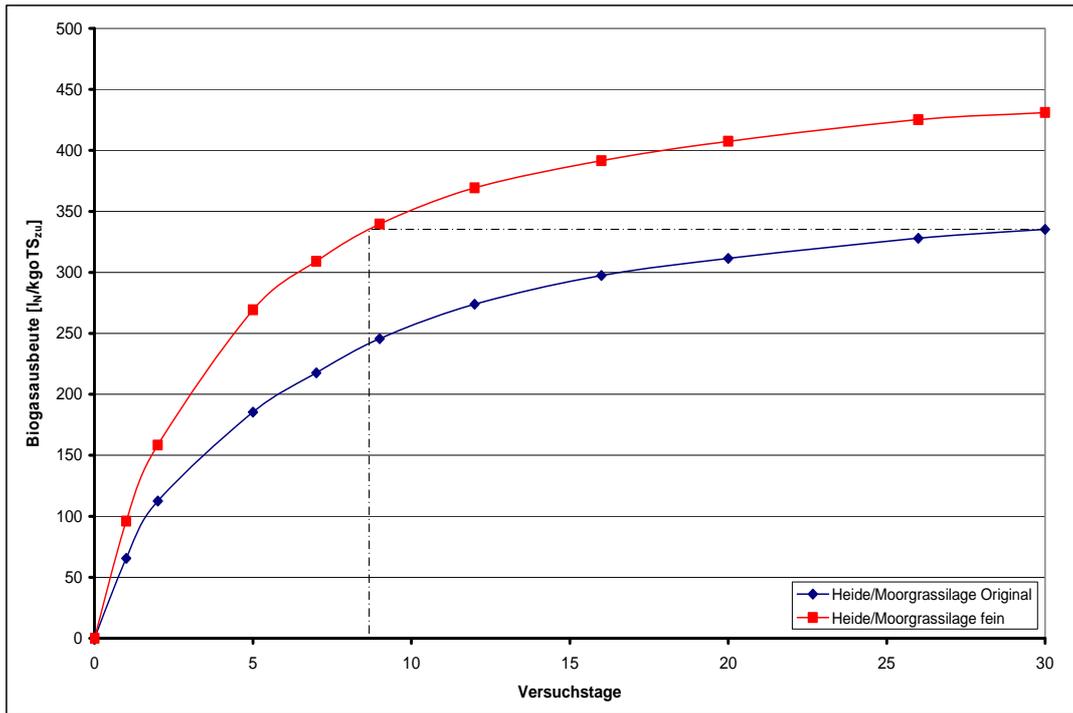


Diagramm 39: Biogasausbeute der Moorgrassilage - Vergärung nach Aufarbeitung

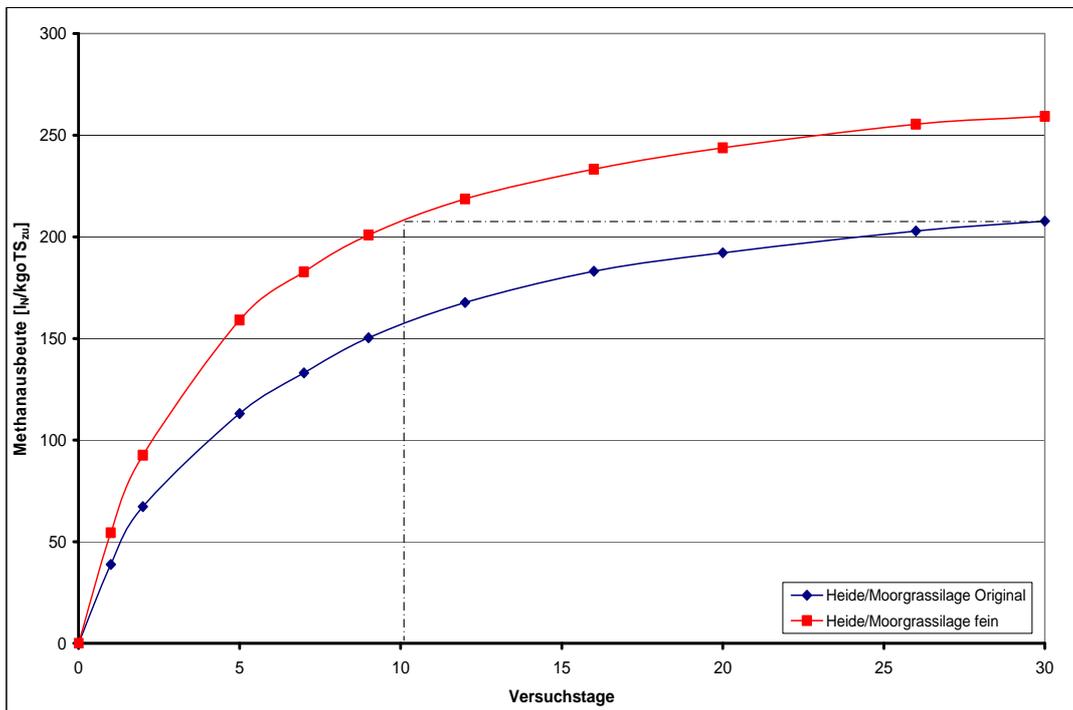


Diagramm 40: Methanausbeute der Moorgrassilage - Vergärung nach Aufarbeitung

Auswertung der Gärversuche

Die berechneten Parameter für die Vergärung der Moorgrossilage ist in Tabelle 25 zusammengefasst.

Tabelle 25: Berechnete Parameter der Moorgrossilage-Vergärungsversuche, Extruder Aufarbeitung

Parameter	Dimension	Heide/Moorgras Silage Original Mittelwert	Heide/Moorgras Silage Extruder Mittelwert	Änderung
Biogasausbeute	$l_N/kg \text{ oTS}_{zu}$	335,3	430,9	28,5%
Methanausbeute	$l_N/kg \text{ oTS}_{zu}$	207,7	259,3	25%
Methangehalt	Vol. %	62	60	-3%

Aus der Tabelle 25 ist ersichtlich, dass sich der durchschnittliche Methangehalt bei allen Versuchsansätzen aufgearbeiteter Moorgrossilage geringfügig gegenüber dem Originalsubstrat verringerte. Dadurch fällt die Änderung der Biogasausbeute höher aus als die der Methanausbeute.

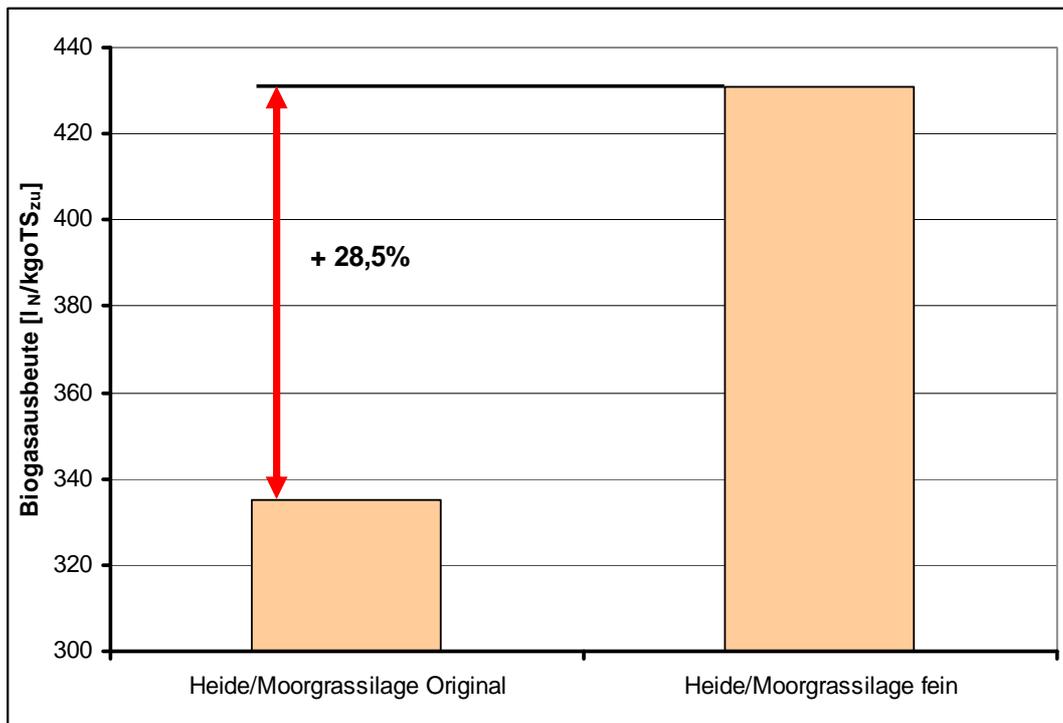


Diagramm 41: Zusammenfassung der Ausbeuten der Moorgrossilage - Vergärung im Batch-Versuch nach 30 Tagen

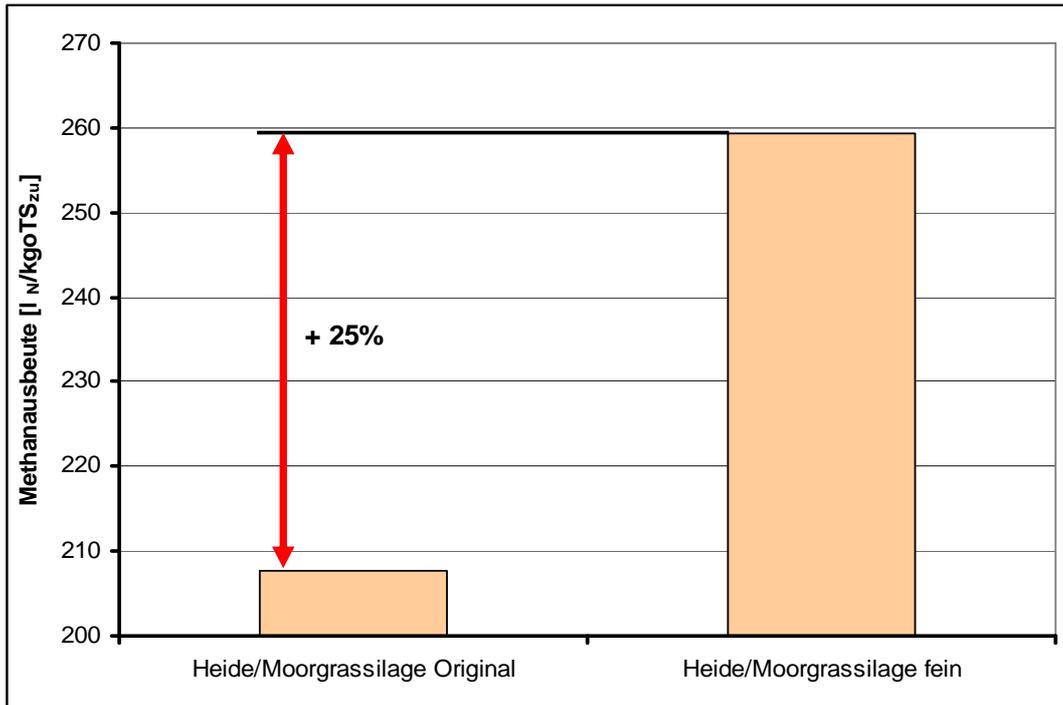


Diagramm 42: Zusammenfassung der Ausbeuten der Moorgrassilage - Vergärung im Batch-Versuch nach 30 Tagen

In den Diagrammen 41 und 42 ist deutlich die Steigerung der Biogasausbeute und der Methanausbeute durch die Aufarbeitung der Substrate zu sehen. Der Verlauf der Biogasausbeute und die in Tabelle 25 dargelegten Werte bezüglich der gesamten Biogasausbeute bestätigen eindeutig, dass durch eine Aufarbeitung der Moorgrassilage die Gasproduktion erhöht werden kann.

5.3.7 Gerste Original/Multischroter

Vor jedem Versuchsbeginn wurden die TS- bzw. oTS-Werte für die Berechnung des Input-Materials ermittelt (Tabelle 26).

Tabelle 26: TS- und oTS-Werte des Impfschlammes und der aufgearbeiteten Substrate

Material	TS [%]	oTS der TS [%]
Impfschlamm	3,07	54,7
Gerste original	88,50	97,75
Gerste grob	88,50	97,75
Gerste mittel	88,50	97,75
Gerste fein	88,50	97,75

Die pH-Werte aus Tabelle 27 zeigen, dass der Verlauf der Versuche im neutralen Bereich abließ und somit keine Prozesshemmung stattfand.

Tabelle 27: pH-Werte vom Gärversuch Ansatz und Abbruch

Material	pH-Wert Ansatz	pH-Wert Abbruch
Impfschlamm	7,56	7,42
Gerste original	7,56	7,24
Gerste grob	7,56	7,22
Gerste mittel	7,56	7,22
Gerste fein	7,56	7,23

Zunächst werden die Auswirkungen der Aufarbeitung exemplarisch anhand der Biogas- bzw. Methangasbildung von Gerste näher betrachtet (Diagramme 43 und 44).

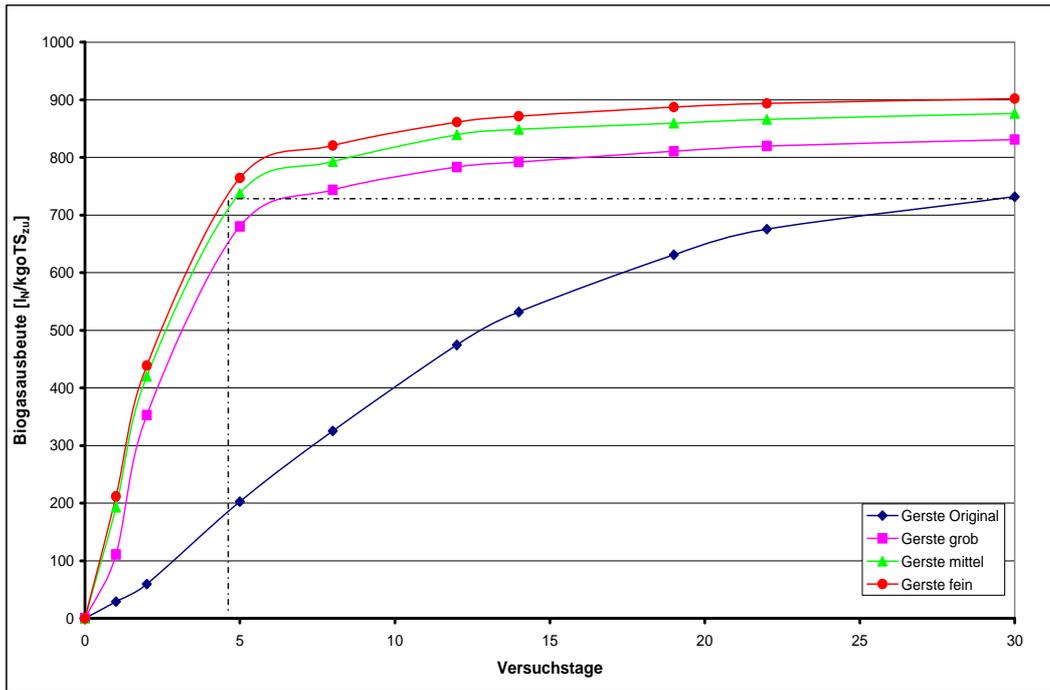


Diagramm 43: Biogasausbeute der Gerste-Vergärung nach unterschiedlicher Aufarbeitung

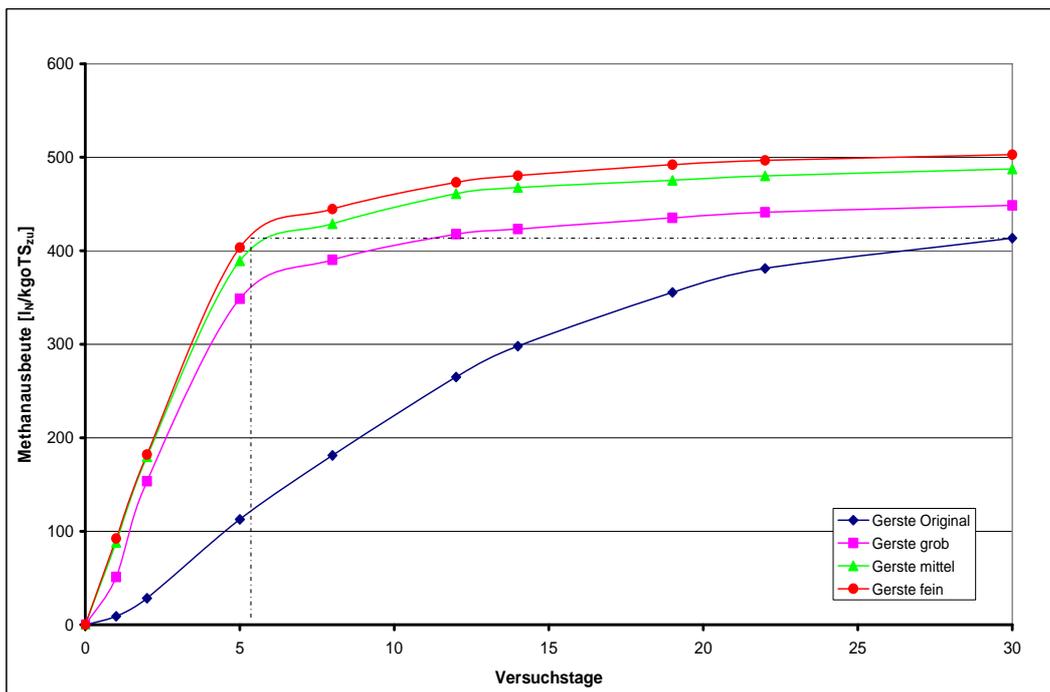


Diagramm 44: Methanausbeute der Gerste-Vergärung nach unterschiedlicher Aufarbeitung

Wie in den Diagrammen 44 und 45 veranschaulicht wird, kam es durch die Aufarbeitung des Substrates zu einer beachtlichen Steigerung der Biogasausbeute.

