

## ENDBERICHT

**Weiterentwicklung von Technologien zur effizienten  
Nutzung von Pferdemist als biogener Reststoff und  
Test im Praxisbetrieb**







UNIVERSITÄT HOHENHEIM



**Energetische  
Biomassenutzung**

## **Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie**

### **Endbericht**

#### **Weiterentwicklung von Technologien zur effizienten Nutzung von Pferdemist als biogener Reststoff und Test im Praxisbetrieb**

Förderung durch: **Bundesministerium für Wirtschaft und Energie**

im Rahmen der Förderinitiative „Energetische Biomassenutzung“

unter Betreuung von Projektträger Jülich

Projektleitung: Dr. Hans Oechsner

Projektbearbeitung: Matthias Mönch-Tegeeder

Julian Frey

Förderkennzeichen: 03KB064

Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2011 bis 30.09.2014

Berichtszeitraum: 01.01.2013 bis 30.09.2014



## **INHALTSVERZEICHNIS:**

ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....	VII
TABELLENVERZEICHNIS .....	XII
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS .....	XVIII
1. AUFZÄHLUNG DER WICHTIGSTEN WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHEN ERGEBNISSE UND ANDERER WESENTLICHER ERGEBNISSE .....	21
1.1. AP 1a: Batch-Versuche – Biogas- und Methanertrag.....	27
1.2. AP 2: Untersuchungen zur Aufbereitung, Mischungsverhältnisse und Gärtemperatur.....	36
1.2.1. Mechanische Aufbereitung mittels MEBA Bio-QZ.....	36
1.2.2. Untersuchungen zu Mischungsverhältnissen und Gärtemperatur ...	56
1.3. AP 3: Versuche im Praxismaßstab an der Forschungsanlage .....	71
1.4. AP 4: Datenerhebung an Praxisanlagen .....	109
1.5. AP 5 Messungen im Praxismaßstab .....	111
1.6. AP 6 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung .....	122
2. ARBEITS-, ZEIT- UND KOSTENPLANUNG .....	173
2.1. Änderungsbedarf an der inhaltlichen Ausrichtung des Projektes .....	173
2.2. Änderungsbedarf im Zeitplan .....	173
2.3. Änderungsbedarf im Kostenplan .....	173
2.4. Aktueller Zeitplan .....	174
3. VORHABENSZIELE .....	175
4. FORSCHUNGS- UND ENTWICKLUNGSERGEBNISSE DRITTER .....	175
5. ÄNDERUNG DER ZIELSETZUNG .....	175
6. JÄHRLICHE FORTSCHREIBUNG DES VERWERTUNGSPLANS .....	176
LITERATURVERZEICHNIS .....	183

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Aufbau und Arbeitsweise eines MEBA Bio-QZ (Mewa, 2010).....	37
Abbildung 2:	Innenansicht des Mewa Bio-QZ.....	38
Abbildung 3:	Mewa Bio-QZ an der Forschungsbiogasanlage Unterer Lindenhof.....	38
Abbildung 4:	Spezifischer Methanertrag von Pferdemist mit unterschiedlichen Aufbereitungsintensitäten.....	47
Abbildung 5:	Spezifischer Methanertrage von Maissilage mit unterschiedlichen Aufbereitungsintensitäten.....	47
Abbildung 6:	Spezifische Methanerträge von Silagen mit unterschiedlichen Aufbereitungsintensitäten .....	48
Abbildung 7:	Abbaukinetik von Pferdemist mit unterschiedlichen Aufbereitungsintensitäten. ....	50
Abbildung 8:	Abbaukinetik von Maissilage mit unterschiedlichen Aufbereitungsintensitäten. ....	51
Abbildung 9:	Abbaukinetik von Silagen mit unterschiedlichen Aufbereitungsintensitäten. ....	51
Abbildung 10:	Abbaukinetik von Grassilage mit unterschiedlichen Aufbereitungsintensitäten. ....	52

Abbildung 11: Vergleich der Aufbereitungswerkzeuge im unbenutzten und verschlissenen Zustand. ....	54
Abbildung 12: Spezifischer Methanertrag des mit verschiedenen Ketten aufbereiteten Pferdemistes. ....	55
Abbildung 13: Schema der kontinuierlichen Fermenter .....	57
Abbildung 14: TS- und oTS-Gehalte der verwendeten Substrate .....	60
Abbildung 15: Raumbelastung ( $B_r$ ) der mesophilen Versuchsgruppen .....	61
Abbildung 16: Raumbelastung ( $B_r$ ) der thermophilen Versuchsgruppen ...	61
Abbildung 17: TS- und oTS-Gehalte der Gärsubstrate der mesophilen Versuchsgruppen .....	62
Abbildung 18: TS- und oTS-Gehalte der Gärsubstrate der thermophilen Versuchsgruppen .....	63
Abbildung 19: Essigsäureäquivalent (HAC) der Gärsubstrate der mesophilen Versuchsgruppe über den Versuchszeitraum .....	63
Abbildung 20: Essigsäureäquivalent (HAC) der Gärsubstrate der thermophilen Versuchsgruppe über den Versuchszeitraum	64
Abbildung 21: FOS/TAC-Werte der Gärsubstrate der mesophilen Versuchsgruppe über den Versuchszeitraum .....	64
Abbildung 22: FOS/TAC-Werte der Gärsubstrate der thermophilen Versuchsgruppe über den Versuchszeitraum .....	65
Abbildung 23: pH-Werte der Gärsubstrate der mesophilen Versuchsgruppe über den Versuchszeitraum .....	65

Abbildung 24:	pH-Werte der Gärsubstrate der thermophilen Versuchsgruppe über den Versuchszeitraum .....	66
Abbildung 25:	Täglicher spezifischer Methanertrag der mesophilen Versuchsgruppen über den Versuchszeitraum .....	66
Abbildung 26:	Täglicher spezifischer Methanertrag der thermophilen Versuchsgruppen über den Versuchszeitraum .....	67
Abbildung 27:	Mittlerer spezifischer Methanertrag der mesophilen Versuchsgruppen.....	69
Abbildung 28:	Mittlerer spezifischer Methanertrag der thermophilen Versuchsgruppen.....	70
Abbildung 29:	Forschungsbiogasanlage Unterer Lindenhof .....	71
Abbildung 30:	Aufstellplan des Bio-QZ am Fermenter 1 der Biogasanlage	74
Abbildung 31:	Installierter Bio-QZ am Fermenter 1 der Biogasanlage.....	75
Abbildung 32:	Spezifische tägliche Methanproduktion der beiden Fermenter in der Versuchsphase „ohne Pferdemist“.....	79
Abbildung 33:	Spezifische tägliche Methanproduktion der Fermenter in der 2. Versuchsphase. ....	85
Abbildung 34:	Vergleich des aus den HBT-Ergebnissen berechneten spezifischen Methanertrags und der gemessenen spezifischen Methanproduktion der Fermenter in der 2. Versuchsphase. ....	86

Abbildung 35:	Spezifische tägliche Methanproduktion der Fermenter in der 3. Versuchsphase. ....	90
Abbildung 36:	Spezifische tägliche Methanproduktion von Fermenter 1 in der 4. Versuchsphase. ....	93
Abbildung 37:	Spezifischer Stromverbrauch für die mechanische Substratvorbehandlung durch den Bio-QZ.....	95
Abbildung 38:	Inline-Viskosimeter an der Forschungsbiogasanlage mit den zwei Messstrecken.....	99
Abbildung 39:	Durchschnittliche monatliche Rationszusammensetzung im Fermenter 1. ....	101
Abbildung 40:	Veränderungen der Fließkurven durch die Rationsumstellungen im Fermenter 1. ....	103
Abbildung 41:	Veränderungen der Fließkurven durch verschiedene TS-Gehalte im Fermenter 1.....	105
Abbildung 42:	Prozentualer Unterschied der repräsentativen Viskosität zwischen Fermenter 1 (Bio-QZ) und Fermenter 2 bei unterschiedlichen Scherraten. ....	107
Abbildung 43:	Vergleich der Fließkurven der Gärsubstrate von Fermenter 1 (Bio-QZ) und Fermenter 2 bei unterschiedlichen TS-Gehalten. ....	108
Abbildung 44:	Biogasanlage der Biogas Rott GbR (Novatech, 2011).....	112
Abbildung 45:	Durchschnittliche Anlagenleistung der Biogasanlage Rott im gesamten Untersuchungszeitraum. ....	115

Abbildung 46: Rationszusammensetzung der Biogasanlage Rott [% FM].....	116
Abbildung 47: Systemfließbild BGA I (32% Mistanteil; ohne Aufbereitung) .....	135
Abbildung 48: Systemfließbild BGA II (40% Mistanteil; Aufbereitung durch Mazerator) .....	139
Abbildung 49: Systemfließbild BGA III (33% Mistanteil; Aufbereitung durch Querstromzerspaner).....	143
Abbildung 50: Systemfließbild BGA IV (33% Mistanteil; Aufbereitung durch Bewässerung).....	148
Abbildung 51: Systemfließbild BGA V (27% Mistanteil; Aufbereitung durch Schredder und Kugelmühle) .....	152
Abbildung 52: Systemfließbild BGA VI (3% Mistanteil; kein Pferdemit; keine Aufbereitung) .....	157
Abbildung 53: Systemfließbild BGA VII (Kein Mist; keine Aufbereitung)..	161
Abbildung 54: Kosten der untersuchten Aufbereitungstechniken bezogen auf die jeweilige realisierte Mistmenge .....	167
Abbildung 55: Aufbereitungskosten ausgewählter Aufbereitungstechniken bezogen auf einheitliche Mistdurchsätze auf Grundlage der Daten von Tabelle 61.....	170

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung der Einstreumaterialien .....	28
Tabelle 2: Chemische Zusammensetzung des Pferdekotes .....	29
Tabelle 3: Chemische Zusammensetzung des frischen Pferdemistes.....	29
Tabelle 4: Chemische Zusammensetzung des gelagerten Pferdemistes ..	30
Tabelle 5: Spezifische Methanerträge, Trockensubstanzgehalte und organische Trockensubstanzgehalte der Einstreumaterialien...	31
Tabelle 6: Spezifische Methanerträge, Trockensubstanzgehalte und organische Trockensubstanzgehalte der Pferdäpfel .....	32
Tabelle 7: Spezifische Methanerträge $\text{Nm}^3$ $\text{CH}_4/\text{kg}$ oTS, Trockensubstanzgehalte und organische Trockensubstanzgehalte des frischen Mistes.....	33
Tabelle 8: Spezifische Methanerträge $\text{Nm}^3$ $\text{CH}_4/\text{kg}$ oTS, Trockensubstanzgehalte und organische Trockensubstanzgehalte des gelagerten Mistes .....	33
Tabelle 9: Spurenelementkonzentrationen des frischen strohbasierten Pferdemist im Vergleich zu Maissilage, Grassilage, Rindergülle und Schweinefestmist .....	34
Tabelle 10: Trockensubstanzgehalte, organische Trockensubstanzgehalte und Inhaltsstoffe der im Batchversuch untersuchten Proben ....	43

Tabelle 11: Konzentrationen der flüchtigen Fettsäuren und Alkohole der aufbereiteten und unbehandelten Substrate .....	44
Tabelle 12: Ergebnisse der Partikelgrößenanalyse der untersuchten Substrate.....	45
Tabelle 13: Methangehalte, spezifischer Biogas- und Methanertrag der untersuchten Substrate.....	46
Tabelle 14: Parameter der modifizierten Gompertz-Funktion der einzelnen Substrate.....	49
Tabelle 15: Energieeffizienz der mechanischen Aufbereitung .....	52
Tabelle 16: Methangehalte, spezifischer Biogas- und Methanertrag des mit verschiedenen Ketten aufbereiteten Pferdemistes.....	55
Tabelle 17: Versuchsphasen des kontinuierlichen Fermentationsversuchs.	59
Tabelle 18: Spezifische Gaserträge der Pferdemistproben aus dem HBT-Versuch.....	68
Tabelle 19: Rationszusammensetzung in der ersten Versuchsphase „ohne Pferdemist“.....	76
Tabelle 20: Fütterungsparameter in der ersten Versuchsphase „ohne Pferdemist“.....	77
Tabelle 21: Prozessbiologische Parameter der Fermenter in der ersten Versuchsphase „ohne Pferdemist“.....	77
Tabelle 22: TS- und oTS-Gehalte der Fütterungssubstrate während der Versuchsphase „ohne Pferdemist“.....	78

Tabelle 23: Rationszusammensetzung in der 2. Versuchsphase. ....	80
Tabelle 24: Fütterungsparameter der 2. Versuchsphase. ....	80
Tabelle 25: TS- und oTS-Gehalte sowie spezifische Methanerträge der Fütterungssubstrate in der 2. Verweilzeit der 2. Versuchsphase. ....	81
Tabelle 26: Prozessbiologische Parameter der Fermenter in der 2. Versuchsphase. ....	82
Tabelle 27: Rationszusammensetzung in der 3. Versuchsphase. ....	87
Tabelle 28: Fütterungsparameter in der 3. Versuchsphase. ....	88
Tabelle 29: Prozessbiologische Parameter in der 3. Versuchsphase. ....	88
Tabelle 30: TS- und oTS-Gehalte der Fütterungssubstrate während der 3. Versuchsphase. ....	89
Tabelle 31: Rationszusammensetzung von Fermenter 1 in der 4. Versuchsphase. ....	91
Tabelle 32: Fütterungsparameter von Fermenter 1 in der 4. Versuchsphase. ....	92
Tabelle 33: Prozessbiologische Parameter von Fermenter 1 in der 4. Versuchsphase. ....	92
Tabelle 34: TS- und oTS-Gehalte der Fütterungssubstrate in der 4. Versuchsphase. ....	92

Tabelle 35: Übersicht über die repräsentative Viskosität bei verschiedenen Scherraten sowie des Konsistenzfaktors (K) und des Fließexponenten (n) nach Ostwald-de-Waele im Fermenter 1.	102
Tabelle 36: Übersicht über die repräsentative Viskosität bei verschiedenen Scherraten sowie des Konsistenzfaktors (K) und des Fließexponenten (n) nach Ostwald-de-Waele im Fermenter 1 bei ansteigendem TS-Gehalt.	104
Tabelle 37: Vergleich der repräsentativen Viskosität bei verschiedenen Scherraten sowie des Konsistenzfaktors (K) und des Fließexponenten (n) nach Ostwald-de-Waele zwischen Fermenter 1 und 2.	106
Tabelle 38: TS- und oTS-Gehalte, Methangehalte und spezifische Methanerträge der Pferdemitproben	110
Tabelle 39: Fütterungsparameter der Biogasanlage Rott im Zeitraum August bis Dezember 2012.	114
Tabelle 40: Fütterungsparameter der Biogasanlage Rott im Zeitraum Januar bis Juli 2013.	114
Tabelle 41: Rationszusammensetzung der Biogasanlage Rott [% FM].	116
Tabelle 42: TS- und oTS-Gehalte der Gärsubstrate in Relation zum Anteil des verwerteten Pferdemitstes in der Ration	117
Tabelle 43: Stromverbrauch des Feststoffeintragssystems pro t zugeführter Frischmasse in dem Zeitraum August bis Dezember 2012.	118
Tabelle 44: Stromverbrauch des Feststoffeintragssystems pro t zugeführter Frischmasse in dem Zeitraum Januar bis Juli 2013.	119

Tabelle 45: Mittlere Anlagenleistung und prozentualer Eigenstrombedarf der Einbringtechnik in dem Zeitraum August bis Dezember 2012.	120
Tabelle 46: Mittlere Anlagenleistung und prozentualer Eigenstrombedarf der Einbringtechnik in dem Zeitraum Januar bis Juli 2013. ....	121
Tabelle 47: Spezifische Methanerträge unterschiedlicher Substrate nach KTBL, Uni Hohenheim und LFL (KTBL, 2009A; Mönch-Tegeder et al., 2014; LFL, 2014) .....	124
<i>Tabelle 48: Kennwerte zur Entnahme und zum Transport von Silage zum Vorlagebehälter unter Berücksichtigung unterschiedlicher Entnahmetechniken (KTBL, 2009B).....</i>	<i>130</i>
<i>Tabelle 49: Maschinenkosten zur Beschickung eines Vorlagebehälters bzw. einer Vorgrube (KTBL, 2009C).....</i>	<i>130</i>
<i>Tabelle 50: Beschickungskosten unterschiedlicher Substrate .....</i>	<i>131</i>
<i>Tabelle 51: Übersicht der untersuchten Biogasanlagen unter Berücksichtigung der Aufbereitungstechnik und des eingesetzten Mistanteils .....</i>	<i>133</i>
<i>Tabelle 52: Wirtschaftlichkeitsberechnung BGA I .....</i>	<i>137</i>
<i>Tabelle 53: Wirtschaftlichkeitsberechnung BGA II .....</i>	<i>141</i>
<i>Tabelle 54: Wirtschaftlichkeitsberechnung BGA III .....</i>	<i>145</i>
<i>Tabelle 55: Wirtschaftlichkeitsberechnung BGA IV.....</i>	<i>150</i>
<i>Tabelle 56: Aufbereitungskosten BGA V.....</i>	<i>153</i>
<i>Tabelle 57: Wirtschaftlichkeitsberechnung BGA V.....</i>	<i>155</i>

<i>Tabelle 58: Wirtschaftlichkeitsberechnung BGA VI.....</i>	159
<i>Tabelle 59: Wirtschaftlichkeitsberechnung BGA VII.....</i>	163
<i>Tabelle 60: Übersicht der jeweiligen Kostenersparnisse durch den Einsatz von Gülle und Mist anstatt Silomais.....</i>	166
<i>Tabelle 61: Variable und fixe Kosten ausgewählter Aufbereitungstechniken bei einer jährlichen Einsatzmenge von 1.000 t, 5.000 t und 10.000 t (Jenz GmbH Maschinen- und Fahrzeugbau, 2014; Mönch-Tegeder et al., 2014, Kogel, 2014; Geisberger – Gesellschaft für Energieoptimierung mbH, 2014) .....</i>	169

## Abkürzungsverzeichnis

A	Ampere
ADF	Säure Detergenz-Fasern
ADL	Säure-Detergenz-Lignin
<i>b</i>	Methanpotential
Bh	Betriebsstunde
BHKW	Blockheizkraftwerk
BR	Raumbelastung
°C	Grad Celsius
CH <sub>4</sub>	Methan
cm	Zentimeter
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
Co	Kobald
d	Tag
e	Eulersche Zahl
Fe	Eisen
FM	Frischmasse
g	Gramm
Getreide-GPS	Getreideganzpflanzensilage
h	Stunde
HBT	Hohenheimer Biogasertragstest
HRT	Theoretische hydraulische Verweilzeit
H <sub>2</sub> S	Schwefelwasserstoff
K	Kelvin
k	Konsistenzfaktor
kg	Kilogramm
km	Kilometer
KW	Kalenderwoche
kW	Kilowatt
kW <sub>el</sub>	Kilowatt elektrisch
kW <sub>th</sub>	Kilowatt thermisch
kWh	Kilowattstunde

LAR	Langachsrührwerk
l	Liter
/	Dauer der Lag-Phase
L	Länge
LKW	Lastkraftwagen
M	Kumulativer Methanertrag
mg	Milligramm
min	Minute
ml	Milliliter
mm	Millimeter
mm <sup>2</sup>	Quadratmillimeter
Mn	Mangan
Mo	Molybdän
n	Fließindex
NDF	Neutral-Detergenz-Fasern
Ni	Nickel
Nml	Normmilliliter
Nm <sup>3</sup>	Normkubikmeter
oTS	organische Trockensubstanz
O <sub>2</sub>	Sauerstoff
Δp	Differenzdruck
Pa	Pascal
pH	potentia Hydrogenii
ppm	parts per million
QZ	Querstromzerspaner
Q <sub>D</sub>	Anzahlverteilung
Q <sub>3</sub> (x)	Summenverteilungskurve
Q <sub>3</sub> (x <sub>EQPC</sub> )	Mengenart Masse/Volumen
R	Rohrradius
<i>rb</i>	maximale Methanproduktion
<i>rb'</i>	Zeitpunkt der maximalen Methanproduktion
r	Korrelationskoeffizient
s	Sekunde
SAR	Schrägachsrührwerk

Se	Selen
STD	Standardabweichung
TMR	Tauchmotorrührwerk
t	Tonne
TS	Trockensubstanz
U	Umdrehung
$\dot{V}$	Volumenstrom
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VK	Variationskoeffizient
Vol.-%	Volumenprozent
x	Durchmesser eines Partikels
$\bar{x}$	arithmetischer Mittelwert
XA	Rohasche
XF	Rohfaser
XL	Rohfett
XP	Rohprotein
$x_{EQPC}$	flächenäquivalenter Kreisdurchmesser
$x_{50,0}$	Zentralwert der Mengenangabe Masse
$x_{50,3}$	Zentralwert der Mengenangabe Volumen
ZAS	Zentrale Anlagensteuerung
$\mu\text{m}$	Mikrometer
%	Prozent
$\dot{\gamma}$	Scherrate
$\eta$	Viskosität
$\pi$	pi
$\tau$	Schubspannung

## **1. Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und anderer wesentlicher Ergebnisse**

Die anaerobe Konversion von organischen Materialien zur Erzeugung von Biogas ist ein seit langem bekannter Prozess zur umweltschonenden Behandlung von Abfällen, Abwässern und Reststoffen (Weiland, 2006). Gestützt durch die energiepolitischen Ziele der Bundesregierung und dem daraus resultierenden Gesetz für den Vorrang erneuerbarer Energien (EEG) im Jahr 2000 hat sich die Biogaserzeugung zu einem bedeutenden Wirtschaftszweig in der Bundesrepublik Deutschland entwickelt. So stieg seit Einführung des EEG die Anzahl an Biogasanlagen um ein Vielfaches von ursprünglich 1.050 im Jahre 2000 auf 7.515 Anlagen in 2012 (Fachverband Biogas e.V., 2013). Einen wesentlichen Einfluss auf diesen starken Zubau im Bereich von landwirtschaftlichen Biogasanlagen hatten die Novellierungen des EEG in den Jahren 2004 und 2009 und der damit einhergehenden Förderung des Einsatzes von nachwachsenden Rohstoffen und Wirtschaftsdüngern zur Biogaserzeugung (Weiland, 2010). Dies führte zu einem Anstieg der Anbaufläche für Substrate zur Biogaserzeugung auf 1,157 Mio. ha und entspricht damit ungefähr 10% der in der Bundesrepublik Deutschland verfügbaren Ackerfläche. Dabei ist Maissilage mit einem Anbauumfang von 0,84 Mio. ha der dominierende Einsatzstoff in landwirtschaftlichen Biogasanlagen (Bundesministerium für Ernährung Landwirtschaft und Verbraucherschutz, 2012; Gömann, 2013). Für die Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen und flüssigem Wirtschaftsdünger wurde das kontinuierlich betriebene einphasige Nassfermentationsverfahren im vollaufmischten stehenden Reaktor zum dominierenden Anlagensystem (Lemmer, 2005; Johann Heinrich von Thünen-Institut, 2009; Weiland, 2010).

Jedoch führte der stetige Anstieg der Biogaserzeugung regional zu zunehmenden Akzeptanzproblemen in der Bevölkerung. Besonders kontrovers wird der Anbau von Energiepflanzen diskutiert (Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina, 2012). Hauptargumente sind hierbei der zunehmende Anbau von Mais, einseitige Fruchtfolgen, Veränderungen des Landschaftsbildes und der Flächenverbrauch zur Energieproduktion (Ehrenstein et al., 2013). Zusätzlich wird durch steigende Preise für Agrarrohstoffe die Wirtschaftlichkeit der Erzeugung von Biogas aus nachwach-

senden Rohstoffen verringert. Daher ist die Effizienzsteigerung der Bioenergieerzeugung und Senkung der Substratkosten eine zentrale Herausforderung, um zukünftig wettbewerbsfähig und nachhaltig Energie zu produzieren.

Die Erschließung von Nebenprodukten, Abfall- und Reststoffen bietet die Möglichkeit zur Kostensenkung der Einsatzstoffe und die Landnutzungskonkurrenzen zwischen der Nahrungsmittelproduktion und der Biogaserzeugung zu verringern. Zusätzlich können Stoffkreisläufe geschlossen werden und Nährstoffe für die Pflanzenproduktion bereitgestellt werden. Trotz des Anteils von 43% am Frischmasseeintrag in Biogasanlagen werden die in Deutschland anfallenden Wirtschaftsdüngermengen nicht ausreichend für die Biogaserzeugung genutzt (Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina, 2012; Daniel-Gromke et al., 2013). So wurden 2011 lediglich 12% der vorhandenen Wirtschaftsdüngermengen in Biogasanlagen verwertet. Zu beachten gilt hierbei zusätzlich, dass 90% des verwendeten Wirtschaftsdüngers aus Rinder- und Schweinegülle bestehen und die restlichen 10% aus Festmist, Geflügelmist und Hühnertrockenkot (Daniel-Gromke et al., 2013) Diese Zahlen zeigen deutlich, dass noch erhebliche Mengen an ungenutzten tierischen Reststoffen zur Verfügung stehen (European Renewable Energy Council, 2007). Die anaerobe Konversion von Festmist bietet viele positive Aspekte. So wird eine unkontrollierte Rotte und die damit verbundene Freisetzung von gasförmigen Emissionen sowie die Auswaschung von Nährstoffen in den Boden und das Grundwasser durch die Biogaserzeugung eingeschränkt (Romano et al., 2006). Außerdem wird die Nährstoffverfügbarkeit und Düngewirksamkeit des Festmistes gesteigert (Romano et al., 2006; Appels et al., 2011; Möller and Müller, 2012). Zusätzlich entstehen in der Regel für den Biogasanlagenbetreiber keine Produktionskosten für den Festmist und es kann die benötigte Anbaufläche für Einsatzstoffe verringert werden.

Ein ebenfalls nahezu ungenutztes Substrat stellt Pferdemit dar. In Deutschland werden zurzeit ca. 1 Mio. Pferde gehalten (Deutsche Reiterliche Vereinigung, 2012). Entsprechend den Untersuchungen von Häußermann et al. (2002) muss mit einer anfallenden Mistmenge zwischen 17 und 21 t pro Pferd und Jahr gerechnet werden. Da die Pferde in der Regel auf spezialisierten Betrieben mit einer geringen Flächenausstattung gehalten werden, stellt die Verwertung des produzierten Mistes häufig ein erhebliches Problem dar. Aufgrund des hohen Anteils an Einstreu ist eine Ausbringung auf Grünland ohne ausreichende Rotte nicht möglich. Bedingt durch den

geringen Düngewert des Pferdemistes ist die Verwertung im Pflanzenbau schwierig. Daher ist in vielen pferdehaltenden Betrieben inzwischen ein Verwertungsproblem mit zum Teil erheblichen Entsorgungskosten entstanden (Beck, 2005). Eine energetische Verwertung des Pferdemistes konnte sich trotz des kontinuierlichen Anfalls, der guten Verfügbarkeit und geringer Kosten bis heute nicht etablieren. Ein wesentlicher Grund ist, dass durch rechtliche Beschränkungen im EEG 2004 der Einsatz von Pferdemist in Biogasanlagen zur Vergärung von nachwachsenden Rohstoffen nicht zulässig war (2004). In der novellierten Fassung des EEG im Jahre 2009 wurde Pferdemist in der Positivliste für nachwachsende Rohstoffe eingestuft (2009). In der aktuellen Fassung des EEG aus dem Jahre 2012 ist Pferdemist der Einsatzstoffvergütungsklasse 2 zuzuordnen (2012). Ein weiteres Hindernis bei der Nutzung von Pferdemist in landwirtschaftlichen Biogasanlagen ist dessen heterogene Zusammensetzung. Zusätzlich ist aufgrund der hohen Anteile von faserreichen Einstreumaterialien im Pferdemist mit Trockensubstanzgehalten (TS-Gehalten) von bis zu 50% zu rechnen (Häußermann et al., 2002). Die Verwertung von Pferdemist im Feststofffermentationsverfahren ist Bestandteil verschiedener wissenschaftlicher Arbeiten (Kusch, 2007; Kusch et al., 2008; Cui et al., 2011; Wartell et al., 2012). Nach Kusch et al. (2008) führt die Verwendung von Pferdemist aufgrund der hohen TS-Gehalte schnell zu Verstopfungen von Förderpumpen und Rohrleitungen und ist derzeit nur im Feststoffverfahren möglich. Zusätzlich neigt das langfaserige Einstreumaterial des Pferdemistes zum Aufschwimmen und kann so zu Schwimmschichten im Fermenter führen und die Gasfreisetzung behindern (Hashimoto, 1983; Kalia and Singh, 1998). Des Weiteren haben die hohen TS-Gehalte der Einsatzstoffe einen großen Einfluss auf die Viskosität des Fermenterinhalt und verringern damit die Rührfähigkeit der Substrate (Hartmann et al., 2000; Haeffner et al., 2010). Neben den verfahrenstechnischen Problemen verursachen die hohen Ligningehalte der faserreichen Substrate einen verlangsamten Substratabbau und erfordern hohe Verweilzeiten im Fermenter (Bruni et al., 2010a). Als Lösungsansatz für diese Probleme wird in der Literatur eine Vorbehandlung solch faserreicher Substrate empfohlen (Appels et al., 2011; Bolduan et al., 2011; Fischer et al., 2013). Nach Agbor et al. (2011) sowie Taherzadeh und Karimi (2008) muss eine effektive Substratvorbehandlung für die Biogaserzeugung folgende Ansprüche erfüllen:

- Vermeidung von verfahrenstechnischen Problemen;
- Schaffung von enzymatisch reaktiven Cellulosefasern;
- Kein Verlust von vergärbaren organischen Substanzen;
- Keine Formung von Prozessinhibitoren;
- Geringer Energiebedarf;
- Vermeidung des Einsatzes von Chemikalien;
- Keine Produktion von unverwertbaren Abfallprodukten;
- Geringe Investitions- und Betriebskosten.

Zudem soll die Substrataufbereitung die Abbaueffizienz im Biogasprozess erhöhen. Dies wird erreicht durch eine Steigerung des spezifischen Methanertrags und einer schnelleren Abbaugeschwindigkeit der Einsatzstoffe (Strong et al., 2011). Für die Erreichung dieser Ziele sind viele verschiedene Verfahren beschrieben. Grundsätzlich kann eine Einteilung der wissenschaftlich untersuchten Verfahren in physikalische (mechanisch oder thermisch), chemische und biologische Verfahren vorgenommen werden (Schwarz et al., 2009). Die Effekte der mechanischen Substrataufbereitung resultieren vorrangig in einer Verringerung der Partikelgröße, einer Vergrößerung der Substratoberfläche und einer Verbesserung der Löslichkeit der organischen Bestandteile (Angelidaki and Ahring, 2000; Climent et al., 2007; Hjorth et al., 2011). Durch die thermischen Substratvorbehandlungsverfahren wird ein Aufschluss der Lignin und Cellulose Komplexe und zusätzlich in Kombination mit Druck eine Verringerung der Partikelgrößen erreicht. Jedoch besteht die Gefahr bei zu hohen Temperaturen die Bildung von Hemmstoffen, wie z.B. Phenolen und heterozyklische Verbindungen zu begünstigen (Hendriks and Zeeman, 2008; Bruni et al., 2010b). Bei den chemischen Desintegrationsverfahren werden durch den Einsatz von Säuren, Laugen oder Oxidationsmitteln die schwer vergärbaren Stoffe (Lignin und Hemicellulose) aufgelöst. Wesentlicher Nachteil bei diesen Verfahren ist der Umgang mit Chemikalien, die eine z.T. hohe Korrosivität besitzen und eine Gefährdung für den Anwender darstellen (Carlsson et al., 2012). Bei den biologischen Verfahren werden in der Regel Enzympräparate zur Steigerung der Hydrolysegeschwindigkeit dem Biogasprozess zugeführt. Die Wirksamkeit dieser Produkte ist jedoch umstritten. So konnten Quiñones et al. (2012) deutliche Steigerungen der spezifischen Gasausbeuten durch den Einsatz von Enzymen nachweisen. Auf der

anderen Seite berichteten Brulé et al. (2008) von keinen signifikanten Effekten durch die von den Herstellern empfohlenen Einsatzmengen von Enzympräparaten im einphasigen Biogasreaktor. Es wurde vermutet, dass eine Enzymwirkung nur in einem instabilen und nicht optimal versorgten Prozess nachweisbar ist (Brulé et al., 2008; Schwarz et al., 2009). Die Vorbehandlung und Animpfung mit Pilzsubstraten zählt ebenfalls zu den biologischen Desintegrationsverfahren. In der Regel werden hierbei ligninabbauende Pilze (Klasse Agaricomycetes) unter aeroben Bedingungen verwendet. Aufgrund der langen Einwirkzeiten ist die Wirksamkeit umstritten. Es ist davon auszugehen, dass während der aeroben Lagerung eine hohe Umsetzung von organischer Masse stattfindet (Bruni et al., 2010a)

Bei der genaueren Betrachtung der verschiedenen Desintegrationsverfahren und der verfügbaren Literatur fällt jedoch auf, dass nahezu alle Untersuchungen im Labormaßstab durchgeführt worden sind. Die Anwendbarkeit im Praxismaßstab ist für die thermischen und chemischen Verfahren noch nicht nachgewiesen (Carlsson et al., 2012). Für eine effektive Aufbereitung faserreicher Einsatzstoffe und einen störungsfreien Biogasprozess kommen derzeit nur die mechanischen Desintegrationsverfahren in Betracht (Kianmehr et al., 2010; Bruni et al., 2010a; Lindmark et al., 2012).

Das Ziel dieses Projektes ist die Entwicklung eines optimalen Verfahrenskonzeptes zur Verwertung von Pferdemist, das einen stabilen, verfahrenstechnisch störungsfreien und wirtschaftlichen Betrieb von Biogasanlagen erlaubt. Hierbei ist speziell auch die Untersuchung im Praxismaßstab im Projekt vorgesehen. Zur Erreichung dieser Zielsetzung wurde das Projekt in folgende sechs Arbeitspakete unterteilt:

- Bestimmung des Biogas- und Methanertrags von Pferdemist sowie der Gehalte an Spurennährstoffen und Beurteilung der Umsetzbarkeit der Materialien im Biogasprozess.
- Untersuchungen zu den Effekten der mechanischen Aufbereitung, der optimalen Aufbereitungsintensität und der Prozessstabilität bei der Vergärung von Pferdemist in kontinuierlich betriebenen Biogasfermentern.
- Etablierung eines Verfahrenskonzeptes zur Verwertung von Pferdemist im Praxismaßstab an der Forschungsbiogasanlage Unterer Lindenhof der Universität Hohenheim. Untersuchungen zur mechanischen Aufbereitung von Einsatzstoffen im Großmaßstab.
- Datenerhebung und Verfahrensbewertung zur Pferdemistvergärung an weiteren Biogasanlagen in Baden-Württemberg.
- Messungen an einer privaten landwirtschaftlichen Biogasanlage mit mechanischer Aufbereitung und Pferdemistverwertung.
- Kostenabschätzung und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Nutzung von Pferdemist in Biogasanlagen.

## **1.1. AP 1a: Batch-Versuche – Biogas- und Methanertrag**

### **Zielsetzung**

Um die Möglichkeiten der Nutzung von Pferdemist als Einsatzstoff in Biogasanlagen bewerten zu können sind Kenntnisse über die Zusammensetzung, die Abbaubarkeit und die zu erzielenden Biogas- und Methanerträge notwendig. Aufgrund von verschiedenen Faktoren ersetzen alternative Einstreumaterialien, wie z.B. Sägespäne, in der Pferdehaltung zunehmend die Stroheinstreu. Der Einfluss dieser Materialien auf die Verwertbarkeit des Pferdemistes im anaeroben Prozess ist nicht ausreichend geklärt. Daher war das Ziel in diesem Arbeitspaket die Gaserträge und Abbaubarkeit des Pferdemistes mit unterschiedlichen Einstreumaterialien zu untersuchen. Zusätzlich wurden die Einstreumaterialien und der Pferdekot getrennt voneinander untersucht um die Gasbildungspotenziale der einzelnen Komponenten darzustellen und zu vergleichen.

### **Material und Methode**

Für diese Versuchsanordnung wurden zehn pferdehaltende Betriebe aus dem Großraum Stuttgart ausgewählt. Dabei wurde bei fünf Betrieben ausschließlich Stroh als Einstreumaterial verwendet. Bei den anderen Betrieben wurden Strohpellets, Flachs, Holzpellets und Sägespäne genutzt. Auf jedem Betrieb wurden die frische und unverwendete Einstreu sowie der Pferdekot separat erfasst. Zusätzlich wurde frischer Mist aus dem Stall und gelagerter Mist gesammelt. Für die Bestimmung der Gehalte an Makro- und Mikronährstoffe des frischen strohhaltigen Pferdemistes wurden tiefgefrorene Proben an das AnalySELabor der IS Forschungsgesellschaft (Wahlstedt, Deutschland) gesendet. Für die weiteren Untersuchungen wurden alle eingesammelten Proben für 48 h bei 60 °C getrocknet und anschließend gemahlen. Dadurch konnte ein homogenes Probenmaterial für die folgenden Untersuchungen geschaffen werden. Die Biogas- und Methanerträge wurden mittels Hohenheimer Biogasertragstest (HBT) entsprechend der VDI-Richtlinie 4630 (VDI-Gesellschaft Energietechnik, 2006) ermittelt und als Normliter bezogen auf 1013 hPa und 0° C angegeben. Der HBT wurde bei  $37,0 \pm 0,5^\circ \text{C}$  über 35 Tage durchgeführt. Die Bestimmung der Trockensubstanz- (TS) und organische Trockensub-

stanzgehalte (oTS) wurden nach den Vorgaben des Verbandes Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten e.V. (VDLUFA, 2007) durchgeführt. Die Bestimmung der Rohnährstoffe entsprechend der Weender Futtermittelanalyse und der Faserbestandteile nach der Methode van Soest wurde von der Landesanstalt für landwirtschaftliche Chemie der Universität Hohenheim durchgeführt.

### Chemische Zusammensetzung

Die Zusammensetzung der verschiedenen Einstreumaterialien sind in Tabelle 1 aufgeführt. Die Betriebe A bis F verwenden Stroh als Einstreumaterial. Der durchschnittliche ADL-Gehalt dieser Einstreumaterialien beträgt  $76,0 \pm 14,4$  g / kg TS. Einen deutlich höheren ADL-Gehalt hat das Flachsstroh mit 210 g / kg TS. Erwartungsgemäß wurden bei der Betrachtung der Einstreumaterialien die höchsten ADL-Gehalte für die holzigen Materialien detektiert. Das C/N-Verhältnis vom Stroh zeigte eine sehr große Variationsbreite ( $68 \pm 28$ ). Das höchste C/N-Verhältnis wurde wiederum bei den holzigen Materialien festgestellt. Im Vergleich zu dem für die Vergärung optimalen C/N-Verhältnis von 20 bis 30 liegen (Weiland, 2010) die detektierten Ergebnisse von den Einstreumaterialien weit außerhalb dieses Bereiches.

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung der untersuchten Einstreumaterialien

Betrieb	Einstreu	C/N	XP	XL	XF	NDF	ADF	ADL	NfE
		Verhältnis	[g/kg TS]						
A	Stroh	42.6	54.0	9.10	415.0	747.0	502.0	88.0	366.6
B	Stroh	96.5	25.0	12.0	442.0	805.0	553.0	67.0	365.9
C	Stroh	53.6	29.0	12.0	457.0	797.0	528.0	96.0	363.4
D	Stroh	105.6	26.0	10.0	421.0	778.0	530.0	74.0	382.2
E	Stroh	39.3	52.0	12.0	397.0	728.0	467.0	75.0	348.0
F	Stroh-pellets	69.6	36.0	8.50	346.0	753.0	443.0	56.0	464.6
G	Stroh/Flachs	57.5	65.0	11.0	464.0	762.0	395.0	119.0	100.6
H	Flachs	85.0	27.0	7.70	592.0	829.0	657.0	210.0	220.7
I	Holz-pellets	722.6	n.a.	n.a.	624.0	839.0	684.0	228.0	n.a.
J	Säge-späne	642.9	n.a.	8.70	651.0	862.0	719.0	238.0	n.a.

Die ADL-Gehalte des Pferdekotes lagen in dieser Untersuchung bei durchschnittlich  $95,2 \pm 1,1$  g / kg TS. Die C/N-Verhältnisse im Pferdekot sind jedoch deutlich enger als in den Einstreumaterialien ( $30 \pm 5$ ).

Tabelle 2: Chemische Zusammensetzung des untersuchten Pferdekotes

Be- trieb	C/N	XP	XL	XF	NDF	ADF	ADL	NfE
	Verhält- nis	[g/kg TS]						
A	29.94	74.00	29.00	334.00	668.00	456.00	100.00	378.80
B	23.57	117.00	41.00	282.00	615.00	432.00	92.00	333.70
C	23.71	96.00	30.00	333.00	681.00	462.00	92.00	317.90
D	37.11	75.00	26.00	369.00	710.00	465.00	87.00	393.70
E	22.64	83.00	18.00	344.00	673.00	446.00	88.00	335.70
F	32.66	77.00	31.00	337.00	673.00	458.00	104.00	396.20
G	27.12	79.00	32.00	346.00	701.00	430.00	82.00	389.60
H	36.57	70.00	22.00	361.00	708.00	496.00	117.00	381.00
I	32.78	68.00	20.00	350.00	720.00	433.00	91.00	383.80
J	29.59	85.00	37.00	344.00	687.00	449.00	99.00	404.60

Die Untersuchungsergebnisse des frischen Mistes zeigen, dass durch die Nutzung und Vermischung mit Ausscheidungen der Tiere ein Anstieg der vergärbaren Substanzen bei den alternativen Einstreumaterialien stattfindet. Bei der Betrachtung des gelagerten Mistes, ist einer deutliche Verringerung der organisch abbaubaren Materialien erkennbar.

Tabelle 3: Chemische Zusammensetzung des frischen Pferdemistes

Be- trieb	Ein- streu	C/N	XP	XL	XF	NDF	ADF	ADL	NfE
		Verhält- nis	[g/kg TS]						
A	Stroh	27.1	72.0	12.0	372.0	714.0	482.0	87.0	367.4
B	Stroh	40.1	52.0	16.0	427.0	745.0	529.0	105.0	309.5
C	Stroh	29.1	71.0	18.0	380.0	712.0	470.0	75.0	385.8
D	Stroh	35.5	61.0	13.0	381.0	732.0	479.0	69.0	395.7
E	Stroh	22.6	60.0	15.0	399.0	743.0	480.0	83.0	398.2
F	Stroh- pellets	33.1	73.0	18.0	358.0	719.0	490.0	101.0	389.9
G	Stroh/ Flachs	22.8	59.0	18.0	379.0	735.0	489.0	77.0	404.0
H	Flachs	26.1	72.0	27.0	349.0	708.0	492.0	107.0	355.1
I	Holz- pellets	37.8	74.0	13.0	443.0	757.0	560.0	170.0	333.0
J	Säge- späne	38.5	54.0	10.0	499.0	799.0	580.0	157.0	309.0

Tabelle 4: Chemische Zusammensetzung des gelagerten Pferdemistes

Be- trieb	Einstreu	C/N	XP	XL	XF	NDF	ADF	ADL	NfE
		Verhält- nis	[g/kg TS]						
A	Stroh	25.6	83.0	16.0	413.0	725.0	529.0	117.0	324.3
B	Stroh	38.0	61.0	14.0	446.0	731.0	568.0	127.0	260.6
C	Stroh	41.9	63.0	7.80	445.0	748.0	571.0	116.0	334.0
D	Stroh	35.0	74.0	6.70	360.0	742.0	575.0	149.0	354.6
E	Stroh	30.2	76.0	11.0	385.0	727.0	544.0	130.0	343.1
G	Stroh/ Flachs	46.3	60.0	18.0	403.0	761.0	517.0	94.0	384.3
H	Flachs	21.1	69.0	23.0	409.0	726.0	535.0	142.0	303.7
I	Holz-pel- lets	23.6	78.0	8.60	388.0	681.0	527.0	167.0	273.2
J	Säge- späne	29.8	71.0	n.a.	542.0	754.0	671.0	231.0	n.a.

### Anaerobe Abbaubarkeit und spezifische Methanerträge

Die Ergebnisse der Untersuchungen der Einstreumaterialien sind in Tabelle 5 dargestellt. Die Betriebe A bis E haben ausschließlich Gersten- und Weizenstroh zur Einstreu verwendet. Das Stroh hatte einen mittleren TS-Gehalt von  $87,6 \pm 4,0$  %. Der spezifische Methanertrag der Stroheinstreu betrug nach 35 Tagen Versuchsdauer durchschnittlich  $0,207 \pm 0,020$  Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> / kg oTS. Der spezifische Methanertrag der Strohpellets von Betrieb F lag oberhalb der Erträge des Strohs mit  $0,247$  Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> / kg oTS. Bei Betrieb G wurde ein Gemisch von Stroh und Flachs zur Einstreu verwendet. Hier zeigt sich zum einen ein niedriger TS-Gehalt von  $72,7$  %. Dies ist auf eine nicht optimale Lagerung der Einstreu auf diesem Betrieb zurückzuführen. Der spezifische Methanertrag war mit  $0,156$  Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> / kg oTS auch deutlich niedriger als bei der Stroheinstreu. Noch geringer war der spezifische Methanertrag der Flachseinstreu von Betrieb H mit  $0,067$  Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> / kg oTS. Die spezifischen Methanerträge der holzigen Einstreumaterialien waren erwartungsgemäß am geringsten mit  $0,021$  Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> / kg oTS bei den Holzpellets und  $0,017$  Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> / kg oTS für die Sägespäne.

Tabelle 5: Spezifische Methanerträge, Trockensubstanzgehalte und organische Trockensubstanzgehalte der Einstreumaterialien

Betrieb	Einstreu	TS	oTS	Spezifischer Methanertrag	Variationskoeffizient
		[% FM]	[% FM]	[Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg oTS]	[%]
A	Stroh	81,77	75,61	0,214	1,82
B	Stroh	89,50	83,93	0,237	2,36
C	Stroh	90,57	85,47	0,203	0,55
D	Stroh	90,98	85,12	0,183	4,16
E	Stroh	85,32	80,54	0,200	2,48
F	Strohpellets	90,03	85,14	0,247	2,14
G	Stroh/Flachs	72,69	67,76	0,156	1,33
H	Flachs	85,05	83,21	0,067	1,31
I	Holzpellets	89,32	87,45	0,021	11,30
J	Sägespäne	83,20	82,90	0,017	12,51

In Tabelle 6 sind die Ergebnisse der Analysen des Pferdekotes dargestellt. Die Pferdeäpfel wurden bei dieser Untersuchung direkt aus den Pferdeboxen entnommen um einen unkontrollierten weiteren Abbau der organischen Materialien des Kotes auszuschließen. Die TS-Gehalte des Pferdekotes liegt durchschnittlich bei  $23,5 \pm 2,0$  %. Der mittlere spezifische Methanertrag aller untersuchten Pferdeäpfel lag bei  $0,171 \pm 0,014$  Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> / kg oTS. Aus diesen Ergebnissen lässt sich jedoch kein Bezug zwischen der Nutzungsintensität der Pferde und dem Methanertrag der Pferdeäpfel darstellen. Jedoch sind die Methanerträge der Pferdeäpfel tendenziell niedriger als die Methanerträge des Strohs.

Tabelle 6: Spezifische Methanerträge, Trockensubstanzgehalte und organische Trockensubstanzgehalte der Pferdäpfel

Betrieb	TS	oTS	Spezifischer Methanertrag	Variationskoeffizient
	[% FM]	[% FM]	[Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg oTS]	[%]
A	23,19	20,51	0,176	1,73
B	21,53	18,22	0,173	0,68
C	22,84	18,92	0,163	5,97
D	22,87	20,71	0,191	3,45
E	20,67	18,85	0,175	2,98
F	26,60	23,47	0,179	1,04
G	23,30	21,10	0,187	0,85
H	22,75	20,18	0,151	0,48
I	23,51	21,46	0,161	5,36
J	27,30	24,72	0,153	1,98

Die Untersuchung des frischen Pferdemistes im HBT zeigte, dass zwischen der Stroheinstreu und dem Pferdemist aus diesem Material kein deutlicher Unterschied besteht (Tabelle 7). So lag der mittlere spezifische Methanertrag dieser Proben bei  $0,191 \pm 0,02 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 / \text{kg oTS}$ . Das gleiche Ergebnis zeigte der frische Mist basierend auf Strohpellets. Jedoch ist dieser Wert deutlich niedriger als der spezifische Methanertrag der unbenutzten Strohpellets. Durch die feine Partikelstruktur und die feuchten Bedingungen im Stall entsteht anscheinend ein Verlust an organischer Substanz. Ein deutlicher Anstieg der spezifischen Methanerträge wurde bei den alternativen Einstreumaterialien beobachtet. Trotzdem liegen die spezifischen Methanerträge dieser Mistvarianten unterhalb der Werte des strohbasierten Pferdemistes.

Tabelle 7: Spezifische Methanerträge  $\text{Nm}^3 \text{CH}_4/\text{kg oTS}$ , Trockensubstanzgehalte und organische Trockensubstanzgehalte des frischen Mistes

Betrieb	Einstreu	TS	oTS	Spezifischer Methanertrag	Variationskoeffizient
		[% FM]	[% FM]	$[\text{Nm}^3 \text{CH}_4/\text{kg oTS}]$	[%]
A	Stroh	53,38	46,65	0,180	6,17
B	Stroh	36,27	31,94	0,164	1,81
C	Stroh	51,58	46,38	0,212	1,39
D	Stroh	46,73	42,81	0,208	3,29
E	Stroh	33,49	30,40	0,191	2,46
F	Strohpellets	40,54	35,01	0,191	2,43
G	Stroh/Flachs	31,60	28,72	0,215	0,69
H	Flachs	25,70	22,18	0,150	3,17
I	Holzpellets	47,23	42,48	0,104	2,73
J	Sägespäne	49,14	45,36	0,114	2,13

Die in Tabelle 8 dargestellten Ergebnisse entstammen der Vergärung des gelagerten Mistes. Hier zeigt sich eine signifikante Verringerung der Methanausbeute bei allen untersuchten Proben. Durch die Aufbewahrung des Pferdemistes in einer Miete kommt es zu einem mehr oder weniger starken Abbau organischer Substanz. Außerdem werden gasförmige und flüssige Emissionen freigesetzt. Daher sollte für die energetische Nutzung von Pferdemit in Biogasanlagen eine Lagerung über einen längeren Zeitraum vermieden werden.

Tabelle 8: Spezifische Methanerträge  $\text{Nm}^3 \text{CH}_4/\text{kg oTS}$ , Trockensubstanzgehalte und organische Trockensubstanzgehalte des gelagerten Mistes

Betrieb	Einstreu	TS	oTS	Spezifischer Methanertrag	Variationskoeffizient
		[% FM]	[% FM]	$[\text{Nm}^3 \text{CH}_4/\text{kg oTS}]$	[%]
A	Stroh	24,13	21,24	0,151	2,19
B	Stroh	28,79	24,08	0,153	1,67
C	Stroh	25,73	23,19	0,196	0,65
D	Stroh	25,56	21,17	0,128	1,38
E	Stroh	21,59	17,97	0,137	0,12
G	Stroh/Flachs	22,45	20,47	0,181	2,41
H	Flachs	24,44	20,83	0,118	2,02
I	Holzpellets	26,43	22,37	0,088	8,55
J	Sägespäne	76,70	67,51	0,102	0,79

## Gehalt an Makro- und Mikronährstoffen

Zusätzlich zu den Untersuchungen im HBT wurden Proben von dem frischen strohbasierten Pferdemist auf die Nährstoffgehalte analysiert. Die Ergebnisse sind vergleichend zu weiteren in der Biogaserzeugung verwendeten Substraten in Tabelle 9 dargestellt. Aus der Tabelle geht hervor, dass die Spurenelementgehalte der Pferdemistproben oberhalb der Konzentration von Maissilage liegen und mit den Werten der Grassilage vergleichbar sind. Aus vorherigen Forschungsarbeiten ist bekannt, dass die Spurennährstoffkonzentrationen dieser Substrate für einen optimalen Anlagenbetrieb nicht ausreichend sind. Im Vergleich der Spurennährstoffkonzentrationen der Pferdemistproben mit Rindergülle und Festmist aus der Schweinhaltung wird deutlich, dass die Werte erheblich niedriger sind. Eine ausreichende Versorgung mit Spurennährstoffen bei der ausschließlichen Vergärung von Pferdemist ist demzufolge nicht zu erwarten.

Tabelle 9: Spurenelementkonzentrationen des frischen strohbasierten Pferdemist im Vergleich zu Maissilage, Grassilage, Rindergülle und Schweinefestmist

Element [mg/kg TS]	Pferdemist			Mais- silage	Gras- silage	Rinder- gülle	Schweine- festmist
	$\bar{x}$	$\pm$	STD	(Kimmich and Slotyuk, 2011)		(Sager, 2007)	
Ni	1,80	$\pm$	0,74	0,2	2,0	6,3	8,9
Fe	810,67	$\pm$	621,22	64,6	879,4	1970,0	2680,0
Co	0,37	$\pm$	0,28	0,0	0,5	2,1	2,3
Mn	89,00	$\pm$	23,83	18,4	78,9	180,0	317,0
Mo	1,48	$\pm$	0,85	0,4	1,3	3,5	2,1
Se	0,27	$\pm$	0,12	0,3	0,3	0,6	1,4

Die Ergebnisse aus diesem Arbeitspaket zeigen, dass sich Pferdemist mit Strohein-streu sehr gut als Substrat zur Erzeugung von Biogas eignet. Aufgrund der geringen Methanerträge der alternativen Einstreumaterialien und der zu erwartenden verfahrenstechnischen Probleme in Biogasanlagen muss jedoch von einer Nutzung dieser Materialien in konventionellen Anlagensystemen abgeraten werden. Des Weiteren führt die Lagerung des Pferdemistes zu einer aeroben Rotte. Durch diese Rotte kommt es zu einem hohen Verlust von vergärbaren organischen Substanzen und

dem Ausstoß von klimaschädlichen Gasen. Daher sind bei der Nutzung von Pferdemist in Biogasanlagen Zwischenlagerungszeiten zu vermeiden. Die Lagerung des Pferdemistes über einen Zeitraum von vier Wochen zeigte bei allen Varianten eine Reduzierung des spezifischen Methanertragspotenzials. So verringerte sich der Methanertrag bei dem Pferdemist mit Stroh um 24 %. Bei den anderen untersuchten Proben fiel der Ertragsverlust geringer aus. So betrug die Abnahme bei dem Mist mit Flachseinstreu 21 %, bei den Sägespänen rund 10 % und bei den Holzpellets 15 %.

## **1.2. AP 2: Untersuchungen zur Aufbereitung, Mischungsverhältnisse und Gärtemperatur**

### **Zielsetzung**

Für die Verbesserung des anaeroben Abbaus und Steigerung der Methanausbeute sind am Markt zahlreiche Aufschlussstechniken und –verfahren verfügbar. Zudem soll durch die Aufbereitungstechniken der benötigte Rühraufwand erheblich gesenkt werden und dadurch die Energieeffizienz der Biogaserzeugung gesteigert werden. Inwieweit diese Effekte im praktischen Anlagenbetrieb zum Tragen kommen ist jedoch nicht bekannt. Die Notwendigkeit der Schaffung von verfahrenstechnisch nutzbaren Strukturen bei rohfaserreichen Materialien wie z.B. Pferdemist, ist im praktischen und wissenschaftlichen Umfeld unumstritten.

Im Rahmen dieses Projektes wird ein MEBA Bio-QZ an der Forschungsbiogasanlage Unterer Lindenhof eingesetzt. Daher fokussieren sich die Untersuchungen in diesem Arbeitspaket insbesondere auf die Effekte der Aufbereitung durch dieses Zerkleinerungsaggregat. Hierfür wurden Versuchsreihen mit Pferdemist und weiteren nachwachsenden Rohstoffen im Batchgärttest in 2 l Fermentern durchgeführt. Zusätzlich wurde ein kontinuierlicher Gärversuch im Biogaslabor der Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie durchgeführt.

### **1.2.1. Mechanische Aufbereitung mittels MEBA Bio-QZ**

#### **Material und Methode**

Der Querstromzersetzer ist der Kategorie der physikalischen Aufbereitungsmöglichkeiten zuzuordnen. Das Verfahren kommt ursprünglich aus dem Gebiet der Werkstoffzerkleinerung und Abfallverwertung (Thomé-Kozmiensky and Hoffmann, 2010). Jedoch wird er heutzutage aufgrund seiner effektiven Technik und des flexiblen Aufbereitungsergebnisses auch in vielen anderen Bereichen eingesetzt. Primäre Einsatzfelder sind die Elektroschrottverwertung, die Aufbereitung von Metall-Kunststofffraktionen und der Aufschluss von Werkstoff-Fraktionen verschiedenster Art. Aber auch die Aufbereitung von Bioabfällen und nachwachsenden Rohstoffen können mittels Bio-QZ bewerkstelligt werden (Schäfer and Schäfer, 2010).

Ein Querstromzerspaner besteht im Wesentlichen aus einem zylinderförmigen Aufschlussbehälter, den Schleuder- bzw. Schlagwerkzeugen und einem Elektromotor, der diese antreibt. Die Schlagwerkzeuge (meist Stahlketten) sind über eine Nabe mittig am Boden des Aufschlussbehälters befestigt (Schäfer and Schäfer, 2010). Im Betriebszustand rotieren die Ketten und verleihen dem aufzuschließenden Material einen Stoßimpuls, welcher es in Richtung Behälterwand befördert. Durch das dortige Auftreffen und den Impulsen des nachfolgenden Gutstroms bewegt sich das Material in einer spiralförmigen Vertikalbewegung in Rotorlaufrichtung. Am Scheitelpunkt fällt das Material wieder senkrecht auf die Schlagwerkzeuge (Mewa, 2010). Die Krafterwirkung der Stahlketten, das Auftreffen des Materials auf die Behälterwand und die Reibwirkung innerhalb des Materials führen zum Aufschluss und der Zerkleinerung des aufzubereitenden Gutes. Dieser Effekt kann durch Vorsprünge und Umlenkeinrichtungen an der Behälterwand verstärkt werden. Die enormen Kräfte, die während des Betriebs erzeugt werden, verschleiben die Ketten, die Bodenplatte und den Innenraum des Zylinders sehr stark (Schäfer and Schäfer, 2010). Der Aufbau und die Bewegung des aufzuschließenden Gutes innerhalb des Arbeitsraumes eines QZs sind in den Abbildungen 1 bis 3 dargestellt.

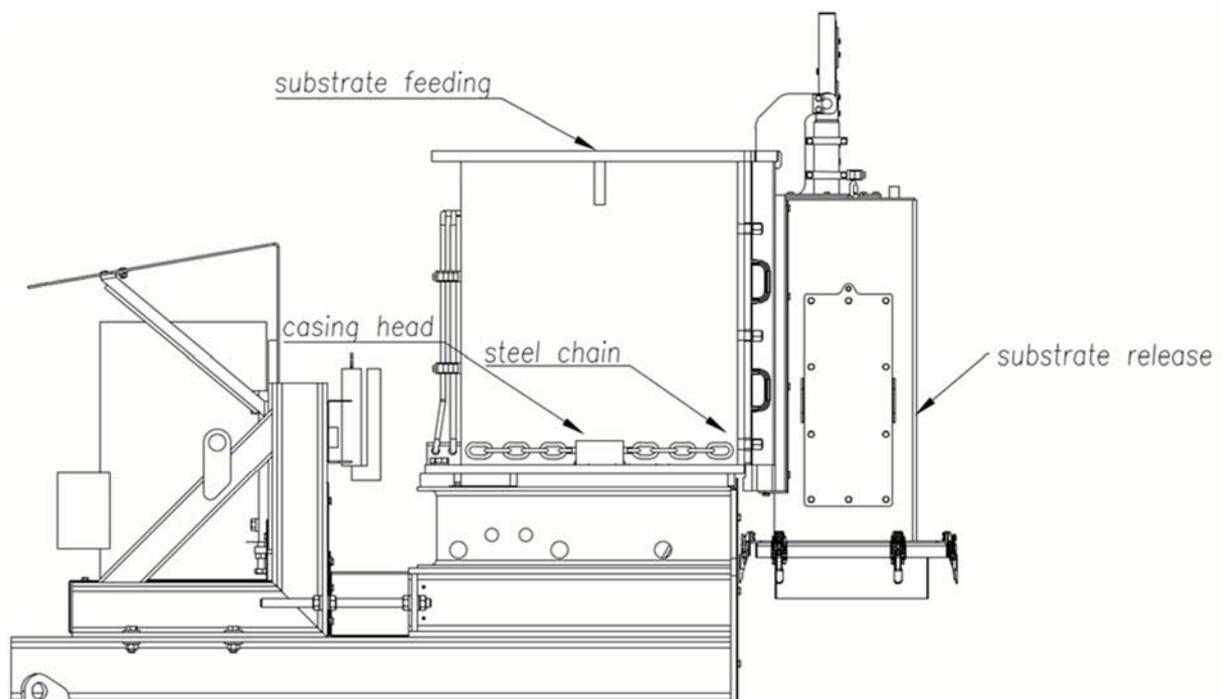


Abbildung 1: Aufbau und Arbeitsweise eines MEBA Bio-QZ (Mewa, 2010)



Abbildung 2: Innenansicht des Mewa Bio-QZ



Abbildung 3: Mewa Bio-QZ an der Forschungsbiogasanlage Unterer Lindenhof

Die Dimensionierung der einzelnen Bauteile eines Bio-QZs richtet sich nach dem Einsatzgebiet und der Durchsatzleistung. Folgende Parameter bestimmen dabei den Aufschlussgrad sowie Form und Stückgröße des Endprodukts (Mewa, 2010; Schäfer and Schäfer, 2010):

- Eigenschaften des Ausgangsmaterials;
- Rotordrehzahl;
- Anzahl der Kettenglieder;
- Auskleidung des zylinderförmigen Aufschlussbehälters;
- Verweildauer des Materials im Aufschlussbehälter;
- Betriebsart des Bio-QZs (Chargen- oder Durchflussbetrieb).

Für die Aufbereitung von Biomasse kann der Bio-QZ grundsätzlich in zwei unterschiedlichen Konfigurationen betrieben werden. Beim Chargenbetrieb wird das Material portionsweise bis zum Erreichen einer vom Anwender wählbaren Stromaufnahme befüllt. Darauf folgt das Zerkleinerungsintervall. Hierbei ist die Verweilzeit substratspezifisch festzulegen. Im Anschluss an das Zerkleinerungsintervall öffnet sich der Auslasschieber des Bio-QZ und das Material wird aus dem Arbeitsraum herausgeschleudert. Im Durchlaufbetrieb ist der Auslasschieber über den gesamten Betriebszeitraum einen Spalt geöffnet. Die Breite des Spaltes ist vom Anwender manuell einstellbar. Durch diesen Spalt wird das zerkleinerte Material kontinuierlich aus dem Prallreaktor ausgetragen. Die Beschickung des Bio-QZ in dieser Betriebsweise erfolgt ebenfalls kontinuierlich und wird über eine frequenzgesteuerte Zuführschnecke gewährleistet. Durch die Steuerung der zugeführten Menge kann der Bio-QZ bei einer definierten Stromaufnahme betrieben werden.

## **Untersuchungen zur Aufbereitungsintensität**

Um die Effekte der mechanischen Aufbereitung des Mewa Bio-QZ zu untersuchen wurden folgende Substrate ausgewählt:

- Pferdemist [PM];
- Maissilage [Mais];
- Grassilage [Gras];
- Getreideganzpflanzensilage (Roggen) [GPS];
- Substratmischung (50 % Pferdemist, 16,6 % Maissilage, 16,6 % Grassilage und 16,6 % Getreide-GPS) [SubG].

Zusätzlich wurden die Auswirkungen von verschiedenen Aufbereitungsintensitäten ermittelt und die Veränderungen der Zerkleinerungseffekte durch die kontinuierliche Betriebsweise des Bio-QZ betrachtet. Darüber hinaus wurden die Auswirkungen der Abnutzung der Aufbereitungswerkzeuge des Bio-QZ bestimmt. In diesem Bericht sind die Ergebnisse dieser Untersuchungen in zwei Abschnitte aufgeteilt:

- Bestimmung der Effekte der mechanischen Aufbereitung auf die Substrate Pferdemist, Maissilage, Grassilage und der Substratmischung, sowie deren optimale Zerkleinerungsintensität;
- Auswirkungen der Abnutzung der Ketten;

Die Vorbehandlung der Materialien wurde an der Forschungsbiogasanlage Unterer Lindenhof der Universität Hohenheim mit dem Mewa Bio-QZ durchgeführt. Die Aufbereitungszeiten variieren bei den Substraten zwischen 5 und 30 Sekunden. Zusätzlich wurde bei den Substraten Pferdemist und Maissilage der kontinuierliche Betrieb des Bio-QZ getestet.

Für die Probenahme im Chargenbetrieb wurde die Befüllung des Bio-QZ mit den Substraten bei einer Stromstärke von 65 A gestoppt. Im kontinuierlichen Betrieb wurde um einen ausreichenden Füllungsgrad des Arbeitsraums zu erreichen, die Stromstärke auf 85 A hochgesetzt. Der Auslassschieber war während dieser Betriebsweise 5 bzw. 10 cm geöffnet. Die Aufbereitung des Pferdemistes bei einer Schieberöffnung von 5 cm war jedoch nicht möglich, da die Spaltweite für einen ausreichenden Materialaustrag zu gering war.

Bei den Untersuchungen zum Verschleiß der Aufbereitungswerkzeuge wurde ausschließlich strohhaltiger Pferdemist verwendet und für 15 s im Chargenbetrieb aufbereitet.

Die aufbereiteten Substrate wurden direkt unterhalb des Auslassschiebers entnommen. Um einen organischen Substanzabbau durch die Substraterwärmung der Aufbereitung zu vermeiden, wurden die einzelnen Proben umgehend in flüssigem Stickstoff heruntergekühlt und bei -20 °C bis zur weiteren Verwendung gelagert. Die nicht aufbereiteten Materialien wurden nach einer 15-minütigen Homogenisierung im Feststoffdosierer am Auslass des Vertikalmischers entnommen. Die unaufbereiteten Proben wurden ebenfalls in Flüssigstickstoff tiefgefroren, um einen vorzeitigen biologischen Abbau zu verhindern.

Neben dem Batchgärttest wurde die biochemische Zusammensetzung der Proben nasschemisch von der Landesanstalt für landwirtschaftliche Chemie der Universität Hohenheim untersucht. Um die Wirkung der mechanischen Zerkleinerung auf die Partikelstruktur zu erfassen wurde vom Fraunhofer Institut für Keramische Technologien und Systeme in Dresden (IKTS) der granulometrische Zustand mittels Bildanalyse erfasst. Zunächst erfolgte eine Unterteilung der Proben in Grobstoffe und Feinanteile. Hierzu wurden die einzelnen Substratproben über ein Sieb mit der Maschenweite 0,5 mm mit Wasser bis zur Partikelfreiheit des Siebdurchganges gespült. Der Siebrückstand wurde im Trockenschrank bei 105 °C getrocknet. Aus den ermittelten Einwaagen vor und nach des Trennschnitts sowie dem Trockenrückstand der jeweiligen Probe wurde der Grobstoffgehalt und der Feinanteil ermittelt. Die Ermittlung des granulometrischen Zustandes der Substrate erfolgte mit dem statischen Bildanalysegerät Fibreshape (Fibreshape, IST - Innovative Sintering Technologies Ltd., Vilters, Schweiz). Nach einer Probeteilung mittels Probeteilekreuz wurde die entstandene Teilmenge gescannt und mittels interner Software des Messgerätes ausgewertet (Fraunhofer IKTS, 2012). Somit wurden folgende Parameter ermittelt:

- Grobanteil [%];
- Feinanteil [%];
- $Q_{x50,3}$ ;
- Zerkleinerungsgrad [%].

Um die Effekte der mechanischen Aufbereitung auf die Abbaukinetik zu erfassen, wurde der kumulative spezifische Methanertrag des Batchtests an eine modifizierte Gompertz-Funktion nach Nopharatana et al. (2007) und Budiyo et al. (2010) angepasst. Die Gompertz-Funktion beruht auf der Annahme, dass die Methanproduktion eine Funktion bakteriellen Wachstums ist:

$$M_t = b \cdot \exp\left\{-\exp\left[\frac{rb \cdot e}{b}(l-t)+1\right]\right\}$$

$M_t$	Kumulativer Methanertrag bei $t$ [ $\text{Nm}^3/\text{kg oTS}$ ]
$b$	Methanertragspotential [ $\text{Nm}^3/\text{kg oTS}$ ]
$rb$	Maximale Methanproduktion [ $\text{Nm}^3/\text{kg oTS} \cdot \text{d}$ ]
$l$	Dauer der Lag-Phase [d]
$t$	Zeitpunkt des Gärtests [d]
$e$	Eulersche Zahl

Die Parameter  $b$ ,  $rb$ , und  $l$  sind Konstanten, die mittels nicht-linearer Regression bestimmt wurden. Um den Zeitpunkt des maximalen Methanertrages zu ermitteln, wurde die erste Ableitung der Gompertz-Funktion bestimmt:

$$M_t' = b \cdot \exp\left\{-\exp\left[\frac{rb \cdot e}{b}(l-t)+1\right]\right\} \cdot \left\{-\exp\left[\frac{rb \cdot e}{b}(l-t)+1\right]\right\} \cdot \left\{-\frac{rb \cdot e}{b}\right\}$$

Durch das Einsetzen von  $rb$  als  $M'$  und das Auflösen nach  $t$  ergab sich der Zeitpunkt der maximalen Methanproduktion ( $t'$ ).

## Ergebnisse und Diskussion

### Aufbereitung von Pferdemist, Maissilage, Grassilage und der Substratmischung

Die Untersuchungsergebnisse der Weender Futtermittelanalyse und die TS- und oTS-Gehalte der Substratproben sind in Tabelle 10 dargestellt. Signifikante Veränderungen der TS- und oTS-Gehalte durch die mechanische Aufbereitung mit dem Bio-QZ waren nicht erkennbar. Ebenso konnten keine Veränderungen bei den Rohnährstoffen festgestellt werden.

Tabelle 10: Trockensubstanzgehalte, organische Trockensubstanzgehalte und Inhaltsstoffe der im Batchversuch untersuchten Proben

Substrat	Aufbereitung	TS	oTS	XP	XL	XF	NDF	ADF	ADL
		[% FM]	[% FM]	[% TS]	[% TS]	[% TS]	[% TS]	[% TS]	[% TS]
Pferdemist	Kontrolle	36,1	32,5	6,6	1,4	40,0	73,5	49,9	7,7
Pferdemist	5 s	32,9	29,4	6,7	1,5	37,9	72,4	49,7	8,0
Pferdemist	10 s	33,6	30,0	6,7	1,3	38,3	73,6	50,1	7,3
Pferdemist	15 s	33,6	30,0	6,6	1,3	38,0	73,7	50,8	7,2
Pferdemist	30 s	34,1	30,4	6,7	1,6	39,0	74,0	50,9	7,4
Pferdemist	10 cm	34,8	31,2	6,6	1,4	39,1	74,7	51,4	7,2
Maissilage	Kontrolle	30,1	29,0	8,2	2,7	21,8	41,3	24,2	1,8
Maissilage	5 s	29,0	27,6	7,7	2,3	25,9	47,3	30,5	3,6
Maissilage	10 s	29,9	28,5	7,8	2,2	26,0	47,9	30,8	3,5
Maissilage	15 s	29,8	28,2	8,0	2,1	25,7	47,8	30,9	3,3
Maissilage	30 s	29,3	27,8	8,0	2,1	25,5	47,4	31,2	4,1
Maissilage	5 cm	29,8	28,5	7,9	2,1	25,2	47,4	30,3	3,7
Maissilage	10 cm	29,1	27,8	8,1	2,3	24,1	46,9	28,2	2,9
Grassilage	Kontrolle	36,9	33,1	17,2	3,8	25,2	44,6	31,6	2,8
Grassilage	15 s	33,9	30,1	17,1	3,6	24,9	45,0	31,5	3,3
Grassilage	30 s	34,2	30,4	17,1	3,8	24,8	44,3	31,6	3,0
Getreide GPS	Kontrolle	39,1	37,0	9,5	2,5	27,1	49,8	31,4	3,4
Getreide GPS	15 s	37,2	34,3	9,5	3,2	23,9	45,9	30,5	3,3
Getreide GPS	30 s	35,4	32,2	9,5	3,0	24,1	46,7	30,7	3,2
Substratmi- schung	Kontrolle	36,7	31,9	8,9	2,0	32,4	61,3	47,8	9,4
Substratmi- schung	15 s	34,7	30,0	9,0	1,8	32,2	60,9	48,2	10,1
Substratmi- schung	30 s	35,3	30,2	8,8	1,9	32,9	61,4	47,6	10,4

Neben den Rohnährstoffen wurden auch die Gehalte an flüchtigen Fettsäuren und Alkoholen der Kontrollvarianten und der aufbereiteten Proben bestimmt (Tabelle 11). Die Ergebnisse zeigen, dass bedingt durch die mechanische Aufbereitung die Säurekonzentrationen bei den Silagen mit steigender Zerkleinerungsintensität abnehmen. Bei dem Pferdemist und der Substratmischung sind zunehmende Konzentrationen mit steigender Beanspruchung festzustellen. Die Verluste bei den Silagen lassen sich eindeutig durch die Aerosolbildung und das Verdampfen während der Aufbereitung erklären. Die Ursache für die tendenziell ansteigenden Gehalte bei den rohfaserreichen Materialien ist unklar.

Tabelle 11: Konzentrationen der flüchtigen Fettsäuren und Alkohole der aufbereiteten und unbehandelten Substrate

Substrat	Aufbereitung	Milchsäure	Essigsäure	Propionsäure	Ethanol	Propandiol
		[g / kg oTS]				
Pferdemist	Kontrolle	1,4	5,0	0,0	0,0	0,0
Pferdemist	5 s	2,7	7,9	0,2	0,0	0,0
Pferdemist	10 s	3,0	9,1	0,3	0,0	0,0
Pferdemist	15 s	2,3	8,7	0,2	0,0	0,0
Pferdemist	30 s	2,6	8,6	0,3	0,0	0,0
Pferdemist	10 cm	1,6	8,4	0,2	0,0	0,0
Maissilage	Kontrolle	87,4	16,6	0,0	7,4	6,7
Maissilage	5 s	81,3	15,1	0,3	8,0	3,8
Maissilage	10 s	76,2	14,8	0,3	7,6	3,0
Maissilage	15 s	75,8	14,7	0,3	6,2	2,7
Maissilage	30 s	75,8	14,2	0,3	7,2	3,1
Maissilage	5 cm	77,0	15,0	0,2	7,0	3,0
Maissilage	10 cm	83,5	15,5	0,2	7,2	2,5
Grassilage	Kontrolle	60,6	41,9	0,0	2,3	0,0
Grassilage	15 s	56,0	46,3	0,5	2,7	0,0
Grassilage	30 s	51,2	46,1	0,4	2,6	0,0
Getreide-GPS	Kontrolle	31,8	46,2	0,6	7,2	31,9
Getreide-GPS	15 s	25,6	33,7	3,3	4,5	11,1
Getreide-GPS	30 s	27,0	34,3	3,7	5,3	12,7
Substratmischung	Kontrolle	13,6	18,8	2,6	2,8	3,4
Substratmischung	15 s	14,5	19,6	2,7	2,7	3,3
Substratmischung	30 s	14,6	19,9	2,7	2,0	3,5

Tabelle 12: Ergebnisse der Partikelgrößenanalyse der untersuchten Substrate

Substrat	Aufbereitung	Grobanteil [%]	Feinanteil [%]	Q <sub>50,3</sub>	Zerkleinerungsgrad [%]
				[mm]	
Pferdemist	Kontrolle	83,3	16,7	10,1	0,0
Pferdemist	5 s	68,6	31,4	3,3	67,3
Pferdemist	10 s	68,0	32,0	3,2	68,3
Pferdemist	15 s	67,1	33,0	3,1	69,4
Pferdemist	30 s	66,4	33,6	1,8	82,1
Pferdemist	10 cm	73,0	27,0	2,9	70,8
Maissilage	Kontrolle	70,8	29,2	6,9	0,0
Maissilage	15 s	51,9	48,1	3,0	80,0
Maissilage	30 s	47,3	52,7	2,8	96,3
Grassilage	Kontrolle	70,2	29,8	5,0	0,0
Grassilage	15 s	58,1	41,9	3,9	45,6
Grassilage	30 s	54,3	45,7	2,7	70,2
Getreide-GPS	Kontrolle	71,6	28,4	7,1	0,0
Getreide-GPS	15 s	51,8	48,2	3,4	80,9
Getreide-GPS	30 s	47,7	52,3	2,7	96,3
Substratmischung	Kontrolle	56,8	43,2	5,5	0,0
Substratmischung	15 s	53,7	46,3	3,3	50,2
Substratmischung	30 s	48,1	51,9	2,2	91,3

Die Effekte der mechanischen Aufbereitung auf die Partikelstruktur der Substrate sind in Tabelle 12 dargestellt. Durch die Aufbereitung nimmt die spezifische Oberfläche deutlich zu. Wobei durch eine Verlängerung der Verweildauer des Materials im Bio-QZ der Zerkleinerungsgrad nicht linear zunimmt. Beim dem Pferdemist wurden alle im Batch-Test untersuchten Varianten mittels Partikelanalyse untersucht. Bei der Maissilage wurde aus Kostengründen, wie bei den anderen Materialien nur drei Proben analysiert. Die Ergebnisse der Zerkleinerungsversuche zeigen bei allen Substraten, dass durch die längere Aufbereitung der Zerkleinerungsgrad zunimmt. In Abhängigkeit der Substrateigenschaften waren jedoch deutliche Unterschiede in der Behandlungseffektivität erkennbar. So führte die Behandlung der Maissilage und Getreide-GPS für 15 Sekunden im Bio-QZ zu einem Zerkleinerungsgrad von

80 bzw. 81 %. Bei einer Aufbereitungsdauer von 30 Sekunden betrug der Zerkleinerungsgrad der beiden Materialien 96 %. Die mechanische Desintegration des Pferdemistes für 15 Sekunden resultierte in einer Reduzierung des Qx50,3 um 69 % und die Steigerung der Aufbereitungsintensität zu einem Zerkleinerungsgrad von 82 %. Die geringsten Veränderungen des Qx50,3 durch die Behandlung im Bio-QZ wurden bei der Gassilage beobachtet. So betrug durch die Aufbereitung für 15 Sekunden der Zerkleinerungsgrad 46% und die Verlängerung der Verweilzeit im Bio-QZ auf 30 Sekunden führte zu einer Verringerung des Qx50,3 um 82%.

Tabelle 13: Methangehalte, spezifischer Biogas- und Methanertrag der untersuchten Substrate.

Substrat	Aufbereitung	Methan- gehalt	Spezifischer Biogasertrag	Spezifischer Methanertrag	Variations- koeffizient
		[Vol.-%]	[Nm <sup>3</sup> /kg oTS]	[Nm <sup>3</sup> /kg oTS]	[%]
Pferdemist	Kontrolle	54,7	0,431	0,236	3,9
Pferdemist	10 cm	54,9	0,439	0,241	1,1
Pferdemist	5 s	55,3	0,446	0,247	0,1
Pferdemist	10 s	55,2	0,451	0,249	3,1
Pferdemist	15 s	55,0	0,467	0,257	1,0
Pferdemist	30 s	54,9	0,455	0,249	1,3
Maissilage	Kontrolle	53,0	0,724	0,384	1,1
Maissilage	5 cm	53,0	0,681	0,361	1,4
Maissilage	10 cm	53,0	0,708	0,375	2,9
Maissilage	5 s	53,1	0,689	0,366	1,3
Maissilage	10 s	52,7	0,679	0,357	0,0
Maissilage	15 s	53,1	0,672	0,357	2,8
Maissilage	30 s	53,3	0,650	0,346	1,6
Grassilage	Kontrolle	57,2	0,586	0,334	0,7
Grassilage	15	57,8	0,581	0,334	1,2
Grassilage	30	60,6	0,557	0,335	0,2
Getreide-GPS	Kontrolle	58,1	0,595	0,345	1,4
Getreide-GPS	15	57,1	0,592	0,338	0,9
Getreide-GPS	30	59,7	0,579	0,345	2,7
Substratmi- schung	Kontrolle	57,7	0,418	0,241	1,2
Substratmi- schung	15	55,8	0,475	0,265	1,8
Substratmi- schung	30	58,1	0,434	0,252	1,3

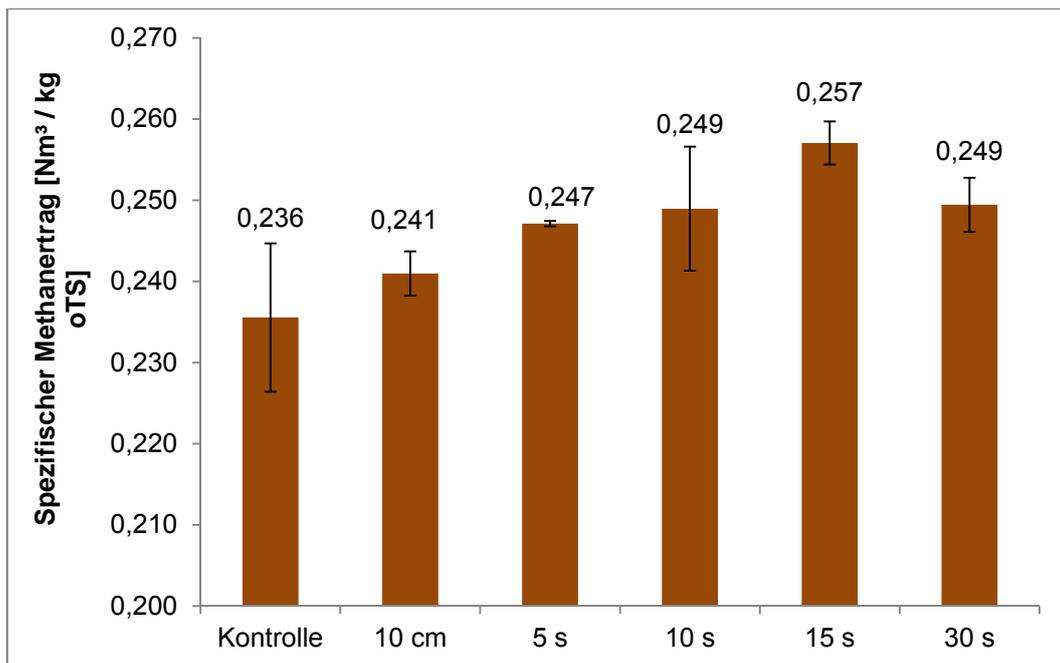


Abbildung 4: Spezifischer Methanertrag von Pferdemist mit unterschiedlichen Aufbereitungsintensitäten.

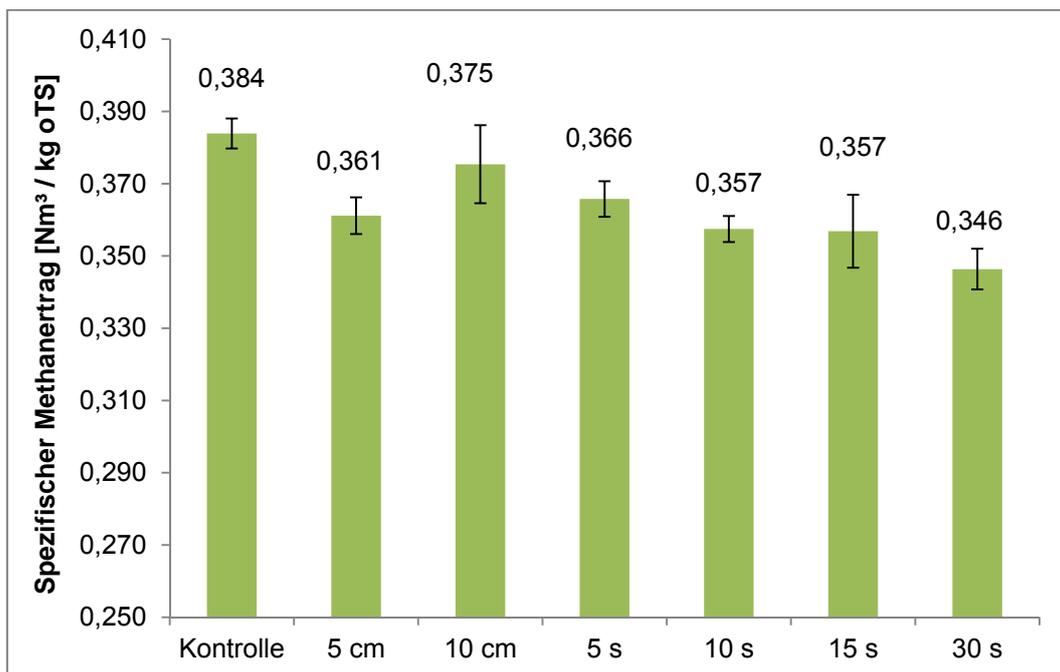


Abbildung 5: Spezifischer Methanerträge von Maissilage mit unterschiedlichen Aufbereitungsintensitäten.

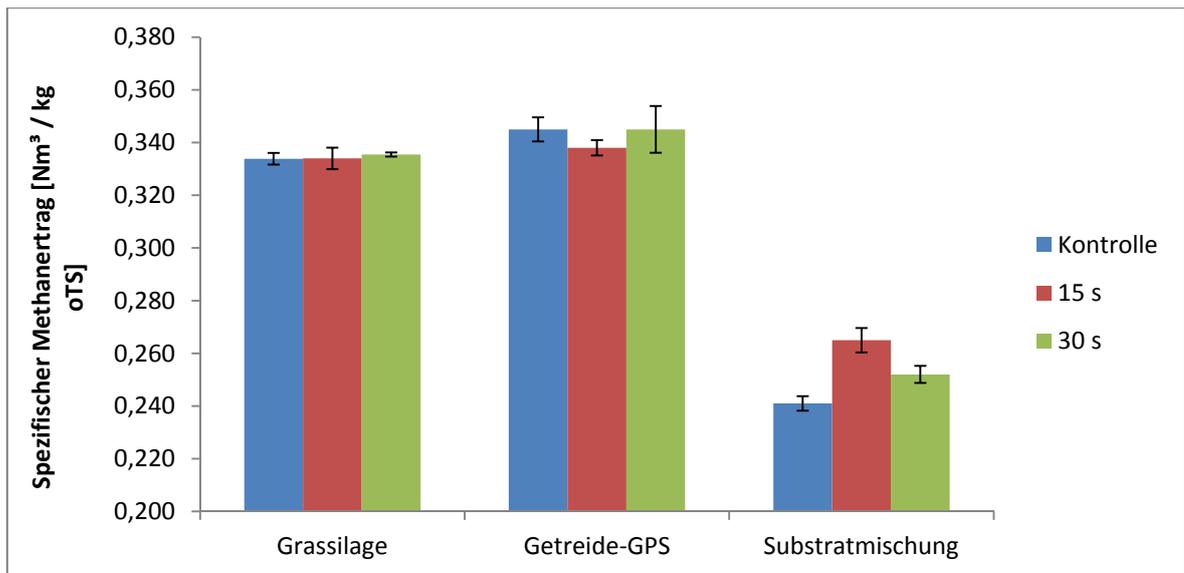


Abbildung 6: Spezifische Methanerträge von Silagen mit unterschiedlichen Aufbereitungsintensitäten

Die Ergebnisse des Batch-Gärtests sind in Tabelle 13 aufgelistet. Die mechanische Vorbehandlung zeigte beim Pferdemit eine Steigerung des spezifischen Methanertrags bei allen Aufbereitungsstufen (Abbildung 4). Durch die Steigerung der Aufbereitungsintensität konnte bis zu einer Zerkleinerungszeit von 15 s die Methanausbeute weiter gesteigert werden. Die Verdoppelung der Aufbereitungszeit auf 30 s führte zu einem geringfügig niedrigeren Methanertrag. In dieser Versuchsreihe konnte eine Methanertragssteigerung von bis zu 9 % durch die Vorbehandlung des Pferdemit beobachtet werden. In weiteren Arbeiten an der Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie konnten bei der Aufbereitung von Pferdemit Steigerungsraten zwischen 16 und 24 % beobachtet werden (Hartmann, 2011; Böhm, 2012). Aufgrund der hohen Heterogenität in der Zusammensetzung des Pferdemit können die Effekte der mechanischen Vorbehandlung stark differieren. Aufgrund der signifikanten Zerkleinerung ist jedoch in jedem Fall mit einer Verringerung der verfahrenstechnischen Probleme zu rechnen. Ein mit steigendem Aufbereitungsgrad abnehmender spezifischer Methanertrag wurde bei der Maissilage festgestellt (Abbildung 5). Aus diesem Ergebnis lässt sich erkennen, dass durch das Häckseln und Silieren ein optimaler Substrataufschluss erreicht wird und eine weitere Behandlung zu Energieverlusten führt. Bei der Grassilage und der Getreide-GPS konnten keine Effekte der Zerkleinerung auf den spezifischen Methanertrag festgestellt

werden (Abbildung 6). Ähnlich wie beim Pferdemist konnte bei der Substratmischung eine Erhöhung des spezifischen Methanertrags um bis zu 10 % beobachtet werden. Ebenfalls wurden bei diesem Substrat durch die 15-sekündige Aufbereitung die höchsten Effekte beobachtet.

Tabelle 14: Parameter der modifizierten Gompertz-Funktion der einzelnen Substrate

Substrat	Aufbereitung	b	rb	t'
Pferdemist	Kontrolle	0,211	0,017	4,6
Pferdemist	10 cm	0,214	0,019	4,1
Pferdemist	5 s	0,220	0,020	4,1
Pferdemist	10 s	0,224	0,020	4,2
Pferdemist	15 s	0,227	0,022	3,9
Pferdemist	30 s	0,219	0,022	3,6
Maissilage	Kontrolle	0,374	0,043	3,3
Maissilage	5 cm	0,351	0,041	3,2
Maissilage	10 cm	0,366	0,042	3,2
Maissilage	5 s	0,360	0,043	3,2
Maissilage	10 s	0,346	0,041	3,1
Maissilage	15 s	0,346	0,041	3,2
Maissilage	30 s	0,335	0,041	3,1
Grassilage	Kontrolle	0,314	0,070	1,7
Grassilage	15 s	0,317	0,075	1,6
Grassilage	30 s	0,314	0,077	1,5
Getreide-GPS	Kontrolle	0,321	0,029	4,1
Getreide-GPS	15 s	0,319	0,036	3,3
Getreide-GPS	30 s	0,328	0,032	3,8
Substratmischung	Kontrolle	0,235	0,021	4,3
Substratmischung	15 s	0,262	0,021	4,7
Substratmischung	30 s	0,252	0,019	5,0

Die Modellierung des Gärverlaufs mittels der modifizierten Gompertz-Funktion der Proben ist in Tabelle 14 dargestellt. Anhand dieser Ergebnisse können eindeutige Aussagen über die Abbaugeschwindigkeit getroffen werden. Durch den Parameter rb wird die höchste tägliche Methanproduktion während des Gärtestes beschrieben und mit t' wird der Zeitpunkt der höchsten Methanproduktivität geschätzt.

Die tägliche Methanproduktion der Pferdemistvarianten ist in Abbildung 7 aufgetragen. Anhand dieser Darstellung sind sehr deutliche Einflüsse der mechanischen Vorbehandlung auf die Abbaukinetik des Pferdemistes erkennbar. Durch die Steigerung der Intensität der Vorbehandlung wird die Abbaugeschwindigkeit erhöht und die maximale tägliche Methanproduktion gesteigert. So kann durch die bessere Substratzugänglichkeit für den Umsetzungsprozess die Abbaugeschwindigkeit um bis zu 22 % gesteigert werden. Im Gegensatz zu dem Pferdemist wird bei der Mais-silage durch die Vorbehandlung die Abbaugeschwindigkeit verringert. (Abbildung 8). Bei der Getreide-GPS und Grassilage konnte durch die Zerkleinerung die Abbaugeschwindigkeit um bis zu 20 % erhöht werden (Abbildungen 8 und 9). Keine Auswirkungen auf die Abbaukinetik durch die mechanische Aufbereitung wurden bei dem Substratgemisch festgestellt.

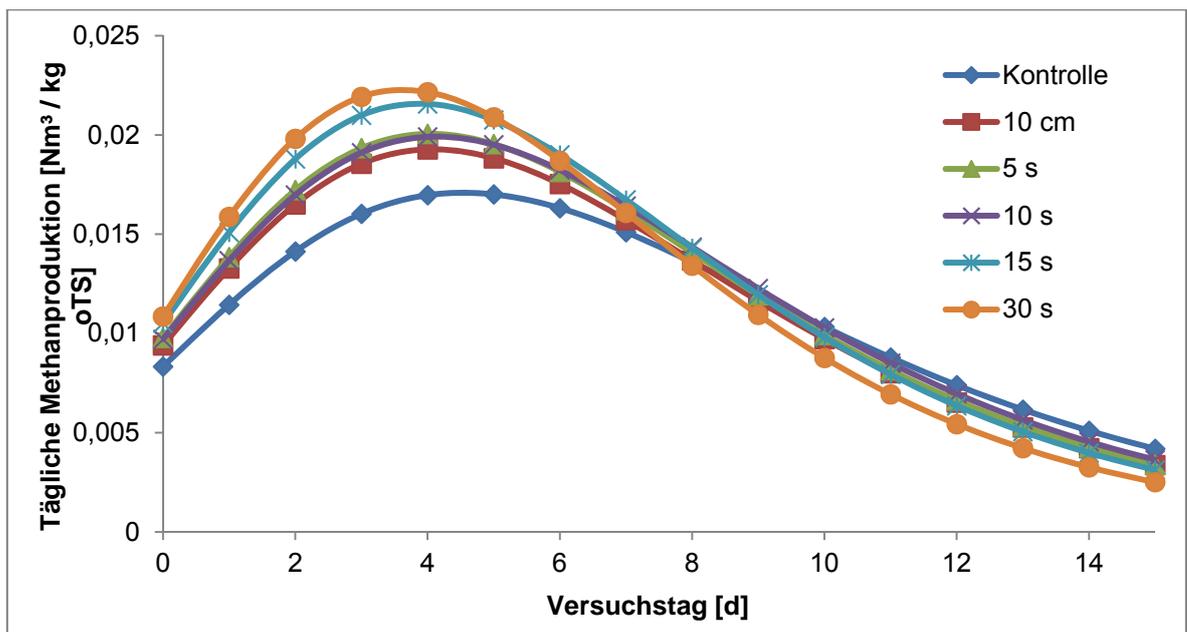


Abbildung 7: Abbaukinetik von Pferdemist mit unterschiedlichen Aufbereitungintensitäten.

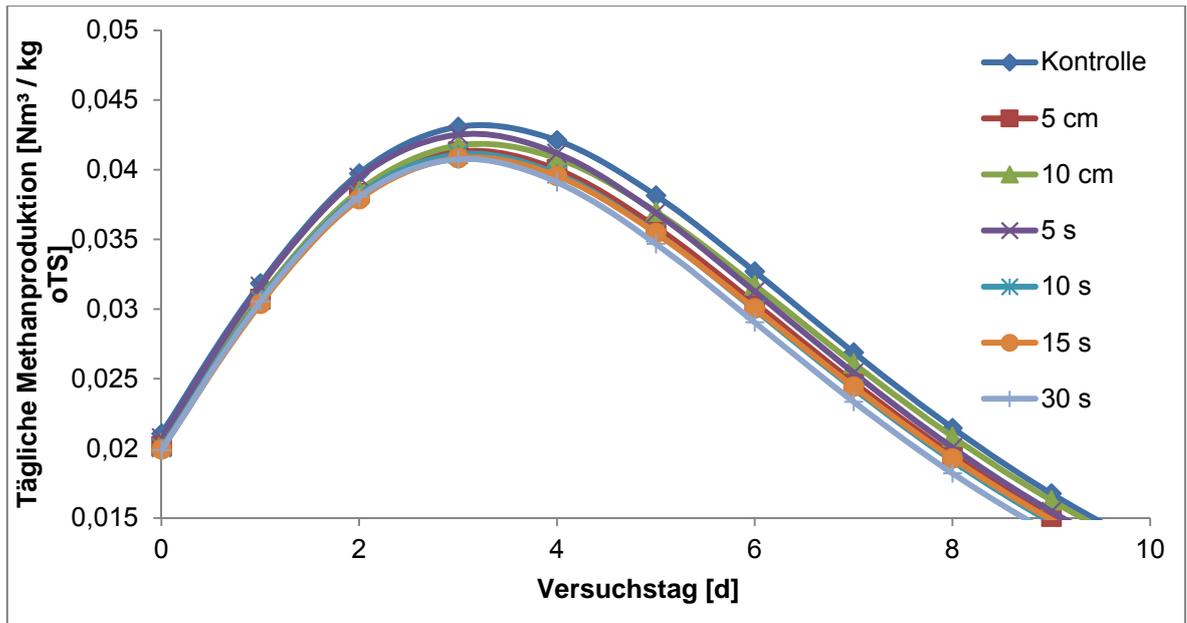


Abbildung 8: Abbaukinetik von Maissilage mit unterschiedlichen Aufbereitungintensitäten.

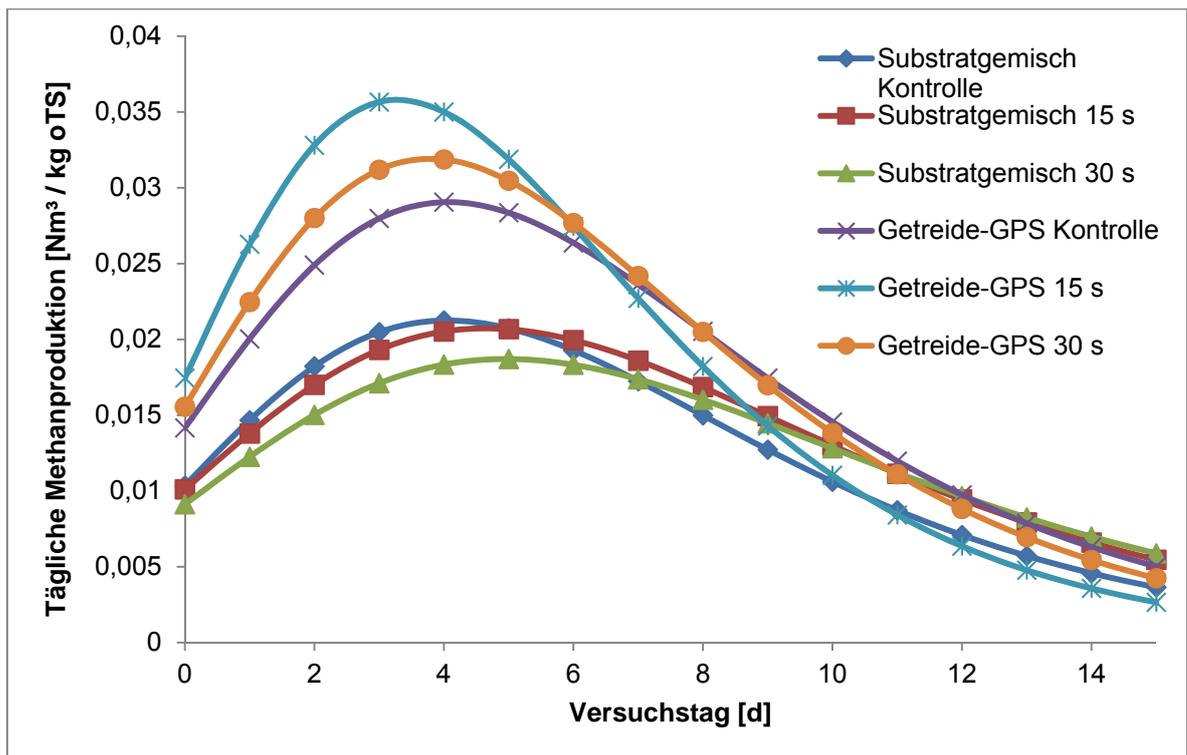


Abbildung 9: Abbaukinetik von Silagen mit unterschiedlichen Aufbereitungintensitäten.

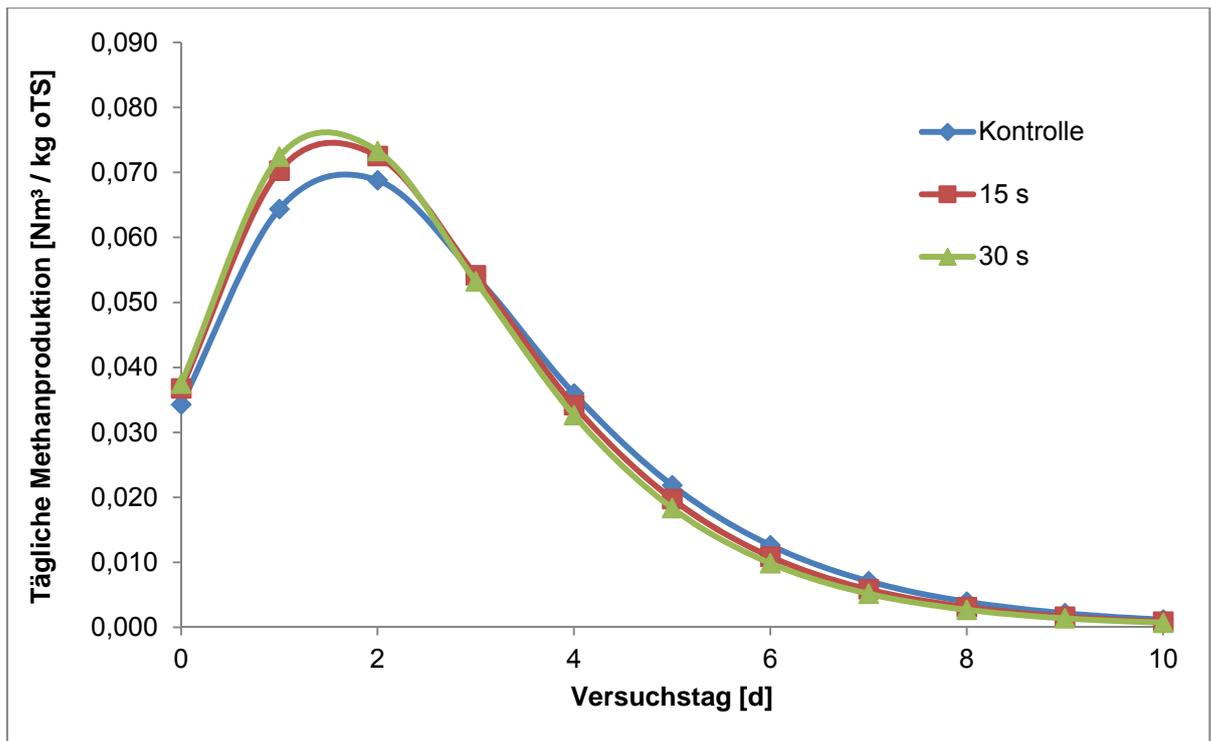


Abbildung 10: Abbauproduktion von Grassilage mit unterschiedlichen Aufbereitungsin-  
tensitäten.

Tabelle 15: Energieeffizienz der mechanischen Aufbereitung

Substrat	Aufbereitung [s]	Energiebedarf [kWh/t FM]	Energiemehrertrag [kWh/t FM]	Energiebilanz [kWh/t FM]
Pferdemist	15	13,8	26,5	12,7
Pferdemist	30	20,5	17,1	-3,4
Maissilage	15	11,6	-29,9	-41,5
Maissilage	30	14,8	-44,9	-59,7
Grassilage	15	11,3	0,2	-11,1
Grassilage	30	14,0	2,0	-11,9
Getreide-GPS	15	11,8	1,2	-10,6
Getreide-GPS	30	16,3	9,2	-7,1
Substratmischung	15	10,7	28,1	17,3
Substratmischung	30	15,2	13,3	-1,9

Um die Energieeffizienz der mechanischen Aufbereitung mittels Bio-QZ zu untersuchen wurde an der Forschungsbiogasanlage am Unteren Lindenhof der Stromverbrauch des Bio-QZ bei der Aufbereitung der verschiedenen Substrate bei einer 15 und 30-sekündigen Verweilzeit des Materials im Bio-QZ erfasst. Diese Ergebnisse wurden mit den spezifischen Methanerträgen aus den Batch-Versuchen zusammengeführt. Für die Berechnungen des Stromertrags aus der Nutzung des Biogases im BHKW wurde ein elektrischer Wirkungsgrad von 40 % angenommen. Die Ergebnisse dieser Betrachtungen sind in Tabelle 15 dargestellt. Bei der Maissilage, der Grassilage und der Getreide-GPS kann der Energieverbrauch durch die Aufbereitung nicht kompensiert werden. Dagegen führt die Vorbehandlung des Pferdemistes für 15 s zu einer Steigerung des Stromertrages um 26,7 kWh / t FM. Abzüglich des Energiebedarfs für die Aufbereitung können 12,7 kWh / t FM mehr erzielt werden. Bei dem Substratgemisch fällt die Energiebilanz mit einem Mehrertrag von 17,3 kWh / t FM noch positiver aus. Die Intensivaufbereitung für 30 s im Bio-QZ führt bei keiner der untersuchten Varianten zu einem positiven Ergebnis.

Die Untersuchungen zu den Effekten der Aufbereitung und Aufbereitungsintensität haben gezeigt, dass eine Vorbehandlung von fasereichen Substraten einen positiven Effekt auf die Gaserträge und die Abbaugeschwindigkeit hat und auch im Rahmen der Energieeffizienz darstellbar ist. Bei der Grassilage und Ganzpflanzensilage konnte keine Steigerung der Methanausbeute beobachtet werden. Jedoch wurde durch die größere Substratoberfläche eine Verbesserung der Abbaukinetik erreicht. Es scheint, dass bei gehäckselten Silagen eine zusätzliche Zerkleinerung keine Steigerung der spezifischen Methanerträge bewirkt und der schnellere Abbau den hohen Energiebedarf des Bio-QZ nicht rechtfertigt.

## Auswirkungen der Abnutzung der Zerkleinerungswerkzeuge

Im Praxisversuch an der Forschungsbiogasanlage wurde eine starke Abnutzung der Zerkleinerungsketten des Bio-QZ beobachtet (Abbildung 11). Der Wechsel der Ketten wurde durchgeführt, wenn aufgrund der Abnutzung der Arbeitsraum des Bio-QZ nicht mehr vollständig ausgeräumt wurde und die Maschine verstopfte. Um den Einfluss des Kettenverschleißes auf die Aufbereitungsintensität zu ermitteln, wurden mit Kettenpaaren verschiedenster Abnutzungsgrade Pferdemit zerkleinert und im Batchgärtetest untersucht. Für diese Versuchsreihe wurden zwei abgenutzte Kettenpaare (Laufzeit 670 und 900 t), ein benutztes (300 t) und ein neues Kettenpaar verglichen. Zusätzlich wurde noch eine Kontrolle mit unbehandeltem Pferdemit verwendet.



Abbildung 11: Vergleich der Aufbereitungswerkzeuge im unbenutzten und verschlissenen Zustand.

Die Ergebnisse des Batchgärtetests sind in Tabelle 16 und Abbildung 12 zusammengefasst. In dieser Versuchsreihe betrug die Steigerung des spezifischen Methanertrags durch die mechanische Aufbereitung bis zu 20 %. Die Vorbehandlung mit den abgenutzten Kettenpaaren führte zu tendenziell geringeren Methanausbeuten. Die

Unterschiede zwischen den aufbereiteten Varianten waren jedoch nicht signifikant. Anhand dieser Ergebnisse lässt sich schlussfolgern, dass die Zerkleinerungsketten möglichst lange verwendet werden sollten, da die Qualität der Vorbehandlung nur geringfügig abnimmt.

Tabelle 16: Methangehalte, spezifischer Biogas- und Methanertrag des mit verschiedenen Ketten aufbereiteten Pferdemistes.

Ketten- paar	TS	oTS	Methan- gehalt	Spezifischer Biogaser- trag	Spezifischer Methanertrag	Variations- koeffizient
	[% FM]	[% FM]	[Vol.-%]	[Nm <sup>3</sup> /kg oTS]	[Nm <sup>3</sup> /kg oTS]	[%]
Kontrolle	32,4	28,4	58,6	0,291	0,170	5,1
Neu	31,2	26,4	58,4	0,345	0,201	3,1
Alt 1	31,2	26,8	58,8	0,324	0,190	2,2
Alt 2	31,6	27,0	59,2	0,332	0,197	2,2
Mittel	31,0	25,9	58,8	0,346	0,204	3,0

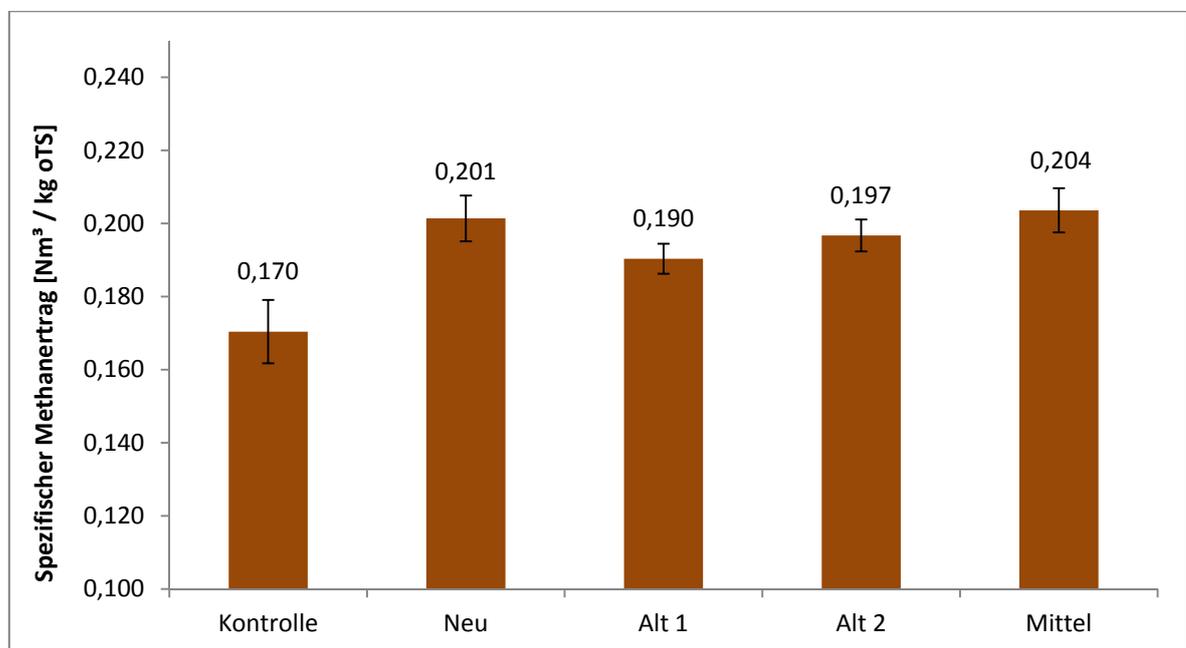


Abbildung 12: Spezifischer Methanertrag des mit verschiedenen Ketten aufbereiteten Pferdemistes.