Des Weiteren wirkte sich die Aufarbeitung des Substrates auf den zeitlichen Verlauf der Biogasproduktion aus. Es ist ein deutlich schnellerer Anstieg der Biogasausbeute bei den zerkleinerten Proben zu verzeichnen.

Gut veranschaulicht wird ebenfalls, dass die Aufarbeitung der Gerste am Multischroter einen längeren exponentiellen Verlauf der Kurve aufweist. Dadurch wird schneller eine deutlich höhere Ausbeute gegenüber dem Original bei gleicher Zeit erreicht. Diese Abbaubeschleunigung führte dazu, dass bereits ab dem 5. von 30 Versuchstagen der Endwert von Gerste Original durch die Aufarbeitung Multischroter fein erreicht wurde (Diagramm 43), d. h., dass bei besserer Aufarbeitung der Substrate gegenüber dem Original eine höhere Biogasausbeute erzielt wird. Durch die Zerkleinerung wurden organische Stoffe den Bakterien günstiger zur Verfügung gestellt, indem die Angriffsfläche der Partikel vergrößert bzw. organische Stoffe freigesetzt wurden (Tabelle 5). Dadurch konnte die Ausbeute verbessert werden.

Aus den Diagrammen ist ebenfalls ersichtlich, dass innerhalb der Versuchsdauer von 30 Tagen keine vollständige Ausfäulung des Gärsubstrates besonders beim Original erreicht wurde und somit das Maximum der Biogasausbeute Gerste noch nicht festliegt.

Eine Hemmung der Gärprozesse bei allen Kurven ist auf Grundlage des Kurvenverlaufes und des stabilen pH-Wertes bei Versuchsbeginn und Versuchsende (Tabelle 27) auszuschließen.

Auswertung der Gärversuche

Die berechneten Parameter für die Vergärung der Gerste ist in Tabelle 28 zusammengefasst.

Tabelle 28: Berechnete Parameter der Gerste-Vergärungsversuche, Multischroter

Substrate	Biogasausbeute I _N /kg oTS _{zu}	Methanausbeute I _N /kg oTS _{zu}	Änderung	Methangehalt in Vol.%	Änderung
Gerste original	731,7	413,6		56,5	
Gerste grob	831,0	448,5	8%	54,0	- 4%
Gerste mittel	876,4	487,4	18%	55,6	- 1,5%
Gerste fein	902,1	502,8	22%	55,7	- 1,5%

Aus der Tabelle 28 der Versuchsergebnisse von aufgearbeiteter Gerste ist ersichtlich, dass sich der durchschnittliche Methangehalt bei allen Versuchsansätzen geringfügig gegenüber dem Originalsubstrat verringerte. Dadurch fällt die Änderung der Biogasausbeute höher als die der Methanausbeute aus (Diagramm 46).

In den Diagrammen 45 und 46 ist deutlich die Steigerung der Biogasausbeute und der Methanausbeute durch die Aufarbeitung der Substrate zu sehen. Der Verlauf der Biogasausbeute und die in Tabelle 28 dargelegten Werte bezüglich der gesamten Biogasausbeute bestätigen eindeutig, dass durch eine Aufarbeitung der Gerste die Gasproduktion erhöht und der Abbau deutlich beschleunigt werden kann.

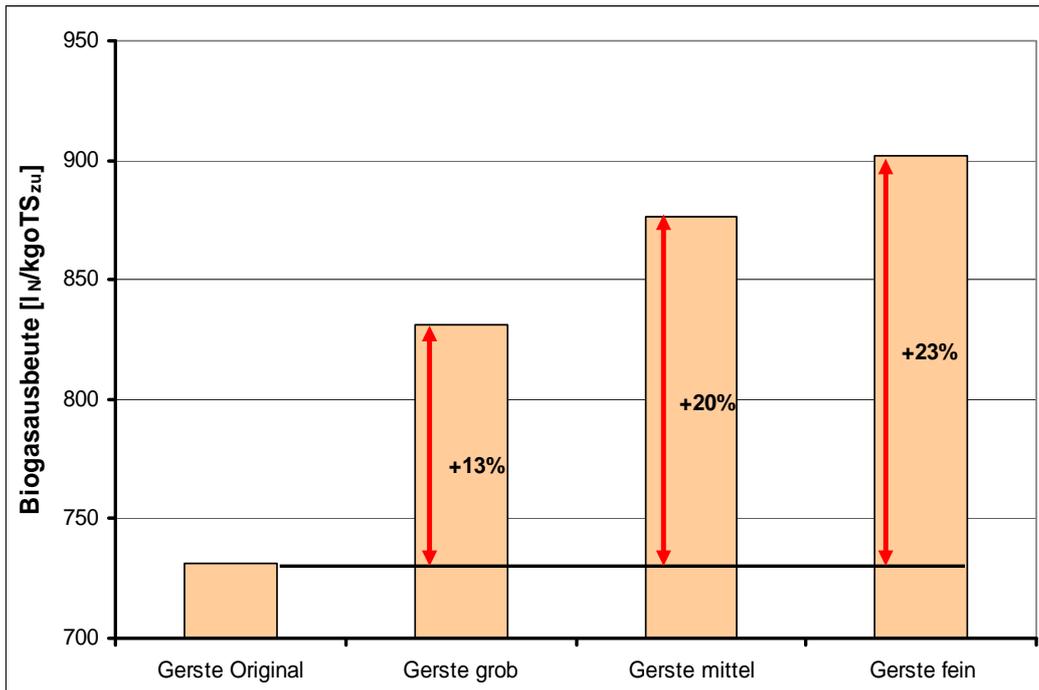


Diagramm 45: Biogausausbeute der Gerstevergärung im Batch-Versuch nach 30 Tagen

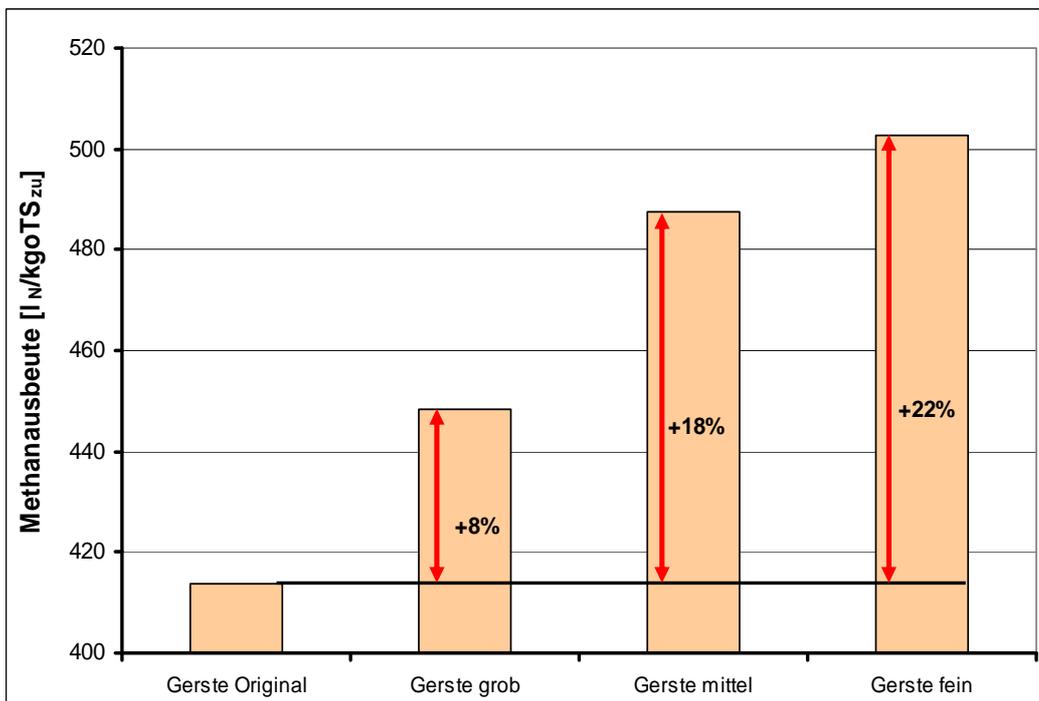


Diagramm 46: Methanausbeute der Gerstevergärung im Batch-Versuch nach 30 Tagen

5.3.8 Weizen Original/Multischroter

Vor jedem Versuchsbeginn wurden die TS- bzw. oTS-Werte für die Berechnung des Input-Materials ermittelt (Tabelle 29).

Tabelle 29: TS und oTS-Werte des Impfschlammes und der aufgearbeiteten Substrate

Material	TS [%]	oTS der TS [%]
Impfschlamm	2,17	52,1
Weizen original	88,88	98,29
Weizen grob	88,88	98,29
Weizen mittel	88,88	98,29
Weizen fein	88,88	98,29

Die pH-Werte aus Tabelle 30 zeigen, dass der Verlauf der Versuche im neutralen Bereich abließ und somit keine Prozesshemmung stattfand.

Tabelle 30: pH-Werte vom Gärversuch Ansatz und Abbruch

Material	pH-Wert Ansatz	pH-Wert Abbruch
Impfschlamm	7,67	7,38
Weizen original	7,67	7,20
Weizen grob	7,67	7,22
Weizen mittel	7,67	7,21
Weizen fein	7,67	7,21

Zunächst werden die Auswirkungen der Aufarbeitung exemplarisch anhand der Biogas- bzw. Methangasbildung von Weizen näher betrachtet (Diagramme 47 und 48).

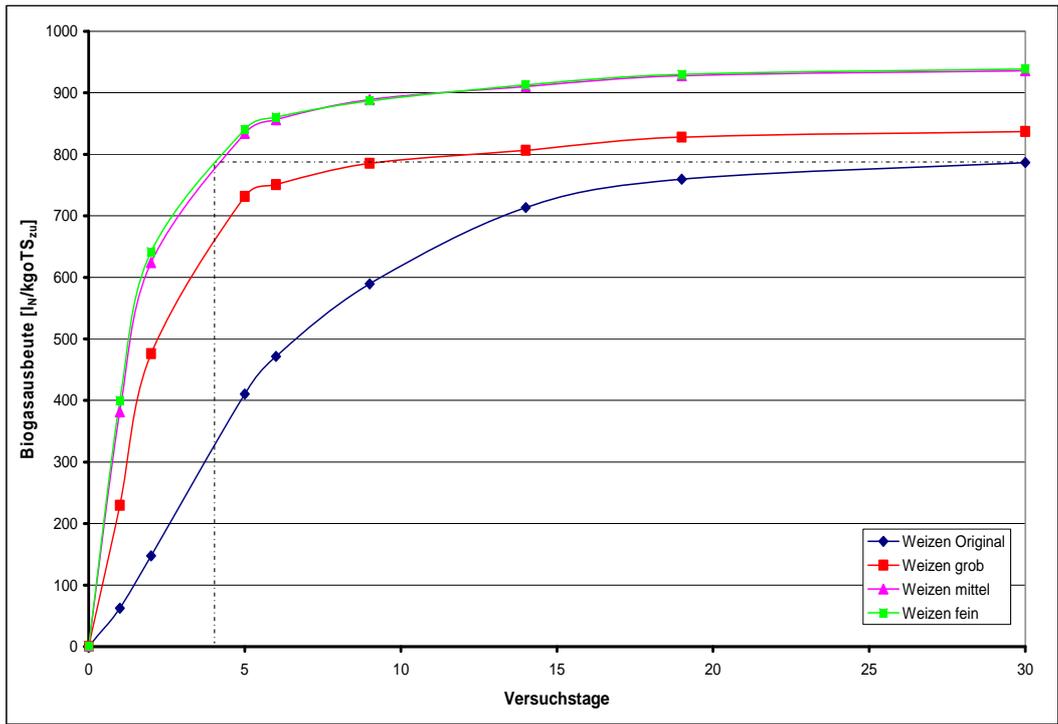


Diagramm 47: Biogasausbeute der Weizen-Vergärung nach unterschiedlicher Aufarbeitung

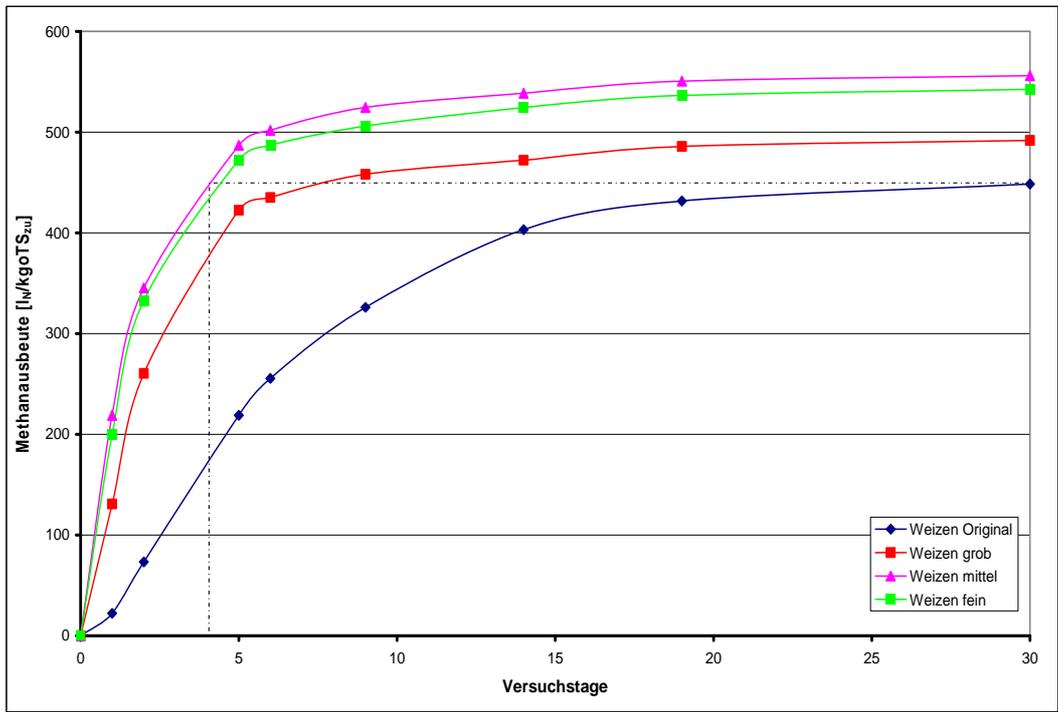


Diagramm 48: Methanausbeute der Weizen-Vergärung nach unterschiedlicher Aufarbeitung

Wie in den Diagrammen 47 und 48 veranschaulicht wird, kam es durch die Aufarbeitung des Substrates zu einer nennenswerten Steigerung der Biogasausbeute. Des Weiteren wirkte sich die Aufarbeitung des Substrates auf den zeitlichen Verlauf der Biogasproduktion aus. Es ist ein deutlich schnellerer Anstieg der Biogasausbeute bei den zerkleinerten Proben zu verzeichnen.

Es ist ersichtlich, dass die Aufarbeitung des Weizens am Multischroter einen längeren exponentiellen Verlauf der Kurve aufweist. Dadurch wird schneller eine höhere Ausbeute gegenüber dem Original bei gleicher Zeit erreicht. Diese Abbaubeschleunigung führte dazu, dass bereits ab dem 4. von 30 Versuchstagen der Endwert von Weizen Original durch die Aufarbeitung am Multischroter fein erreicht wurde (Diagramm 47). Woraus man schließen kann, dass bei besserer Aufarbeitung der Substrate gegenüber dem Original eine höhere Biogasausbeute erzielt wird. Durch die Zerkleinerung wurden organische Stoffe den Bakterien günstiger zur Verfügung gestellt, indem die Angriffsfläche der Partikel vergrößert bzw. organische Stoffe freigesetzt wurden. Dadurch konnte die Ausbeute verbessert werden. Die Werte aus der Substratanalyse belegen das Ergebnis (Tabelle 6).

Aus den Diagrammen ist ebenfalls ersichtlich, dass innerhalb der Versuchsdauer von 30 Tagen keine vollständige Ausfäulung des Gärsubstrates erreicht wurde und somit das Maximum der Biogasausbeute Weizen noch nicht festliegt.

Auswertung der Gärversuche

Die berechneten Parameter für die Vergärung des Weizens sind in Tabelle 31 zusammengefasst.

Tabelle 31: Berechnete Parameter der Weizen-Vergärungsversuche, Multischroter

Substrate	Biogasausbeute l _N /kg oTS _{zu}	Methanausbeute l _N /kg oTS _{zu}	Änderung	Methangehalt in Vol.%	Änderung
Weizen original	786,7	448,6		57,0	
Weizen grob	837,1	491,9	9,6%	58,7	3%
Weizen mittel	936,2	556,2	24%	59,4	4%
Weizen fein	938,7	542,6	21%	57,8	1,5%

Aus der Tabelle 31 ist ersichtlich, dass sich der durchschnittliche Methangehalt bei allen Versuchsansätzen mit aufgearbeitetem Weizen gegenüber dem Originalsubstrat geringfügig verbesserte. Dadurch fällt die Änderung der Methanausbeute höher als die der Biogasausbeute aus.

In den folgenden Diagrammen 49 und 50 ist deutlich die Steigerung der Biogasausbeute und der Methanausbeute durch die Aufarbeitung der Substrate zu sehen. Der Verlauf der Biogasausbeute und die in Tabelle 31 dargelegten Werte bezüglich der gesamten Biogasausbeute bestätigen eindeutig, dass durch eine Aufarbeitung des Weizens die Gasproduktion erhöht werden kann.

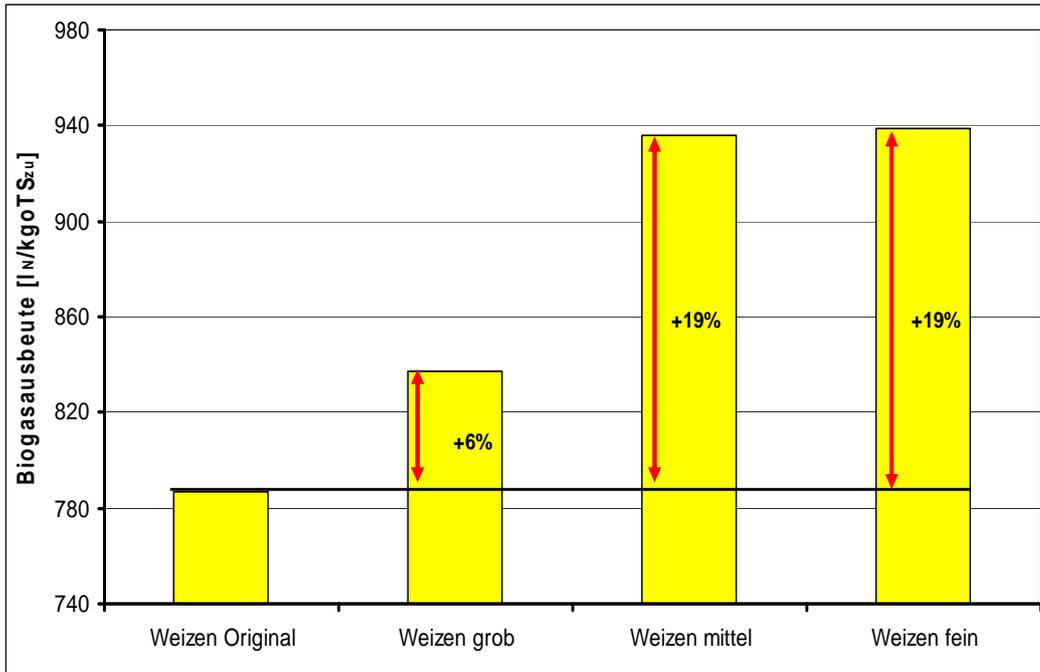


Diagramm 49: Biogasausbeute der Weizenvergärung im Batch-Versuch nach 30 Tagen

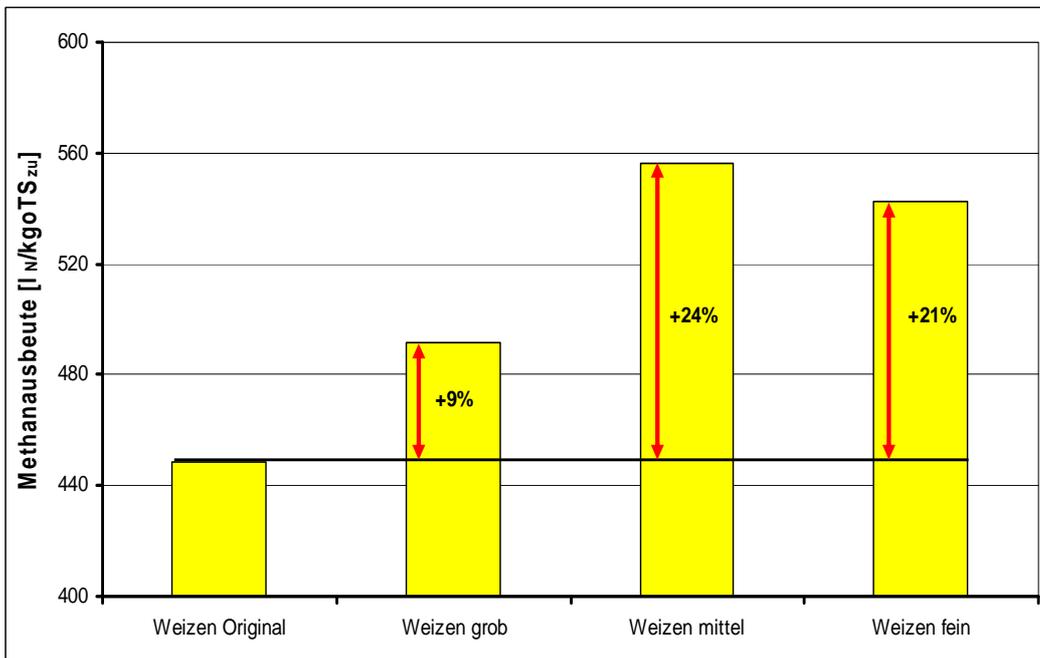


Diagramm 50: Methanausbeute der Weizenvergärung im Batch-Versuch nach 30 Tagen

5.4 Erntetechnik Claas Jaguar 870

Vor jedem Versuchsbeginn wurden die TS- bzw. oTS-Werte für die Berechnung des Input-Materials ermittelt (Tabelle 32).

Tabelle 32: TS- und oTS-Werte des Impfschlammes und der aufgearbeiteten Substrate

Material	TS [%]	oTS der TS [%]
Impfschlamm	2,89	54,90
Maissilage 2006 kurz	29,70	96,47
Maissilage normale Häcksellänge	39,63	95,85

Die pH-Werte aus Tabelle 33 zeigen, dass der Verlauf der Versuche im neutralen Bereich ablief und somit keine Prozesshemmung stattfand.

Tabelle 33: pH-Werte vom Gärversuch Ansatz und Abbruch

Material	pH-Wert Ansatz	pH-Wert Abbruch
Impfschlamm	7,79	7,40
Maissilage 2006 kurz	7,79	7,29
Maissilage normale Häcksellänge	7,79	7,26

Zunächst werden die Auswirkungen der Aufarbeitung exemplarisch anhand der Biogas- bzw. Methangasbildung von Maissilage mit verschiedenen Häcksellängen näher betrachtet (Diagramme 51 und 52).

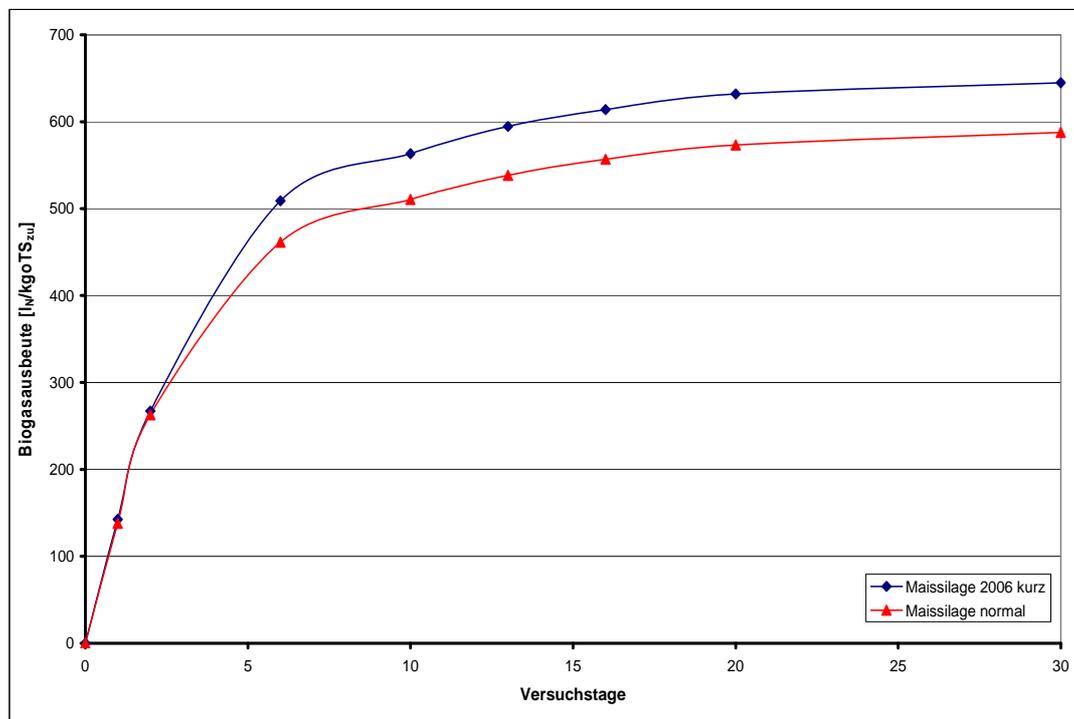


Diagramm 51 : Biogasausbeute der Maissilage-Vergärung nach unterschiedlicher Häcksellänge

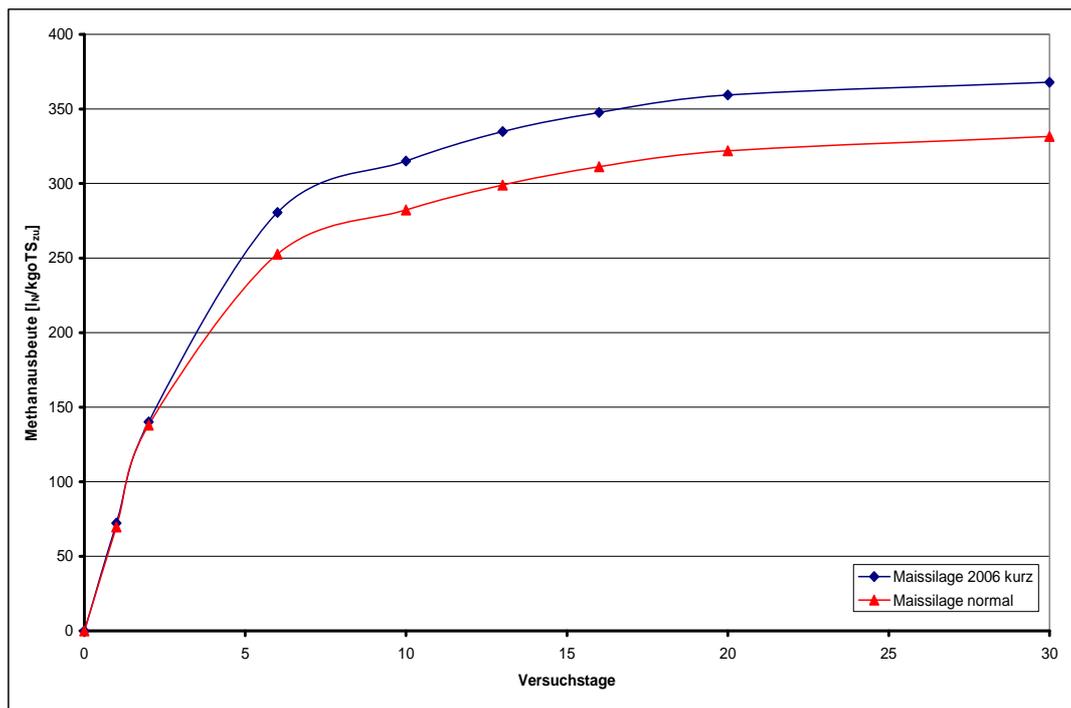


Diagramm 52: Methanausbeute der Maissilage-Vergärung nach unterschiedlicher Häcksellänge

Wie in den Diagrammen 51 und 52 veranschaulicht wird, kam es durch die verschiedenen Erntearten des Substrates zu einer Steigerung der Biogausausbeute bei der Maissilage mit kurzer Häcksellänge. Es ist ein deutlich schnellerer Anstieg der Biogausausbeute bei der Maissilage Häcksler gegenüber der Maissilage normal zu verzeichnen. Aus den Diagrammen ist ebenfalls ersichtlich, dass innerhalb der Versuchsdauer von 30 Tagen keine vollständige Ausfäulung des Gärsubstrates erreicht wurde und somit das Maximum der Biogausausbeute Maissilage noch nicht festliegt.

Eine Hemmung der Gärprozesse bei allen Kurven ist auf Grundlage des Kurvenverlaufes und des stabilen pH-Wertes bei Versuchsbeginn und Versuchsende (Tabelle 33) auszuschließen.

Auswertung der Gärversuche

Die berechneten Parameter für die Vergärung der Maissilage sind in Tabelle 34 zusammengefasst.

Tabelle 34: Berechnete Parameter der Maissilage-Vergärungsversuche

Parameter	Dimension	Maissilage Häcksler MW	Maissilage normal Mittelwert	Änderung
Biogausausbeute	l _N /kg oTS _{zu}	644,9	587,7	-10%
Methanausbeute	l _N /kg oTS _{zu}	367,9	331,9	-11%
Methangehalt	Vol. %	57,0	56,	-0,5%

Aus der Tabelle 34 der Versuchsergebnisse von Maissilage ist ersichtlich, dass sich der durchschnittliche Methangehalt bei den Versuchsansätzen nur geringfügig zueinander unterscheidet.

In den Diagrammen 53 und 54 ist deutlich die geringere Biogasausbeute von Maissilage normal gegenüber der Maissilage Häcksler zu sehen.