## 1.2.2. Untersuchungen zu Mischungsverhältnissen und Gärtemperatur

### Material und Methode

Aufgrund der hohen Trockensubstanzgehalte des Pferdemistes ist eine Monovergärung dieses Substrates in Nassfermentationsanlagen nicht möglich. Im Rahmen eines kontinuierlichen Gärtests sollte daher die Co-Fermentation mit Rindergülle untersucht werden. Außerdem sollten durch die Zugabe eines Enzympräparates und die mechanische Aufbereitung des Pferdemistes die Effekte auf die Gasproduktion erfasst werden. Zusätzlich wurde der unaufbereitete und mechanisch aufbereitete Pferdemist bei mesophiler (40° C) und thermophiler (50° C) Gärtemperatur vergoren. Aufgrund dieser Versuchsanordnung ergaben sich für die mesophile Gruppe die Varianten

- Rindergülle (Rindergülle);
- Pferdemist unaufbereitet (PM U);
- Pferdemist unaufbereitet mit Enzymzugabe (PM U + Enz);
- Pferdemist aufbereitet (PM QZ).

Für die thermophile Versuchsgruppe ergaben sich drei Versuchsvarianten:

- Rindergülle (Rindergülle);
- Pferdemist unaufbereitet (PM U);
- Pferdemist aufbereitet (PM QZ).

Jede Versuchsvariante wurde zweimal wiederholt. Für die Durchführung dieses Versuches wurden daher 14 Durchflussfermenter mit je 17 l Faulraumvolumen eingesetzt (Abbildung 13). Diese befinden sich im Biogaslabor der Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie.

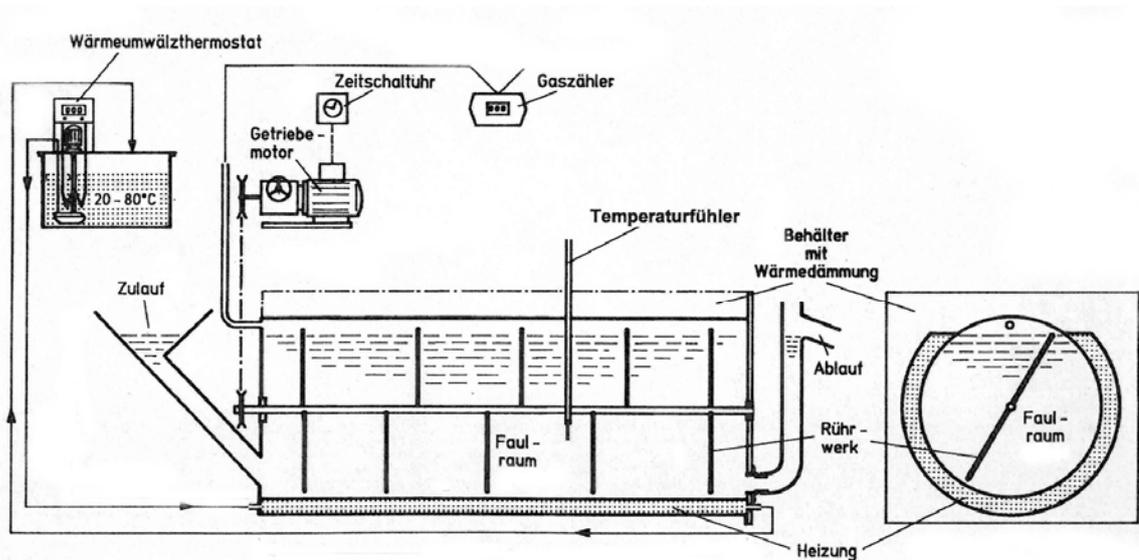


Abbildung 13: Schema der kontinuierlichen Fermenter

Die aus Edelstahl gefertigten Fermenter werden durch eine doppelwandige Außenhülle mit Warmwasser beheizt. Die Temperierung erfolgt über zwei getrennte Heizkreisläufe mit Wasserbädern. Das produzierte Biogas gelangt durch Gaswaschflaschen in die Gasspeichersäcke. Die Erfassung der gebildeten Gasmengen und Gasqualität ( $\text{CH}_4$ - und  $\text{CO}_2$ -Konzentration) erfolgt einmal täglich mittels Massendurchflussmessgerät und Infrarot-Gassensor.

Während des Versuches wurde der pH-Wert alle vier Tage gemessen und wöchentlich wurden über die Abläufe der Fermenter Gärsubstratproben entnommen, die auf folgende Parameter im Analytiklabor der Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie untersucht wurden:

- Flüchtige Fettsäuren;
- TS- und oTS-Gehalte;
- FOS/TAC.

Ebenfalls wurden die TS- und oTS-Gehalte der zugeführten Substrate wöchentlich ermittelt.

Die Fütterungsration in diesem Versuch bestand zu 85 % der täglich zugeführten oTS-Menge aus Pferdemist und 15 % der täglich zugeführten oTS-Menge aus Rindergülle. Damit konnte ein stabiler TS-Gehalt von 15 % in der Ration erreicht werden.

Die hydraulische Verweilzeit wurde auf 35 Tage festgelegt. Die Raumbelastung sollte bei 3,0 kg oTS/m<sup>3</sup>\*d liegen.

Aufgrund dieser Randparameter wurde der Pferdemist von der Biogasanlage Rott (Aidlingen, Landkreis Böblingen) bezogen. An der Biogasanlage ist ein Mewa Bio-QZ installiert, mit dem der Pferdemist mechanisch aufbereitet wurde. Hierfür wurde eine Zerkleinerungszeit von 20 Sekunden bei einem Befüllungsstopp von 80 A Stromaufnahme des Bio-QZ gewählt. Der unbehandelte Pferdemist stammte aus der gleichen Charge wie der aufbereitete Pferdemist. Aufgrund des hohen Langstrohanteils musste der unaufbereitete Pferdemist vor der Verwertung im Durchflussversuch auf eine maximale Partikellänge von 5 cm zerkleinert werden. Dadurch sollten Verstopfungen der Ein- und Ausläufe der Versuchsfermenter verhindert werden. Nach erfolgter TS- und oTS-Bestimmung des Pferdemistes wurden für den Versuch für jeden Fermenter die täglichen Fütterungsportionen abgewogen und in Kunststoffbeuteln bei -18° C gelagert.

Die Rindergülle wurde vom Meiereihof der Versuchstation der Universität Hohenheim bezogen und in Fässern bei 4° C gelagert.

Um für den Versuch einheitliche Startbedingungen bezüglich der Bakterienpopulationen und Milieubedingungen zu schaffen wurden sämtliche Fermenter mit dem identischen Impfmateriale befüllt. Aufgrund der zwei verschiedenen Temperaturregime wurde das Impfmateriale aus dem Nachgärer der mesophil-betriebenen Biogasanlage Unterer Lindenhof der Versuchstation der Universität Hohenheim und dem Nachgärer der thermophil-betriebenen Biogasanlage Knecht (Pliezhausen, Landkreis Reutlingen) bezogen. Vor der Verwendung wurde die homogenisierten Materialien im Verhältnis 1:1 vermischt, um den jeweiligen Bakterienpopulationen die Chance zu bieten, sich an die vorgegebenen Temperaturstufen anzupassen.

Der Versuch startete am 11.07.2012 und wurde nach 155 Versuchstagen beendet. Eingeteilt ist der Versuch in fünf Phasen (Tabelle17).

Tabelle 17: Versuchsphasen des kontinuierlichen Fermentationsversuchs

Phase	Bezeichnung	Zeitraum [d]
1	Startphase	0 – 21
2	1. Verweilzeit (1. VW)	22 – 57
3	2. Verweilzeit (2. VW)	58 – 93
4	3. Verweilzeit (3. VW)	94 – 132
5	ohne Gülle	133 – 155

In der Startphase wurden, bis auf die Nullvarianten, alle Fermenter mit dem unaufbereiteten Pferdemist identisch beschickt. Hierbei sollte die Vergleichbarkeit der einzelnen Fermenter überprüft werden. Am 22. Versuchstag begann dann die Umstellung der Fütterung entsprechend der Versuchsgruppen. Aufgrund stark schwankender TS-Gehalte der Rindergülle wurde die Fütterung am Versuchstag 57, 56 und 60 angepasst. Die zweite Verweilzeit des Versuches begann am Versuchstag 58. Ab hier wurde eine Stabilisierung der Gasproduktion und Beendigung der Einfahrphase der Versuchsanlage erwartet. Der Zeitraum der dritten Verweilzeit dauerte vom 94. bis zum 132. Versuchstag. In der fünften Versuchsphase wurde auf den Zusatz der Rindergülle verzichtet und die Raumbelastung durch eine Erhöhung der zugeführten Pferdemistmenge auf 3,5 kg / oTS m<sup>3</sup>\*d gesteigert.

## Ergebnisse und Diskussion

In Abbildung 14 sind die Ergebnisse der wöchentlichen Analysen der TS- und oTS-Gehalte der verwendeten Substrate dargestellt. Die Rindergülle hatte einen mittleren TS-Gehalt von  $4,79 \pm 1,66$  %. Bei dem unaufbereiteten Pferdemist lag der TS-Gehalt bei  $56,03 \pm 5,84$  %. Tendenziell niedriger war der TS-Gehalt des aufbereiteten Pferdemistes mit  $49,19 \pm 3,79$  %. Ein signifikanter Unterschied zwischen den Pferdemistvarianten bestand jedoch nicht.

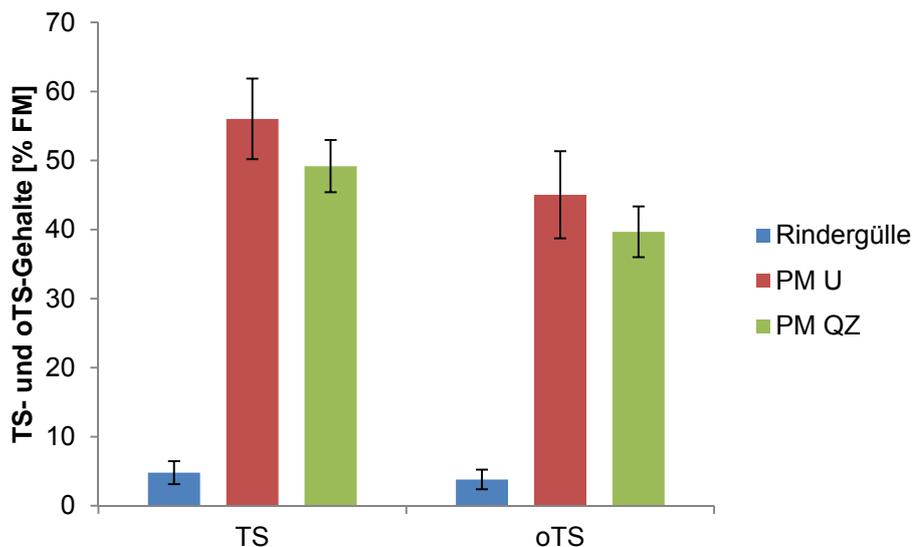


Abbildung 14: TS- und oTS-Gehalte der verwendeten Substrate

Die durchschnittliche Raumbelastung der mesophilen Versuchsgruppen ist in Abbildung 15 dargestellt. Die Fütterung war über den gesamten Versuchszeitraum stabil. Die Schwankungen der zugeführten oTS-Mengen wurden größtenteils durch die Rindergülle verursacht. Aufgrund begrenzter Lagerkapazitäten und Aufbewahrungsdauer war eine Bevorratung der Rindergülle über den gesamten Versuchszeitraum nicht möglich. Während der Versuchsphasen eins bis vier lag die Raumbelastung entsprechend der Zielvorgaben bei  $3,0 \text{ kg oTS} / \text{m}^3 \cdot \text{d}$ . Im letzten Versuchsabschnitt betrug die Raumbelastung  $3,5 \text{ kg oTS} / \text{m}^3 \cdot \text{d}$ .

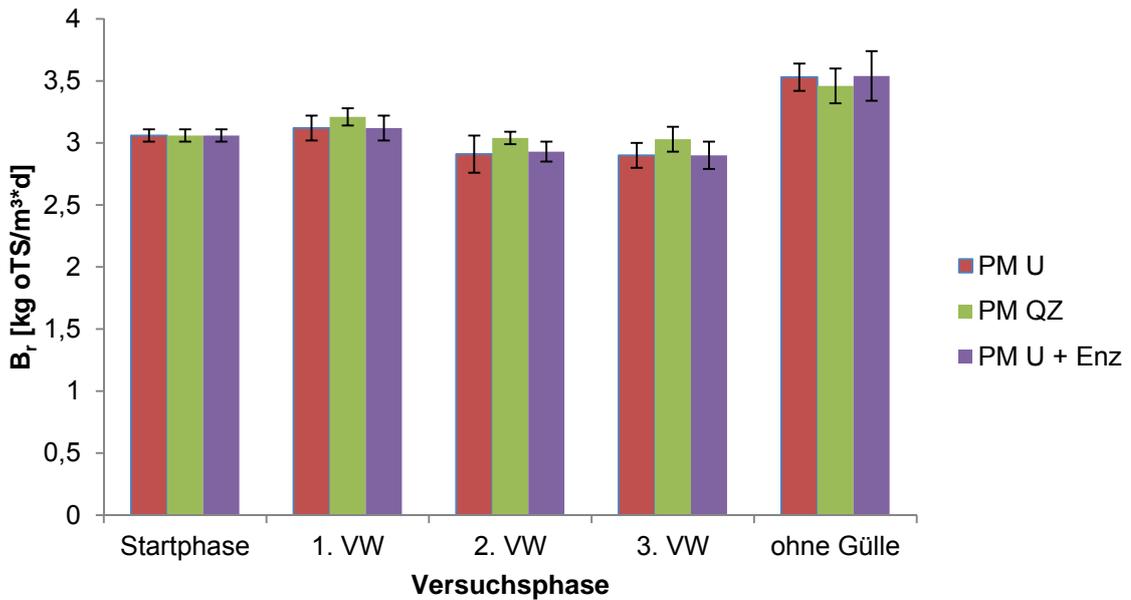


Abbildung 15: Raumbelastung ( $B_r$ ) der mesophilen Versuchsgruppen

Analog zu der vorherigen Abbildung ist in Abbildung 16 die durchschnittliche Raumbelastung der thermophilen Versuchsgruppe aufgetragen. Auch hier bestehen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten.

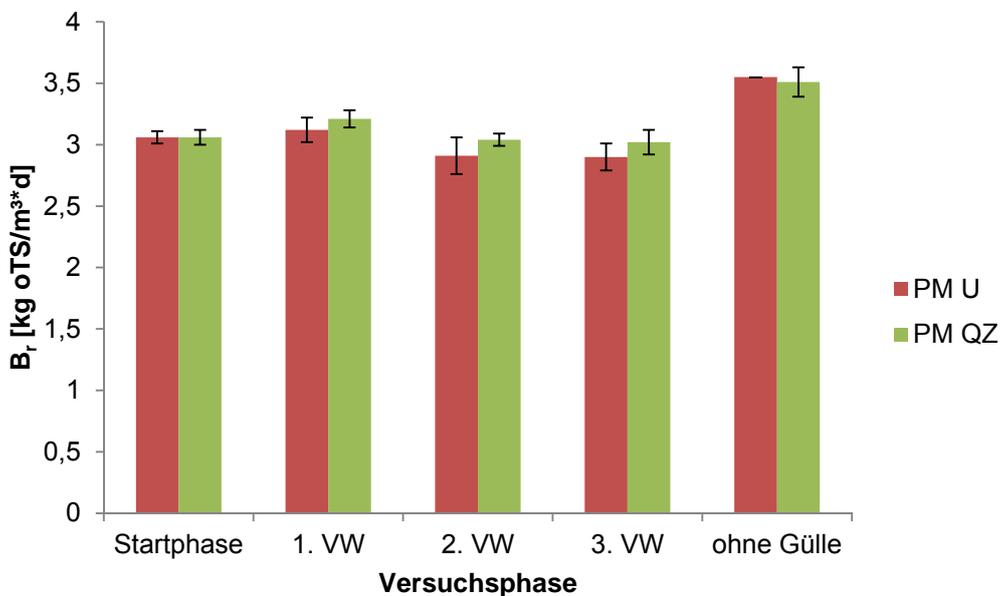


Abbildung 16: Raumbelastung ( $B_r$ ) der thermophilen Versuchsgruppen

Die TS- und oTS-Gehalte der Gärsubstrate der mesophilen Versuchsgruppen über den Versuchszeitraum sind in Abbildung 17 dargestellt. Nach Ablauf der 1. Verweilzeit wird eine Stabilisation der TS- und oTS-Gehalte der Fermenter deutlich. Zwischen den Fütterungsvarianten wird über den Versuchszeitraum jedoch kein Unterschied deutlich. Insgesamt befanden sich die TS-Konzentrationen der Gärsubstrate auf einem optimalen Niveau.

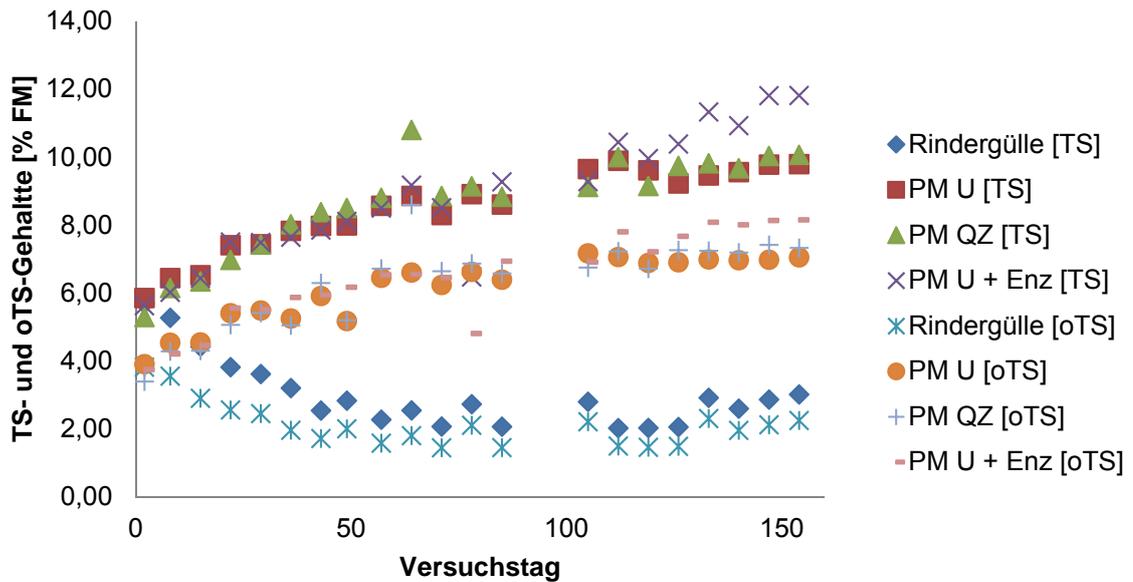


Abbildung 17: TS- und oTS-Gehalte der Gärsubstrate der mesophilen Versuchsgruppen

Die in Abbildung 18 aufgetragenen TS- und oTS-Konzentrationen der Fermenterhalte der thermophilen Versuchsgruppe zeigen einen identischen Verlauf zu der mesophilen Versuchsgruppe.

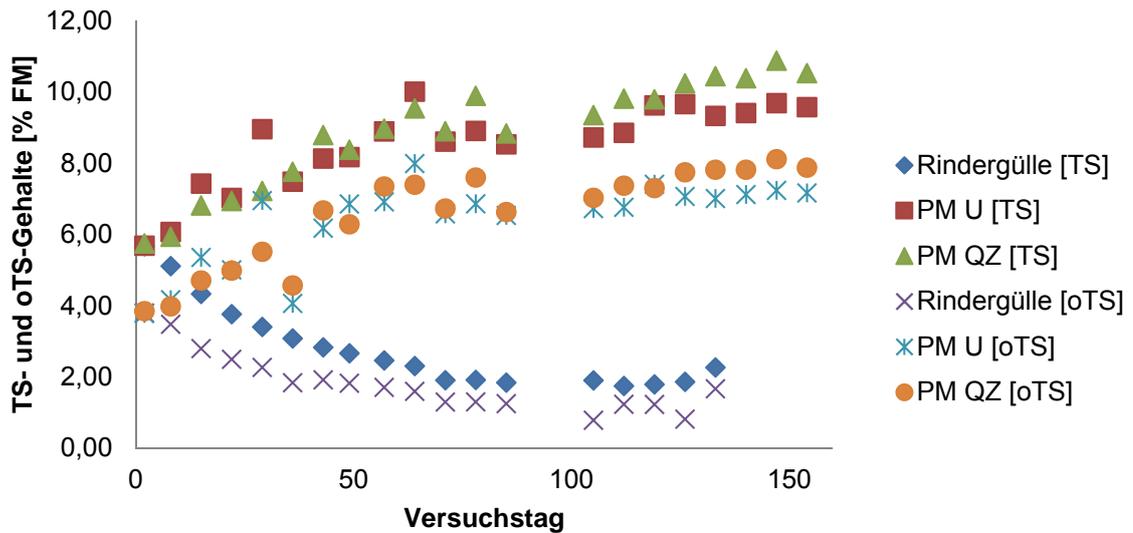


Abbildung 18: TS- und oTS-Gehalte der Gärsubstrate der thermophilen Versuchsgruppen

Die Ergebnisse der weiteren prozessbiologischen Analysen während des Versuches zeigen keine Störungen oder Hemmungen, die zu einer verringerten Gasproduktion hätten führen können. Aus diesen Daten lässt sich folgern, dass in diesem Versuch die Gefahr einer Überlastung des Prozesses zu keinem Zeitpunkt gegeben war (Abbildungen 19 bis 24).

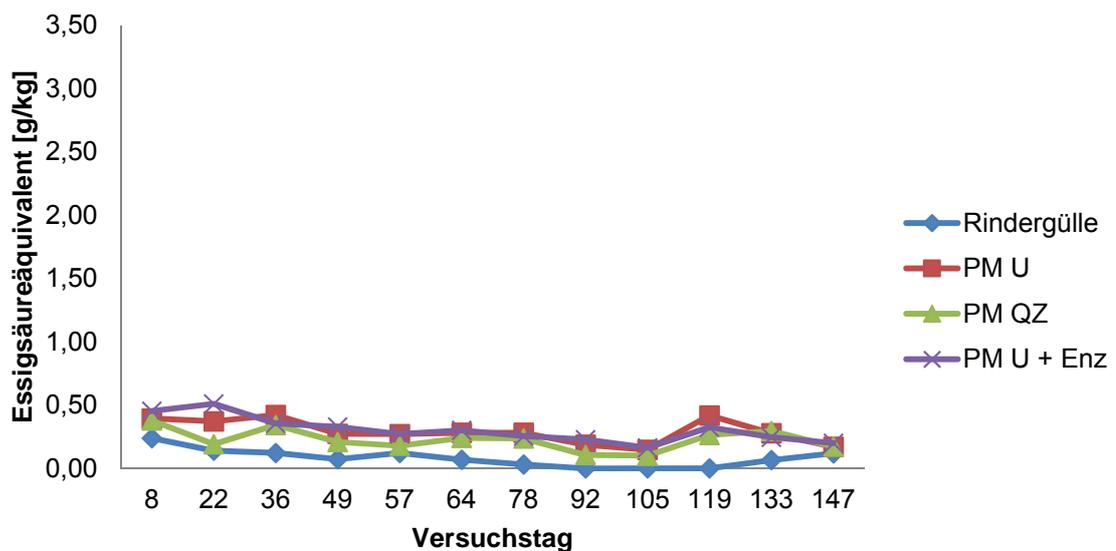


Abbildung 19: Essigsäureäquivalent (HAC) der Gärsubstrate der mesophilen Versuchsgruppe über den Versuchszeitraum

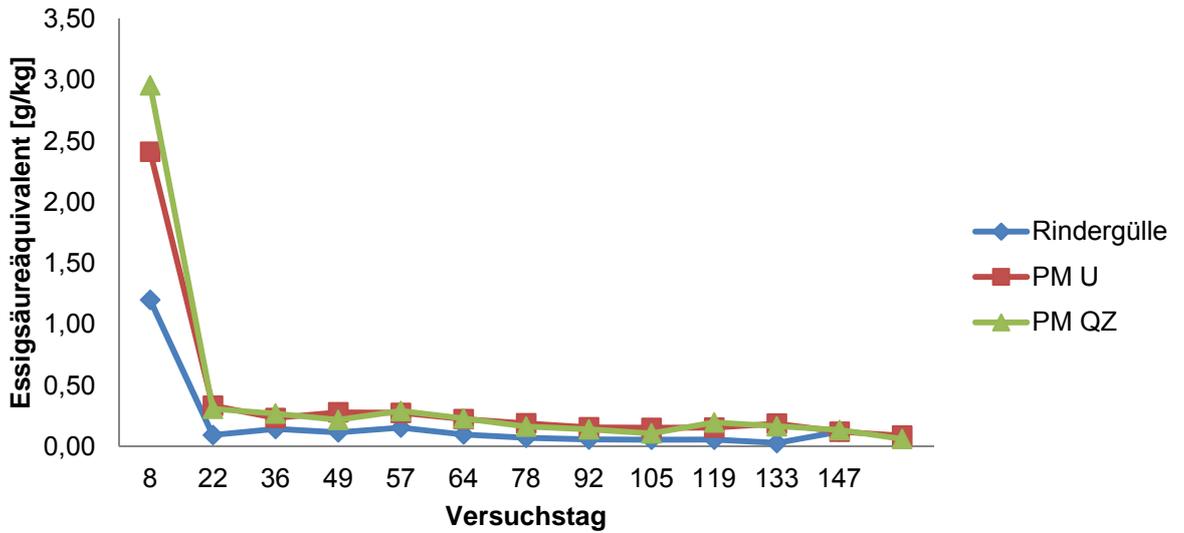


Abbildung 20: Essigsäureäquivalent (HAC) der Gärsubstrate der thermophilen Versuchsgruppe über den Versuchszeitraum

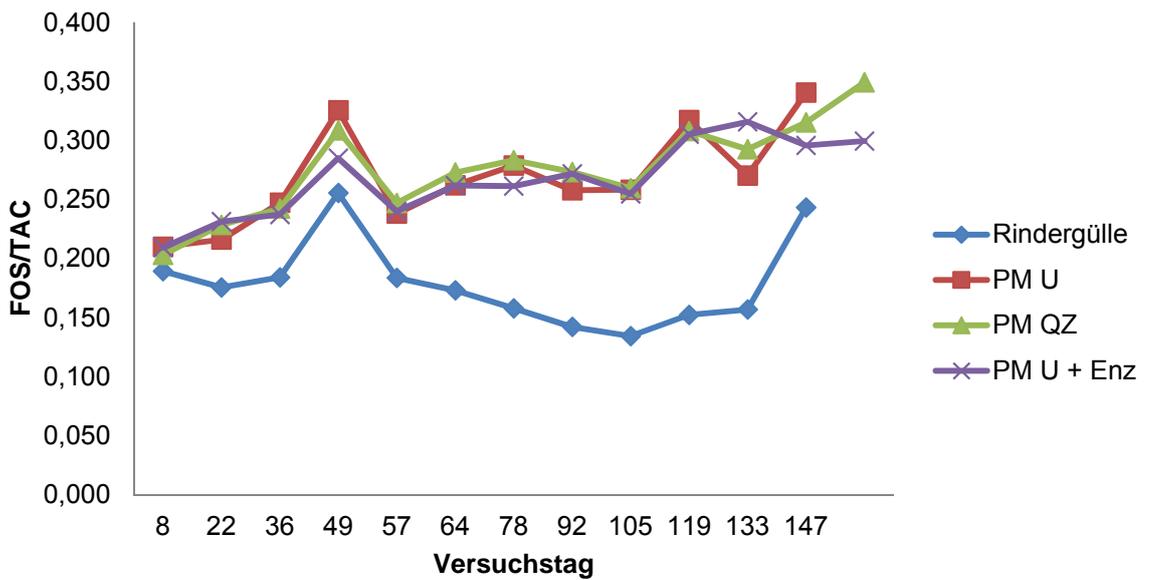


Abbildung 21: FOS/TAC-Werte der Gärsubstrate der mesophilen Versuchsgruppe über den Versuchszeitraum

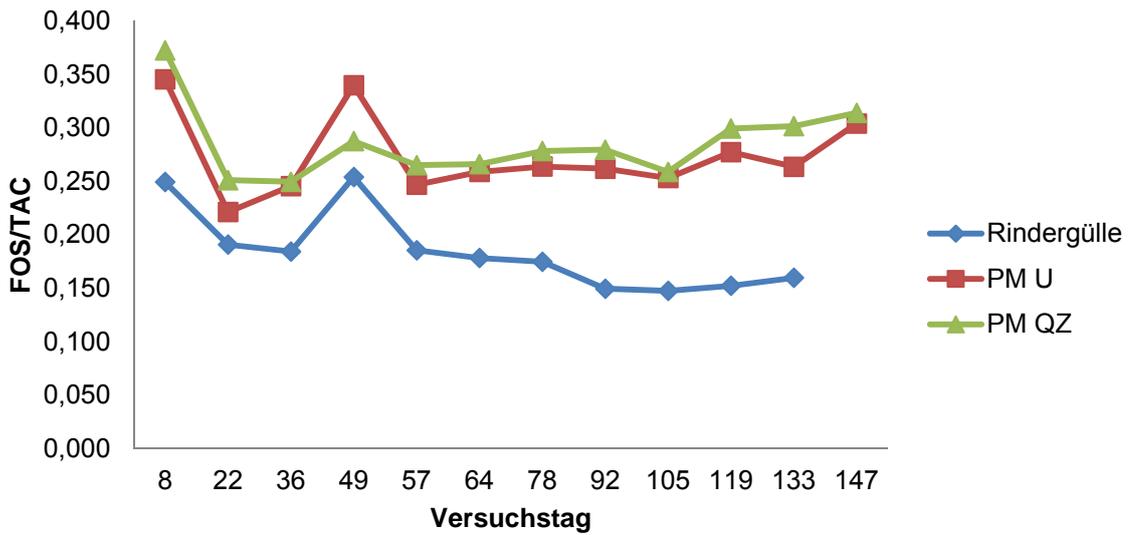


Abbildung 22: FOS/TAC-Werte der Gärsubstrate der thermophilen Versuchsgruppe über den Versuchszeitraum

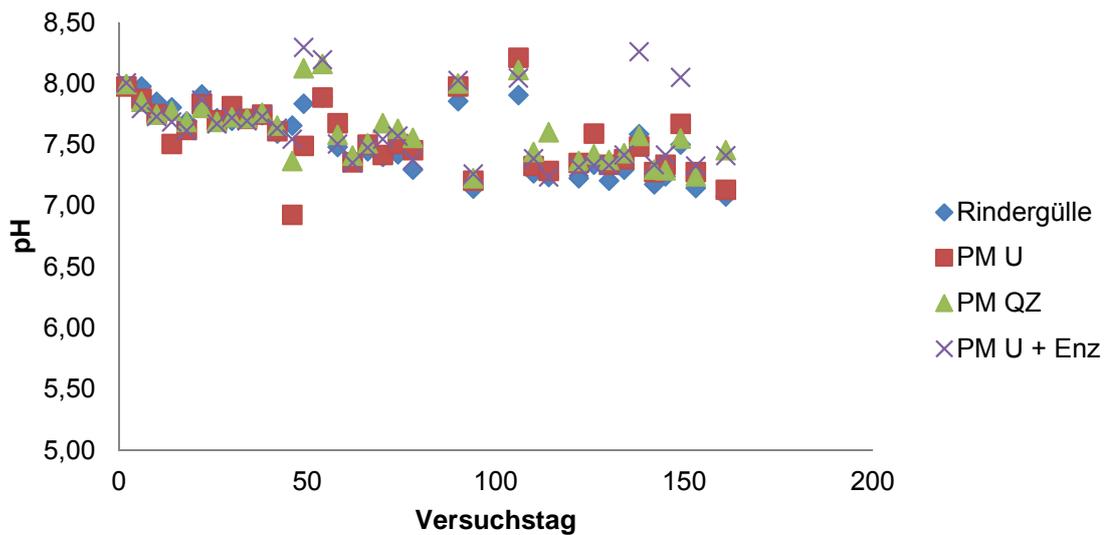


Abbildung 23: pH-Werte der Gärsubstrate der mesophilen Versuchsgruppe über den Versuchszeitraum

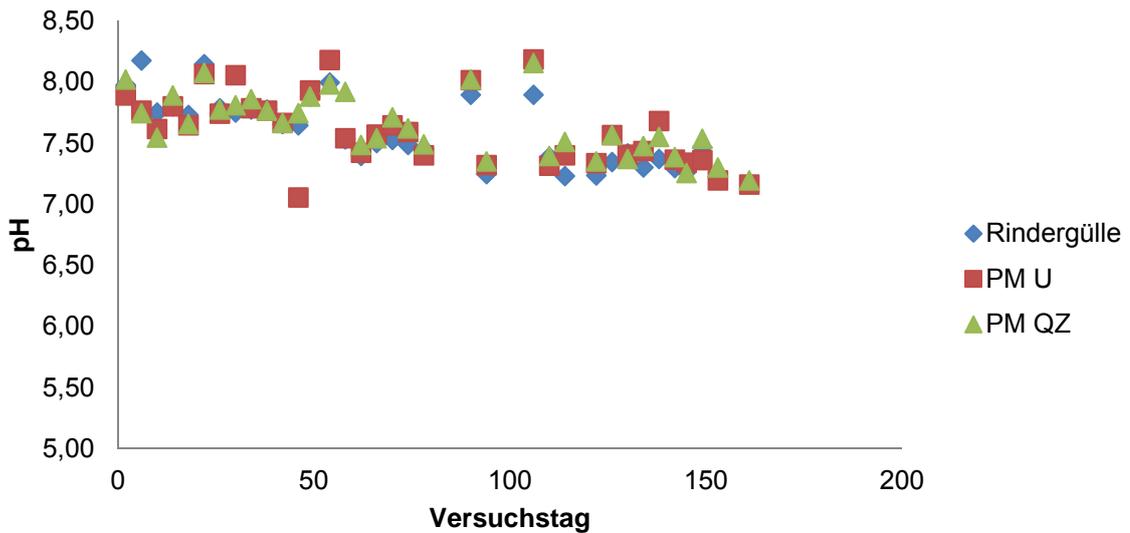


Abbildung 24: pH-Werte der Gärsubstrate der thermophilen Versuchsgruppe über den Versuchszeitraum

Die tägliche spezifische Methanproduktion der mesophilen Versuchsvarianten ist in Abbildung 25 aufgetragen. Die Methanerträge der einzelnen Gruppen Verlaufen über den gesamten Versuchszeitraum parallel und zeigen keine signifikanten Unterschiede. Aus der Abbildung geht deutlich hervor, dass der Zeitpunkt der stabilen Gasproduktion erst in der 2. Verweilzeit erreicht werden konnte.

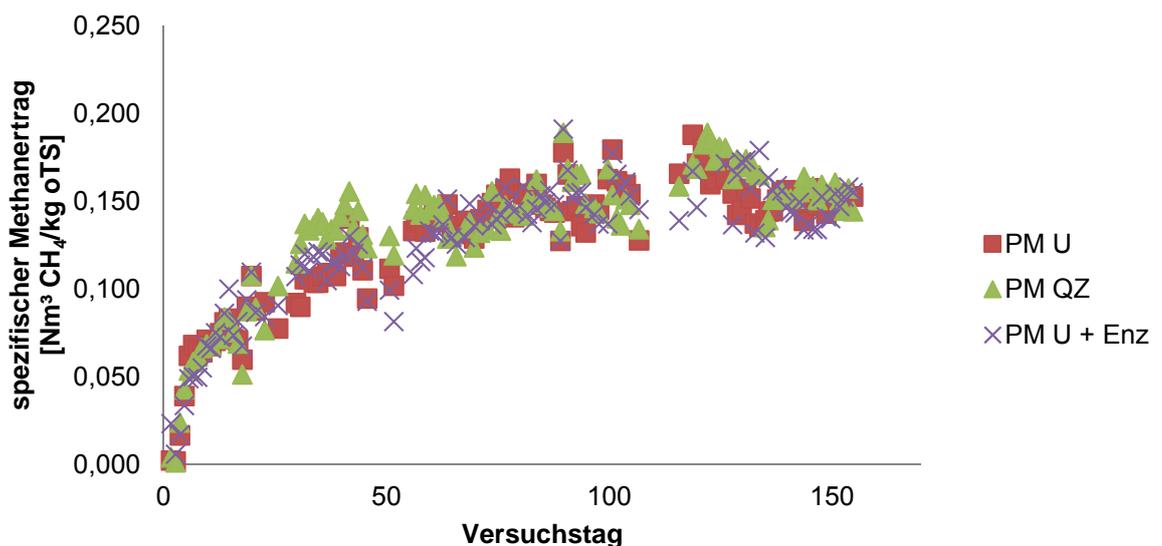


Abbildung 25: Täglicher spezifischer Methanertrag der mesophilen Versuchsgruppen über den Versuchszeitraum

In Abbildung 26 ist der tägliche spezifische Methanertrag der thermophilen Versuchsgruppen dargestellt. Bei dieser Temperaturvariante lagen die spezifischen Methanerträge der Pferdemitvarianten geringfügig höher. Zusätzlich steigt die Gasproduktion zum Versuchsbeginn deutlich schneller an, aber die stabile Phase der Gasproduktion wird wie bei der mesophilen Variante erst in der 2. Verweilzeit erreicht.

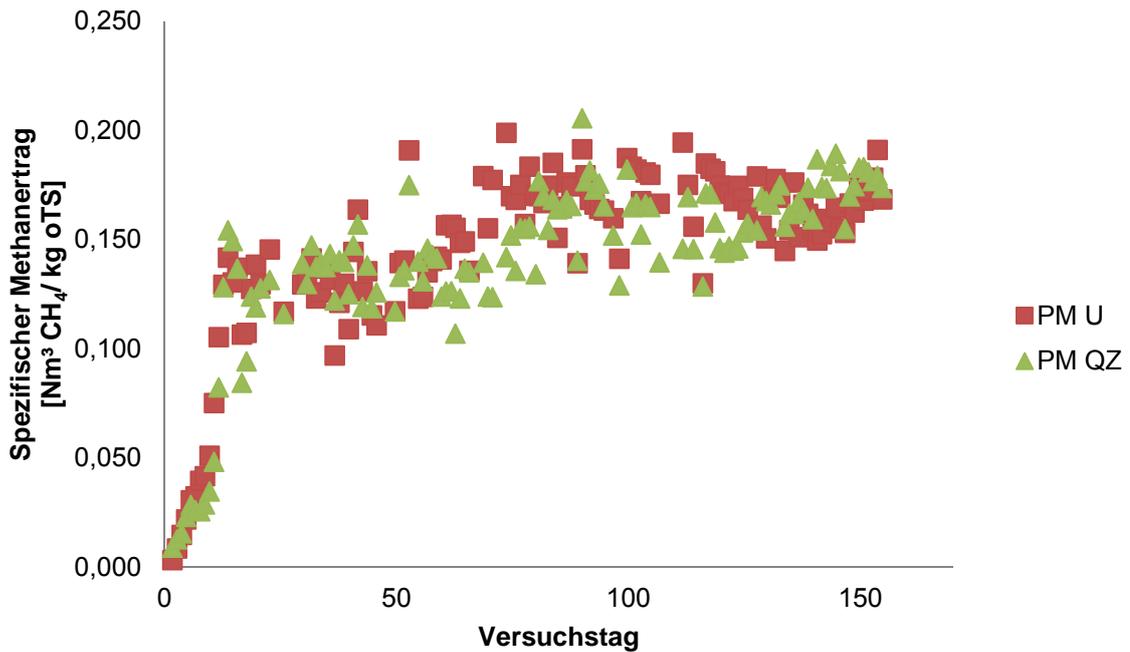


Abbildung 26: Täglicher spezifischer Methanertrag der thermophilen Versuchsgruppen über den Versuchszeitraum

Um die im kontinuierlichen Gärversuch ermittelten spezifischen Gaserträge zu validieren wurden Proben des unbehandelten und aufbereiteten Pferdemit in einem HBT-Versuch über 35 Tage vergoren. Die Ergebnisse dieses Batch-Tests sind in Tabelle 18 aufgeführt. Für den unbehandelten Pferdemit wurde ein spezifischer Methanertrag von  $0,166 \pm 0,028 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 / \text{kg oTS}$  ermittelt. Geringfügig niedriger lag der spezifische Methanertrag des aufbereiteten Pferdemit mit  $0,146 \pm 0,003 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 / \text{kg oTS}$ . Aufgrund der Erfahrungen aus vorangegangenen Untersuchungen wurde ein höherer spezifischer Gasertrag für den aufbereiteten Pferdemit erwartet. Die Gründe für dieses unerwartete Ergebnis können zum einem durch eine nicht repräsentative Probenahme des heterogenen Pferdemit verursacht worden

sein. Für den Batch-Test wurde der Inhalt von fünf Kunststoffbeuteln vermischt. Aufgrund der groben Struktur des unbehandelten Pferdemistes können an diesem Punkt Fehler entstanden sein. Zum anderen kann auch bei der Substratbeschaffung eine Variation in der Charge zu einem veränderten Gasertrag führen. Außerdem wurde der Pferdemist vor dem portionieren und einfrieren vorgeschnitten. Um dieses Material im HBT untersuchen zu können musste eine weitere Vorbehandlung mit einer Küchenmaschine durchgeführt werden. Dies kann einen hohen Effekt auf den Aufschluss des Materials haben und dadurch den Gasertrag positiv beeinflussen.

Tabelle 18: Spezifische Gaserträge der Pferdemistproben aus dem HBT-Versuch

Substrat	spezifischer Biogasertrag				spezifischer Methanertrag			
	Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg oTS				Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg oTS			
	$\bar{x}$	±	STD	VK	$\bar{x}$	±	STD	VK
PM U	0,331	±	0,028	8,4	0,166	±	0,012	7,0
PM QZ	0,287	±	0,010	3,4	0,146	±	0,003	2,3

Die mittleren spezifischen Methanerträge der mesophilen Versuchsgruppen sind in Abbildung 27 dargestellt. Aufgrund der instabilen Gaserträge ist eine Betrachtung des Mittelwerts der Startphase und 1. Verweilzeit nicht sinnvoll. Daher sind bei dieser Auswertung nur die Ergebnisse der 2. und 3. Verweilzeit sowie der letzten Versuchsphase verwertet worden. Während der 2. Verweilzeit lag der spezifische Methanertrag des unaufbereiteten Pferdemistes bei  $0,146 \pm 0,011$  Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> / kg oTS und der des aufbereiteten Pferdemistes bei  $0,145 \pm 0,017$  Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> / kg oTS. Die Zudosierung des Enzympräparates bewirkte keinen Effekt bezüglich des spezifischen Gasertrages. So lag für diese Versuchsvariante während der 2. Verweilzeit der spezifische Methanertrag bei  $0,143 \pm 0,015$  Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> / kg oTS. Auch in den weiteren Versuchsphasen konnte kein signifikanter Unterschied im spezifischen Gasertrag zwischen den Varianten festgestellt werden. Tendenziell zeigt der aufbereitete Pferdemist in der letzten Versuchsphase die höheren Gaserträge. Im Vergleich dieser Ergebnisse zu den HBT-Werten lagen die Gaserträge aus beiden Versuchen des unaufbereiteten Pferdemistes auf dem gleichen Niveau. Bei dem aufbereiteten Pferdemist konnten im Durchflussversuch tendenziell höhere Gaserträge

als im HBT ermittelt werden. In diesem Punkt besteht jedoch noch Klärungsbedarf und eine Wiederholung des HBT-Versuchs sollte angestrebt werden bevor diese Folgerung als richtig betrachtet werden kann.

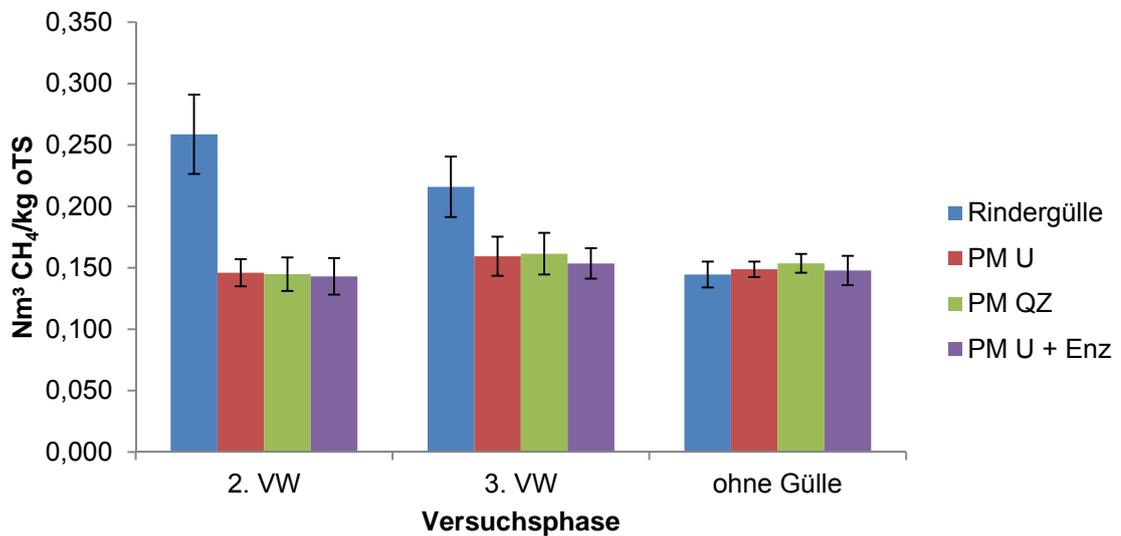


Abbildung 27: Mittlerer spezifischer Methanertrag der mesophilen Versuchsgruppen

In Abbildung 28 sind die mittleren spezifischen Methanerträge der thermophilen Versuchsgruppen dargestellt. Die spezifischen Methanerträge der Pferdemistvarianten lagen bei der thermophilen Prozessführung tendenziell über den Ergebnissen des mesophilen Temperaturregimes. Zusätzlich lagen die spezifischen Methanerträge der unaufbereiteten Variante in der 2. und 3. Verweilzeit ( $0,167 \pm 0,015 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 / \text{ kg oTS}$  und  $0,171 \pm 0,014 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 / \text{ kg oTS}$ ) in der Tendenz höher als der aufbereitete Pferdemist ( $0,150 \pm 0,022 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 / \text{ kg oTS}$  und  $0,156 \pm 0,014 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 / \text{ kg oTS}$ ). In der letzten Versuchsphase drehte sich diese Tendenz und der aufbereitete Pferdemist zeigte die höchsten spezifischen Methanerträge des gesamten Versuches mit  $0,173 \pm 0,010 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 / \text{ kg oTS}$ .

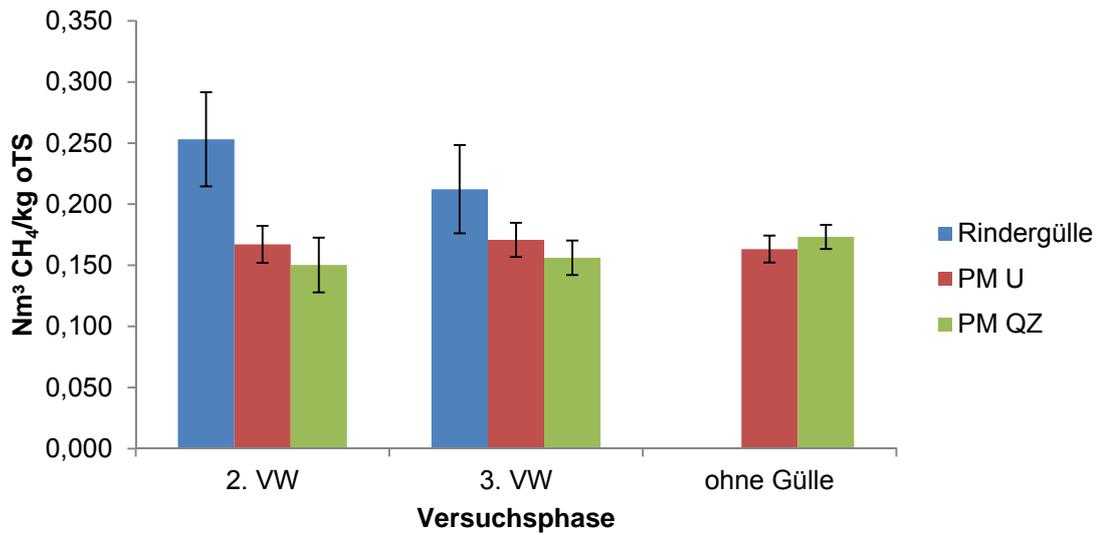


Abbildung 28: Mittlerer spezifischer Methanertrag der thermophilen Versuchsgruppen

Die Ergebnisse dieses Durchflussversuches zeigen, dass Pferdemist in kontinuierlich betriebenen Fermentern grundsätzlich verwertbar ist. Aufgrund der Zusammensetzung des Pferdemistes ist eine prozessbiologische Störung durch eine erhöhte Raumbelastung nicht zu erwarten. Zu beachten sind jedoch bei der Nutzung des Pferdemistes die hohen TS-Gehalte dieses Substrates. Durch zu hohe Anteile von Pferdemist in der Ration kann es zu einer deutlichen Verringerung der Pump- und Rührfähigkeit des Fermenterinhalt kommen und die Gasfreisetzung kann blockiert werden. Der Zusatz einer kommerziell erhältlichen Enzymmischung zeigte in diesem Versuch keinen Effekt. Auch die mechanische Aufbereitung zeigte eine positive Tendenz nur in der letzten Versuchsphase.

### 1.3. AP 3: Versuche im Praxismaßstab an der Forschungsanlage

#### Zielsetzung

Im Rahmen eines Praxisversuches an der Forschungsbiogasanlage Unterer Lindenhof der Universität Hohenheim sollte die Verwertbarkeit von Pferdemist in Biogasanlagen nachgewiesen werden. Dabei sollte verfahrenstechnische Schwierigkeiten und Prozessgrenzen betrachtet werden, um ein möglichst umfassendes Wissen für den praktischen Einsatz zu generieren. Zusätzlich wurden die Möglichkeiten und Grenzen der mechanischen Aufbereitung mittels Mewa Bio-QZ untersucht.

#### Material und Methode

Die Forschungsbiogasanlage (Abbildung 20) hat eine Leistung von 186 kW<sub>el</sub> und ist an die Versuchsstation für Nutztierhaltung und Tierzucht Unterer Lindenhof in Eningen unter Achalm, 35 km südlich von Stuttgart, angegliedert.



Abbildung 29: Forschungsbiogasanlage Unterer Lindenhof

Die Biogasanlage besteht aus zwei Fermentern und einem Nachgärer. Die Rundbehälter sind aus Beton gefertigt und haben einen Durchmesser von 14 m und eine Höhe von 6 m (923 m<sup>3</sup> Bruttovolumen). Die Fermenter sind mit einer Betondecke ausgestattet. Der Nachgärer hat ein Doppelmembran-Tragluftdach, welches als Gasspeicher (333 m<sup>3</sup> Volumen) der Anlage dient. In jedem Behälter sind je zwei einzeln absperrbare Heizkreise aus Edelstahlwell- und glattrohr sowie eine zusätzliche Fußbodenheizung im Fermenter 1 zu Temperierung installiert. Zur Kontrolle der Wärmeverteilung in den Behältern sind sowohl an der Außenwand als auch an der Mittelstütze in jeweils drei verschiedenen Höhen auswechselbare Temperatursensoren. Zur Durchmischung des Gärsubstrates ist in jedem Behälter ein Tauchmotorrührwerk (Flygt, 13 kW) installiert. Darüber hinaus ist im Fermenter 1 noch ein Langachs-rührwerk (Rema Biogator HPR 1, 15,0 kW) und im Fermenter 2 ein Schrägachs-rührwerk (Streisal Biobull, 11,0 kW) verbaut. In die Betondecken sind je Fermenter zwölf Öffnungen zur Entnahme von Proben eingelassen. Diese ermöglichen eine Beprobung der Fermenter in unterschiedlichen Höhen. Dadurch sind 3 dimensionale Untersuchungen zur Nährstoffverteilung und Fermenterbiologie im Praxismaßstab möglich.

Jeder Fermenter verfügt über einen stationären Vertikalmischer zum Eindosieren der Feststoffe. In der zentralen Anlagensteuerung (ZAS) werden die Futtersollmengen in Rezepten zusammengestellt. Beim Befüllen der Vertikalmischer erhält der Fahrer des Teleskopladers über Funk von der Zentralen Anlagensteuerung die Angaben zu den Einfüllmengen der einzelnen Substrate. Die von diesen Sollmengen abweichenden Ist-Futtermengen werden von der ZAS erfasst und fließen in die Berechnung der tatsächlichen Futtermischungen ein. So kann die Substratmenge je Fermenter und Komponente genau erfasst werden. Die Substratmischungen werden entsprechend der in der ZAS vorgewählten Intervalle gewichtsabhängig den Fermentern zugeführt. Der auf der Versuchstation anfallende Flüssigmist wird in einer Vorgrube zwischengespeichert und von dort aus mittels Exzentrerschneckenpumpe in die Fermenter gefördert. An dieser zentralen Pumpstation sind die Vorgrube, die beiden Fermenter, der Nachgärer sowie die beiden Zwischenspeichergruben mit jeweils separaten Saug- und Druckleitungen angeschlossen. Die geförderten Substratmengen werden mit einem induktiven Durchflussmengenmesser erfasst. Zusätzlich steht für das Eindosieren von Getreide und Prozesshilfsstoffen ein

1 m<sup>3</sup> großer Behälter (WEDA Flüssigfütterungssysteme Komfort 4PX) mit einer Dosierpumpe und separaten Leitungen zu den Fermentern und dem Nachgärer zur Verfügung. Das produzierte Biogas wird aus den beiden Fermentern in den Gasbereich des Nachgärers eingeleitet. Am Ausgang jedes Fermenters ist in einer austauschbaren Bypassleitung die Messtechnik zum Erfassen der Gasqualität, der Gasmenge sowie der Gastemperatur und des Druckes installiert.

Verwertet wird das Biogas in einem sechs Zylinder Gas-Otto-BHKW mit einer Leistung von 186 kW<sub>el</sub> und 202 kW<sub>th</sub>. Bevor das Gas in den Motor gelangt wird es aktiv gekühlt um den Wassergehalt im Gas zu verringern und mit einem Aktivkohlefilter das H<sub>2</sub>S aus dem Gas entfernt.

Da die Biogasmenge jedes Fermenters zur Bewertung der jeweiligen Variante erfasst werden muss, bevor das Gas entwässert und entschwefelt werden kann, ergibt sich hierbei eine besondere Herausforderung. Die Gasmessung an dieser Stelle führt leicht zu Problemen durch Ablagerungen. Aufgrund starker Schwefelablagerungen und dadurch verursachter Schädigung der bisher eingesetzten Gasdurchflussmessgeräte in den Bypassleitungen wurden zum Start der Messungen im Juni 2012 zwei neue Gasdurchflussmessgeräte (Esters GDR 300) getestet und installiert. Dafür musste die Bypassleitung komplett erneuert werden.

Die Aufstellung des Querstromzespanners am Fermenter 1 ist im Juni 2012 erfolgt. Dafür musste das Eintragungssystem in den Fermenter angepasst werden und der Vertikalmischer wurde auf ein neues Fundament umgesetzt (Abbildung 21 und 22). Zur Beschickung des Bio-QZ wurden zwei neue Förderschnecken mit einem Durchmesser von 500 mm installiert. Für die Untersuchungen zur Energieeffizienz wurden der Stromverbrauch und die Betriebsstunden der Förderschnecken und des Bio-QZ von der ZAS aufgezeichnet und gespeichert.

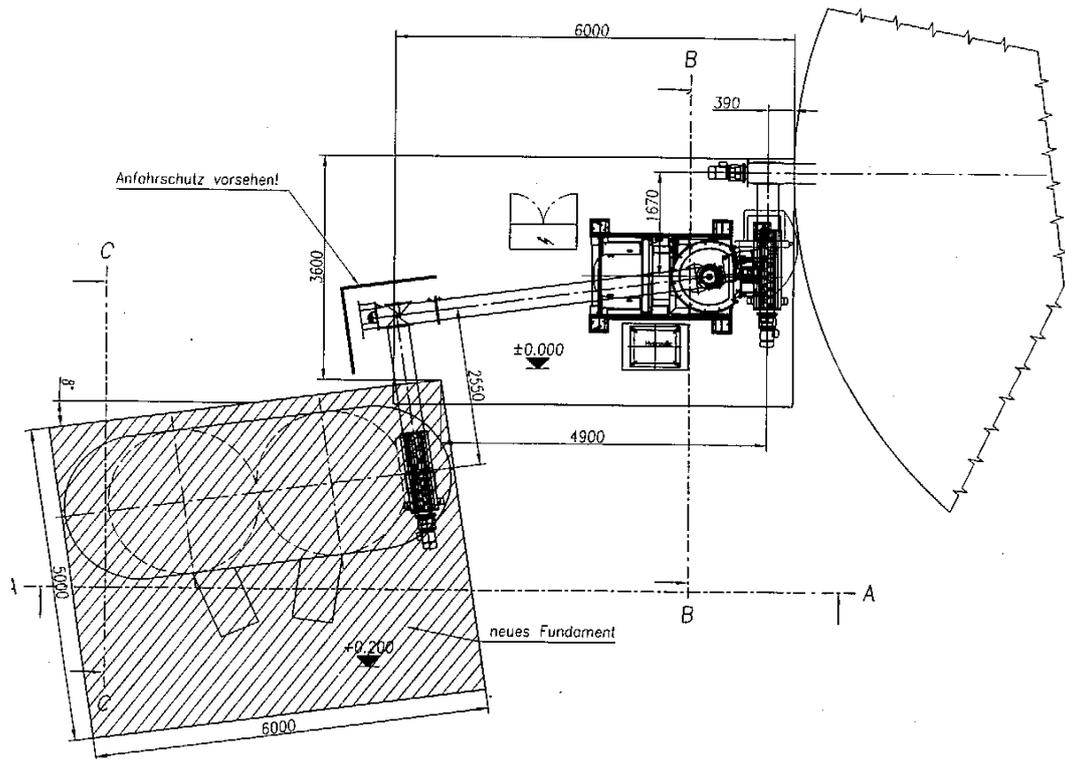


Abbildung 30: Aufstellplan des Bio-QZ am Fermenter 1 der Biogasanlage



Abbildung 31: Installierter Bio-QZ am Fermenter 1 der Biogasanlage

Aufgrund der Ergebnisse zur optimalen Aufbereitungsintensität aus Arbeitspaket 2 wurden die Aufbereitungsparameter des Bio-QZ folgendermaßen gewählt:

- Zerkleinerungszeit 15 Sekunden
- Befüllstop bei einer Stromaufnahme von 65 A

Die Untersuchungen zum Einsatz von Pferdemistes und der mechanischen Aufbereitung im Praxismaßstab an der Forschungsbiogasanlage Unterer Lindenhof wurden in vier Abschnitte aufgeteilt. Im ersten Abschnitt wurden nach der Installation des Bio-QZ am Fermenter 1 beide Gärbehälter ohne Pferdemist betrieben. In dieser Phase wurde die Einbindung des Zerkleinerungsaggregates im routinemäßigen Anlagenbetrieb getestet und die Vergleichbarkeit der beiden Hauptfermenter überprüft. Im zweiten und dritten Abschnitt der Untersuchungen wurde die Verwertbarkeit von Pferdemist mit einem Anteil von bis zu 25 % an der Gesamtration im aufbereiteten und unaufbereiteten Zustand an der Versuchsanlage erprobt. Nach Abschluss dieser Untersuchungen wurden die Untersuchungen auf den Fermenter 1 beschränkt und der Pferdemistanteil in der Fütterungsration auf 50 % gesteigert.

## Ergebnisse und Diskussion

### 1. Versuchsphase

Nach dem Umbau und der Erweiterung der Eintragstechnik am Fermenter 1 Mitte Juni 2012 erfolgte die abschließende Installation der neuen Gasdurchflussmessgeräte am 27.06.2012. Die Testphase begann somit am 28.06.2012 und endete nach 52 Tagen am 18.08.2012.

In Tabelle 19 ist die prozentuale Zusammensetzung der Fütterungsrationen der beiden Versuchsreaktoren in diesem Zeitraum dargestellt. Im Vergleich zum landesweiten Durchschnitt der Biogasanlagen, ist der Anteil an Wirtschaftsdünger in der Ration mit über 50 % sehr hoch (Landesdurchschnitt 37 %) (Härdtlein et al., 2013). Als weitere Einsatzstoffe wurden an der Biogasanlage Silagen und zu einem geringen Anteil Getreideschrot eingesetzt. Bei den pflanzlichen Substraten dominierte in diesem Zeitraum die Maissilage und Grassilage mit je ca. 15 %.

Tabelle 19: Rationszusammensetzung in der ersten Versuchsphase „ohne Pferdemit“.

Substrat		F1	F2
Festmist	[%]	9,4	10,9
Gülle	[%]	46,1	40,0
Maissilage	[%]	14,3	15,8
Grassilage	[%]	13,9	15,3
Getreide-GPS	[%]	12,2	12,4
Getreideschrot	[%]	4,1	5,6

Die weiteren Fütterungsparameter dieser Versuchsphase sind in Tabelle 20 beschrieben. Die beiden Fermenter wurden täglich mit der nahezu identischen Fütterungsmenge von 9,1 bzw. 9,2 t beschickt. Aufgrund der geringfügig unterschiedlichen Rationszusammensetzung wurden über den Feststoffeintrag des Fermenter 1 durchschnittlich 4,5 t Substrat pro Tag dosiert und bei dem Fermenter 2 5,0 t pro Tag. Dementsprechend lag die Raumbelastung im Fermenter 1 tendenziell geringfügig niedriger. Bei der Betrachtung der theoretischen hydraulischen Verweilzeit sind keine Unterschiede zwischen den Gärbehältern erkennbar.

Tabelle 20: Fütterungsparameter in der ersten Versuchsphase „ohne Pferdemit“.

Parameter	Einheit	Fermenter 1		Fermenter 2	
			STD		STD
Frischmasse	[t/d]	9,1	± 1,6	9,2	± 1,6
Feststoff	[t/d]	4,5	± 0,7	5,0	± 0,7
oTS	[t/d]	1,7	± 0,2	2,0	± 0,2
Raumbelastung	[kg oTS/m <sup>3</sup> *d]	2,2	± 0,3	2,5	± 0,3
Verweilzeit	[d]	87,7		87,4	

Die Auswertung der prozessbiologischen Parameter zeigte in dieser Versuchsphase keine Auffälligkeiten (Tabelle 21). Die TS-Konzentrationen der Fermenter-inhalte liegen mit ca. 9 % in einem typischen Bereich für Nawaro-Biogasanlagen (Johann Heinrich von Thünen-Institut, 2009). Die Essigsäureäquivalente und die pH-Werte der Gärsubstrate lagen ebenfalls in einem normalen Bereich und zeigten keine Störungen oder Hemmungen des Prozesses.

Tabelle 21: Prozessbiologische Parameter der Fermenter in der ersten Versuchsphase „ohne Pferdemit“.

Parameter	Einheit	Fermenter 1		Fermenter 2	
			STD		STD
TS	[% FM]	9,3	± 0,7	8,9	± 0,5
oTS	[% FM]	6,6	± 0,6	6,3	± 0,4
pH		7,6	± 0,2	7,6	± 0,2
HAC	[g/kg FM]	0,54	± 0,30	0,48	± 0,25

Die TS- und oTS-Gehalte der Fütterungssubstrate in diesem Zeitraum sind in Tabelle 22 aufgeführt. Die Ergebnisse der Silagen deuten auf akzeptable Qualitäten hin und liegen im Zielbereich. Die niedrigen TS-Gehalte der verwendeten Gülle wurden durch die Einleitung von Niederschlagswasser über die Auslaufflächen der Tierhaltung verursacht.

Tabelle 22: TS- und oTS-Gehalte der Fütterungssubstrate während der Versuchsphase „ohne Pferdemist“.

Substrat	TS [% FM]			oTS [% FM]		
		±	STD		±	STD
Festmist	42,3	±	12,1	33,1	±	10,8
Gülle	3,1	±	0,8	2,0	±	0,5
Maissilage	30,5	±	3,8	29,2	±	3,6
Grassilage	27,4	±	7,7	22,7	±	8,5
Getreide-GPS	37,0	±	8,0	32,7	±	10,5
Getreide	86,2	±	0,6	84,6	±	0,3

Anhand der täglichen Fütterungsmengen und deren Zusammensetzung sowie der Ergebnisse aus den routinemäßigen TS- und oTS-Analysen konnten die Werte der Gasdurchflussmessungen in die spezifische Gasproduktion pro kg oTS umgerechnet werden. Für die Berechnung der spezifischen Methanproduktion wurden zusätzlich noch die Messergebnisse der Gasqualitätsbestimmung verwendet. Die spezifische Methanproduktion der beiden Versuchsreaktoren vom 28.06. bis zum 18.08.2012 ist in Abbildung 32 dargestellt. Die beiden Fermenter zeigten über diesen Zeitraum eine stabile spezifische Methanproduktion, welches die Einschätzung einer ungestörten Prozessbiologie bestätigt. Der Variationskoeffizient der spezifischen Methanproduktion betrug in diesem Zeitraum bei Fermenter 1 7,8 % und bei Fermenter 2 8,0 %. Diese Werte verdeutlichen die Schwankungsbreite dieses biologischen Prozesses und sind bei der Beurteilung von Einflüssen auf den Methanertrag durch verschiedene Behandlungen oder Zusatzstoffe unbedingt zu berücksichtigen. Ein Unterschied in der spezifischen Methanproduktion der beiden Fermenter war in diesem Zeitraum nicht erkennbar. So betrug die durchschnittliche Methanproduktion im Fermenter 1 mit mechanischer Aufbereitung durch den Bio-QZ  $0,323 \pm 0,025 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 / \text{kg oTS}$  und in Fermenter 2 ohne Substratvorbehandlung  $0,286 \pm 0,023 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 / \text{kg oTS}$ .

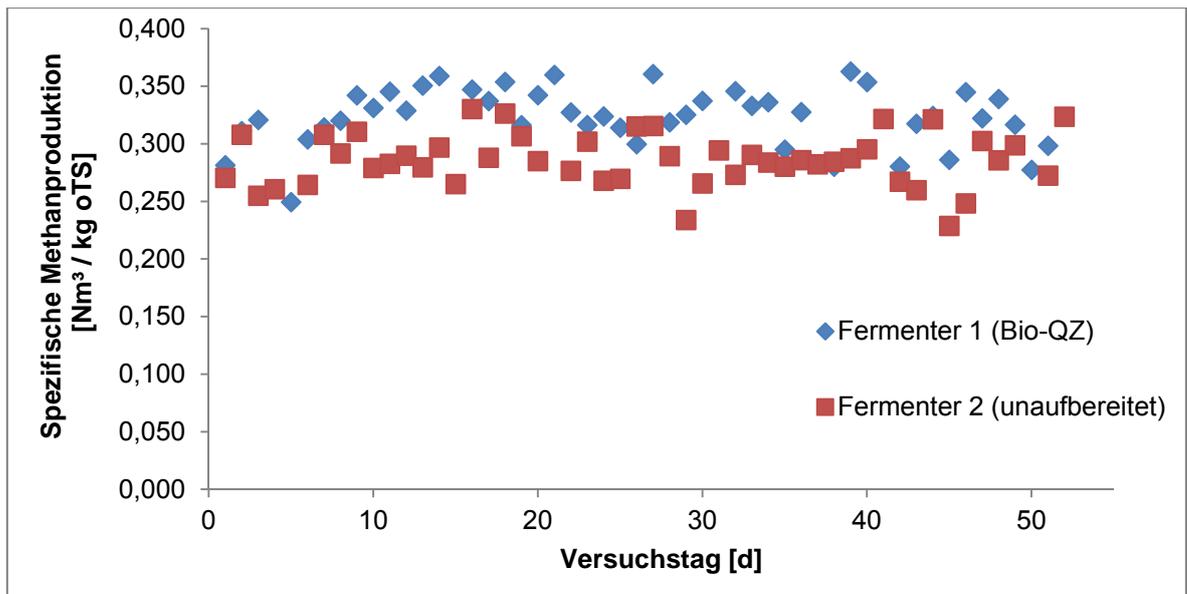


Abbildung 32: Spezifische tägliche Methanproduktion der beiden Fermenter in der Versuchsphase „ohne Pferdemist“.

## 2. Versuchsphase

Der Versuchsbeginn zur Nutzung von Pferdemist in der Biogasanlage Unterer Lindenhof war am 22.08.2012 (KW 34). In der ersten Versuchsphase (22.08.2012 bis 31.01.2013) wurde die Vergärbarkeit von strohhaltigem Pferdemist im zerkleinerten (Fermenter 1) und unzerkleinerten (Fermenter 2) Zustand untersucht. Dabei sollten die Auswirkungen der mechanischen Aufbereitung auf die biologischen und verfahrenstechnischen Anlagenparameter untersucht werden. Zusätzlich sollte auch die Abbaueffizienz der zugeführten Substrate ermittelt werden. Gegenüber der vorherigen Fütterungsration wurde der Anteil von nachwachsenden Rohstoffen in dieser ersten Versuchsphase um 20 % reduziert und durch Pferdemist ersetzt. Die Zusammensetzung der zugeführten Substratmengen in diesem Versuchszeitraum ist in Tabelle 19 aufgelistet. Bedingt durch die an der Versuchsstation anfallenden Wirtschaftsdünger war eine Verringerung des Gülleanteils in der Ration nicht möglich und betrug bei beiden Fermentern nahezu 40 %.

Tabelle 23: Rationszusammensetzung in der 2. Versuchsphase.

Substrat		F1	F2
Pferdemist	[%]	20,1	19,1
Festmist	[%]	7,9	8,2
Gülle	[%]	40,0	39,8
Maissilage	[%]	10,8	11,2
Grassilage	[%]	6,9	7,7
Getreide-GPS	[%]	10,7	10,5
Getreideschrot	[%]	3,7	3,6

Aufgrund der geringeren Methanausbeute des Pferdemistes gegenüber der Silagen mussten die Fütterungsmengen der beiden Behälter um ca. 2 t pro Tag angehoben werden. Dadurch steigerte sich die Raumbelastung um 0,6 kg oTS / m<sup>3</sup>\*d. Der negative Effekt durch diese Steigerung war die Verringerung der theoretischen Verweilzeit um ca. 10 Tage in den Fermentern. Die Fütterungsparameter dieser Versuchsphase sind in Tabelle 20 dargestellt.

Tabelle 24: Fütterungsparameter der 2. Versuchsphase.

Parameter	Einheit	Fermenter 1		Fermenter 2	
		$\bar{x}$	STD	$\bar{x}$	STD
Frischmasse	[t/d]	10,5	± 2,0	10,4	± 2,3
Feststoff	[t/d]	6,0	± 1,2	5,9	± 1,4
oTS	[t/d]	2,3	± 0,4	2,3	± 0,5
Raumbelastung	[kg oTS/m <sup>3</sup> *d]	2,9	± 0,5	2,8	± 0,6
Verweilzeit	[d]	76,2		77,3	

Für die Bestimmung der Abbaueffizienz wurden in der zweiten Hälfte dieses 160 Tage andauernden Versuchsabschnitts (2. Verweilzeit) die Fütterungssubstrate an drei Terminen (Anfang, Mitte und Ende der 2. Verweilzeit) beprobt und bezüglich ihres Gasbildungspotenzials untersucht. Dafür wurden die Proben im Labor der Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie schonend bei 60 °C getrocknet und anschließend mit einer Schneidmühle auf eine Partikelgröße von 1 mm gemahlen. Von diesen Materialien wurde anschließend das spezifische Gasertragspotential im HBT im mesophilen Temperaturbereich bestimmt. In Tabelle 25 sind die Ergebnisse der

TS- und oTS-Analysen sowie die Mittelwerte der spezifischen Methanerträge aus den HBT-Untersuchungen aufgeführt. Die TS- und oTS-Gehalte des Pferde- und Festmistes waren in diesem Zeitraum nahezu identisch. Bei den restlichen Einsatzstoffen konnten keine Veränderungen der TS- und oTS-Gehalte zur vorherigen Phase festgestellt werden. Die spezifischen Methanerträge des Pferdemistes lagen innerhalb der in den vorherigen Laboruntersuchungen festgestellten Spannbreite und zeigten trotz der hohen Heterogenität des Ausgangsmaterials nur einen geringen Variationskoeffizient über die drei Proben. Eine sehr hohe Abweichung der spezifischen Methanerträge bestand bei dem Festmist über die drei Beprobungstermine. Hier wird die variierende Herkunft des Mistes bzw. die unterschiedliche Zusammensetzung sehr deutlich. Aufgrund der auf der Versuchsstation nur geringen Tierzahlen war eine Trennung des Mistes nach Tierart in der Regel nicht möglich. Die spezifischen Methanerträge der pflanzlichen Einsatzstoffe liegen im oberen Bereich der in der Literatur genannten Werte und deuten auf eine gute Substratqualität hin (Oechsner, 2005; Döhler et al., 2007).

Tabelle 25: TS- und oTS-Gehalte sowie spezifische Methanerträge der Fütterungs-substrate in der 2. Verweilzeit der 2. Versuchsphase.

Substrat	TS		oTS		Spezifischer Methanertrag	
	[% FM]		[% FM]		[Nm <sup>3</sup> /kg oTS]	
	$\bar{x}$	STD	$\bar{x}$	STD	$\bar{x}$	STD
Pferdemist	32,4	± 13,5	28,2	± 13,5	0,224	± 0,010
Festmist	31,9	± 19,5	26,8	± 16,3	0,180	± 0,071
Gülle	2,4	± 1,3	1,7	± 1,1	0,265	± 0,008
Maissilage	27,8	± 1,8	26,7	± 1,7	0,376	± 0,006
Grassilage	26,7	± 12,1	22,6	± 11,0	0,351	± 0,014
Getreide-GPS	36,9	± 7,3	34,2	± 6,6	0,336	± 0,007
Getreideschrot	86,2	± 0,6	84,6	± 0,3	0,395	± 0,009

Die Analyse der prozessbiologischen Parameter zeigten in dieser Versuchsphase keine Auffälligkeiten (Tabelle 26). Eine Prozessinhibition durch die Akkumulation von organischen Säuren und einer daraus resultierenden Übersäuerung des Fermenterinhalt erscheint bei dem Einsatz von hohen Anteilen Pferdemist in der Fütterungsration unwahrscheinlich. In diesem Fall muss davon ausgegangen werden, dass die Einbringung der hohen TS-Konzentrationen der Fütterungs-substrate in den

Gärbehälter Störungen verursacht und als prozesslimitierender Faktor bei der Steigerung der Raumbelastung gilt. Entsprechend der VDI-Richtlinie 3475 Blatt 4 (VDI-Gesellschaft Kommission Reinhaltung der Luft, 2010) sowie nach Eder und Schulz (2012) ist ein TS-Gehalt von 15% des Gärsubstrates bei der Vergärung von nachwachsenden Rohstoffen in kontinuierlich betriebenen und vollaufgemischten Biogasfermentern ein verfahrenstechnischer Grenzwert. Bei höheren TS-Gehalten ist mit einer erheblichen Reduzierung der Durchmischbarkeit und Förderfähigkeit der Substrate zu rechnen. Zusätzlich wird die Gasfreisetzung aus dem Gärsubstrat behindert. Bedingt durch die Fütterungsumstellung konnte in dieser Versuchsphase ein Anstieg der TS-Konzentration der Fermenterinhalt um nahezu 2% beobachtet werden. Der in dieser Versuchsanordnung hohe Einsatz von flüssigen Wirtschaftsdüngern ist nicht nur aus ökologischer Sicht als vorteilhaft zu bewerten. Bedingt durch die hohen Wasseranteile der Gülle konnte der Anstieg der TS-Gehalte der Fermenterinhalt begrenzt und die rheologischen Eigenschaften der Gärsubstrate verbessert werden. Zusätzlich wurden durch die flüssigen Wirtschaftsdünger essentielle Mikro- und Makronährstoffe für den anaeroben Prozess zur Verfügung gestellt. Zudem bewirkt die hohe Pufferkapazität der Gülle eine Stabilisierung des pH-Wertes im Gärsubstrat (Mähnert, 2007).

Tabelle 26: Prozessbiologische Parameter der Fermenter in der 2. Versuchsphase.

Parameter	Einheit	Fermenter 1		Fermenter 2	
		$\bar{x}$	STD	$\bar{x}$	STD
TS	[% FM]	11,0	± 0,8	10,1	± 0,7
oTS	[% FM]	8,0	± 0,7	7,3	± 0,7
pH		7,8	± 0,1	7,9	± 0,1
HAC	[g/kg]	0,3	± 0,3	0,3	± 0,4

Um den Aufwand der mechanischen Substratvorbehandlung zu rechtfertigen, müssen neben den Effekten auf verfahrenstechnischer Seite, auch Steigerungen der Biogasproduktion und Abbaueffizienz nachweisbar sein. Die Betrachtung der spezifischen Methanproduktion der beiden Fermenter zeigte eine deutliche Verringerung der Gasproduktion durch den Einsatz von Pferdemit. So lag die spezifische Methanausbeute im Fermenter 1 in der ersten Verweilzeit des Versuches um 30%

niedriger gegenüber der vorherigen Betriebsweise ohne Pferdemist ( $0,234 \pm 0,054 \text{ Nm}^3 / \text{CH}_4 \text{ kg oTS}$ ). Im Fermenter 2 betrug die Differenz 31% ( $0,199 \pm 0,037 \text{ Nm}^3 / \text{CH}_4 \text{ kg oTS}$ ). Zusätzlich waren die Qualitätsschwankungen des Pferdemistes deutlich erkennbar. Wurde der schon zum Teil umgesetzte Mist aus dem Tiefstall eines Pferdebetriebs verwertet, konnte eine unmittelbare Verringerung der Gasproduktion beobachtet werden. Auch machte sich die aerobe Rotte des Pferdemistes durch eine längere Zwischenlagerung direkt im spezifischen Gasertrag bemerkbar. Zusätzlich war eine Adaption der Mikrobiologie im Reaktor durch die Umstellung der Einsatzstoffe im Fermenter 1 zu erkennen. Nach der starken Abnahme der spezifischen Gasproduktion war im weiteren Versuchsverlauf eine kontinuierliche Steigerung zu beobachten. Bedingt durch die Zunahme der verfahrenstechnischen Schwierigkeiten im Fermenter 2 konnte der Effekt der Anpassung der Prozessbiologie nicht nachgewiesen werden. Einen Einfluss der mechanischen Desintegration auf den Methangehalt des produzierten Biogases war in dieser Untersuchung nicht erkennbar.

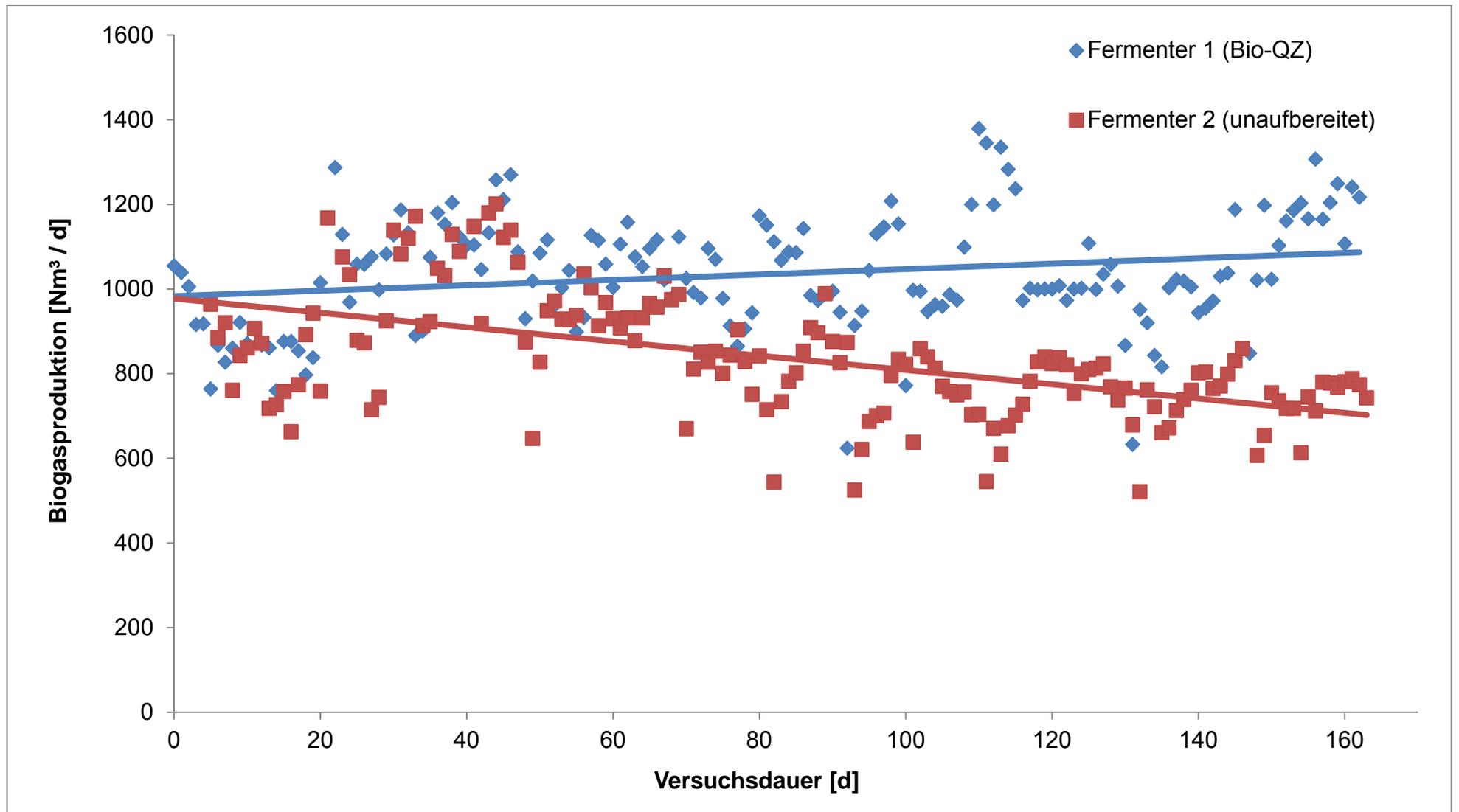


Abbildung 33a: Tägliche Biogasproduktion der Fermenter in der 2. Versuchsphase

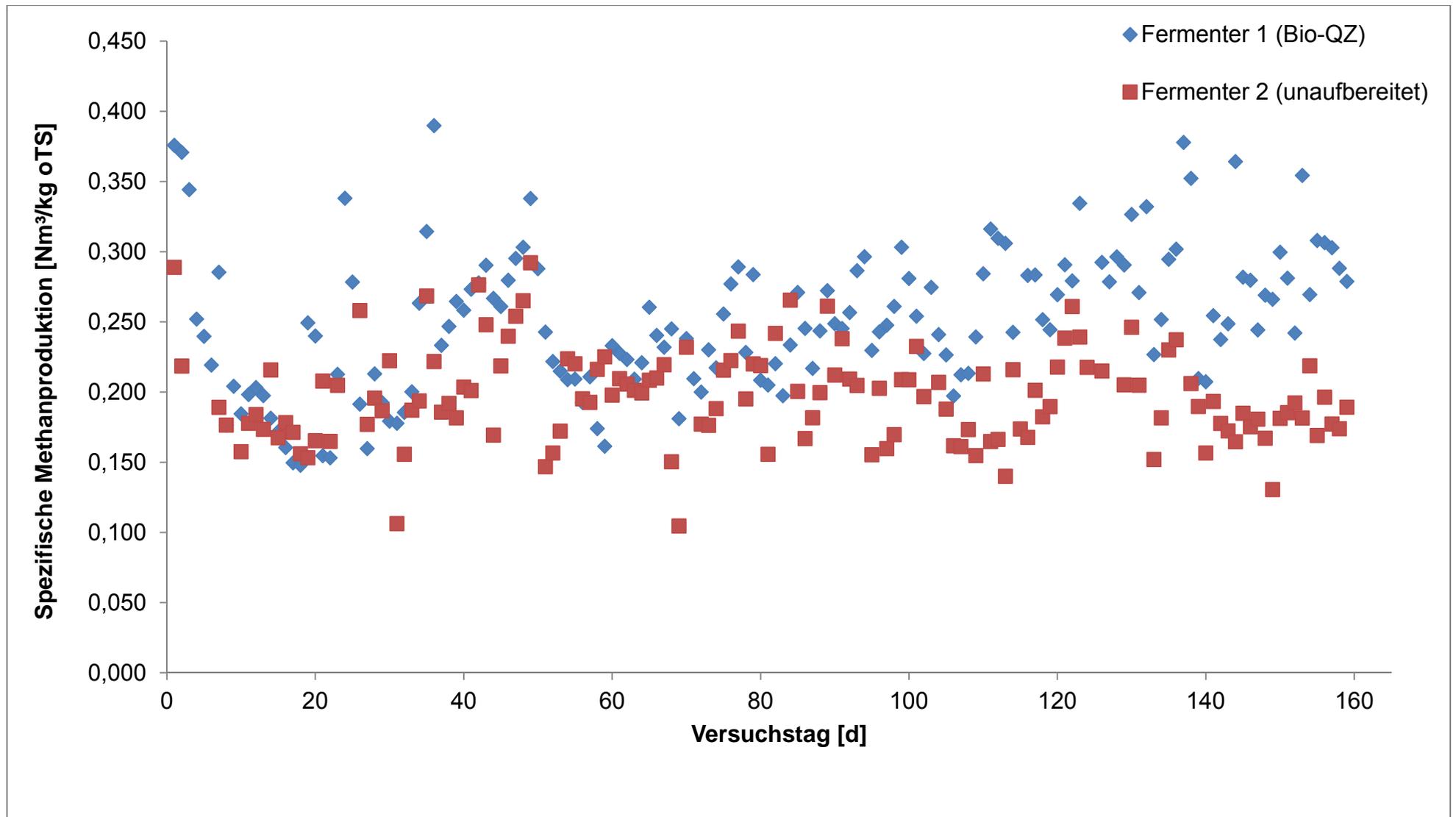


Abbildung 33: Spezifische tägliche Methanproduktion der Fermenter in der 2. Versuchsphase.

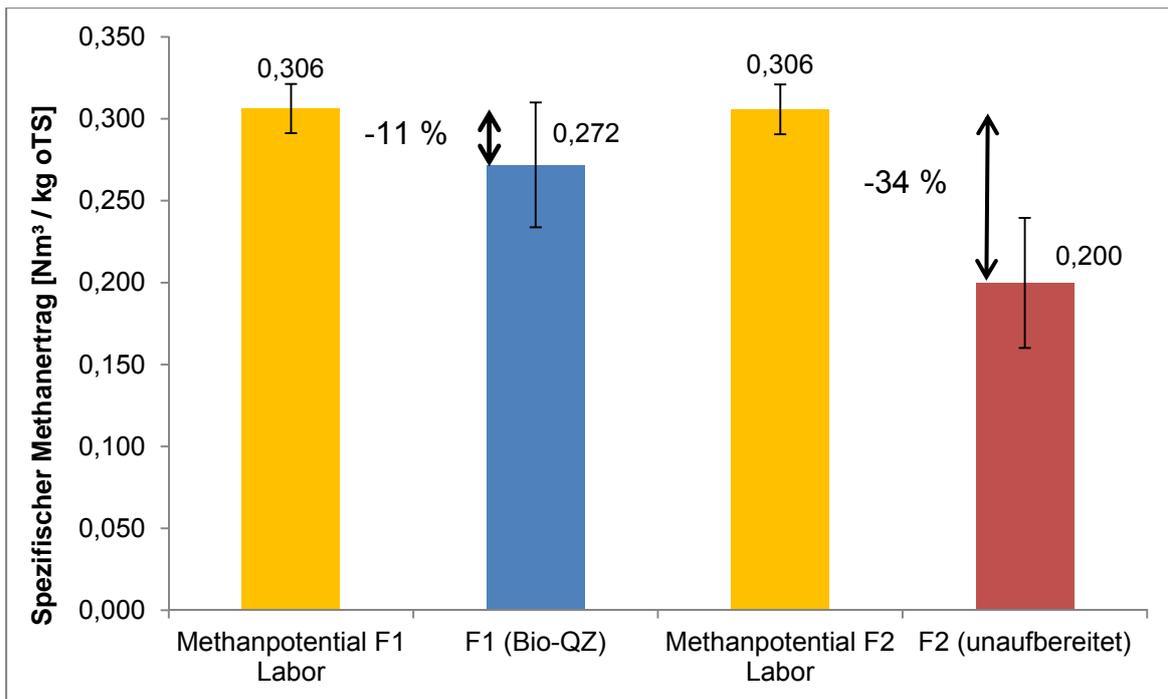


Abbildung 34: Vergleich des aus den HBT-Ergebnissen berechneten spezifischen Methanertrags und der gemessenen spezifischen Methanproduktion der Fermenter in der 2. Versuchsphase.

Für die Abschätzung der im Praxismaßstab erreichbaren Methanerträge sind Batchgärttests nach der VDI-Richtlinie 4630 (VDI-Gesellschaft Energietechnik, 2006) im Labormaßstab ein etabliertes Verfahren mit guter Übertragbarkeit in den Großmaßstab (Oechsner und Paterson, 2013). Daher wurden für die Beurteilung der Abbaueffizienz in den Biogasreaktoren die maximalen Methanpotentiale der Einsatzstoffe der Biogasanlage mittels HBT, entsprechend der VDI-Richtlinie 4630 (VDI-Gesellschaft Energietechnik, 2006), bestimmt. Anhand dieser Ergebnisse und den zugeführten Substratmengen der Reaktoren konnte die maximale spezifische Methanproduktion der Fermenter berechnet werden (Abbildung 34). Der Vergleich dieser Werte mit der erzielten spezifischen Methanproduktion zeigte eine sehr gute Abbaueffizienz im Fermenter 1 mit mechanischer Substratzerkleinerung. So lag die erzielte durchschnittliche spezifische Methanausbeute bei einer theoretischen Verweilzeit von ungefähr 80 Tagen um lediglich 11% unterhalb der im Labor bestimmten maximalen Ausbeute. Im Fermenter 2 betrug die Differenz zwischen der realisierten und berechneten Methanausbeute im Mittel 34% und zeigt eine unzu-

reichende Substratumsetzung. Zwischen den beiden Reaktoren betragen die Unterschiede in der spezifischen Methanproduktion bis zu 27% bzw. lag die tägliche Methanproduktion in diesem Zeitraum im Fermenter 1 um durchschnittlich  $167 \pm 85 \text{ Nm}^3$  höher. Anhand dieser Ergebnisse konnte die Notwendigkeit der mechanischen Desintegration beim Einsatz von Pferdemist im kontinuierlich beschickten Biogasfermenter nachgewiesen werden. Auch der benötigte Energieaufwand des Bio-QZ für die Aufbereitung der Einsatzstoffe von  $11,3 \pm 1,3 \text{ kWh/t FM}$  ist im Anbetracht dieser Unterschiede vernachlässigbar.

### 3. Versuchsphase

Nach Abschluss der zweiten Versuchsphase musste aufgrund anhaltender Winterwitterung mit der fachgerechten Ausbringung der Gärreste abgewartet werden. Demzufolge war eine Reduzierung der Fütterungsmengen notwendig und der Versuch wurde unterbrochen. Nach Wiederaufnahme des Versuches war die Umstellungsphase am 14.06.2013 beendet. Der Untersuchungszeitraum in dieser Phase beläuft sich vom 15.06. bis zum 12.10.2013 (120 Versuchstage).

In der dritten Versuchsphase konnte aufgrund von betrieblichen Veränderungen der Anteil von flüssiger Gülle in der Ration auf unter 30 % gesetzt werden. Dadurch konnte gegenüber der 2. Versuchsphase der Mistanteil in der Ration um ca. 5 % erhöht werden (Tabelle 27). So bestand die Fütterungsration im Fermenter 1 aus 35 % Mist und im Fermenter 2 aus 33% Mist.

Tabelle 27: Rationszusammensetzung in der 3. Versuchsphase.

Substrat		F1	F2
Pferdemist	[%]	24,5	22,8
Festmist	[%]	10,2	10,1
Gülle	[%]	29,1	27,9
Maissilage	[%]	12,2	16,6
Grassilage	[%]	19,3	18,1
Getreideschrot	[%]	4,8	4,4

Durch die deutlich geringere Güllemenge in der Fütterungsration konnten die täglichen Fütterungsmengen reduziert werden und dadurch eine Verlängerung der Verweilzeiten in den Fermentern um 25 Tage erreicht werden (Tabelle 28).

Tabelle 28: Fütterungsparameter in der 3. Versuchsphase.

Parameter	Einheit	Fermenter 1		Fermenter 2	
		$\bar{x}$	STD	$\bar{x}$	STD
Frischmasse	[t/d]	8,0	± 1,7	7,9	± 1,8
Feststoff	[t/d]	5,3	± 1,4	5,3	± 1,1
oTS	[t/d]	2,0	± 0,5	2,0	± 0,4
Raumbelastung	[kg oTS/m <sup>3</sup> *d]	2,5	± 0,6	2,5	± 0,5
Verweilzeit	[d]	100		102	

Auch in diesem Versuchszeitraum waren keine Prozessstörungen oder Hemmungen zu beobachten. Bedingt durch die geringere Güllemenge waren die TS-Konzentrationen der Gärsubstrate um ca. 1 % höher als in der 2. Versuchsphase (Tabelle 29).

Tabelle 29: Prozessbiologische Parameter in der 3. Versuchsphase.

Parameter	Einheit	Fermenter 1		Fermenter 2	
		$\bar{x}$	STD	$\bar{x}$	STD
TS	[% FM]	11,2	± 1,1	11,5	± 1,1
oTS	[% FM]	8,4	± 0,9	8,7	± 0,8
pH		8,2	± 0,1	8,1	± 0,1
HAC	[g/kg]	0,4	± 0,2	0,2	± 0,1

Die TS- und oTS-Gehalte der Einsatzstoffe zeigten in dieser Versuchsphase keine wesentlichen Veränderungen gegenüber den anderen Phasen. Aufgrund der sehr hohen Niederschlagsmengen, die in die Gülle gelangten, war jedoch der TS-Gehalt der Gülle sehr gering.

Tabelle 30: TS- und oTS-Gehalte der Fütterungssubstrate während der 3. Versuchsphase.

Substrat	TS [% FM]			oTS [% FM]		
	$\bar{x}$	$\pm$	STD	$\bar{x}$	$\pm$	STD
Pferdemist	39,3	$\pm$	15,0	33,9	$\pm$	11,7
Festmist	30,8	$\pm$	10,4	23,7	$\pm$	8,0
Gülle	1,5	$\pm$	1,3	1,0	$\pm$	1,0
Maissilage	30,8	$\pm$	10,4	23,7	$\pm$	8,0
Grassilage	32,0	$\pm$	10,7	28,3	$\pm$	10,8
Getreideschrot	87,5	$\pm$	0,3	85,6	$\pm$	0,3

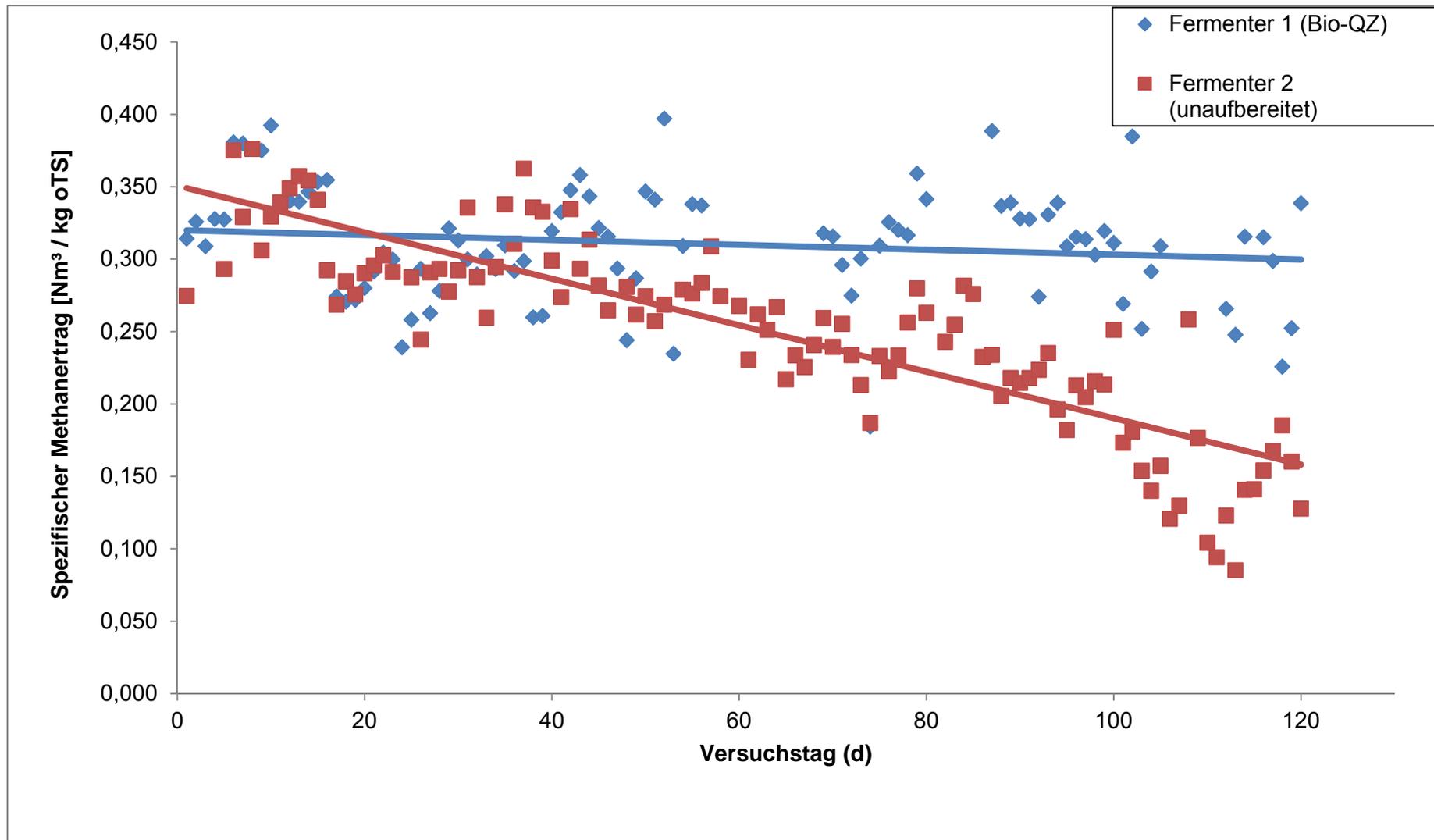


Abbildung 35: Spezifische tägliche Methanproduktion der Fermenter in der 3. Versuchsphase.

Die in Abbildung 35 dargestellte spezifische Methanproduktion der beiden Fermenter zeigt, dass in der ersten Hälfte dieser Versuchsphase die Gasproduktion der beiden Fermenter identisch war. Im der zweiten Hälfte dieses Zeitraumes fiel jedoch die Methanproduktion im Fermenter 2 deutlich ab. So lag die durchschnittliche spezifische Methanproduktion im Fermenter 1 mit der mechanischen Aufbereitung im zweiten Teil bei  $0,307 \pm 0,040 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 / \text{kg oTS}$  und im Fermenter 2 ohne Vorzerkleinerung bei  $0,206 \pm 0,050 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 / \text{kg oTS}$ . Der Unterschied in der spezifischen Methanproduktion zwischen den beiden Fermentern betrug in diesem Versuchsabschnitt 33 % und bestätigt damit die Ergebnisse aus der zweiten Versuchsphase.

#### 4. Versuchsphase

Nachdem durch die zwei vorherigen Versuchsphasen die Notwendigkeit einer mechanischen Vorbehandlung des Pferdemistes im Praxismaßstab nachgewiesen wurde, sollte in der vierten Phase der Pferdemistanteil in der Fütterungsration des Fermenter 1 deutlich gesteigert werden.

So betrug in diesem Versuchsabschnitt der Pferdemistanteil in der Ration 46,6 %. Bei der Rationsplanung wurde der Gülleanteil in der Ration auf 30 % festgelegt. Durch leichte Abweichungen in den Fütterungsmengen lag die eingesetzte Güllemenge bei 33,8 % an der Ration. Der Anteil an nachwachsenden Rohstoffen lag in diesem Abschnitt bei unter 20 % (Tabelle 31).

Tabelle 31: Rationszusammensetzung von Fermenter 1 in der 4. Versuchsphase.

Substrat		Fermenter 1
Pferdemist	[%]	46,6
Gülle	[%]	33,8
Maissilage	[%]	15,2
Getreideschrot	[%]	4,3

Bedingt durch die Rationsumstellung wurde die absolute Fütterungsmenge im Fermenter 1 um 700 kg pro Tag erhöht und dementsprechend die Verweilzeit um ca. 8 Tage verringert. Die Raumbelastung blieb unverändert bei  $2,4 \pm 0,3 \text{ kg oTS} / \text{m}^3 \cdot \text{d}$  (Tabelle 32).

Tabelle 32: Fütterungsparameter von Fermenter 1 in der 4. Versuchsphase.

Parameter	Einheit	Fermenter 1		
		$\bar{x}$		STD
Frischmasse	[t/d]	8,7	±	1,1
Feststoff	[t/d]	5,4	±	0,8
oTS	[t/d]	1,9	±	0,3
Raumbelastung	[kg oTS/m <sup>3</sup> *d]	2,4	±	0,3
Verweilzeit	[d]	91,8		

Durch den hohen Pferdemitanteil in der Ration ist der TS-Gehalt des Fermenterinhalt um vier Prozent auf  $15,4 \pm 0,7$  % angestiegen und erforderte einen deutlich höheren Rühraufwand (Tabelle 33). Trotz intensiver und langandauernder Rührintervalle konnte eine komplette Bewegung des Fermenterinhalt nicht mehr festgestellt werden. Im Bereich der schnell-laufenden Tauchmotorrührwerke kam es zu typischen Kavernenbildungen. Trotz alledem traten während dieser Versuchsphase keine Schwimmdecken oder Aufblähungen des Gärsubstrates im Fermenter auf.

Tabelle 33: Prozessbiologische Parameter von Fermenter 1 in der 4. Versuchsphase.

Parameter	Einheit	Fermenter 1		
		$\bar{x}$		STD
TS	[% FM]	15,4	±	0,7
oTS	[% FM]	11,4	±	0,4
pH		8,4	±	0,0
HAC	[g/kg]	0,5	±	0,2

Die TS- und oTS-Gehalte der Fütterungssubstrate in der vierten Versuchsphase sind in Tabelle 34 dargestellt. Die Substrate zeigten keine nennenswerten Veränderungen gegenüber den vorherigen Phasen.

Tabelle 34: TS- und oTS-Gehalte der Fütterungssubstrate in der 4. Versuchsphase.

Substrat	TS [% FM]			oTS [% FM]		
	$\bar{x}$		STD	$\bar{x}$		STD
Pferdemist	32,6	±	14,9	27,9	±	12,5
Gülle	5,5	±	1,3	4,3	±	1,1
Maissilage	31,8	±	8,1	30,5	±	7,7
Getreideschrot	85,4	±	2,1	83,6	±	1,9

Die spezifische tägliche Methanproduktion von Fermenter 1 in dieser Versuchsphase ist in Abbildung 36 aufgetragen. Die Fütterungsumstellung zeigte keinen Einfluss auf die spezifische Methanproduktion und war mit  $0,297 \pm 0,037 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 / \text{kg oTS}$  gegenüber dem vorherigen Zeitraum unverändert. Um die langfristigen Auswirkungen dieser hohen Pferdemistanteile in der Ration auf den Biogasprozess zu untersuchen wird diese Versuchsreihe in 2014 fortgesetzt.

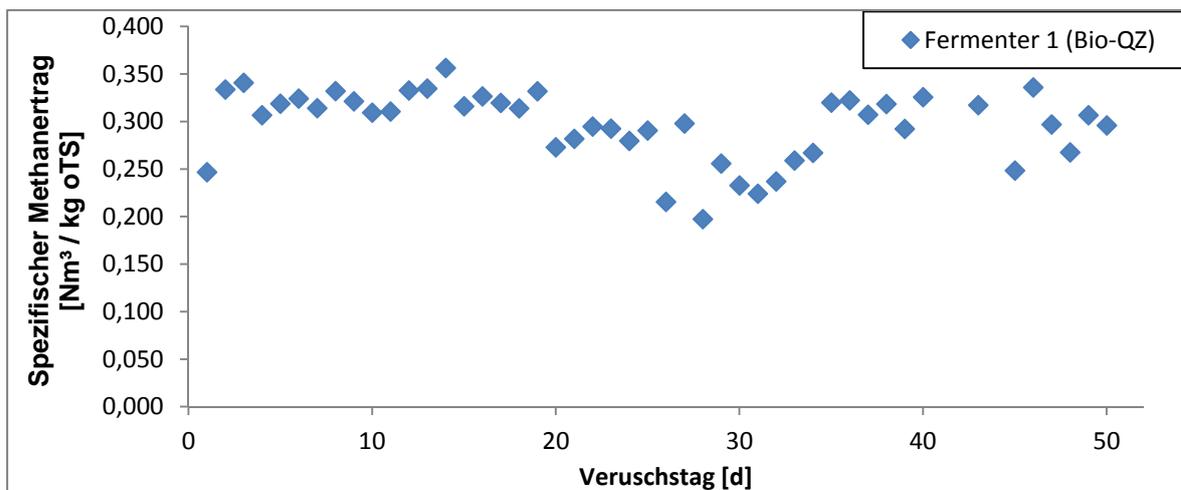


Abbildung 36: Spezifische tägliche Methanproduktion von Fermenter 1 in der 4. Versuchsphase.

## **Energiebedarf der mechanischen Substratvorbehandlung**

Einen wesentlichen Einfluss auf das wirtschaftliche Ergebnis einer Biogasanlage hat deren Eigenstrombedarf (Naegele et al., 2012). Dieser wird erheblich durch den Einsatz von zusätzlichen Komponenten beeinflusst. Die Aggregate zur mechanischen Substratvorbehandlung haben aufgrund ihrer Herkunft aus dem Recyclingbereich in der Regel sehr hohe elektrische Anschlussleistungen. Um den Energiebedarf des Bio-QZ zu beurteilen wurde der Stromverbrauch für die Zerkleinerung über den gesamten Versuchszeitraum erfasst (Abbildung 37). Um den Strombedarf in einen Bezug zu setzen, wurde der Stromverbrauch pro Tonne aufbereitetem Substrat angegeben. Der Energiebedarf des Bio-QZ war über den gesamten Zeitraum relativ konstant mit  $11,3 \pm 2,6$  kWh / t FM. Bei der Betrachtung des Stromverbrauchs über den Zeitraum fallen die Zeitpunkte des Kettenwechsels (28.11.2012; 04.04.2013 und 02.09.2013) durch einen deutlichen Anstieg des spezifischen Energiebedarfs auf. Während der Langzeituntersuchungen konnten durch verschiedenste Variationen die Einflussfaktoren auf den Strombedarf des Bio-QZ betrachtet werden. Dabei zeigte sich, dass die Verringerung der Auswurfzeit zu einer deutlichen Abnahme des Energiebedarfs führte, aber Zeitgleich auch die Störanfälligkeit (Verstopfungen) zugenommen hat (siehe Anfang Juni 2014).

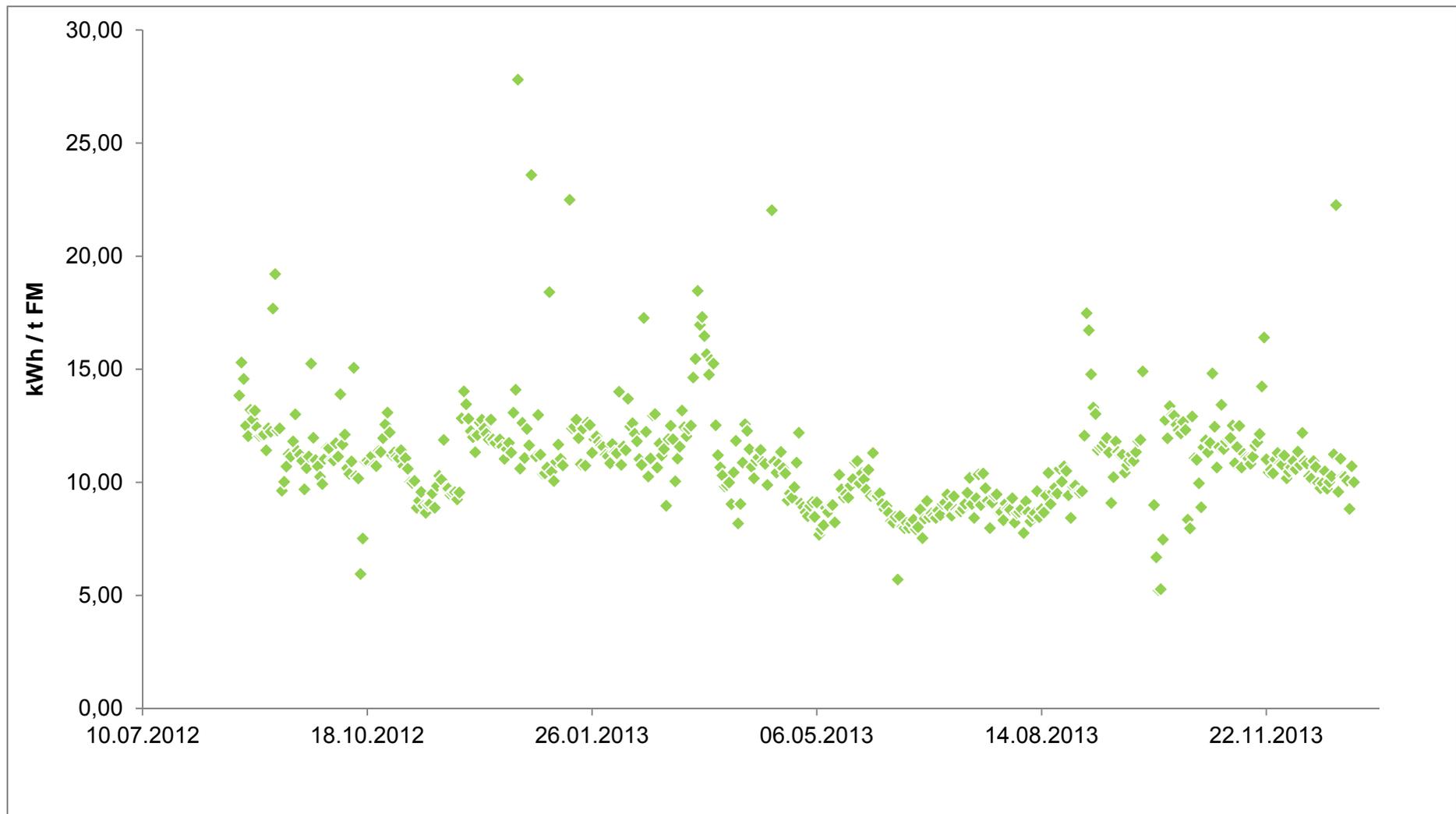


Abbildung 37: Spezifischer Stromverbrauch für die mechanische Substratvorbehandlung durch den Bio-QZ.