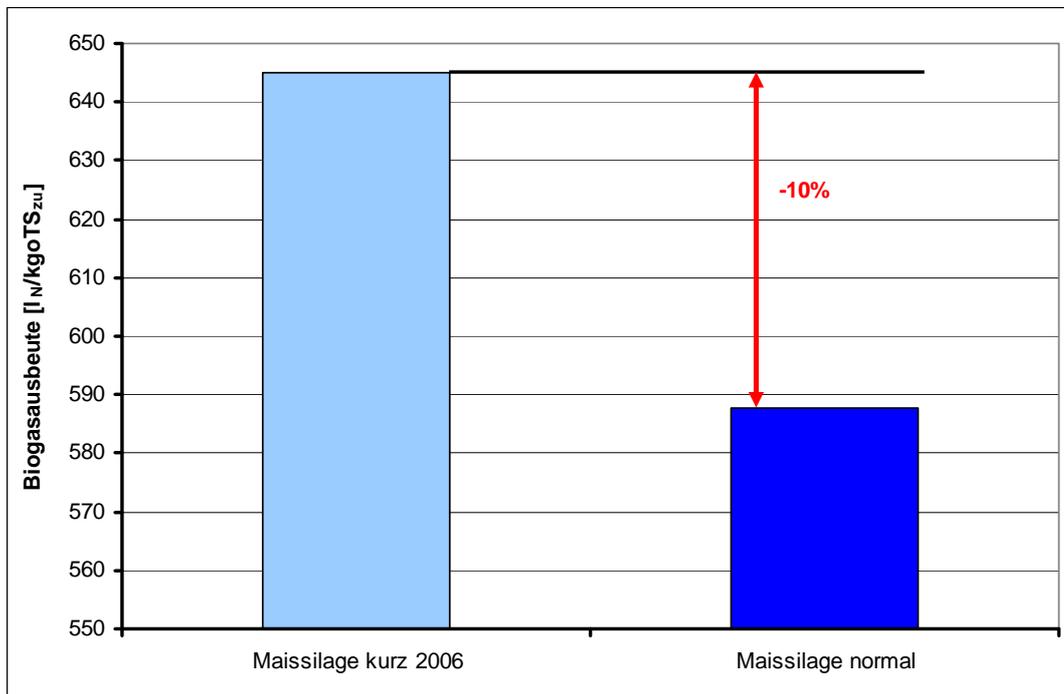


Diagramm 53: Biogasausbeute der Maissilagevergärung im Batch-Versuch nach 30 Tagen

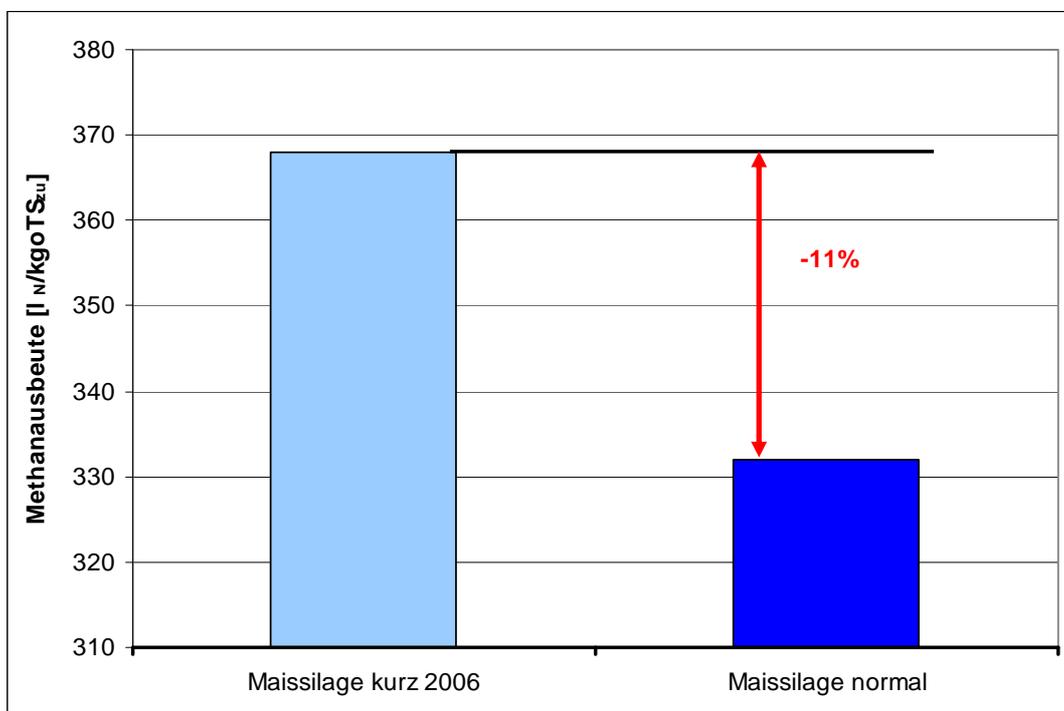


Diagramm 54: Methanausbeute der Maissilagevergärung im Batch-Versuch nach 30 Tagen

5.5 Ergebnisse der Gärversuche durch Enzymzugabe

5.5.1 Maissilage und Grassilage Original/Enzym

In Tabelle 35 sind die Ergebnisse der TS- bzw. oTS-Werte-Bestimmung für die Berechnung des Input-Materials dargelegt. Nach dem Befüllen der Mini-Batch-Fermenter wurde je eine Versuchsreihe Maissilage Original und Grassilage Original mit 10 mg eines Enzyms zusätzlich befüllt und homogenisiert.

Tabelle 35: TS- und oTS-Werte des Impfschlammes und der Substrate

Material	TS [%]	oTS der TS [%]
Impfschlamm	3,30	60,70
Maissilage Original	39,63	95,85
Maissilage Original + Enzym	39,63	95,85
Grassilage Original	35,44	89,66
Grassilage Original + Enzym	35,44	89,66

Von jedem Ansatz aus Impfschlamm und Substrat wurden zu Beginn und am Ende der Versuchsreihen die pH-Werte ermittelt. Aus diesen ermittelten Werten lässt sich die Stabilität eines Prozesses ablesen. Die pH-Werte aus Tabelle 36 zeigen, dass der Verlauf der Versuche im neutralen Bereich ablief und somit keine Prozesshemmung stattfand.

Tabelle 36: pH-Werte vom Gärversuch Ansatz und Abbruch

Material	pH-Wert Ansatz	pH-Wert Abbruch
Impfschlamm	7,88	7,95
Maissilage Original	7,88	7,84
Maissilage Original + Enzym	7,88	7,88
Grassilage Original	7,88	7,46
Grassilage Original + Enzym	7,88	7,81

Zunächst werden die Auswirkungen der mit Enzymen versetzten Maissilage exemplarisch anhand der Biogas- bzw. Methangasbildung näher betrachtet (Diagramme 55 und 56).

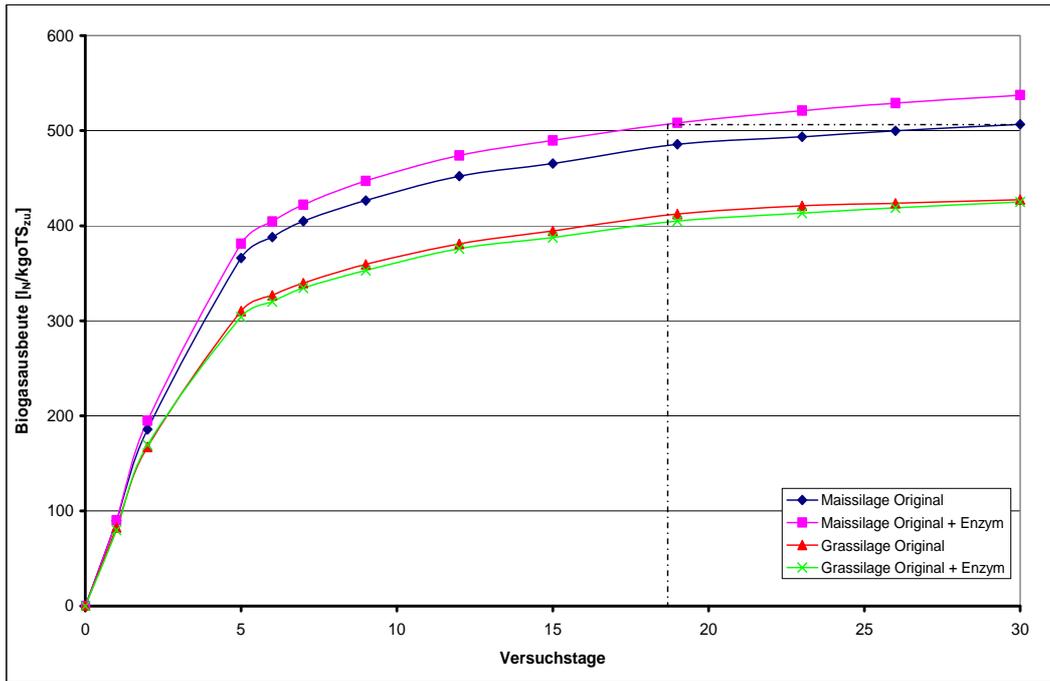


Diagramm 55: Biogasausbeute der Mais- und Grassilage-Vergärung original mit und ohne Enzym

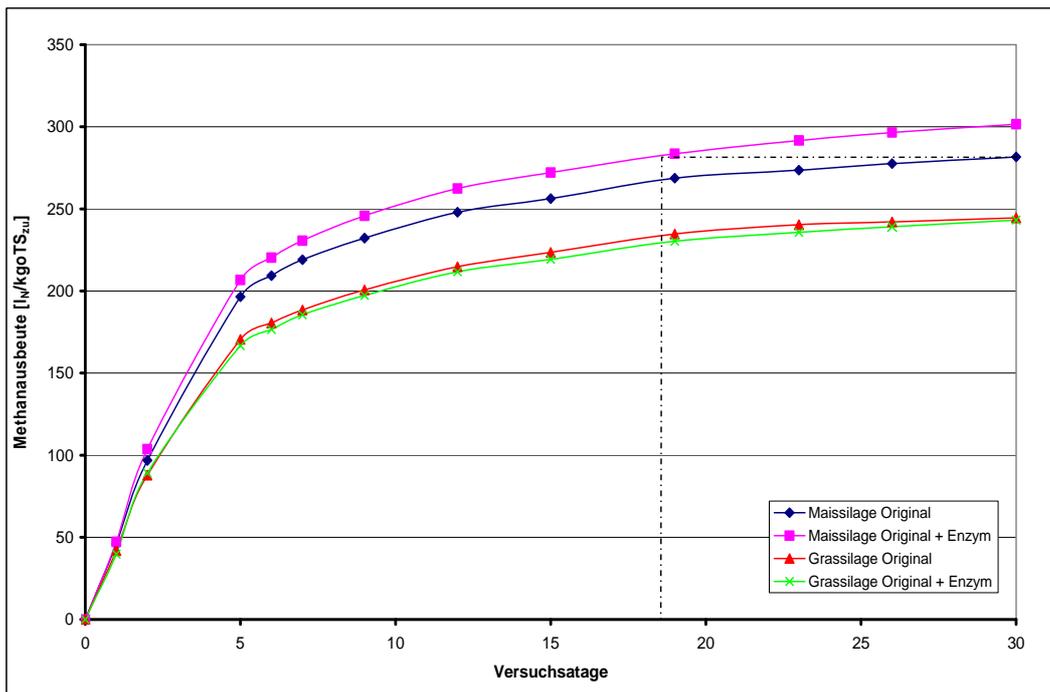


Diagramm 56: Methanausbeute der Mais- und Grassilage-Vergärung original mit und ohne Enzym

Wie in den Diagrammen 55 und 56 veranschaulicht wird, kam es durch die Zugabe von Enzymen zur Maissilage zu einer Steigerung der Biogasausbeute gegenüber der unbehandelten Probe.

Des Weiteren wirkte sich die Zugabe eines Enzyms auf den zeitlichen Verlauf der Biogasproduktion aus. Es konnte dadurch ein schnellerer Anstieg der Biogasausbeute gegenüber dem Originalsubstrat ohne Enzym festgestellt werden. Dadurch wurde bereits ab dem 18. von 30 Versuchstagen der Endwert von Maissilage Original ohne Enzym erreicht (Diagramm 55). Woraus man schließen kann, dass durch die Enzymzugabe die komplexen Strukturen der Biomasse besser aufgeschlossen wurden und somit eine bessere Bioverfügbarkeit gegenüber dem Original vorlag. Beim Substrat Grassilage konnte kein positiver Effekt durch die Zugabe von Enzymen wie bei der Vergärung von Maissilage mit Enzym verzeichnet werden.

Eine Hemmung der Gärprozesse bei allen Kurven ist auf Grundlage des Kurvenverlaufes und des stabilen pH-Wertes bei Versuchsende (Tabelle 36) auszuschließen. Bei beiden Substraten, insbesondere bei Maissilage, wurde keine vollständige Ausfäulung im Versuchszeitraum erreicht. Ein stationärer Kurvenverlauf ist bei allen Versuchsansätzen noch nicht zu verzeichnen.

Auswertung der Gärversuche

Die berechneten Parameter für die Vergärung der Maissilage Original mit und ohne Enzym sind in der folgenden Tabelle 37 zusammengefasst.

Tabelle 37: Berechnete Parameter der Maissilage Vergärungsversuche mit und ohne Enzym

Parameter	Dimension	Maissilage Original Mittelwert	Maissilage Original mit Enzym Mittelwert	Änderung
Biogasausbeute	$l_N/kg \text{ oTS}_{zu}$	506,5	537,3	+ 6 %
Methanausbeute	$l_N/kg \text{ oTS}_{zu}$	281,6	301,6	+ 7%
Methangehalt	%	55,5	56,1	+ 1%

Aus der Tabelle 37 der Versuchsergebnisse von Maissilage Original mit und ohne Zugabe von Enzym ist ersichtlich, dass der durchschnittliche Methangehalt bei dem Versuchsansatz geringfügig zunahm gegenüber dem Originalsubstrat. Dadurch kam es auch zu einer Steigerung der Methanausbeute gegenüber der Biogasausbeute.

Die berechneten Parameter für die Vergärung von Grassilage Original mit und ohne Enzym sind in Tabelle 38 zusammengefasst.

Tabelle 38: Berechnete Parameter der Grassilage Vergärungsversuche mit und ohne Enzym

Parameter	Dimension	Grassilage original Mittelwert	Grassilage mit Enzym Mittelwert	Änderung
Biogasausbeute	$l_N/kg \text{ oTS}_{zu}$	427,5	425,0	- 1%
Methanausbeute	$l_N/kg \text{ oTS}_{zu}$	244,5	243,2	- 0,5%
Methangehalt	%	57,2	57,3	0%

Aus der Ergebnistabelle 38 der Batchversuche mit Grassilage ist ersichtlich, dass es zu keiner Steigerung der Ausbeute gegenüber der Versuchsreihe ohne Enzymzugabe kam. Dies spiegelt sich auch im Methangehalt wider.

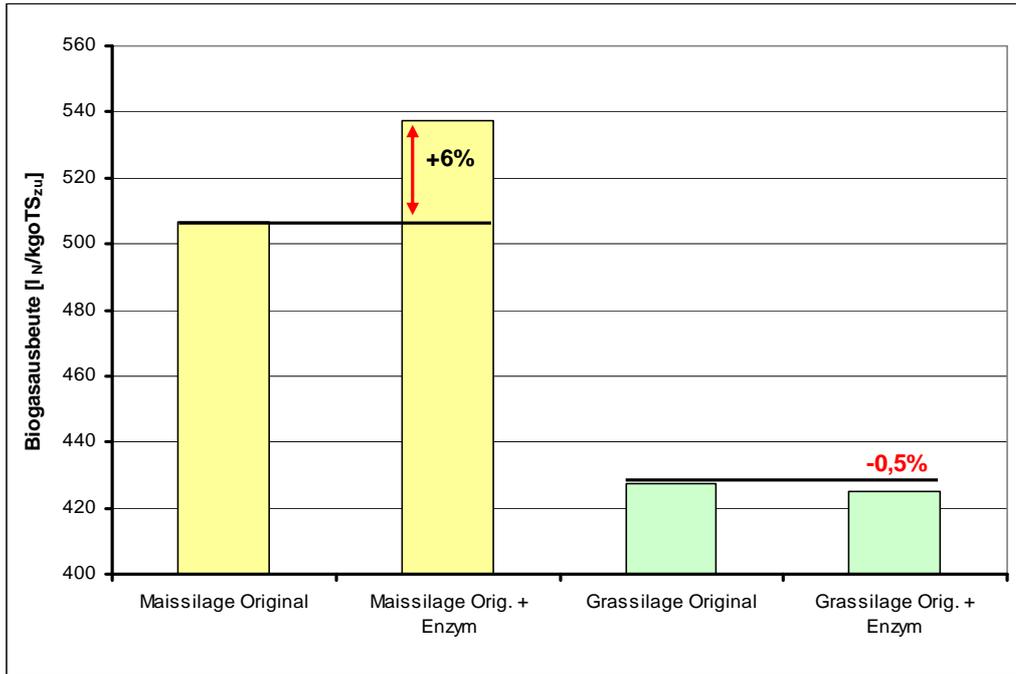


Diagramm 57: Biogasausbeute der Maissilage- und Grassilage-Vergärung im Batch-Versuch mit und ohne Enzymzusatz

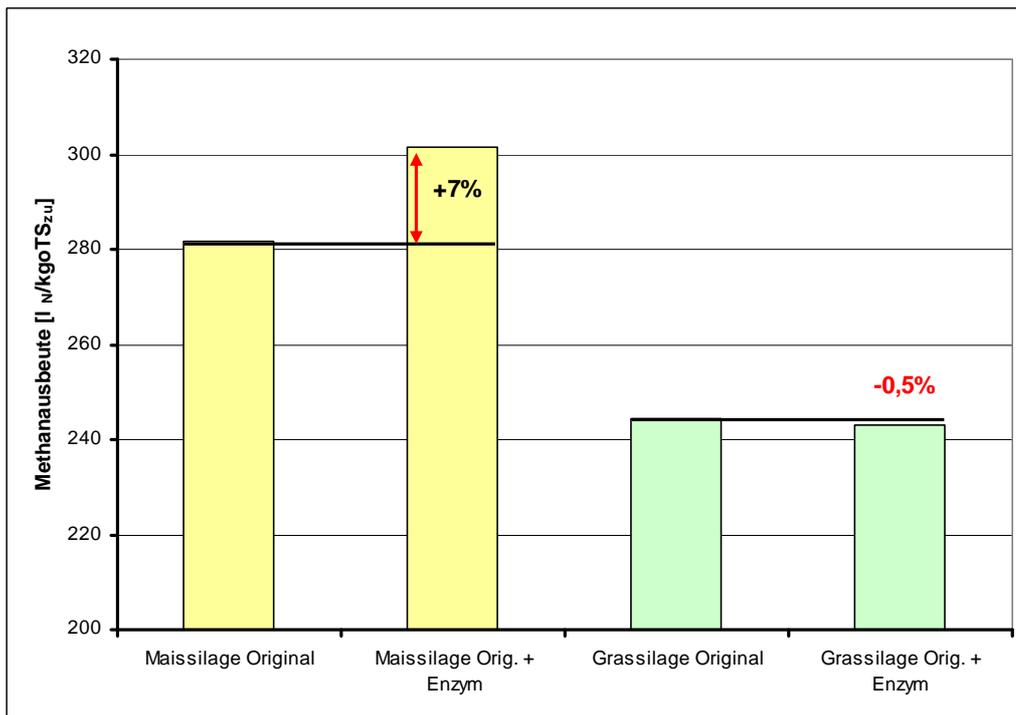


Diagramm 58: Methanausbeute der Maissilage- und Grassilage-Vergärung im Batch-Versuch mit und ohne Enzymzusatz

Aus den Diagrammen 57 und 58 kann man einen positiven Einfluss der Enzymzugabe beim Substrat Maissilage erkennen. Die Ausbeuten der Grassilage Original zur Grassilage mit Enzym blieben zueinander nahezu unverändert. Dies könnte am größeren Ligningehalt in der Grassilage gegenüber der Maissilage liegen.