## Viskositätsprüfstand

Für die Planung und Auslegung von Rührwerken und Pumpen an Biogasanlagen sind Kenntnisse über die rheologischen Eigenschaften der Gärsubstrate notwendig. Im Gegensatz zu Wasser als Newtonsches-Fluid mit einem linearen und unelastischen Fließverhalten sind Gärsubstrate aus Biogasanlagen strukturviskos. Strukturviskos bedeutet, dass die Viskosität mit abnehmender Scherbeanspruchung zunimmt und bei steigender Scherbeanspruchung abnimmt. Die Beschreibung von strukturviskosen Substraten ohne Fließgrenze kann durch den Potenz-Ansatz von Ostwald-de Waele ( $\eta = k \cdot \dot{\gamma}^{n-1}$ ) beschrieben werden (wobei  $\eta$  = Viskosität,  $k$  = Konsistenzfaktor,  $\dot{\gamma}$  = Scherrate und  $n$  = Fließindex). Der Konsistenzfaktor beschreibt die Viskosität eines Fluids bei der Scherrate 1 / s. Der Fließindex beschreibt die Abhängigkeit der Viskosität von der Scherrate. Bei einem Fließindex von 1 handelt es sich um ein Newtonsches-Fluid. Bei strukturviskosen Gärsubstraten aus Biogasanlagen ist der Fließexponent  $< 1$ .

Die Charakterisierung der Fließeigenschaften der Gärsubstrate ist jedoch mit herkömmlichen Labormethoden nur bedingt möglich. Außerdem ist die Übertragbarkeit der im Labormaßstab ermittelten Fließkurven auf den großmaßstäblichen Biogasprozess schwierig. Die Gärsubstrate bestehen in der Regel aus einer flüssigen, festen und gasförmigen Phase. In Abhängigkeit der eingesetzten Fütterungssubstrate sind in diesem Dreiphasengemisch noch Partikel und Fasern unterschiedlichster Größen und Längen enthalten. Die Bestimmung der Fließeigenschaften im Labormaßstab erfordern daher in der Regel Vorbehandlungsschritte, die entweder die groben Partikelstrukturen entfernen oder zerkleinern. Durch diese Vorbehandlung können die Fließeigenschaften erheblich beeinflusst werden.

Einen weiteren Einfluss auf die rheologischen Eigenschaften hat der zunehmende Gasverlust aus dem Gärsubstrat bei andauernder Lagerung oder längeren Transportzeiten. Um die Effekte der mechanischen Substrataufbereitung und des Pferdewistes auf die Fließeigenschaften der Gärsubstrate untersuchen zu können wurde an der Forschungsbiogasanlage im Frühjahr 2013 ein großmaßstäblicher Inline-Viskositätsprüfstand installiert. Die Installations- und Umbaumaßnahmen wurden zu einem großen Teil aus Haushaltsmitteln der Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie finanziert.

Das Arbeitsprinzip des Inline-Viskositätsprüfstands beruht auf der Erfassung des Druckverlustes ( $\Delta p$ ) und des Volumenstroms ( $\dot{V}$ ) in einer Rohrleitung mit einer bekannten Länge und Durchmesser. Das Prinzip des Rohrviskosimeters beruht dabei auf der Anwendung des Hagen-Poiseuilleschen Gesetzes in dem der Zusammenhang zwischen statischer Druckdifferenz im Rohr und der Durchflussmenge angegeben wird:

$$\dot{V} = \frac{\pi \times R^4 \times \Delta p}{8 \times \eta \times L}$$

$\dot{V}$ : Volumenstrom [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$\Delta p$ : Differenzdruck [Pa]

$\eta$ : Viskosität [Pa s]

L: Länge der Messstrecke [m]

R: Rohrradius [m]

Bei definiertem Rohrradius (R) und dem Abstand (L) zwischen zwei Druckmesspunkten lassen sich die Schubspannung ( $\tau$ ) und die Scherrate ( $\dot{\gamma}$ ) errechnen, wenn hierzu das Kräftegleichgewicht von Strömung und Druckverlust angesetzt wird. Die Berechnung der repräsentativen Schubspannung erfolgt mit der Formel:

$$\tau_{rep} = \frac{\pi \times \Delta p \times R}{8 \times L}$$

$\tau_{rep}$ : repräsentative Schubspannung [1/s]

$\Delta p$ : Differenzdruck [Pa]

L: Länge der Messstrecke [m]

R: Rohrradius [m]

Die repräsentative Scherrate für die Rohrströmung wurde angegeben mit:

$$\dot{\gamma}_{rep} = \frac{\dot{V}}{R^3}$$

$\dot{\gamma}_{rep}$ : repräsentative Scherrate [1/s]

$\dot{V}$ : Volumenstrom [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

R: Rohrradius [m]

Für die Viskosität des strukturviskosen Fluids gilt:

$$\eta(\dot{\gamma}_{rep}) = \frac{\pi \times \Delta p \times R^4}{8 \times L \times \dot{V}}$$

$\eta_{rep}$ : repräsentative Viskosität [1/s]

$\tau_{rep}$ : repräsentative Schubspannung [1/s]

$\Delta p$ : Differenzdruck [Pa]

L: Länge der Messstrecke [m]

R: Rohrradius [m]

$\dot{V}$ : Volumenstrom [m<sup>3</sup>/s]

Die Fließkurven wurden mit dem Power law-Ansatz von Ostwald-de-Waele berechnet:

$$\eta = k \times \dot{\gamma}^{n-1}$$

$\eta$ : Viskosität

$\dot{\gamma}$ : Scherrate

k: Konsistenzfaktor

n: Fließindex

Als Grundlage für den Aufbau des Inline-Viskositätsprüfstandes dient der zentrale Pumpenraum der Forschungsbiogasanlage Unterer Lindenhof. Dort können mit einer frequenzgesteuerten Exzentrerschneckenpumpe (KL 65 S, Fa. Pumpenfabrik Wangen, Wangen) Substrate zwischen allen an der Biogasanlage vorhandenen Behältern umgepumpt werden. Zusätzlich ist zur Erfassung der Durchflussmengen hinter der Exzentrerschneckenpumpe ein Magnetisch-Induktiver-Durchflussmengenmesser (Promag 50 W, Fa. Endress und Hauser, Reinach, Schweiz) installiert. Aufgrund der vorhandenen Technik und der Möglichkeit alle an der Biogasanlage vorhandenen Substrate zu untersuchen wurde der Prüfstand in dem zentralen Pumpenraum eingebaut. Im Wesentlichen besteht der Prüfstand aus zwei Messstrecken mit unterschiedlichen Rohrquerschnitten (Abbildung 38).



Abbildung 38: Inline-Viskosimeter an der Forschungsbiogasanlage mit den zwei Messstrecken.

Für die Bestimmung der Fließeigenschaften wird der Bypass der Förderleitung hinter der Pumpe in Betrieb genommen. In diesem Bypass wird das Gärsubstrat zunächst in die Messstrecke mit der Rohrnennweite DN 80 und anschließend in die Messstrecke mit der Rohrnennweite DN 100 geleitet. Der Druckverlust in den Messstrecken wird jeweils mit zwei Rohr-Druckmittlern erfasst (Fa. Wika, Klingenberg). Um den Temperatureinfluss auf die Fließeigenschaften bzw. Änderungen der Substrattemperatur zu erfassen, wurde ein Widerstandstemperatursensor hinter der zweiten Messstrecke installiert. Die Bestimmung der Fließkurven erfolgt an der Forschungsbiogasanlage bei 40° C. Die Aufzeichnung der Messwerte erfolgt durch die ZAS. Für die Bestimmung der Fließkurve wird das Gärsubstrat von dem zu untersuchenden Behälter im Kreislauf gepumpt und die Förderleistung der Exzenter-schneckenpumpe über den Frequenzumrichter schrittweise reduziert. Die Differenzdruckmessung erfolgt in der Messstrecke DN 80 über einen 399 cm langen Abschnitt und in der Messstrecke DN 100 über ein 411 cm langes Rohr. Die Längen der Messstrecken sind aufgrund der baulichen Gegebenheiten des Pumpenraums begrenzt.

Nach Abschluss der Methodenentwicklung und Validierung der Messreihen mit dem Inline-Viskosimeter wurden erste Versuchsreihen durchgeführt. Dabei wurde auf folgende Fragestellungen eingegangen:

- Einfluss der Rationszusammensetzung;
- Einfluss des TS-Gehaltes;
- Einfluss der mechanischen Aufbereitung.

### **Einfluss der Rationszusammensetzung**

Aufgrund von betrieblichen Erfordernissen an der Versuchsstation mussten im Zeitraum Mai bis Juli die prozentualen Anteile der Mais- und Grassilage in der Fütterungsration verändert werden (Abbildung 39). So wurde im Juni die Grassilage in der Ration deutlich reduziert und durch Maissilage ersetzt. Im Juli und August wurden dann die Maissilage in der Ration verringert und dafür mehr Grassilage genutzt. Gleichzeitig wurde der Anteil an flüssigem Wirtschaftsdünger in der Gesamtration reduziert.

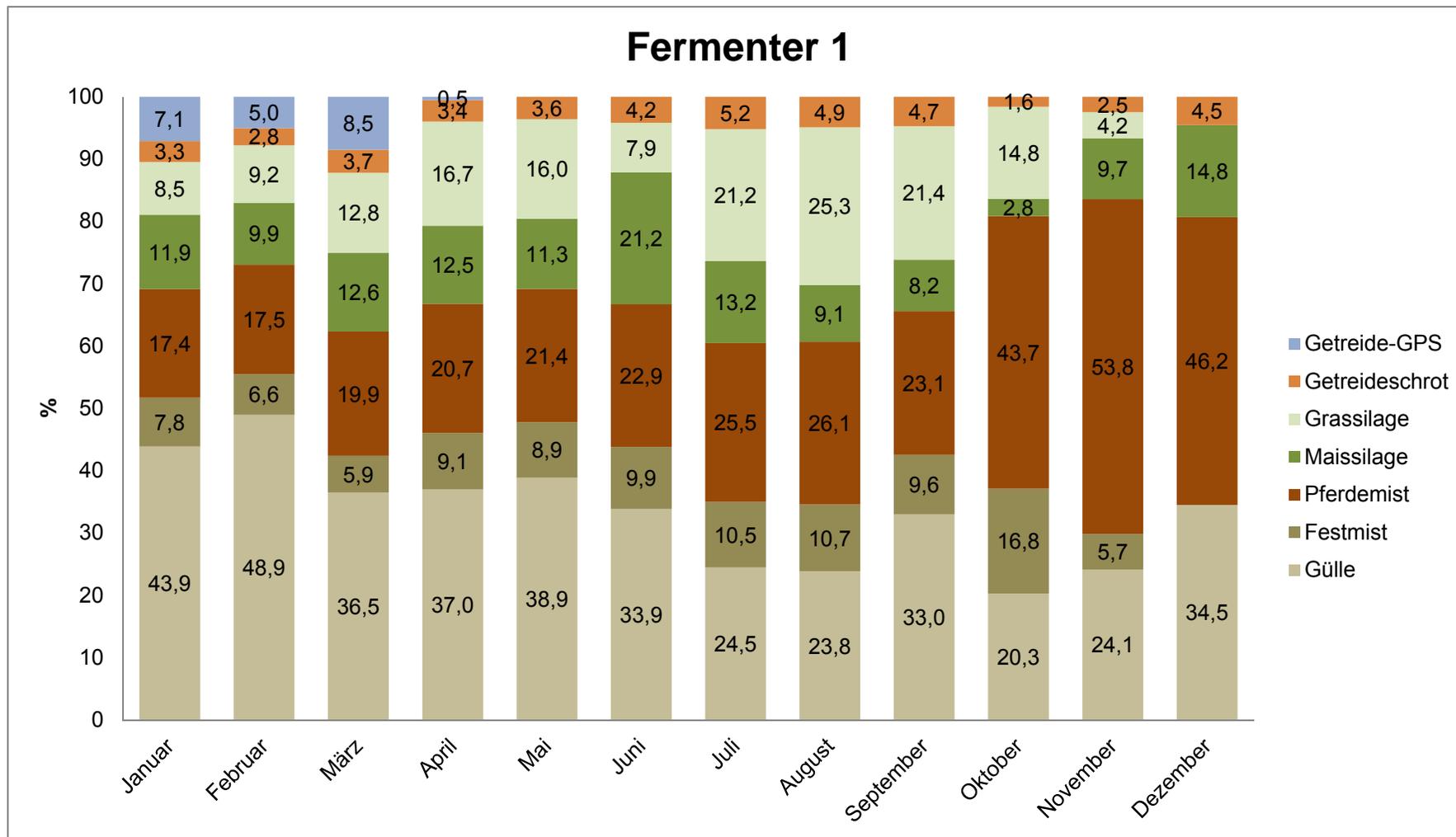


Abbildung 39: Durchschnittliche monatliche Rationszusammensetzung im Fermenter 1.

Tabelle 35: Übersicht über die repräsentative Viskosität bei verschiedenen Scherraten sowie des Konsistenzfaktors (K) und des Fließexponenten (n) nach Ostwald-de-Waele im Fermenter 1.

	28.05.	05.06.	18.06.	25.06.	03.07.	09.07.	16.07.	31.07.
rep. Scherrate [1/s]	TS 10,7 %	TS 10,5 %	TS 10,5 %	TS 10,4 %	TS 10,1 %	TS 10,7 %	TS 10,7 %	TS 11,2 %
	rep. Viskosität [Pa s]							
10	2,6	2,2	2,0	1,8	1,6	1,6	1,7	2,0
30	1,1	0,9	0,9	0,8	0,7	0,7	0,8	0,9
50	0,7	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6
100	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4
k	15,7	12,7	10,5	10,0	8,0	7,9	8,6	10,0
n	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3

Anhand der in Tabelle 35 aufgeführten Parameter sind die Rationsumstellungen bei niedrigeren Scherraten deutlich zu erkennen. Durch den höheren Maisanteil in der Ration verringert sich die Viskosität und es kommt zu einer Verbesserung der Fließeigenschaften (Abbildung 40). Erwartungsgemäß ist dieser Effekt bei höheren Scherraten nicht ausgeprägt. Bedingt durch die Erhöhung des Grasanteils und der Reduzierung der Gülle in der Ration konnte ab dem 16.07.2013 ein Anstieg der Viskosität nachgewiesen werden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Fließeigenschaften des Gärsubstrates in sehr starker Abhängigkeit der eingesetzten Fütterungs-substrate stehen. Durch leicht abbaubare Substrate kann die Viskosität deutlich gesenkt werden. Aufgrund der hohen Variabilität der eingesetzten Substrate und Rationszusammensetzungen ist ein Vergleich zwischen verschiedenen Biogasanlagen sehr schwierig.

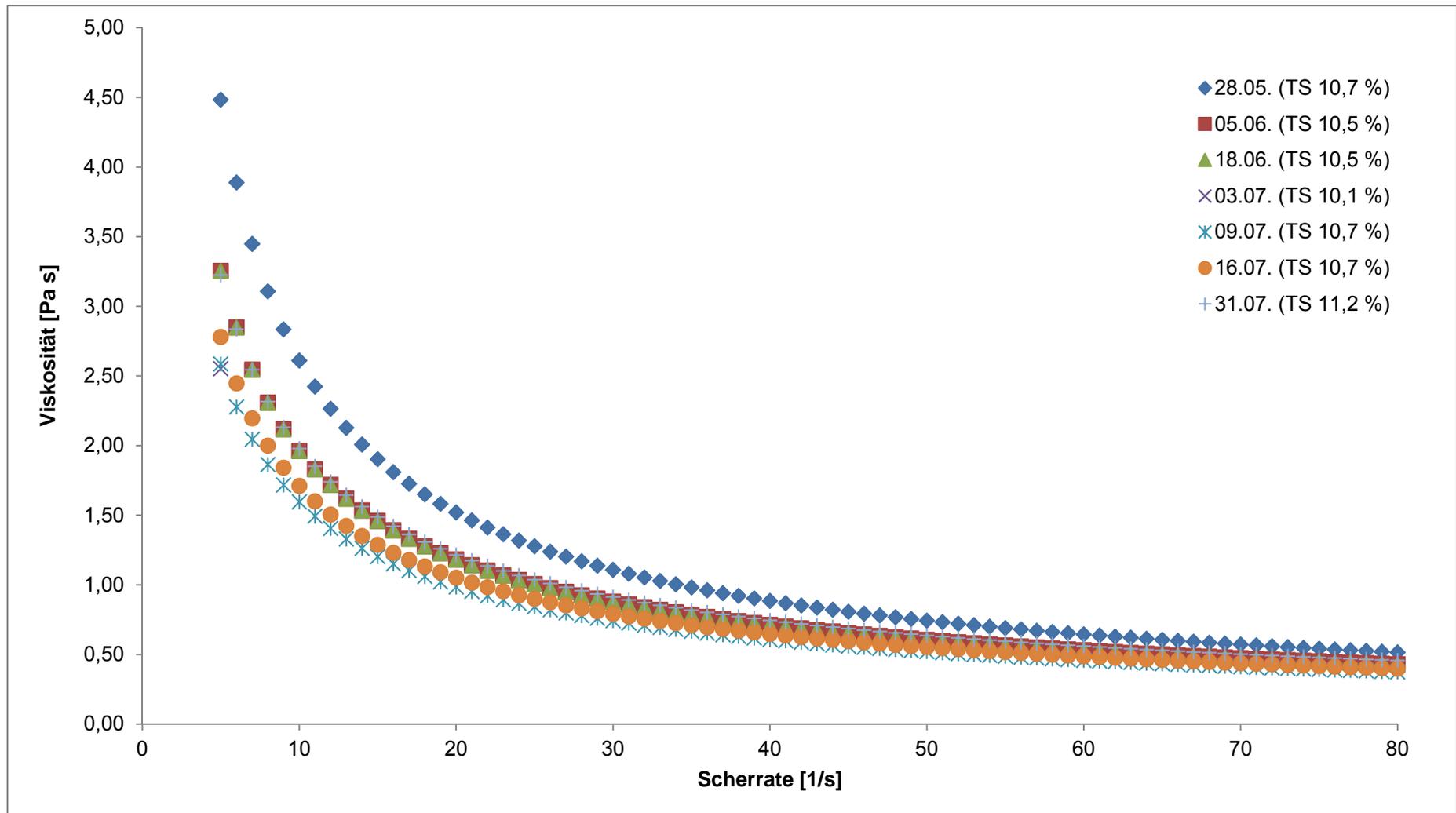


Abbildung 40: Veränderungen der Fließkurven durch die Rationsumstellungen im Fermenter 1.

## Einfluss des TS-Gehaltes

Durch die Steigerung des Pferdemistanteils in der Ration konnte eine deutliche Erhöhung des TS-Gehaltes im Fermenter 1 erreicht werden. Aufgrund der regelmäßigen Viskositätsbestimmungen an der Forschungsbiogasanlage konnten die Veränderungen der Fließeigenschaften erstmalig dokumentiert werden und über den Verlauf betrachtet werden.

In Tabelle 36 ist die Veränderung der repräsentativen Viskosität bei verschiedenen Scherbeanspruchungen bei verschiedenen TS-Gehalten dargestellt. Anhand der Ergebnissen wird deutlich, dass ab einem TS-Gehalt > 11,0 % die Viskosität auch bei höheren Scherraten deutlich zunimmt. Durch die höhere Viskosität verschieben sich auch die Anforderungen gegenüber der eingesetzten Rührtechnik und Pumpensysteme. Gerade bei dem Einsatz von Pferdemist mit z.T. hohen TS-Gehalten kann eine Anpassung der vorhandenen Technik notwendig werden, um eine ausreichende Durchmischung des Fermenterinhalt zu gewährleisten. Zusätzlich ist die Leistungsfähigkeit der Pumpen hinsichtlich erhöhter Viskositäten zu prüfen.

Tabelle 36: Übersicht über die repräsentative Viskosität bei verschiedenen Scherraten sowie des Konsistenzfaktors (K) und des Fließexponenten (n) nach Ostwald-Waele im Fermenter 1 bei ansteigendem TS-Gehalt.

rep. Scherrate	TS-Gehalt [%]							
	10,1	10,7	11,2	11,7	12,7	13,3	14,7	15,1
[1/s]	rep. Viskosität [Pa s]							
5	2,6	2,8	3,2	4,7	5,1	7,0	11,0	12,1
10	1,6	1,7	2,0	2,7	3,1	4,1	6,5	7,1
30	0,7	0,8	0,9	1,1	1,4	1,8	2,8	3,0
50	0,5	0,6	0,6	0,7	0,9	1,2	1,9	2,0
100	0,3	0,3	0,4	0,4	0,6	0,7	1,1	1,2
k	8,0	8,6	10,0	16,7	17,0	23,6	38,0	41,9
n	0,3	0,3	0,3	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2

In Abbildung 41 sind die Fließkurven von Fermenter 1 bei unterschiedlichen TS-Gehalten dargestellt. Anhand dieser Darstellung zeigt sich, dass durch TS-Gehalte oberhalb von 12,0 % die Viskosität auch bei höheren Scherraten deutlich ansteigt.

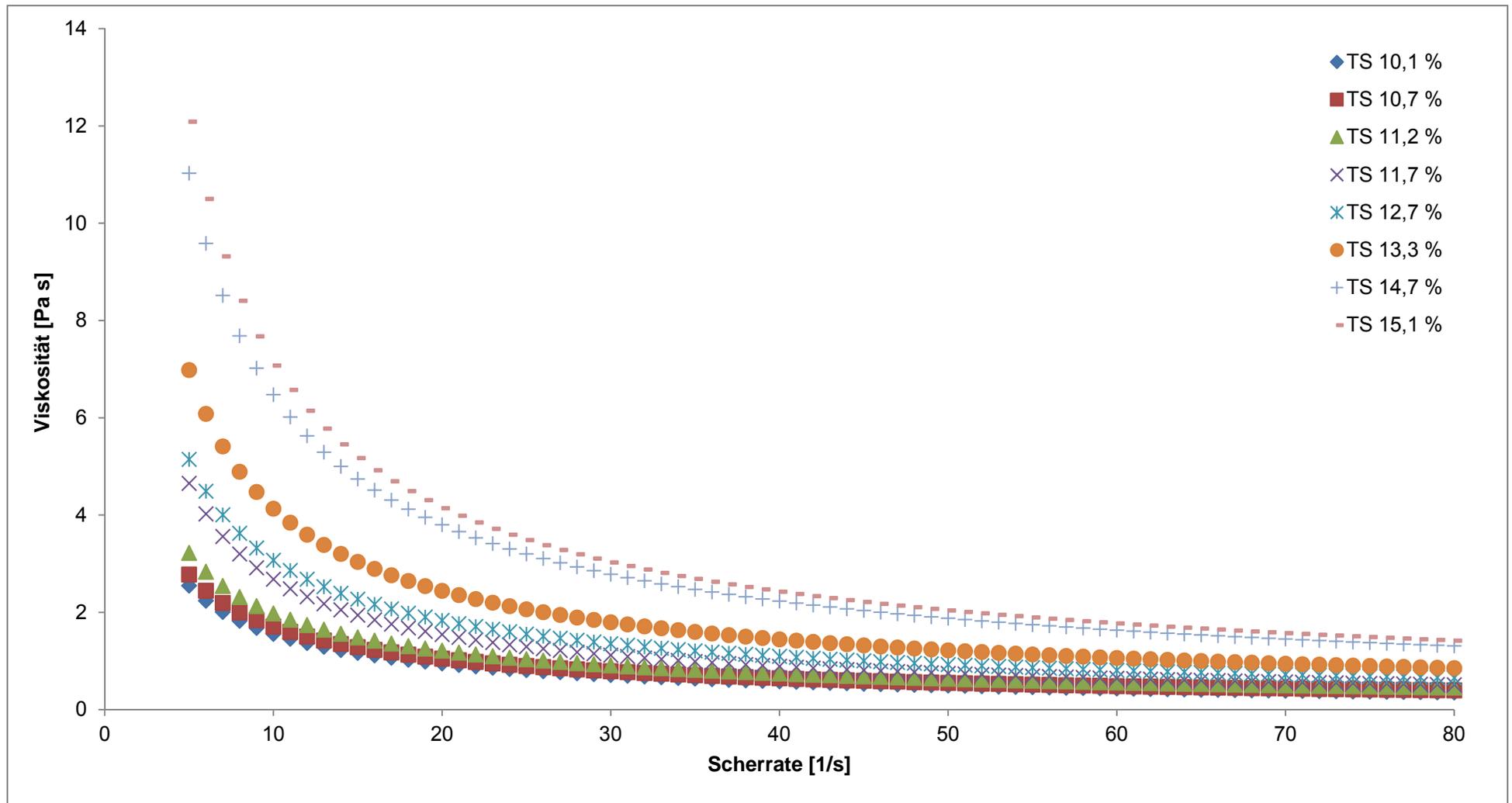


Abbildung 41: Veränderungen der Fließkurven durch verschiedene TS-Gehalte im Fermenter 1.

## Einfluss der mechanischen Substrataufbereitung

Um den Effekt der mechanischen Aufbereitung mittels Bio-QZ auf die Fließeigenschaften der Gärsubstrate zu untersuchen, wurden die Fließkurven der beiden Fermenter bei identischer Fütterung bestimmt. Aufgrund des Einflusses des TS-Gehaltes kann der Vergleich nur bei identischem TS-Gehalt der Gärsubstrate erfolgen. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Tabelle 37 aufgeführt. Es wurden die Fließkurven bei drei unterschiedlichen TS-Gehalten ausgewählt. Die Ergebnisse zeigen, dass die mechanische Aufbereitung zu einer deutlichen Verringerung der Viskosität führt. Das strukturviskose Verhalten ist durch die vorgeschaltete Substratzerkleinerung am Fermenter 1 stärker ausgeprägt. In Abbildung 42 sind die prozentualen Unterschiede der Viskosität der Gärsubstrate der Fermenter bei den verschiedenen TS-Gehalten dargestellt. Die Unterschiede in der Viskosität zwischen den beiden Fermentern steigen mit zunehmender Scherbeanspruchung an. Bei den Gärsubstraten mit einem TS-Gehalt von 10,1 % betrug die Differenz der repräsentativen Viskosität bei einer Scherrate von  $10 \text{ s}^{-1}$  6,4 % und bei einer Scherrate von  $100 \text{ s}^{-1}$  20,3 %. Einen zusätzlichen Einfluss hatte der TS-Gehalt der Substrate. Mit steigenden TS-Gehalten wurde der Effekt der mechanischen Aufbereitung wesentlich erhöht. So lag die repräsentative Viskosität bei einer Scherbeanspruchung von  $100 \text{ s}^{-1}$  im Fermenter 1 um 52,5 % niedriger als im Fermenter 2 ohne die mechanische Aufbereitung. Die Fließkurven dieses Vergleiches zwischen den beiden Fermentern sind in Abbildung 43 aufgetragen.

Tabelle 37: Vergleich der repräsentativen Viskosität bei verschiedenen Scherraten sowie des Konsistenzfaktors (K) und des Fließexponenten (n) nach Ostwald-de-Waele zwischen Fermenter 1 und 2.

rep. Scherrate [1/s]	F 1	F 2	F 1	F 2	F 1	F 2
	TS	TS	TS	TS	TS	TS
	10,1 %	10,1 %	11,2 %	11,1 %	11,7 %	11,7 %
rep. Viskosität [Pa s]						
10	1,6	1,7	2,0	2,1	2,7	3,0
30	0,7	0,8	0,9	1,1	1,1	1,4
50	0,5	0,6	0,6	0,8	0,7	1,0
100	0,3	0,4	0,4	0,5	0,4	0,7
k	8,0	7,5	10,0	8,3	16,7	13,5
n	0,3	0,3	0,3	0,4	0,2	0,3

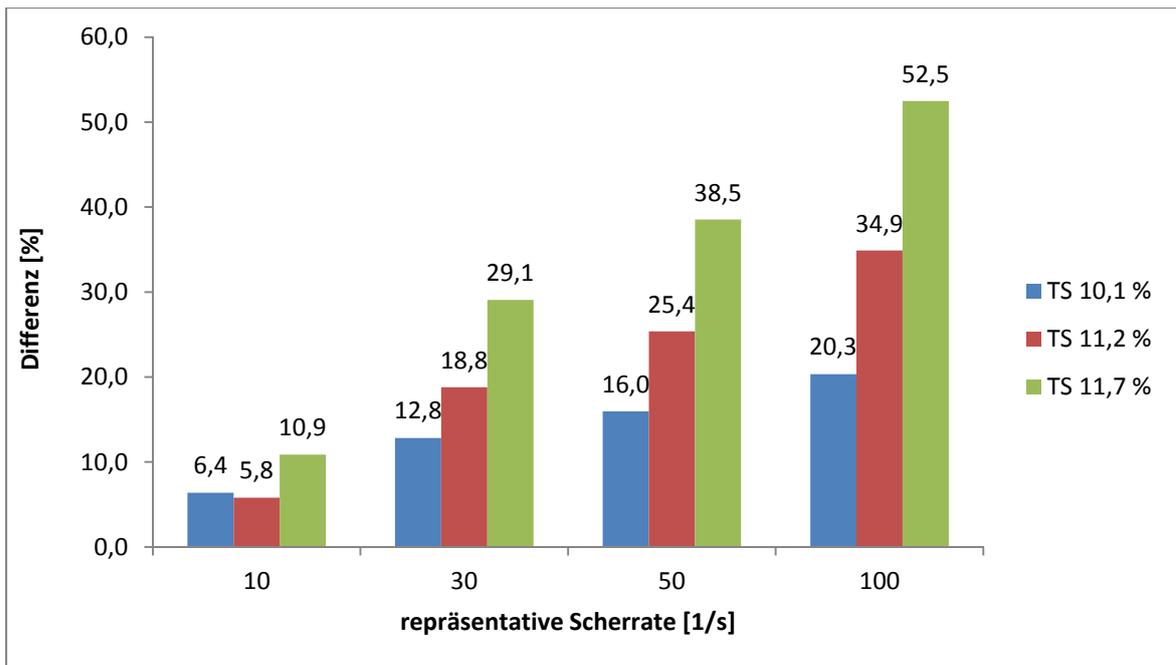


Abbildung 42: Prozentualer Unterschied der repräsentativen Viskosität zwischen Fermenter 1 (Bio-QZ) und Fermenter 2 bei unterschiedlichen Scherraten.

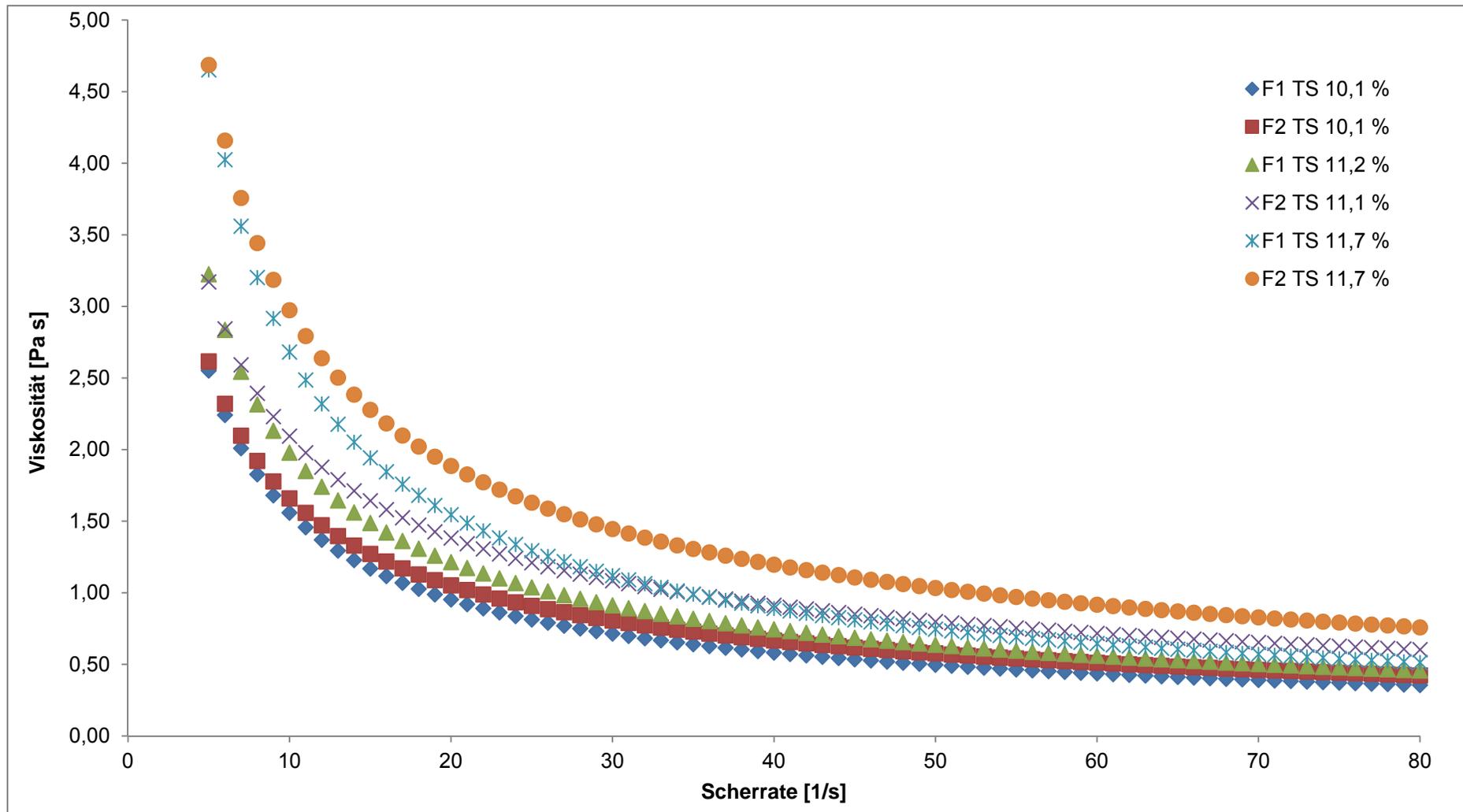


Abbildung 43: Vergleich der Fließkurven der Gärsubstrate von Fermenter 1 (Bio-QZ) und Fermenter 2 bei unterschiedlichen TS-Gehalten.

## 1.4. AP 4: Datenerhebung an Praxisanlagen

Für die Untersuchung der Pferdemitvergärung auf Praxisbetrieben wurden an einem Betrieb vertiefende Messungen durchgeführt. Zusätzlich wurden weitere sieben Praxisbetriebe untersucht. Die Datenerhebung dieser sieben Betriebe umfasste die Verfahrenstechnik, sowie die Substratbeschaffung und Aufbereitung. Desweiteren wurde eine detaillierte Wirtschaftlichkeitsberechnung dieser Betriebe durchgeführt. Die Auswertung dieser Ergebnisse sind in Abschnitt 1.6. AP 6 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung dargestellt. Die Auswertung des separat erfassten Praxisbetriebs ist näher im folgenden Abschnitt beschrieben.

Bei der untersuchten Biogasanlage handelt es sich um eine Einzelhofanlage mit Nassfermentation, mit einer mesophilen Prozessführung (48 °C). Die Anlage wurde im Jahr 2011 in Betrieb genommen. Die Einsatzstoffe bestehen aus den Rohstoffen Pferdemit, Mais, Gras, Getreide und Schweinegülle. Im Untersuchungszeitraum hat sich die Ration folgendermaßen zusammengesetzt:

- 31,63 % Schweinegülle;
- 45,24 % Maissilage;
- 2,36 % Grassilage;
- 14,40 % Pferdemit;
- 6,37 % Getreide.

Das Reaktorsystem umfasst einen stehenden Fermenter und einen stehenden Nachgärer mit jeweils 2300 m<sup>3</sup> Nettovolumen. Bei dem BHKW handelt es sich um zwei asynchrone MAN Gasmotoren mit einer gesamten elektrischen Leistung von 400 kW. Die durchschnittliche theoretische Verweilzeit liegt zwischen 120 und 150 Tagen.

Der Transport des Pferdemites von den Pferdehöfen zum Abladeplatz in Frabertsham, Landkreis Traunstein, erfolgt zum einen mit einem LKW des Unternehmens Hölzl Agrosystem und zum anderen mit einem betriebseigenen Schlepper und Anhänger. Der Transport der Firma Hölzl erfolgt von einer Reitsportanlage aus Sauerlach bei München. Die Transportstrecke beträgt 75 km. Der Transport des Pferdemitis vom Pferdebetrieb Heise aus Seeon beträgt 8,5 km.

Bei der Zerkleinerung des Pferdemists wird der Schredder BA 720 der Firma Jenz eingesetzt. Dieser stammt von der Firma Hälbig Dienstleistungs GmbH aus Eising, Landkreis Rosenheim. Der geschredderte Pferdemist wird von einem Radlader aufgenommen und zu einer Halde aufgeschoben sowie verdichtet. Zusätzlich wurde die ersten drei Tage eine Silofolie über die Halde gelegt, um eine erhöhte Geruchs-Immission zu vermeiden. Diese Folie wurde anschließend wieder entfernt. Der Pferdemist wurde in diesem Zustand ca. vier Wochen auf dem Betrieb gelagert.

Um die Attraktivität des Pferdemists im Vergleich zu anderen Substraten beurteilen zu können, wird eine Kostenanalyse des Aufbereitungsverfahrens durchgeführt. Dazu zählen:

- Transportkosten;
- Zerkleinerungskosten;
- Lagerungskosten.

Als Grundlage für diese Berechnung wurden die abgerechneten Kosten der Dienstleister und Kalkulationsdaten des KTBL herangezogen. Werden alle Kosten zusammengefasst (Transport, Schreddern, Lagerung) ergeben sich Bereitstellungskosten von 21,53 €/t Pferdemist.

Zusätzlich wurden die spezifischen Methanerträge einer Charge Pferdemist untersucht. Dafür wurde eine Probe von dem frisch angelieferten Pferdemist gezogen, eine nach dem Schreddern und die dritte nach der vierwöchigen Lagerung. Die Ergebnisse des Batchversuchs sind in Tabelle 45 dargestellt.

Tabelle 38: TS- und oTS-Gehalte, Methangehalte und spezifische Methanerträge der Pferdemistproben

Substrat	TS	oTS	Me- than- gehalt	Spezifischer Methanertrag	Variations- koeffizient
	[ % FM]	[% FM]	[Vol.-%]	[Nm <sup>3</sup> /kg oTS]	[%]
Pferdemist frisch	59,01	54,38	59,5	0,161	16,7
Pferdemist geschreddert	41,87	36,15	59,1	0,170	3,3
Pferdemist gelagert	28,04	21,63	62,1	0,130	3,4

Das Verfahren der Pferdemistaufbereitung mit Schredder und nachgeschalteter Rotte ist als Aufbereitung für Pferdemist nur bedingt geeignet. Die Zerkleinerung des Pferdemists führt zu einem um 6% höheren spezifischen Methanertrag bei unmittelbarem Einsatz des Substrats nach der Zerkleinerung gegenüber der unaufbereiteten Variante. Länger gelagerter Pferdemist schneidet deutlich schlechter ab. Da dieses Verfahren eine Rotte mit einschließt, ist es aus Sicht des Methanertrags nicht zu empfehlen.

## **1.5. AP 5 Messungen im Praxismaßstab**

### **Zielsetzung**

Das Ziel dieses Arbeitspaketes war die Begleitung und Betreuung einer landwirtschaftlichen Biogasanlage mit Pferdemist als Einsatzstoff über einen 12-monatigen Zeitraum. Hierfür wurde die Biogasanlage der Rott GbR ausgewählt.

Die Biogasanlage wurde 2007 als Nawaro-Anlage in Betrieb genommen und hat seit der Erweiterung im Jahre 2011 eine genehmigte Anlagenleistung von 300 kW<sub>el</sub> und liegt in Aidlingen im Landkreis Böblingen (Abbildung 44). Die Biogasanlage besteht aus einem Fermenter und einem Nachgärer mit einem Bruttovolumen von jeweils 1206 m<sup>3</sup> (16 m Durchmesser und 6 m Höhe). Der Fermenter ist mit einer Betondecke ausgestattet. Der Nachgärer hat ein Doppelmembran-Tragluftdach, welches als Gasspeicher (330 m<sup>3</sup> Volumen) der Anlage dient. Zur Durchmischung des Gärsubstrates ist in jedem Behälter ein Tauchmotorrührwerk (Flygt, 13 kW) installiert. Zusätzlich ist im Fermenter noch ein Langachsrührwerk (Rema Biogator HPR 1, 15,0 kW) verbaut. Die Verwertung des produzierten Biogases erfolgt in zwei MTU Gasmotoren mit einer elektrischen Leistung von jeweils 190 kW. Im Zuge der Anlagenerweiterung wurde von dem Anlagenbetreiber ein MeWa Bio-QZ beschafft. Durch den Bio-QZ ist die Substratflexibilität deutlich erhöht worden. Dadurch konnte der Betreiber alternative Einsatzstoffe zur Energiegewinnung einsetzen und den gesteigerten Substratbedarf für die höhere Anlagenleistung hauptsächlich durch Pferdemist sicherstellen. Für die Beschickung des Bio-QZ ist ein Doppel-Rondomat (Fa. Fliegl) verbaut. Die vom Bio-QZ aufbereiteten Substrate werden über einen Biomix

(Fa. Pumpenfabrik Wangen) in den Fermenter hineingepumpt. Für die Untersuchungen an der Biogasanlage wurden Stromzähler für die Einbring- und Rührtechnik nachgerüstet.

Die Biogasanlage ist für dieses Projekt als Beispiellösung zu betrachten, da nur durch die Umrüstung der Eintragstechnik der Einsatz von Pferdemist und weiteren Maisalternativen ermöglicht wurde. Anhand dieser Biogasanlage soll gezeigt werden, dass durch gezielte Umrüstungen von bestehenden Anlagen noch erhebliche Reststoffpotentiale für die Biogaserzeugung nutzbar gemacht werden können.



Abbildung 44: Biogasanlage der Biogas Rott GbR (Novatech, 2011)

## **Ergebnisse und Diskussion**

Die Fütterungsmengen sowie die Raumbelastung und theoretische hydraulische Verweilzeit der Biogasanlage des Untersuchungszeitraums sind in Tabelle 39 und 40 dargestellt. Die täglichen Fütterungsmengen waren an der Biogasanlage sehr schwankend. Dies spiegelt sich auch in der durchschnittlichen Anlagenleistung wieder (Abbildung 45). Die Ursachen für diese Schwankungen waren zum Teil stark variierende Substratqualitäten. Im Januar 2013 musste die Anlagenleistung aufgrund unzureichender Lagerkapazität reduziert werden. Aufgrund des langanhaltenden Winters konnte die Fütterung erst wieder im März gesteigert werden. Ende März trat im Fermenter aufgrund eines Rührwerkdefektes eine erhebliche Schwimmdecke auf, die ein externes Aufrühren erforderlich machte. Im Mai 2013

konnte die Leistung der Anlage wieder gesteigert werden. Im Juni 2013 wurde aufgrund der andauernden Probleme mit Schwimmschichten und Verstopfungen des Überlaufes der Fermenter geleert. Hier zeigte sich die hohe Flexibilität der Flüssigfütterung als großer Vorteil, da der Anlagenbetreiber in dieser Phase den Nachgärer mit frischem Substrat beschicken konnte und die Gasproduktion aufrechterhalten könnte.

Tabelle 39: Fütterungsparameter der Biogasanlage Rott im Zeitraum August bis Dezember 2012.

Parameter	Einheit	Aug 12		Sep 12		Okt 12		Nov 12		Dez 12	
		$\bar{x}$	STD	$\bar{x}$	STD	$\bar{x}$	STD	$\bar{x}$	STD	$\bar{x}$	STD
FM	[t/d]	16,6 ± 3,4	14,0 ± 2,4	13,8 ± 3,1	15,2 ± 2,3	17,2 ± 2,6					
oTS	[t/d]	6,4 ± 1,3	3,8 ± 0,8	5,0 ± 1,1	4,0 ± 0,6	3,7 ± 0,7					
RB	[kg oTS/m*d]	6,4 ± 1,3	3,8 ± 0,8	4,9 ± 1,1	4,0 ± 0,6	3,7 ± 0,7					
HRT	[d]	63,9 ± 18,3	74,6 ± 16,4	77,3 ± 22,2	67,8 ± 11,7	60,1 ± 11,4					

Tabelle 40: Fütterungsparameter der Biogasanlage Rott im Zeitraum Januar bis Juli 2013.

Parameter	Einheit	Jan 13		Feb 13		Mrz 13		Apr 13		Mai 13		Jun 13		Jul 13	
		$\bar{x}$	STD	$\bar{x}$	STD	$\bar{x}$	STD	$\bar{x}$	STD	$\bar{x}$	STD	$\bar{x}$	STD	$\bar{x}$	STD
FM	[t/d]	12,8 ± 2,4	11,8 ± 0,6	14,6 ± 4,4	16,9 ± 3,5	19,9 ± 4,9	14,2 ± 4,2	18,7 ± 1,7							
oTS	[t/d]	3,0 ± 0,6	2,9 ± 0,2	3,6 ± 1,1	4,3 ± 0,9	5,2 ± 1,2	3,7 ± 1,1	5,1 ± 0,5							
RB	[kg oTS/m*d]	3,0 ± 0,6	2,9 ± 0,2	3,6 ± 1,1	4,3 ± 0,9	5,1 ± 1,2	3,7 ± 1,1	5,1 ± 0,5							
HRT	[d]	81,2 ± 14,3	85,1 ± 4,3	81,2 ± 45,0	63,1 ± 19,9	60,0 ± 45,8	83,3 ± 46,3	54,2 ± 5,4							

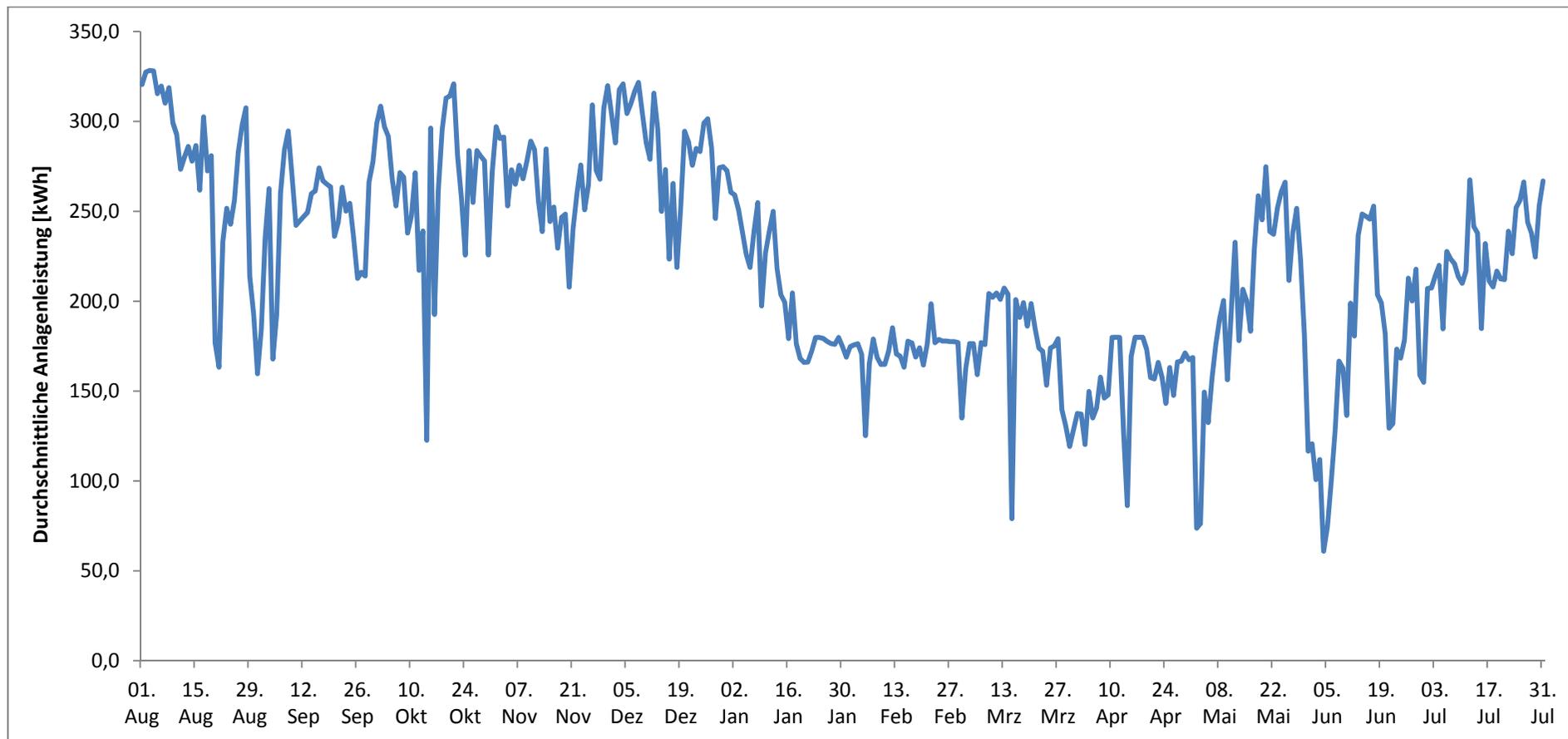


Abbildung 45: Durchschnittliche Anlagenleistung der Biogasanlage Rott im gesamten Untersuchungszeitraum.

In Tabelle 41 und Abbildung 46 sind die Veränderungen der Rationszusammensetzung in den einzelnen Monaten dargestellt. Die Daten zeigen, dass an der Biogasanlage der Pferdemist den Hauptanteil in der Ration darstellt und vom Betreiber eine große Vielfalt an Substraten eingesetzt wird.

Tabelle 41: Rationszusammensetzung der Biogasanlage Rott [% FM].

Substrat		Aug 12	Sep 12	Okt 12	Nov 12	Dez 12	Jan 13	Feb 13	März 13	Apr 13	Mai 13	Jun 13	Jul 13
Pferdemist	[%]	41	40	31	35	36	37	35	38	40	38	35	35
Maissilage	[%]	-	6	42	40	29	7	5	3	20	27	41	31
Grassilage	[%]	9	21	24	19	14	13	19	20	18	18	9	24
GPS	[%]	42	31	3	-	-	-	-	-	-	-	-	7
Getreideschrot	[%]	8	3	-	-	-	-	5	2	-	-	-	-
Zückerrüben	[%]	-	-	-	3	14	20	16	3	-	-	-	-
Zuckerhirse	[%]	-	-	-	3	7	23	25	34	23	17	15	3

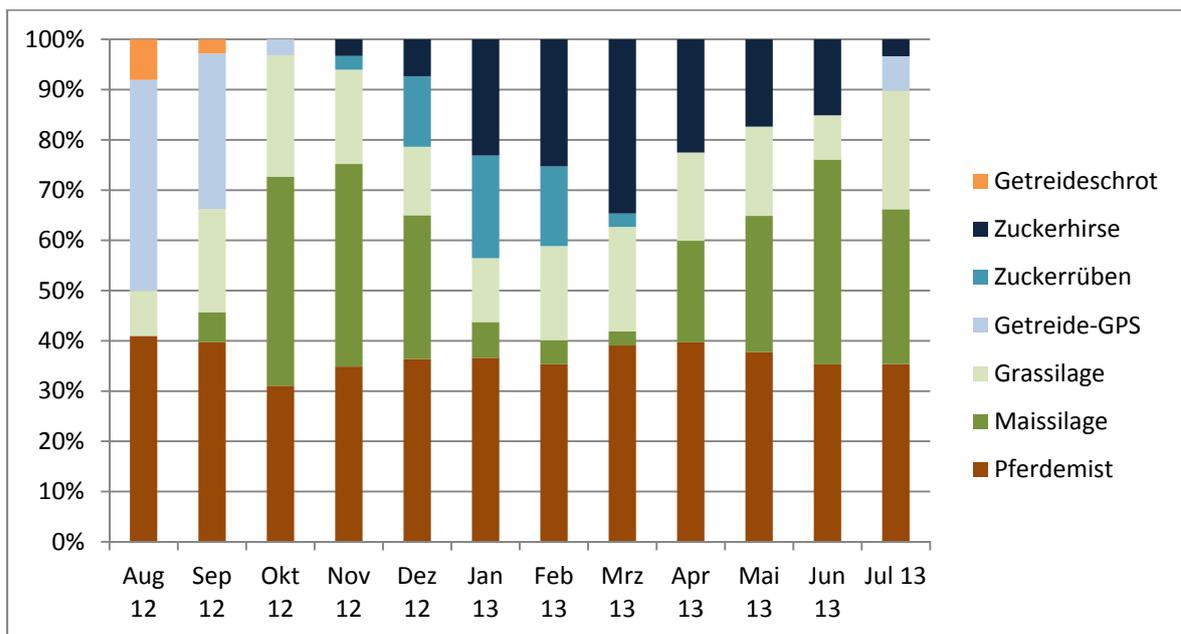


Abbildung 46: Rationszusammensetzung der Biogasanlage Rott [% FM].

Bei der Betrachtung der TS- und oTS-Gehalte der Gärsubstrate ist ein deutlicher Einfluss der hohen Anteile des Pferdemistes und des Getreideschrotes in der Ration zu erkennen. Durch die Verwendung dieser Substrate stieg der TS-Gehalt im Fermenter auf bis zu 15,01 % in der KW 35. Aufgrund der Vorzerkleinerung der Substrate durch den Bio-QZ traten jedoch keine Probleme bei der Durchmischung des Fermenterinhaltens und der Gasfreisetzung auf. Durch die Umstellung der Ration sank der TS-Gehalt im Fermenter wieder auf 10,19 % in der KW 45. Durch die erneute Steigerung des Pferdemistes in der Ration stiegen die TS-Gehalte bis zum Jahresende wieder auf 11,44 %. Die Reduzierung der Fütterung Anfang 2013 resultierte ebenfalls in einer deutlichen Verringerung der TS-Gehalte in den Gärbehältern. Aufgrund der Prozessstörungen ab Ende März war eine repräsentative Probenahme an der Biogasanlage nicht mehr möglich.

Tabelle 42: TS- und oTS-Gehalte der Gärsubstrate in Relation zum Anteil des verwerteten Pferdemistes in der Ration

KW	Anteil Pferdemist [% FM]	Fermenter		Nachgärer	
		TS [%]	oTS [%]	TS [%]	oTS [%]
31	41,4	14,1	9,5	13,0	9,1
33	41,7	14,1	9,5	13,0	9,1
35	42,3	15,0	10,6	-	-
37	40,8	12,8	8,8	12,4	8,4
39	37,1	12,5	8,8	12,3	8,4
41	29,1	12,0	8,3	11,7	8,1
43	32,4	10,3	7,5	9,9	6,9
45	34,4	10,2	7,4	9,7	6,7
47	35,0	10,6	7,8	9,9	6,9
49	35,1	11,2	8,1	9,6	6,8
51	36,5	11,4	8,3	9,1	6,3
3	37,9	8,8	6,1	7,9	5,4
5	35,0	9,0	6,4	8,3	5,8
7	35,0	8,9	6,5	7,5	5,2
9	35,1	9,1	6,5	8,4	5,9
11	35,5	9,0	6,5	8,5	5,9
15	38,8	6,1	4,5	5,7	4,0

In den Tabellen 43 und 44 ist der Stromverbrauch des Eintragungssystems und des Bio-QZs pro t zugeführter Frischmasse dargestellt. Zusätzlich ist der prozentuale Anteil des Pferdemistes an der Gesamtration aufgeführt. Der Bio-QZ an der Biogasanlage Rott hat im Durchschnitt  $6,9 \pm 2,1$  kWh/t FM für die Aufbereitung verbraucht. Im Vergleich dazu hat der Bio-QZ an der Biogasanlage am Unteren Lindenhof  $11,3 \pm 2,6$  kWh/t FM benötigt. Der niedrigere Verbrauch an der Biogasanlage Rott lässt sich auf die kürzere Zerkleinerungszeit von 8 Sekunden zurückführen. Die übrigen Verbraucher des Feststoffeintragssystems haben  $5,4 \pm 1,3$  kWh/t FM benötigt. Zwischen dem Stromverbrauch pro t zugeführter FM und dem Anteil des Pferdemistes in der Ration ist kein Zusammenhang erkennbar.

Tabelle 43: Stromverbrauch des Feststoffeintragssystems pro t zugeführter Frischmasse in dem Zeitraum August bis Dezember 2012.

KW	Anteil Pferdemist		kWh/t FM					
	[% FM]		Eintrag		QZ		Summe Eintrag + QZ	
	$\bar{x}$	STD	$\bar{x}$	STD	$\bar{x}$	STD	$\bar{x}$	STD
31	41,4	± 4,0	4,2	± 0,3	5,9	± 0,6	10,2	± 0,8
32	40,5	± 0,9	4,6	± 0,6	5,6	± 0,5	10,3	± 0,9
33	42,8	± 2,0	5,1	± 1,3	6,2	± 1,6	11,4	± 2,7
34	41,5	± 7,5	7,8	± 2,4	7,7	± 1,7	15,5	± 4,1
35	43,0	± 6,7	7,1	± 2,6	6,6	± 1,6	13,8	± 4,2
36	42,4	± 3,8	5,7	± 1,4	9,2	± 4,4	14,9	± 5,7
37	39,2	± 1,0	7,5	± 0,7	8,1	± 1,3	15,5	± 1,8
38	38,5	± 1,3	7,3	± 0,8	7,9	± 0,8	15,2	± 1,6
39	35,7	± 1,8	7,1	± 1,5	8,1	± 1,7	15,1	± 3,2
40	27,4	± 6,5	5,3	± 0,6	6,7	± 1,2	12,0	± 1,6
41	30,8	± 3,1	6,6	± 0,9	8,1	± 2,2	14,7	± 2,9
42	33,2	± 1,3	4,9	± 1,9	6,3	± 1,8	11,3	± 3,6
43	31,6	± 1,6	6,1	± 1,2	6,0	± 1,3	12,1	± 2,3
44	33,7	± 2,4	6,1	± 2,4	5,9	± 2,1	12,0	± 4,4
45	35,0	± 0,5	5,4	± 0,5	5,1	± 0,7	10,5	± 1,2
46	34,8	± 0,1	6,8	± 1,2	6,7	± 1,2	13,5	± 2,2
47	35,2	± 0,8	6,3	± 1,8	6,2	± 1,6	12,5	± 3,4
48	34,7	± 0,9	5,8	± 1,0	6,3	± 1,1	12,1	± 2,1
49	35,5	± 1,3	5,0	± 0,8	5,6	± 0,5	10,6	± 1,4
50	35,6	± 2,9	7,3	± 2,8	8,6	± 3,1	16,0	± 5,9
51	37,7	± 1,4	5,9	± 1,1	8,2	± 1,5	14,1	± 2,5
52	37,4	± 1,0	5,5	± 1,0	8,2	± 1,5	13,7	± 2,5

Tabelle 44: Stromverbrauch des Feststoffeintragssystems pro t zugeführter Frischmasse in dem Zeitraum Januar bis Juli 2013.

KW	Anteil Pferdemist		kWh/t FM					
	[% FM]		Eintrag		QZ		Summe Eintrag + QZ	
	$\bar{x}$	STD	$\bar{x}$	STD	$\bar{x}$	STD	$\bar{x}$	STD
1	37,6	± 2,8	5,7	± 1,0	7,4	± 2,2	13,0	± 1,5
2	38,1	± 2,3	6,6	± 1,7	8,2	± 1,9	14,8	± 3,5
3	35,0	± 0,0	5,7	± 0,9	7,4	± 0,8	13,0	± 1,6
4	35,5	± 1,2	6,4	± 1,1	8,1	± 1,1	14,5	± 2,2
5	35,0	± 0,0	5,8	± 0,6	7,1	± 0,6	12,9	± 1,2
6	35,0	± 0,0	6,1	± 1,5	7,6	± 1,6	13,7	± 3,0
7	35,1	± 0,8	6,6	± 2,1	7,8	± 1,9	14,4	± 4,0
8	34,4	± 0,7	6,8	± 1,6	8,1	± 2,3	14,9	± 3,9
9	35,5	± 1,5	8,7	± 5,0	9,9	± 4,0	18,6	± 8,9
10	36,1	± 2,2	5,9	± 0,9	8,4	± 0,9	14,3	± 1,7
11	38,8	± 0,2	4,5	± 0,3	7,5	± 0,6	12,0	± 0,8
12	39,1	± 0,9	4,5	± 0,4	8,1	± 1,1	12,6	± 1,4
13	40,7	± 1,6	4,2	± 1,1	7,4	± 1,8	11,6	± 2,9
14	40,7	± 1,4	4,4	± 2,1	8,8	± 3,7	13,2	± 5,7
15	39,2	± 1,3	3,8	± 0,5	7,8	± 2,1	11,7	± 2,4
16	39,8	± 0,6	3,4	± 0,3	6,5	± 0,4	9,9	± 0,7
17	39,4	± 1,2	3,4	± 0,7	6,1	± 0,9	9,5	± 1,5
18	38,4	± 2,2	4,2	± 1,8	6,7	± 2,6	10,9	± 4,4
19	38,1	± 1,7	3,6	± 0,3	5,6	± 0,2	9,2	± 0,3
20	37,5	± 0,5	4,0	± 1,5	5,3	± 1,8	9,3	± 3,2
21	37,4	± 1,1	3,7	± 0,3	5,0	± 0,8	8,8	± 0,9
22	36,8	± 7,1	3,9	± 1,2	5,1	± 1,3	9,0	± 2,5
23	35,2	± 1,5	4,2	± 1,7	4,3	± 0,2	8,6	± 1,8
24	35,0	± 1,7	3,9	± 0,4	5,1	± 0,5	9,0	± 0,8
25	35,3	± 0,9	4,1	± 0,8	5,0	± 1,1	9,1	± 1,8
26	36,2	± 0,6	5,3	± 1,1	5,7	± 1,0	11,0	± 2,1
27	36,0	± 0,6	4,7	± 0,8	5,8	± 0,9	10,5	± 1,7
28	34,2	± 0,4	4,9	± 0,9	5,6	± 0,9	10,5	± 1,6
29	35,7	± 1,0	5,2	± 0,9	6,5	± 0,8	11,7	± 1,7
30	35,7	± 0,9	4,6	± 0,7	6,3	± 0,5	10,9	± 1,2

An der Biogasanlage Rott betrug die tägliche Stromproduktion im Untersuchungszeitraum durchschnittlich  $5292 \pm 1230$  kWh/d. Daraus ergibt sich eine mittlere Anlagenleistung von  $221 \pm 15$  kW (Tabellen 45 und 46). Wie schon erwähnt, haben die Störungen im Frühjahr 2013 erhebliche Auswirkungen auf die Anlagenleistung. Der prozentuale Anteil des für die Einbringung der Feststoffe benötigten Stroms in Relation zur Erzeugung beträgt  $3,0 \pm 0,9$  %. Etwas mehr als die Hälfte des Stromverbrauchs wird durch den Bio-QZ verursacht ( $1,6 \pm 0,5$  %).

Tabelle 45: Mittlere Anlagenleistung und prozentualer Eigenstrombedarf der Einbringtechnik in dem Zeitraum August bis Dezember 2012.

KW	Stromproduktion [kWh/d]		Leistung [kW]		Eigenstrombedarf in [%] der Stromproduktion			
	$\bar{x}$	STD	$\bar{x}$	STD	Eintrag		QZ	
	$\bar{x}$	STD	$\bar{x}$	STD	$\bar{x}$	STD	$\bar{x}$	STD
31	7652	± 401	319	± 17	2,4	± 0,4	1,4	± 0,3
32	7180	± 438	299	± 18	2,8	± 0,3	1,6	± 0,2
33	6749	± 305	281	± 13	2,7	± 0,7	1,5	± 0,4
34	5509	± 1046	230	± 44	4,1	± 0,8	2,0	± 0,4
35	5456	± 1360	227	± 57	3,2	± 0,8	1,6	± 0,4
36	5937	± 1149	247	± 48	3,4	± 0,8	2,0	± 0,6
37	6098	± 275	254	± 11	3,8	± 0,4	2,0	± 0,3
38	6135	± 292	256	± 12	3,6	± 0,5	1,9	± 0,3
39	5747	± 645	239	± 27	3,4	± 0,5	1,9	± 0,3
40	6818	± 482	284	± 20	2,4	± 0,2	1,3	± 0,2
41	5501	± 1215	229	± 51	3,3	± 1,1	1,8	± 0,6
42	6837	± 1083	285	± 45	2,5	± 0,9	1,4	± 0,6
43	6401	± 527	267	± 22	2,4	± 1,0	1,2	± 0,5
44	6540	± 610	273	± 25	2,8	± 0,6	1,0	± 0,7
45	6627	± 203	276	± 8	1,9	± 1,4	0,9	± 0,7
46	6006	± 419	250	± 17	3,1	± 0,8	1,5	± 0,4
47	5992	± 523	250	± 22	3,0	± 0,6	1,5	± 0,4
48	7094	± 472	296	± 20	3,0	± 0,2	1,6	± 0,1
49	7528	± 176	314	± 7	2,6	± 0,2	1,4	± 0,1
50	6601	± 731	275	± 30	3,4	± 0,4	1,8	± 0,2
51	6450	± 628	269	± 26	3,9	± 0,5	2,3	± 0,3
52	6734	± 446	281	± 19	3,5	± 0,4	2,1	± 0,3

Tabelle 46 Mittlere Anlagenleistung und prozentualer Eigenstrombedarf der Einbringtechnik in dem Zeitraum Januar bis Juli 2013.

KW	Stromproduktion		Leistung		Eigenstrombedarf in [%] der Stromproduktion			
	[kWh/d]		[kW]		Eintrag		QZ	
	$\bar{x}$	STD	$\bar{x}$	STD	$\bar{x}$	STD	$\bar{x}$	STD
1	5920	± 471	247	± 20	3,9	± 1,2	2,1	± 0,7
2	5571	± 475	232	± 20	4,0	± 0,5	2,2	± 0,3
3	4448	± 402	185	± 17	3,5	± 0,4	2,0	± 0,2
4	4221	± 121	176	± 5	4,2	± 0,5	2,4	± 0,2
5	4204	± 78	175	± 3	3,7	± 0,3	2,0	± 0,2
6	3903	± 413	163	± 17	4,3	± 1,0	2,4	± 0,5
7	4166	± 168	174	± 7	4,1	± 1,1	2,2	± 0,5
8	4244	± 258	177	± 11	4,2	± 1,0	2,3	± 0,6
9	4063	± 387	169	± 16	4,2	± 1,0	2,3	± 0,5
10	4358	± 386	182	± 16	4,8	± 0,7	2,8	± 0,4
11	4414	± 1117	184	± 47	5,2	± 2,6	3,3	± 1,7
12	4349	± 389	181	± 16	5,0	± 0,7	3,2	± 0,6
13	3586	± 617	149	± 26	3,8	± 2,0	2,5	± 1,3
14	3354	± 283	140	± 12	4,7	± 1,5	3,2	± 1,0
15	3594	± 832	150	± 35	5,8	± 2,0	3,8	± 1,3
16	4103	± 245	171	± 10	4,3	± 0,9	2,8	± 0,5
17	3806	± 231	159	± 10	4,9	± 0,9	3,2	± 0,5
18	3221	± 1023	134	± 43	6,1	± 2,7	3,7	± 1,7
19	4483	± 639	187	± 27	4,6	± 0,5	2,8	± 0,4
20	5147	± 737	214	± 31	3,9	± 1,1	2,2	± 0,7
21	5971	± 514	249	± 21	3,3	± 0,4	1,9	± 0,3
22	4228	± 1522	176	± 63	2,4	± 1,2	1,4	± 0,7
23	2763	± 975	115	± 41	3,1	± 0,6	1,6	± 0,4
24	5123	± 1036	213	± 43	3,0	± 0,6	1,7	± 0,3
25	4361	± 1033	182	± 43	3,6	± 1,2	1,9	± 0,6
26	4427	± 618	184	± 26	4,0	± 0,6	2,1	± 0,3
27	5089	± 344	212	± 14	3,9	± 0,7	2,2	± 0,4
28	5514	± 492	230	± 20	3,5	± 0,6	1,9	± 0,3
29	5064	± 335	211	± 14	4,1	± 0,7	2,3	± 0,4
30	5902	± 318	246	± 13	3,6	± 0,4	2,1	± 0,2

## 1.6. AP 6 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

### Zielsetzung

Ziel dieses Arbeitspaketes ist es, unterschiedliche Verfahren der Pferdemitnutzung an Biogasanlagen zu untersuchen. Am Markt ist eine Fülle an verfahrenstechnischen Komponenten zur Einbringung sowie zur Aufbereitung von Substraten vorhanden. Die Unterhaltskosten in Form von Energiekosten und Wartungskosten, sowie die Investitionskosten dieser Systeme, variieren sehr stark. Um alternative Substrate wie Pferdemit wirtschaftlich einsetzen zu können, müssen die Kosten für die Aufbereitung und Einbringung möglichst gering gehalten werden. Durch den Einsatz von Pferdemit in landwirtschaftlichen Biogasanlagen können erhebliche verfahrenstechnische Störungen hervorgerufen werden. Aufgrund der Tatsache, dass Biogasanlagen oftmals zur Nassvergärung von Energiepflanzen als CSTR ausgelegt sind, kann der Einsatz von rohfaserreichen und faserigen Materialien folgende Störungen verursachen:

- Verstopfen der Schnecken und Rohrleitungen (*Kusch et al, 2008*);
- Mehrbelastung der Rührwerke (*Kusch et al, 2008*);
- Bildung von Schwimmschichten (*Hashimoto, 1983*);
- Beeinträchtigung der Biologie (*Hashimoto, 1983*).

Dementsprechend ist eine Anpassung der eingesetzten Verfahrenstechnik zwingend notwendig. Durch eine geeignete Aufbereitungstechnik soll eine Entlastung der übrigen Anlagentechnik erzielt werden. In der Praxis werden inzwischen unterschiedlichste Verfahrenskonzepte zur Nutzung von Pferdemit angewendet. Die Verfahren basieren häufig auf den Erfahrungen der Anlagenbetreiber. Eine Bewertung dieser Verfahren bezüglich Wirtschaftlichkeit und Übertragbarkeit auf weitere Biogasanlagen ist derzeit noch nicht erfolgt. Daher ist das Ziel dieses Arbeitspaketes die Verfahrenskonzepte von sieben Praxisanlagen zu untersuchen und zu bewerten.

## **Material und Methoden**

Die Datenerhebung dieses Arbeitspaketes umfasst den Bereich der Substratbeschaffung, sowie der Substrataufbereitung. Zusätzlich wurden spezifische Substrat- und Anlagenparameter der Referenzanlagen mit einbezogen.

### **Erfassung und Auswahl der Referenzanlagen**

Im Mittelpunkt der Datenerhebung standen Biogasanlagen, die zu einem größeren Anteil Pferdemist verwerten. Dabei wurden Anlagen ausgewählt, die sich sowohl in ihrer Größe, sowie auch in der Art der vorgeschalteten Pferdemistaufbereitung unterscheiden. Ziel der Datenerhebung war es, möglichst viele unterschiedliche Ansätze der Pferdemistverwertung in Biogasanlagen zu untersuchen und Rückschlüsse auf Wirtschaftlichkeit und verfahrenstechnische Möglichkeiten zu ziehen. Zur Datenerhebung wurde ein für diese Arbeit konzipierter Fragebogen verwendet. Dieser deckte folgende Themenbereiche ab:

- Persönliche Daten;
- Anlagenbezogene Daten;
- Investitions- und Anlagenkosten;
- Einbring- und Aufbereitungstechnik;
- Technische Daten Behälter, BHKW;
- Eingesetzte Substrate.

Untersucht wurden sieben Anlagen mit einer installierten elektrischen Leistung von 190 kW<sub>el</sub> – 800 kW<sub>el</sub>. Dabei setzten fünf Anlagen Pferdemist mit einem Anteil von 13% - 70% ein. Diese werden im späteren Verlauf der Arbeit BGA I – BGA V genannt. Bei BGA VI und BGA VII handelt es sich um Biogasanlagen ohne Pferdemisteinsatz. Diese setzten zum Teil Gülle, sowie andere Mistarten ein. Die Datenerhebung fand an den Anlagen vor Ort statt.

## Berechnung der theoretischen Stromerträge nach KTBL

Zur Berechnung der theoretischen Stromerträge wurde auf Grund der Inhomogenität der eingesetzten Substrate zum größten Teil auf KTBL- Faustzahlen und teilweise auf Zahlen aus Ergebnissen der Uni Hohenheim zurück gegriffen. Durch die Nutzung von empirisch ermittelten Faustzahlen wurde versucht, die realen Erträge möglichst gut abzubilden. Eine Auflistung spezifischer Methanerträge der unterschiedlichen Substrate, sowie deren Trockensubstanzgehalte sind in Tabelle 47 näher dargestellt. Um den theoretischen Stromerlös bezogen auf die Frischmasse zu erhalten, sind einige Rechenschritte erforderlich. Ein Auflistung der dazu benötigten Formeln, sowie die chronologische Folge der Rechenschritte werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

Tabelle 47 Spezifische Methanerträge unterschiedlicher Substrate nach KTBL, Uni Hohenheim und LFL (KTBL, 2009A; Mönch-Tegeder et al., 2014; LFL, 2014)

Substrat		TS- Ge- halt [% an FM]	oTS- Ge- halt [% an TM]	oTS- Gehalt [% an FM]	Biogasetrag [Nm <sup>3</sup> / t oTS]	Methan- gehalt [%]	Methan- ertrag [Nm <sup>3</sup> / t oTS]	
KTBL, LFL (*)								
NawaRo	Silomais	33	95	31,35	650	52	338	
	Grassilage	35	90	31,50	600	53	318	
	Getreide- GPS	33	95	31,35	620	53	329	
	Grünroggen - GPS	25	90	22,50	600	53	318	
	Sorghum	28	90	25,20	610	52	317	
	Zuckerrübe	23	90	20,70	700	52	364	
	Getreidekorn	87	97	84,39	730	52	380	
	Corn-Cob-Mix	65	98	63,70	730	52	380	
	Lieschkolben- schrot*	45	97	43,65	645	53	342	
Wirt- schafts- Dünger	Hühnertrockenkot	40	75	30,00	500	55	275	
	Rindermist	25	85	21,25	450	55	248	
	Rindergülle	10	80	8,00	380	55	209	
	Schweinegülle	6	80	4,80	420	60	252	
	Uni Hohenheim , LFL (*)							
	Pferdemist unaufbereitet	36	90	32,48	454	52	236	
	Pferdemist aufbereitet	34	88	29,96	494	52	257	
	Schweinemist*	23	83	19,09	400	60	240	

### Berechnung spezifischer Methanertrag

Zur Berechnung des spezifischen Methanertrags wird der spezifische Biogasertrag mit dem spezifischen Methangehalt multipliziert (Formel 1).

$$Y_M = Y_B \times \frac{M_C}{100} \quad (1)$$

$Y_M$ = spezifischer Methanertrag [ $\text{Nm}^3/\text{t oTS}$ ]

$Y_B$ = spezifischer Biogasertrag [ $\text{Nm}^3/\text{t oTS}$ ]

$M_C$ = Methangehalt [%]

### Berechnung theoretischer Stromertrag

Durch Multiplikation des spezifischen Methanertrags mit der organischen Trockenmasse kann die gewonnene Gasmenge berechnet werden. Diese kann mit dem Heizwert von Methan multipliziert werden. Das Produkt ist der theoretische Gesamtenergieertrag der eingesetzten organischen Trockenmasse (Formel 2).

$$E_G = (Y_M \times oTS) \times H_M \quad (2)$$

$E_G$ = theoretischer Gesamtenergieertrag [kWh]

$oTS$ = organische Trockenmasse [t]

$H_M$ = Heizwert Methan = 9,8 [kWh/ $\text{Nm}^3$ ]

Durch Multiplikation des Produkts aus Formel 2 mit dem Wirkungsgrad des BHKWs kann der theoretische Stromertrag berechnet werden. Dieser spiegelt die eingespeiste Menge an Strom wieder (Formel 3).

$$E_{el} = E_G \times \frac{\eta_{el}}{100} \quad (3)$$

$E_{el}$ = theoretischer Stromertrag [kWh]

$\eta_{el}$ = elektrischer Wirkungsgrad des BHKWs [%]

### Berechnung des theoretischen Stromerlöses bezogen auf die Frischmasse

Um eine Aussage über die betriebsindividuellen Stromerlöse bezogen auf die eingesetzte Frischmasse treffen zu können, ist es notwendig den theoretischen spezifischen Stromerlös zu berechnen. In einem ersten Schritt wird der durchschnittliche Strompreis der Biogasanlage berechnet. Dieser setzt sich aus dem Quotient der Stromeinnahmen und des theoretischen Stromertrags zusammen. Um einen durchschnittlichen Strompreis in Cent/ kWh zu erhalten, ist es erforderlich den zuvor berechneten Quotienten mit dem Faktor 100 zu multiplizieren (Formel 4).

$$x_{\text{Strompreis}} = \frac{G_S \times 100}{E_{el}} \quad (4)$$

$x_{\text{Strompreis}}$  = durchschnittlicher Strompreis [Cent/ kWh]

$G_S$  = Stromeinnahmen [€/ t oTS]

Zur Berechnung des spezifischen Stromerlöses bezogen auf die organische Trockenmasse, muss das Produkt aus theoretischem Stromertrags und durchschnittlichen Strompreises durch die eingesetzte organische Trockenmasse dividiert werden (Formel 5).

$$G_{oTM} = \frac{E_{el} \times x_{\text{Strompreis}}}{oTS} \quad (5)$$

$G_{oTS}$  = Stromerlös bezogen auf eine Tonne oTS [€/ t oTS]

Soll der spezifische Stromerlös auf eine Tonne Frischmasse bezogen werden, kann das Ergebnis aus Formel 5 mit dem hundertstel des oTS-Gehalts (an FM) (vgl. Tabelle 47) multipliziert werden (Formel 6).

$$G_{FM} = G_{oTS} \times \frac{oTS\text{-Gehalt}_{an\,FM}}{100} \quad (6)$$

$G_{FM}$  = Stromerlös bezogen auf eine Tonne Frischmasse [€/ t FM]

$oTS\text{-Gehalt}_{an\,FM}$  = oTS-Gehalt an der Frischmasse [%]

## **Wirtschaftlichkeit der Substratversorgung**

Zur Ermittlung des wirtschaftlichen Einflusses des Pferdemisteinsatzes bzw. Mist-einsatzes an Biogasanlagen, wurde für jeden Betrieb eine detaillierte Kostenberechnung des Substrateinsatzes durchgeführt. Diese beinhaltet folgende Punkte:

- Anlagenspezifische Daten;
- Theoretischer Stromerlös aus Substrat;
- Kosten der Aufbereitung des Pferdemists;
- Substratbezogene Kosten frei Eintrag;
- Kostenvorteil durch den Einsatz von Gülle und Mist.

Der Abschnitt „Anlagenspezifische Daten“ enthält allgemeine Angaben zur Bemessungsleistung, sowie zur produzierten Strommenge und den nach Formel 4 berechneten durchschnittlichen Strompreis.

In Abschnitt „theoretischer Stromerlös aus Substrat“ werden Stromerträge und Stromerlöse aus den eingesetzten Substraten nach Formel 1-6 berechnet. Diese können anschließend mit der tatsächlich eingespeisten Strommenge verglichen werden.

Die Kosten der Aufbereitung setzen sich aus den fixen und variablen Kosten der eingesetzten Aufbereitungstechnik zusammen.

Die substratbezogenen Kosten frei Eintrag werden mithilfe von Angaben der Biogasanlagenbetreiber berechnet. Zusätzlich werden die Kosten der Beschickung des Vorratsbehälters mit KTBL-Faustzahlen berechnet. Die Summe der Kosten kann anschließend auf ein Maisäquivalent umgerechnet werden.

Ziel der Berechnungen ist es, eine Aussage über die substratbezogene Kostensparnis durch Einsatz von Mist und im speziellen Pferdemist treffen zu können. Dieser Kostenvorteil wird in Abschnitt „Kostenvorteil durch Einsatz von Gülle und Mist“ dargestellt.

## Berechnung der fixen Kosten

Ein wesentlicher Teil der Substratkosten stellen die fixen Kosten der Anlagentechnik dar. Beim Einsatz von Mist ist in der Regel eine Aufbereitung erforderlich. Die Anschaffung sowie die Zinskosten und die Versicherungskosten der Aufbereitungstechnik werden als fixe Kosten auf die Gesamtkosten des jeweiligen Substrates aufaddiert.

### Abschreibung

Mit der Abschreibung wird der gesamte Werteverlust eines Gebrauchsguts auf die Nutzungsdauer verteilt. Die Nutzungsdauer wurde in allen Berechnungen auf das wirtschaftliche Nutzungspotential in Jahren angegeben. Die Nutzungsdauer der Aufbereitungstechniken wurde auf fünf Jahre festgelegt. Der Restwert wurde auf null festgelegt. Die zeitabhängige Abschreibung lässt sich wie folgt mit Formel 7 berechnen:

$$AfA = \frac{A-R}{N} \quad (7)$$

AfA= zeitabhängige Abschreibung [€/a]

A= Anschaffungswert [€]

R= Restwert [€]

N= Nutzungsdauer [a]

### Zinskosten

Die Zinskosten der Gebrauchsgüter setzen sich aus dem Zinssatz und den Zinsen zusammen. Zur Berechnung der jährlichen Zinskosten muss das durchschnittlich gebundene Kapital ermittelt werden. Bei einer kontinuierlichen Abschreibung ergibt sich ein durchschnittlich gebundenes Kapital in Höhe der halben Anschaffung. Der Zinssatz wurde in den durchgeführten Berechnungen auf 5% festgelegt. Die Zinskosten können mithilfe von Formel 8 berechnet werden.

$$I_K = \frac{A}{2} \times i \quad (8)$$

$I_k$  = Zinskosten je Jahr [€/a]

$i$  = Zinssatz dividiert durch 100

### Versicherung

Die Kosten zur Versicherung der jeweiligen technischen Einrichtungen, entstehen unabhängig von der Auslastung und zählen deshalb zu den fixen Kosten. Die Höhe der Versicherungskosten wurde auf 0,7% des Anschaffungspreises festgelegt. Demnach können die jährlichen Versicherungskosten wie folgt mit Formel 9 berechnet werden.

$$V = A \times v \quad (9)$$

$V$  = Versicherungskosten [€/a]

$v$  = Versicherungszinssatz dividiert durch 100

(KTBL, 2012)

### **Berechnung der variablen Kosten**

Zu den variablen Kosten der Substratversorgung gehören in erster Linie die Rohstoffkosten selbst. Zusätzlich fallen noch Kosten für Ernte und Einlagerung, für die Beschickung des Vorratsbehälters und für eine eventuell vorgeschaltete Aufbereitung an. In den durchgeführten Berechnungen wurden Substratpreise frei Silagelager zu Grunde gelegt. Somit war die Berechnung von Ernte und Einlagerungskosten nicht mehr erforderlich. Lediglich bei der Substratversorgung durch Mist waren teilweise Substratpreise ohne Transportkosten vorhanden. Diese wurden durch Berechnung der Transportkosten korrigiert.

### Beschickungskosten

Bei der Beschickung des Vorratsbehälters entstehen Kosten. Diese setzen sich aus Maschinenkosten und Lohnkosten zusammen. Als Lohnansatz wurde 10 €/h gewählt. Je nach Art der Beschickungsmaschinen, Entfernung zum Silagelager und

Substratart ergeben sich unterschiedliche Beschickungszeiten. Eine Übersicht typischer Entnahmezeiten von Maissilage und Grassilage nach KTBL ist in Tabelle 48 dargestellt.

*Tabelle 48: Kennwerte zur Entnahme und zum Transport von Silage zum Vorlagebehälter unter Berücksichtigung unterschiedlicher Entnahmetechniken (KTBL, 2009B)*

		Maissilage [Akmin/ t FM]	Grassilage [Akmin/ t FM]
Traktor mit Frontlader (1,1 m³)	100m Entfernung	2,08 - 3,05	2,59 - 3,46
	200m Entfernung	3,17 - 4,66	3,96 - 5,28
Radlader, Teleskoplader (2 m³)	100m Entfernung	1,25 - 1,84	1,57 - 2,35
	200m Entfernung	1,85 - 2,73	2,32 - 3,09
Radlader (3,2 m³)	100m Entfernung	0,85 - 1,26	1,07 - 1,42
	200m Entfernung	1,23 - 1,81	1,54 - 2,05

In Tabelle 49 sind Maschinenkosten unterschiedlicher Fahrzeuge und Pumpen dargestellt. Die Maschinenkosten wurden ausgehend von einer Auslastungsschwelle von 100% gewählt.

*Tabelle 49: Maschinenkosten zur Beschickung eines Vorlagebehälters bzw. einer Vorgrube (KTBL, 2009C)*

Art der Maschine	Maschinenkosten bei 100% AS [€/h]
Traktor mit Frontlader (83 kW)	22,43
Teleskoplader (3,5 t)	20,50
Radlader (102 kW)	28,97
Gülepumpe (20 kW E-Motor)	7,22

Mithilfe von Tabelle 48 und 49 konnten durchschnittliche Entnahmekosten unterschiedlicher Substrate berechnet werden. Je nach Substratart wurden realistische Beschickungszeiten innerhalb der oben genannten Grenzen angenommen. Eine Berechnung der Beschickungskosten unter Annahme der jeweiligen Beschickungszeiten ist in Tabelle 50 dargestellt. Diese wurde zur späteren Berechnung der Substratkosten verwendet.

Tabelle 50: Beschickungskosten unterschiedlicher Substrate

	Beschickungszeit [min/ t FM]	Kosten Maschine [€/ t FM]	Kosten Arbeitslohn [€/ t FM]	Kosten Gesamt [€/ t FM]
Silomais	1,5	0,51	0,25	<b>0,76</b>
Grassilage	1,96	0,67	0,33	<b>1,00</b>
Getreide- GPS	1,5	0,51	0,25	<b>0,76</b>
Grünroggen - GPS	1,5	0,51	0,25	<b>0,76</b>
Sorghum	1,5	0,51	0,25	<b>0,76</b>
Zuckerrübe	2,35	0,80	0,39	<b>1,19</b>
Getreidekorn	1	0,34	0,17	<b>0,51</b>
Corn-Cob-Mix	1	0,34	0,17	<b>0,51</b>
Lieschkolbenschrot	1	0,34	0,17	<b>0,51</b>
Hühnertrockenkot	1,5	0,51	0,25	<b>0,76</b>
Rindermist	2,35	0,80	0,39	<b>1,19</b>
Pferdemist	2,35	0,80	0,39	<b>1,19</b>
Schweinemist	2,35	0,80	0,39	<b>1,19</b>
Rindergülle	0,17	0,02	0,03	<b>0,05</b>
Schweinegülle	0,17	0,02	0,03	<b>0,05</b>

### Aufbereitungskosten

Bei der Nutzung von Mist und im speziellen Pferdemist nehmen die Aufbereitungskosten einen wesentlichen Teil der Substratbereitstellungskosten ein. Diese setzen sich aus variablen und fixen Kosten der Aufbereitung zusammen. Die fixen Kosten werden wie oben beschrieben berechnet. Die Berechnung der variablen Kosten beinhaltet die Wartungs-, Reparatur-, und Verschleißkosten, sowie die Kosten der Betriebsmittel und der genutzten Energieträger.

### **Berechnung des Kostenvorteils durch Einsatz von Gülle und Mist**

#### Maisäquivalent

Um die Kosten der einzelnen Substrate untereinander vergleichbar zu machen, ist es notwendig eine Umrechnung in das sogenannte Maisäquivalent vorzunehmen. Dieses gibt an, wie viel Tonnen eines Substrates benötigt werden, um den Methanertrag einer Tonne Mais zu ersetzen. Das mithilfe von Formel 10 berechnete Maisäquivalent wird auf die Frischmasse bezogen.

$$M_{\text{äquivalent}} = \frac{Y_{M(\text{Mais})} \times \text{oTS-Gehalt}_{\text{an FM (Mais)}}}{Y_{M(\text{Substrat})} \times \text{oTS-Gehalt}_{\text{an FM (Substrat)}}} \quad (10)$$

$M_{\text{äquivalent}}$  = Maisäquivalent [ ]

$Y_{M(\text{Mais})}$  = spezifischer Methanertrag von Mais [ $\text{m}^3/\text{t oTS}$ ]

$Y_{M(\text{Substrat})}$  = spezifischer Methanertrag des jeweiligen Substrates [ $\text{m}^3/\text{t oTS}$ ]

### Kosten Maisäquivalent

Um eine Aussage über die Kosten der jeweiligen Substrate im Vergleich zu Mais treffen zu können, ist es notwendig diese mit dem oben berechneten Maisäquivalent zu korrigieren. Durch Korrektur mithilfe von Formel 11 können so die Kosten einer ersetzten Tonne Mais berechnet werden.

$$KM_{\text{äquivalent}} = M_{\text{äquivalent (Substrat)}} \times K_{\text{Gesamt (Substrat)}} \quad (11)$$

$KM_{\text{äquivalent}}$  = Kosten Maisäquivalent [€/ t FM]

$K_{\text{Gesamt (Substrat)}}$  = Gesamtkosten Substrat frei Eintrag [€/ t FM]

### Berechnung Kostenvorteil Substrat

Ziel der durchgeführten Wirtschaftlichkeitsberechnung ist es, den monetären Kostenvorteil durch den Einsatz von Gülle und Mist zu berechnen. Dazu kann mithilfe von Formel 12 der Kostenvorteil des eingesetzten Substrates berechnet werden. Durch Formel 13 erhält man den Kostenvorteil bezogen auf ein gesamtes Jahr.

$$KV_{\text{Substrat}} = K_{\text{Gesamt (Mais)}} - KM_{\text{äquivalent}} \quad (12)$$

$KV_{\text{Substrat}}$  = Kostenvorteil Substrat zu Mais [€/ t FM]

$K_{\text{Gesamt (Mais)}}$  = Gesamtkosten Mais frei Eintrag [€/ t FM]

$$KV_{\text{Substrat pro Jahr}} = KV_{\text{Substrat}} \times \frac{FM_{\text{Substrat}}}{M_{\text{äquivalent}}} \quad (13)$$

$KV_{\text{Substrat pro Jahr}}$  = Kostenvorteil Substrat zu Mais bezogen auf ein Jahr [€/ a]

## Ergebnisse

Im folgenden Abschnitt wird auf die Ergebnisse der durchgeführten Datenerhebungen, sowie die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnung der jeweiligen Anlagen näher eingegangen. Eine Zusammenstellung der untersuchten Biogasanlagen ist in Tabelle 51 näher dargestellt. BGA I bis V setzten unter anderem Pferdemist als Substrat ein. Hier schwanken die Einsatzmengen von 7- 36 %. BGA VI und VII setzten keinen Pferdemist ein. BGA VI setzt zu einem geringen Anteil Rindermist ein. Die untersuchten Anlagen unterscheiden sich sehr stark in ihrer verfahrenstechnischen Ausstattung, sowie in der vorhandenen Einbringtechnik bis hin zur eingesetzten Aufbereitungstechnik. Während BGA I, VI und VII keine Aufbereitungstechnik verwenden, kommen bei den übrigen Anlagen teilweise in Ihrer Funktion deutlich unterschiedliche Aufbereitungstechniken zum Einsatz. BGA II, III und V setzten auf mechanische Aufbereitung mittels eines Mazerators, eines Querstromzerspaners, eines Schredders oder einer Kugelmühle. Die übrigen Anlagen verzichteten auf eine Aufbereitungstechnik.

*Tabelle 51: Übersicht der untersuchten Biogasanlagen unter Berücksichtigung der Aufbereitungstechnik und des eingesetzten Mistanteils*

BGA	Bemessungsleistung [kW <sub>el</sub> ]	Mistanteil [%]		Aufbereitungstechnik	Einbringtechnik
		Pferdemist [%]	Mist Gesamt [%]		
I	184	13	32	keine	Abschieber mit Vertikalmischeinheit
II	250	31	40	Mazerator	Abschieber mit Vertikalmischeinheit
III	263	8	34	Querstromzerspaner	Vertikalmischer
IV	509	36	36	Bewässerung	Vertikalmischer
V	700	24	27	Schredder Verdichtung Kugelmühle	Trichter mit Auflöseschnecke
VI	244	0	3	keine	Trichter mit Auflöseschnecke
VII	500	0	0	Keine	Trichter mit Auflöseschnecke

## **Betriebe mit Pferdemist als Substrat**

### **BGA I**

Bei BGA I handelt es sich um eine Anlage, die im Juni 2011 mit einer elektrischen Leistung von 190 kW in Betrieb gegangen ist. Zum Zeitpunkt der Besichtigung wurde diese auf eine Leistung von 400 kW erweitert. Die Anlage besteht aus je einem Fermenter (B1) mit einem Volumen von 1200 m<sup>3</sup>, einem Nachgärer (B2) mit 1200 m<sup>3</sup> und einem offenen Gärrestlager (B3) mit 2280 m<sup>3</sup>. Der Fermenter ist mit einem Tauchmotorrührwerk der Firma Flygt mit einer Antriebsleistung von 15 kW, sowie mit zwei Stabrührwerken der Firma Rema mit je 15 kW ausgerüstet. Das zweite Stabrührwerk wurde nachgerüstet, um den Behälter auch bei erhöhtem Misteinsatz homogen zu halten. Die Rührzeiten betragen jeweils 6 h/d. Im Nachgärer (B2) ist ebenfalls ein Tauchmotorrührwerk der Firma Flygt verbaut. Dieses wird etwa 4 h/d betrieben. Im Gärrestlager befindet sich wie im Nachgärer ein weiteres Tauchmotorrührwerk, das je nach Bedarf rührt. Zur Gasverwertung wird ein BHKW der Firma AVS mit 190 kW elektrischer Leistung genutzt. Dieses wurde zum Zeitpunkt der Datenerhebung durch ein BHKW der Firma MTU mit einer elektrischen Leistung von 400 kW ersetzt.

Als Substrat werden nur etwa 34% Silomais und Grassilage eingesetzt. Hauptanteil der Substratversorgung bilden Gülle und Mist. Eingesetzt werden etwa 33% Schweinegülle aus dem an den Betrieb angegliederten Schweinestall, sowie 32% Mist unterschiedlicher Herkunft. Unter anderem wird Rinderfestmist, Schweinefestmist, Hühnertrockenkot sowie Pferdemist eingesetzt. Bezogen auf die gesamte Einsatzmenge nimmt der Anteil an Pferdemist etwa 13% ein.

Die Einbringung der Substrate findet unaufbereitet über einen Abschiebecontainer mit abschließender Vertikalmischeinheit der Firma Höre mit nachgeschalteter Vertikalschnecke statt.

(vgl. Abbildung 47)

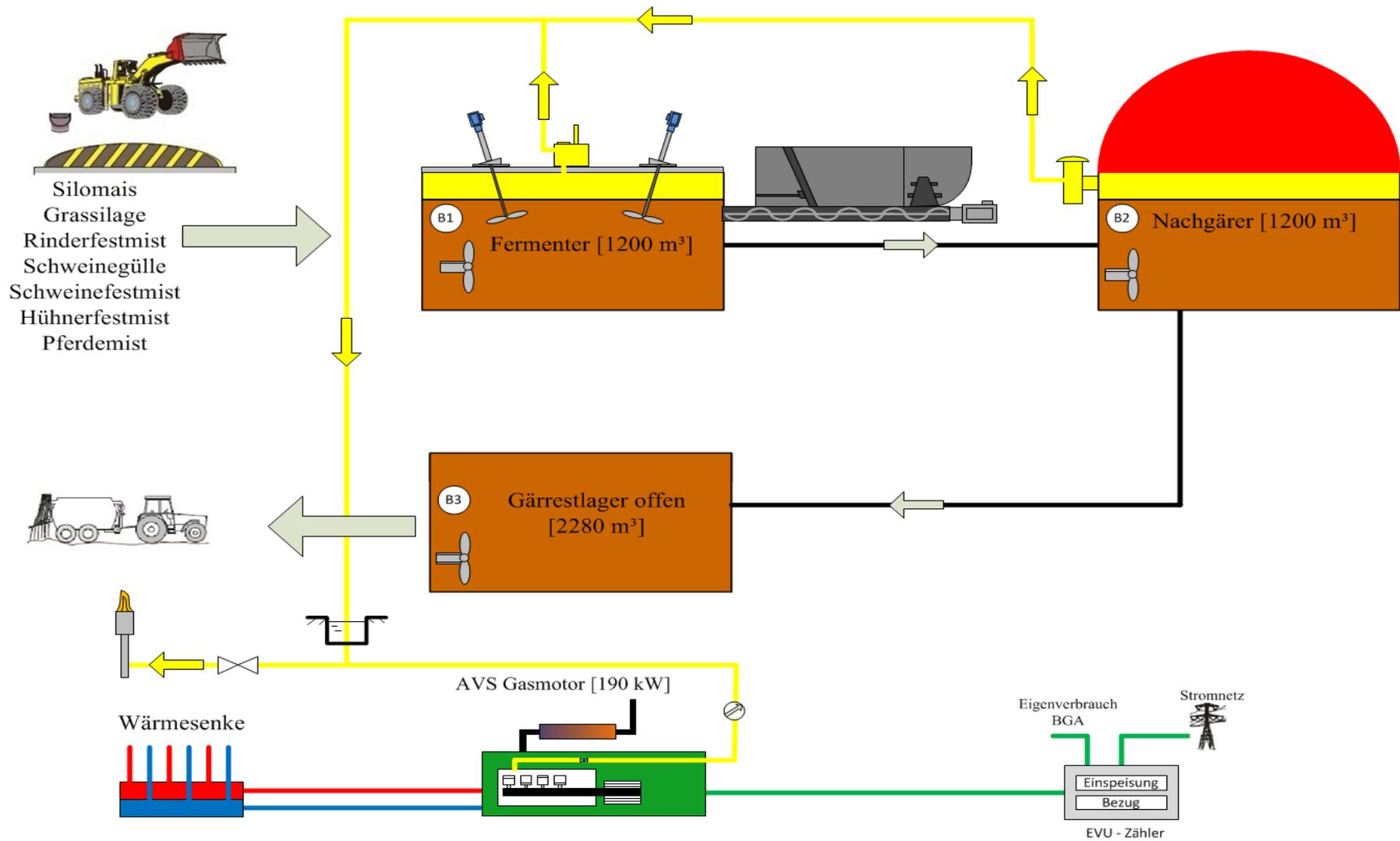


Abbildung 47: Systemfließbild BGA I (32% Mistanteil; ohne Aufbereitung)

### Wirtschaftlichkeitsberechnung

Die alternativ zu Silomais eingesetzte Gülle und Mist an BGA I führt zu einem Kostenvorteil der Substratversorgung von 51.202 €/a (vgl. Tabelle 52). Schweinegülle sowie Schweinemist sind auf dem Betrieb vorhanden und führen zu einer Kostenersparnis von 9.187 €/a und 14.790 €/a. Rindermist und Hühnertrockenkot werden kostenlos zum Hof geliefert und führen zu einer Kostenersparnis von 2.713 €/a und 2.942 €/a. Den höchsten Anteil der eingesparten Substratkosten nimmt der Pferdemit ein. Dieser wird teilweise frei Hof geliefert und teilweise kostenlos durch den Anlagenbetreiber an den Pferdehöfen abgeholt. Bei den Kosten des Substrates frei Lager handelt es sich deshalb um eine Mischkalkulation der jeweiligen Lieferungen. Diese ergibt Kosten in Höhe von 1,17 €/t FM. Betrachtet man den Kostenvorteil bezogen auf eine Tonne Frischmasse, so stellt sich der Einsatz von Hühnertrockenkot am attraktivsten heraus. Die Kostenersparnis durch den Einsatz von Hühnertrockenkot liegt bei 29,42 €/t FM. Pferdemit liegt leicht darunter bei 25,68 €/t FM. Die Kosten des Pferdemit sind aufgrund einer fehlenden Aufbereitung relativ gering. Aufgrund der geringen Energiedichte liegt der Kostenvorteil von Schweinegülle lediglich bei 4,37 €/t FM.

Tabelle 52: Wirtschaftlichkeitsberechnung BGA I

BGA I						
Anlagenspezifische Daten						
Bemessungsleistung [kWel]:	184	Investitionskosten Gesamt [€]:	1.200.000			
installierte Leistung [kWel]:	190	produzierte Strommenge [kWh]:	1.614.809			
Raubelastung Fermenter [kg oTS/m <sup>3</sup> *d]:	2,96	Stromeinnahmen [€]:	342.824			
hydraulische Verweilzeit im Fermenter [d]:	69	durchschn. Strompreis [Cent/kWh]:	21,23			
elektrischer Wirkungsgrad [%]:	38,30	Eigenstrombedarf [%]	9,90			
theoretischer Stromerlös aus Substrat						
Substratart	FM [t/a]	oTS [% an FM]	oTS [t/a]	spez. Methanertrag [Nm <sup>3</sup> / t oTS]	theor. Stromertrag [kWh]	theor. Stromerlös [€/t FM]
Silomais	2.010	31,35	630,14	338,00	799.420	84,44
Grassilage	166	31,50	52,29	318,00	62.412	79,82
Schweinegülle	2.100	4,80	100,80	252,00	95.342	9,64
Schweinemist	950	19,09	181,36	240,00	163.367	36,51
Rindermist	150	21,25	31,88	248,00	29.671	41,99
Hühnertrockenkot	100	30,00	30,00	275,00	30.966	65,74
Pferdemist unaufb.	840	32,48	272,83	236,00	241.675	61,08
Kosten Aufbereitung Pferdemist						
entfällt						
Substratbezogene Kosten frei Eintrag						
Substratart	Kosten Substrat frei Silo [€/t FM]	Kosten Aufbereitung [€/t FM]	Kosten für Beschickung [€/t FM]	Kosten Gesamt [€/t FM]	Maisäquivalent [t FM Mais/ t FM Substrat]	Kosten Maisäquivalent [€/t FM]
Silomais	38,00	0,00	0,76	38,76	1,00	38,76
Grassilage	22,50	0,00	1,00	23,50	1,06	24,86
Schweinegülle	0,00	0,00	0,05	0,05	8,76	0,44
Schweinemist	0,00	0,00	1,19	1,19	2,31	2,75
Rindermist	0,00	0,00	1,19	1,19	2,01	2,39
Hühnertrockenkot	0,00	0,00	0,76	0,76	1,28	0,98
Pferdemist Unaufbereitet	1,17	0,00	1,19	2,36	1,38	3,26
Kostenvorteil durch Einsatz von Gülle und Mist						
				€/t FM	€/a	
Schweinegülle				4,37	9.187	
Schweinemist				15,57	14.790	
Rindermist				18,09	2.713	
Hühnertrockenkot				29,42	2.942	
Pferdemist				25,68	21.570	
Gesamt					51.202	

## BGA II

Bei BGA II handelt es sich um eine Anlage, die 2011 in Betrieb gegangen ist. Diese besteht aus einem Fermenter (B1) und einem Nachgärer (B2) mit je 1.527 m<sup>3</sup> Volumen, sowie aus einem offenen Gärrestlager (B3) mit einem Lagerraum von 2.734 m<sup>3</sup>. Zum Rühren des Fermenters werden zwei Stabrührwerke der Firma Rema mit einer Antriebsleistung von je 15 kW, sowie ein Tauchmotorrührwerk mit einer Leistung von 15,5 kW verwendet. Die Rührzeit dieser Rührwerke beträgt je Rührwerk etwa 8 h pro Tag. Der Nachgärer (B2) mit Tragluftdach wird mithilfe zweier Tauchmotorrührwerke mit einer Leistung von je 15,5 kW gerührt. Die Rührzeit der Tauchmotorrührwerke des Nachgärers beträgt etwa 4 h pro Tag und Rührwerk. Das Gärrestlager wird mittels zwei Tauchmotorrührwerken nach Bedarf gerührt.

Als Vorratsbehälter für die Fütterung des Fermenters (B1) dient ein Abschieber mit einer angegliederten Vertikalmischeinheit. Im Anschluss wird in einer Mischschnecke ein pumpfähiges Gemisch aus Futter und Gärsubstrat angemaischt. Dieses wird im nachgeschalteten Mazerator zerkleinert und in den Fermenter gepumpt. Durch die Zerkleinerung des Substrates können vermehrt Pferde- und Rindermist zur Vergärung eingesetzt werden. Der Fermenter wird mit einer Raumbelastung von 4,02 kg oTS/ m<sup>3</sup>\*d betrieben. Die Verweilzeit in Fermenter und Nachgärer beträgt je 54 Tage.

Das produzierte Biogas wird direkt vor Ort in einem Gasmotor der Firma Senergie mit einer elektrischen Leistung von 300 kW in Strom und Wärme umgewandelt.

Die Substratversorgung besteht zu 31% aus Pferdemist und zu 9% aus Rindermist. Außerdem werden 21% Silomais, 36% Rindergülle, 3% Grassilage und etwa 1% Lieschkolbenschrot eingesetzt.

Die Anlieferung des Pferdemistes wird durch den Anlagenbetreiber übernommen. Der Transport findet überwiegend mittels Hakenliftcontainer statt (vgl. Abbildung 48).

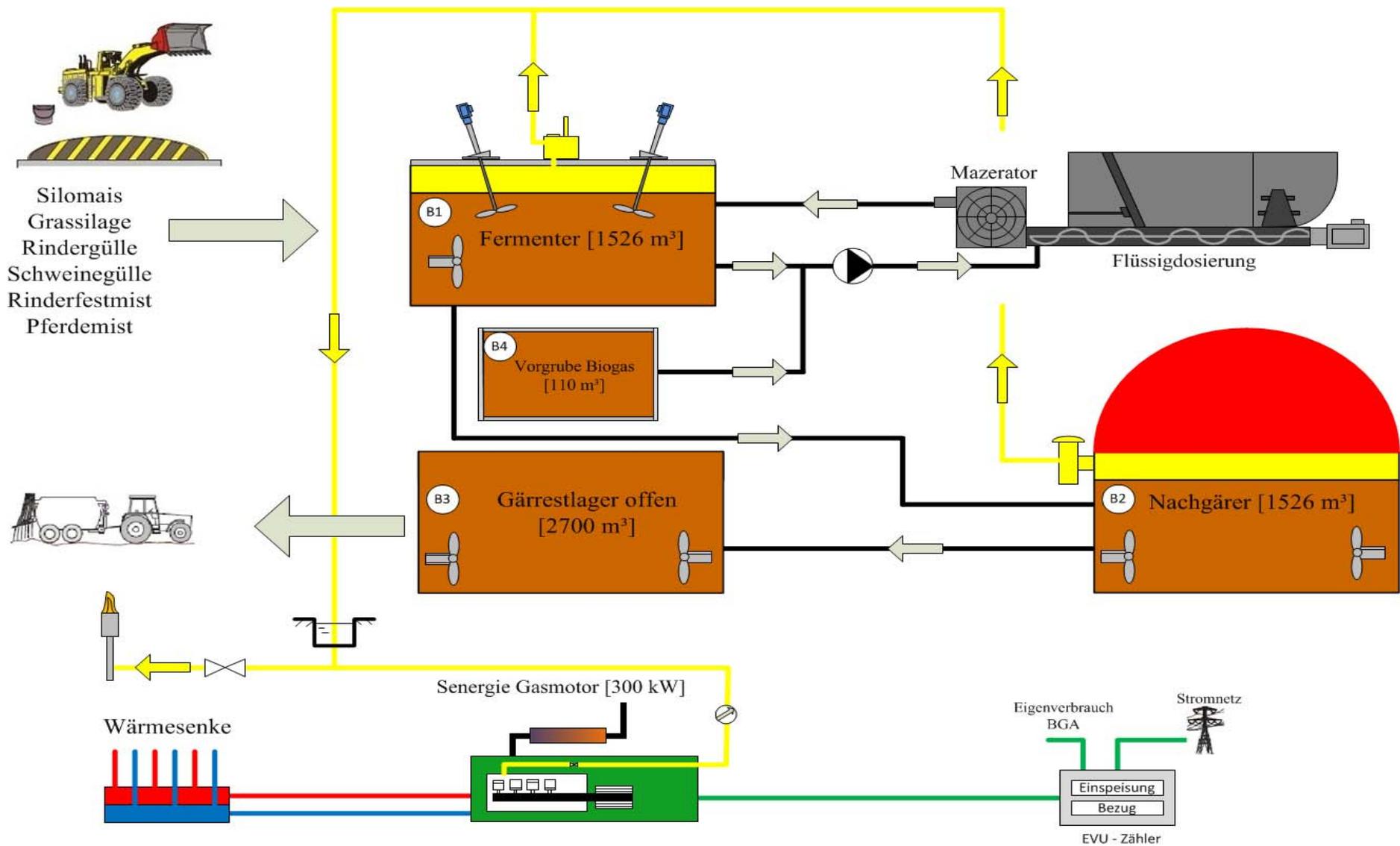


Abbildung 48: Systemfließbild BGA II (40% Mistanteil; Aufbereitung durch Mazerator)

### Wirtschaftlichkeitsberechnung

An BGA II kommt ein Mazerator zur Aufbereitung des eingesetzten Pferde- und Rindermistes zum Einsatz. Die Aufbereitungskosten des Mazerators belaufen sich bei einer Durchsatzmenge von 3.132 t Pferdemists, sowie 912 t Rindermist auf etwa 32.461 €/ a. Dies entspricht 8,03 €/ t FM, die zur Aufbereitung des Mistes anfallen. Die Beschaffungskosten der übrigen Silagen liegen frei Silo für Silomais bei 37 €/ t FM, bei Grassilage bei 34 €/ t FM, für Getreide-GPS bei 36 €/ t FM und für LKS bei 90 €/ t FM. Die Beschaffungskosten von Rindermist und Pferdemist liegen frei Silo bei 6,20 €/ t FM. Diese spiegeln die Transportkosten, die durch den Anlagenbetreiber übernommen werden wieder. Das berechnete Maisäquivalent für Rindermist liegt bei 2,01, das von aufbereitetem Pferdemist bei 1,27. Nach Umrechnung mittels Maisäquivalent ergeben sich so äquivalente Kosten frei Vorratsbehälter von 31 €/ t FM für Rindermist und von 19,57 €/ t FM für Pferdemist. Dagegen stehen Kosten für Silomais in Höhe von 37,76 €/ t FM frei Vorratsbehälter. Bezogen auf das ganze Jahr ergeben sich Einsparungen durch den alternativen Einsatz von Rindergülle, Rindermist und Pferdemist von 51.979 €. Durch den Einsatz von Pferdemist können Substratkosten in Höhe von 44.878 €/ a eingespart werden. Die Einsparung durch den Einsatz von Rindergülle liegt bei 4.034 €/ a, die von Rindermist bei 3.067 €/ a (vgl. Tabelle 53).