5.5.2 Maissilage und Grassilage fein aufgearbeitet/Enzym

In Tabelle 39 sind die Ergebnisse der TS- bzw. oTS-Werte Bestimmung für die Berechnung des Input-Materials dargelegt. Nach dem Befüllen der Mini-Batch-Fermenter wurde je eine Versuchsreihe Maissilage fein und Grassilage fein mit 20 mg eines Enzyms befüllt und homogenisiert. Um einen Unterschied zum vorherigen Gärversuch mit Original Substrat und Enzym zu erhalten, wurde in diesem Versuchansatz die Enzymmenge von 10 mg auf 20 mg verdoppelt.

Tabelle 39: TS- und oTS-Werte des Impfschlammes und der aufgearbeiteten Substrate

Material	TS [%]	oTS der TS [%]
Impfschlamm	3,04	58,5
Maissilage fein	35,81	94,76
Maissilage fein + Enzym	35,81	94,76
Grassilage fein	35,37	88,17
Grassilage fein + Enzym	35,37	88,17

Von jedem Ansatz aus Impfschlamm und Substrat wurden zu Beginn und am Ende der Versuchsreihen die pH-Werte ermittelt. Aus diesen ermittelten Werten lässt sich die Stabilität eines Prozesses ablesen. Die pH-Werte aus Tabelle 40 zeigen, dass der Verlauf der Versuche im neutralen Bereich ablief und somit keine Prozesshemmung stattfand.

Tabelle 40: pH-Werte vom Gärversuch Ansatz und Abbruch

Material	pH-Wert Ansatz	pH-Wert Abbruch
Impfschlamm	7,85	7,42
Maissilage fein	7,85	7,23
Maissilage fein + Enzym	7,85	7,21
Grassilage fein	7,85	7,21
Grassilage fein + Enzym	7,85	7,19

Zunächst werden die Auswirkungen der mit Enzymen versetzten Maissilage fein und Grassilage fein gegenüber der unbehandelten Versuchsreihe exemplarisch anhand der Biogas- bzw. Methangasbildung näher betrachtet (Diagramme 59 und 60).

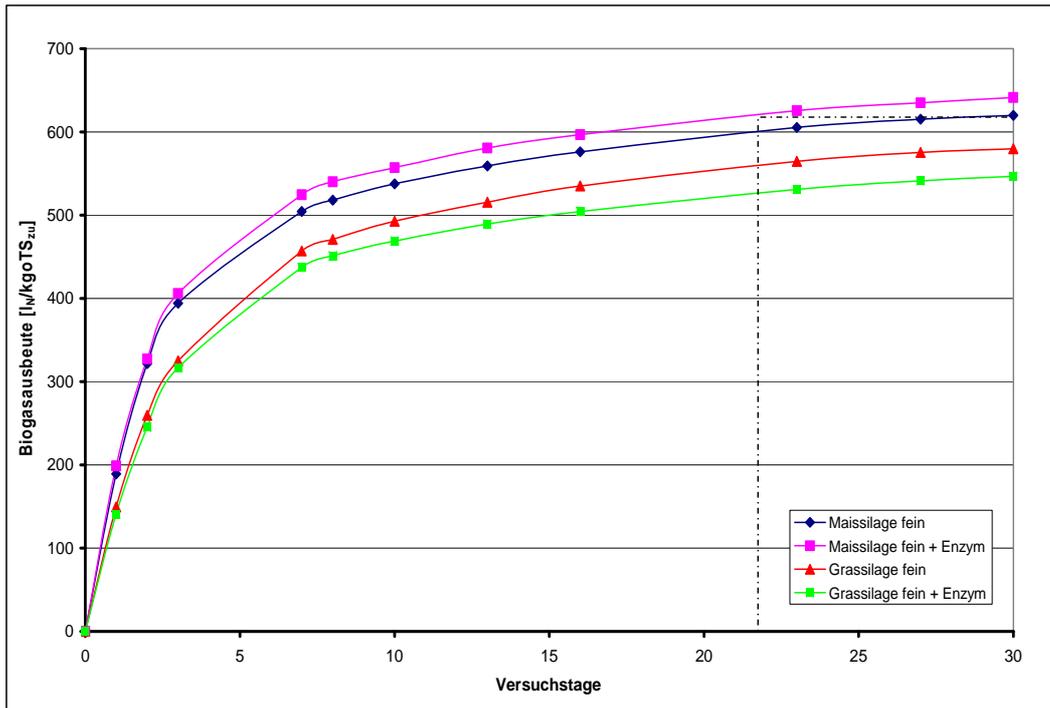


Diagramm 59: Biogasausbeute der Maissilage- und Grassilage-Vergärung fein mit und ohne Enzym

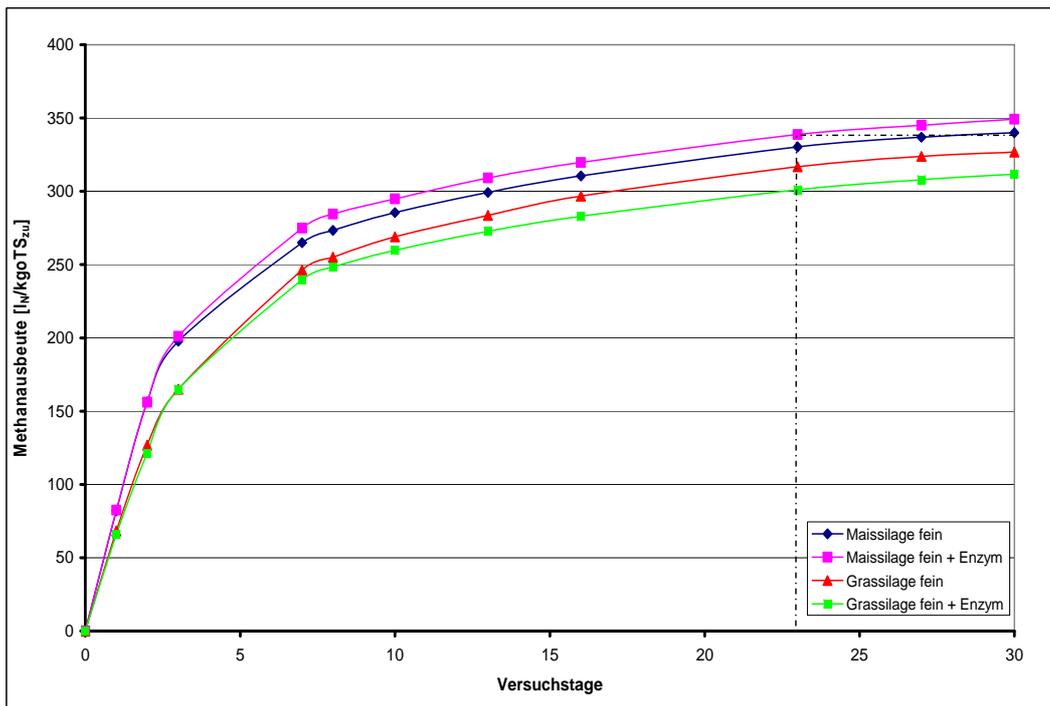


Diagramm 60: Methanausbeute der Maissilage- und Grassilage-Vergärung fein mit und ohne Enzym

Wie in den Diagrammen 59 und 60 veranschaulicht wird, kam es durch die Zugabe von Enzymen beim Substrat Maissilage zu einer nennenswerten Steigerung der Biogasausbeute.

Des Weiteren wirkte sich die Zugabe vom Enzym zum Substrat auf den zeitlichen Verlauf der Biogasproduktion aus. Es konnte dadurch ein schnellerer Anstieg der Biogasausbeute gegenüber dem Substrat ohne Enzymzusatz festgestellt werden. Wodurch bereits am 22. von 30 Versuchstagen der Endwert von Maissilage ohne Enzymzusatz erreicht wurde (Diagramm 59). Hieraus kann man schließen, dass eine bessere Bioverfügbarkeit gegenüber dem unbehandelten Substrat vorlag.

Beim Substrat Grassilage konnte kein positiver Effekt durch die Zugabe von Enzymen wie bei der Vergärung von Maissilage mit Enzym verzeichnet werden. Hier kam es sogar zu einer geringeren Biogasausbeute gegenüber der unbehandelten Substratprobe. Inwieweit dies auf die doppelte Enzymmenge gegenüber der vorherigen Versuchsreihe zurückzuführen ist, lässt sich zum jetzigen Versuchsstand nicht sagen. Hierfür müssten weitere Versuche in diese Richtung durchgeführt werden.

Eine Hemmung der Gärprozesse bei allen Kurven ist auf Grundlage des Kurvenverlaufes und des stabilen pH-Wertes bei Versuchsende (Tabelle 40) auszuschließen. Bei beiden Substraten wurde keine vollständige Ausfäulung im Versuchszeitraum erreicht. Es wurde noch kein stationärer Kurvenverlauf nach 30 Versuchstagen erreicht.

Auswertung der Gärversuche

Die berechneten Parameter für die Vergärung der Maissilage sind in Tabelle 41 zusammengefasst.

Tabelle 41: Berechnete Parameter der Maissilage fein, Versuche mit und ohne Enzym

Parameter	Dimension	Maissilage fein Mittelwert	Maissilage fein mit Enzym Mittelwert	Änderung
Biogasausbeute	$l_N/kg \text{ oTS}_{zu}$	619,3	641,3	4 %
Methanausbeute	$l_N/kg \text{ oTS}_{zu}$	340,0	349,2	3 %
Methangehalt	%	54,8	54,5	- 0,5 %

Aus der Tabelle 41 - Versuchsergebnisse von aufgearbeiteter Maissilage - ist ersichtlich, dass der durchschnittliche Methangehalt bei dem Versuchsansatz unverändert gegenüber dem Originalsubstrat blieb.

Die berechneten Parameter für die Vergärung von Grassilage sind in Tabelle 42 zusammengefasst.

Tabelle 42: Berechnete Parameter der Grassilage fein - Batchversuche mit und ohne Enzym

Parameter	Dimension	Grassilage fein Mittelwert	Grassilage mit Enzym Mittelwert	Änderung
Biogasausbeute	$l_N/kg \text{ oTS}_{zu}$	579,7	546,9	- 7 %
Methanausbeute	$l_N/kg \text{ oTS}_{zu}$	326,8	311,8	- 5 %
Methangehalt	%	56,4	57,0	- 1 %

Aus der Ergebnistabelle der am Extruder aufgearbeiteten Grassilage ist ersichtlich, dass der mittlere Methangehalt fast unverändert blieb.

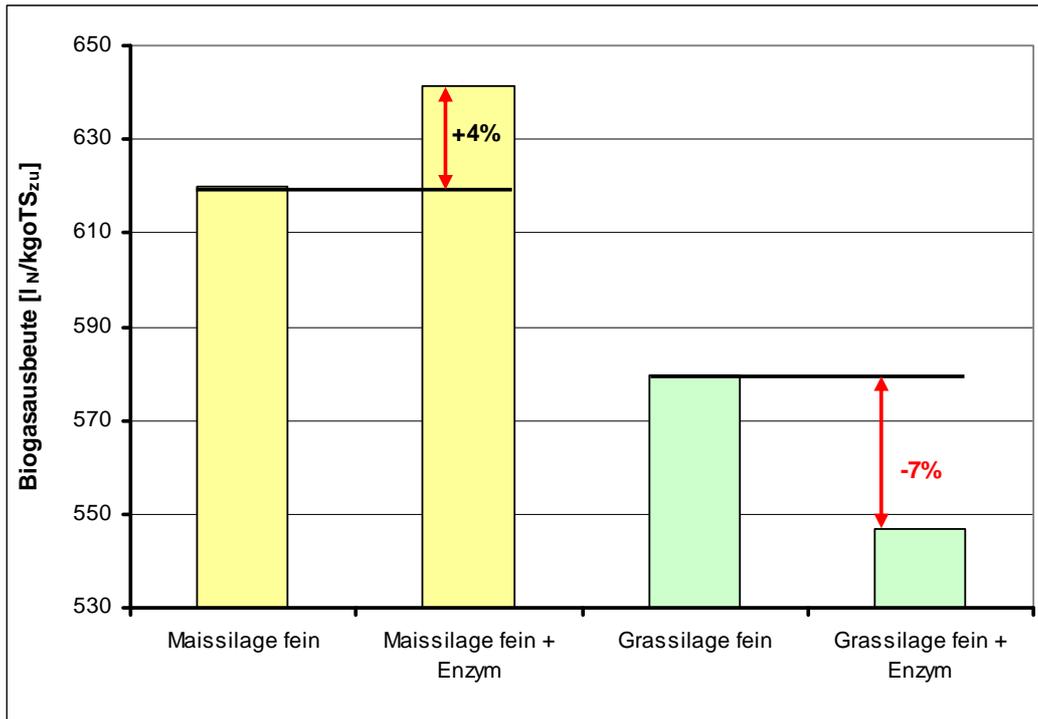


Diagramm 61: Biogasausbeute der Maissilage- und Grassilage-Vergärung im Batch-Versuch fein mit und ohne Enzymzusatz

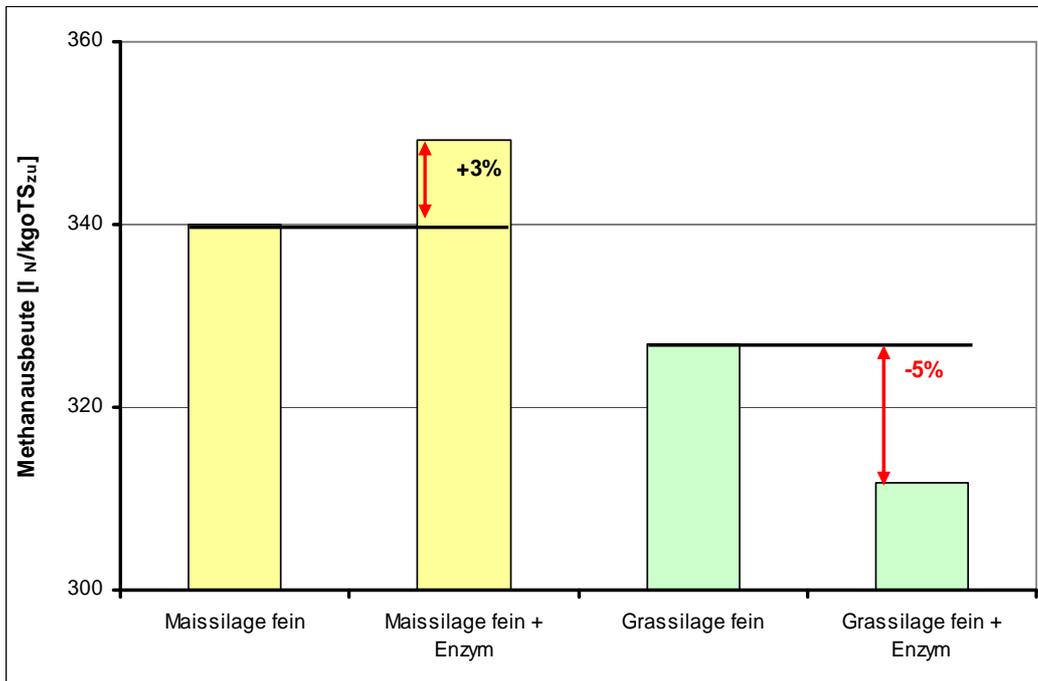


Diagramm 62: Methan ausbeute der Maissilage- und Grassilage-Vergärung im Batch-Versuch fein mit und ohne Enzymzusatz

Aus den Diagrammen 61 und 62 kann man einen positiven Einfluss der Enzymzugabe beim Substrat Maissilage mit feiner Aufarbeitung erkennen. Die Zugabe von Enzym bei aufgearbeiteter Grassilage brachte eine Verringerung der Ausbeuten.