Tabelle 53: Wirtschaftlichkeitsberechnung BGA II

<b>BGA II</b>						
<b>Anlagenspezifische Daten</b>						
Bemessungsleistung [kW <sub>el</sub> ]:	250		Investitionskosten Gesamt [€]:	1.900.000		
installierte Leistung [kW <sub>el</sub> ]:	300		produzierte Strommenge [kWh]:	2.186.993		
Raumbelastung Fermenter [kg oTS/m <sup>3</sup> *d]:	4,16		Stromeinnahmen [€]:	415.528		
hydraulische Verweilzeit im Fermenter [d]:	54		durchschn. Strompreis [Cent/kWh]:	19,00		
elektrischer Wirkungsgrad [%]:	38,70		Eigenstrombedarf [%]	8,35		
<b>theoretischer Stromerlös aus Substrat</b>						
Substratart	FM [t/a]	oTS [% an FM]	oTS [t/a]	spez. Methanertrag [Nm <sup>3</sup> / t oTS]	theor. Stromertrag [kWh]	theor. Stromerlös [€/t FM]
Silomais	2.119	31,35	664,31	338,00	851.574	76,36
Grassilage	300	31,50	94,50	318,00	113.971	72,18
Getreide-GPS	16	31,35	5,02	329,00	6.259	74,32
Getreidekörner	4	84,39	3,38	380,00	4.865	231,08
LKS	111	43,65	48,45	342,00	62.845	107,57
Rindergülle	3.640	8,00	291,20	209,00	230.821	12,05
Rinderfestmist	912	21,25	193,80	248,00	182.281	37,98
Pferdemist aufb.	3.132	32,48	1017,27	257,00	991.535	60,15
<b>Kosten Aufbereitung Pferdemist</b>						
					[€/a]	[€/t FM]
Variable Kosten	Betriebskosten Antrieb (Energiekosten)				4.610	1,14
	Reparatur, Wartungs- und Verschleißkosten				4.448	1,10
	Personalkosten				202	0,05
Fixe Kosten	Abschreibung (5 Jahre)				20.000	4,95
	Zinskosten (5%)				2.500	0,62
	Versicherung (0,7%)				700	0,17
Gesamtkosten					32.461	8,03
<b>Substratbezogene Kosten frei Eintrag</b>						
Substratart	Kosten Substrat frei Silo [€/t FM]	Kosten Aufbereitung [€/t FM]	Kosten für Beschickung [€/t FM]	Kosten Gesamt [€/t FM]	Maisäquivalent [t FM Mais/ t FM Substrat]	Kosten Maisäquivalent [€/t FM]
Silomais	37,00	0,00	0,76	37,76	1,00	37,76
Grassilage	34,00	0,00	1,00	35,00	1,06	37,02
Getreide-GPS	36,00	0,00	0,76	36,76	1,03	37,77
Getreidekörner	110,00	0,00	0,51	110,51	0,33	36,52
LKS	90,00	0,00	0,51	90,51	0,71	64,25
Rindergülle	4,80	0,00	0,05	4,85	6,34	30,74
Rinderfestmist	6,20	8,03	1,19	15,42	2,01	31,00
Pferdemist aufb.	6,20	8,03	1,19	15,42	1,27	19,57
<b>Kostenersparnis durch Alternativeinsatz von Gülle und Mist</b>						
				€/t FM	€/a	
Rindergülle				1,11	4.034	
Rinderfestmist				3,36	3.067	
Pferdemist aufbereitet				14,33	44.878	
Gesamt					51.979	

### BGA III

Bei BGA III handelt es sich um eine Anlage, die im September 2007 in Betrieb gegangen ist. Die Anlage wurde von der Firma Novatech GmbH geplant und gebaut. Sie besteht aus einem Fermenter (B1) mit 1200 m<sup>3</sup>, einem Nachgärer (B2) mit 1200 m<sup>3</sup> und zwei offenen Gärrestlagern mit 1200 m<sup>3</sup> (B3) und 1800 m<sup>3</sup> (B4). Der Fermenter wird mittels eines Stabrührwerks, sowie mit einem Tauchmotorrührwerk gerührt. Die Rührzeiten betragen jeweils 8 Stunden pro Tag. Der Nachgärer ist lediglich mit einem Tauchmotorrührwerk ausgestattet. Die Gärrestlager werden je nach Bedarf mit einem externen Rührwerk gerührt. Zusätzlich kann der Gärrest je nach Bedarf separiert werden. Das produzierte Gas wird mit zwei MTU-Gasmotoren mit einer elektrischen Leistung von je 185 kW verwertet.

Hauptbestandteil der Substratversorgung stellt Mist dar. Dieser setzt sich zu ca. 8% aus Pferdemit und 26% aus Rindermist zusammen. Der Mist wird täglich je nach Anfall angeliefert und im Silo zwischen gelagert. Der Transport wird vom Anlagenbetreiber durchgeführt. Sonstige Substrate sind etwa 22% Silomais, 17% Grassilage, 15% Getreide-GPS, 5% Grünroggen, je 1% Sorghum und Getreide und ca. 6% Zuckerrüben.

Aufgrund des sehr hohen Anteils an Pferdemit kommt ein Querstromzerspanner zur Anwendung. Dieser ist zwei Vertikalmischern mit anschließender Querförderschnecke nachgeschaltet. Der Querstromzerspanner wird im Batchbetrieb betrieben. Das aufbereitete Substrat wird anschließend über eine „BioMix-Pumpe“ der Firma Pumpenfabrik Wangen in den Fermenter gepumpt.

Der Fermenter wird mit einer Raumbelastung von 4,94 kg oTS/ m<sup>3</sup>\*d und einer hydraulischen Verweilzeit von 57 Tagen betrieben (vgl. Abbildung 49).

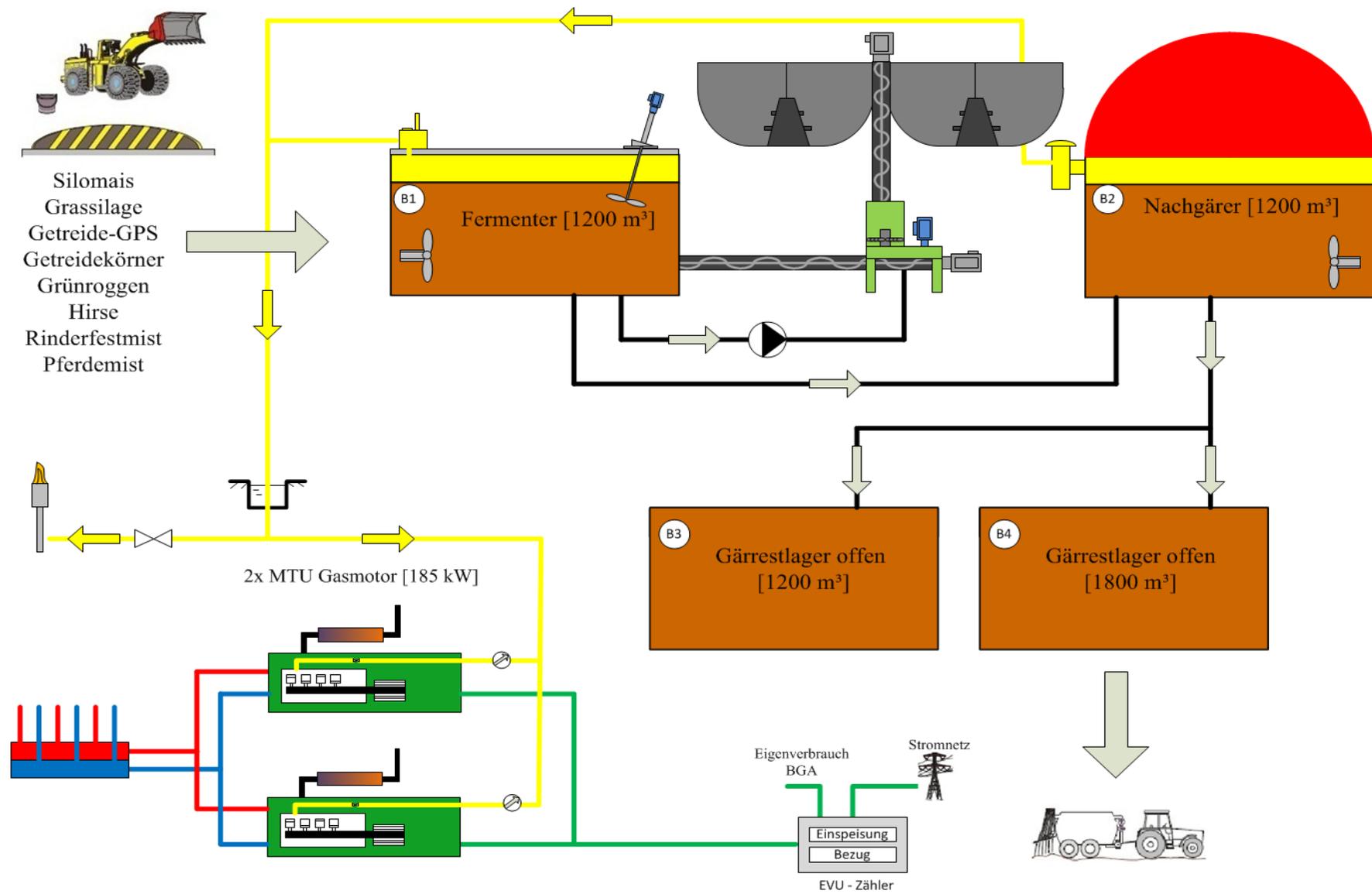


Abbildung 49: Systemfließbild BGA III (33% Mistanteil; Aufbereitung durch Querstromzerspanner)

### Wirtschaftlichkeitsberechnung

An BGA III kommt ein Querstromzerspanner zur Aufbereitung von Pferde- und Rindermist zum Einsatz. Aufbereitet werden pro Jahr 2.015 t Rindermist, sowie 558 t Pferdemist. Die Investitionskosten des Querstromzerspanners belaufen sich auf etwa 105.000 €. Aufgrund der moderaten Durchsatzmenge von 2.573 t FM/a ergeben sich hohe Fixkosten pro Tonne Frischmasse. Die Gesamtkosten der Aufbereitung belaufen sich auf 12,15 €/t FM.

Die Beschaffungskosten der Substrate liegen frei Silo für Silomais bei 40 €/ t FM, für Grassilage bei 30 €/t FM, für Getreide-GPS bei 35 €/t FM, für Zuckerrübe bei 35 €/t FM, für Rinderfestmist bei 20 €/t FM und für Pferdemist bei 10 €/t FM. Diese Kosten enthalten sowohl Beschaffungskosten, als auch die Transportkosten zur Biogasanlage.

Frei Vorratsbehälter ergeben sich so Gesamtkosten für Silomais von 40,76 €/ t FM. Die äquivalenten Kosten von Rinderfestmist belaufen sich auf 67,04 €/ t FM, die von Pferdemist auf 29,63 €/ t FM. Durch die hohen Aufbereitungskosten und im speziellen die sehr hohen Beschaffungskosten für Rinder- und Pferdemist, ergeben sich im Falle des Rindermist negative Kosteneinsparungen. Durch den Einsatz von Rindermist werden demnach keine Kosten eingespart. Der Einsatz des Rindermists führt im Vergleich zu Silomais zu höheren Kosten von 26.333 €/ a. Durch den Alternativeinsatz von Pferdemist können Kosten in Höhe von 4.893 €/ a eingespart werden. Zusammenfassend entstehen durch den Alternativeinsatz der angegebenen Substrate höhere Kosten von 21.439 €/ a im Vergleich zu einer Substratbeschaffung mit Silomais (vgl. Tabelle 54).

Tabelle 54: Wirtschaftlichkeitsberechnung BGA III

BGA III						
Anlagenspezifische Daten						
Bemessungsleistung [kW <sub>el</sub> ]:	263	Investitionskosten Gesamt [€]:	1.330.000			
installierte Leistung [kW <sub>el</sub> ]:	370	produzierte Strommenge [kWh]:	2.312.566			
Raumbelastung Fermenter [kg oTS/m <sup>3</sup> *d]:	4,92	Stromeinnahmen [€]:	501.112			
hydraulische Verweilzeit im Fermenter [d]:	57	durchschn. Strompreis [Cent/kWh]:	21,67			
elektrischer Wirkungsgrad [%]:	38,00	Eigenstrombedarf [%]	13,20			
theoretischer Stromerlös aus Substrat						
Substratart	FM [t/a]	oTS [% an FM]	oTS [t/a]	spez. Methanertrag [Nm <sup>3</sup> / t oTS]	theor. Stromertrag [kWh]	theor. Stromerlös [€/t FM]
Silomais	1.730	31,35	542,36	338,00	682.669	85,51
Grassilage	1.289	31,50	406,04	318,00	480.840	80,83
Getreide- GPS	1.160	31,35	363,66	329,00	445.555	83,23
Grünroggen	400	22,50	90,00	318,00	106.581	57,74
Sorghum	40	25,20	10,08	317,00	11.900	64,46
Getreidekörner	59	84,39	49,79	380,00	70.459	258,78
Zuckerrübe	443	20,70	91,70	364,00	124.304	60,80
Rinderfestmist	2.015	21,25	428,19	248,00	395.453	42,53
Pferdemist aufb.	558	32,48	181,24	257,00	173.457	67,36
Kosten Aufbereitung Pferdemist und Rindermist						
					[€/a]	[€/t FM]
Variable Kosten	Betriebskosten Antrieb (Energiekosten)				5.661	2,20
	Reparatur, Wartungs- und Verschleißkosten				1.287	0,50
	Personalkosten				inkl.	inkl.
Fixe Kosten	Abschreibung				20.960	8,15
	Zinskosten				2.620	1,02
	Versicherung				734	0,29
Gesamtkosten					31.261	12,15
Substratbezogene Kosten frei Eintrag						
Substratart	Kosten Substrat frei Silo [€/t FM]	Kosten Aufbereitung [€/t FM]	Kosten für Beschickung [€/t FM]	Kosten Gesamt [€/t FM]	Maisäquivalent [t FM Mais/ t FM Substrat]	Kosten Maisäquivalent [€/t FM]
Silomais	40,00	0,00	0,76	40,76	1,00	40,76
Grassilage	30,00	0,00	1,00	31,00	1,06	32,79
Getreide- GPS	35,00	0,00	0,76	35,76	1,03	36,74
Grünroggen	35,00	0,00	0,76	35,76	1,48	52,96
Sorghum	40,00	0,00	0,76	40,76	1,33	54,07
Getreidekörner	200,00	0,00	0,51	200,51	0,33	66,25
Zuckerrübe	35,00	0,00	1,19	36,19	1,41	50,89
Rinderfestmist	20,00	12,15	1,19	33,34	2,01	67,04
Pferdemist aufb.	10,00	12,15	1,19	23,34	1,27	29,63
Kostenvorteil durch Alternativeinsatz von Gülle und Mist						
				€/ t FM	€/a	
Rinderfestmist				-13,07	-26.333	
Pferdemist				8,77	4.893	
Gesamt					-21.439	

## BGA IV

Bei BGA IV handelt es sich um eine Anlage, die im Dezember 2006 in Betrieb gegangen ist und durch die Firma Seiler GmbH geplant und gebaut wurde. Sie besteht aus zwei parallel beschickten Fermentern (B1, B2) mit je 1900 m<sup>3</sup> Volumen. Den Fermentern nachgeschaltet ist ein Nachgärer (B3) mit ebenfalls 1900 m<sup>3</sup>. Zur Lagerung des Gärrests ist ein offenes Gärrestlager (B4) mit 2500 m<sup>3</sup> Volumen vorhanden (vgl. Abbildung 50). Behälter eins bis drei sind mit einer integrierten Heizung, sowie mit je einem Paddelrührwerk und einem Propellerrührwerk ausgestattet. Die Antriebsleistung der Rührwerke beträgt je 17 kW. Die Rührzeiten liegen bei B1 und B2 bei 12 h/ d für das Paddelrührwerk und bei 4 h/ d für das Propellerrührwerk. Bei B3 werden beide Rührwerke etwa 6 h/ d betrieben. Das Gärrestlager verfügt über zwei Tauchmotorrührwerke, die je nach Bedarf zugeschaltet werden. Das produzierte Gas wird mit einem BHKW der Firma Jenbacher mit einer elektrischen Leistung von 550 kW verwertet. Die produzierte Wärme wird über ein Nahwärmenetz verkauft. Ein wesentlicher Bestandteil der Substratversorgung ist der Pferdemist. Der Anteil des Pferdemistes lag 2012 bei etwa 33% und wurde im Jahre 2013 auf 36% erhöht. Ansonsten wird noch Silomais mit einem Anteil von etwa 60%, GPS mit einem Anteil von knapp 6% und Körnergetreide mit etwa einem Prozent eingesetzt.

Aufgrund der sehr hohen Pferdezahl in der Region erfolgt die Anlieferung des Pferdemists frei Hof durch den Halter der Pferde kostenlos. Der Pferdemist wird in einer speziell dafür gebauten Box gelagert. Nach Anlieferung wird dieser festgefahren und mithilfe einer Beregnungsanlage mit Wasser übergossen. Nach Wassersättigung wird der Pferdemist ohne mechanische Aufbereitung in den dafür vorgesehenen Vorratsbehälter, mit integriertem Vertikalmischer, eingefüllt. Die Beschickung des Fermenters erfolgt direkt und automatisch über Vertikalschnecken. Zur Vermeidung von Ausfällen durch die Einbringtechnik ist diese zweifach in identischer Bauart vorhanden. Beide Fermenter können demnach eigenständig mit Substrat beschickt werden. Zur Anpassung an das Substrat Pferdemist, wurde der Abstand zwischen Vertikalmischeinheit und Schneckenaustrag vergrößert, um Verstopfungen zu vermeiden.

Die beiden Fermenter werden mit einer Raumbelastung von 2,67 kg oTS/ m<sup>3</sup>\*d und einer Verweilzeit von etwa 122 Tagen betrieben. Der TS-Gehalt der beiden Fermenter lag bei 9,5% mit einer Gesamtsäurekonzentrationen unter 100 mg/kg. Zur Homogenisierung der Behälter wird zusätzlich zu den Rührwerken täglich ein unbekanntes Öl in Konzentrationen von ca. 40 ml/ Fermenter zugeführt.

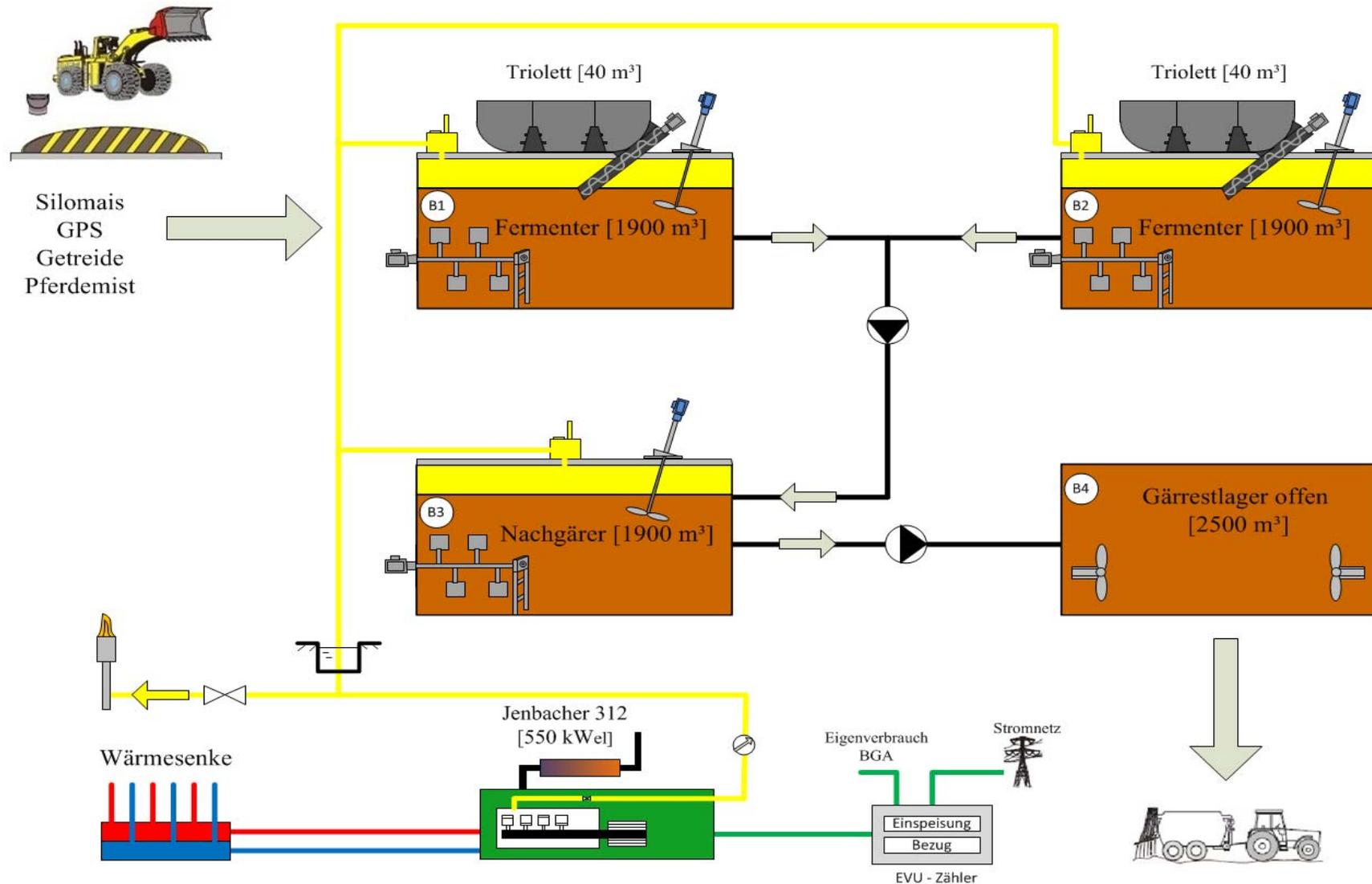


Abbildung 50: Systemfließbild BGA IV (33% Mistanteil; Aufbereitung durch Bewässerung)

### Wirtschaftlichkeitsberechnung

Der Anteil des Pferdemisteinsatzes an BGA IV liegt bei etwa 36%. Für die Anlieferung des Pferdemists fallen keine Kosten an. Die Kosten für Silomais frei Silo liegen bei 36 €/t FM, die von Getreide-GPS bei 40 €/t FM und die von Getreidekörnern bei 190 €/t FM. Die Kosten der Aufbereitung setzen sich aus den variablen Kosten und den fixen Kosten zusammen. Die Betriebskosten sind im Wesentlichen Stromkosten zur Wasserumwälzung. Zur Umwälzung werden etwa 2.190 kWh/ a benötigt. Bei einem Eigenstrompreis von 20 Cent/ kWh ergeben sich jährliche Kosten von 438 €. Bei Anlieferung wird der Pferdemist in der Lagerbox mit einem Radlader festgefahren. Dies nimmt etwa 2 h pro Woche in Anspruch. Bei Einsatzkosten des Radladers inkl. Fahrer von 28,97 €/ h ergeben sich so jährliche Kosten von 3.012,88 €. Die fixen Kosten bestehen aus den Abschreibungskosten, sowie den Zins- und Versicherungskosten der Pferdemistboxen. Bei Investitionskosten von 120.000 € und einer Nutzungsdauer von 20 Jahren ergibt sich so eine jährliche Abschreibung von 6.000 €. Die Zinskosten betragen 3.000 €, die Versicherungskosten 840 €. Bei einer jährlichen Einsatzmenge von 4.072 t Pferdemist ergeben sich so Kosten von 3,26 €/ t FM.

Der Kostenvorteil des Pferdemists liegt etwa bei 22,14 € pro Tonne Frischmasse. Daraus ergeben sich Kosteneinsparungen aufgrund des Pferdemisteinsatzes von 90.146 €/a (vgl. Tabelle 55).

Tabelle 55: Wirtschaftlichkeitsberechnung BGA IV

BGA IV						
Anlagenspezifische Daten						
Bemessungsleistung [kW <sub>el</sub> ]:	509	Investitionskosten Gesamt [€]:	2.250.000			
installierte Leistung [kW <sub>el</sub> ]:	550	produzierte Strommenge [kWh]:	4.458.027			
Raumbelastung Fermenter [kg oTS/m <sup>3</sup> *d]:	2,66	Stromeinnahmen [€]:	877.786			
hydraulische Verweilzeit im Fermenter [d]:	122	durchschn. Strompreis [Cent/kWh]:	19,69			
elektrischer Wirkungsgrad [%]:	40,50	Eigenstrombedarf [%]	5,99			
theoretischer Stromerlös aus Substrat						
Substratart	FM [t/a]	oTS [% an FM]	oTS [t/a]	spez. Methanertrag [Nm <sup>3</sup> / t oTS]	theor. Stromertrag [kWh]	theor. Stromerlös [€/t FM]
Silomais	6.488	31,35	2033,99	338,00	2.728.640	82,81
Getreide-GPS	605	31,35	189,67	329,00	247.668	80,60
Getreidekörner	184	84,39	155,28	380,00	234.193	250,61
Pferdemist unaufb.	4.072	32,48	1322,59	236,00	1.238.845	59,90
Kosten Bewässerung Pferdemist						
					[€/a]	[€/t FM]
Variable Kosten	Betriebskosten Antrieb (Energiekosten)				438	0,11
	Kosten zum Festfahren des PM				3.013	0,74
	Personalkosten				enthalten	enthalten
Fixe Kosten	Abschreibung				6.000	1,47
	Zinskosten				3.000	0,74
	Versicherung				840	0,21
Gesamtkosten					13.291	3,26
Substratbezogene Kosten frei Eintrag						
Substratart	Kosten Substrat frei Silo [€/t FM]	Kosten Aufbereitung [€/t FM]	Kosten für Beschickung [€/t FM]	Kosten Gesamt [€/t FM]	Maisäquivalent [t FM Mais/ t FM Substrat]	Kosten Maisäquivalent [€/t FM]
Silomais	36,00	0,00	0,76	36,76	1,00	36,76
Getreide GPS	40,00	0,00	0,76	40,76	1,03	41,88
Getreidekörner	190,00	0,00	0,51	190,51	0,33	62,95
Pferdemist unaufb.	0,00	3,26	1,19	4,45	1,38	6,16
Kostenvorteil durch Alternativeinsatz von Gülle und Mist						
					€/ t FM	€/a
Pferdemist					22,14	90.146
Gesamt						90.168

## BGA V

Bei BGA V handelt es sich um eine Anlage, die 2005 in Betrieb gegangen ist. Diese besteht aus je zwei Fermentern (B1 und B2) mit 800 m<sup>3</sup> und zwei Nachgärern (B3 und B4) mit 800 m<sup>3</sup> Fassungsvermögen. Zur Gärrestlagerung ist ein Gärrestlager (B5) mit einem Lagerraum von 4.200 m<sup>3</sup> vorhanden. Fermenter 1 (B1) wird mithilfe zweier Propellerrührwerke mit einer Leistung von je 30 kW etwa 3,5 h/ d gerührt. Fermenter 2 (B2) wird etwa 3,5 h/ d mit einem baugleichen Propellerrührwerk gerührt. Zur Homogenisierung des ersten Nachgärers (B3) ist ebenfalls ein Propellerrührwerk mit einer Leistung von 30 kW verbaut. Dieses rührt etwa 2,8 h /d. Im Nachgärer 2 (B4) ist ein Tauchmotorrührwerk mit einer Leistung von 15 kW verbaut. Die Laufzeit beträgt etwa 2,8 h/ d. Das Gärrestlager (B5) wird mit vier baugleichen Tauchmotorrührwerken mit einer Leistung von je 15 kW gerührt. Die Laufzeit der Rührwerke beträgt jeweils etwa 1,2 h/ d. Zur Lagerung des erzeugten Biogases befindet sich auf B4 sowie auf B5 ein Membranspeicherdach. Als Substrate werden etwa 22% Silomais, 44% Grassilage, 3% Rindermist, 24% Pferdemist sowie etwa 7% separierter Gärrest eingesetzt. Zum Zeitpunkt der Erfassung wurde der Anteil des Pferdemists, laut Aussage des Anlagenbetreibers, auf etwa 78% erhöht. Dieser hohe Anteil an Mist lässt sich nur durch eine sehr intensive Aufbereitung realisieren. Der Pferdemist wird durch externe Fuhrunternehmen angeliefert und in einem ersten Schritt verdichtet und luftdicht gelagert. Bevor das Substrat in den Vorratsbehälter gelangt, wird dieses mittels eines Schredders zerkleinert und mit Maissilage vermischt. Zusätzlich wird der Fermenterinhalt über einen Bypass ständig mithilfe einer Kugelmühle homogenisiert und weiter aufgeschlossen. Eine weitere Besonderheit ist das generelle Separieren des Gärrestes. Dieser wird anschließend zur Abdeckung der Silage verwendet und gelangt so mittels Fermentereintrag erneut in das System. Die beiden Fermenter werden mit einer Raumbelastung von 8,96 kg oTS/ m<sup>3</sup>\*d und einer Verweilzeit von lediglich 34 Tagen betrieben. Das produzierte Gas wird in drei BHKWs mit einer Leistung von insgesamt 864 kW verwertet (vgl. Abbildung 51).

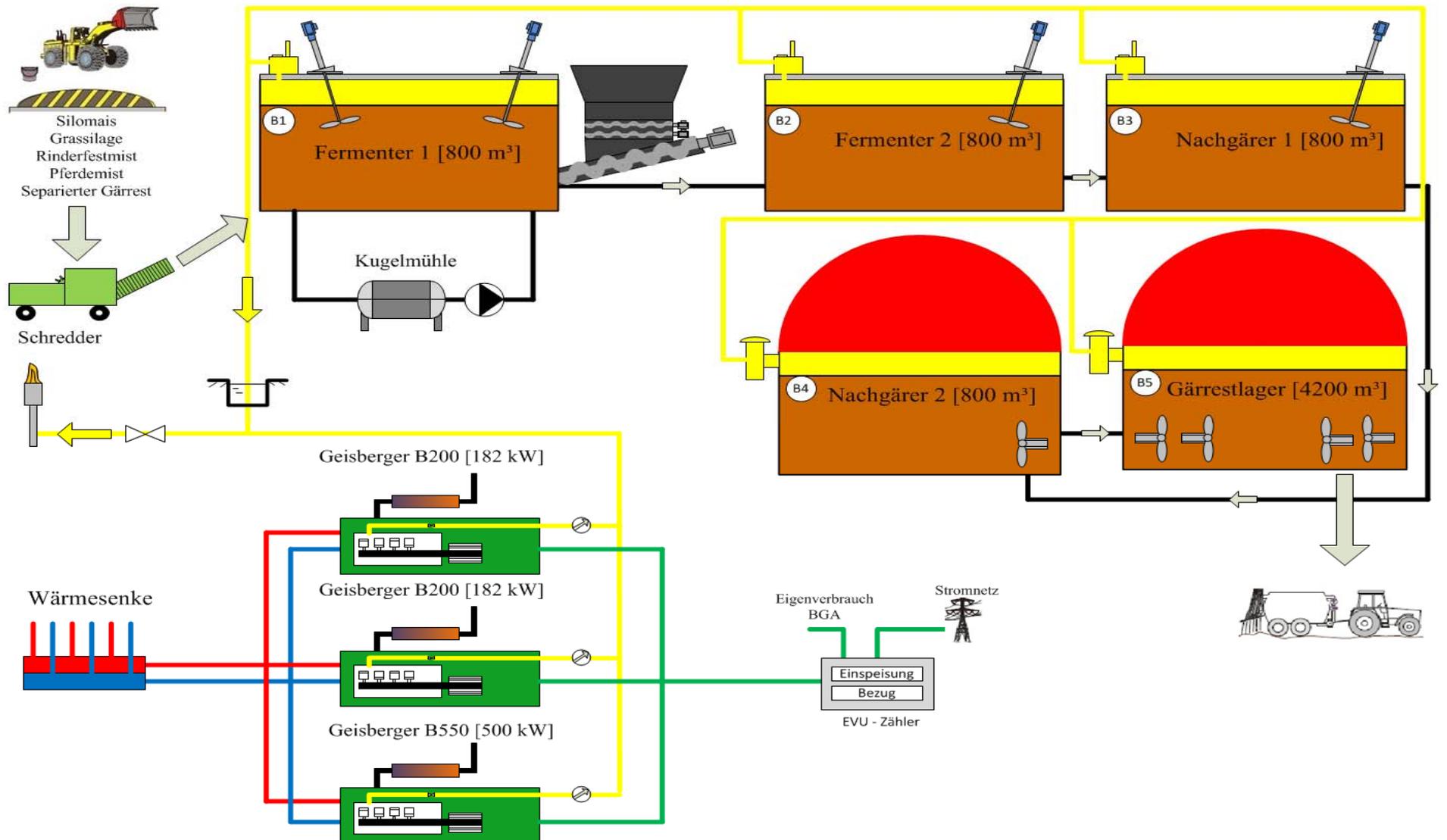


Abbildung 51: Systemfließbild BGA V (27% Mistanteil; Aufbereitung durch Schredder und Kugelmühle)

### Wirtschaftlichkeitsberechnung

Die Kosten der Substrate frei Eintrag liegen für Silomais bei 40,76 €/ t FM, für Graspilage bei 31 €/ t FM, für Rindermist und Pferdemist bei 35,02 €/ t FM und bei 0,76 €/ t FM für den separierten Gärrest.

Die Kosten des Pferdemists setzen sich aus Kosten der „Einsilierung“, Transportkosten sowie Aufbereitungskosten und Beschickungskosten zusammen. Auf Grundlage von KTBL Faustzahlen ergeben sich Kosten der „Silierung“ von etwa 1,95 €/ t FM.

Für die Anlieferung des Pferdemists ergeben sich für den Anlagenbetreiber 10 €/ t FM Transportkostenbeteiligung. Die Aufbereitung durch den Schredder ergibt Kosten in Höhe von 18,40 €/ t FM, die Kosten der Aufbereitung durch die Kugelmühle liegen bei 3,48 €/ t FM (vgl. Tabelle 56). Insgesamt ergeben sich so Kosten des Pferdemists frei Eintrag in Höhe von 35,02 €/ t FM (vgl. Tabelle 57).

*Tabelle 56: Aufbereitungskosten BGA V*

		Schredder		Kugelmühle		Gesamt	
		€/a	€/t FM	€/a	€/t FM	€/a	€/t FM
Variable Kosten	Betriebskosten Antrieb (Energiekosten)	9.612	2,10	1.098	0,24	10.710	2,34
	Reparatur, Wartungs- und Verschleißkosten	7.186	1,57	915	0,20	8.101	1,77
	Personalkosten	4.257	0,93	inkl.	inkl.	4.257	0,93
Fixe Kosten	Abschreibung	54.442	11,89	12.000	2,62	66.442	14,51
	Zinskosten	6.805	1,49	1.500	0,33	8.305	1,82
	Versicherung	1.905	0,42	420	0,09	2.325	0,51
Gesamtkosten		<b>84.207</b>	<b>18,40</b>	<b>15.933</b>	<b>3,48</b>	<b>100.140</b>	<b>21,88</b>

Insgesamt ergeben sich Aufbereitungskosten von 100.140 €/ a, was etwa 21,88 €/ t FM entspricht. Aufgrund der hohen Aufbereitungskosten ergeben sich so, durch den Einsatz von Mist, negative Kostenvorteile von insgesamt 18.508 €/ a. Demnach wäre der Einsatz von Silomais in diesem Fall kostengünstiger.

Die aktuelle Erhöhung des Einsatzes von Pferdemist auf 13.000 t pro Jahr (78%) führt zu jährlichen Aufbereitungskosten von 144.800 €/ a. Dies entspricht 10,78 €/ t

FM anstatt 21,88 €/ t FM. Die Kosten könnten demnach halbiert werden. Durch die Reduzierung der Aufbereitungskosten könnte so ein Kostenvorteil von 105.000 €/ a realisiert werden.

Tabelle 57: Wirtschaftlichkeitsberechnung BGA V

<b>BGA V</b>						
<b>Anlagenspezifische Daten</b>						
Bemessungsleistung [kW <sub>el</sub> ]:	700	Investitionskosten Gesamt [€]:	2.600.000			
installierte Leistung [kW <sub>el</sub> ]:	864	produzierte Strommenge [kWh]:	6.132.000			
Raumbelastung Fermenter [kg oTS/m <sup>3</sup> *d]:	8,96	Stromeinnahmen [€]:	1.149.137			
hydraulische Verweilzeit im Fermenter [d]:	34	durchschn. Strompreis [Cent/kWh]:	18,74			
elektrischer Wirkungsgrad [%]:	40,70	Eigenstrombedarf [%]	-			
<b>theoretischer Stromerlös aus Substrat</b>						
Substratart	FM [t/a]	oTS [% an FM]	oTS [t/a]	spez. Methanertrag [m <sup>3</sup> / t oTS]	theor. Stromertrag [kWh]	theor. Stromerlös [€/t FM]
Silomais	3723	31,35	1167,16	338,00	1.573.504	79,20
Grassilage	7446	31,50	2345,49	318,00	2.974.960	74,87
Rindermist	438	21,25	93,08	248,00	92.067	39,39
Pferdemist aufb.	4139	32,48	1344,35	257,00	1.378.050	62,39
separierter Gärrest	1241	23,75	294,74	0,00	0	0,00
<b>Kosten Aufbereitung Pferdemist (Schredder, Kugelmühle)</b>						
					[€/a]	[€/t FM]
Variable Kosten	Betriebskosten Antrieb (Energiekosten)				10.710	2,34
	Reparatur, Wartungs- und Verschleißkosten				8.101	1,77
	Personalkosten				4.257	0,93
Fixe Kosten	Abschreibung				66.442	14,51
	Zinskosten				8.305	1,82
	Versicherung				2.325	0,51
Gesamtkosten					100.140	21,88
<b>Substratbezogene Kosten frei Eintrag</b>						
Substratart	Kosten Substrat frei Silo [€/t FM]	Kosten Aufbereitung [€/t FM]	Kosten für Beschickung [€/t FM]	Kosten Gesamt [€/t FM]	Maisäquivalent [t FM Mais/ t FM Substrat]	Kosten Maisäquivalent [€/t FM]
Silomais	40,00	0	0,76	40,76	1,00	40,76
Grassilage	30,00	0	1	31,00	1,06	32,79
Rindermist	11,95	21,88	1,19	35,02	2,01	70,41
Pferdemist aufb.	11,95	21,88	1,19	35,02	1,27	44,46
separierter Gärrest	0,00	0,00	0,76	0,76	-	-
<b>Kostensparnis durch Einsatz von Gülle und Mist</b>						
				€/t FM	€/a	
Rindermist				-14,75	-6.460	
Pferdemist aufb.				-2,91	-12.048	
Gesamt					-18.508	

## Betriebe ohne Pferdemist als Substrat

### BGA VI

Bei BGA VI handelt es sich um eine an eine Milchviehhaltung angegliederte Biogasanlage mit einer elektrischen Leistung von 250 kW. Diese wurde von der Firma Agrikomp GmbH geplant und im Jahr 2010 in Betrieb genommen. Die Anlage besteht aus einem Fermenter (B1) mit 1260 m<sup>3</sup> Volumen, einem Nachgärer (B2) mit 1260 m<sup>3</sup> und einem offenen Gärrestlager mit 2800 m<sup>3</sup>. Zusätzlich ist eine Vorgrube (B4) für die Annahme von Gülle aus dem Milchviehstall vorhanden. Zwei weitere Gärrestlager (B6 und B7) befinden sich am Standort des Milchviehstalls. Der Fermenter (B1) ist mit einem Paddelrührwerk mit einer Antriebsleistung von 15 kW ausgestattet, mit welchem ca. 5,5 h/d gerührt wird. Der Fermenter wird mit einer Raumbelastung von 2,8 kg oTS/ m<sup>3</sup>\*d und einer Verweilzeit von ca. 70 Tagen betrieben. Der Nachgärer wird mittels eines Tauchmotorrührwerks mit einer Antriebsleistung von 15 kW etwa 1,7 h/d gerührt. Gärrestlager 1 (B3) ist mit zwei Tauchmotorrührwerken mit einer Antriebsleistung von je 15 kW ausgestattet, welche nach Bedarf eingesetzt werden (vgl. Abbildung 52).

Die Substratversorgung besteht im Wesentlichen zu 50% aus Rindergülle inkl. Rinderfestmist. Zusätzlich werden noch 34% Silomais, 13% Grassilage, 2% GPS und ca. 1% Getreide eingesetzt. Die Substrateinbringung der Feststoffe wird mittels eines Einbringtrichters mit Auflöseschnecke und nachgeschalteter Vertikalschnecke durchgeführt. Beschickt wird ausschließlich der Fermenter. Die Rindergülle wird mittels einer Kreiselpumpe aus der Vorgrube (B4) direkt in den Fermenter dosiert.

Zur Verwertung des produzierten Gases wird ein Zündstrahl-BHKW der Firma Schnell mit einer elektrischen Leistung von 250 kW verwendet. Die Wärme wird überwiegend in einer Holzhackschnitzeltrocknung verwertet.

Zum Zeitpunkt der Besichtigung wurde die Menge des eingesetzten Rindermists von 200 t/a auf 600 t/a erhöht. Inwiefern sich eine Erhöhung des Rindermisteinsatzes positiv auf Substratbeschaffungskosten auswirkt wird im folgenden Abschnitt dargelegt.

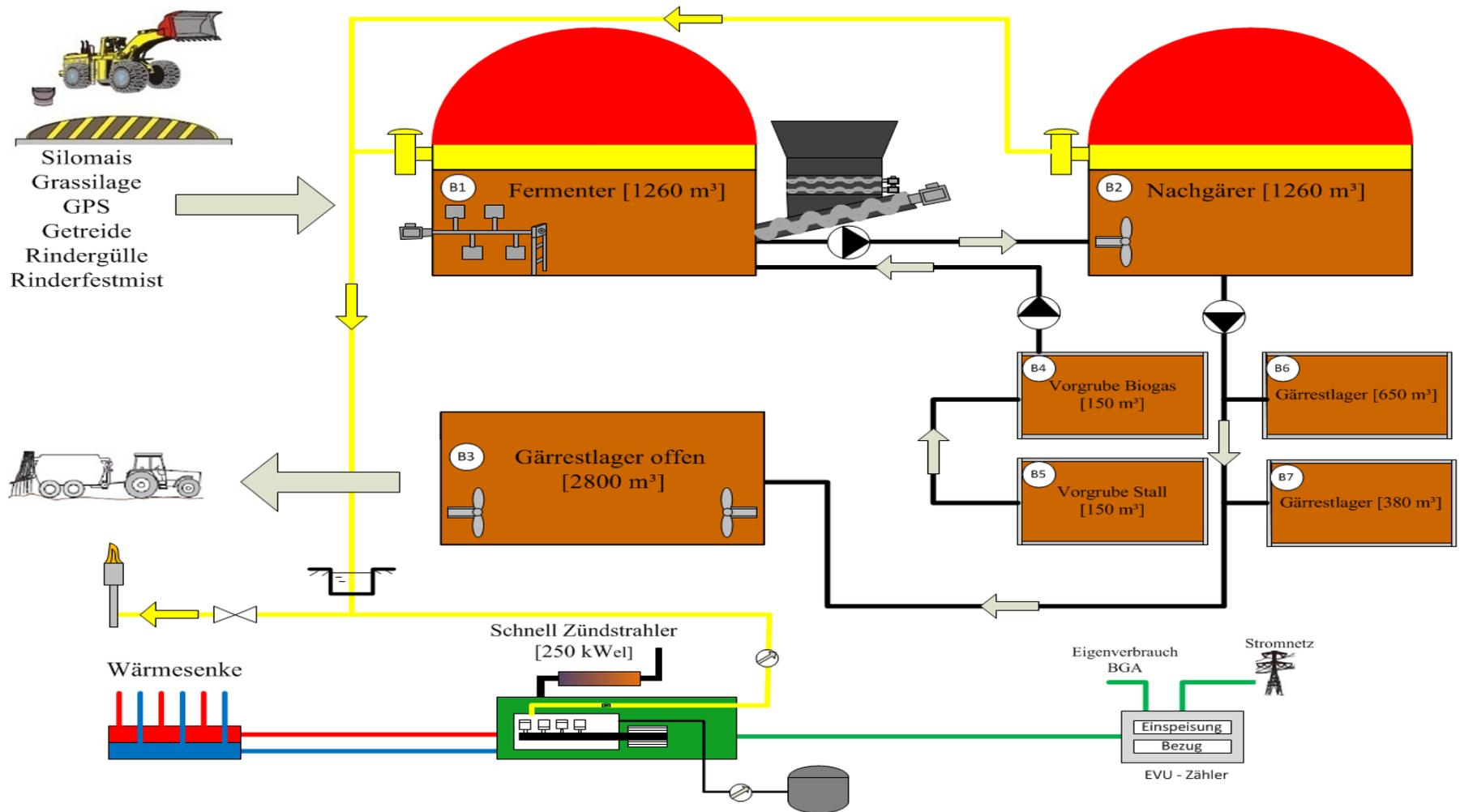


Abbildung 52: Systemfließbild BGA VI (3% Mistanteil; kein Pferdemist; keine Aufbereitung)

### Wirtschaftlichkeitsberechnung

Die Kosten frei Eintrag liegen für Silomais bei 35,14 €/ t FM, für Grassilage bei 31 €/ t FM, für Getreide-GPS bei 39,14 €/ t FM, für Rinderfestmist bei 5,98 €/ t FM und für Rindergülle bei 0,73 €/ t FM. Der Anteil der Rindergülle stammt zur Hälfte aus dem eigenen Betrieb und zur anderen Hälfte aus einem in der Nachbarschaft angesiedelten Milchviehbetrieb. Die Kosten der eigenen Rindergülle wurden mit 0,05 €/ t FM angesetzt, die des Partnerbetriebes mit 1,40 €/ t FM. Beide Beträge enthalten die Kosten der Beschickung. Die Kosten für den eingesetzten Rindermist liegen beim betriebseigenen Mist bei 1 €/ t FM und beim zugekauften bei 7,22 €/ t FM inklusive Beschickung.

Durch den Einsatz der Rindergülle anstatt Silomais können jährlich 2.357 € eingespart werden. Dies entspricht 11,50 €/ t FM. Bei dem Einsatz von Rindergülle ergeben sich Kostenersparnisse in Höhe von 15.061 €/ a. Dies entspricht 4,81 €/ t FM. Zusammen ergibt sich ein Kostenvorteil in Höhe von 17.417 €/a durch den Einsatz von Rindergülle und Rinderfestmist (vgl. Tabelle 58).

Zum Zeitpunkt der Datenerhebung wurde in Erwägung gezogen den Rindermistanteil von 200 t FM/ a auf 600 t FM/a zu erhöhen. Die Beschaffung des zusätzlichen Pferdemists wäre vergleichbar wie mit dem aktuellen Partnerbetrieb. Demnach würden Kosten in Höhe von 7,22 €/ t FM entstehen. Durch den zusätzlichen Einsatz von 400 t Rindermist könnten so etwa 200 t Silomais ersetzt werden. Bei einer Kostenersparnis von 10,26 €/ t FM Rindermist würde dies zu einer zusätzlichen Kostenersparnis von 4.103 €/ a führen. Demnach würde der Kostenvorteil durch den Einsatz von Mist und Gülle von 17.417 €/ a auf 21.520 €/ a steigen.

Tabelle 58: Wirtschaftlichkeitsberechnung BGA VI

BGA VI						
<b>Anlagenspezifische Daten</b>						
Bemessungsleistung [kW <sub>el</sub> ]:	244	Investitionskosten Gesamt [€]:	905.000			
installierte Leistung [kW <sub>el</sub> ]:	250	produzierte Strommenge [kWh]:	2.144.582			
Raumbelastung Fermenter [kg oTS/m <sup>3</sup> *d]:	2,96	Stromeinnahmen [€]:	431.412			
hydraulische Verweilzeit im Fermenter [d]:	69	durchschn. Strompreis [Cent/kWh]:	20,12			
elektrischer Wirkungsgrad [%]:	43,00	Eigenstrombedarf [%]	4,19			
<b>theoretischer Stromerlös aus Substrat</b>						
Substratart	FM [t/a]	oTS [% an FM]	oTS [t/a]	spez. Methanertrag [Nm <sup>3</sup> / t oTS]	theor. Stromertrag [kWh]	theor. Stromerlös [€/t FM]
Silomais	2.274	31,35	712,90	338,00	1.015.405	89,83
Grassilage	903	31,50	284,45	318,00	381.171	84,91
Getreide-GPS	112	31,35	35,11	329,00	48.679	87,43
Getreidekörner	46	84,39	38,82	380,00	62.162	271,84
Rinderfestmist	205	21,25	43,56	248,00	45.526	44,67
Rindergülle	3.128	8,00	250,24	209,00	220.393	14,17
Zündöl [l/a]	28.998	-	-	-	124.691	0,87
<b>Kosten Aufbereitung Pferdemist</b>						
entfällt						
<b>Substratbezogene Kosten frei Eintrag</b>						
Substratart	Kosten Substrat frei Silo [€/t FM]	Kosten Aufbereitung [€/t FM]	Kosten für Beschickung [€/t FM]*	Kosten Gesamt [€/t FM]	Maisäquivalent [t FM Mais/ t FM Substrat]	Kosten Maisäquivalent [€/t FM]
Silomais	34,38	0,00	0,76	35,14	1,00	35,14
Grassilage	30,00	0,00	1,00	31,00	1,06	32,79
Getreide-GPS	38,38	0,00	0,76	39,14	1,03	40,21
Getreidekörner	170,00	0,00	0,51	170,51	0,33	56,34
Rinderfestmist	5,98	0,00	inkl.	5,98	2,01	12,02
Rindergülle	0,73	0,00	inkl.	0,73	6,34	4,63
<b>Kostenvorteil durch Einsatz von Gülle und Mist</b>						
				€/t FM		€/a
Rinderfestmist				11,50		2.357
Rindergülle				4,81		15.061
Gesamt						17.417

## BGA VII

Bei BGA VII handelt es sich um eine Anlage, die 2004 in Betrieb gegangen ist. Diese wurde von der Firma Agrikomp GmbH geplant und realisiert. Sie besteht aus zwei Fermenter (B1 und B2) mit je 900 m<sup>3</sup> Volumen, einem Nachgärer (B3) mit 2500 m<sup>3</sup> und zwei offenen Gärrestlagern mit je 1200 m<sup>3</sup>. Fermenter 1 (B1) ist mit einem Paddelrührwerk mit einer Leistung von 20 kW, sowie einem Tauchmotorrührwerk der Firma KSB mit einer Antriebsleistung von 6,5 kW ausgerüstet. Die Rührzeit des Paddelrührwerks liegt bei 12 h/ d, die des Tauchmotorrührwerks bei 24 h/ d. Fermenter 2 (B2) wird mittels eines Paddelrührwerks etwa 8 h/ d gerührt. Es wird ausschließlich Fermenter 1 mit Substrat beschickt. Fermenter 2 wird durch starkes Rezirkulieren aus Fermenter 1 beschickt. Für Fermenter 1 ergibt sich so eine theoretische Raumbelastung von etwa 8,6 kg oTS/ m<sup>3</sup>\*d. Diese wird jedoch durch regelmäßiges Rezirkulieren annähernd gleichmäßig auf Fermenter 2 verteilt. Der Nachgärer (B3) ist ebenfalls mit einem Paddelrührwerk ausgestattet. Dieses wird etwa 4 h/ d betrieben. Die beiden nachgeschalteten offenen Gärrestlager werden mithilfe je eines Tauchmotorrührwerks nach Bedarf gerührt.

Ein Teil des Gases wird vor Ort an der Anlage durch zwei Zündstrahl-BHKWs der Firma Schnell mit je 200 kW elektrischer Leistung verwertet. Der Rest des Biogases wird über eine Mikrogasleitung zu einem Satelliten-BHKW mit einer elektrischen Leistung von 250 kW transportiert und dort verwertet. Dieses versorgt ein Pflegeheim mit Wärme.

Die Substratversorgung setzt sich zu etwa 30% aus Silomais zusammen. Desweiteren werden 25% Grassilage, 7% GPS, 6% LKS, 1% Getreide sowie etwa 32% Rindergülle eingesetzt. Die Rindergülle stammt aus dem an die Biogasanlage angegliederten Milchviehstall mit Nachzucht.

Zum Zeitpunkt der Besichtigung befand sich die Anlage bereits in der Direktvermarktung mit dem Marktprämienmodell. Außerdem wurde bereits Tag/ Nacht- Fahrplan mit den installierten BHKWs gefahren. Ein Einstieg in die Regelleistung wurde bereits durch installieren einer dafür vorgesehenen Regeleinheit vorbereitet (vgl. Abbildung 53).

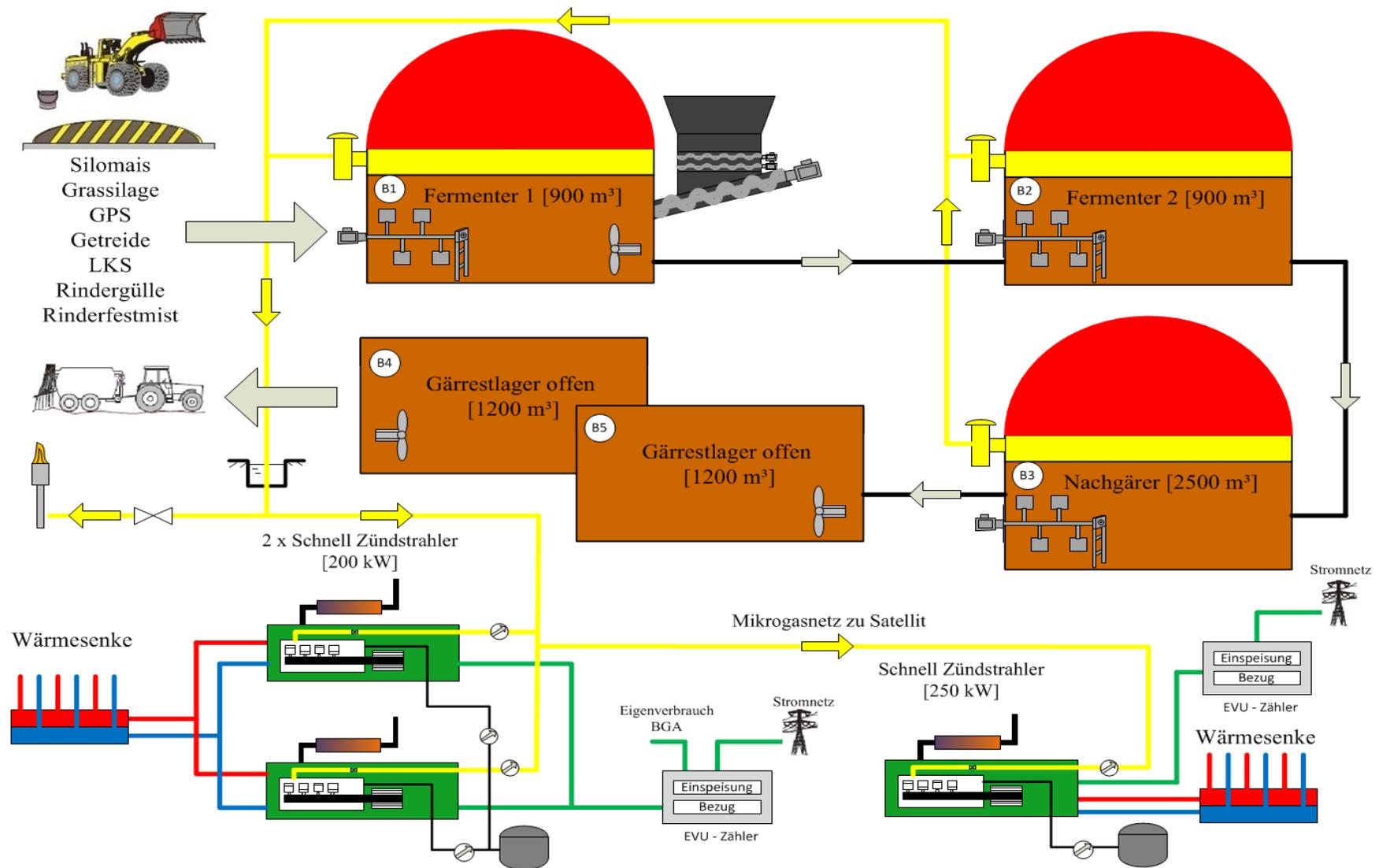


Abbildung 53: Systemfließbild BGA VII (Kein Mist; keine Aufbereitung)

### Wirtschaftlichkeitsberechnung

Die Kosten der Substratversorgung lagen für Silomais bei knapp über 58 €/ t FM frei Eintrag. Grassilage lag bei 53 €/ t FM, Getreide-GPS bei 65,56 €/ t FM, Getreidekörner bei 163,91 €/ t FM, Lieschkolbenschrot bei 91,65 €/ t FM und Rindergülle bei 0,05 €/ t FM frei Eintrag. Die Substrate werden komplett über eine Waage nach Trockenmasse abgerechnet. Der durchschnittliche Strompreis lag bei 18,64 Cent/kWh bei einer Bemessungsleistung von 500 kW. Die Kosten der Rindergülle beschränken sich auf die Kosten der Beschickung mittels Pumpe, da diese vor Ort kostenlos vom angegliederten Milchviehstall abgenommen werden kann. Es werden etwa 3.500 t Rindergülle an der Anlage verwertet. Dies entspricht einer produzierten Strommenge von 236.410 kWh. Durch den Einsatz der Rindergülle anstatt Silomais können pro Tonne Frischmasse 9,15 € eingespart werden. Im gesamten Jahr entspricht dies 32.196 €, die durch den alternativen Einsatz von Gülle eingespart werden können (vgl. Tabelle 59).

Tabelle 59: Wirtschaftlichkeitsberechnung BGA VII

BGA VII						
Anlagenspezifische Daten						
Bemessungsleistung [kW <sub>el</sub> ]:	500,36	Investitionskosten Gesamt [€]:	-			
installierte Leistung [kW <sub>el</sub> ]:	650	produzierte Strommenge [kWh]:	4.395.200			
Raumbelastung Fermenter [kg oTS/m <sup>3</sup> *d]:	4,31	Stromeinnahmen [€]:	819.367			
hydraulische Verweilzeit im Fermenter [d]:	58	durchschn. Strompreis [Cent/kWh]:	18,64			
elektrischer Wirkungsgrad [%]:	41,00	Eigenstrombedarf [%]	6,88			
theoretischer Stromerlös aus Substrat						
Substratart	FM [t/a]	oTS [% an FM]	oTS [t/a]	spez. Methanertrag [Nm <sup>3</sup> / t oTS]	theor. Stromertrag [kWh]	theor. Stromerlös [€/t FM]
Silomais	3.519	31,35	1103,21	338,00	1.498.247	79,37
Grassilage	2.711	31,50	853,97	318,00	1.091.132	75,03
Getreide - GPS	801	31,35	251,11	329,00	331.952	77,26
Getreidekörner	76	84,39	64,14	380,00	97.926	240,21
Lieschkolbenschrot	658	43,65	287,22	342,00	394.681	111,82
Rindergülle	3.519	8,00	281,52	209,00	236.410	12,52
Zündöl [l/a]	60.475	-	-	-	247.948	0,76
Kosten Aufbereitung Pferdemist						
entfällt						
Substratbezogene Kosten frei Eintrag						
Substratart	Kosten Substrat frei Silo [€/t FM]	Kosten Aufbereitung [€/t FM]	Kosten für Beschickung [€/t FM]	Kosten Gesamt [€/t FM]	Maisäquivalent [t FM Mais/ t FM Substrat]	Kosten Maisäquivalent [€/t FM]
Silomais	57,54	0,00	0,76	58,30	1,00	58,30
Grassilage	52,00	0,00	1,00	53,00	1,06	56,07
Getreide - GPS	64,80	0,00	0,76	65,56	1,03	67,35
Getreidekörner	163,40	0,00	0,51	163,91	0,33	54,16
Lieschkolbenschrot	91,14	0,00	0,51	91,65	0,71	65,05
Rindergülle	0,00	0,00	0,05	0,05	6,34	0,32
Kostenvorteil durch Einsatz von Gülle und Mist						
				€/ t FM	€/a	
Rindergülle				9,15	32.196	
Gesamt					32.205	

## Diskussion

### Vergleich Kostenersparnis der Anlagen

Insgesamt wurden sieben Biogasanlagen mit einer Größe von 184 - 700 kW<sub>el</sub> untersucht. Die eingesetzten Techniken zur Aufbereitung des Mists führten zu unterschiedlichen Ergebnissen der Wirtschaftlichkeit. Der höchste erzielte Kostenvorteil durch den Einsatz von Mist wurde durch BGA IV erzielt. Diese setzt etwa 4.000 t Pferdemist pro Jahr ein, was etwa 36% des Gesamtinputs entspricht. Durch den Einsatz von Pferdemist anstatt Silomais können so pro Jahr etwa 90.000 € eingespart werden. Ein Grund für die hohe Summe der Einsparung, ist die minimale Aufbereitung des Mists. An dieser Anlage wurde der Pferdemist lediglich bewässert und anschließend ohne mechanische Aufbereitung in den Fermenter eingebracht. Die Kosten der Bewässerung schlagen mit 3,26 € zu Buche. Auch BGA I und BGA II konnten hohe Einsparungen durch den alternativen Einsatz von Gülle und Mist erzielen. Der Kostenvorteil lag bei BGA I bei 51.202 €/ a und bei BGA II bei 51.979 €/ a. BGA I erzielt diese hohen Einsparungen ohne Investition in Aufbereitungstechnik. Jedoch sind mit einem Anteil von etwa 32% Mist deutliche Grenzen gesetzt. Um die Einsatzmenge von Mist erneut zu erhöhen, wäre auch an dieser Anlage der Einsatz einer mechanischen Aufbereitungstechnik nötig. BGA II verwendet einen Mazerator zur Aufbereitung des eingesetzten Mistes. Zum Zeitpunkt der Besichtigung lag der Anteil an Mist bei etwa 40%. Steigerungen sind durch die mechanische Aufbereitung jederzeit möglich. Am Beispiel von BGA III und BGA V kann erkannt werden, dass nicht jede Verwendung von Mist ökonomisch sinnvoll ist. So ergeben sich für BGA III Mehrkosten durch den Einsatz von Mist von 21.439 €/ a und für BGA V von 18.508 €/ a. Grund für die hohen Kosten des Mists sind die Kosten der mechanischen Aufbereitung. So liegt BGA III bei Aufbereitungskosten von 12,15 €/ t FM und BGA V durch den Einsatz von einer doppelten mechanischen Aufbereitung sogar bei 21,88 €/ t FM (vgl. Tabelle 60).

Aufgrund der hohen Raumbelastung von BGA V mit 8,96 kg oTS/ m<sup>3</sup>\*d ist jedoch der Einsatz einer Vorzerkleinerung des Pferdemist mit einem Schredder und eine zusätzliche Homogenisierung des Fermenters mittels Kugelmühle unbedingt erforderlich. Nicht plausibel ist das belassen des separierten Gärrests im System. Dieser

wird ständig wieder dem Prozess zugeführt. Die Zuführung des separierten Gärrest führt zu einer Verkürzung der Verweilzeit von ca. 9%, sowie zu einer Erhöhung der Raumbelastung von 6%. Wie in Abschnitt 4.1.5. erwähnt, wurde zum Zeitpunkt der Untersuchung die Menge an eingesetztem Pferdemist auf 78% erhöht. Durch den erhöhten Durchsatz an Pferdemist können die Kosten der Aufbereitung etwa halbiert werden, was anschließend zu einem deutlichen Kostenvorteil gegenüber des Silomaiseinsatzes führt.

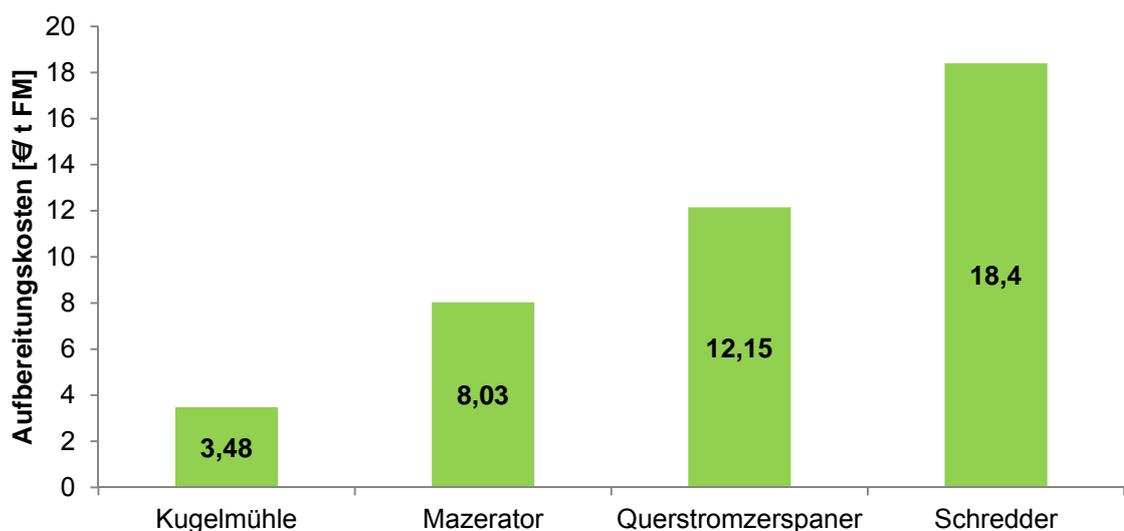
Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor ist die Höhe der Beschaffungskosten der restlichen Substrate. Wird Silomais mit hohen Preisen gehandelt, ergeben sich deutlich höhere Kostenvorteile durch den Einsatz von Mist als bei niedrigen Silomaispreisen. Hingegen wirken sich hohe Preise des zugeführten Mists negativ auf die Ersparnis aus.

Tabelle 60: Übersicht der jeweiligen Kostenersparnisse durch den Einsatz von Gülle und Mist anstatt Silomais

		BGA I		BGA II		BGA III		BGA IV		BGA V		BGA VI		BGA VII	
Anlagenbezogene Daten	Bemessungsleistung [kWe]l	184		250		263		509		700		244		500	
	Verweilzeit [d]	70		54		57		122		34		69		58	
	Raumbelastung [kg oTS/ m <sup>3</sup> *d]	2,81		4,16		4,92		2,66		8,96		2,96		4,31	
Anteile Wirtschaftsdünger	Anteil Mist Gesamt [%]	32		40		34		36		27		3		0	
	Anteil Pferdemit [%]	13		31		8		36		24		0		0	
	Anteil Gülle [%]	33		36		0		0		0		47		32	
Aufbereitungs-technik [€/t FM; €/a]	eingesetzte Technik	keine		Mazerator		Querstrom-zerspaner		Bewässerung		Schredder, Kugelmühle		keine		keine	
	Kosten Aufbereitung	-	-	8,03	32.461	12,15	31.261	3,26	13.291	21,88	100.140	-	-	-	-
Kostenvorteil [€/t FM; €/a]	Rindergülle	-	-	1,11	4.034	-	-	-	-	-	-	4,81	15.061	9,15	32.196
	Schweinegülle	4,37	9.187	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Rinderfestmist	18,09	2.713	3,36	3.067	-13,07	-26.333	-	-	-14,75	-6.460	11,50	2.357	-	-
	Schweinemist	15,57	14.790	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Hühnertrockenkot	29,42	2.942	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Pferdemist	25,68	21.570	14,33	44.878	8,77	4.893	22,14	90.168	-2,91	-12.048	-	-	-	-
	Gesamt [€/a]	<b>51.202</b>		<b>51.979</b>		<b>-21.439</b>		<b>90.168</b>		<b>-18.508</b>		<b>17.417</b>		<b>32.196</b>	

## **Einfluss der Aufbereitungstechnik auf die Wirtschaftlichkeit und die Verfahrenstechnik**

Ein wesentlicher Einflussfaktor auf die Wirtschaftlichkeit der Mistnutzung sind die Kosten der mechanischen Aufbereitung. Je niedriger die Kosten der Aufbereitung, desto höhere Ersparnisse können durch den Einsatz von Mist erzielt werden. Grundsätzlich ist jedoch nicht jede Aufbereitung an jeder Biogasanlage sinnvoll beziehungsweise realisierbar. Anhand der untersuchten Anlagen erwies sich die Kugelmühle mit einem Aufbereitungspreis von 3,48 €/ t FM bei einer Durchsatzmenge von 4.577 t FM/ a am günstigsten. Die teuerste Variante war der Schredder mit Aufbereitungskosten von 18,40 €/ t FM bei einer Mistmenge von ebenfalls 4.577 t FM/ a (vgl. Abbildung 54). Generell wurde die Kugelmühle jedoch lediglich zur Umwälzung des Fermenterinhalt verwendet. Der Einbringung war ein Schredder zur Zerkleinerung vorgeschaltet. Die anderen untersuchten Aufbereitungstechniken wurden zur direkten Zerkleinerung des Mists eingesetzt. Um hohe Mistanteile in der Fütterungsration an Biogasanlagen zu realisieren, ist der Einsatz einer Aufbereitung unbedingt notwendig. Generell eignen sich die einzelnen mechanischen Aufbereitungstechniken für unterschiedlichste Durchsatzmengen. Durch Erhöhung der Auslastung der Aufbereitungstechniken, können deutliche Kostenreduktionen realisiert werden.



*Abbildung 54: Kosten der untersuchten Aufbereitungstechniken bezogen auf die jeweilige realisierte Mistmenge*

Um eine Aussage über die Aufbereitungskosten bei gleichen Durchsatzmengen treffen zu können, sind in Tabelle 61 variable und fixe Kosten ausgewählter Aufbereitungstechniken bezogen auf die Einsatzmengen 1.000 t, 5.000 t und 10.000 t pro Jahr, dargestellt. Die Tabelle enthält die Höhe der zu tätigenen Investition und außerdem die Höhe der anfallenden Betriebskosten. Sämtliche Aufbereitungstechniken wurden aufgrund des hohen Verschleißes auf 5 Jahre abgeschrieben. Der Zinssatz wurde auf 5% festgelegt. Die Stromkosten wurden auf 20 Cent/ kWh, die Personalkosten auf 25 €/ h festgelegt.

Die höchste Investitionssumme muss für den Schredder aufgebracht werden. Diese liegt bei etwa 272.000 €. Die Kugelmühle hat mit 60.000 € die geringste Investitionssumme. Ein Grund für die deutlichen Unterschiede der Investitionshöhe sind die unterschiedlichen Durchsatzmengen, die bei der jeweiligen Technik realisiert werden können. Während mit dem Querstromzerspaner, sowie Mazerator und Kugelmühle Durchsatzmengen von 2-10 t/ h möglich sind, können mit dem angegebenen Schredder bis zu 27 t/ h realisiert werden.

Die Parameter der Wirtschaftlichkeit sind im Falle des Schredders, sowie der Kugelmühle Herstellerangaben. Die Daten zum Querstromzerspaner stammen aus wissenschaftlichen Untersuchungen von Mönch-Tegeder et al. (2014), die des Mazerators aus der Dokumentation eines Biogasanlagenbetreibers.

Die höchsten Gesamtkosten zur Aufbereitung fallen bei dem Schredder an. Diese sind mit 10,92 €/ t FM im Vergleich zur Kugelmühle mit 1,80 €/ t FM, bezogen auf eine Durchsatzmenge von 10.000 t/ a, deutlich höher. Die Gesamtkosten des Querstromzerspaners liegen bei einer Durchsatzmenge von 10.000 t/ a bei 5,13 €/ t FM, die des Mazerators bei 4,61 €/ t FM (vgl. Tabelle 61 und Abbildung 55).

Aufgrund der sehr hohen Fixkosten des Schredders eignet dieser sich in erster Linie als überbetriebliche Variante zur Aufbereitung von Pferdemist. Die anderen Varianten sind in allen Fällen fest an der Biogasanlage installiert.

Grundsätzlich sind nicht nur die Kosten zur Aufbereitung zur Kaufentscheidung wichtig, sondern ebenso die sinnvolle Einsatzmöglichkeit an der jeweiligen Anlage.

Tabelle 61: Variable und fixe Kosten ausgewählter Aufbereitungstechniken bei einer jährlichen Einsatzmenge von 1.000 t, 5.000 t und 10.000 t (HerstellerangabeA ,2014; Mönch-Tegeder et al., 2014; Betreiberangabe, 2014; HerstellerangabeB, 2014)

	Einheit	Verfahren											
		Schredder			Querstromzerspaner			Mazerator			Kugelmühle		
Investitionskosten	€	272.210			104.800			100.000			60.000		
Abschreibungsdauer	A	5			5			5			5		
Abschreibung	€/a	54.442			20.960			20.000			12.000		
Verzinsung (5%)	€/a	6.805			2.620			2.500			1.500		
Versicherung (0,7 %)	€/a	1.905			734			700			420		
Fixe Kosten	€/a	63.153			24.314			23.200			13.920		
Mistmenge/Jahr	T	1.000	5.000	10.000	1.000	5.000	10.000	1.000	5.000	10.000	1.000	5.000	10.000
Jährliche Einsatzdauer der Technik	h/a	37	185	370	500	2500	5000	167	833	1.667	200	1.000	2.000
Betriebskosten Antrieb (Energiekosten)	€/t	2,10	2,10	2,10	2,20	2,20	2,20	1,14	1,14	1,14	0,21	0,21	0,21
	€/a	2.100	10.500	21.000	2.200	11.000	22.000	1.140	5.700	11.400	42	210	420
Reparaturkosten, Wartungskosten, Verschleißkosten	€/t	1,57	1,57	1,57	0,5	0,5	0,5	1,10	1,10	1,10	0,2	0,2	0,2
	€/a	1.570	7.850	15.700	500	2.500	5.000	1.100	5.500	11.000	200	1.000	2.000
Personalkosten (25 €/h)	€/t	0,93	0,93	0,93	inkl.	inkl.	inkl.	0,05	0,05	0,05	inkl.	inkl.	inkl.
	€/a	930	4.650	9.300	inkl.	inkl.	inkl.	50	250	500	inkl.	inkl.	inkl.
Variable Kosten	€/t	4,60	4,60	4,60	2,70	2,70	2,70	2,29	2,29	2,29	0,41	0,41	0,41
	€/a	4.600	23.000	46.000	2.700	13.500	27.000	2.290	11.450	22.900	242	1.210	2.420
Fixe Kosten	€/t	63,15	12,63	6,32	24,31	4,86	2,43	23,2	4,64	2,32	13,92	2,78	1,39
	€/a	63.153	63.153	63.153	24.314	24.314	24.314	23.200	23.200	23.200	13.920	13.920	13.920
Gesamtkosten	€/t	<b>67,75</b>	<b>17,23</b>	<b>10,92</b>	<b>27,01</b>	<b>7,56</b>	<b>5,13</b>	<b>25,49</b>	<b>6,93</b>	<b>4,61</b>	<b>14,33</b>	<b>3,19</b>	<b>1,80</b>
	€/a	67.753	86.153	109.153	27.014	37.814	51.314	25.490	34.650	46.100	14.162	15.130	16.340

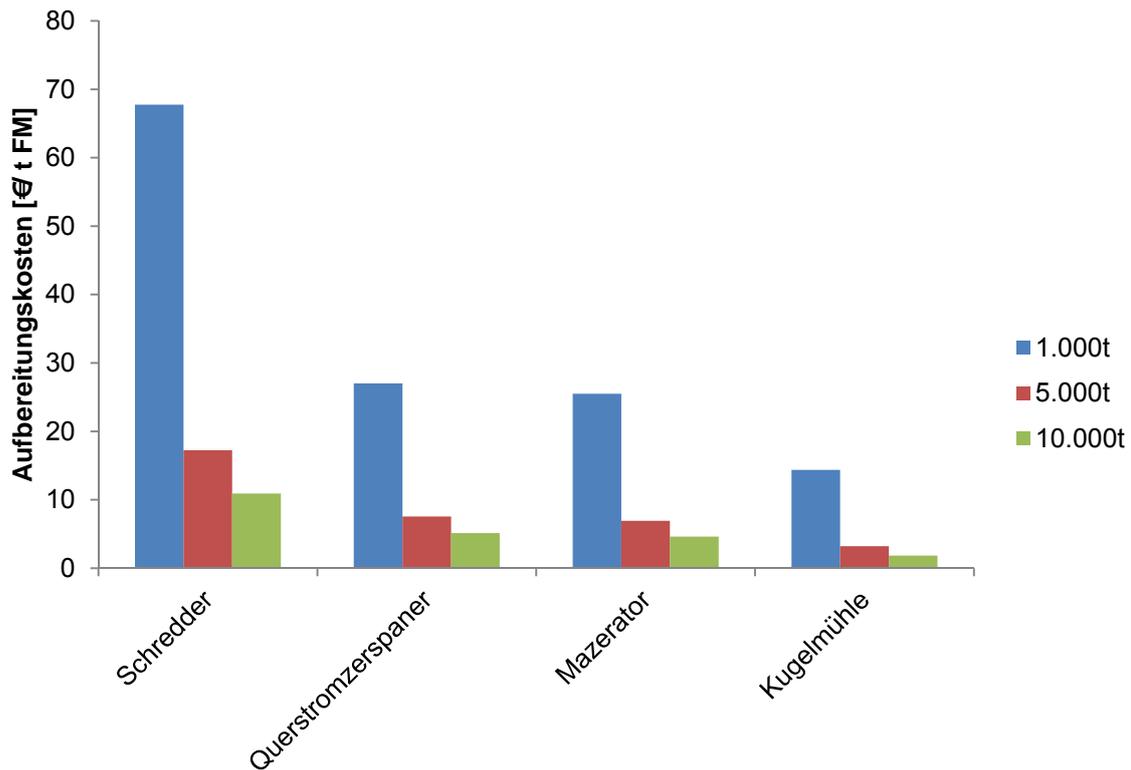


Abbildung 55: Aufbereitungskosten ausgewählter Aufbereitungstechniken bezogen auf einheitliche Mistdurchsätze auf Grundlage der Daten von Tabelle 61

### Relevanz der Fermenterbauart, der Einbringtechnik und des Rührwerkstyps

Der Einsatz von faserhaltigen Substraten wie Mist, stellt besondere Anforderungen an die an der Biogasanlage eingesetzte Verfahrenstechnik. Abgesehen von der vorgeschalteten Aufbereitungstechnik spielen die Fermenterbauart, die Art der Einbringtechnik, sowie die eingesetzten Rührwerkstypen eine entscheidende Rolle.

Als Fermenter eignen sich liegende Fermenter (Propfenströmer), sowie schmale Hochfermenter besser als Flachfermenter mit hohen Durchmessern. Ein Grund dafür ist die leichtere Durchmischbarkeit der jeweiligen Behälter.

Der Einsatz eines Vorratsbehälters mit integrierter oder angegliederter Vertikalmischeinheit eignet sich am besten für den Einsatz von Mist. Grund dafür ist die Möglichkeit einer homogenen Durchmischung der im Vorratsbehälter zwischengelagerten Substrate. Der anschließende Transport des Substrates kann über Schne-

cken sowie auch über Flüssigdosierung erfolgen. Der Einsatz einer Flüssigdosierung führt zu einer Anmischung des Substrates mit Gärrest, bevor das Substrat in den Fermenter dosiert wird. Dies führt zu besserer Homogenität im Fermenter. Die Gefahr der Bildung einer Schwimmschicht kann so verringert werden. Außerdem kann Rührleistung eingespart werden. Meist ist die Voraussetzung für einen störungsfreien Betrieb einer Flüssigdosierung jedoch eine vorgeschaltete Zerkleinerung bzw. Aufbereitung des Substrates, da diese relativ anfällig gegen Störstoffe und langfaserige Substrate ist.

Beim Einsatz von größeren Mengen Mist eignen sich besonders Rührwerke, die möglichst viel des Fermentervolumens durchmischen. Ein Beispiel für ein solches Rührwerk ist das Paddelrührwerk (z.B. Paddelgigant der Firma Agrikomp). Dieses kann auch noch bei höheren Trockensubstanzgehalten den Fermenterinhalt umwälzen. Bei anderen Rührwerken, wie beispielsweise dem Stabrührwerk, kann das Problem auftreten, dass dieses bei hohen Trockensubstanzgehalten lediglich noch sein nächstes Umfeld umwälzt.

## **Grenzen der Pferdemistverwertung**

Die Grenzen der Pferdemistvergärung einer Biogasanlage korrelieren stark mit der an der Anlage eingesetzten Technik. Es ist nur schwer möglich eine Aussage über genaue Mengenteile des Misteinsatzes zu treffen. Jedoch können gewisse Tendenzen durch den Einsatz unterschiedlicher Techniken genannt werden.

Aufgrund des Einsatzes folgender Techniken können höhere Pferdemistanteile realisiert werden:

- liegender Fermenter (Propfenströmer)
- Paddelrührwerk
- Einsatz einer mechanischen Aufbereitung
- Flüssigfütterung

Je nach Substrateinsatz und Mistanteil ist es notwendig, auf mehrere dieser Techniken zurück zu greifen. Defizite der Rührtechnik können teilweise durch den Ein-

satz einer vorgeschalteten Aufbereitungstechnik oder einer Flüssigfütterung ausgeglichen werden. Ein Zusammenspiel gezielt ausgewählter Verfahrenstechnik ist jedoch empfehlenswert.

Weiterhin hat der Anteil an flüssigen Substraten, wie Gülle, einen Einfluss auf Einsatzmenge an Mist. Je höher die eingesetzte Güllemenge, desto mehr Mist kann eingesetzt werden. Demnach ist die Grenze der Pferdemistvergärung überwiegend abhängig vom TS-Gehalt und der Viskosität im Fermenter. Steigt der TS-Gehalt über 15%, ist in vielen Fällen keine Pumpfähigkeit mehr gegeben. Kann durch gezielte Rührtechnik bzw. Aufbereitung des Substrates die Viskosität verringert werden, ist ein stabiler Betrieb auch bei hohen TS-Gehalten möglich.

Anhand der Wirtschaftlichkeitsberechnungen wird deutlich, dass sich Einsatzmengen bis 40% gut durch den Einsatz einer mechanischen Aufbereitung auch bei klassischen Nassvergärungsanlagen realisieren lassen. Einsatzmengen die deutlich über dieser Grenze liegen, wie etwa einen Anteil von knapp 80% wie in BGA V, jedoch nur durch einen enorm hohen verfahrenstechnischen Aufwand realisiert werden können. Auch wird deutlich, dass ein derart hoher Aufwand an ökonomische Grenzen stößt.

## **2. Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung**

### **2.1. Änderungsbedarf an der inhaltlichen Ausrichtung des Projektes**

Keine

### **2.2. Änderungsbedarf im Zeitplan**

Der offizielle Projektstart war am 01.09.2011. Aufgrund der Ausdehnung der Untersuchungen an der Forschungsbiogasanlage und der Entwicklung eines Inline-Viskositätsprüfstandes ist das Projekt kostenneutral bis zum 30.09.2014 verlängert worden.

### **2.3. Änderungsbedarf im Kostenplan**

Keine

## 2.4. Aktueller Zeitplan

Kennung	Projektlaufzeit 01.09.2011 bis 30.09.2014	2012				2013				2014		
		Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3
1	Arbeitspaket 1											
2	Arbeitspaket 2											
3	Arbeitspaket 3											
4	Arbeitspaket 4											
5	Arbeitspaket 5											
6	Arbeitspaket 6											

### **3. Vorhabensziele**

Es gibt keine Änderungen bezüglich der Vorhabensziele.

### **4. Forschungs- und Entwicklungsergebnisse Dritter**

Innerhalb des Berichtszeitraums sind keine Ergebnisse bekannt geworden, die eine Änderung des Arbeits-, Zeit- und Kostenplans erforderlich machen.

### **5. Änderung der Zielsetzung**

Derzeit sind keine Änderungen notwendig.

## 6. Jährliche Fortschreibung des Verwertungsplans

Zu Beginn des Projektes wurde eine Pressemitteilung zu den Projektzielen und Hintergründen veröffentlicht. Daraufhin entstand ein großes Interesse von verschiedensten Medien (z.B. SWR und WDR) und Fachzeitschriften. Diese Mitteilung wurde u.a. von der DLG, topagrar, profi und landwirtschaftlichen Wochenblättern veröffentlicht.

Die gute Resonanz von Landwirten und Pferdehaltern auf unser Projekt unterstrich die Aktualität und Bedeutung der Verwertung von Reststoffen wie Pferdemist in Biogasanlagen. Es wurden intensive Kontakte zu Praktikern aufgebaut und es fand ein Gedankenaustausch statt.

Zusätzlich konnten Kontakte zu verschiedenen Unternehmen und Beratungseinrichtungen aufgebaut werden:

- Agricapital
- Agrikomp (Biogasanlagenhersteller)
- Badenova AG & Co KG (Regionaler Energieversorger)
- Becker Concepts (Vertrieb von Biogasadditiven)
- Methavis (Biogasberatung)
- MT-Energie (Biogasanlagenhersteller)
- Novatech (Biogasanlagenhersteller)
- Schaumann Bioenergy (Biologische Prozessbetreuung)
- Stadtwerke Aachen (Energieversorger)
- NETZ Ingenieurbüro (Beratung Energieversorgung und Energiekonzepte)
- Staatliche Biogasberatung Baden-Württemberg

Auf dem Statustreffen im November 2012 wurde eine Zusammenarbeit mit der TU Berlin Abt. Bioverfahrenstechnik vereinbart (Projekt MultiSens; FKZ:03KB059).

Im September 2012 wurde ein Tag der offenen Tür an der Biogasanlage am Unteren Lindenhof veranstaltet. Hier stand die energetische Nutzung von Pferdemist und mechanische Aufbereitung im Vordergrund.

## **Veröffentlichungen**

### **Peer-reviewed**

#### **2013**

Mönch-Tegeder, M., A. Lemmer, H. Oechsner and T. Jungbluth (2013): Investigation of the methane potential of horse manure. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 15(2): 161-172.

#### **2014**

Naegele, H.-J., Mönch-Tegeder, M., Haag, N.L., Oechsner, H. (2014): Effect of substrate pretreatment on particle size distribution in a full-scale research biogas plant. *Bioresource Technology*, 172, pp. 396-402.

Mönch-Tegeder, M., Lemmer, A., Hinrichs, J., Oechsner, H. (2014): Development of an in-line process viscometer for the full-scale biogas process. *Bioresource Technology*, Article in Press.

Mönch-Tegeder, M., Lemmer, A., Oechsner, H. (2014): Enhancement of methane production with horse manure supplement and pretreatment in a full-scale biogas process. *Energy*, 73, pp. 523-530.

Mönch-Tegeder M. (2014): Untersuchungen zur Verwertbarkeit von Pferdemist im Biogasprozess. Dissertation Fakultät Agrarwissenschaften, Universität Hohenheim, Selbstverlag.

## **Sonstige Veröffentlichungen, Tagungsbeiträge, Poster**

### **2012**

Oechsner, H. und Mönch-Tegeder, M. (2012): Einsatz von Pferdemist als Gärsubstrat und dessen Aufbereitung, 21. Jahrestagung Biogas und Bioenergie in der Landwirtschaft, Biogas Expo und Kongress, Messe Offenburg, 24. bis 25.10.2012 in Offenburg (Vortrag).

Oechsner, H.: Innovative Verfahren landwirtschaftlicher Co-Vergärungsanlagen. Biogas Tag 2012 Baden-Württemberg. Fachverband Biogas, 08.11.2012, Stuttgart (Vortrag)

### **2013**

Oechsner, H. (2013): Verwerten statt entsorgen – Rohstoff Pferdemist. Pferdebetrieb 1/2013: 39-41.

Mönch-Tegeder, M., H. Oechsner und T. Jungbluth (2013): Aufbereitung und Vergärung von Pferdemist, 14. Treffen des BioMethan-Kuratoriums, Fördergesellschaft Erneuerbarer Energien e.V., 03.06.2013 in Eningen unter Achalm (Vortrag, download im Internet).

Mönch-Tegeder, M., H. Oechsner und T. Jungbluth (2013): Verwertungsmöglichkeiten von Pferdemist in Biogasanlagen, 7. Fachtagung „Biogas – Energieträger der Zukunft“, Verein Deutscher Ingenieure (VDI), 12. bis 13.06.2013 in Nürtingen (Poster).

Mönch-Tegeder, M., H. Oechsner und T. Jungbluth (2013): Verwertungsmöglichkeiten von Pferdemist in Biogasanlagen, VDI-Berichte 2208, S. 259 - 260

Mönch-Tegeder, M. und H. Oechsner (2013): Effizienter Aufschluss schwieriger Substrate, 9. Biogastag Baden-Württemberg, Fachverband Biogas e.V. und Universität Hohenheim, 17.07.2013 in Hohenheim (Vortrag und Download der Präsentation).

Mönch-Tegeder, M., H. Oechsner und T. Jungbluth (2013): Erschließung von Pferdemist als Gärsubstrat in Biogasanlagen, 5. Statustreffen „Energetische Biomassenutzung“, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), 14. bis 15.11.2013 in Leipzig (Tagungsbeitrag).

Mönch-Tegeder, M. und H. Oechsner (2013): Vergärung von Pferdemist – Möglichkeiten und Grenzen, Süddeutsche Biogas-Fachtagung, renergie-Allgäu e.V., 27.11.2013 in Westerheim (Vortrag).

Mönch-Tegeder, M., H. Oechsner und T. Jungbluth (2013): Möglichkeiten der Vergärung von Pferdemist in Biogasanlagen, Fachgespräch „Pferdehaltung“, ALB Baden-Württemberg e.V., 28.11.2013 in Gomadingen (Vortrag).

Mönch-Tegeder, M., H. Oechsner und T. Jungbluth (2013): Möglichkeiten der Vergärung von Pferdemist in Biogasanlagen, Tagungsband zum Fachgespräch „Pferdehaltung“, ALB Baden-Württemberg e.V., 28.11.2013 in Gomadingen, S. 63 - 76.

Oechsner, H. (2013): Pferdemistvergärung, 27. Sitzung des KTBL-Arbeitskreises „Referenten Land und Energietechnik“, 05.06.2013, Rheinmünster.

Oechsner, H. (2013): Nutzung organischer Reststoffe in landwirtschaftlichen Kofermentierungsanlagen, 1. Abfallwirtschaftliches Seminar, Universität der Bundeswehr München, 17.07.2013 in München (Vortrag und Manuskript im Tagungsband).

Oechsner, H. und M. Paterson (2013): Methanertrag aus Biomasse - Übertragbarkeit von Laborergebnissen in die Praxis, KTBL/FNR-Kongress Biogas in der Landwirtschaft – Stand und Perspektiven, 10. bis 11.09.2013, Kassel.

Oechsner, H. (2013): Bioenergie aus der Landschaftspflege, 1. Referentenworkshop, Netzwerk Steuobst Mössingen e.V., 12.11.2013 in Mössingen.

Oechsner H. und T. Jungbluth (2013): Use of fiber-rich substrates as a raw material for biogas production on the example of manure from livestock, International Research Training Groups, 24. bis 28.11.2013, Chiang Mai, Thailand.

## **2014**

Oechsner H. (2014): Mobilisierung ungenutzter Rohstoffpotenziale: Pferdemist und Landschaftspflegematerial als Biogassubstrat. In: Biogene Gase für die Energiewende in Baden-Württemberg- Möglichkeiten und Grenzen. Tagung Akademie Ländlicher Raum am 20. Februar 2014 in Geislingen/Steige – Vortrag

Oechsner H., M. Mönch-Tegeder: (2014): Mobilisierung ungenutzter Rohstoffpotenziale: Pferdemist und Landschaftspflegematerial als Biogassubstrat. In: Biogene Gase für die Energiewende in Baden-Württemberg- Möglichkeiten und Grenzen. Tagungsband zur Tagung Akademie Ländlicher Raum am 20. Februar 2014 in Geislingen/Steige – Tagungsmappe S. 1-7

Oechsner H.: Effect of enzyme addition on the methane yields and biological stability of the biogas process. Sino-German workshop on anaerobic digestion technologies and energy generation from biomass and specific organic wastes (DIGEST), TU Hamburg-Harburg and Tsinghua-University Beijing, 9.-10. April 2014 in Beijing. - Vortrag

Oechsner H. und M. Mönch-Tegeder (2014): Full scale investigations of the use of lignocellulosic materials for anaerobic digestion. Proceedings of the Congress Progress in Biogas III, IBBK, 10.-11- September 2014

Oechsner H. und M. Mönch-Tegeder (2014): Full scale investigations of the use of lignocellulosic materials for anaerobic digestion. Congress „Progress in Biogas III“, IBBK, 10.-11- September 2014 - Vortrag

Oechsner H. und M. Mönch-Tegeder (2014): Nachhaltige Energieerzeugung durch Erschließung von Pferdemist als Gärsubstrat für Biogasanlagen. 1. Jahrestagung DBFZ am 1.-2. Oktober 2014 in Leipzig - Vortrag

Oechsner H. und M. Mönch-Tegeder (2014): Nachhaltige Energieerzeugung durch Erschließung von Pferdemist als Gärsubstrat für Biogasanlagen. Tagungsband zur 1. Jahrestagung DBFZ, S. 147 – 151

Oechsner H.: Biogasproduction – state of the art and innovative methods for advancement of technology. 1. Bioökonomiekongress Baden-Württemberg. 29.-30. Oktober, 2014, Haus der Wirtschaft, Stuttgart

## **Projektberichte**

### **2012 und 2013**

Mönch-Tegeder, M. H. Oechsner und T. Jungbluth (2012): Weiterentwicklung von Technologien zur effizienten Nutzung von Pferdemist als biogener Reststoff und Test im Praxisbetrieb – Zwischenbericht., FKZ 03KB064.



## Literaturverzeichnis

- , -. (2004): Gesetz zur Neuregelung des Rechts der Erneuerbaren Energien im Strom Bereich. BGBl. Teil I Nr. 40 v. 31.07.2004.
- , -. (2009): Gesetz für den Vorrang erneuerbaren Energien. BGBl. Teil I v. 25.10.2008.
- , -. (2012): Gesetz für den Vorrang erneuerbarer Energien. BGBl. Teil I v. 12.04.2012.
- Agbor, V. B., N. Cicek, R. Sparling, A. Berlin and D. B. Levin (2011): Biomass pretreatment: Fundamentals toward application. *Biotechnology Advances*, 29(6): 675-685.
- Angelidaki, I. and B. K. Ahring (2000): Methods for increasing the biogas potential from the recalcitrant organic matter contained in manure. *Water Science and Technology*, 41(3): 189-194.
- Appels, L., J. Lauwers, J. Degreve, L. Helsen, B. Lievens, K. Willems, J. Van Impe and R. Dewil (2011): Anaerobic digestion in global bio-energy production: Potential and research challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9): 4295-4301.
- Bayrische Landesanstalt für Landwirtschaft (LFL) (2014): Faustzahlen Schweinemist. BZA Biogas Software.
- Beck, J. (2005): Horse manure problem solving through mechanical processing, composting and thermal utilisation. *Landtechnik*, 60(1): 40-41.
- Betreiberangabe (2014): Wirtschaftlichkeit Mazerator. Persönliches Gespräch vom 10.07.2014.
- Böhm, R. (2012): Optimierung der mechanischen Aufbereitung von Pferdemist zur Vergärung in Biogasanlagen mittels Querstromzerspaner. Universität Hohenheim.
- Bolduan, R., M. Brulé, T. Demeusy, P. Schlagermann, G. Göttlicher, S. Eissler and H. Oechsner. (2011): Extrusion pretreatment of green waste for biogas production - Methane yield and energy balance. In *Progress in Biogas II - Biogas production from agricultural biomass and organic residues*; University of Hohenheim, March 30 - April 01 2011. FnBB; Kirchberg an der Jagst, FnBB: 95-102.
- Brulé, M., A. Lemmer, H. Oechsner, T. Jungbluth and U. Schimpf (2008): Effect of adding fibrolitic enzymes to the methane yields of rye silage. *Landtechnik*, 63(3): 178-179.

- Bruni, E., A. P. Jensen and I. Angelidaki (2010a): Comparative study of mechanical, hydrothermal, chemical and enzymatic treatments of digested biofibers to improve biogas production. *Bioresource Technology*, 101(22): 8713-8717.
- Bruni, E., A. P. Jensen and I. Angelidaki (2010b): Steam treatment of digested biofibers for increasing biogas production. *Bioresource Technology*, 101(19): 7668-7671.
- Budiyono, B., I. N. Widiyasa, S. Johari and S. Sunarso (2010): The kinetic of biogas production rate from cattle manure in batch mode. *International Journal of Chemical and Biological Engineering*, 3(1): 39 - 44.
- Bundesministerium für Ernährung Landwirtschaft und Verbraucherschutz. (2012): Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten der Bundesrepublik Deutschland. Münster: Landwirtschaftsverlag GmbH.
- Carlsson, M., A. Lagerkvist and F. Morgan-Sagastume (2012): The effects of substrate pre-treatment on anaerobic digestion systems: A review. *Waste Management*, 32(9): 1634-1650.
- Climent, M., I. Ferrer, M. d. M. Baeza, A. Artola, F. Vázquez and X. Font (2007): Effects of thermal and mechanical pretreatments of secondary sludge on biogas production under thermophilic conditions. *Chemical Engineering Journal*, 133(1-3): 335-342.
- Cui, Z., J. Shi and Y. Li (2011): Solid-state anaerobic digestion of spent wheat straw from horse stall. *Bioresource Technology*, 102(20): 9432-9437.
- Daniel-Gromke, J., V. Denysenko, P. Sauter, K. Naumann, M. Scheffelowitz, A. Krautz, M. Beil, W. Beyrich, W. Peters, S. Schicketanz, C. Schultze, P. Deumelandt and F. Reinicke (2013): *Stromerzeugung aus Biomasse 03MAP250 - Zwischenbericht*. Deutsches Biomasseforschungszentrum. Leipzig.
- Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina (2012): *Bioenergy - Chances and limits*. Halle (Saale).
- Deutsche Reiterliche Vereinigung, e. V. (2012): *Zahlen, Daten, Fakten Pferdesport 2012*. Abgerufen am: 09.11.2013, unter [http://www.pferd-aktuell.de/shop/index.php/cat/c106\\_Verband.html](http://www.pferd-aktuell.de/shop/index.php/cat/c106_Verband.html).
- Döhler, H., H. Eckel, N. Fröba, S. Grebe, S. Hartmann, U. Häußermann, S. Klages, N. Sauer, S. Nakazi, A. Nußbaum, U. Roth, B. Wirth and S. Wulf. (2007): *Faustzahlen Biogas*. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft.
- Eder, B. and H. Schulz. (2012): *Biogas-Praxis: Grundlagen, Planung, Anlagenbau, Beispiele, Wirtschaftlichkeit, Umwelt*. Staufen bei Freiburg: Ökobuch-Verlag.

- Ehrenstein, U., S. Strauch and J. Hildebrand. (2013): Gesellschaftliche Akzeptanz von Biogasanlagen - Empfehlungen für die Praxis. Biogas in der Landwirtschaft - Stand und Perspektiven. FNR/KTBL-Kongress. Kassel, KTBL-Schrift. 501: 292-300.
- European Renewable Energy Council. (2007): Renewable energy technology roadmap.
- Fachverband Biogas e.V. (2013): Branchenzahlen 2012 und Prognose der Branchenentwicklung 2013. Abgerufen am: 09.11. 2013, unter [http://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE\\_Branchenzahlen/\\$file/13-05-22\\_Biogas%20Branchenzahlen\\_2012-2013.pdf](http://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE_Branchenzahlen/$file/13-05-22_Biogas%20Branchenzahlen_2012-2013.pdf).
- Fischer, E., A. M. Powrosnik and C. Beil (2013): Assessment of process stability and biogas yield for the anaerobic digestion of horse dung in lab-scale. Landtechnik, 68(4): 248-251.
- Gömann, H. (2013): Landwirtschaftliche Landnutzung und Biogaserzeugung in Deutschland - Stand und Perspektiven. Biogas in der Landwirtschaft - Stand und Perspektiven. FNR/KTBL-Kongress. Kassel, KTBL-Schrift. 501: 60 -71.
- Haeffner, B., C. Nied, J. Voigt and K. Sommer (2010): Verweilzeitverkürzung bei der Biogasentstehung durch Zerkleinerung von lignocellulosehaltigen Substraten. Chemie Ingenieur Technik, 82(8): 1261-1264.
- Härdtlein, M., M. Stenull and L. Eltrop. (2013): Biogasanlagen in Baden-Württemberg - Stand der Technik, wirtschaftliche Aspekte, Klimarelevanz und Optimierungspotenziale, Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung.
- Hartmann, F. G. (2011): Einfluss der Intensivaufbereitung von Biomasse mittels Querstromzerspanner auf die Abbaukinetik und den spezifischen Methanertrag von Maissilage, Grassilage und Pferdemist. Universität Hohenheim.
- Hartmann, H., I. Angelidaki and B. K. Ahring (2000): Increase of anaerobic degradation of particulate organic matter in full-scale biogas plants by mechanical maceration. Water Science and Technology, 41(3): 145-153.
- Hashimoto, A. G. (1983): Conversion of straw-manure mixtures to methane at mesophilic and thermophilic temperatures. Biotechnology and Bioengineering, 25(1): 185-200.
- Häußermann, A., J. Beck and T. Jungbluth (2002): Litter materials in horse husbandry. Landtechnik, 57(1): 50-51.
- HerstellerangabeA (2014): Wirtschaftlichkeitsauswertung Schredder. Mail vom 27.06.2014.
- HerstellerangabeB (2014): Wirtschaftlichkeitsauswertung Kugelmühle. Mail vom 27.09.2014.

- Hendriks, A. T. W. M. and G. Zeeman (2008): Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, 100(1): 10-18.
- Hjorth, M., K. Gränitz, A. P. S. Adamsen and H. B. Møller (2011): Extrusion as a pretreatment to increase biogas production. *Bioresource Technology*, 102(8): 4989-4994.
- Johann Heinrich von Thünen-Institut (2009): Biogas-Messprogramm II - 61 Anlagen im Vergleich. ; Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. Gülzow.
- Kalia, A. K. and S. P. Singh (1998): Horse dung as a partial substitute for cattle dung for operating family-size biogas plants in a hilly region. *Bioresource Technology*, 64(1): 63-66.
- Kianmehr, P., W. Parker and P. Seto (2010): An evaluation of protocols for characterization of ozone impacts on WAS properties and digestibility. *Bioresource Technology*, 101(22): 8565-8572.
- Kimmich, S. and L. Slotyuk. (2011): Research into the difference in the nutrient content of conventional and ecological produced substrates and their influence on the biogas process. project thesis Universität Hohenheim.
- Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL) (2009A): Richtwerte für die Gasausbeute. In: *Faustzahlen Biogas*, KTBL, Darmstadt, S. 94.
- Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL) (2009B): Substratlagerung. In: *Faustzahlen Biogas*, KTBL, Darmstadt, S. 79.
- Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL) (2009C): Technik in der Außenwirtschaft. In: *Faustzahlen für die Landwirtschaft*, KTBL, Darmstadt, S. 61-71.
- Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL) (2012): Methodische Grundlage der Kostenkalkulation. <http://daten.ktbl.de/makost/downloads/Kalkulationsmethode.pdf>, Stand 18.08.2014.
- Kusch, S. (2007): Methanisierung stapelbarer Biomassen in diskontinuierlich betriebenen Feststofffermentationsanlagen. Dissertation Universität Hohenheim.
- Kusch, S., H. Oechsner and T. Jungbluth (2008): Biogas production with horse dung in solid-phase digestion systems. *Bioresource Technology*, 99(5): 1280-1292.
- Lemmer, A. (2005): Kofermentation von Grünput in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Dissertation Universität Hohenheim. Forschungsbericht Agrartechnik der VDI-MEG Nr. 435.

- Lindmark, J., N. Leksell, A. Schnürer and E. Thorin (2012): Effects of mechanical pre-treatment on the biogas yield from ley crop silage. *Applied Energy*, 97(0): 498-502.
- Mähnert, P. (2007): Kinetik der Biogasproduktion aus nachwachsenden Rohstoffen und Gülle. Dissertation Humboldt Universität.
- Mewa. (2010): Universal-Querstromzerspaner: Serie Uni-Cut QZ. Mewa Maschinen- und Anlagenbau GmbH. Gechingen.
- Möller, K. and T. Müller (2012): Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: A review. *Engineering in Life Sciences*, 12(3): 242-257.
- Mönch-Tegeder, M.; Lemmer, A.; Oechsner, H.; Jungbluth, T. (2014): Effects of full-scale substrate pretreatment with the cross-flow grinder on biogas production. Article in press.
- Mönch-Tegeder, M., Lemmer, A., Hinrichs, J., Oechsner, H. (2014): Development of an in-line process viscometer for the full-scale biogas process. *Bioresource Technology*, Article in Press.
- Mönch-Tegeder, M., Lemmer, A., Oechsner, H. (2014): Enhancement of methane production with horse manure supplement and pretreatment in a full-scale biogas process. *Energy*, 73, pp. 523-530.
- Naegele, H.-J., A. Lemmer, H. Oechsner and T. Jungbluth (2012): Electric energy consumption of the full scale research biogas plant "Unterer Lindenhof": Results of longterm and full detail measurements. *Energies*, 5(12): 5198-5214.
- Nopharatana, A., P. C. Pullammanappallil and W. P. Clarke (2007): Kinetics and dynamic modelling of batch anaerobic digestion of municipal solid waste in a stirred reactor. *Waste Management*, 27(5): 595-603.
- Oechsner, H. (2005): Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen in Biogasanlagen - Gasertrag und Anlagentechnik. *Biogas - nachwachsende Rohstoffe, neue Wege für die Landwirtschaft*. Nürnberg, Fachverband Biogas: 115 - 120.
- Oechsner, H. und Mönch-Tegeder, M. (2012): Einsatz von Pferdemist als Gärsubstrat und dessen Aufbereitung, 21. Jahrestagung Biogas und Bioenergie in der Landwirtschaft, Biogas Expo und Kongress, Messe Offenburg, 24. bis 25.10.2012 in Offenburg (Vortrag)
- Oechsner, H. (2013): Verwerten statt entsorgen – Rohstoff Pferdemist. *Pferdebetrieb* 1/2013: 39-41.

- Oechsner, H. (2013): Nutzung organischer Reststoffe in landwirtschaftlichen Kofermentierungsanlagen, 1. Abfallwirtschaftliches Seminar, Universität der Bundeswehr München, 17.07.2013 in München (Vortrag und Manuskript im Tagungsband)
- Oechsner H., M. Mönch-Tegeder: (2014): Mobilisierung ungenutzter Rohstoffpotenziale: Pferdemist und Landschaftspflegematerial als Biogassubstrat. In: Biogene Gase für die Energiewende in Baden-Württemberg- Möglichkeiten und Grenzen. Tagungsband zur Tagung Akademie Ländlicher Raum am 20. Februar 2014 in Geislingen/Steige – Tagungsmappe S. 1-7
- Quiñones, T. S., M. Plöchl, J. Budde and M. Heiermann (2012): Results of batch anaerobic digestion test - effect of enzyme addition. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 14(1): 38-50.
- Romano, P. V., U. Krogmann, M. L. Westendorf and P. F. Strom (2006): Small-scale composting of horse manure mixed with wood shavings. *Compost Science and Utilization*, 14(2): 132-141.
- Sager, M. (2007): Trace and nutrient elements in manure, dung and compost samples in Austria. *Soil Biology and Biochemistry*, 39(6): 1383-1390.
- Schäfer, S. and A. Schäfer. (2010): Neue Möglichkeiten für die Aufschlusszerkleinerung beim Recycling durch den Universal-Querstromzerspanner. In *Recycling und Rohstoffe*. K.; Thomé-Kozmiensky and D.; Goldmann. Neuruppin, TK-Verlag: 287-299.
- Schwarz, B., E. Friedrich, H. Friedrich, K. Jobst and M. Lincke. (2009): Desintegrationsverfahren - Aufwand und Nutzen für die Biogaserzeugung. *Gülzower Fachgespräche: Biogas in der Landwirtschaft - Stand und Perspektiven*. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. Weimar, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. 32: 278-288.
- Strong, P. J., B. McDonald and D. J. Gapes (2011): Combined thermochemical and fermentative destruction of municipal biosolids: A comparison between thermal hydrolysis and wet oxidative pre-treatment. *Bioresource Technology*, 102(9): 5520-5527.
- Taherzadeh, M. J. and K. Karimi (2008): Pretreatment of lignocellulosic wastes to improve ethanol and biogas production: A review. *International Journal of Molecular Sciences*, 9(9): 1621-1651.
- Thomé-Kozmiensky, K. J. and B. Hoffmann. (2010): Mechanische Aufbereitung von Abfällen. In *Recycling und Rohstoffe*. Neuruppin, TK Verlag. Band 3: 141-285.
- VDI-Gesellschaft Energietechnik. (2006): VDI 4630: Vergärung organischer Stoffe - Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung,

- Gärversuche. In VDI-Handbuch Energietechnik. VDI (Hrsg.); Berlin, Beuth-Verlag.
- VDI-Gesellschaft Kommission Reinhaltung der Luft. (2010): VDI 3475 Blatt 4: Emissionsminderung - Biogasanlagen in der Landwirtschaft - Vergärung von Energiepflanzen und Wirtschaftsdünger. In VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 3: Emissionsminderung II. VDI (Hrsg.). Berlin, Beuth-Verlag.
- VDLUFA. (2007): Method Book III - The chemical analysis for feedstuffs. Darmstadt, Germany: VDLUFA Verlag.
- Wartell, B. A., V. Krumins, J. Alt, K. Kang, B. J. Schwab and D. E. Fennell (2012): Methane production from horse manure and stall waste with softwood bedding. *Bioresource Technology*, 112(1): 42-50.
- Weiland, P. (2006): Biomass digestion in agriculture: A successful pathway for the energy production and waste treatment in Germany. *Engineering in Life Sciences*, 6(3): 302-309.
- Weiland, P. (2010): Biogas production: current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85(4): 849-860.