5.6 Kontinuierliche Gärversuche

Die kontinuierlichen Versuche wurden mit ausgefaultem Gärrest aus einer Biogasanlage des Landwirtschaftsbetriebes A gestartet und mit Maissilage des Landwirtschaftsbetriebes B versetzt. Zu Beginn des kontinuierlichen Betriebes wurden die Fermenter mit einer Raumbelastung von $1,7 \text{ kg}_{\text{OTS}}/(\text{m}^3_{\text{FR}} \cdot \text{d})$ gefahren. Diese wurde im Laufe des Versuches schrittweise auf eine Raumbelastung von $3 \text{ kg}_{\text{OTS}}/(\text{m}^3_{\text{FR}} \cdot \text{d})$ erhöht. Die hydraulische Verweilzeit wurde auf 31 Tage eingestellt. Die Gesamtversuchsdauer betrug 123 Tage. Aufgrund der unregelmäßigen Fütterung an den Wochenenden wurde die Versuchsdauer auf 38 Tage bereinigt.

Insgesamt wurden drei Fermenter gleichzeitig bei konstant $37 \text{ }^\circ\text{C}$ betrieben. In Fermenter 1 befand sich Maissilage im Originalzustand, in Fermenter 2 wurde mit einem Extruder aufgearbeitete Maissilage eingesetzt und in Fermenter 3 befand sich ebenfalls aufgearbeitete Maissilage zusätzlich noch mit einem Enzym versetzt. Das folgende Diagramm zeigt einen Überblick über den Versuchsverlauf.

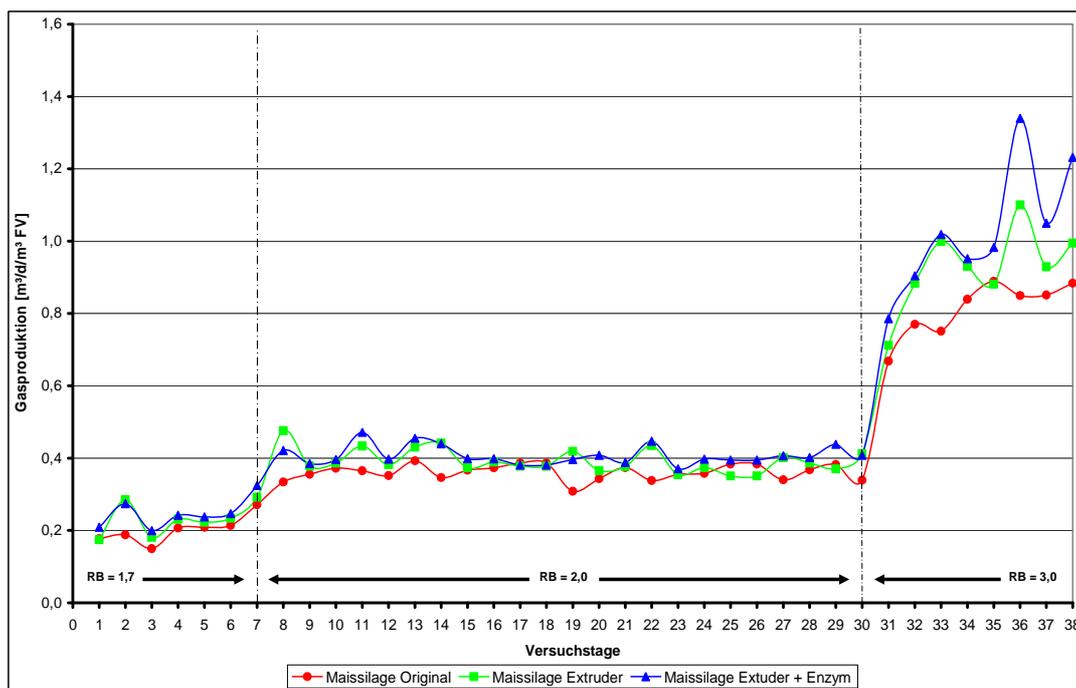


Diagramm 63: Biogasproduktion von Maissilage im kontinuierlichen Versuch

Die Auswertung des stabilen Bereiches bei einer Raumbelastung von $2 \text{ kg}_{\text{OTS}}/(\text{m}^3_{\text{FV}} \cdot \text{d})$ ergab einen Mittelwert für die tägliche Gasproduktion für Maissilage Original von $0,36 \text{ m}^3/(\text{m}^3_{\text{FV}} \cdot \text{d})$, für aufgearbeitete Maissilage im Extruder von $0,39 \text{ m}^3/(\text{m}^3_{\text{FV}} \cdot \text{d})$. Diese wurde durch die tägliche Zugabe von Enzym auf $0,4 \text{ m}^3/(\text{m}^3_{\text{FV}} \cdot \text{d})$ geändert. Ab dem 30. Versuchstag konnten bei einer Raumbelastung von

3 $\text{kg}_{\text{oTS}}/(\text{m}^2_{\text{FV}} \cdot \text{d})$ die Durchschnittswerte für die Gasproduktion bei Maissilage Original auf $0,81 \text{ m}^3/(\text{m}^3_{\text{FV}} \cdot \text{d})$, für Maissilage Extruder auf $0,93 \text{ m}^3/(\text{m}^3_{\text{FV}} \cdot \text{d})$ und Maissilage Extruder + Enzym auf $1,03 \text{ m}^3/(\text{m}^3_{\text{FV}} \cdot \text{d})$ erhöht werden.

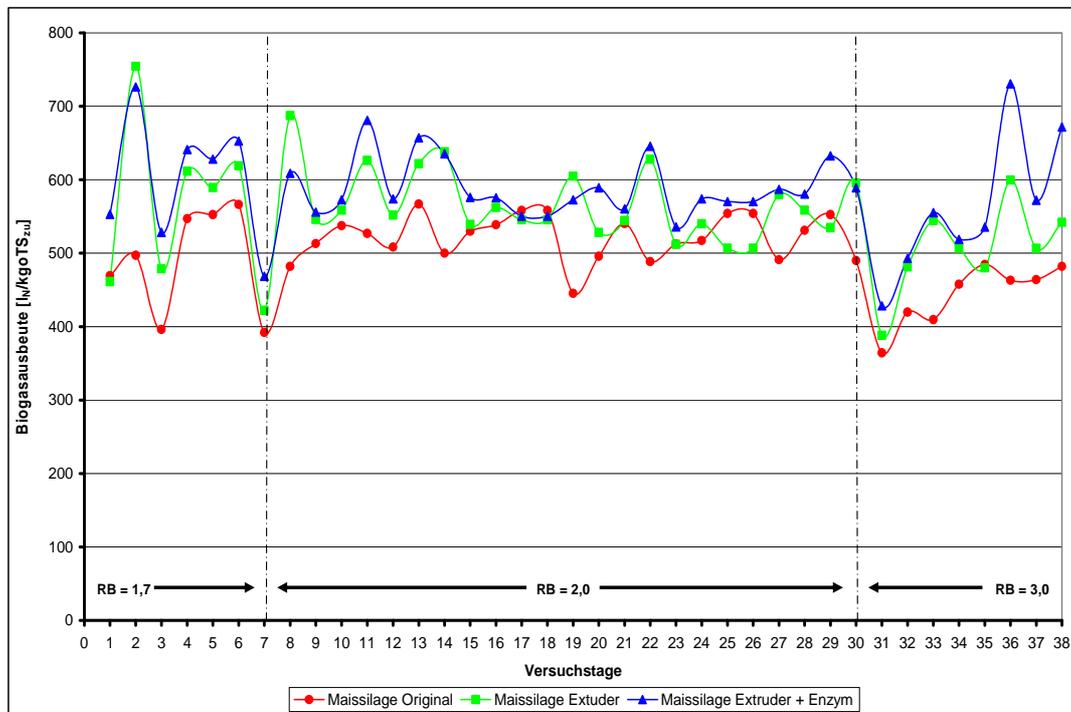


Diagramm 64: Biogasausbeute von Maissilage im kontinuierlichen Versuch

Die durchschnittliche Biogasausbeute (Diagramm 64) über die gesamte Versuchsdauer betrug bei Maissilage Original $498,9 \text{ l}_N/\text{kg}_{\text{oTSzu}}$, bei Maissilage Extruder $553,9 \text{ l}_N/\text{kg}_{\text{oTSzu}}$ und bei Maissilage Extruder + Enzym $585,4 \text{ l}_N/\text{kg}_{\text{oTSzu}}$. Durch die Substrataufarbeitung mittels Extruder konnte die Biogasausbeute um 11 % und mit nochmaliger Enzymzugabe auf 17 % gegenüber dem Originalsubstrat gesteigert werden. Dies bestätigen auch die Batch-Versuche mit Maissilage.

Während der gesamten Versuchsdauer bewegte sich der pH-Wert in allen drei Fermentern konstant zwischen 7,42 und 7,61 und somit im neutralen Bereich. Es kam zu keiner Hemmung des Vergärungsprozesses.

Tabelle 43: Ergebnisse der Ausbeuten aus kontinuierlichen Gärversuchen über die Gesamtdauer

Parameter	Dimension	Maissilage Original Mittelwert	Maissilage Extruder Mittelwert	Maissilage Extr.+Enzym Mittelwert
Biogasausbeute	l _N /kg oTS _{zu}	498,9	553,9	585,4
Methanausbeute	l _N /kg oTS _{zu}	264,4	293,6	316,1
Methangehalt	%	53	53	54
Steigerung	%		+11	+17

6 Betrachtungen zur Wirtschaftlichkeit

In der Praxis bilden Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen die Grundlage zur Entscheidungsfindung über den Bau einer Biogasanlage. In diesem Zusammenhang gestaltet sich eine hinreichend gute Übertragung von in Batch-Versuchen erworbenen Kennwerten auf die in der Praxis üblichen Dimensionen der kontinuierlichen Verfahren recht schwierig. Aus diesem Grund sind die nachfolgenden Betrachtungen aus folgendem Blickwinkel zu sehen:

Im Arbeitspapier Batch-Gärtest VDI 4630 wird davon ausgegangen, dass eine grundsätzliche Bewertung des zu erwartenden Biogaspotenzials von Cofermenten im Labormaßstab möglich ist. Durch einen zumeist ungenügenden Erkenntnisstand zu Adaptationsphänomenen, Synergieeffekten und des Optimierungsbedarfs bei der Prozessführung von biologischen Vorgängen im industriellen Maßstab sind Vorhersagen über den Gasertrag unter Praxisbedingungen sehr unsicher. Daher soll vereinfacht davon ausgegangen werden, dass sich aus den Tendenzen der Versuche im Labormaßstab abschätzen lässt, inwieweit sich eine störungsfreie Mitvergärung von Substraten in der Praxis erwarten lässt.

6.1 Das Erneuerbare-Energien-Gesetz

Um den Anteil erneuerbarer Energien am Strommarkt zu erhöhen, wurde am 01.04.2000 das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) verabschiedet. Es sichert dem Erzeuger von regenerativ gewonnenem Strom eine festgelegte Vergütung für den in das öffentliche Netz eingespeisten Strom durch die Netzbetreiber zu und verpflichtet diese, die Stromabnahme zu ermöglichen und zu vergüten.

Dies gilt auch für die Verstromung von Biogas, sofern die Art der vergorenen Stoffe dies erlaubt. Die auf Grundlage des Gesetzes erlassene Biomassenverordnung legt fest, welche Stoffe dafür verwendet werden dürfen. Die Vergütungssätze unterscheiden sich je nach Herkunft des Energieträgers und der Höhe der erzeugten Leistung.

Entsprechend § 8 des novellierten EEG sind folgende Mindestvergütungen für die Verstromung von Biomasse nach dem 01.06.2004 in Betrieb genommenen Anlagen wirksam:

Tabelle 44 : Vergütung von Strom aus Biogasanlagen nach EEG

Anlagenleistung	Vergütung 2004	Vergütung 2007
bis 150 kW	11,5 Cent/kWh	10,99 Cent/kWh
über 150 kW - 500 kW	9,9 Cent/kWh	9,46 Cent/kWh
über 500 kW - 5 MW	8,9 Cent/kWh	8,51 Cent/kWh
über 5 MW - 20 MW	8,4 Cent/kWh	8,03 Cent/kWh

Die Mindestvergütung wird im Inbetriebnahmejahr 2004 über einen Zeitraum von 20 Jahren garantiert. Des Weiteren gibt es noch die Möglichkeit, aufgrund zusätzlicher Voraussetzungen die Vergütung zu erhöhen.

Tabelle 45: Zusätzliche Vergütungsmöglichkeiten für Strom aus Biogasanlagen

Bonus nach EEG	zusätzliche Vergütung Cent/kWh
NawaRo-Bonus bis 500 kW	6
NawaRo-Bonus bei Anlagen über 500 kW – 5 MW	4
Bonus für die Kraftwärmekopplung	2
Bonus für innovative Verfahren (Technologiebonus) in Verbindung mit KWK-Bonus bis 5 MW	2

Die Mindestvergütungen werden, beginnend mit dem 01.01.2005, jährlich jeweils für ab diesem Zeitpunkt neu in Betrieb genommene Anlagen um jeweils 1,5 Prozent des für die im Vorjahr neu in Betrieb genommenen Anlagen maßgeblichen Wertes gesenkt.

6.2 Ökonomische Wertung der Substratbehandlung

Im Folgenden soll geklärt werden, welche Energieertragssteigerung und -kostensenkung für die Stromproduktion in Abhängigkeit von der Aufbereitung erzielt werden kann. Hierzu wurde ein elektrischer Wirkungsgrad des BHKW von 39 % angenommen.

Aus den gewonnenen Ergebnissen der Gärversuche und den festgelegten Werten ergaben sich für die Stromerzeugung die in Tabelle 46 aufgeführten Steigerungsraten. Darüber hinaus sind in dieser Tabelle die Kosten der Stromerzeugung für die untersuchten Substrate im Original und nach Aufarbeitung enthalten.

Die Bereitstellungskosten für die Substrate frei Silo entstammen Richtwerten der LfL bzw. Kalkulationen sowie der ZMP-Marktberichterstattung (Marktbericht Ost 2007).

Zusatzkosten, die u. a. im Zusammenhang mit der Substrataufbereitung stehen, blieben bei diesen Betrachtungen unberücksichtigt.

Tabelle 46: Substratkosten pro erzeugter kWh_{el} im Original und nach Aufarbeitung

	Substratbereitstellungskosten	Methan- aus- beute	Stromer- zeu- gung ¹⁾	Steigerungs- rate	Substrat- kosten pro er- zeugter kWh _{el} ²⁾
	€/t FM	IN/kg oTSzu	kWh _{el} / t FM	%	Cent / kWh _{el}
Maissilage original	35	298,9	441	-	7,94
Maissilage grob		320,1	472	7,1	7,42
Maissilage fein		340,0	502	13,8	6,97
Maissilage fein + Enzym		349,2	515	16,8	6,80
Grassilage original	70	258,2	319	-	21,94
Grassilage grob		307,8	380	19,1	18,42
Grassilage fein		326,8	404	26,6	17,33
Futterreste original	40	267,6	188	-	21,28
Futterreste fein		302,4	212	12,8	18,87
Luzernesilage original	62	297,5	336	-	18,45
Luzernesilage fein		310,7	351	4,5	17,66
Kleegrassilage original	68	178,2	230	-	29,57
Kleegrassilage fein		177,3	229	-0,5	29,72
Moorgras original	60	207,7	187	-	32,09
Moorgras extrudiert		259,3	233	24,6	25,75
Gerste original	210	413,6	1.399	-	15,01
Gerste grob		448,5	1.517	8,4	13,84
Gerste mittel		487,4	1.649	17,9	12,73
Gerste fein		502,4	1.699	21,4	12,36
Weizen original	210	448,6	1.524	-	13,78
Weizen grob		491,9	1.671	9,6	12,57
Weizen mittel		556,2	1.889	24,0	11,12
Weizen fein		542,6	1.843	20,9	11,39

1) Berechnungsgrundlage:

Stromerzeugung (kWh/t FM) = Methanausbeute (l_N/kg oTS) * kg TS/kg FM * kg oTS/kg TS) / 1000
 * Heizwert Methan * elektrischen Wirkungsgrad BHKW

2) Berechnungsgrundlage:

Substratkosten (Cent/kWh_{el}) = Substratbereitstellungskosten (€/ tFM) / Stromerzeugung (kWh_{el}/t FM)
 Substratbereitstellungskosten ohne Kosten Substrataufschluss

Wie aus Tabelle 46 deutlich wird, konnte durch die mechanische Aufarbeitung bis auf eine Ausnahme bei allen Substraten beim Strom ein Energiemehrertrag (Differenz der jeweiligen Aufarbeitungsstufe zum Original) erzielt werden. Beim Substrat Maissilage können dies je nach mechanischem Aufarbeitungsgrad bis zu 61 kWh_{el} je t Frischmasse sein und bei Grassilage bis zu 85 kWh_{el} je Tonne. Bei der Vergärung von Futterresten kann ein Mehrertrag gegenüber dem Originalsubstrat von 24 kWh_{el} je t erzielt werden. Bei Luzernesilage kann der Energiemehrertrag eine Größenordnung von 15 kWh_{el} je t FM erreichen, beim Substrat Moorgrassilage sogar bis zu 46 kWh_{el}.

Durch die Substrataufarbeitung am Multischroter kann bei Gerste ein Mehrertrag gegenüber dem Originalsubstrat von 300 kWh_{el} je t FM und bei Weizen bis 318 kWh_{el} je t FM erzielt werden.

Demzufolge können die Steigerungsraten für die Stromerzeugung gegenüber dem Originalsubstrat bis zu 26,6 % betragen. Mit diesen Werten kommt ein erhebliches Prozessoptimierungspotenzial hinsichtlich der Effizienzsteigerung zum Ausdruck.

Unter den zugrunde gelegten Annahmen bewegen sich die Substratkosten pro kWh_{el} bei der Maissilage im Originalzustand mit 7,94 Cent/kWh etwa 2 Cent/kWh_{el} über der Größenordnung des Nawa-Ro-Bonus. Durch den Feinaufschluss verringert sich der Betrag auf 6,97 Cent/ kWh_{el}.

In Folge der höheren Kosten für die Substratbereitstellung liegen auch die Kosten pro kWh_{el} bei allen weiter aufgeführten Substraten über denen der Maissilage. Zum Teil beträgt dieser Wert mehr als die Einspeisungsvergütung nach EEG (ca. 16 Cent). Die durch den Substrataufschluss erzielten zusätzlichen Energiemengen bewirken keine grundlegende Änderung dieser Situation.

6.3 Energieeinsatz bei Substrataufarbeitung

Ein weiterer wichtiger Punkt für die Wirtschaftlichkeit einer Substrataufarbeitung ist der Stromeigenbedarf einer solchen Anlage. Um dies praxisnah zu ermitteln, wurde im Zeitraum vom 21.07.2006 bis 15.02.2008 der Eigenstrombedarf der Extruderanlage in einem Landwirtschaftsbetrieb erfasst.

Zur Extruderanlage (Abbildung 27) gehören ein Substratdosierer, ein Substratförderband mit Metallsensor, der Extruder und ein Substratförderband vom Extruder zur Vorgrube.

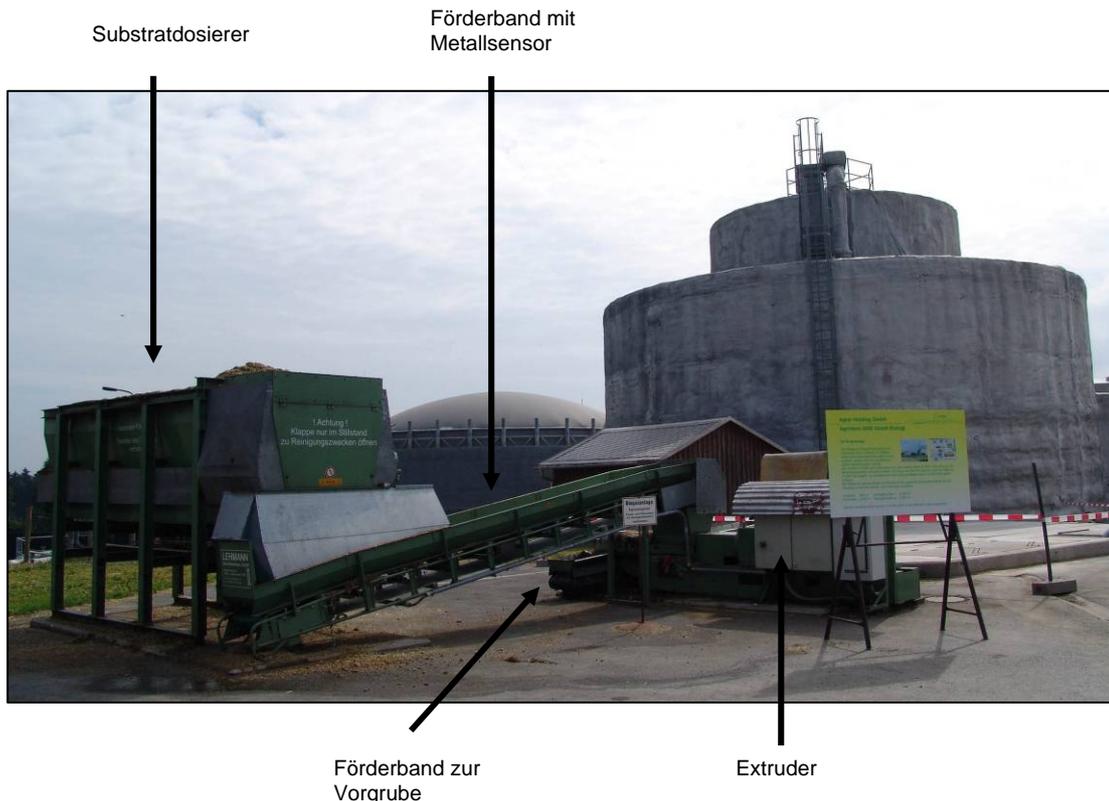


Abbildung 27: Aufbau der Extruderanlage

In dem genannten Zeitraum verbrauchte die Anlage 38 206 kWh und lief 1 916 Stunden. Dies bedeutet eine tägliche Extruderlaufzeit von rund drei Stunden. In dem Landwirtschaftsbetrieb werden täglich 4 t Silage über den Extruder aufgearbeitet. Bei Stromkosten von 16 ct/kWh ergibt das einen Wert von 3,20 € je Stunde.

6.4 Wirtschaftliche Relevanz der Vorbehandlung von Gärsubstraten in Praxisanlagen

Die Wirtschaftlichkeit der Biogaserzeugung ist dann gewährleistet, wenn die erzielten Leistungen die anfallenden Kosten möglichst weit übersteigen. Die Höhe der Leistung hängt dabei maßgeblich von Einflussfaktoren wie Zusammensetzung des Inputmaterials, Methanausbeute, elektrischem Wirkungsgrad des BHKW, Wärmenutzungsgrad und Entsorgungseinnahmen ab.

In die Gesamtkosten fließen die Einzelpositionen Abschreibung, Zinsen, Versicherung, Reparatur, Wartung, Instandhaltung, Betriebsmittel, Energie- und Arbeitskosten ein. Grundlage für die Analyse der Wirtschaftlichkeit der Substrataufbereitung ist die Gegenüberstellung der kalkulierten Leistungen und Kosten der Biogaserzeugung (500 kWh_{el}) mit und ohne Berücksichtigung des Substrataufschlusses (Tabellen 47a und 47b). Als Aufarbeitungsgrad für die Substrate Maissilage und Grassilage wurde „fein“ bzw. bei Moorgrassilage „extrudiert“ gewählt.

Folgende Annahmen liegen den Berechnungen in den Tabellen 47a und 47b zugrunde:

installierte elektrische Leistung	kWh _{el}	500
Wirkungsgrad BHKW	%	39
Arbeitsauslastung BHKW	%	83
Volllaststunden	h /a	7 300
externer Wärmenutzungsgrad ¹⁾	%	14
Investitionskosten		
Biogasanlage	€	1 600 000
Substrataufbereitungsanlage Maissilage	€	100 000
Substrataufbereitungsanlage Grassilage	€	110 000
Substrataufbereitungsanlage Moorgrassilage	€	190 000

Tabelle 47a: Wirtschaftliches Ergebnis bei Vergärung unbehandelter und aufgearbeiteter Maissilage in einer Biogasanlage mit einer installierten elektrischen Leistung von 500 KWh

	Maissilage original	Maissilage fein	Differenz
Inputstoffe (t FM/d)	22,7	19,9	-2,8
(t FM/a)	8.286	7.264	-1022
Hektarerträge (t FM/ha) ²⁾	40	40	
Stromeinspeisung (KWh _{el} /a)	3.648.932	3.648.932	0
KWh_{el}/ t FM	441	502	62,0
Leistungen (€) ³⁾			
Stromeinspeisung	361.974	361.974	0
NawaRo - Bonus	218.936	218.936	0
Bewertung Prozesswärme	57.634	57.634	0
Externe Wärmenutzung	14.985	14.985	0
KWK - Bonus	6.638	6.638	0
Entsorgungseinnahmen	94.335	82.875	-11.460
Leistungen gesamt (€)	754.502	743.042	-11.460
Kosten (€t FM) ⁴⁾			
Abschreibung	100.000	106.250	6.250
Zinsen	39.000	42.000	3.000
Versicherung	6.400	6.800	400
Wartung, Instandhaltung, Betriebsmittel	80.000	85.000	5.000
Prozessenergie (Strom)	46.706	46.706	0
Prozessenergie (Wärme)	57.634	57.634	0
Strom Aufbereitungsanlage	7.3660	22.320	14.954
Arbeitskosten	13.156	12.782	-374
Substratkosten frei Silo	289.625	254.450	-35.175
Kosten Substrattransport	63.082	55.250	-7.832
Sonstige Kosten	16.640	17.680	1.040
Kosten gesamt (€)	719.609	706.872	-12.737
Gewinn / Verlust (€)	32.893	36.170	1.277
(Cent/ KWh_{el})	0,96	0,99	-0,03
(€/ t FM)	4,21	4,98	0,77
(€/ ha)	168	199	30,73

¹⁾ Externer Wärmenutzungsgrad in Anlehnung an die Ergebnisse der Betriebszweiganalyse 2006

²⁾ Hektarertrag: Maissilage - 40 t/ha

Grassilage vom Dauergrünland - 25 t/ha

Moorgrassilage - 30 t/ha (Annahme)

³⁾ Vergütungssätze EEG- Basis 2007, ohne Flächengutschrift für frei werdende Fläche

Wärmevergütung - 0,04 €/KWh

Entsorgungseinnahmen: 15 €/t

4) Abschreibung: 6,25 % der Investitionssumme (AHK); Kapitalverzinsung – 6 % Fremdkapital, 3 % Eigenkapital;

Versicherung: 0,4 % von AHK;

Wartung, Instandhaltung, Betriebsmittel: 5 % von AHK

Prozessenergie (Strom): 8 % der Elektroenergie

Prozessenergie (Wärme): 35 % der Wärme

Berechnungsgrundlage für den Strom der Aufbereitungsanlage: Beispiel Mais "fein":

$$20 \text{ kWh} * 23 \text{ h} * 329 \text{ Tage} = 157.920 \text{ kWh} * 0,16 \text{ €/kWh} = 25.267 \text{ €}$$

Arbeitskosten: Arbeitszeitbedarf nach KTBL - Biogasrechner; 1 h pro Woche mehr für Aufbereitungsanlage angesetzt, 11 €/Akh

Substratkosten frei Silo: Annahmen in Anlehnung an Richtwerte LfL - 35 €/t Maissilage, 70 €/t Grassilage

Ansatz Moorgras: 60 €/t

Kosten Substrattransport: 2,20 €/ m³ vom Silo zur Biogasanlage

3,50 €/ m³ vom Endlager zum Feld

Sonstige Kosten: 1,04 % von AHK

Grundsätzlich wird bei beiden Varianten, der Vergärung unbehandelter als auch aufgearbeiteter Maissilage, ein positives Ergebnis erreicht. Dabei besteht im aufgezeigten Beispiel bei der Originalvariante und der Variante mit Feinaufschluss Gewinngleichheit. Diese Aussage basiert auf Substratbereitstellungskosten frei Silo von 35 €/t Frischmasse (FM). Ein weiterer Anstieg dieser Kostenposition über 40 €/t FM (ermittelter Grenzwert) führt zu einer Gefährdung der Rentabilität der Biogas-erzeugung auf Energiemaisbasis.

Maissilage ist in der Originalform aufgrund ihrer bewährten Gäreigenschaften in der Praxis weit verbreitet. Durch Feinaufschluss von Maissilage wird, wie weiter oben beschrieben, ein zusätzlicher Effekt bzw. Mehrertrag erzielt, der in seiner Höhe ausreichen dürfte, die mit dem Aufschluss verbundenen zusätzlichen Kosten (Kapitalkosten Aufarbeitungsanlage, Stromverbrauch) zu decken.

Darüber hinaus entlastet der infolge der Extrudierung um ca. 1 000 t pro Jahr bzw. 2,8 t pro Tag geringere Bedarf an Maissilage den Substratzukauf.

In Landwirtschaftsbetrieben mit Biogasanlage und eigenen Flächen wird durch die Maisvorbehandlung weniger Anbaufläche für Energiemais benötigt. Bei einem Hektarertrag von 40 t Frischmasse stehen beispielsweise 26 ha zusätzlich für den Anbau von Marktgetreide zur Verfügung. Bei einem erzielbaren Durchschnittsgewinn von 200 €/ha für Getreide entspräche das einer jährlichen Gutschrift von 5 200 €. Bei einem Gewinn von 350 €/ha wäre eine Flächengutschrift von 9 100 € sichergestellt.

Tabelle 47b : Wirtschaftliches Ergebnis bei Vergärung unbehandelter und aufgearbeiteter Silagen vom Dauergrünland und Moorgras aus der Presseler Heide in einer Biogasanlage mit einer installierten elektrischen Leistung von 500 KWh

	Grassilage original	Grassilage fein	Differenz	Moorgras-silage original	Moorgras-silage extrudiert	Differenz
Inputstoffe (t FM/d)	31,3	24,8	-6,5	53,6	42,9	-10,7
(t FM/a)	11.425	9.052	-2373	19.564	15.659	-3.906
Hektarerträge (t FM/ha) ²⁾	25	25		30	30	
Stromeinspeis. (KWh _{el} / a)	3.650.499	3.651.685	1186	3.650.305	3.650.305	0
KWh_{el}/ t FM	319	404	85	187	233	46
Leistungen (€) ³⁾						
Stromeinspeisung	362.247	362.247	0	362.110	362.110	0
NawaRo - Bonus	219.101	219.101	0	219.018	219.018	0
Bewertung Prozesswärme	57.678	57.678	0	57.656	57.656	0
Externe Wärmenutzung	14.996	14.996	0	14.991	14.991	0
KWK - Bonus	6.643	6.643	0	6.641	6.641	0
Entsorgungseinnahmen	128.625	101.820	-26.805	219.960	176.295	-43.665
Leistungen gesamt (€)	789.290	762.485	-26.805	880.376	836.711	-43.665
Kosten (€t FM) ⁴⁾						
Abschreibung	100.000	106.875	6.875	100.000	111.875	11.875
Zinsen	39.000	42.300	3.300	39.000	44.700	5.700
Versicherung	6.400	6.840	440	6.400	7.160	760
Wartung, Instandhaltung, Betriebsmittel	80.000	85.500	5.500	80.000	89.500	9.500
Prozessenergie (Strom)	46.742	46.742	0	46.724	46.724	0
Prozessenergie (Wärme)	57.678	57.678	0	57.656	57.656	0
Strom Aufbereitungsanlage	8.959	27.148	18.189	16.318	49.449	33.131
Arbeitskosten	16.027	14.410	-1.617	23.463	20.482	-2.981
Substratkosten frei Silo	800.100	633.500	-166.600	1.173.000	940.200	-232.800
Kosten Substrattransport	90.297	103.170	12.873	222.870	178.638	-44.232
Sonstige Kosten	16.640	17.784	1.144	16.640	18.616	1.976
Kosten gesamt (€)	1.261.843	1.141.947	-119.896	1.782.071	1.565.000	-217.071
Gewinn / Verlust (€)	-472.553	-379.462	93.091	-901.695	-726.289	173.406
(Cent/ KWh_{el})	-12,94	-10,39	2,55	-24,70	-19,95	4,75
(€ / t FM)	-41,36	-41,92	-0,56	-46,09	-46,51	-0,42
(€ / ha)	-1.034	-1.048	-13,93	-1.383	-1.395	-12,64

Ursächlich begründet durch die geringeren Methan- bzw. Stromerträge sowie die höheren Substratkosten gegenüber Maissilage liegen die ökonomischen Ergebnisse der Varianten mit Gras- und Moorgrassilage deutlich im Verlustbereich. Die Feinzerkleinerung bzw. Extrudierung hat eine Verbesserung der Ergebnisse im Vergleich mit der Originalvergärung zur Folge. Dieser Effekt weist bei der Moorgrassilage gegenüber der Grassilage eine noch deutlichere Ausprägung auf. Während sich das Betriebsergebnis durch die Substrataufbereitung bei Moorgrassilage um 4,75 Ct/KWh_{el} verbessert, beträgt die Verbesserung bei Grassilage etwas mehr als die Hälfte dieses Wertes.

Die durch die Substrataufarbeitung bewirkte Effizienzsteigerung ändert aber nichts an der Situation, dass bei der Vergärung von aufbereiteter Gras- und Moorgrassilage kein Gewinn erzielt werden kann. Während Maissilage in der Praxis auch als Monosubstrat zum Einsatz kommt, werden die Silagen von Gräsern in der Praxis eher als Cosubstrat in Kombination mit Rindergülle eingebracht. In Tabelle 48 wird die Veränderung des ökonomischen Ergebnisses (Gewinn/Verlust) in Abhängigkeit von der Inputzusammensetzung und der Substrataufarbeitung aufgezeigt. Aufgrund seiner geringen Ertragsfähigkeit wurde Moorgrassilage für weitere Darstellungen beispielhaft ausgewählt.

Tabelle 48: Veränderung des wirtschaftlichen Ergebnisses (Gewinn/Verlust) der Biogasproduktion (BGA mit 500 KWh_{el}) in Abhängigkeit von Inputzusammensetzung und Substrataufarbeitung (Beispiel Moorgrassilage)

Bezeichnung Inputmaterial	Inputmenge t Gülle / t FM Moorgras pro Tag	Gewinn/ Verlust Cent/KWh _{el}	Differenz zu Moorgras original Cent/KWh _{el}	Differenz zu 100 % Gülle Cent/KWh _{el}
Moorgras original	0/53,6	-24,25	-	-32,49
Moorgras extrudiert	0/42,9	-20,07	4,18	-28,31
Gülle/Moorgras original	170,2/10	2,19	26,44	-6,05
Gülle/Moorgras extrudiert	170,3/8	2,75	27,00	-5,49
Gülle/Moorgras extrudiert	145,9/13	-0,28	23,97	-8,52
	150,8/12	0,32	24,58	-7,92
	155,7/11	0,93	25,18	-7,31
	160,6/10	1,54	25,79	-6,70
	165,4/9	2,14	26,40	-6,10
	170,3/8	2,75	27,00	-5,49
	175,2/7	3,35	27,61	-4,89
	180,1/6	3,96	28,21	-4,28
	184,9/5	4,57	28,82	-3,67
	189,8/4	5,17	29,43	-3,07
	194,7/3	6,13	30,38	-2,11
	199,6/2	6,73	30,99	-1,51
204,4/1	7,34	31,59	-0,90	
100 % Gülle	209,3/0	8,24	32,50	-

Abgesehen vom negativen ökonomischen Ergebnis bringt eine Vorzerkleinerung von langfaserigem, ligninhaltigem Inputmaterial technologische Vorteile wie die Vermeidung von Schwimmschichten und eine Effizienzsteigerung bezogen auf die erzielbaren Gaserträge.

In Kombination mit Gülle kann vorhandenes Material in geringen Mengen mit eingesetzt werden. Hierbei gilt, je geringer die Beimischung von Grassilagen, umso höher die Gewinnerwartung.

Bei Moorgrassilage liegt der Grenzwert für die maximal der Gülle beizumischende extrudierte Menge bei etwa 12 bis 13 t FM pro Tag. Bei Grassilage vom Dauergrünland beträgt dieser Grenzwert ca. 11 bis 12 t FM pro Tag. Umfangreichere Beimischungen bergen die Gefahr von Verlusten in der Biogasproduktion.

Jede Biogasanlage ist in ihrer Komplexität ein Unikat und bei den aufgezeigten Berechnungen handelt es sich um einen beispielhaften Auszug. Daher wird empfohlen, Wirtschaftlichkeitsberechnungen vor jeder Investitionsentscheidung einzelfallbezogen durchzuführen.

7 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Bei den Untersuchungen zur Steigerung der Biogasbildung durch eine vorgeschaltete Substrataufbereitung wurden verschiedene Silagen und Getreidearten eingesetzt. Diese Substrate kommen in landwirtschaftlichen Biogasanlagen in der Regel als Cosubstrate zur Wirkung. Als Zerkleinerungsaggregate dienten ein Doppelschneckenextruder und ein Multischroter. Darüber hinaus wurde die Wirkung von Enzymen untersucht. Die Zerkleinerung der Materialien im Extruder führte insbesondere bei den Silagen zu einer starken Verringerung der Partikelgröße.

Das Gärverhalten der verwendeten nachwachsenden Rohstoffe wurde in 1 Liter – Mini-Batch Gärtests bestimmt. Für Maissilage im Original wurde unter den gewählten Gärbedingungen eine Biogausbeute von 524 l_N/kg oTS_{zu} (Methanabausbeute - 298,9 l_N/kg oTS_{zu}) nach einer Gärdauer von 30 Tagen erzielt. Diese konnte durch Aufarbeitung im gleichen Untersuchungszeitraum auf bis zu 619 l_N/kg oTS_{zu} (Methanabausbeute - 340 l_N/kg oTS_{zu}) erhöht werden. Der zusätzliche Enzyemeinsatz ergab eine Steigerung auf 641 l_N/kg oTS_{zu} (Methanabausbeute - 349,2 l_N/kg oTS_{zu}) bzw. einen Energiemehrertrag von bis zu 72,6 kWh/t Frischmasse (FM).

Die Zerkleinerung der Grassilage hatte eine Erhöhung der Biogausbeute von 447 l_N/kg oTS_{zu} (Methanabausbeute – 258,2 l_N/kg oTS_{zu}) auf bis zu 579 l_N/kg oTS_{zu} (Methanabausbeute – 326,8 l_N/kg oTS_{zu}) zur Folge. Die Zugabe von Enzymen brachte hier keine weitere Steigerung.

Bei der Grassilage kam es zu einem Energiemehrertrag von bis zu 82,8 kWh/t FM.

Die Zerkleinerung der Futterreste bewirkte eine Erhöhung der Biogausbeute von 503 l_N/kg oTS_{zu} (Methanabausbeute – 267,6 l_N/kg oTS_{zu}) auf 554 l_N/kg oTS_{zu} (Methanabausbeute – 302,4 l_N/kg oTS_{zu}). Hierbei wurde ein Energiemehrertrag von 23,9 kWh/t FM erzielt.

Für Luzernesilage wurde die Biogausbeute mittels Aufarbeitung „fein“ von 486 l_N/kg oTS_{zu} im Original (Methanabausbeute – 297,5 l_N/kg oTS_{zu}) auf 522 l_N/kg oTS_{zu} (Methanabausbeute – 310,7 l_N/kg oTS_{zu}) erhöht und somit ein Energiemehrertrag von 14,6 kWh/t FM erreicht.

Aufgrund der schlechten Silagequalität wurde bei Klee gras keine Ausbeutesteigerung erzielt.

Bei Moorgrassilage konnte durch Extrudierung die Biogausbeute von 335 l_N/kg oTS_{zu} (Methanabausbeute 207,7 l_N/kg oTS_{zu}) auf 431 l_N/kg oTS_{zu} (Methanabausbeute 259,3 l_N/kg oTS_{zu}) und somit um 28,5 % gesteigert werden. Das entspricht einem Energiemehrertrag von 45,3 kWh/t FM.

Die Zerkleinerung von Gerste im Multischroter brachte eine Steigerung von 731 l_N/kg oTS_{zu} (Methanausbeute – 413,6 l_N/kg oTS_{zu}) auf 902 l_N/kg oTS_{zu} (Methanausbeute – 502,4 l_N/kg oTS_{zu}) und somit einen Energiemehrertrag je nach Zerkleinerungsgrad von bis zu 291,9 kWh/t FM.

Für Originalweizen wurde unter den gewählten Bedingungen eine Biogasausbeute von 786 l_N/kg oTS_{zu} (Methanausbeute – 448,6 l_N/kg oTS_{zu}) nach einer Gärdauer von 30 Tagen erzielt. Diese konnte durch Zerkleinerung im gleichen Untersuchungszeitraum auf bis zu 938 l_N/kg oTS_{zu} (Methanausbeute – 542,6 l_N/kg oTS_{zu}) erhöht werden. In Folge ergab sich ein Energiemehrertrag von 356,9 kWh/t FM.

Die erreichten Steigerungsraten in der Stromerzeugung von bis zu 26,6 % bringen ein erhebliches Prozessoptimierungspotenzial zum Ausdruck bzw. verdeutlichen die mögliche Effizienzsteigerung in der Biogaserzeugung.

Die durch Substrataufarbeitung zusätzlich erzielbaren Energiemengen bewirken eine sichtbare Senkung der Substratbereitstellungskosten (frei Silo) pro erzeugter kWh_{el}, d. h. bei Maissilage von 7,94 auf 6,8 Cent/kWh_{el}, bei Grassilage von 21,94 auf 17,33 Cent/kWh_{el}, bei den Futterresten von 21,28 auf 18,87 Cent/kWh_{el}, bei Luzernesilage von 18,45 auf 17,66 Cent/kWh_{el}, bei Moorgrassilage von 32,09 auf 25,75 Cent/kWh_{el}, bei Gerste von 15,01 auf 12,36 Cent/kWh_{el} und bei Weizen von 13,78 auf 11,39 Cent/kWh_{el}.

Im Vergleich mit den Originalsubstraten wurde beim aufgearbeiteten Material eine zügigere Biogasbildung beobachtet. Auf die Gasqualität hatte die mechanische Aufarbeitung keinen nennenswerten Einfluss. Innerhalb der Versuchsdauer von 30 Tagen konnte keine vollständige Ausfäulung des Gärsubstrates erreicht werden. Es sollte angestrebt werden, innerhalb vertretbarer Verweilzeiten für das jeweilige Substrat ein Optimum an Abbauleistung zu erreichen.

Die Analyse der Wirtschaftlichkeit erfolgte auf der Grundlage der Planung und Gegenüberstellung der Biogaserzeugung mit und ohne vorgeschaltete Substrataufbereitung, beispielhaft anhand einer Anlage mit 500 kWh_{el}.

Grundsätzlich gestaltet sich die Biogaserzeugung bei der Vergärung behandelter und unbehandelter Maissilage bis zu einem Grenzwert von 40 €/t Maissilage (frei Silo) rentabel. Dabei besteht im vorliegenden Rechenbeispiel bei der Variante „fein“ und der Originalvariante etwa Gewinnleichheit.

Positiv zu bewerten ist, dass durch die Substrataufbereitung weniger Anbaufläche für Energiemais benötigt wird bzw. Fläche für lohnende Alternativkulturen wie beispielsweise Getreide frei bleibt. Die Effizienzsteigerung bedeutet für den Anlagenbetreiber eine Entlastung beim Substratzukauf. In Landwirtschaftsbetrieben stehen der Nahrungsmittelproduktion zusätzliche Flächen zur Verfügung. Eine rentable Biogaserzeugung ist auf der Basis von Grassilagen (Grassilage vom Dauergrünland sowie Moorgrassilage) aufgrund der hohen Kosten für die Substratbereitstellung nicht realisierbar. Die Rentabilitätsgrenze liegt bei ca. 30 €/t Frischmasse. Diese Größenordnung ist unter den derzeitigen Praxisbedingungen unrealistisch bzw. nicht erreichbar.

Die Substrataufbereitung bewirkt beim Einsatz von Grassilagen in Biogasanlagen eine deutliche Effizienzsteigerung. Der erzielte Energiemehrertrag (bis 26,6 %) bewirkt eine sichtbare Verbesserung des wirtschaftlichen Ergebnisses, reicht aber nicht aus, die Biogaserzeugung aus dem Verlustbereich zu bringen.

In Kombination mit Gülle als Substratmix können vorhandene Grassilagen bis zu einer Menge von ca. 12 t Frischmasse pro Tag (Rentabilitätsgrenze) mit verbraucht werden. Die Gewinnerwartung wird erhöht, je geringer der Cosubstratanteil am Substratmix ist.

Der derzeitige Stand der Technik ermöglicht den zuverlässigen Betrieb von Biogasanlagen. Der erfolgreiche Anlagenbetrieb hängt jedoch maßgeblich vom Kenntnisstand des Betreibers hinsichtlich der in der Biogasanlage ablaufenden biologischen und technischen Prozesse ab.

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchungen zeigen, dass eine geeignete Substrataufarbeitung die Steigerung der Biogasausbeute bzw. Stromerzeugung und damit der Anlageneffizienz bewirken kann. Abgesehen vom ökonomischen Ergebnis bringt eine Vorzerkleinerung von langfaserigem, ligninhaltigem Inputmaterial technologische Vorteile wie beispielsweise die Vermeidung von Schwimmschichten.

Jeder Investitionsentscheidung zur Substrataufbereitung sollten einzelfallbezogene Wirtschaftlichkeitsberechnungen vorausgehen. Die im Bericht aufgezeigte Beispielsrechnung kann dabei als Entscheidungshilfe dienen.

Literaturverzeichnis

Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) vom 01.04.2000; Novelle vom 21.07.2004

Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL); Darmstadt; Faustzahlen
Biogas 2007

Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, Fachbereich Agrarökonomie, Ländlicher Raum;

Dr. Brückner, Claudia; Ergebnisbericht der Betriebszweiganalyse Biogas aus 2006; 06/2008

Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, Fachbereich Agrarökonomie, Ländlicher Raum;
05/2008; Planungsdatenbank

Vergärung organischer Stoffe - VDI-Richtlinie 4630; Düsseldorf, 2006;

Verordnung über die Erzeugung von Strom aus Biomasse (Biomasseverordnung) vom 21.06.2001
(BGBl. I S. 1234), geändert durch VO vom 09.08.2005 (BGBl. I S.2419)

Zentrale Markt- und Preisberichtsstelle Bonn; Marktbericht Ost 2007

Impressum

- Herausgeber:** Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft
August-Böckstiegel-Straße 1, 01326 Dresden
Internet: www.landwirtschaft.sachsen.de/lfl/publikationen/
- Autor:** Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft
Fachbereich Agrarökonomie, Ländlicher Raum
Daniel Weiß, Dr. Claudia Brückner
Leipziger Straße 200
04178 Leipzig
Telefon: 0341 4472-220
Telefax: 0341 4472-314
E-Mail: claudia.brueckner@smul.sachsen.de
- Redaktion:** siehe Autor
- Endredaktion:** Presse- und Öffentlichkeitsarbeit
Anne-Christin Matthies-Umhau, Ramona Scheinert, Matthias Löwig
Telefon: 0351 2612-345
Telefax: 0351 2612-151
E-Mail: anne-christin.matthies@smul.sachsen.de
- ISSN:** 1861-5988
- Redaktionsschluss:** Juli 2008

Für alle angegebenen E-Mail-Adressen gilt:

Kein Zugang für elektronisch signierte sowie für verschlüsselte elektronische Dokumente

Verteilerhinweis

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit herausgegeben. Sie darf weder von Parteien noch von Wahlhelfern zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen.