

Stoffliche Nutzung industrieller Abprodukte in
Biogasanlagen am Beispiel Apfeltrester

Bachelorarbeit

TU Bergakademie Freiberg / DREWAG

Verfasser: Karl Bedrich

Datum der Abgabe: 04.03.2011

Inhaltsverzeichnis

Abstract	4
Zusammenfassung	4
Abkürzungsverzeichnis	5
1 Literaturrecherche	6
1.1 Grundlagen zur Biogassynthese.....	6
1.1.1. Übersicht des anaeroben Abbaus organischer Substanzen.....	6
1.1.1 Abgrenzung zum aeroben Abbau.....	6
1.1.2 Ausgangsprodukte.....	7
1.2 Phasen der Biogasbildung.....	11
1.2.1 Hydrolyse	11
1.2.2 Acidogenese.....	12
1.2.3 Acedogenese.....	12
1.2.4 Methanogenese.....	13
1.3 Einflussfaktoren des Biogasprozesses.....	14
1.3.1 Temperatur.....	14
1.3.2 pH-Wert und Gehalt an Fettsäuren.....	15
1.3.3 Nährstoffversorgung und Hemmstoffe.....	16
1.4 Verfahrenstechnische Betriebsparameter.....	18
1.4.1 Faulraumbelastung.....	18
1.4.2 Hydraulische Verweilzeit.....	18
2 Material und Methoden	20
2.1 Ausgangsmaterialien.....	20
2.1.1 Apfeltrester der Kelterei „Sachsenobst“.....	20
2.1.2 Maissilage des „LLH Eichhof“.....	24
2.1.3 Stallgülle des „LLH Eichhof“.....	25
2.1.4 Fermentergülle des „LLH Eichhof“	26
2.2 Diskontinuierlicher Gärtest (Batch-Versuch).....	27
2.2.1 Apparativer Aufbau.....	27
2.2.2 Versuchsdurchführung.....	29
2.3 Kontinuierlicher Gärversuch.....	30
2.3.1 Apparativer Aufbau.....	30
2.3.2 Versuchsdurchführung.....	31
3 Ergebnisse	38
3.1 Biogasertragsermittlung.....	38
3.1.1 Variante „Null“	39

3.1.2	Cellulose als Referenz.....	39
3.1.3	Apfeltrester.....	40
3.1.4	Maissilage.....	41
3.2	Kontinuierlicher Versuch.....	42
3.2.1	Erläuterung der dargestellten Diagramme.....	42
3.2.2	Variante „Null“	45
3.2.3	Variante „Mais“	48
3.2.4	Variante „Mix“	53
3.2.5	Variante „Trester“	57
4	Diskussion.....	62
4.1	Fehlerrechnung und -diskussion.....	62
4.1.1	Systematische Fehler der Laborversuche.....	62
4.1.2	Zufällige Fehler der Laborversuche.....	64
4.1.3	Fehlerrahmen und Vergleichbarkeit der Ergebnisse	65
4.2	Thesen.....	67
4.2.1	Die Vergärung von Apfeltrester als Co-Fermentat hat nur wenig Einfluss auf Ertrag und Stabilität des Gärprozesses unter Einsatzbedingungen.....	67
4.2.2	Die Zugabe von Apfeltrester verdünnt das Fermentat.....	72
4.2.3	Weder Lagerdauer noch Konservierung des Apfeltresters beeinflussen messbar den Methanertrag.....	75
5	Einsatz von Apfeltrester als Co-Fermentat in BGA.....	76
5.1	Politische und wirtschaftliche Rahmenbedingungen.....	76
5.2	Technische und wirtschaftliche Annahmen.....	81
5.3	Vorstellung der Vergleichsfälle	86
5.3.1	Optimierung hinsichtlich diskreter Parameter des Transports.....	86
5.3.2	Optimierung hinsichtlich der Verteilung des Tresters.....	87
5.3.3	Verwertung des Gärrestes.....	90
6	Fazit.....	93
	Literaturverzeichnis.....	95
	Abbildungsverzeichnis.....	100
	Tabellenverzeichnis.....	103
	Eidesstattliche Erklärung	105
	Anhang.....	106

Abstract

Due to the increasing ecological and financial importance of industrial waste products in the recovery of biogas the following thesis describes potentials and risks of the usage of one of these products using apple pomace – the filter cake of the apple juice production.

Thereby the issues of the three-month practical course in the LHL Eichhof, a laboratory in middle Germany, are shown and discussed. As conclusion several theses are given and verified with help of the taken measurements and scientific literature. At the end an economical calculation compares the present costs of purchase, storage and processing with the proceeds of the reimbursement by the german renewable energy sources act (EEG).

Against the misgiving that apple pomace could decrease the pH-value to an unacceptable level for the anaerobic decomposition process the fermentation of this product gets a comparable output even with a little more reliability compared to corn silage when added up to a defined level to corn silage and slurry.

Zusammenfassung

Die folgende Arbeit beschreibt Potentiale und Risiken der Nutzung industrieller Abprodukte am Beispiel des Apfeltrester – einem Pressrückstand der Apfelsaftgewinnung. Dieser spielt aus finanzieller und ökologischer Sicht als Abprodukt eine steigende Rolle bei der Biogassynthese. Dabei werden die Ergebnisse des vorangegangenen Fachpraktikums vorgestellt und diskutiert.

Darauf aufbauend wurden Thesen erstellt und anhand ermittelter Messwerte sowie der Literatur verifiziert. Schlussendlich werden in einer Wirtschaftlichkeitsrechnung Kosten von Bezug, Lagerung und Beschickung den Gewinnen aus der Einspeisevergütung gegenüber gestellt.

Es konnte gezeigt werden, dass Apfeltrester unter Laborbedingungen nicht die befürchtete Übersäuerung des anaeroben Abbauprozesses zur Folge hatte, sondern unter vergleichbaren Erträgen mit leicht höherer Sicherheit zur Maissilage bis zu einem gewissen Anteil zu Maissilage und Stallgülle zugesetzt werden kann.

Abkürzungsverzeichnis

Abb.:	Abbildung
BGA:	Biogasanlage
bzw.:	beziehungsweise
bzgl.:	bezüglich
CSB:	chemischer Sauerstoffbedarf
EEG:	Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien
EW:	Einwohner
FOS:	flüchtige organische Säuren
FM:	Frischmasse
FNR:	Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe
KTBL (e.V.):	Kuratorium für Technik und Bau e.V.
KWK:	Kraft-Wärme-Kopplung
LHL:	Landesbetrieb Hessisches Landeslabor
NaWaRo:	Nachwachsende Rohstoffe
oTS:	organische Trockensubstanz
Tab.:	Tabelle
TAC:	gesamter anorganischer Kohlenstoff
TS:	Trockensubstanz
u.a.:	unter anderem
z.B.:	zum Beispiel
z.T.	zum Teil

1 Literaturrecherche

1.1 Grundlagen zur Biogassynthese

1.1.1. Übersicht des anaeroben Abbaus organischer Substanzen

Biogas entsteht als Folge anaerober Zersetzung komplexer organischer Verbindungen als Gärungs- oder Faulungsprodukt in der Natur z.B. in Mooren oder am Meeresgrund, kann aber auch gesteuert auf Mülldeponien, bei der Abwasserbehandlung und in Biogasanlagen auftreten. Es besteht aus:

- 50 – 75 % Methan (CH_4)
- 25 – 45 % Kohlendioxid (CO_2)
- 2 – 7 % Wasserdampf (H_2O)
- < 1 % Schwefelwasserstoff (H_2S) und
- < 2 % Spurengasen.

Biogas ist brennbar und in Verbindung mit 6 – 12 % Luft explosiv. Ein Kubikmeter hiervon kann 0,6 l Heizöl ersetzen.¹

1.1.1 Abgrenzung zum aeroben Abbau

Bei der stofflichen Umsetzung organischer Substanzen lässt sich nach der An- bzw. Abwesenheit von Sauerstoff unterscheiden. Beide Varianten unterscheiden sich hinsichtlich Kohlenstoff- und Energiebilanz, wie Abbildung 1 zeigt.

Während beim anaeroben Abbau lediglich ein bis fünf (bzw. sieben²) Prozent für die Neubildung von Mikroorganismenmasse verbraucht und der verbleibende Kohlenstoff in Biogas umgesetzt wird, werden im aeroben Abbau lediglich 50 % zu Kohlendioxid veratmet – der Rest verbleibt im Substrat.

1 vgl. [1] S. 7ff; [4] S. 853

2 vgl. [8] S. 74

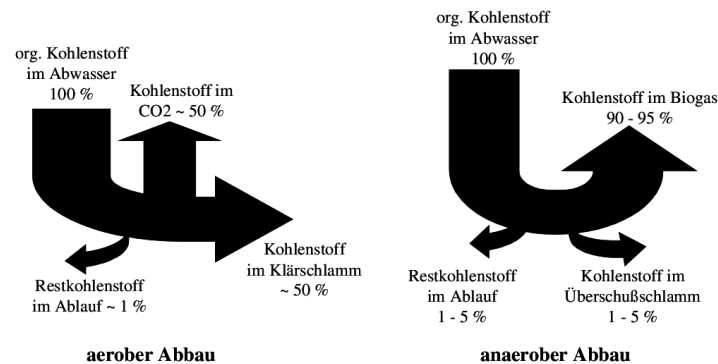


Abb. 1: Kohlenstoffbilanzen des mikrobiellen Abbaus
vgl. [25] S. 4

Dies geschieht allerdings unter einer deutlich stärkeren Wärmefreisetzung – im Gegensatz zum anaeroben Abbau, in welchem der Energiegehalt zum größten Teil im Methan gespeichert wird.³

1.1.2 Ausgangsprodukte

Ausgangsprodukt der Biogassynthese bildet primär und sekundär anfallende Biomasse, also Stoff organischer Herkunft, welcher entweder durch direkte photosynthetische Ausnutzung der Sonnenenergie entsteht (Primärprodukte) oder durch den Ab- und Umbau organischer Substanz in höheren Organismen (z.B. Tieren) anfällt (Sekundärprodukte). Als Abgrenzung zu fossilen Energiequellen dient Torf, welches als fossiles Sekundärprodukt der Verrottung nicht mehr zur Biomasse gezählt werden kann.⁴

Der Jahresmittelwert der extraterrestrischen Bestrahlungsstärke⁵ (Solarkonstante) beträgt 1367 Wm^{-2} , die mittlere Biomasseproduktion⁶ an Land $0,51 \text{ Wm}^{-2}$. Würden beide Werte zur Berechnung eines Wirkungsgrades der durchschnittlichen Umwandlung von Strahlungsenergie zu chemisch gebundener Energie herangezogen, würde dies 0,037 % ergeben. Hierbei sind allerdings weder der Tag-/Nachtwechsel, noch die Streu- und Reflexionsverluste der Atmosphäre und Beschaffenheit des Bodens bedacht. Tatsächlich liegt der Nutzeffekt der meisten Wälder- und Grasgemeinschaften bei einem Prozent. Einige landwirtschaftlich genutzte Pflanzen können aber auch einen maximalen Nutzeffekt von bis zu sechs Prozent (Hirse) oder drei Prozent (Mais) erreichen. Die Gründe für diesen – im Vergleich zur direkten

³ vgl. [25] S. 4-5

⁴ vgl. [4] S. 2-3

⁵ vgl. [2] S. 5

⁶ vgl. [3] S. 289

Umwandlung von Strahlungsenergie zu elektrischer Energie – sehr niedrigen Wirkungsgrad werden in der folgenden Betrachtung der Energieverluste (Abbildung 2) und der Stoffbilanz (Abbildung 3) ersichtlich.

Energieverluste durch	relativer Verlust ^a
Solarenergie außerhalb der photosynthetisch nutzbaren Wellenlängen	50 %
Remission und Transmission	5 bis 10 %
Absorption durch photosynthetisch unproduktive Gewebe und Strukturen (Zellwände, nicht photosynthetisch wirksame Pigmente)	2,5 %
Energieverluste nach Strahlungsabsorption durch Wärme, Fluoreszenz usw.	8,7 %
Aufwand für Elektronentransporte und Sekundärprozesse der Kohlenstoffassimilation	19 bis 22 %
Lichtatmung	2,5 bis 3 %
Dunkelatmung	
C ₃ -Pflanzen	3,7 bis 4,3 %
C ₄ -Pflanzen	4,9 bis 5,8 %
Summe	91,4 bis 100 %

^a bezogen auf die gesamte Globalstrahlung

Abb. 2: Energieverluste im Verlauf der Kohlenstoffassimilation in Pflanzen
vgl. [4] S. 52

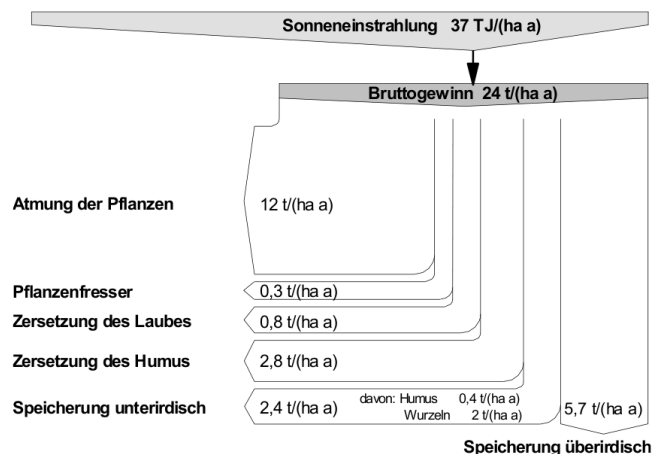


Abb. 3: Stoffbilanz einer Pflanzengesellschaft am Beispiel eines Hainbuchenwaldes
vgl. [4] S. 53

Konkret verarbeiten Biogasanlagen in der BRD derzeit 41 % tierische Exkremente (z.B. Rinder- und Schweinegülle), 10 % Bioabfälle, 2 % Reststoffe aus Industrie und Landwirtschaft sowie 47 % nachwachsende Rohstoffe. Da Energiepflanzen die größten Biogaserträge erzielen (siehe Abb. 4), werden diese bevorzugt genutzt.

Der globale Flächenbedarf der in Deutschland genutzten nachwachsenden Rohstoffe (NaWaRo) stieg allein mit $3,9 \cdot 10^6$ Hektar im Jahre 2006 um das 2,24-fache gegenüber dem Wert von 2004. 2020 soll mit $9,3 \cdot 10^6$ Hektar bereits das 2,4-fache des Bedarfs von 2006 erforderlich werden. Der Anteil energetisch genutzter NaWaRo vergrößert sich nach BAU1-Szenario (Business-as-usual) von 2004 bis 2020 um den Faktor 8 auf 89 % der gesamten NaWaRo.⁷

⁷ vgl. [5] S. 115-116

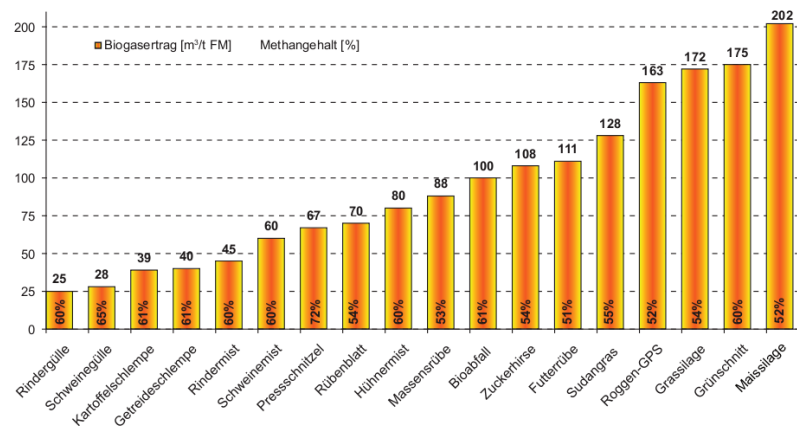


Abb. 4: Biogasertträge verschiedener Substrate
vgl. [1] S. 8

Diese zunehmende Nutzung der nachwachsenden Rohstoffe zur energetischen Nutzung generiert wiederum Probleme:

- abnehmende Biodiversität durch übermäßige Nutzung von Monokulturen,
- steigende Importabhängigkeit für NaWaRo zur stofflichen Nutzung bei inländisch steigendem Energiepflanzenanbau,
- steigende Konkurrenz zur Lebensmittelherstellung (nach einer Rechnung von Jeremy Woods müsste, um lediglich 5 % der Transportenergie bereitzustellen, zwischen 12 % (mit Zuckerrüben) und 45 % (mit Weizenstroh) des Ackerlandes Englands alleinig hierfür bewirtschaftet werden)⁸.

Dem gegenüber steht eine Hochrechnung der Bioreact GmbH welche ausgehend von ihren 1300 statistisch erfassten Biogasanlagen (BGA) und einem angenommenen Flächenverbrauch für den Anbau der eingesetzten NaWaRo zu dem Ergebnis kommt, dass derzeit lediglich ca. sechs Prozent der gesamten Ackerfläche Deutschlands für die Erzeugung von Strom aus Biogas verwendet werden.⁹

Dennoch steigt die Relevanz von Biomasse aus Nebenprodukten, Rückständen und Abfällen. Zu dieser Stoffgruppe gehören Rückstände aus der Land- und Forstwirtschaft (z.B. Stammholz und Waldrestholz), Reststoffe aus Industrie und Gewerbe (z.B. Schlachthofabfälle, Gemüsereste), sowie Siedlungsabfälle. Jene meist feuchten und heterogenen Stoffe kommen, so sie lignin-arm sind, für biochemische Umwandlung zur Energiegewinnung in Frage, da durch die auftretende Methangärung ein breites Spektrum der organischen Verbindungen abgebaut werden kann.

⁸ vgl. [5] S. 110 ff; [6]

⁹ vgl. [30]

Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die produktionsspezifischen Abfallmengen und den Methanertrag einiger Abprodukte.

Tab. 1: Übersicht über Anfall und Methanertrag einiger industrieller Abprodukte im Vergleich zu NaWaRo
vgl. [4] S. 163; [11] S. 17; [14] S. 95

Sektor	Substrat	typische produktions- spezifische Abfallmengen	typische oTS- Gehalte [%]	Methanertrag [l/kg _{oTS}]
NaWaRo	Maissilage		20 – 35	340
Getreideverarbeitung	Kleie, Spelzen, Teigreste, Retourware	0,2-0,3 kg · kg ⁻¹ Getreide	85 – 97	374
	Obst-, Gemüse- und Kartoffelverarbeitung	Weintrester Briertreber Kartoffelschlempe	0,2 – 0,3 kg · l ⁻¹ Wein 0,25 kg · l ⁻¹ Bier 1 – 3 kg · l ⁻¹ Ethanol	33 – 55 12 – 25 5 – 9	416 – 483 342 – 450 232 – 455
Zuckerherstellung	Zuckerrübenschnitzel Melasse	0,7 kg · kg ⁻¹ Zucker	23 68 - 81	430 252 – 367,5
	Grün und Rasenschnitt	Grünschnitt	variabel	10,5 302 – 442

Hochgerechnet auf die Produktionsmengen ergäbe sich in Deutschland mit $300 \text{ kg} \cdot (\text{EW} \cdot \text{a})^{-1}$ Frischmasse bzw. $80 \text{ kg} \cdot (\text{EW} \cdot \text{a})^{-1}$ Trockenmasse produktionsspezifischer organischer Abfälle so ein erhebliches Potential zur energetischen Nutzung.

Die „Agentur für erneuerbare Energien“ errechnete für den Fall, dass die derzeit für Bioenergie genutzten Reststoffe in Deutschland, würden diese extra angebaut werden, einer Fläche von $2,6 \cdot 10^6$ ha entsprechen würden. Dabei bliebe ein Drittel der verfügbaren Reststoffe immer noch ungenutzt.¹⁰

Reststoffe aus der Obst-, Gemüse und Kartoffelherstellung (wozu auch Trester zählen) fallen mit ca. 10 – 30 % des Rohmaterials an. Allerdings wird ein Großteil dieser Rückstände bisher als Futtermittel genutzt, kompostiert oder sogar als Ausgangsprodukt für andere Stoffe (z.B. Alkohol, Suppen, Kosmetika) genutzt und steht somit nicht zur energetischen Nutzung zur Verfügung.

Treber, eines der Abprodukte der Bierherstellung, welches die cellulosehaltigen Hülsen des Malzes enthält, fällt mit ca. $20 \text{ kg} \cdot \text{hl}^{-1}$ Bier an. Aufgrund des enthaltenen Stickstoffs und der pflanzlichen Fette wird aber auch dieser Stoff bevorzugt zur Tierfütterung verwendet.¹¹

¹⁰ vgl. [56]

¹¹ vgl. [4] S. 157ff

1.2 Phasen der Biogasbildung

Biogas wird durch den anaeroben Abbau vergärbare Substrate von Mikroorganismen gebildet. Als Modell können vier aufeinander folgende Abbaustufen unterschieden werden. Das Abbauprodukt der vorherigen Stufe stellt hierbei jeweils die Nahrungsgrundlage für die folgende dar. Dabei sind bei jeder Stufe andere Mikroorganismen beteiligt, welche entsprechend eigene Optima hinsichtlich ihrer Lebensbedingungen besitzen. In der Praxis lassen sich diese Phasen besonders bei einstufiger Vergärung nicht voneinander trennen. Es ist daher essentiell, den engen Rahmen, der durch die verschiedenen Ansprüche der Mikroorganismen entsteht, einzuhalten, sodass die Symbiose der einzelnen Phasen nicht gefährdet wird.¹²

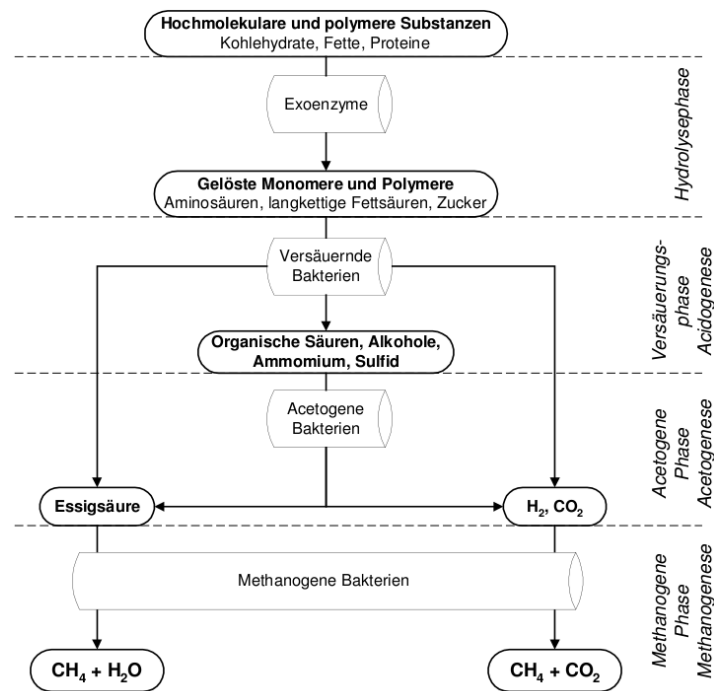


Abb. 5: Mikrobiologischer Weg des mehrstufigen anaeroben Abbaus organischer Materialien zu Biogas vgl. [25] S. 8

1.2.1 Hydrolyse

In der ersten Phase, der „Hydrolyse“, werden hochmolekulare Stoffe, wie Polysaccharide, Lipide und Proteine in einfache, niedermolekulare Stoffe zerlegt. Dies geschieht durch fakultativ und obligat anaerobe Bakterien durch die Ausschüttung extrazellulärer Enzyme – sogenannter Hydrolasen. Dabei verbrauchen die fakultativ

¹² vgl. [16] S. 29ff

anaeroben Mikroorganismen den restlichen, im Substrat befindlichen, Sauerstoff und ermöglichen somit (durch ein ausreichend tiefes Redoxpotential) die Existenz anderer Anaerobier. Kleinere Mengen an Sauerstoff, welche z.B. bei der Beschickung oder der biologischen Entschwefelung in den Fermenter eingebracht werden, stellen daher keine Gefährdung des Prozesses dar. Die Hydrolyse kann (z.B. bei Kohlenhydraten) wenige Stunden aber auch mehrere Tage (z.B. bei lignocellulose- und ligninhaltigen Fraktionen) in Anspruch nehmen und somit, je nach Einsatzstoff, vom treibenden zum hemmenden Prozess des Abbaus werden.¹³

1.2.2 Acidogenese

Die gebildeten Monomere und Oligomere werden nun von den selben Bakterien der Hydrolyse in kurzkettige organische Säuren (z.B. Essigsäure, Propionsäure, Buttersäure), Alkohole (Methanol und Ethanol), sowie Wasserstoff und Kohlendioxid umgewandelt. Als Folge dieser Umsetzung sinkt der pH-Wert des Fermentats und es entstehen geruchsintensive Stoffe. Werden Proteine abgebaut, entsteht vermehrt Ammoniak, welches als starke Base die gebildeten Säuren neutralisiert. Der optimale pH-Wert dieser, sowie der vorhergehenden Phase, liegt bei 4,5 – 6.¹⁴

1.2.3 Acedogenese

In der nun angrenzenden, „essigsäurebildenden“ Phase werden die gebildeten organischen Säuren und Alkohole zu Essigsäure, Wasserstoff und Kohlendioxid umgewandelt. Die Bildung von Essigsäure bedingt aber einen geringen Wasserstoffpartialdruck, welcher nur durch die Umwandlung in Methan durch die methanogenen Bakterien geschehen kann. Je geringer dabei der Wasserstoffpartialdruck ist, desto schwächer exergon verläuft die Methanisierung und desto stärker exergon die acetogenen Reaktionen. Für einen optimalen Gärverlauf muss sich daher eine an die Substratbelastung angepasste Symbiose aus acetogenen und methanogenen Mikroorganismen ausbilden.¹⁵

13 vgl. [16] S. 29ff; [25] S. 9

14 vgl. [13] S. 2.1-2.2; [25] S. 10-11

15 vgl. [25] S. 11-12; [13] S. 2.2; [14] S. 25

1.2.4 Methanogenese

Abschließend wird von strikt anaeroben methanogenen Bakterien hauptsächlich Wasserstoff und Kohlendioxid (welches als Kohlenstoffquelle und Elektronenakzeptor fungiert) bzw. Hydrogencarbonat umgewandelt. Einige Methanogene sind auch in der Lage, Essigsäure direkt umzusetzen und eine bekannte Spezies kann Methanol direkt in Methan umwandeln. Diese finale Reaktion ist nicht nur durch Sauerstoff gefährdet, sondern auch durch wasserstoffbindende Inputstoffe. Ermöglicht z.B. ein sulfathaltiger Stoff die Reduktion zu Schwefelwasserstoff, wird eine konkurrierende Wasserstoffsенke geschaffen, welche mit ihrem Reaktionsprodukt wiederum die methanogenen Bakterien hemmt.¹⁶

¹⁶ vgl. [25] S. 14-15; [13] S. 2.4

1.3 Einflussfaktoren des Biogasprozesses

1.3.1 Temperatur

Die maximale Aktivität und Wachstumsrate der meisten Bakterienarten wird bei Temperaturen von 20 °C – 40 °C erreicht. In diesem als „mesophil“ bezeichnetem Bereich liegen auch die Optima der meisten der Gülle entstammenden Bakterien, da deren Biologie und Enzyme an den Stoffwechsel im Tierinneren angepasst sind. Indes sich die Reaktionsgeschwindigkeit bei einer Erhöhung um 10 K verdoppelt, scheint es erstrebenswert zu sein, eine möglichst hohe Temperatur (z.B. im thermophilen Bereich zwischen 50 °C und 57 °C) für den anaeroben Abbau zu wählen. Doch dies ist mit folgenden Nachteilen verbunden:

- Das thermische Optimum der spezialisierten Bakterien ist sehr eingeschränkt. Wird es überschritten (wie für die Hygienisierung von Substraten erforderlich) kann es zu einer Denaturierung der Enzyme und damit zum Abbrechen des Prozesses führen.
- Höhere Temperaturen mindern die Lösungsfähigkeit des Substrates gegenüber Gasen. Aufgrund eines somit erhöhten Austreibens von Kohlendioxid verringert sich die Carbonat-Pufferkapazität.
- Das Verhältnis von Ammonium zu Ammoniak verringert sich (zu Ungunsten der Bakterien).
- Weil der anaerobe Abbau nur schwach exotherm verläuft, vergrößert sich der Energieaufwand mit steigender Temperatur.

Da innerhalb der einzelnen Temperaturbereiche positive Auswirkungen durch erhöhte Temperaturen kaum nachweisbar sind und zudem Mikroorganismen empfindlich auf Temperaturschwankungen reagieren, sollte eine Temperatur gewählt und gehalten werden, welche die größtmögliche Stabilität verspricht.

In der Praxis entspricht dies (wie in Abbildung 6 dargestellt) einer Temperatur von 38 – 42 °C.¹⁷

¹⁷ vgl. [28]; [14] S. 26-27;

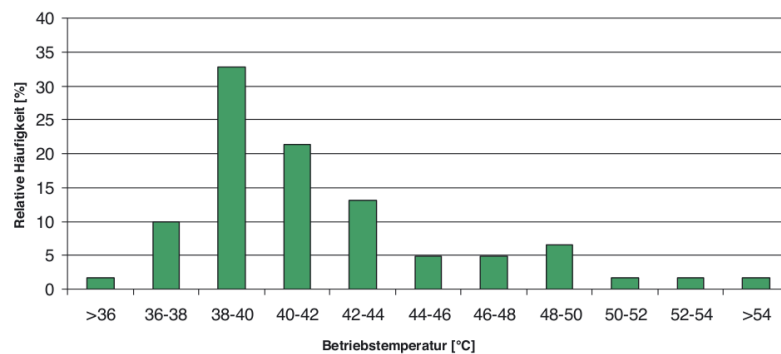


Abb. 6: Relative Häufigkeitsverteilung der mittleren Betriebstemperaturen der Biogasanlagen
vgl. [48] S. 86

1.3.2 pH-Wert und Gehalt an Fettsäuren

Die verschiedenen für den anaeroben Abbau zuständigen Bakterien bevorzugen ebenfalls unterschiedliche pH-Werte. Während die hydrolisierenden und säurebildenden Bakterien einen sauren pH-Wert von 4,5 – 6,3 bevorzugen, benötigen die essigsäure- und methanbildenden Bakterien einen neutralen pH-Wert von 6,8 – 7,5. Da die erstgenannten Bakterien ebenfalls in diesem Bereich existieren können, ist es geboten, in einstufig-geführten Fermentern (in welchen alle Prozesse an einem Ort ablaufen) einen neutralen pH-Wert zu halten.

In einem optimalen Abbauprozess stellt sich dieser Wert automatisch ein, da ein niedrigerer pH-Wert den Anteil an freien organischen Säuren (FOS) erhöht, führt dies damit ebenso zu einer Vermehrung des Nährstoffangebotes für die acetogenen und methanogenen Bakterien. Wird die Ausbildung großer negativer Abweichungen des pH-Wertes vom neutralen Bereich (z.B. durch eine zu geringe Pufferkapazität) nicht ausreichend gedämpft, kann ein so „übersäuertes“ Fermentat die methanogenen Bakterien hemmen, die Aktivität der acidogenen Bakterien aber steigern, was zu einer weiteren Versäuerung und schlussendlich zum Abbruch des Prozesses führt.

Werden vermehrt Proteine abgebaut, so führt dies durch die Bildung von Ammoniak zu einem Anstieg des pH-Wertes, was die Bakterienkultur ebenfalls zunehmend hemmen kann.

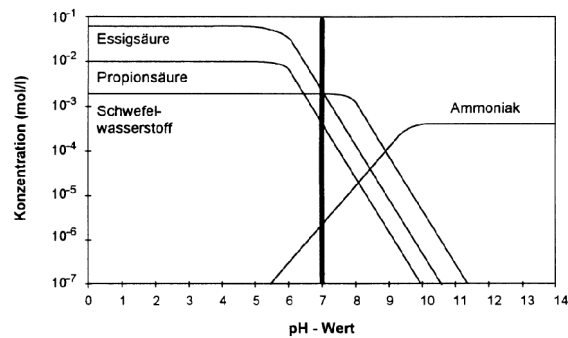


Abb. 7: Undissoziierte Anteile wichtiger Substrate und Hemmstoffe in Abhängigkeit vom pH-Wert vgl. [25] S. 18

Abbildung 7 stellt die Konzentration verschiedener Prozess-Indikatoren in Abhängigkeit des pH-Wertes dar. Da für den leicht sauren Bereich das Kohlendioxid-Hydrogencarbonat-Puffersystem und für den leicht alkalischen Bereich das Ammoniak-Ammonium-Puffersystem wirken, werden Änderungen des Prozesses erst verzögert und meist zu spät über eine Änderung des pH-Wertes erkannt. Hingegen kann ein gesteigerter Essigsäure- und Propionsäuregehalt das drohende Umschlagen eines Prozesses mitunter lange im Voraus anzeigen. Als kritische Konzentration für wasserdampfflüchtige organische Säuren (angegeben als Essigsäureäquivalent) gilt $3000 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$, für Propionsäure sollte die Konzentration unter $600 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ liegen.¹⁸

1.3.3 Nährstoffversorgung und Hemmstoffe

Für einen stabilen Prozessablauf sollte ein ausgewogenes Verhältnis um das Optimum von 600 : 15 : 5 : 1 der Nährstoffe C : N : P : S vorliegen. Fällt beispielsweise das C/N-Verhältnis zu Ungunsten des Stickstoffs aus, so wird der vorhandene Kohlenstoff nicht vollständig umgesetzt. Ist Stickstoff aber im Überfluss vorhanden, kommt es zur Bildung von Ammoniak.

Wie sich die theoretische Methanausbeute anhand der Anteile an Proteinen, Kohlenhydraten und Fetten berechnen lässt, wird im Anhang A - 2.1 erörtert. Neben dem Gehalt an Nährstoffen ist das Vorhandensein von Spurenelementen unter anderem für den Zellaufbau der Mikroorganismen essentiell.

Die erforderlichen Konzentrationen hierfür werden in Tabelle 2 aufgezeigt.

¹⁸ vgl. [25] S. 16ff; [14] S. 27; [11] S. 24

Tab. 2: Erforderliche Konzentrationen einiger Spurenelemente für einen optimalen anaeroben Abbau
vgl. [25] S. 34

Substanz	Kobalt	Molybdän	Nickel	Selen	Chrom	Mangan	Blei
Konzentration [mg · l ⁻¹]	0,06	0,05	0,006	0,008	0,005 – 50	0,005 – 50	0,002 – 200

Durch die Zugabe von Gülle in ausreichendem Maße wird die Spurenelementversorgung meist schon sichergestellt. Findet aber eine Monovergärung (also die alleinige Vergärung meist nachwachsender Rohstoffe) statt, kann der Abbauprozess durch einen Mangel an Spurenelementen verringert oder sogar gefährdet werden. Um dem vorzubeugen, sollte deren Gehalt regelmäßig überprüft und, wenn nötig, durch die zusätzliche Gabe von Spurenelement-Präparaten aufgestockt werden.

Der anaerobe Abbau kann nicht nur durch einen solchen Mangel behindert werden, sondern auch durch Überfluss – von Hemmstoffen. Da die Grenzwerte für kritische Konzentrationen in der Literatur stark von einander abweichen, wird auf die Auflistung solcher Hemmstoffe und deren Konzentrationen verzichtet. Die Divergenz der Werte kann auf die vielen verschiedenen Faktoren, welche die Toxizität bestimmen, zurück geführt werden.

Die kritischen Konzentrationen können z.B. abhängig von der Zusammensetzung des Ausgangsmaterials, von der Adaptionzeit, der Intensität der Zugabe sowie von Wechselwirkungen untereinander anhängig sein. Bei der Klassifizierung der Hemmstoffe ist zwischen Stoffen, welche von Außen in das System eingebracht werden und Stoffen, welche als Zwischenprodukte aus den einzelnen Phasen des Abbaus hervorgehen zu unterscheiden. Stoffe, welche bereits in geringen Mengen schädlich wirken, können Antibiotika, Lösungsmittel, Herbizide oder Schwermetalle sein. Als Zwischenprodukte wirken Schwefelwasserstoff sowie Ammoniak in höheren Mengen toxisch.¹⁹

¹⁹ vgl. [14] S. 27-28; [4] S. 862-864; [25] S. 24ff

1.4 Verfahrenstechnische Betriebsparameter

1.4.1 Faulraumbelastung

Als Faulraumbelastung wird – je nach Fachgebiet – die Menge des „chemischen Sauerstoffbedarfs“ (CSB) bzw. die Masse organischer Trockensubstanz (oTS) verstanden, welche je Volumeneinheit in den Fermenter gegeben werden. Auf den CSB wird sich zumeist in der Abwasseraufbereitung bezogen.

Die Faulraumbelastung beschreibt direkt die Leistungsfähigkeit einer Anlage. Entsprechend ist es ökonomisch von Interesse, einen möglichst hohen Wert zu erreichen. Allerdings lässt sich ein hoher Abbaugrad nicht mit einer beliebig hohen Faulraumbelastung erreichen. Ebenso kann eine zu hohe Faulraumbelastung zusammen mit einer niedrigen Verweilzeit die Stabilität des Abbauprozesses gefährden. Da das eingesetzte Substrat, die Leistungsfähigkeit des Fermentats, die Bauweise des Fermenters sowie die Verweilzeit die maximale Faulraumbelastung beeinflussen, kann nur ein Bereich angegeben werden, welcher für Biogasanlagen zwischen $0,5$ und $5 \text{ kg}_{\text{oTS}} \cdot (\text{m}^3\text{d})^{-1}$ liegt.²⁰

Die Berechnung der Faulraumbelastung wird im Anhang A - 2.3 erläutert.

1.4.2 Hydraulische Verweilzeit

Die hydraulische Verweilzeit gibt die kalkulierte Zeitdauer – wie lange das Inputsubstrat im Fermenter verbleibt – an. Mit ihr verbindet sich eine je nach Einsatzfeld unterschiedliche Bedeutung. In der Abwasseraufbereitung gilt sie als Kenngröße, wie viel Inputmaterial pro Zeiteinheit in der Anlage umgesetzt werden kann. Bei Biogasanlagen (in welchen Substrate mit höheren Trockensubstanzgehalten eingesetzt werden) beschreibt eine hohe hydraulische Verweilzeit ein ebenso großes benötigtes Fermentervolumen.

Auch dieser Wert lässt sich nicht beliebig senken, denn mit einer niedrigen Verweilzeit einher geht ein nur ungenügender Abbau besonders bei Substraten, welche schwer verdaulich sind. Ist die Verweilzeit zudem geringer als die längste Wachstumsrate einer am anaeroben Abbau beteiligten Bakterienart, so kommt es durch den ständigen Substrataustausch mit der Zeit zum Ausspülen dieser Art.

²⁰ vgl. [4] S. 871-872; [11] S. 22

Da hierbei besonders methanogene Bakterien betroffen sind, hat die Verweilzeit eine direkte Auswirkung auf die Prozessstabilität. Mit technischen Maßnahmen, wie der Rückführung ausgetragener Biomasse (z.B. dem Belebtschlammverfahren) oder der Fixierung von Biomasse (z.B. in Festbetten) durch geeignete Einbauten im Fermenter, lässt sich die hydraulische Verweilzeit unter Umständen weiter senken als für die Vermehrung der Bakterien eigentlich erforderlich wäre. Dies wird durch das Halten bzw. Erhöhen der Aufenthaltszeit nicht gelöster partikulärer Stoffe (SRT: Solid Retention Time) ermöglicht.²¹

Als Richtwerte werden eine Verweilzeit von mehr als achtzig Tagen bei der Co-Fermentation von Gülle und NaWaRo (bei einer maximalen Raumbelastung von 2 bis 4 $\text{kg}_{\text{oTS}} \cdot [\text{m}^3\text{d}]^{-1}$) bzw. mehr als hundert Tagen bei der Monovergärung von NaWaRo (bei einer maximalen Raumbelastung von 3 $\text{kg}_{\text{oTS}} \cdot [\text{m}^3\text{d}]^{-1}$) angegeben.²²

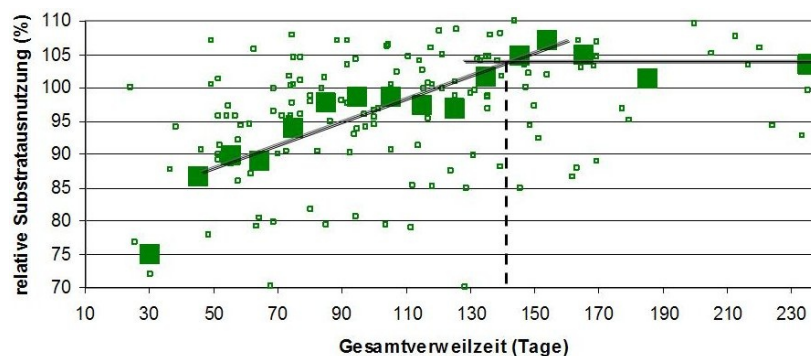


Abb. 8: Beziehung zwischen hydraulischer Verweilzeit und der zur KTBL relativen Substratausnutzung von Anlagen mit weniger als $\frac{1}{3}$ Eintrag durch Gülle vgl. [12]

In der Praxis arbeiten Biogasanlagen im Schnitt mit einer Verweilzeit von 114 Tagen.²³

Abbildung 8 zeigt den direkten Zusammenhang zwischen Substratausnutzung und Verweilzeit auf. Zur Berechnung der Verweilzeit siehe Anhang A - 2.4.

²¹ vgl. [4] S. 870-871; [14] S. 29

²² vgl. [11] S. 22

²³ vgl. [29]

2 Material und Methoden

2.1 Ausgangsmaterialien

2.1.1 Apfeltrester der Kelterei „Sachsenobst“

Auf Löß-/Lößlehmböden baut die Firma Obstland bei mittleren Jahrestemperaturen von 8,6 °C, einer jährlichen Sonneneinstrahlung von 1612 h und einem jährlichen Niederschlag von 570 mm · m² unter anderem folgende Apfelsorten an:

- Golden Delicious, Idared, Jonagold, Elstar, Delbarestivale, Gloster, Gala, Roter Boskoop, Pinova, Pilot²⁴

In der Hauptsaison von Ende August bis Anfang November fielen 2010 in der Kelterei „Sachsenobst“ GmbH in Ebersbach 5000 – 6000 t Äpfel an. Damit war dieses Jahr im Vergleich zu ergiebigeren Jahren mit einer Ernte von 7000 – 8000 t Äpfeln wenig erfolgreich. Der jährliche Anfall an Apfeltrester (dem flockig, fast schon pastösen Pressrückstand des Apfels) lässt sich aus der relativen Ausbeute der Pressung von 75 % errechnen und beträgt demnach jährlich 1250 – 2000 t. Täglich entspricht dies von Montag bis Donnerstag einem mittleren Tresteranfall von 20 t, bzw. unter Volllast von 25 t.²⁵

Zusätzlich werden von Juli bis August 1000 t Kirschen (mit 80 %er Ausbeute) und 40 t schwarze Johannesbeeren verarbeitet. Bisher wird der in der Kelterei angefallene Trester für die Tierfütterung (firmenfremder Parteien) verwendet.²⁶

Die Probenahme erfolgte am Montag, dem 04.10.2010 zwischen 10:30 Uhr und 11:30 Uhr in der Kelterei „Sachsenobst“. Der vorhandene Apfeltrester lagerte seit der letzten Pressung am vergangenen Freitag (also seit drei Tagen) bis zur Probenahme in drei offenen Containern mit einem Fassungsvermögen von jeweils 8 – 10 t.

24 vgl. [22]

25 vgl. [46], [40]

26 vgl. [23]



Abb. 9: Probenahme des Apfeltresters
vgl. [9]

Die Proben wurden dabei ausschließlich aus den beiden Containern genommen, welche keiner direkten Sonneneinstrahlung ausgesetzt waren. Für eine repräsentative Gesamtprobe wurden, nachdem die oberste Schicht des Apfeltresters abgehoben wurde, Mischproben von verschiedenen Orten und Tiefen der Schüttung entnommen und in die in Abbildung 9 sichtbaren Spanndeckelfässer gegeben. Diese wurden nach einer ca. vierstündigen Fahrt im Landesbetrieb Hessisches Landeslabor – Standort Eichhof (LHL Eichhof) eingefroren.

Da eine ökonomische Verwendung des Apfeltresters in einer Biogasanlage dessen Haltbarkeit und Stabilität bedingt, wurde ein Teil des Apfeltresters noch am Tag der Probenahme für die Silierung aufbereitet. Hierzu wurde der Trester in sechs luftdichte Siliergläser eingestampft und bis zur ersten Öffnung am 10.12.2010 mehr als acht Wochen unter Verschluss gehalten.



Abb. 10: Siliergläser am 04.10.2010
vgl. [9]



Abb. 11: Siliergläser am 10.12.2010
vgl. [9]

Es zeigte sich, dass der Trester bereits kurz nach dem Einbringen in die Siliergläser hörbar ausgaste. Dies trieb sogar den Trester am folgenden Tag (wie Abbildung 12 zeigt) aus den Siliergläsern. Nach dem Reinigen und erneuten Abdichten der Siliergläser verlief der weitere Prozess aber stabil.

Ab dem 19.10. wurde ein leichter Schimmelansatz bei den Gläsern (1) und (6) entdeckt, welcher sich vom Deckel her bis maximal drei Zentimeter in die Tiefe ausbreitete. Bis zum Tag der Öffnung des ersten Silierglases (2) wiesen die Gläser (1), (6) und (3) einen leichten Schimmelansatz auf. Bräunliche Verfärbungen der Trestersilage (siehe Abbildung 11) wurden bei allen Gläsern mit Ausnahme dem Silierglas (3) beobachtet.



Abb. 12: Herausquellen des Tresters am 05.10.2010 vgl. [9]



Abb. 13: Schimmelansatz des silierenden Tresters am 17.11.2010 vgl. [9]

Der fruchtige Geruch des frischen Tresters war nun dem herben, leicht alkoholischen Geruch der Trestersilage gewichen. Die während der Lagerzeit aufgetretenen Silierverluste wurden durch Wägung ermittelt und betrug absolut 132 g. Bezogen auf die Einwaage nach der letzten Reinigung der Siliergläser (mit insgesamt 12577 g) ergibt dies einen relativen Verlust von 1,05 % (bei 12 % Varianz zwischen den einzelnen Gläsern).

Auch der nicht silierte Apfeltrester wies ein ähnliches Verhalten auf. Wurde eingefrorener Apfeltrester aufgetaut und beschickt, so war auch dort ein Ausgasen des Substrates durch die Wölbung des Deckels des Fünf-Liter-Eimers (welcher zur Aufbewahrung des aufgetauten Tresters genutzt wurde) bemerkbar. Ebenso veränderten sich Konsistenz und Geruch des nur gekühlten Tresters. Die Charge aufgetauten Tresters, welche vom 8. bis zum 40. Versuchstag beschickt wurde, nahm z.B. von einer anfänglichen trocken-flockigen Konsistenz eine eher heterogen-breiige Form an. Der Geruch wandelte sich ebenfalls von angenehm-süßlich zu herb-alkoholisch.

Nach Empfehlung der Deutschen Landwirtschaftsgesellschaft e.V. sind für die Bewertung von Grünfuttersilagen folgende Kennwerte (so Empfehlungen vorliegen) einzuholen:

- Ermittlung der Gärqualität nach DLG-Bewertungsschlüssel
- Sensorische Bewertung nach DLG-Sinnenbewertungsschlüssel
- aerobe Stabilität

Zwar gehört Apfeltrester nicht zum Grünfutter, dennoch lässt es sich als Gärungssilage eines „Nebenproduktes der Ernährungsindustrie“ nach den oben genannten Bewertungsschlüsseln der Gärqualität einschätzen.²⁷ Für weitere Bewertungen liegen für Obsttrester keine Empfehlungen vor. Verfärbungen, Schimmelbildung, Verunreinigungen und übermäßige Gärverluste sind aber hier, wie auch bei Grünfutter, als negativ zu deuten. Durch den nicht nachweisbaren Buttersäureanteil sowie den geringen Essigsäuregehalt (Glas „4“: 1,78 %TS) und den sehr niedrigen pH-Wert erreicht die Apfeltrestersilage den Maximalwert von hundert, welches einer sehr guten Silagequalität entspricht.²⁸

Tab. 3: Analyseergebnisse für Apfeltrester und Apfeltrestersilage

	TS	oTS	Roh- asche	Roh- proteien	Roh- faser	Roh- fett	pH- Wert	Dichte	Methan- ertrag
	[%FM]	[%TS]	[%TS]	[%TS]	[%TS]	[%TS]	-	[g · l ⁻¹]	[l · kg _{oTS} ⁻¹]
Trester - eigene Untersuchung²⁹	21,5	98					3,83	1037	475,64*
Trestersilage – eigene Untersuchung ³⁰	18,6	97,9					3,28		447,21**
Untersuchung LKS GmbH von 2008³¹	20,1	97,5	2,5	5,8	28,9	5,4			271
Literaturangabe: FNR ³²	20 - 45	85 - 90							429 - 476
KTBL³³	22,7	93,5							282

* Ertragssumme aus Batch-Versuch
 ** aus der Endphase des kontinuierlichen Versuchs des mit Trestersilage beschickten Fermenters 80

27 vgl. [33] S. 2-3

28 vgl. [10] - „Probenanalytik“, [33] S. 2-3

29 vgl. [10] - „Probenanalytik“

30 vgl. [10] - „Probenanalytik“

31 vgl. [24] - Apfeltrester

32 vgl. [14] S. 88

33 vgl. [11] S. 18

2.1.2 Maissilage des „LLH Eichhof“

Während des Praktikums fanden zwei unterschiedliche Maissilagen Verwendung. Bis zum 56. Versuchstag des kontinuierlichen Versuchs wurde eine Maissilage aus dem Jahr 2008, mit Herkunft aus den umliegenden Feldern des LLH Eichhof, eingesetzt. Maissilage wird im LLH Eichhof anteilig zur Fütterung der 264,7 Großvieheinheiten³⁴ und mit $2,7 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ zur Beschickung der eigenen Großbiogasanlage eingesetzt. Als abzusehen war, dass die Maissilage nicht mehr ausreicht, wurde am 14.10.2010 neuer Mais aus Neukirchen gehäckselt und sechs Wochen siliert.³⁵ Für die Gärversuche wurde die Maissilage einmal pro Woche aus dem Foliensilo des LLH genommen und in Fünf-Liter-Eimern aufbewahrt.

Tab. 4: Analyseergebnisse für Maissilage

	TS	oTS	Roh- asche	Roh- proteien	Roh- faser	Roh- fett	pH- Wert	Dichte	theoret. Methan- ertrag*	Methan- ertrag
	[%FM]	[%TS]	[%TS]	[%TS]	[%TS]	[%TS]	-	[g · l ⁻¹]	[l · kg _{oTS} ⁻¹]	[l · kg _{oTS} ⁻¹]
„2008“ – eigene Untersuchung³⁶	35,2	97						1063,1	285,1*	367,9***
									bzw.	349,1**
„2008“ - externe Untersuchung ³⁷	36,14	96,7	3,31	7,16	18,16	3,15	3,89			
„2010“ - eigene Untersuchung³⁸	29,7	96					3,86	1023,7	280,6*	412,8***
									bzw.	340,4**
„2008“ - externe Untersuchung ³⁹	29,74	96,1	3,86	7,71	19,92	2,92	3,92			
Literaturangabe: FNR⁴⁰	20 - 35	85 - 95								225-385
KTBL ⁴¹	33	95								340

* Berechnung nach VDI 4630 im Anhang A - 2.1; ** Berechnung nach WEIßBACH im Anhang A - 2.1
*** korrigierter Mittelwert aus kontinuierlichem Gärversuch

34 eine Großvieheinheit (GVE) entspricht 500 kg Lebendgewicht eines Nutztieres

35 vgl. [17]

36 vgl. [10] - „Probenanalytik“

37 vgl. [18] - „Maissilage 2008“

38 vgl. [10] - „Probenanalytik“

39 vgl. [18] - „Maissilage 2010“

40 vgl. [14] S. 88

41 vgl. [11] S. 18

Wie Tabelle 5 zeigt, differiert der TS-Gehalt aufgrund der großen Unterschiede bzgl. der Lagerdauer beider eingesetzter Maissilagen erheblich. Gemessen am DLG-Bewertungsschlüssel für den Gärerfolg, erreicht die jüngere Maissilage mit einem Buttersäureanteil unterhalb der Nachweisgrenze, einem Essigsäureanteil von 1,32 %TS und einem pH-Wert von 3,86 ebenfalls eine sehr gute Gärqualität⁴².

Da die Faserlänge beider Silagen in unbehandeltem Zustand eine Beschickung durch den $\frac{3}{4}$ -Zoll-Zugang der Fermenter nahezu unmöglich machte, mussten beide Silagen mit einem „Thermomix“ der Firma Vorwerk ein bis zwei Minuten bei Stufe 2,5 zerkleinert werden.

Es ist davon auszugehen, dass die damit einhergehende Vergrößerung der aktiven Oberfläche einen beschleunigten Abbau der Silage und zusammen mit der kurzen Verweilzeit einen erhöhten Methanertrag zur Folge hatte.

Das KTBL geht jedoch davon aus, dass eine Substratverkleinerung kaum positiven Einfluss auf die Gasausbeute hat.⁴³

2.1.3 Stallgülle des „LLH Eichhof“

Die Stallgülle des LLH setzt sich zusammen aus Harn, Kot, Reinigungswasser und sonstigen Abfällen einer Tierhaltung, welche sich aus $\frac{1}{3}$ Schweinezucht und $\frac{2}{3}$ Milchviehhaltung zusammensetzt. Der TS-Gehalt der Gülle, welche im Abstand von zwei Wochen direkt aus dem Güllebecken entnommen wurde, schwankte erheblich. Durch die zwei „Null“-Versuche konnten die damit einhergehenden Ertragschwankungen aber korrigiert werden und eine regelmäßige Bestimmung des TS-Gehaltes entfiel.

Zur Beschickung wurde die Stallgülle zusammen mit Wasser in die Fermenter gegeben und zwischen diesen Zeiten (luftdicht verschlossen) gekühlt gelagert.

42 vgl. [10] - „Probenanalytik“, [33] S. 2-3

43 vgl. [11] S. 23

Tab. 5: Analyseergebnisse für Stallgülle

	TS [%FM]	oTS [%TS]	N [%TS]	NH4 [%TS]	Dichte [g · l ⁻¹]	Methanertrag [l · kg _{oTS} ⁻¹]
eigene Untersuchung⁴⁴	11	80,4			995,3	224,53*
Literatur: FNR ⁴⁵	7,7 – 9,7	75 – 83,3	3,7 – 10,5	1,7 – 8,3		145 – 503,3
Literatur: KTBL⁴⁶	8,7	80				223,3

* korrigierter Mittelwert aus kontinuierlichem Gärversuch

2.1.4 Fermentergülle des „LLH Eichhof“

Zum „Animpfen“ aller Fermenter wurden 15 kg Fermentergülle als Inoculum⁴⁷ direkt aus der Großbiogasanlage des Landesbetriebes Landwirtschaft Hessen (LLH) entnommen. Der außergewöhnlich hohe pH-Wert der Fermentergülle ermöglichte es, die Fermenter des kontinuierlichen Gärversuches nach der Strategie der maximalen Belastung schnell anzufahren.

Tab. 6: Analyseergebnisse für Fermentergülle

	TS [%FM]	oTS [%TS]	N [g · l ⁻¹]	pH
eigene Untersuchung ⁴⁸ für				-
... Batch-Gärttest	3,9	68,3		
... kontinuierlichen Gärversuch	4,9	72,3	30,3	7,84

44 vgl. [10] – „Probenanalytik“

45 vgl. [14] S. 86 – 87 (errechnet aus $\frac{2}{3}$ Rindergülle und $\frac{1}{3}$ Schweinegülle)

46 vgl. [11] S. 18 (errechnet aus $\frac{2}{3}$ Rindergülle und $\frac{1}{3}$ Schweinegülle)

47 das Inoculum wird zum Animpfen einer Kultur hinzugegeben und steht für „Impfkultur“

48 vgl. [10] – „Probenanalytik“

2.2 Diskontinuierlicher Gärtest (Batch-Versuch)

Der mit relativ geringen Aufwand durchführbare Gärtest erlaubt generelle Aussagen zum möglichen Biogasertrag, zum Abbau, sowie dessen Geschwindigkeit und einer möglichen Hemmwirkung des eingesetzten Stoffs. Hierbei wird das zu vergärende Substrat dem Inoculum zugesetzt und die entstandene Mischung in einem gasdichten und temperierten Behälter mehrere Tage gelagert.

Das dabei entstehende Biogas wird nun entweder durch die Vergrößerung des Probengefäßes⁴⁹, durch den dabei entstehenden Überdruck⁵⁰ im Probengefäß, durch Verdrängung einer Sperrflüssigkeit⁵¹ oder durch Auffangen in einem Folienbeutel (Gasbag) und anschließender Erfassung via Gaszähler gemessen.

Eine typische Auswertung dieses Versuchs stellt das Auftragen der gemessenen Biogasrate und des Methangehaltes nach der Verweilzeit dar. Da das verwendete Inoculum ebenso Biogas emittiert, sollte zusätzlich zum eigentlichen Versuch mit dem zu untersuchenden Substrat ein sogenannter Null-Versuch durchgeführt werden, in welchem ausschließlich das Inoculum vergoren wird.

Das aus dem zu untersuchenden Substrat entwickelte Gas kann nun ermittelt werden, indem das dort gebildete Gas um das (auf das Verhältnis des eingesetzten Inoculums korrigierte) Gas des Null-Versuchs dezimiert wird. Um die Aktivität des Inoculums zu überprüfen und zusätzlich eine Vergleichbarkeit mit anderen Gärtests zu ermöglichen, kann außerdem in einem weiteren Versuch dem Inoculum eine Standard-Lösung, deren Biogasertrag bekannt ist, zugesetzt werden. Meist handelt es sich hierbei um mikrokristalline Cellulose⁵².

2.2.1 Apparativer Aufbau

Die Biogasertragsermittlung mittels Gärtest wird im LHL Eichhof u.a. durch die oben zuletzt genannte Variante (der Gasvolumenmessung mittels Folienbeutel) erfasst. Abbildung 14 verdeutlicht deren prinzipiellen Aufbau.

49 z.B. Hohenheimer Biogasertragstest

50 z.B. DIN EN ISO 11734: Gasvolumenmessung mittels Gasdruckmessgerät

51 z.B. DIN 38414-8: Gasvolumenmessung mittels Eudiometerrohr

52 vgl. [8] S. 45 ff

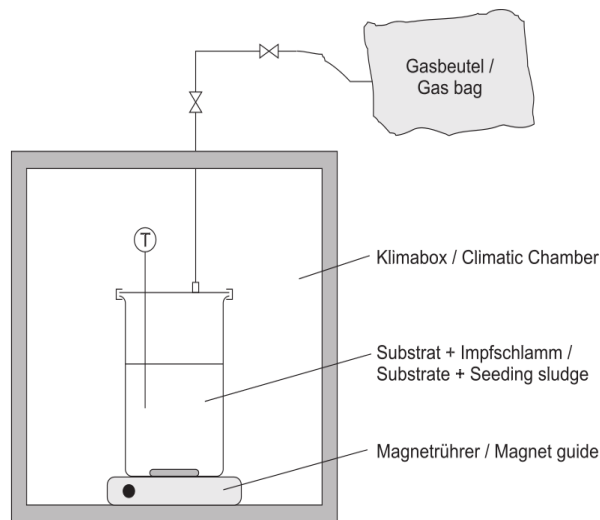


Abb. 14: Gasvolumenmessung mittels Folienbeutel
vgl. [8] S. 48



Abb. 15: Aufbau eines Reaktors für Batch-Versuche
vgl. [9]

Konkret wurde das Fermentat in gasdichten zwanzig-Liter-Polyethylen-Gärbehältern der Firma Speidel vergoren. Eine Temperierung im mesophilen Bereich (Richtwert: 37 °C, Schwankungsbreite: 1 °C) wurde durch ein Wasserbad erreicht, welches über einen Temperaturfühler direkt am Heizwassersystem des Labors angeschlossen war und mittels einer Aquariumpumpe umgewälzt wurde. Der Wasserspiegel des Wasserbades war dabei stets höher als der Flüssigkeitsspiegel im Fermenter. Um die thermischen Verluste möglichst gering halten, wurden das Wasserbad selbst und die Fermenter mit Styrodur-Platten ausgekleidet.

Die Durchmischung und den Austrag des Biogases unterstützte ein U-förmig gebogener Rührer, welcher an einer Welle in einem Tauchrohr befestigt war. Die Welle wiederum war an einem Zwölf-Volt-Motor, welcher sonst als Scheibenwischemotor in PKWs genutzt wird, befestigt. Der Motor selbst war auf dem Fermenterdeckel befestigt und wurde durch einen Dreibein, welcher auf den Griffen des Reaktors aufsaß, fixiert.

Um den Stromverbrauch sowie den Verschleiß des Motors in Grenzen zu halten, wurde dessen Tätigkeit mit einer Zeitschaltuhr auf 15 Minuten je Stunde eingestellt. Der Gasaustrag aus dem Fermenter erfolgte durch eine gasdichte Tülle und einen Silikonschlauch und wurde in einem mit Kunststoff beschichteten Aluminiumbeutel (Gasbag) der Größen zehn Liter bzw. sechzig Liter gesammelt.

Abbildung 15 zeigt beispielhaft den Aufbau eines Reaktors für Batch-Versuche, bestehend aus Gärbehälter, Gastülle, Gasschlauch mit Ventil, Gasbag, Umwälzmotor mit Rührer und Schalteinheit sowie der Motoraufhängung.

2.2.2 Versuchsdurchführung

Zu Beginn des Versuchs wurden die verwendeten acht Reaktoren (welche sich aus der Doppelbestimmung jedes Versuchs ergeben) mit ca. 15 Liter frischer Fermentergülle der Großbiogasanlage des Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen befüllt und eine Probe zur TS- bzw. oTS-Bestimmung genommen. Unmittelbar danach wurden – je nach Versuch – folgende Substrate zugegeben:

Tab. 7: Einwaagen der Substrate des Batch-Versuches
vgl. [10] - „Übersicht Batch“

		„Null“	„Referenz“	„Trester 1“	„Trester 2“
Einwaage Cellulose	[g]		100		
Einwaage Apfeltrester	[g]			600	1200
Raumbelastung	[g _{oTS} · l ⁻¹]	-	6	7,9	15,7

Der Apfeltrester wurde vorher am selben Tag aus der Tiefkühl-Zelle gebracht. Nach Verschluss der Reaktoren wurden diese auf ihre Dichtheit überprüft.

Hierzu wurde durch Lufteinblasen durch die Gastülle kurzzeitig ein Überdruck im Fermenter erzeugt und gehalten. Strömte das eingeblassene Gas nach zehn Sekunden noch hörbar aus der Gastülle, so galt der Reaktor als dicht und wurde in das Wasserbad gestellt. Die ersten drei Messungen von Gasertrag und Methangehalt wurden ab dem kommenden Tag im Abstand von 24 Stunden genommen.

Nachfolgende Messungen erfolgten aufgrund der nur noch mäßigen Gasemission deutlich seltener. Der tägliche Gasertrag wurde nun bestimmt, indem der gesamte Gasertrag mit dem Kehrwert des Messabstandes (in Tagen) multipliziert wurde.

Entsprach die tägliche Biogasrate nur noch einem Prozent der bisherigen Gesamtrate, galt das Abbruchkriterium für den Gärtest als erfüllt.⁵³

Dennoch wurde der Gärtest bei allen Reaktoren bis zum Versuchstag 37 weitergeführt.

⁵³ vgl. [8] S. 54

2.3 Kontinuierlicher Gärversuch

Im Gegensatz zum Batch-Versuch, bei welchem lediglich am Anfang Substrat zugegeben wird und welches danach unter Biogasemission ausfällt, erfolgt die Substratzugabe (Beschickung) sowie die Entnahme des Gärrestes im kontinuierlichen Versuch in regelmäßigen Abständen. Zwar erzeugt dieser Versuch (so er nicht automatisiert abläuft) einen deutlich höheren Aufwand, jedoch ermöglichen die darin gewonnenen Daten umfassende Auskünfte zu:

- der Prozessstabilität in Abhängigkeit des verwendeten Substrates, der Faulraumbelastung, der hydraulischen Verweilzeit und der Versuchszeit,
- Bildung und Akkumulation von Stoffwechselzwischenprodukten sowie einem möglichen Mangel an Stoffwechseledukten (z.B. Spurenelementen),
- der optimalen Steuerungsstrategie des Gärprozesses,
- der Qualität des Gärrestes,
- möglichen Biogaserträgen und Methangehalten, da durch das fortwährende Austragen des Gärrestes ebenfalls das Inoculum, welches die Ergebnisse verzerrt, ausgetragen wird.⁵⁴

2.3.1 Apparativer Aufbau

Der Aufbau der Reaktoren ist der Beschreibung für einen einfachen kontinuierlichen Gärtest nach VDI 4630 nachempfunden⁵⁵ und entspricht dem des Batch-Versuchs.

Der Gärbehälter wurde für die Substratzugabe und -entnahme allerdings zusätzlich mit einem Zulauf auf der Oberseite neben dem Deckel versehen. Dieser ist nach außen mit einem $\frac{3}{4}$ -Zoll-Kugelhahn verschraubt, welcher verhindern soll, dass Gas bzw. Gärrest unerwünscht nach außen tritt. Im Fermenterraum endet der Zulauf mit einer Schlauchtülle, an welcher ein Kunststoffschlauch als Tauchrohr befestigt ist, welches wiederum bis ca. fünf Zentimeter an den Fermenterboden heranreicht und somit deutlich unter dem Flüssigkeitsspiegel endet. Dies hat zweierlei Vorteile:

⁵⁴ vgl. [8] S. 59 ff

⁵⁵ vgl. [8] S. 64 ff

Zum einen wird dadurch verhindert, dass beim Öffnen des Kugelhahns Gas aus dem Fermenterraum austritt und zum anderen ermöglicht diese Konstruktion die Entnahme des Gärrestes bei Erzeugen eines Unterdrucks.

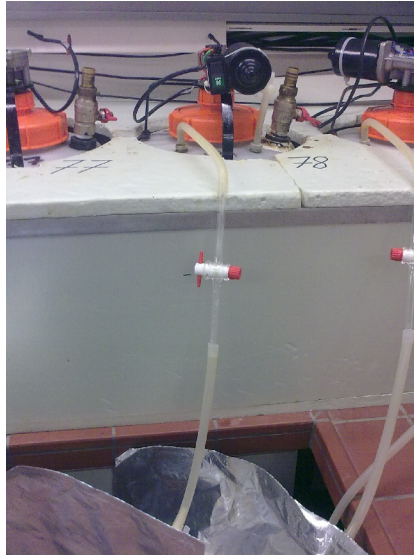


Abb. 16: Versuchsaufbau des kontinuierlichen Versuchs vgl. [9]

Abbildung 16 zeigt den Versuchsaufbau des kontinuierlichen Versuchs. Die Gärbehälter, von welchen einer in Abbildung 15 dargestellt ist, wurden für den Versuch in ein Wasserbecken gestellt und mit Styrodur-Platten thermisch isoliert. Weiterhin sind Kugelhähne der Zuläufe jeweils rechts neben den orangefarbenen Deckeln sichtbar.

2.3.2 Versuchsdurchführung

Die in Planung befindliche BGA in Bockelwitz, für welche die hier beschriebenen Versuche ausgelegt sind, soll zukünftig wie folgt betrieben werden:

Beschickung:

- 14 %FM Gülle (im Verhältnis 3:1 Rinder- zu Schweinegülle)
- 86 %FM Maissilage bzw. entsprechend weniger, sollten industrielle Abprodukte, wie z.B. Apfeltrester und Biertreber zum Einsatz kommen

Faulraumbelastung:

- knapp unter $3 \text{ kg}_{\text{OTS}} \cdot \text{m}^{-3}$

hydraulische Verweilzeit:

- ca. $73 \text{ l}_{\text{Fermenter}} \cdot \text{l}_{\text{Austauschvolumen}}^{-1}$

Wie auch im Batch-Versuch wurden alle Versuche in Doppelbestimmung durchgeführt. Dies ergibt folgende Fermenterkonfiguration:

Tab. 8: Fermenterkonfiguration des kontinuierlicher Versuchs

Variante	„Null“	„Mais“	„Mix“	„Trester“
Fermenternummer	73; 74	75; 76	77; 78	79; 80
Versuchsziel	Gaserträge der anderen Versuche um die der Stallgülle dezimieren	Referenzversuch zu „Mix“	Darstellen von Möglichkeit, Stabilität und Erträgen unter Zugabe von 30% Apfeltrester	Darstellen von Möglichkeit, Stabilität und Erträgen bei Apfeltrester in Monovergärung bzw. unter Zugabe von Stallgülle
Beschickung [%FM]	100 % Stallgülle + (Wasser)	86 % Maissilage 14 % Stallgülle + (Wasser)	56 % Maissilage 30 % Apfeltrester 14 % Stallgülle + (Wasser)	70 – 100 % Apfeltrester 0 – 30 % Stallgülle + (Wasser)
Faulraumbelastung [g _{OTS} · l ⁻¹]	0,94 (Ergibt sich bei doppelter Verdünnung mit Wasser)	min.: 4,5 max.: 6,5	min.: 4,5 max.: 6,5	min.: 4,5 max.: 6,5
hydraulische Verweilzeit	31,5	31,5	31,5	31,5
[l _{Fermenter} · l _{Austauschvolumen} ⁻¹]				

Mit einer zu jedem Zeitpunkt gleichbleibenden hydraulischen Verweilzeit sollte die Vergleichbarkeit trotz unterschiedlicher Beschickung und Faulraumbelastung gewahrt werden.

Eine an die Praxis angelehnte höhere Verweilzeit von beispielsweise 72 Tagen hätte sich zwar positiv auf die Stabilität und auf die Gaserträge auswirken können, die Aussagekraft der Ergebnisse wäre aber erheblich vermindert, da während der Versuchsdauer von 80 Tagen gerade einmal 1,1 Verweilzeiten erreicht würden. Am Ende des Versuches wären daher, wie Abbildung 17 zeigt, immer noch ca. 40 % des Inoculums im Fermentat vorhanden.

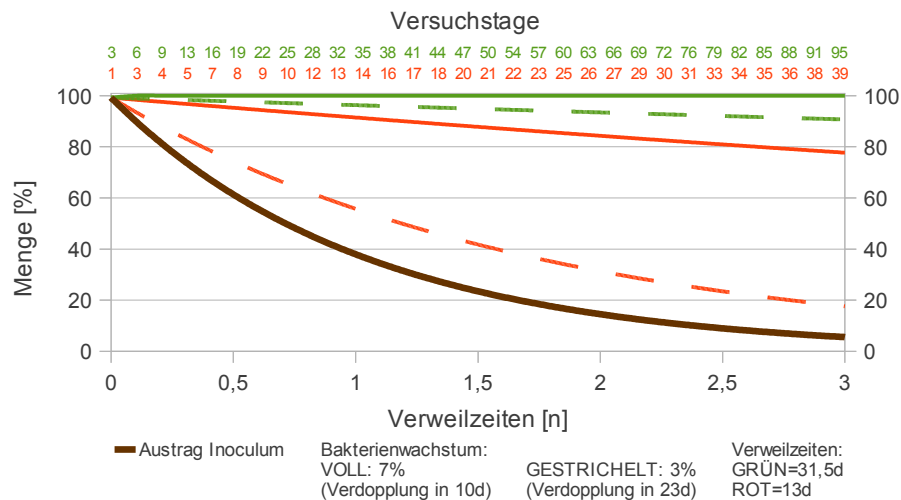


Abb. 17: theoretische Berechnung des Austrages des Inoculums und der Vermehrung anaerober Bakterien
vgl. [10] - „Theorie“

Die Verweilzeit des Versuches wurde auf folgende Bedingungen hin optimiert:

- Es sollte ein möglichst großer Austrag des Inoculums erreicht werden.
Es scheint daher sinnvoll mindestens drei Verweilzeiten durchzuführen, da dann die Änderung der Zusammensetzung des Fermentats nur noch sehr gering ist. Dies würde bei 80 Versuchstagen eine Verweilzeit von 26,67 Tagen ergeben.
- Die Verweilzeit sollte in Biogasanlagen ohne allzu große Ertragseinbußen bzw. einem nach Möglichkeit vollständigen Abbau angelegt sein.⁵⁶
- Das Ausschwemmen von Bakterien sollte nicht größer als deren Vermehrung sein. Abbildung 17 stellt dafür eine Wachstumsrate von drei Prozent⁵⁷ sowie von sieben Prozent⁵⁸ pro Tag dar.
- Es sollten mindestens zwei, bestenfalls jedoch drei Verweilzeiten durchgeführt werden⁵⁹

56 vgl. [12] - lt. Abbildung 3 fällt die relative Substratausnutzung bei Anlagen mit einer Verweilzeit unter 30 Tagen von 90 % stark ab

57 vgl. [13] S. 62 - 64 – es wird von einem täglichen „Biomassewachstum“ von 0,5 - 3 % ausgegangen

58 vgl. [14] S. 29 – es wird von einer Verdopplungsrate von anaeroben Bakterien von 10 Tagen und mehr ausgegangen. Das entspricht einem täglichen Wachstum von 7 %.

59 vgl. [26] – dies wäre nötig um klare Aussagen zur Stabilität des Prozesses zu geben

Als Ergebnis wurde zuzüglich einer Sicherheit⁶⁰ eine Verweilzeit von 31,5 Tagen gewählt. Dieser niedrige Wert konnte jedoch nur mit der Zugabe von Wasser erreicht werden. Dies hatte den Vorteil, dass verdünnte Stallgülle, welche einfacher in den Zugang des Fermenters geschüttet werden konnte, zugegeben wurde. Die Verdünnung wirkte sich allerdings auch nachteilig gegenüber des Informationsgehaltes von pH-Wert, FOS, TAC und Essigsäure aus, da all diese Werte mit zunehmender Anzahl an Versuchstagen durch den Wassereintrag entweder tiefer als normal (FOS, TAC, Essigsäure) oder aber näher am neutralen Bereich (pH-Wert) waren. Da FOS und TAC als FOS/TAC immer im Verhältnis gewertet wurden, wurde hier der Fehler wieder aufgehoben.

Für die verbleibenden Werte könnte – im Zuge einer besseren Vergleichbarkeit mit anderen Anlagen – eine „Wasserkorrektur“ errechnet werden. Hierauf wurde aber verzichtet, da die ermittelten Werte die Biologie des Fermentats repräsentieren. In der Annahme, dass das Aufzeigen der Möglichkeit einer Vergärung mit hoher Faulraumbelastung die Durchführbarkeit bei niedrigerer Faulraumbelastung mit einschließt, wurde die Faulraumbelastung entsprechend höher gewählt. Als Minimum wurde der 1,5-fache Wert und als Maximum der doppelte Wert bezüglich der Auslegungsgröße gewählt. Nach dem Aufbau und Befüllen der Fermenter wurden folgende wiederkehrende Tätigkeiten, sortiert nach Häufigkeit, durchgeführt:

Tab. 9: Wiederkehrende Tätigkeiten im Rahmen des kontinuierlichen Versuchs

Häufigkeit	Tätigkeit	Bemerkung
immer	<ul style="list-style-type: none"> Regelung der Temperatur des Wasserbeckens 	Automatisiert durch „Fema“-Thermoregler
stündlich	<ul style="list-style-type: none"> Vermischen des Fermentats 	Automatisiert durch Zeitschaltuhr und Rührer
täglich	<ul style="list-style-type: none"> Beschickung mit Inputsubstraten (1 – 2 x) Wechsel und Messung der Gasbags auf Gasertrag und Methangehalt Kontrolle der Temperatur des Wasserbeckens 	
aller drei Tage	<ul style="list-style-type: none"> Entnahme des Gärrestes Messung von pH-Wert und FOS/TAC 	
aller neun Tage	<ul style="list-style-type: none"> Messung der Essigsäureäquivalente 	
aller 10 – 20 Tage	<ul style="list-style-type: none"> Wägung der Fermenter 	
bei Bedarf	<ul style="list-style-type: none"> Nachfüllen des Wassers im Wasserbecken 	

⁶⁰ eine Sicherheit ist aufgrund des hohen Fehlerpotenzials aus systematischen und statistischen Fehlern notwendig (Erläuterung siehe Kapitel 4.1)

Beschickung:

Das feste Inputmaterial wurde mit Hilfe eines Kunststoffrohres und eines Trichters, welcher über den Zulauf gestülpt wurde, in kleinen Dosen eingepresst. Der kleine Durchmesser des Zulaufes und die vergleichbar langen Fasern des Inputmaterials erschwerten die Beschickung und führten zu einer starken Belastung der Dichtungen zwischen Zulauf und Gärbehälter.

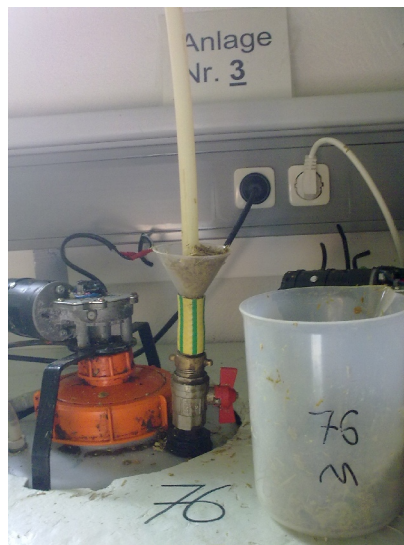


Abb. 18: Beschickung eines Fermenters mit Maissilage
vgl. [9]

Entnahme des Gärrestes:

Da die kleinen Mengen sowie der hohe zeitliche Aufwand einer täglichen Entnahme des Gärrestes entgegen standen, wurde dieser nur im Abstand von drei Tagen entnommen. Korrekterweise sollte daher von einem quasikontinuierlichen Gärversuch gesprochen werden. Die Entnahme erfolgte, wie auch die Beschickung, durch den Zulauf und wurde mittels Unterdruck, durch eine Wasserpumpe erzeugt, ermöglicht und in einer Saugflasche gesammelt. Abbildung 19 stellt den Aufbau, bestehend aus Unterdruckschlauch, Saugflasche, Stopfen und Saugschlauch dar.



Abb. 19: Vorrichtung zur Entnahme des Gärrestes
vgl. [9]

Korrekturwägung:

Um Fehler zu korrigieren, welche durch Beschickung und Entnahme (inklusive deren Berechnung) sowie durch Überlaufen der Reaktoren entstanden, wurden die Reaktoren nach Bedarf im Abstand von ca. zehn bis zwanzig Tagen gewogen. Dazu wurden die Fermenter aus dem Wasserbecken gehoben und auf einer Waage nachgewogen. Die Differenz aus dem realen und dem berechneten Fermentergewicht wurde in einen Korrekturfaktor umgerechnet und auf die Absaugmenge umgelegt.

Inbetriebnahme der Fermenter, Anfahrphase:

Damit das Anfahren möglichst zügig von statten gehen konnte, wurden die Fermenter mit einer Faulraumbelastung von $2 \text{ g}_{\text{OTS}} \cdot \text{l}^{-1}$ angefahren. Diese Belastung wurde täglich um 5 % gesteigert. Dieser Wert ist zwar höher als die vorgeschlagene Maximalsteigerung von $3 \% \cdot \text{d}^{-1}$ ⁶¹, das „ausgehungerte“ Inoculum (mit seinem vergleichsweise hohen pH-Wert) ermöglichte aber eine solche Steigerung, ohne gleich zur Übersäuerung zu führen. Zusätzlich wurden die Anteile der festen Inputsubstrate täglich im selben Maße auf ihr Zielverhältnis gesteigert. Durch die tägliche Steigerung der Faulraumbelastung entspricht die Inbetriebnahme nicht der Maßgabe der VDI 4630, welche rät, die Faulraumbelastung immer um 0,5 Einheiten zu erhöhen, wenn die tägliche Methanproduktion über mindestens vier Tage konstant ist. In den meisten Fällen würde dies einer Steigerung aller 14 Tage entsprechen. Eine zugleich seltene,

⁶¹ vgl. [13] S. 2-64

dann aber größere Steigerung ist mit dem kontinuierlichen Bakterienwachstum nicht vereinbar und wurde daher abgelehnt. Die Steigerung der Faulraumbelastung wurde eingestellt, wenn die Methanerträge zurückgingen oder die Werte beider Fermenter eines Versuchs nicht mehr als vergleichbar galten sowie ein wiederholtes Überlaufen der Fermenter die Stabilität des Abbauprozesses in Frage stellte.

Belastungsphase:

Sobald die maximal mögliche Faulraumbelastung sowie die Zielkonfiguration der Beschickung erreicht war, wurde versucht das hohe Belastungslevel so lange zu halten bis entweder die Messwerte (z.B. durch das Überlaufen der Fermenter) dauerhaft verfälscht wurden oder der Prozess irreversibel umzukippen drohte.

Endphase:

Drohte ein Fermenter umzukippen, wurde die Faulraumbelastung zurückgefahren. Es wurde folgend versucht die Fermenter so zu betreiben, dass ein weiterer Umschlag unwahrscheinlich war.

War die Fermenterbiologie bereits umgeschlagen, hatte dies die Herausnahme aus dem Vergleich mit anderen Fermentern zur Folge. Es wurde nun

- individuell entweder die Beschickung eingestellt, so dass den Methanogenen genügend Zeit gelassen wurde das angestaute Säurepotential abzubauen,
- der Rührmotor außer Betrieb genommen, so dass Bakterienkulturen zumindest an Regionen mit höherem pH-Wert lebensfähig waren und sich von dort aus ausbreiten konnten,
- vermehrt oder ausschließlich Stallgülle beschickt, damit die Pufferkapazität (durch verstärktes Einbringen von Carbonat-Ionen) gesteigert wurde oder
- notfalls durch die Zugabe von Löschkalk ($\text{Ca}[\text{OH}]_2$) die gebildete Säure neutralisiert.

3 Ergebnisse

Folgend werden die Ergebnisse des Batch-Versuchs sowie des kontinuierlichen Versuchs vorgestellt. Dabei werden die Durchführung sowie die Ergebnisse erläutert. Eine Interpretation der Ergebnisse findet untergliedert in Thesen in Kapitel 4.2 statt. Statistische und systematische Fehler werden in Kapitel 4.1 erörtert.

3.1 Biogasertragsermittlung

Wie bereits in Kapitel 2.2 besprochen, ermöglichen die einmalig beschickten Batch-Versuche generelle Aussagen zu den im kontinuierlichen Betrieb zu erwartenden (maximalen) Biogas- und Methanerträgen. Der zeitliche Verlauf der Gasbildung lässt sich mit typischen Verläufen (siehe Abbildung 20) vergleichen.

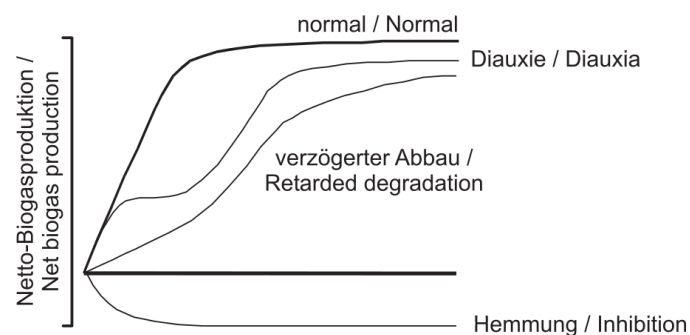


Abb. 20: Typische Verläufe von Gasbildungskurven
vgl. [8] S. 59

In der Tendenz liegen die im Versuch ermittelten Werte deutlich höher als die theoretisch ermittelten Erträge⁶². Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass die Zugabe von Substraten zum Inoculum dessen Aktivität anregt und somit mehr Biogas vom Inoculum gebildet wird, als in der Null-Variante.⁶³

62 siehe 2.1

63 vgl. [26]

3.1.1 Variante „Null“

Die zur Ermittlung der Gaserträge (welche aus den Co-Fermentaten gebildet werden) eingesetzten Fermenter der Variante „Null“ zeigen eine leicht verzögerte, dennoch typische Gasbildung. Auffallend sind jedoch die großen Abweichungen der jeweiligen Gaserträge, wie die jeweils dunkleren Fehlerbalken zeigen.

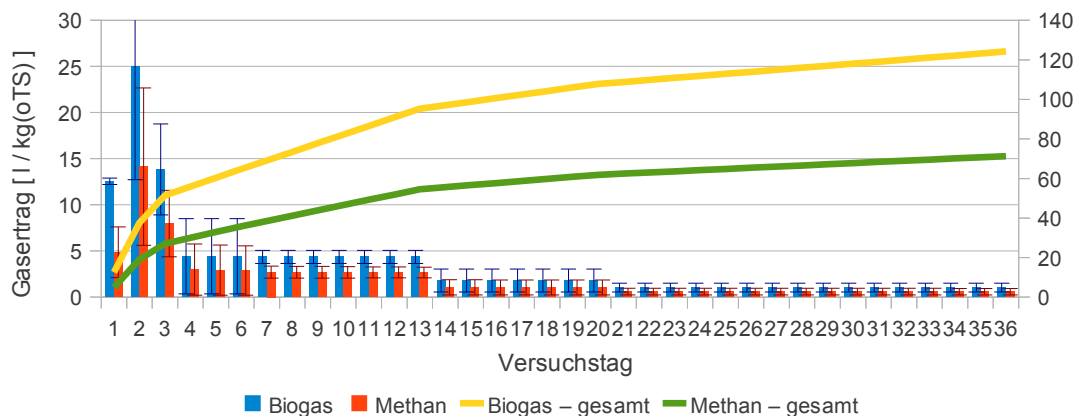


Abb. 21: Gasausbeute des Inoculums (Fermentergülle)
vgl. [10] - „Diagramme Batch“

Die Ertragssumme von $71,86 \text{ l} \cdot \text{kg}_{\text{oTS}}^{-1}$ Methan sowie der sehr niedrige Trockensubstanzgehalt von 3,89% deuten auf ein ausreichend ausgefaltetes Inoculum hin. Eine übermäßige Verfälschung der folgenden Ergebnisse wird somit unwahrscheinlich.

3.1.2 Cellulose als Referenz

Mit einem gesamten Biogasertrag von $867,31 \text{ l} \cdot \text{kg}_{\text{oTS}}^{-1}$ liegt die Referenzprobe weit über der nach VDI zu erwartenden Gasmenge von $740 - 750 \text{ l/kg}_{\text{oTS}}$ ⁶⁴. Ein Grund hierfür wurde bereits in Kapitel 3.1 genannt. Da die zu überprüfende Aktivität des Inoculums deutlich übertroffen wurde, könnte ein „Herunterrechnen“ der Erträge der anderen Substrate sinnvoll erscheinen. Dem widerspricht jedoch folgende Sachlage:

- Es ist fraglich, dass die Aktivität des Inoculums bei jedem Substrat gleichwertig gesteigert wird.
- Bessere Bedingungen (als die Optimalen) können nicht existieren, ergo auch nicht zurück gerechnet werden.

⁶⁴ vgl. [8] S. 53

- Die Erträge der Batch-Versuche unterscheiden sich zwar im Vergleich zu den theoretisch ermittelten Gaserträgen, nähern sich dafür den Erträgen aus dem kontinuierlichen Versuch an⁶⁵.

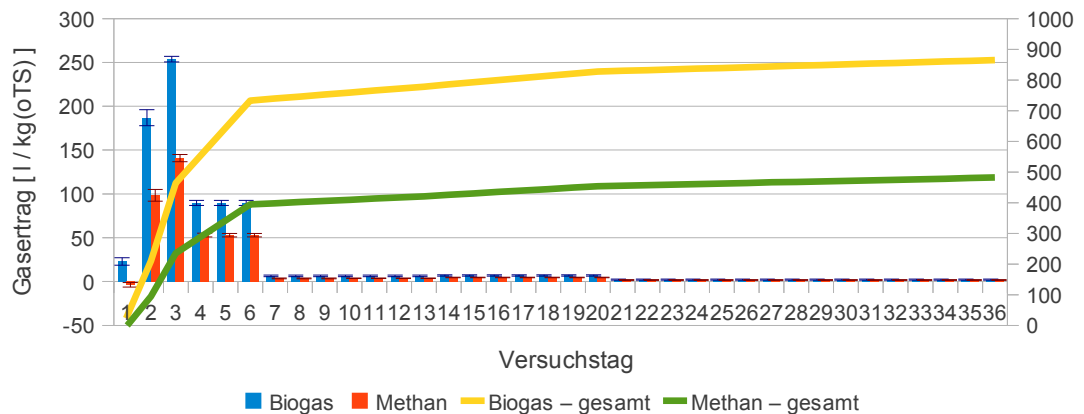


Abb. 22: Gasausbeute des Co-Fermentats (Cellulose)
vgl. [10] - „Diagramme Batch“

3.1.3 Apfeltrester

Auch die Gasbildungskurven für Apfeltrester (siehe Abbildung 23 und 24) entsprechen weitestgehend einem normalen Abbau. Allerdings sind beide Fermenter, welche mit 1200 g beschickt wurden am ersten bzw. vierten Tag übergelaufen. Das damit einhergehende zu starke Absinken des pH-Wertes sowie der Gasaustritt während des Überlaufens und während der Reinigung der Gastülle verminderte den mittleren Methanertrag im Vergleich zur 600 g-Einwaage um $83,3 \text{ l} \cdot \text{kg}_{\text{oTS}}^{-1}$ auf $392,3 \text{ l} \cdot \text{kg}_{\text{oTS}}^{-1}$. Auch verläuft die Gasbildung bei den Fermentern mit 1200 g leicht verzögert und nicht entsprechend der potentiellen Regression in Abbildung 23. Allerdings wurden beide Varianten mit einer Raumbelastung von 7,9 bzw. $15,7 \text{ g}_{\text{oTS}} \cdot \text{l}^{-1}$ deutlich über der maximalen Belastung des kontinuierlichen Versuchs gefahren. Die Methanerträge im Kontext der Literaturwerte sind in Kapitel 2.1.1 dargestellt.

⁶⁵ vgl. Kapitel 4.2.1

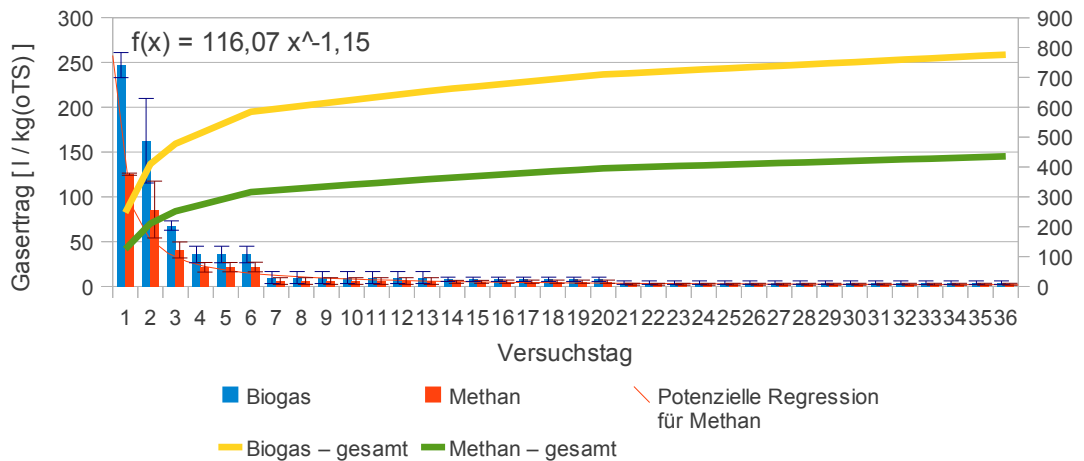


Abb. 23: Gasausbeute des Co-Fermentats (Apfeltrester 600 g)
vgl. [10] - „Diagramme Batch“

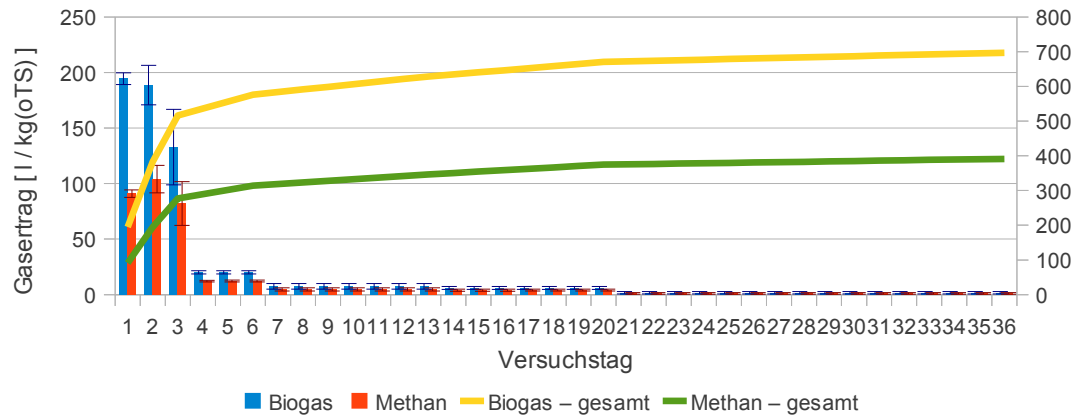


Abb. 24: Gasausbeute des Co-Fermentats (Apfeltrester 1200 g)
vgl. [10] - „Diagramme Batch“

3.1.4 Maissilage

Da die im kontinuierlichen Versuch eingesetzte Maissilage nicht im Batch-Versuch auf ihren Ertrag hin untersucht wurde, wird für den ermittelten Methanertrag in Kapitel 4.2.1 (zur theoretischen Berechnung eines Substratmixes mit Apfeltrester) ein Ertragspotential aus dem Archiv des Labors genutzt, welches als vergleichbar galt⁶⁶.

66 vgl. [10] - „Diagramme Batch“ - Maissilage GO 513 41-43 aus Archiv des LHL vom 13.09.2006

3.2 Kontinuierlicher Versuch

Zur Darstellung des kontinuierlichen Versuchs wird wie folgt vorgegangen:

- Überblick über Verlauf, Vorfälle und gefahrene Lastgrenzen
- Erläuterung von Besonderheiten
- Vorstellen der Versuchsergebnisse in Form von Diagrammen

3.2.1 Erläuterung der dargestellten Diagramme

Generell:

- Mit Ausnahme der Variante „Null“ werden die Fermenter am Ende der Belastungsphase individuell betrachtet, da jeweils ein Fermenter umgeschlagen oder im Umschlag begriffen war.

Diagramm: Gaserträge und Raumbelastung (als Beispiel: Abb. 25)

- Dargestellt wird der Biogas- und Methanertrag, welcher mittels des Anstieges der Regressionsgerade aus Gasertrag und Füllzeit auf eine Gasemission von 24 Stunden korrigiert wurde. Die in den jeweiligen Farben auf den Balken aufgesetzten Fehlerbalken stellen dabei die Unterschiede der beiden eingesetzten Fermenter dar. Ist kein Fehlerbalken eingezeichnet, so wurde für den jeweiligen Versuchstag nur ein Fermenter gewertet, da der Gasertrag des jeweils anderen (z.B. wegen eines Gasaustritts) nicht gewertet werden konnte. Wurde die Beschickung ausgesetzt, so entsteht eine Lücke im Diagramm.
- Zum Ausgleich biologischer Schwankungen wurde ein Drei-Tages-Mittelwert des Methanertrages als gelber Graph hinzugefügt. Aufgrund der Abhängigkeit des Gasertrages von der Faulraumbelastung⁶⁷ wurde diese als grüner Graph ebenfalls eingetragen.
- In den Abbildungen 29, 36 und 43 sind zudem direkt unter den Versuchstagen in Form von Abkürzungen markante Vorfälle dargestellt. Die Buchstaben vor dem Bindestrich beziehen sich dabei auf den Fermenter mit der jeweils kleineren Fermenternummer.

⁶⁷ vgl. [16] S. 59

Eine genauere Beschreibung der Vorfälle zeigt die Darstellung des Versuchsablaufes im Anhang A - 5 (z.B. in den Tabellen 21 bis 23).

Diagramm: pH-Wert des Gärrestes (als Beispiel: Abb. 26)

- Als Messpunkt eingetragen wurde der anfängliche pH-Wert des Inoculums sowie die folgenden (meist im Abstand von drei Tagen) gemessenen und Temperatur-korrigierten Werte. Die Fehlerbalken an den Messpunkten geben den jeweiligen Unterschied beider Fermenter wieder.

Diagramm: Korrelation des relativen Gasertrages zur Füllzeit (als Beispiel: Abb. 28)

- Zur Motivation und Berechnung der Zeitkorrektur siehe Anhang A - 2.6.
- Dargestellt wird jeder (zeitlich nicht korrigierte) Gasertrag im Verhältnis zu einem mittleren Gasertrag, welcher sich aus dem jeweiligen Mittelwert von fünf Tagen ergibt. Für die Zeitkorrektur wird ein linearer Zusammenhang zwischen dem somit ermittelten relativen Gasertrag und der Füllzeit des Gasbags angenommen (siehe blaue Gerade), welche der realen Gasemission aber nur bedingt entsprechen kann.
- Durch die Darstellung von Gasertrag und Füllzeit können zudem Rückschlüsse auf die Geschwindigkeit der Gasbildung innerhalb eines Tages gezogen werden.

Diagramm: theoretische Zusammensetzung des Fermentats (als Beispiel: Abb. 27)

- Zur Motivation und Berechnung der Zusammensetzung siehe Anhang A - 2.12.
- Als farbige Kurven wird der theoretisch ermittelte volumetrische Anteil der Substrate des Fermentats in Abhängigkeit der durchlaufenen Verweilzeiten und Versuchstagen dargestellt. In den Abbildungen 33, 40 und 47 wird zusätzlich am rechten Rand die Zusammensetzung des Fermentats angegeben, welche sich nach unendlich vielen Verweilzeiten einstellen würde.
- Diese Berechnung ist rein theoretischer Natur. Für homogene und flüssige Substrate mag sie mit einem recht geringen Fehler zutreffen, bei den verwendeten Inputsubstraten steigt der mögliche Fehler aber mit zunehmender Anzahl an Versuchstagen an.⁶⁸

68 vgl. 4.1

Diagramm: FOS/TAC und Essigsäureäquivalente des Gärrestes (als Beispiel: Abb. 31)

- Analog zum Diagramm „pH-Wert des Gärrestes“ stellt dieses Diagramm FOS/TAC und Essigsäureäquivalente dar. Da sich die Größen beider Messwerte unterscheiden, stellen alle linken Ordinaten das dimensionslose Verhältnis FOS/TAC und alle rechten Ordinaten die Essigsäureäquivalente dar.

Diagramm: Beschickungsverhältnis der Frischmassen (als Beispiel: Abb. 32)

- Hier stellen aufeinander gestellte Balken das Beschickungsverhältnis der Frischmassen dar. Da Wasser direkt keinen Einfluss auf den Methanertrag hat, wird es bei diesem Diagramm nicht betrachtet. Wurde die Beschickung ausgesetzt, so entsteht eine Lücke im Diagramm.

Diagramm: Korrelation von Methanerträgen und Raumbelastung beider Fermenter

- Durch die verkürzte Abbauzeit und das vermehrte Auswaschen der Bakterien besteht ein Zusammenhang zwischen der Gasausbeute und der Raumbelastung⁶⁹. In der Vermutung, dass diese Abhängigkeit für die untersuchten Varianten unterschiedlich ist, wird in diesem Diagramm der Methanertrag beider Fermenter der jeweiligen Variante über der Raumbelastung dargestellt. Regressionsgeraden sollen dabei eine tendenzielle Korrelation beider Größen aufzeigen.

69 vgl. [16] S. 59

3.2.2 Variante „Null“

Von allen täglich anfallenden Tätigkeiten abgesehen, fielen bei beiden ausschließlich mit Stallgülle betriebenen Fermentern 13 weitere Maßnahmen⁷⁰ an, davon zwei aufgrund von technischen Problemen. Diese bestanden aus einem defekten Rührmotor (welcher ausgetauscht wurde) und einem Gasaustritt durch einen defekten Gasbag. Im Vergleich zu den anderen Varianten liefen beide Fermenter ausgesprochen stabil.

Da anfänglich versucht wurde mittels einer festen Verdünnung von 2:1 Wasser zu Gülle die erwünschte Verweilzeit bei allen Fermentern zu erreichen, wurden beide Reaktoren über den gesamten Versuchszeitraum mit einer so verdünnten Gülle betrieben.

Nach einigen Tagen stellte sich heraus, dass die erzielten Größen von Beschickungsverhältnis, Faulraumbelastung und Verweilzeit lediglich mit der Zugabe von Wasser in variabler Menge eingehalten werden konnten. Fortan wurde für jede Variante eine andere Verdünnung eingesetzt.

Da aber die Variante „Null“ unter möglichst gleichbleibenden Bedingungen gefahren werden sollte, blieb es bei der Verdünnung von 2:1. Dadurch wurde über den gesamten Versuchszeitraum eine Raumbelastung von $0,94 \text{ g}_{\text{OTS}} \cdot \text{l}^{-1}$ erzielt.

Naturgemäß unterliegt der TS-Gehalt der Stallgülle teils starken Schwankungen, welche mehr die Biogasrate als den Methanertrag verändern. Auf eine stetige Korrektur der Variablen Dichte und TS bzw. $\text{TS} \cdot \rho_{\text{TS}}^{-1}$ wurde aber aus praktischen Gründen verzichtet zumal der hier entstandene Fehler durch die „Güllekorrektor“ (siehe Anhang A - 2.8) für die anderen Varianten wieder behoben wurde.

Auswertung der angehangenen Versuchsergebnisse von Variante „Null“:

Anhand der Ähnlichkeit der pH-Werte, welche sich um ein Mittel von 7,45 gruppieren, einem einmaligen Minimum von 7,33 und einem Maximum von 7,72 und den oftmals eher marginalen Abweichungen beider Fermenter lässt sich erkennen, dass der Prozess erwartungsgemäß sehr stabil lief.

Der nach dem Anlaufen des Prozesses bis zum 22. Tag kontinuierlich abfallende Methanertrag, welcher am 36. Tag sein Minimum erreichte, kann auf die Ertragseinbußen durch das Austragen des Inoculums hinweisen. Ab dem 37. Tag steigt

⁷⁰ größtenteils im Zusammenhang der Maßnahmen der anderen Varianten

der Methanertrag wieder leicht an, bis er sich bei Werten um $200 - 250 \text{ l} \cdot \text{kg}_{\text{OTS}}^{-1}$ stabilisiert. Der Mittelwert vom 37. bis zum 80. Versuchstag liegt dabei bei $224,53 \text{ l} \cdot \text{kg}_{\text{OTS}}^{-1}$.

Er ist damit nahezu identisch zu dem angegebenen Richtwert des KTBL⁷¹.

Markant ist zudem der scheinbar sehr zügige Abbau der Stallgülle, wie der niedrige Anstieg der Regressionsgeraden aus Abbildung 28 zeigt.

71 siehe Tabelle 5

Fermentation von Stallgülle (Variante "Null")

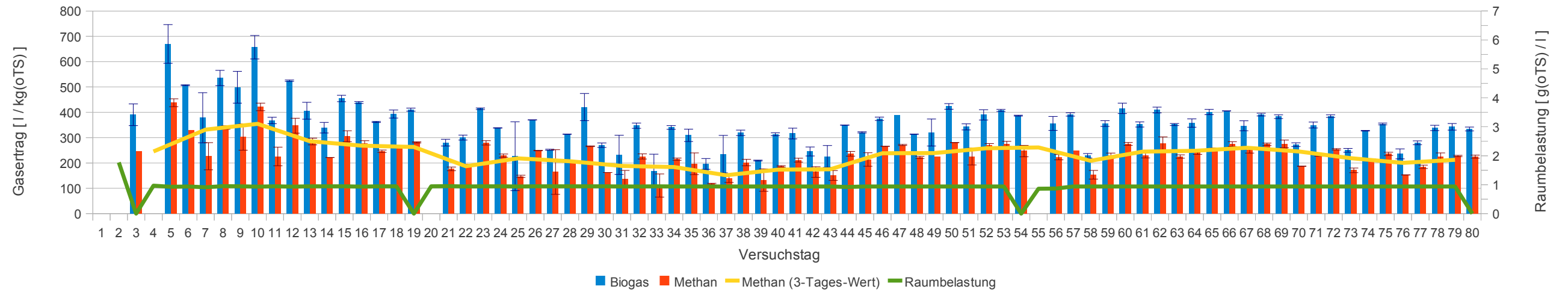


Abb. 25: Gaserträge und Raumbelastung – normiert auf 24 h (Variante „Null“) vgl. [10] - „Diag. 73-74“

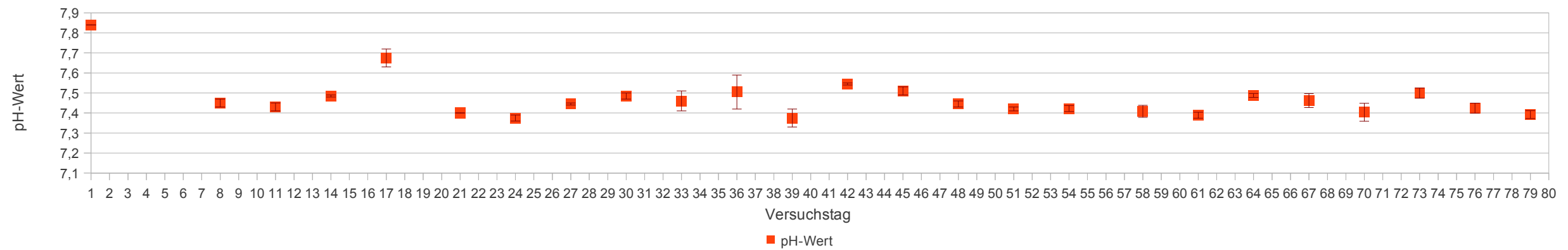


Abb. 26: pH-Wert des Gärrestes (Variante „Null“) vgl. [10] - „Diag. 73-74“

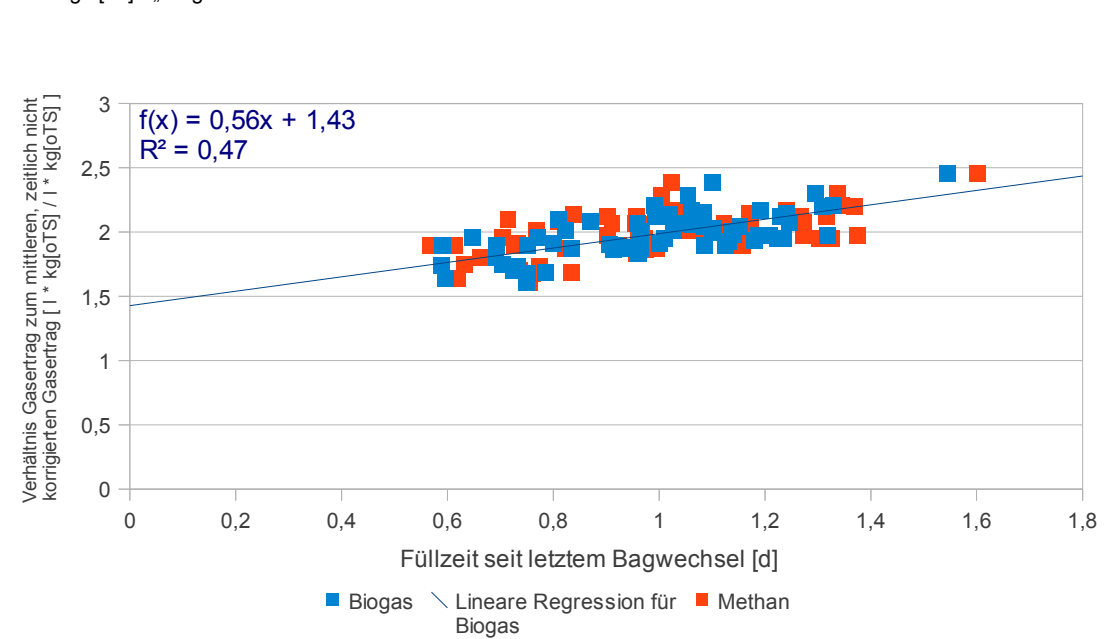


Abb. 28: Korrelation des relativen Gasertrages zur Füllzeit (Variante „Null“) vgl. [10] - „Diag. 73-74“

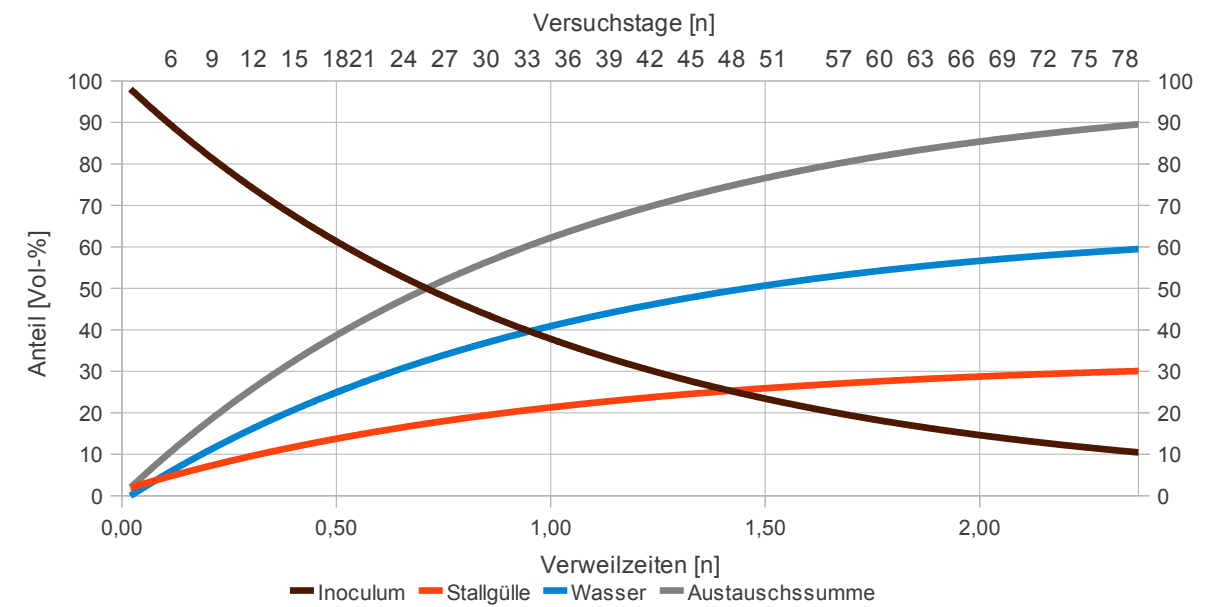


Abb. 27: theoretische Zusammensetzung des Fermentats (Variante „Null“) vgl. [10] - „Diag. 73-74“

3.2.3 Variante „Mais“

Jenseits wiederkehrender Tätigkeiten erforderte der Betrieb der beiden Fermenter der Variante „Mais“ 98 Maßnahmen – darunter waren 33 Vorfälle und 9 technische Fehler.

Da diese Variante als Referenz für die Variante „Mix“ galt, wurde die Raumbelastung meist nur in Verbindung mit der Variante „Mix“ verändert. Dies hatte zu Folge, dass einzelne Fermenter teilweise übermäßig belastet wurden, besonders dann, wenn die andere Variante stabiler lief.

Dabei bedeutete das häufige Überlaufen der Fermenter nicht unbedingt, dass der Abbauprozess gefährdet war, sondern eher dass durch die hohe Belastung (mit dem temporären Absinken pH-Werts) der Carbonatpuffer angegriffen und CO_2 unter Schaumbildung (welcher der Fermenteraufbau nicht gewachsen war) austrieb. Kurzfristig verzehrte dies die Methanerträge, längerfristig gefährdete es die Prozessstabilität. Zu Fehleinschätzungen dieser Prozessstabilität konnten auch Gasaustritte durch Undichtigkeiten von Fermenter oder Gasbag beitragen (z.B. Tabelle 22, Tag 52 - 58), welche oft erst im Nachhinein entdeckt wurden.

Relevante Maßnahmen⁷² der drei Versuchsphasen zeigen die Tabellen 21 bis 23 im Anhang A - 5.1.

Auswertung der angehangen Versuchsergebnisse von Variante „Mais“:

Da die mittleren Methanerträge zusammen mit dem Vergleich des Batch-Versuches und der Literatur in Tabelle 10 des Kapitels 4.2.1 betrachtet werden, sei hier auf eine nähere Betrachtung verzichtet.

Es lässt sich erkennen, dass sich die Methanerträge bis auf wenige Spitzen eher träge in einem überschaubaren Bereich aus statistischem Fehler und biologischer Schwankung von $300 - 400 \text{ l} \cdot \text{kg}_{\text{OTS}}^{-1}$ bewegen. Dabei wird deutlich, dass der Methanertrag kurz nach Erreichen einer maximalen Raumbelastung von $6,7 \text{ g}_{\text{OTS}} \cdot \text{l}^{-1}$ auf ein Minimum $226 \text{ l/kg}_{\text{OTS}}$ absinkt, sich danach aber wieder fängt und für fünf Tage bei einem Mittel von $378 \text{ l} \cdot \text{kg}_{\text{OTS}}^{-1}$ stabilisiert – trotz des anhaltenden Überlaufens der Fermenter. In Abbildung 34 wurde versucht, eine Korrelation der Methanerträge zur Raumbelastung mittels einer Regressionsgerade darzustellen.

⁷² eine ausführliche Liste der Vorfälle siehe [10] - „Reaktortagebuch“

Dabei weisen beide Geraden eine erwartungsgemäß negative Tendenz auf. Der niedrige Korrelationskoeffizient R beider Geraden lässt eine direkte Abhängigkeit der Erträge von der Raumbelastung aber nur schwer belegen.

Scheint der Abbauprozess stabil, so fällt auch der Unterschied beider Fermenter bezüglich der Gaserträgen, aber auch bei den Analyseergebnissen eher gering aus. Ein übermäßiger Unterschied kann daher auf ein technisches Problem oder einen gestörten Abbauprozess hinweisen.

Abbildung 33 vergleicht die theoretische Substratzusammensetzung mit der Zielkonfiguration. Diese wird – zumindest vom Fermenter 67 – nahezu erreicht. Lediglich ein Rest des Inoculums von 11,44 % wäre nach der Berechnung noch im Fermenter enthalten. Im Gegensatz zu Fermenter 76, in welchem sich die Zusammensetzung in den letzten Versuchstagen stabilisiert hat, weicht die des Fermenters 75 aufgrund seines Umschlages und der damit einhergehenden veränderten Beschickung stark vom Ziel ab. Aus diesem Grund wird dieser Fermenter ab 64. Versuchstag – dem Tag des beginnenden Umschlages – nicht mehr für den Vergleich mit den Varianten „Mix“ und „Trester“ hinzugezogen.

Im Vergleich zur Stallgülle besitzt Maissilage einen höheren Anteil an Rohfaser (welche eine schlechtere Verdaulichkeit aufweist). Dies verlängert die Dauer der Hydrolysephase. Der steilere Anstieg der Regressionsgerade von 0,67 (im Gegensatz zu 0,56 bei der Variante „Null“) bestätigt daher die erwartungsgemäß geringere Abbaugeschwindigkeit.

Gleich den Methanerträgen bewegen sich die Werte des FOS/TAC (bis auf drei Ausreißer) bis zum Umschlag des Fermenters 75 in einem Bereich von 0,2 - 0,35. Dies ist in der Mitte der, für einen stabilen Prozess angegebenen⁷³, Grenzen von 0,15 - 0,45. Widersprüchlich ist die abnehmende Tendenz des FOS/TAC bei beiden Fermentern in den letzten zehn Tagen vor dem Umschlag des Fermenters 75.

Auch der pH-Wert, welcher meist zwischen 7,3 und 7,5 liegt, deutet mit dem Sprung von 7,3 auf 7,1 drei Tage vor dem Umschlag nicht eindeutig darauf hin. Werden die pH-Werte beider Varianten aber mit dem Versuchsablauf und der Raumbelastung verglichen so zeigt sich, dass der pH-Wert aufgrund der zuvor verringerten Raumbelastung generell ansteigen sollte. Dies geschah aber nur bei Fermenter 76.

73 vgl. [20] S. 681

Am 42. Versuchstag wurde für den Fermenter 75 ein pH-Wert von 8,16 gemessen. Dessen Richtigkeit darf aber bezweifelt werden. Es wird vermutet, dass hierbei eine für den Fermenter nicht repräsentative Probe ausgewertet wurde.

Dass die Maßnahmen zum „Wiederanfahren“ des umgeschlagenen Fermenters 75 erfolgreich waren, zeigen die Verläufe von pH-Wert und FOS/TAC, welche von 6 bzw. 2,9 innerhalb von zehn Tagen auf 7,3 bzw. 1,5 stiegen bzw. sanken.

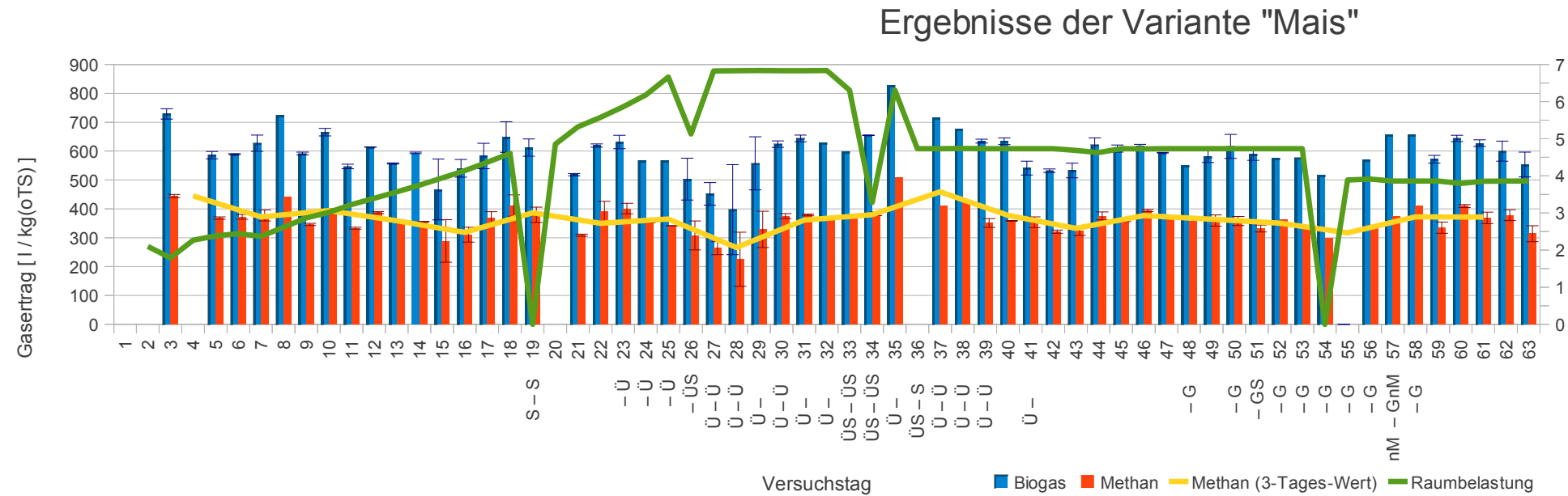
Laut KTBL ist der Großteil der dargestellten Werte zwar im Rahmen der (großzügig) angesetzten Grenzen von 7 bis 8⁷⁴, statistisch liegen diese aber nach der Bioreact GmbH weit unter dem Mittelwert der untersuchten Anlagen von 7,72 sowie dem dort empfohlenen Bereich von 7,4 - 8⁷⁵.

Da die Messwerte der Essigsäureäquivalente lediglich aller neun Tage genommen wurden, zeigen diese nur, dass alle Werte mit 81 - 336 mg · l⁻¹ vor dem 64. Versuchstag weit unter der angegebenen Grenze⁷⁶ von 3000 mg · l⁻¹ liegen. Eine Tendenz für den Umschlag des Fermenters 75 lässt sich nicht erkennen.

74 vgl. [11] S. 24

75 vgl. [32]

76 vgl. [11] S. 24



Kurzinfo: 1. „-“ 2. ... Variante; „nT“/„nM“ ... neuer Trester/Mais; „Ü“ ... Reaktor übergelaufen; „G“ ... Gasaustritt; „S“ ... sonstiger Vorfall

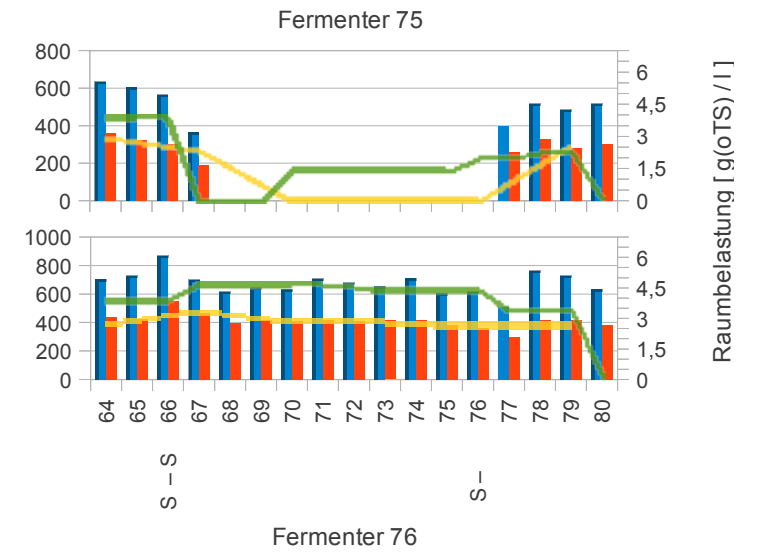


Abb. 29: Gaserträge und Raumbelastung - berichtigt um Fehlerträge, normiert auf 24 h (Variante "Mais")
vgl. [10] - „Diag. 75-76“

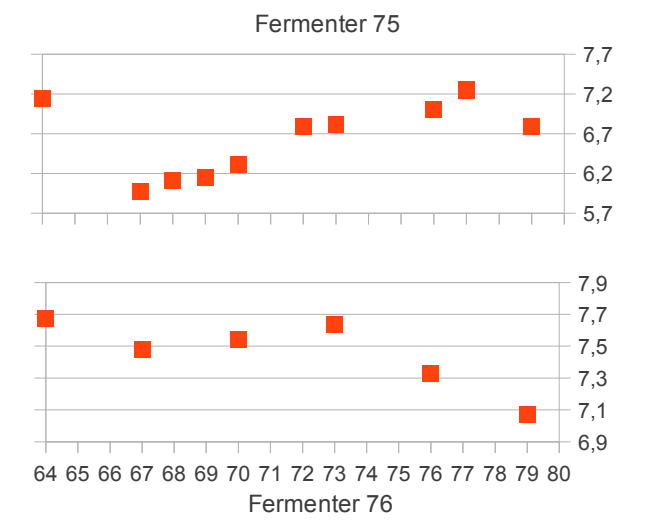
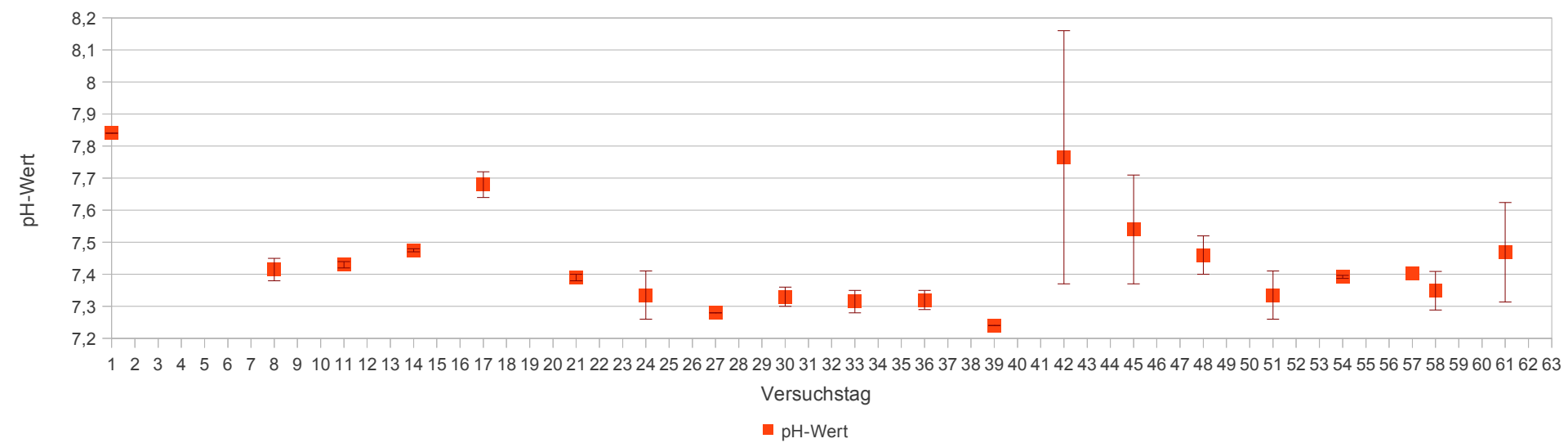


Abb. 30: pH-Wert des Gärrestes (Variante "Mais")
vgl. [10] - „Diag. 75-76“

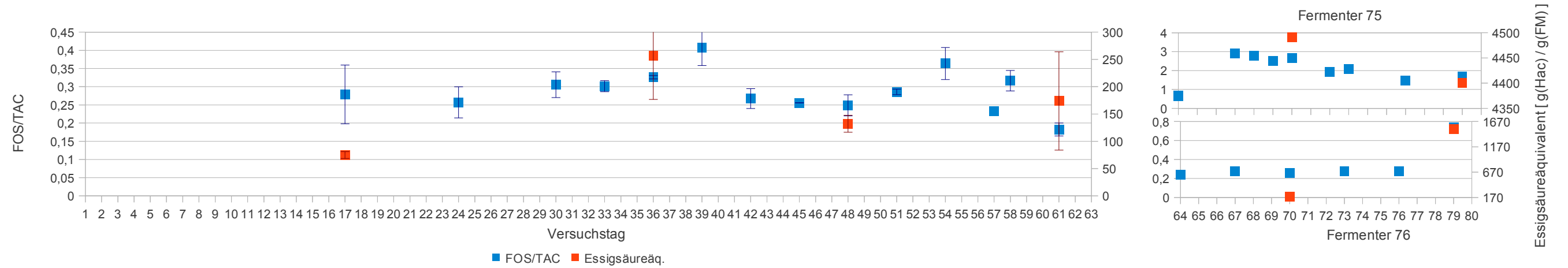


Abb. 31: FOS/TAC und Essigsäureäquivalente des Gärrestes (Variante "Mais")
vgl. [10] - „Diag. 75-76“

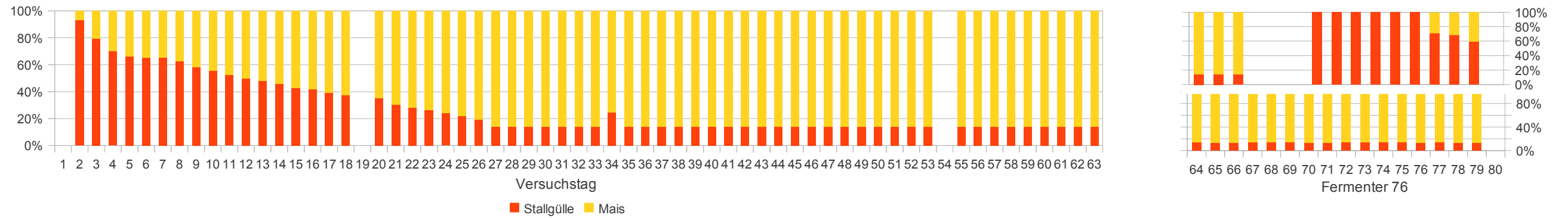


Abb. 32: Beschickungsverhältnis der Frischmassen - ohne Wasser (Variante "Mais")
vgl. [10] - „Diag. 75-76“

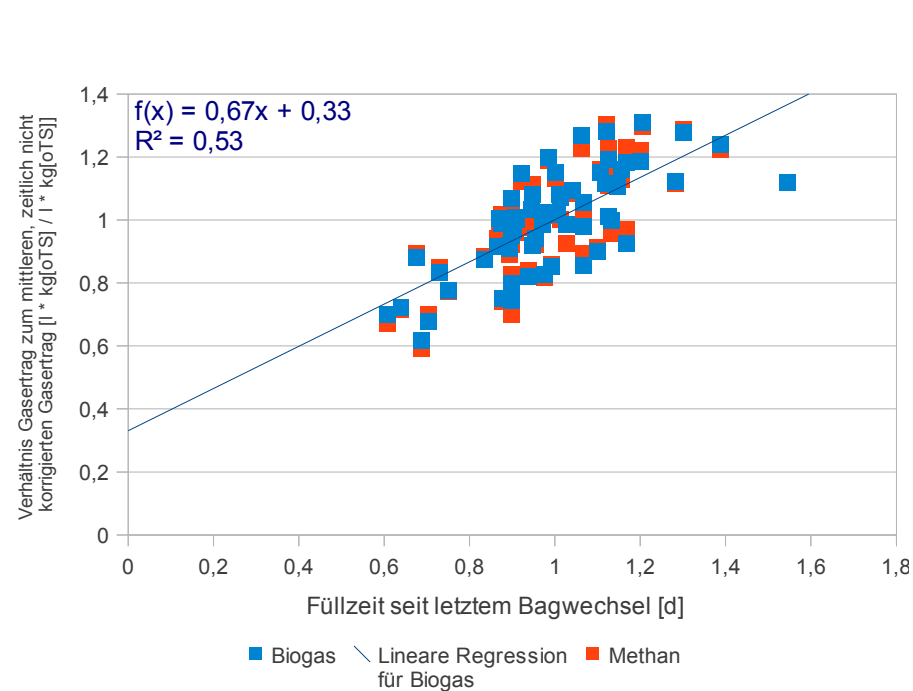


Abb. 35: Korrelation des relativen Gasertrages zur Füllzeit (Variante „Null“)
vgl. [10] - „Diag. 73-74“

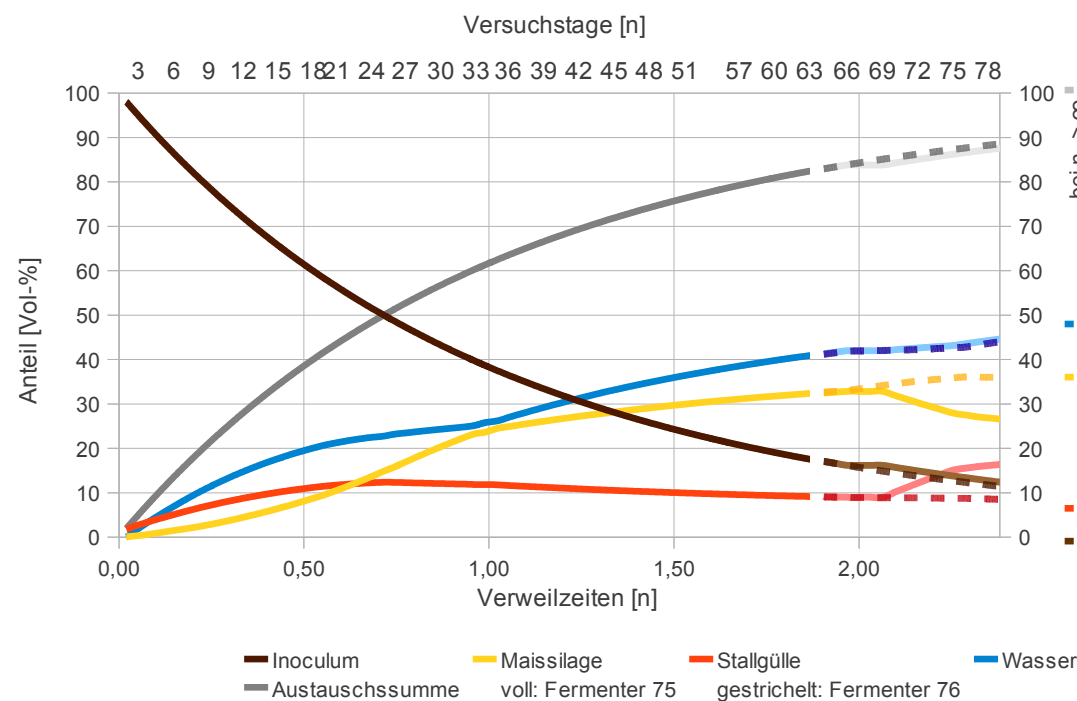


Abb. 33: theoretische Zusammensetzung des Fermentats (Variante „Mais“)
vgl. [10] - „Diag. 75-76“

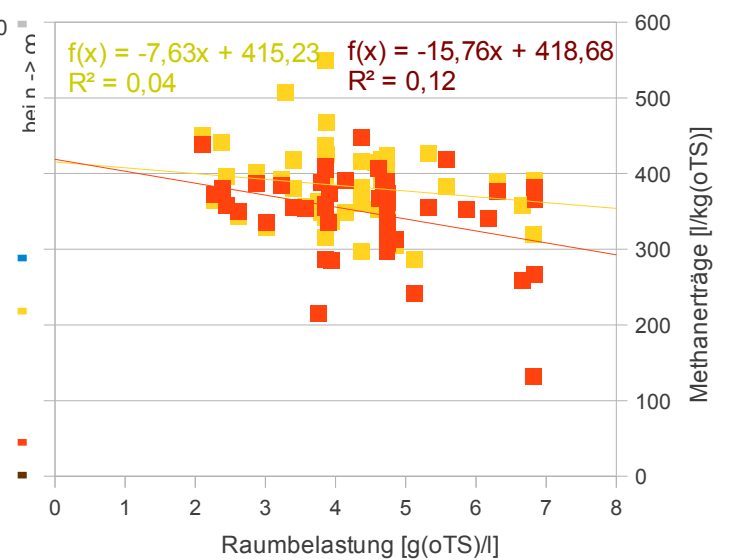


Abb. 34: Korrelation von Methanerträgen und Raumbelastung beider Fermenter (Variante "Mix")
vgl. [10] - „Diag. 77-78“

3.2.4 Variante „Mix“

Mit 80 Maßnahmen (zusätzlich zu den wiederkehrenden Tätigkeiten, siehe Tabelle 9) - darunter 17 Vorfällen und zwei technischen Fehlern lief diese Variante etwas ruhiger als deren Referenz. Einige der Maßnahmen werden in den Tabellen 24 bis 26 im Anhang A - 5.2 aufgezeigt.

Auswertung der angehangenen Versuchsergebnisse von Variante „Mix“:

Da die mittleren Methanerträge zusammen mit dem Vergleich des Batch-Versuches und der Literatur in Tabelle 10 des Kapitels 4.2.1 betrachtet werden, sei hier ebenfalls auf eine nähere Betrachtung verzichtet.

Wie auch bei der Variante „Mais“ liegen die meisten Methanerträge zwischen 300 und 400 l · kg_{OTS}⁻¹. Erst in den letzten Versuchstagen liegen die Erträge dauerhaft über der Marke von 400 l · kg_{OTS}⁻¹. Dabei lässt sich eine Abhängigkeit des Methanertrages zur Raumbelastung durch den Korrelationskoeffizienten der Regressionsgeraden in Abbildung 42, welcher für beide Fermenter nahezu null ist, nicht feststellen.

Mit Ausnahme der ersten Versuchstage und der Tage 56 und 57 (an welchen vermutlich defekte Gasbags die Gaserträge deutlich verringerten) liegen die individuellen Gaserträge sehr nah aneinander – sogar bis zum Vortag des Umschlages des Fermenters 78 am Versuchstag 73.

Der Einbruch der Gaserträge dieses Fermenters lässt sich anhand der drei davor gemessenen FOS/TAC-Verhältnissen vorhersehen. Diese stiegen innerhalb von je drei Tagen von 0,27 über 0,52 auf 1,08 an. Auch die Essigsäureäquivalente sind kurz vorher mit 862,53 mg_{HAc} · kg⁻¹ stark erhöht. Der pH-Wert fiel erst innerhalb von drei Tagen vor dem totalen Einbruch der Gaserträge deutlich von 7,61 auf 7,14 ab. In der gleichen Zeit verringern sich ebenfalls die Methanerträge.

Bei der Betrachtung der theoretischen Zusammensetzung des Fermentats sind besonders folgende Auffälligkeiten zu bemerken:

Ab dem Versuchstag 33 ist ein „Knick“ in der Kurve, verbunden mit einem stärkeren Anstieg des Wasser-Anteils, sichtbar. Dies ergibt sich aus der ab diesem Tag zugeführten variablen Wassermenge, welche sich nicht mehr an der Einwaage der Stallgülle orientierte. Der Notwendigkeit, auch bei niedrigeren Raumbelastungen eine gleichbleibende Verweilzeit zu ermöglichen, wurde damit nachgekommen.

Die Zielkonfiguration konnte trotz der wenigen Verweilzeiten gut angenähert werden. Gleich der Variante „Mais“ verblieben theoretisch lediglich 11,4 % des ursprünglichen Inoculums im Fermentat.

Auch wenn der Fermenter 78 umgeschlagen ist, hatte dies aufgrund der Nähe zum Versuchsende nur wenig Auswirkung auf die Zusammensetzung des Fermentats.

Mit einem Anstieg der Regressionsgeraden in Abbildung 41 von 0,64 befindet sich die daraus möglicherweise ableitbare Abbaugeschwindigkeit leicht über der Variante „Mais“ mit einem Anstieg von 0,67. Der niedrige Korrelationskoeffizient der beiden betrachteten Geraden von 0,48 bzw. 0,53 vermindert aber die Aussagekraft dieser These.

Während des gesamten Versuchs bewegt sich der pH-Wert um einen mittleren Wert von 7,4. Bis auf wenige Ausreißer lässt sich anhand des Verlaufs die Stabilität des Prozesses in Abhängigkeit der Raumbelastung bestimmen.

Ab dem Überschreiten einer Raumbelastung von 4,5 am Versuchstag 17 lässt sich ein kontinuierlicher Abfall des pH-Wertes von 7,4 auf nur noch 7,1 feststellen. Nach dem Rückgang der Raumbelastung auf $5 \text{ g}_{\text{oTS}} \cdot \text{l}^{-1}$ erholt sich der tiefe pH-Wert wieder und stellt sich auf dem benannten mittleren Wert ein.

Für diese Phase ist ebenfalls der Verlauf des FOS/TAC bezeichnend: steigt das FOS/TAC von 17. zum 30. Versuchstag an, fällt der pH-Wert entsprechend ab. Auch die darauf folgende Zeit der Belastungsphase bis zum Versuchstag 45 verläuft analog: fällt FOS/TAC ab, steigt der pH-Wert an. Lediglich die letzten Tage der Belastungsphase verlaufen widersprüchlich. Dabei steigt der pH-Wert an, ohne dass das FOS/TAC entsprechend verringert wird.

Die anfängliche Behauptung, das Überlaufen eines Fermenters gefährde vielmehr einen Prozess längerfristig durch das Verringern der gelösten Carbonat-Ionen, belegt, dass der Fermenter 78, welcher in der gesamten Versuchszeit acht Mal übergelaufen ist (fünf Mal mehr als Fermenter 77) im Mittel ab am 24. Versuchstag mit $4928 \text{ mg}_{\text{CaCO}_3} \cdot \text{l}^{-1}$ einen viel kleineren TAC als Fermenter 77 mit $5423 \text{ mg}_{\text{CaCO}_3} \cdot \text{l}^{-1}$ aufweist. Zudem ist dieser ab dem 54. Versuchstag immer kleiner als der des Fermenters 77.

Dagegen spricht, dass beide Fermenter der Variante „Mais“, welche 12 bzw. 14 mal übergelaufen sind mit 4939 bzw. $5861 \text{ mg}_{\text{CaCO}_3} \cdot \text{l}^{-1}$ einen höheren TAC zum Ende des Versuchs aufweisen.

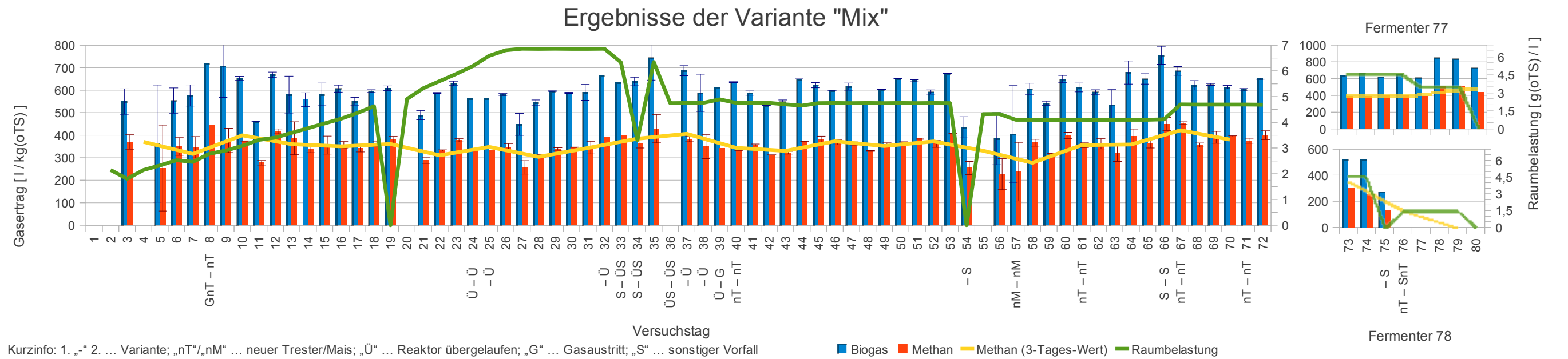


Abb. 36: Gaserträge und Raumbelastung - berichtigt um Fehlerträge, normiert auf 24 h (Variante "Mix")
vgl. [10] - „Diag. 77-78“

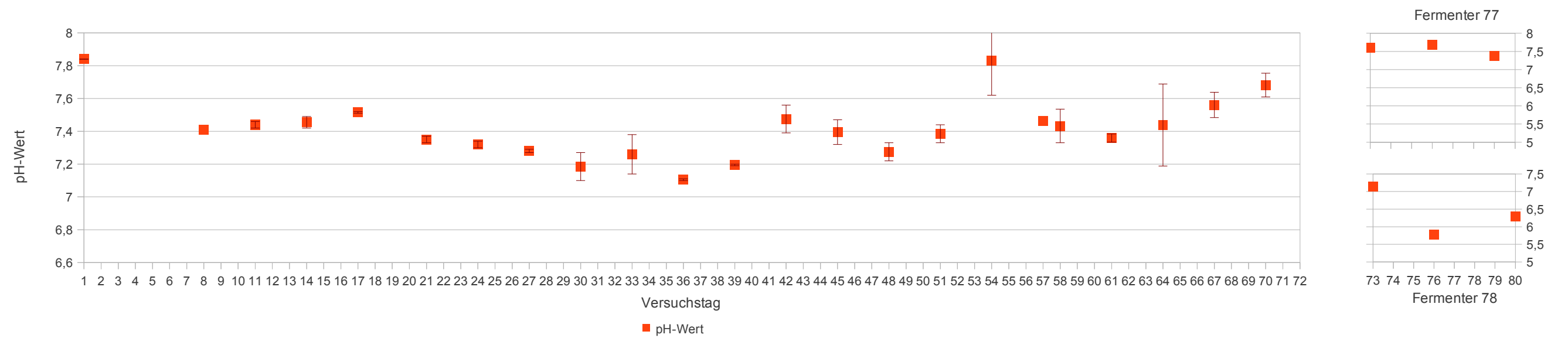


Abb. 37: pH-Wert des Gärrestes (Variante "Mix")
vgl. [10] - „Diag. 77-78“

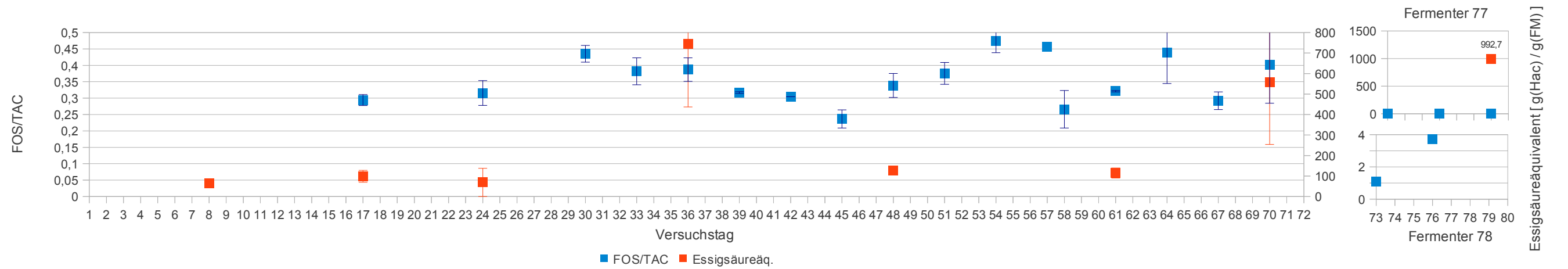


Abb. 38: FOS/TAC und Essigsäureäquivalente des Gärrestes (Variante "Mix")
vgl. [10] - „Diag. 77-78“

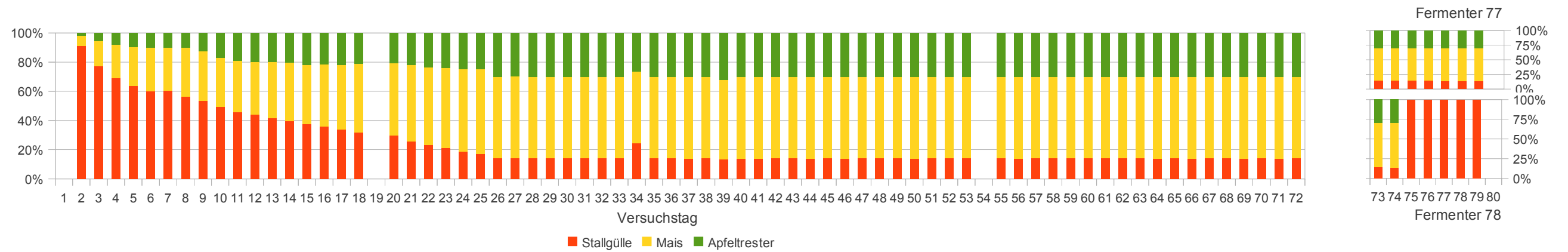


Abb. 39: Beschickungsverhältnis der Frischmassen - ohne Wasser (Variante "Mix")
vgl. [10] - „Diag. 77-78“

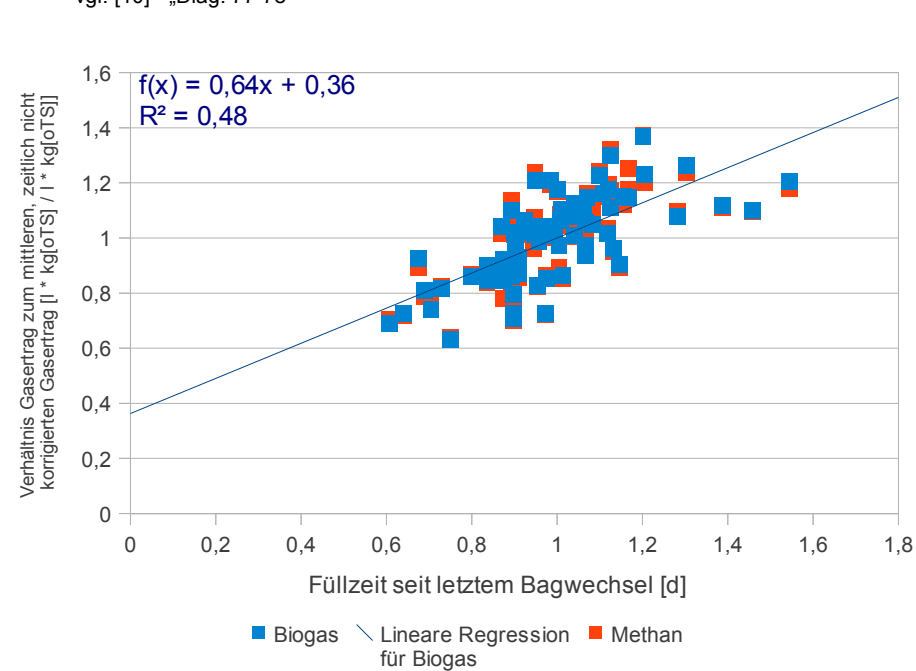


Abb. 41: Korrelation des relativen Gasertrages zur Füllzeit (Variante „Mix“)
vgl. [10] - „Diag. 77-78“

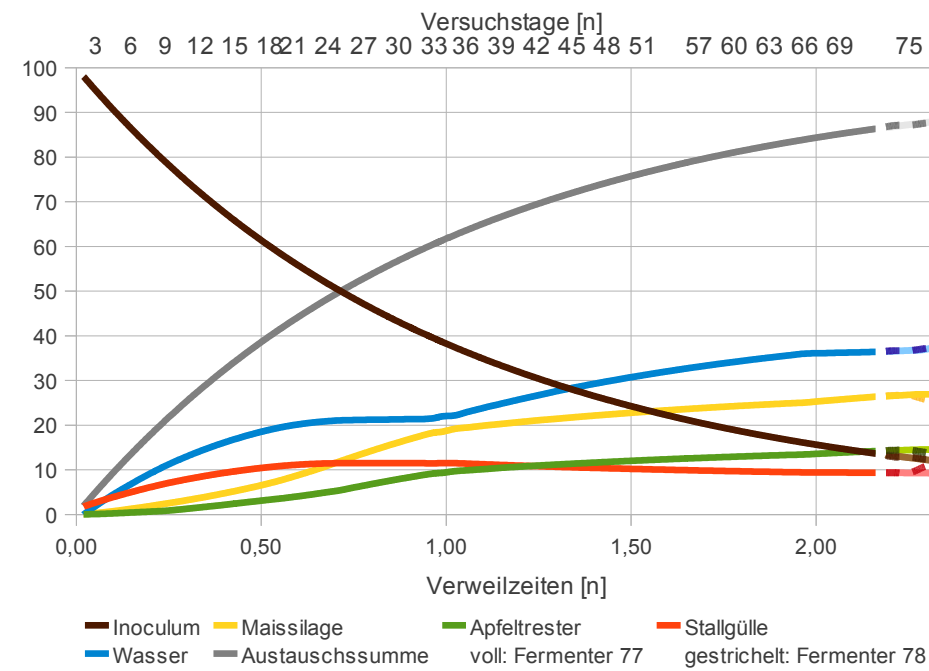


Abb. 40: theoretische Zusammensetzung des Fermentats (Variante „Mix“)
vgl. [10] - „Diag. 77-78“

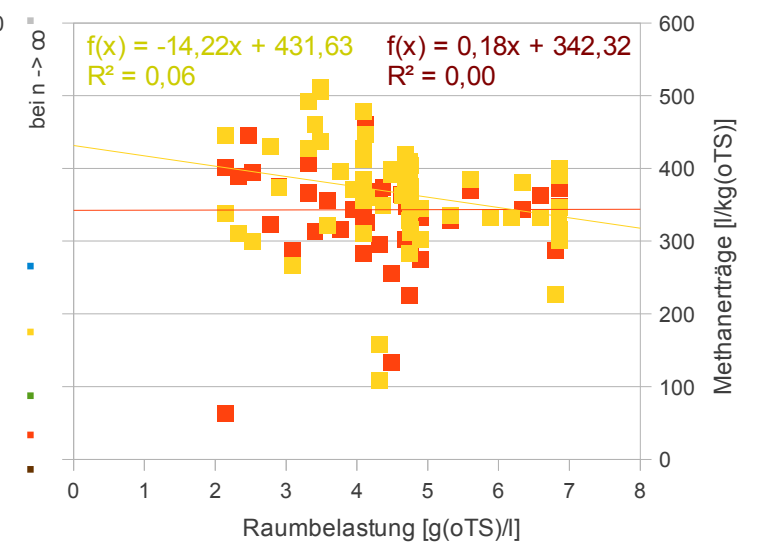


Abb. 42: Korrelation von Methanerträgen und Raumbelastung beider Fermenter (Variante "Mix")
vgl. [10] - „Diag. 77-78“

3.2.5 Variante „Trester“

Die Variante „Trester“ stellte in der Versuchsreihe aufgrund des kompletten Verzichts auf Maissilage vielmehr eine Potentialanalyse als eine Darstellung möglicher Konfigurationen der Praxis dar. Daher konnten folgende Variablen auch unabhängig von denen der anderen Varianten verändert werden:

- maximale Raumbelastung: diese wurde bereits am 23. Versuchstag mit $5,35 \text{ g}_{\text{OTS}} \cdot \text{l}^{-1}$ erreicht
- mittlere Raumbelastung: mit $3,5 \text{ g}_{\text{OTS}} \cdot \text{l}^{-1}$ ausgelegt vergleichsweise niedrig (durch die TS-Korrektur im Nachhinein auf 3,18 abgefallen)
- Beschickung: nachdem die maximale Raumbelastung nicht weiter gehalten werden konnte, wurde entschieden, neben dem Verringern der Raumbelastung ebenfalls auf die Zugabe von Gülle zu verzichten um das Verhalten bei Monovergärung zu evaluieren.

Mit 57 zusätzlichen Maßnahmen (darunter 13 Vorfällen und einem technischer Fehler) lief die Variante „Trester“ nach der Variante „Null“ weitestgehend störungsfrei. Die Tabellen 27 bis 29 im Anhang A - 5.3 geben dabei einen Überblick über relevante Maßnahmen.

Auswertung der angehangenen Versuchsergebnisse von Variante „Trester“:

Für die mittleren Methanerträge im Kontext der Biogasertragsermittlung und der Literaturwerte sei auf Tabelle 10 des Kapitels 4.2.1 verwiesen.

In Abbildung 43 lässt sich die Abhängigkeit der Gaserträge von der Raumbelastung gut erkennen.

Auch wenn die Gaserträge in der Anfahrphase größere Schwankungen aufweisen, fällt der Drei-Tages-Mittelwert des Methanertrages bis zum 25. Versuchstag – dem Tag der Überlastung des Prozesses von $400 \text{ l} \cdot \text{kg}_{\text{OTS}}^{-1}$ auf $270 \text{ l} \cdot \text{kg}_{\text{OTS}}^{-1}$ ab. Diese Abhängigkeit wird durch Abbildung 49 unterlegt. Die Überlastung des Systems wird ebenfalls in der Abnahme der pH-Werte bzw. der Zunahme von FOS/TAC und Essigsäureäquivalent zum 24. Versuchstag hin sichtbar.

In der folgenden Phase sollte nun unter nur leicht erhöhter Raumbelastung die Möglichkeit einer Monovergärung aufgezeigt werden.

Dabei stiegen die Gaserträge in den ersten Tagen der Monovergärung vom 28. bis zum 31. Versuchstag sogar auf das bisherige Maximum an, fielen danach aber bis zum Umschlag des Abbauprozesses wieder ab.

Wird die Ertragsspitze dieser Tage im Kontext der mittleren Erträge dem zusätzlichen Abbau des Restpotentials der vorherigen Überlastung des Prozesses zugesprochen, scheint sich der Methanertrag aber eher auf einem Mittel von $338 \text{ l} \cdot \text{kg}_{\text{OTS}}^{-1}$ einzustellen.

Die zu der Zeit gemessenen pH-Werte sind zwar allesamt sehr niedrig, zeigen aber trotz größerer Schwankungen eine leicht positive Tendenz. Auch das FOS/TAC liegt in dieser Zeit im Mittel niedrig bei 0,33 und das Essigsäureäquivalent bei $618 \text{ mg}_{\text{HAc}} \cdot \text{g}^{-1}$. Obwohl vieles für einen vorerst stabilen Prozess spricht, zeigen alle Analysewerte sowie der Gasertrag ab dem 44. Tag bis zum Umschlag des Abbauprozesses am 51. Tag eine deutlich negative Entwicklung.

Als Grund für die Instabilität der hier getesteten Monovergärung kann ein Mangel an Spurenelementen angenommen werden. Untersuchungen, welche dies bekräftigen könnten, lagen bis Abschluss dieser Arbeit aber noch nicht vor.

Zwischen Versuchstag 52 und 54 entwickelt sich der Umschlag des Abbauprozesses beider Fermenter allerdings unterschiedlich. Während die Methanerträge von Fermenter 80 stets über $200 \text{ l} \cdot \text{kg}_{\text{OTS}}^{-1}$ bleiben, fallen sie in den betrachteten drei Tagen bei Fermenter 79 unter null.

Dieser real nicht mögliche Wert ergibt sich aus der Güllekorrektur. Fermenter mit negativem Ertrag emittieren also im Verhältnis weniger Biogas als die Fermenter der Variante „Null“.

Es scheint unwahrscheinlich, dass ein Fermenter dieses Zustandes innerhalb kurzer Zeit und nur durch die Zugabe von Stallgülle wieder stabilisiert werden kann. Daher wurde vier Mal versucht mit dem Eintrag von Löschkalk ($\text{Ca}[\text{OH}]_2$) den pH-Wert zu neutralisieren.

Die ersten drei Male blieben dabei ohne größere Wirkung, auch wenn sich pH-Wert und FOS/TAC leicht verbesserten.

Als mögliche Gründe hierfür seien eine möglicherweise überbewertete Löslichkeit des Löschkalks, ein Säurepotential, welches sichtbare Veränderungen des pH-Wertes vermindert und durch die kurzzeitige Verbesserung des pH-Wertes aktivierte acidogene Bakterien, welche den Prozess wieder versäuerten, genannt.

Da kurz vor dem Versuchsende ein langsames „Herantasten“ an einen optimalen pH-Wert unzweckmäßig war und der Fermenter 79 (durch veränderte Beschickung und die Zugabe von Prozesshilfsmitteln) nicht mehr zum Vergleich herangezogen wurde, sollte eine erhöhte Menge Löschkalk den Fermenter durch einen vierten und letzten Neutralisationsversuch in ein akzeptables pH-Niveau bewegen.

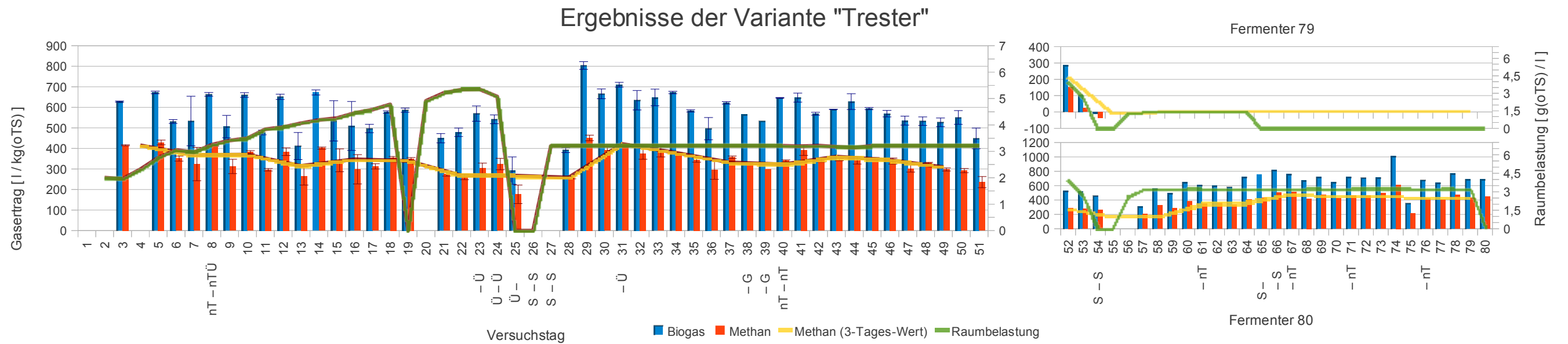
Die erhöhte Dosis hatte aber den Umschlag in den alkalischen Bereich und damit den endgültigen Abbruch des Versuches zur Folge.

Im Gegensatz zu Fermenter 79 konnte der Fermenter 80 nach einer zweitägigen Unterbrechung der Beschickung auf mittlerer Raumbelastung und mit abnehmender Güllekonzentration weiter betrieben werden.

Vom 64. zum 67. Versuchstag zeichnet sich dabei die Veränderung von einem gefährdeten zu einem stabilen Prozess ab. Während FOS/TAC von einem kritischem in ein normales Niveau abfällt, steigt der pH-Wert in der selben Zeit wieder deutlich über 7 an. Auch die Methanerträge übersteigen in jenem Zeitraum die $400 \text{ l} \cdot \text{kg}_{\text{OTS}}^{-1}$ -Marke und unterschreiten diese meist nicht mehr.

Die in dieser Zeit (im Vergleich zu den anderen Varianten) doppelte Güllekonzentration zur Beschickung wurde zur besseren Vergleichbarkeit vom 71. bis zum 72. Tag wieder auf 14 % herabgesenkt. Dies wirkte sich allerdings bereits am 73. Versuchstag negativ auf pH-Wert und FOS/TAC aus. Daher wurde in der letzten Versuchswoche wieder 28 % Gülle zum Trester hinzu gegeben.

Für die Deutung einer möglichen Abbaugeschwindigkeit interessant ist der Anstieg der Regressionsgeraden in Abbildung 48. Dieser übertrifft mit 0,78 den der Variante „Mais“ von 0,67 und den der Variante „Mix“ von 0,64. Dies spricht für einen, zumindest zwischen 0,8 und 1,6 Tagen, langsameren Abbau des Apfeltresters.



Kurzinfo: 1. „-“ 2. ... Variante; „nT“/„nM“ ... neuer Trester/Mais; „Ü“ ... Reaktor übergelaufen; „G“ ... Gasaustritt; „S“ ... sonstiger Vorfall

Abb. 43: Gaserträge und Raumbelastung - berichtigt um Fehlerträge, normiert auf 24 h (Variante "Trester")
vgl. [10] - „Diag. 79-80“

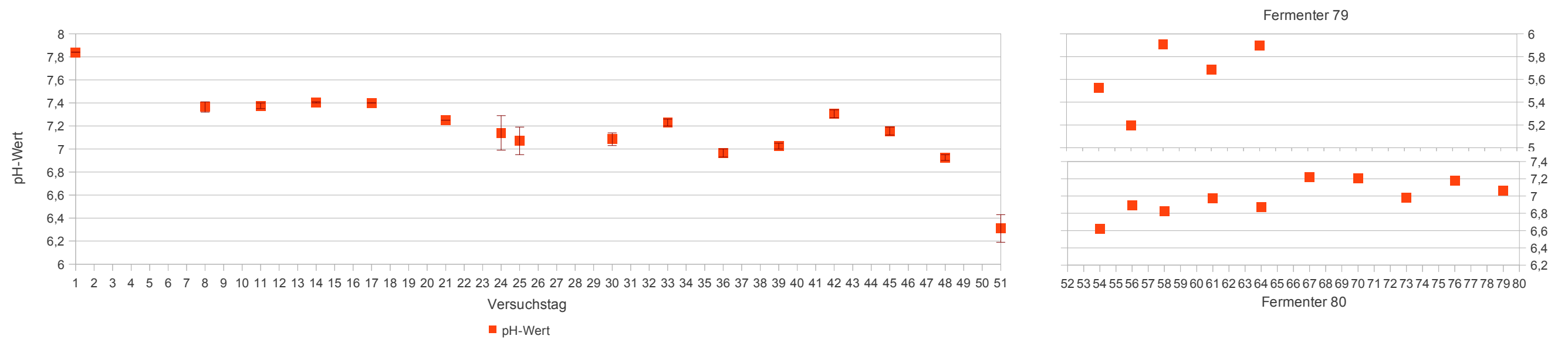


Abb. 44: pH-Wert des Gärrestes (Variante "Trester")
vgl. [10] - „Diag. 79-80“

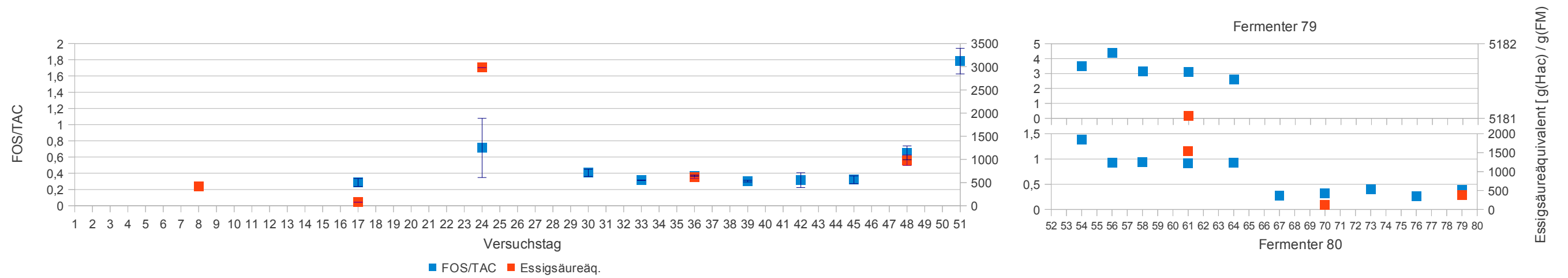


Abb. 45: FOS/TAC und Essigsäureäquivalente des Gärrestes (Variante "Trester")
vgl. [10] - „Diag. 79-80“

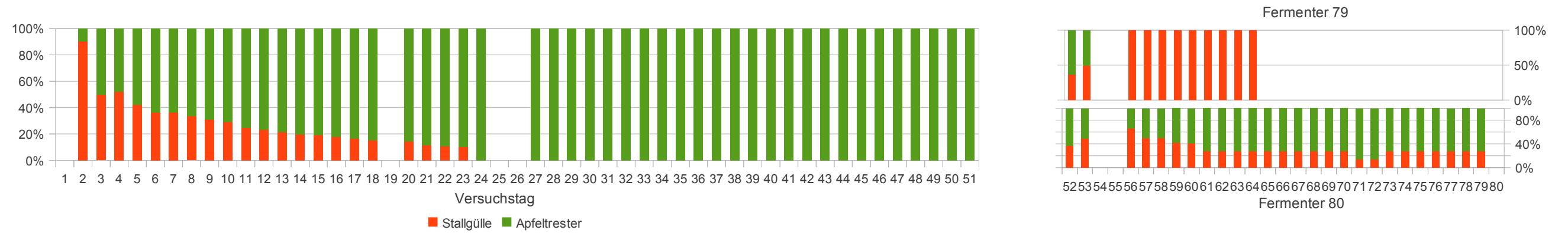


Abb. 46: Beschickungsverhältnis der Frischmassen - ohne Wasser (Variante "Trester")
vgl. [10] - „Diag. 79-80“

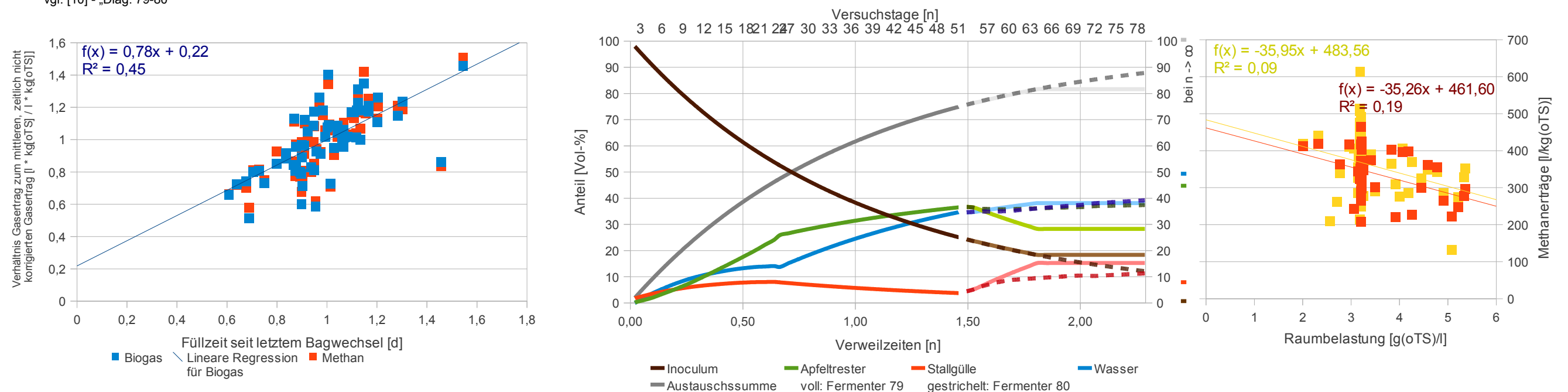


Abb. 48: Korrelation des relativen Gasertrages zur Füllzeit (Variante „Trester“)
vgl. [10] - „Diag. 79-80“

Abb. 47: theoretische Zusammensetzung des Fermentats (Variante „Trester“)
vgl. [10] - „Diag. 79-80“

Abb. 49: Korrelation von Methanerträgen und Raumbelastung beider Fermenter (Variante "Trester")
vgl. [10] - „Diag. 79-80“

4 Diskussion

4.1 Fehlerrechnung und -diskussion

Obwohl die gemessenen Gasraten um den Einfluss der Temperatur, des Umgebungsdrucks, (evtl. des Kopfraumes), der Abnahmezeit und der Gasemission durch Gülle korrigiert wurden⁷⁷ gibt es ein großes Fehlerpotenzial, welches nahezu jegliche Ergebnisse aus [10] verfälscht. Folgend werden systematische und zufällige Fehler, welche durch die diskontinuierlichen und kontinuierlichen Versuche entstanden, diskutiert sowie Möglichkeiten beschrieben die hier vorgestellten Ergebnisse vergleichbar zu machen.

4.1.1 Systematische Fehler der Laborversuche

Weder der Batch-Gärtest noch der kontinuierliche Versuch können den biologischen Abbauprozess für kommerziell betriebene BGA abbilden. Daher sind alle hier ermittelten Werte beider Versuche angesichts folgender Faktoren auf Validität zu untersuchen:

- Reale Strömungsverhältnisse konnten mit den Labor-Rührern nicht nachgebildet werden – dies veränderte das Erscheinungsbild eventuell auftretender Schwimm- und Sinkschichten sowie den Austrag des Biogases.
- Da die Beschickung nur ein bis zwei Mal am Tag erfolgte, konnten bei hohen Faulraumbelastungen temporäre Übersäuerungen auftreten, welche die Biologie des Fermentats negativ beeinflussten.
- Ein „Überlaufen“, also ein übermäßiger Austrag von Kohlendioxid und Fermentat ist im Labormaßstab eher lästig (durch die erzeugten Ungenauigkeiten durch entweichendes Gas und Fermentat), kann bei kommerziellen BGA aber einen so starken Überdruck erzeugen, dass die Stabilität des Fermenters und der Gasleitungen gefährdet werden kann.

⁷⁷ vgl. A - 2

- Die Lagerbedingungen der Inputsubstrate entsprechen meist nicht denen kommerzieller BGA. Dabei kann eine Lagerung unter suboptimalen Bedingungen durch Zersetzungsprozesse den Methanertrag deutlich verringern.

Zusätzlich für Versuche des Praktikums:

- Die Aufbereitung der Maissilage (Zerkleinerung) erhöhte durch Oberflächenvergrößerung die Abbaugeschwindigkeit.⁷⁸
- Das eingetragene Wasser veränderte die substratbezogenen Messwerte und verhinderte so deren direkte Übertragbarkeit auf kommerzielle BGA.⁷⁹
- Die Verkürzung der Verweilzeit konnte dazu führen, dass
 - Kurzschlussströmungen verstärkt auftraten (also der sofortige Austrag des zuvor eingebrachten Inputmaterials),
 - der vollständige Abbau im Fermentat unterbunden wurde,
 - Bakterien verstärkt ausgeschwemmt wurden.
- Das Inputmaterial war nicht repräsentativ für das über ein Jahr anfallende Material. Beispielsweise fand während des Praktikums lediglich Apfeltrester, welcher in einer Kelterei an einem einzigen Tag angefallen ist sowie Stallgülle eines Betriebes aus den Monaten Oktober bis Dezember und Maissilage zweier Jahrgänge Verwendung.
- Durch das Beschicken per Hand konnte nie die exakte Einwaage dem Fermenter zugeführt werden. So verblieb immer ein Teil der hinzugegebenen Stallgülle oder der Feststoffe im Messbecher oder wurde verschüttet.⁸⁰
- Die Belastung der Fermenter bei Beschickung und Austrag des Gärrestes konnte zu Materialermüdung und schlussendlich deren Versagen führen. Eine Folge könnte ein fehlerhafter Methanertrag sein, welcher durch Gasaustritt hervorgerufen wurde.

78 vgl. Kapitel 2.1.2

79 weitere Ausführungen zu Veränderungen durch den Eintrag von Wasser siehe Seite 34

80 Zahlenwerte dazu siehe Kapitel 4.1.3

- Es entstand ein nicht messbares Totvolumen durch die Gasschläuche zwischen Fermenter und Gasbag, sowie bei der Montage und Demontage der Gülleabscheider. Zudem könnten nicht entdeckte Lecks in den Gasbags den Gasertrag deutlich mindern.
- Da Cellulose, Hemicellulose und andere, besonders faserreiche, Inhaltsstoffe nicht innerhalb eines Tages abbaubar waren verblieb immer ein gewisser Anteil an Feststoffen im Fermentat. Ab einer gewissen Faserlänge bzw. Konzentration konnten diese Feststoffe nicht mehr (bedingt durch den $\frac{3}{4}$ -Zoll-Zugang) abgesaugt werden und verblieben im Fermentat bzw. bildeten im „Absaugkanal“ eine Art Filter. Beides führte mit zunehmender Versuchszeit zu einer „Feststoff-Akkumulation“⁸¹, welche sich negativ auf die Produktivität des Fermentats und somit auf die Gaserträge auswirkte.

4.1.2 Zufällige Fehler der Laborversuche

Zusätzlich zu den systematischen Fehlern wurden die Ergebnisse von mehreren „zufälligen“ Fehlern beeinflusst, darunter:

- Fehler durch menschliches Versagen wie Ablesefehler, Vertauschen von Fermentern, Gasbags, Messwerten und Proben,
- technische Ungenauigkeiten darunter Messfehler im Toleranzbereich aber auch Fehler durch defekte Technik (schiene Messwerte nicht plausibel, oder konnten diese im Nachhinein falsifiziert werden, wurden die betreffenden Messungen wiederholt),
- Fehler durch Inhomogenitäten der untersuchten Substrate.

Um Fehler dieser Art auszuschließen oder zumindest zu vermindern wurden relevante Messungen (wie die TS-Bestimmung) aber auch der Versuch selbst (durch zwei Fermenter je Variante) in Mehrfachbestimmung durchgeführt.

81 vgl. Abbildung 53 bis 55

4.1.3 Fehlerrahmen und Vergleichbarkeit der Ergebnisse

Aus der Einheit des Gasertrages ($l \cdot \text{kg}_{\text{OTS}}^{-1}$) lässt sich erkennen, dass dieser direkt von der korrigierten Gasrate und indirekt proportional von dem Produkt aus der Einwaage der Substrate sowie dem Anteil an organischer Trockensubstanz abhängig ist.

Von allen Faktoren, welche letzten Endes Einfluss auf den Methanertrag hatten⁸², lassen sich lediglich die Fehler der beiden zuletzt genannten Größen mit hinreichender Genauigkeit quantifizieren. Der Fehlerbereich weiterer Messgrößen lässt sich nur schätzen. Problematisch für eine sinnvolle Abschätzung des Fehlerbereichs wirkt sich jedoch die sogenannte „biologische Schwankung“, also die systemimmanente Varianz der Messwerte, welche sich aus der komplexen und nicht immer exakt beschreibbaren Abbaubiologie ergibt⁸³, aus. Auf eine ausführliche Fehlerrechnung mittels der Bildung eines totalen Differenzials aller Variablen wird daher verzichtet. Vielmehr beschränkt sich die Rechnung im Folgenden auf einen „kalkulierbaren“ Fehler.

Resultierender Fehler der Massebilanz:

Bereits in den ersten Versuchstagen zeigte sich, dass die kalkulierten Werte für die Beschickung und Entnahme des Gärrestes das Gewicht der Fermentats nicht halten konnten. Aus diesem Grund wurden Korrekturwägungen⁸⁴ durchgeführt. Der sich daraus ergebende Korrekturfaktor betrug zum Ende des Versuchs $-35 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$.⁸⁵ Dieser Fehler ergab sich zum großen Teil aus Ungenauigkeiten beim Absaugen des Gärrestes, aber auch aus Fehlern beim Beschicken und Vereinfachungen in der Kalkulation.

Da der einzelne Anteil der Verursacher an diesem Fehler nicht bekannt ist, wird (im Zuge eines maximalen Fehlers) der gesamte Fehler der Ungenauigkeit dem Beschicken zugesprochen. Nach [10] wurden demnach jeden Tag 35 g zu wenig in den Fermenter gefüllt. Dies ergab im Verhältnis der gesamten täglichen Einwaagen (im Mittel ca. 500 g) in den letzten Versuchstagen ein Fehler von 6,9 %. Wird davon ausgegangen, dass Wasser immer gemäß der Einwaage beschickt wurde, verdoppelt sich der Fehler auf ca. 13 %, welche anteilig jeden Tag zu wenig beschickt wurden.

82 vgl. Anhang A - 2

83 zur Veranschaulichung vgl. Anhang A - 3: Messfehler oder biologische Schwankung?

84 vgl. Kapitel 2.3.2 - „Korrekturwägung“

85 vgl. [10] - „Übersicht kont. Gv.“

Resultierender Fehler der oTS-Berechnung:

Da die Berechnung von TS und Glühverlust immer in Mehrfachbestimmung durchgeführt wurde, lies sich hierfür eine mittlere Varianz von 0,2 % errechnen.⁸⁶

Fehlerrahmen:

Werden Fehler und Varianz nun auf ihrem Einfluss auf den Gasertrag bezogen, so ergibt sich ein Fehlerbereich für Gaserträge von (-18) % - 13 %.

Dieser Wert ähnelt dem geschätzten Schwankungsbereich aus [16] von 10 bis 20 %⁸⁷.
Kommen die bereits erwähnten zeitabhängigen und -unabhängigen Schwankungen der Inputsubstrate kommerzieller BGA hinzu, kann es zu einer weiteren Verfälschung der Gaserträge kommen.

Hinsichtlich dieses enormen Fehlerpotentials sollten die hier vorgestellten Messwerte weniger absolut als vielmehr in Verlauf und Verhältnis zueinander betrachtet werden.

86 vgl. [10] - „Statistik und Fehlerrechnung“

87 vgl. [16] S. 86

4.2 Thesen

4.2.1 Die Vergärung von Apfeltrester als Co-Fermentat hat nur wenig Einfluss auf Ertrag und Stabilität des Gärprozesses unter Einsatzbedingungen

Die Zugabe von Apfeltrester im Mischungsverhältnis 30 % Trester zu 56 % Maissilage und 14 % Stallgülle führte bezüglich der Gaserträge sowie der Entwicklung von pH-Wert und FOS/TAC zu keinen markanten Veränderungen.

Belege:

Gaserträge

- Abbildung 50 stellt die Differenz der Gaserträge der Varianten „Mix“ zu „Mais“ zu den jeweiligen Raumbelastungen dar. Bis auf wenige größere Unterschiede, welche vornehmlich an den ersten Tagen, dem Ende der Anfahr- und der Belastungsphasen bzw. durch vermutete Leckagen von defekten Gasbags (Tag 56 und 57) auftraten, weichen die Erträge nur sehr gering von einander ab. Die positiven Werte der letzten fünf Versuchstage ergeben sich entweder aus einer unter geringerer Raumbelastung verbesserten Ausnutzung der Inputsubstrate oder weisen auf einen möglicherweise bevorstehenden Umschlag der Variante „Mais“ (wie in Kapitel 3.2.3 angesprochen) hin. Der angezeigte Mittelwert von $-10,6 \text{ l} \cdot \text{kg}_{\text{OTS}}^{-1}$ bzw. $-2,9 \%$ (im Verhältnis zum mittleren Methanertrag beider Varianten) bezieht sich dabei auf alle angezeigten Differenzen. Korrigiert um Differenzen größer als $50 \text{ l} \cdot \text{kg}_{\text{OTS}}^{-1}$ verringert sich der Mittelwert auf $-8,7 \text{ l} \cdot \text{kg}_{\text{OTS}}^{-1}$ bzw. $-2,4 \%$. Aus der geringen Größe beider Werte lassen sich keine belastbaren Aussagen zu Gewinnen oder Einbußen durch die Zugabe von Apfeltrester ableiten.
- Da für beide Varianten größtenteils die gleiche Raumbelastung gefahren wurde kann eine Verfälschung aufgrund unterschiedlicher Raumbelastungen ausgeschlossen werden. Die Abbildungen 34 und 42 zeigen zusätzlich eine möglicherweise geringere Abhängigkeit von der Raumbelastung der Variante „Mix“ zu „Mais“ auf.
Durch den geringen Korrelationskoeffizienten in beiden Abbildung sollte diese These aber kritisch betrachtet werden.

- Die Tabellen 10 und 11 vergleichen die mittleren Methanerträge der Varianten „Mais“, „Mix“ und „Trester“ in den drei Versuchsphasen mit dem ermittelten Biogasertragspotenzial des Batch-Versuchs und den Angaben der Literatur. Dabei wurden die Tage nicht gewertet, an denen die Prozessstabilität nicht gegeben war. Es zeigt sich, dass der im 37 Tage andauernden Batch-Versuch erhaltene Methanertrag bei der Variante „Trester“ in den ersten beiden Versuchsphasen nur zu gut $\frac{2}{3}$ erreicht werden konnte, dafür aber in der Endphase übertroffen wurde. Absolut liegen die ermittelten Werte dabei leicht unter bzw. im Rahmen des von der FNR veröffentlichten Bereichs. Weit darunter liegt der von dem KTBL angegebene Ertrag. Dieser wurde allerdings nur in drei Versuchen (und mit einem Variationskoeffizienten von 12 %) ermittelt.

Da das Ertragspotenzial für Maissilage aus einem früheren Versuch stammt, sind die Werte der dazugehörigen Substratausnutzung wenig aussagekräftig. Markant sind allerdings die sehr hohen Werte der Substratausnutzung in Tabelle 11. Sie zeigen zum einen, dass sich die errechneten Erträge der Varianten „Trester“ und „Mais“ für eine kalkulierte „Mix“-Variante sehr gut dem dazugehörigen ermittelten Ertragspotenzial annähern und zum anderen, dass die reale „Mix“-Variante jene Werte sehr gut annähert. Mögliche Interferenzen durch die Zugabe von Apfeltrester zu Mais scheinen sich also nach dieser Tabelle nicht auf den Methanertrag auszuwirken.

Tab. 10: Methanertragsvergleich von Trester und Mais der Reinvarianten „Trester“ und „Mais“
vgl. [10] - „Statistik und Fehlerrechnung“

Methan- erträge	Variante „Trester“ [l · kg _{OTS} ⁻¹]	Versuchs- tage	Substrat- ausnutzung [% Batch]	Variante „Mais“ [l · kg _{OTS} ⁻¹]	Versuchs- tage	Substrat- ausnutzung [% Batch]
Batch (Ertrags- summe)	475,64	37		338,28	28	
kontinuierlicher Gärversuch (tägl. Ertrag)						
Anfahrphase	339,84	1 – 24	71,45	367,95	1 – 25	108,77
Belastungs- phase	344,70	29 - 51	72,47	367,89	30 – 63	108,75
Endphase	447,21	64 – 80 *	94,02	412,75	64 – 80**	122,02
Literaturangabe						
FNR ⁸⁸	429 - 476			348,00		
KTBL ⁸⁹	282,00			225-385		

* nur Fermenter 80; ** nur Fermenter 76

Tab. 11: Methanertragsvergleich von kalkulierte und realen 30%-Trester-Mix
vgl. [10] - „Statistik und Fehlerrechnung“

Methan- erträge	Mix - kalkuliert* [l · kg _{OTS} ⁻¹]	Substrat- ausnutzung [% Batch]	Variante „Mix“ [l · kg _{OTS} ⁻¹]	Versuchs- tage	Substrat- ausnutzung [% Mix- kalkuliert]
Batch (Ertrags- summe)	379,49				
kontinuierlicher Gärversuch (tägl. Ertrag)					
Anfahrphase	359,52	94,74	347,84	1 – 24	96,75
Belastungs- phase	360,93	95,11	358,93	28 – 72	99,45
Endphase	423,09	111,49	427,55	73 – 80**	101,05
Literaturangabe					
FNR ⁹⁰	328,20				
KTBL ⁹¹	349,25				

* gewichtetes Mittel der Erträge von Mais und Trester; ** nur Fermenter 77

88 vgl. [14] S. 88

89 vgl. [11] S. 18

90 vgl. [14] S. 88

91 vgl. [11] S. 18

Analysewerte

- Zwar zeigt sich in Abbildung 52 bis zum 48. Versuchstag eine leicht negative Tendenz der pH-Werte, danach aber weist die Variante „Mix“ im Mittel einen höheren pH-Wert auf. Analog verhält es sich mit FOS/TAC und Essigsäureäquivalent in Abbildung 51. Werden, wie in Tabelle 12 dargestellt, jene Werte gemittelt gegenübergestellt, fallen die zuerst wahrgenommenen Unterschiede deutlich geringer aus.

Tab. 12: Differenz der Mittelwerte von pH-Wert, FOS/TAC und Essigsäureäquivalent der Varianten „Mix“ zu „Mais“ vgl. [10] - „Diag. Vgl. Mix-Mais“

	gesamt	bis zum 48. Tag	ab dem 48. Tag
pH-Wert	-0,007	-0,088	0,103
FOS/TAC	0,065	0,040	0,085
Essigsäureäq. [mg _{Hac} · kg _{FM} ⁻¹]	164,484		

Prozessstabilität

- Tabelle 13 stellt die für die Prozessstabilität charakteristischen Parameter dar. Hierbei zeigt sich, dass die Variante „Mix“ in allen aufgeführten Kategorien bessere Werte erzielt, als deren Referenzvariante „Mais“. Eine weitere Steigerung könnte Variante „Trester“ vorweisen, wäre hier nicht der frühe Umschlag beider Fermenter in Monovergärung und die generell niedrigere Raumbelastung.

Tab. 13: Stabilitätsvergleich der Varianten „Mais“, „Mix“ und „Trester“ vgl. [10] - „Diag. 79-80“ bis „Statistik und Fehlerrechnung“

Variante	zusätzliche Maßnahmen gesamt	Überlauf der Fermenter	Versuchstage bis zum Umschlag eines Fermenters	Mittlere Raumbelastung*
„Mais“	98	26	63	4,31
„Mix“	80	11	73	4,40
„Trester“	57	6	51**	3,18

* ohne umgeschlagene Fermenter; ** in Monovergärung

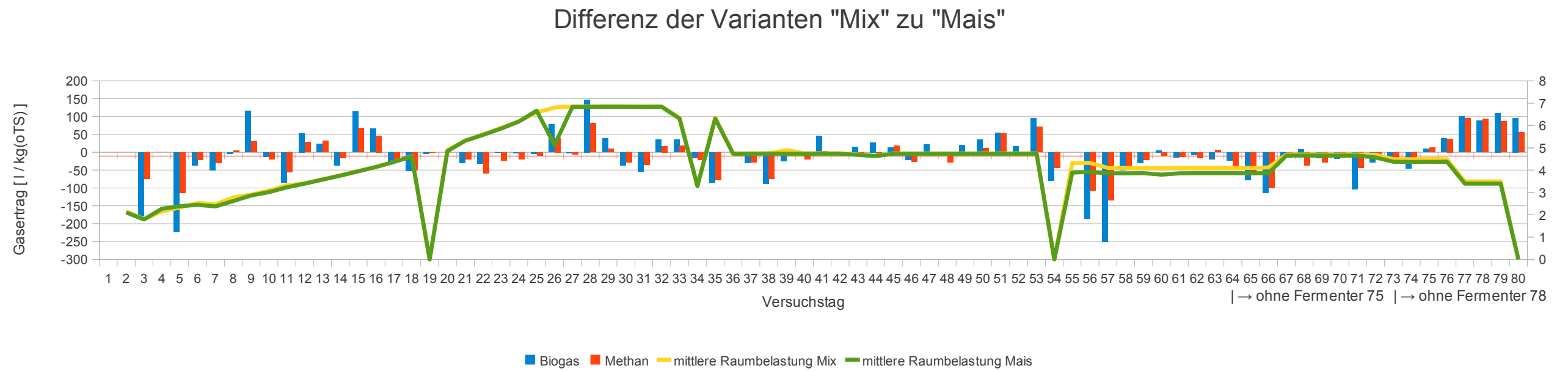


Abb. 50: Gaserträge und Raumbelastung - berichtigt um Fehlerträge durch übergelaufene Reaktoren bzw. Gasaustritt, normiert auf 24 h (Differenz der Varianten "Mix" zu „Mais“ vgl. [10] - „Diag. Vgl. Mix-Mais“)

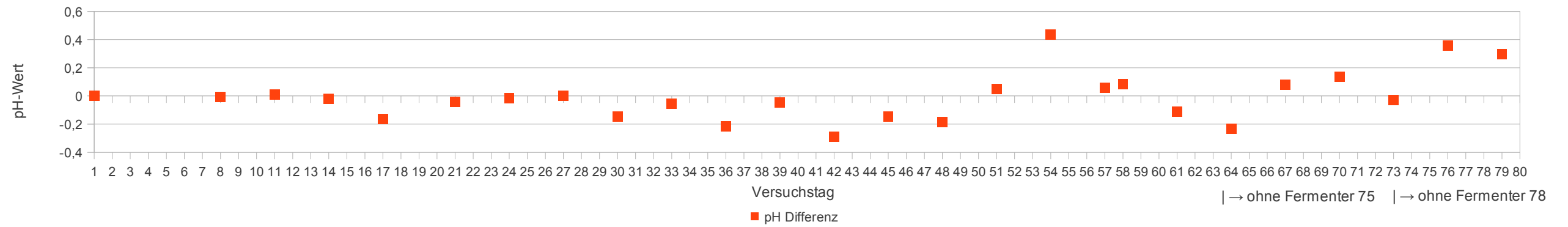


Abb. 52: pH-Wert des Gärrestes (Differenz der Varianten „Mix“ zu „Mais“) vgl. [10] - „Diag. Vgl. Mix-Mais“)

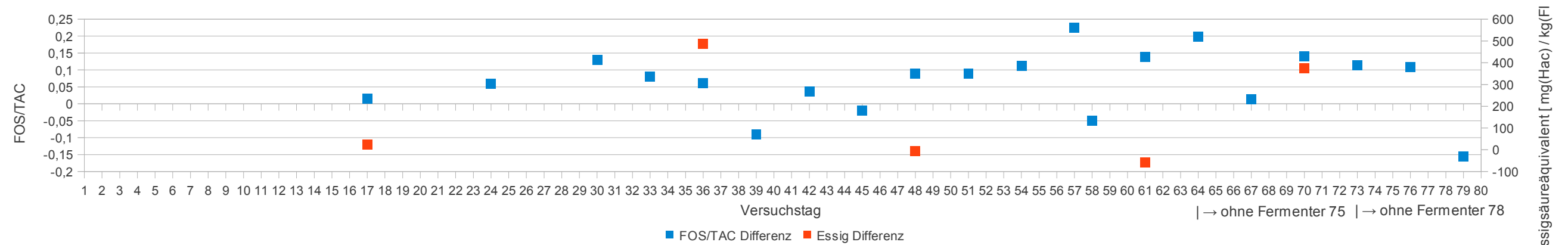


Abb. 51: FOS/TAC und Essigsäureäquivalent des Gärrestes (Differenz der Varianten "Mix" zu "Mais") vgl. [10] - „Diag. Vgl. Mix-Mais“)

4.2.2 Die Zugabe von Apfeltrester verdünnt das Fermentat

Mit zunehmendem Anteil von Apfeltrester als Co-Fermentat zur Maissilage verringerte sich unter Laborbedingungen der Anteil an Feststoffen im Fermentat.

Belege:

Abbaugeschwindigkeit und Restgaspotenzial

- Indem die Biogasrate des Folgetages nach einem Tag mit ausgesetzter Beschickung ins Verhältnis mit der am Vortag gemessenen Biogasrate gestellt wurde, konnte das „Restgaspotenzial“ bestimmt werden. Dieses ermöglichte eine Aussage zur Gasemission jenseits der Zeit von 0,8 bis 1,6 Tagen, wie in den Abbildungen der Korrelation von Gasertrag und Füllzeit dargestellt. Dieses Restgaspotenzial wurde zusammen mit dem Anstieg der dort erhaltenen Regressionsgeraden in Tabelle 14 dargestellt. Hier zeigt sich, dass im Verhältnis weniger Biogas am Folgetag nach einer Unterbrechung der Beschickung bei den Varianten „Mix“ und „Trester“ im Vergleich zur Variante „Mais“ emittiert wurde. Dies zeichnet sich zumindest auch in dem geringeren Anstieg der Regressionsgerade von „Mix“ zu „Mais“ ab. Daraus könnte gefolgert werden, dass sich Abbaugeschwindigkeit durch die Zugabe von Apfeltrester erhöht. Dem widersprechen nur der höhere Anstieg der Regressionsgerade der Variante „Trester“ sowie das Restgaspotenzial des Fermenters 79 am Versuchstag 55. Ersteres kann möglicherweise mit dem hauptsächlichlichen Erfassen einer Füllzeit von 0,8 bis 1,6 Tagen und zweiteres mit dem Umschlag des Fermenters, welcher in dieser Zeit die Abbaubiologie stark beeinträchtigte, erklärt werden.

Tab. 14: Vergleich von Abbaugeschwindigkeit und Restgaspotenzial
vgl. [10] - „Statistik und Fehlerrechnung“

Variante/Fermenternummer	„Null“		„Mais“		„Mix“		„Trester“	
	73	74	75	76	77	78	79	80
Restgaspotenzial bei Nichtbeschickung [BG-Rate-Ruhetag · BG-Rate-Vortag⁻¹]								
Versuchstag: 20	0,77	0,76	0,46	0,44	0,43	0,38	0,44	0,43
55	0,31	0,28	0,32	0,48	0,23	0,27	0,80*	0,22
Anstieg der Regressionsgerade für die Zeitkorrektur	0,56		0,67		0,64		0,78	

* zu diesem Zeitpunkt war der Fermenter bereits umgeschlagen

Theoretische Zusammensetzung des Fermentats und reale Zusammensetzung am letzten Versuchstag

- Wie Abbildung 56 zeigt, entstand durch die unterschiedliche Beschickung von „Mix“ und „Mais“ bei nahezu gleicher Raumbelastung (und damit auch gleichem oTS-Eintrag) mit zunehmender Anzahl an Versuchstagen eine ebenso zunehmende Konzentrationsdifferenz, welche sich aus der unterschiedlichen TS-Konzentration der Inputsubstrate ergibt. Die ca. 6 % bzw. 9 %, welche (bezogen auf das Volumen) am letzten Versuchstag in den Fermentern der Variante „Mix“ weniger an Wasser bzw. Maissilage im Fermentat vorhanden waren, wurden mit Apfeltrester ausgeglichen.
- Trotz gleichem oTS-Eintrag und verringertem Wassergehalt zeigte sich bei der Öffnung der Fermenter während des Abbruchs des Versuchs, dass sich im Gegensatz zur Variante „Mais“ (in welcher beide Fermenter eine ca. 7 cm dicke Schwimmschicht aus faserhaltigem Material gebildet hatten) bei der Variante „Mix“ nur eine dünne Schwimmschicht ausgebildet hatte, welche sich auch leicht wieder untermischen ließ. Der Fermenter 80, in welchem keine Maissilage beschickt wurde, zeigte keinerlei Schichtenbildung und ein durchgängig dünnflüssiges Fermentat. Veranschaulicht wird dies in Abbildung 53 bis 55.
- Dies kann wie folgt erklärt werden:
 - Der hohe Säuregehalt des Apfeltresters beschleunigte die Hydrolysephase.
 - Apfeltrester baut sich schneller und in der kurzen Verweilzeit besser ab.
 - Apfeltrester beinhaltet weniger und kürzere schwerverdauliche cellulose- bzw. lignin-haltige Bestandteile, welche sich, wie in Kapitel 4.1.1 beschrieben, anreichern können.



Abb. 53: Fermentat des Fermenters 76 der Variante "Mais" - Versuchsabbruch
vgl. [9]



Abb. 55: Fermentat des Fermenters 77 der Variante "Mix" - Versuchsabbruch
vgl. [9]



Abb. 54: Fermentat des Fermenters 80 der Variante "Trester" - Versuchsabbruch
vgl. [9]

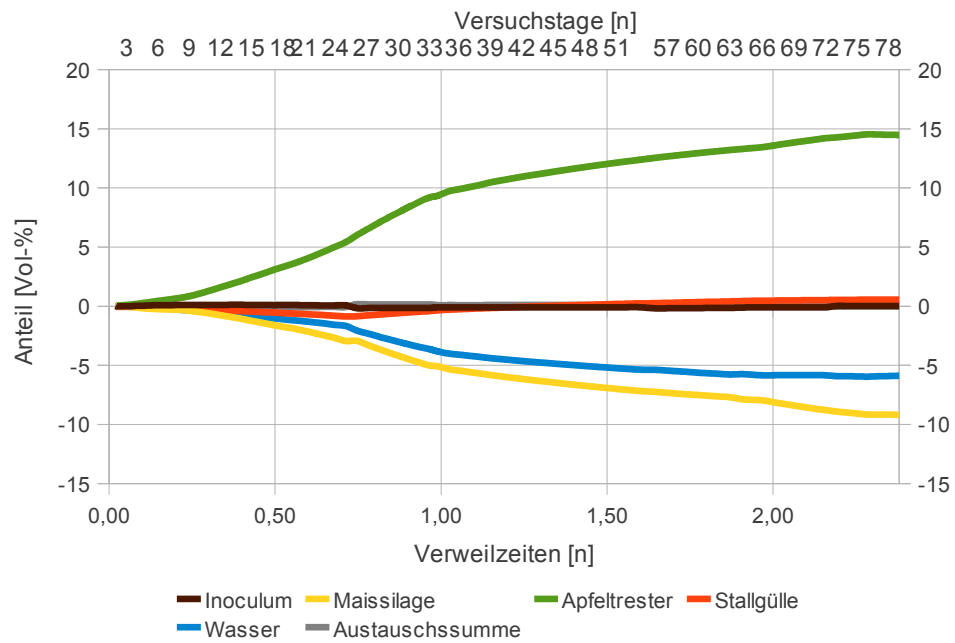


Abb. 56: Differenz der Stoffzusammensetzungen der Varianten "Mix" zu "Mais" vgl. [10] - „Diag. Vgl. Mix-Mais“

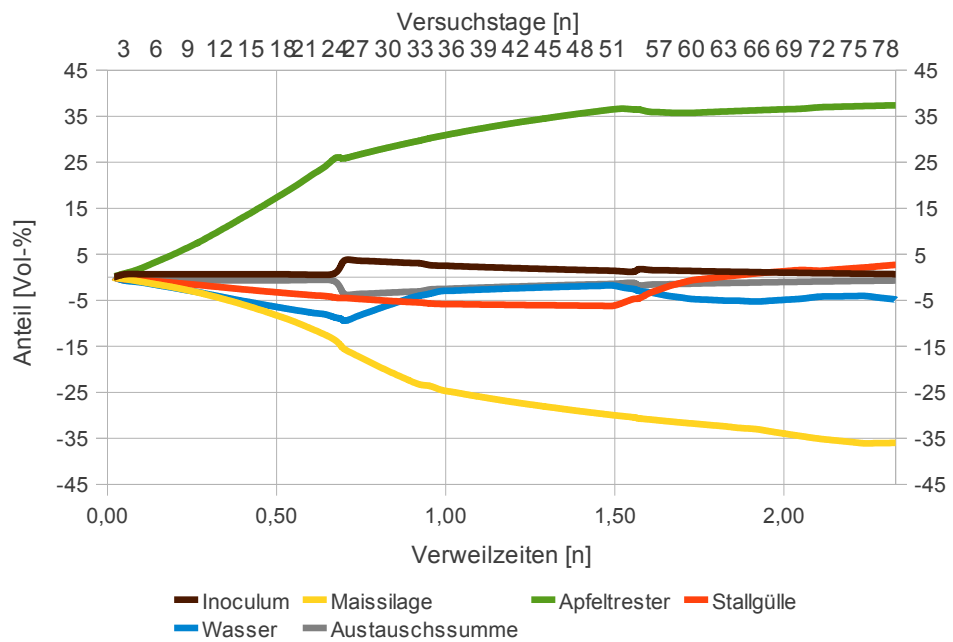


Abb. 57: Differenz der Stoffzusammensetzungen der Varianten "Trester" zu "Mais" vgl. [10] - „Diag. Vgl. Trester-Mais“

4.2.3 Weder Lagerdauer noch Konservierung des Apfeltresters beeinflussen messbar den Methanertrag

Es ließen sich während der Versuchszeit keine Ertragseinbußen feststellen, welche auf die Lagerdauer bzw. die Aufbereitung des Apfeltresters zurückgeführt werden konnten.

Belege:

- Die Abbildungen 29, 36 und 50 zeigen die Gaserträge der Variante „Mais“, „Mix“ sowie die der Differenz von „Mix“ zu „Mais“. Auf keiner der Abbildungen können die Schwankungen der Erträge zweifelsfrei mit der Lagerdauer des Apfeltresters bzw. dessen Silage (welche sich aus dem Abstand zwischen den Tagen, an welchen frischer Trester bzw. dessen Silage eingesetzt wurde, ergibt) in Verbindung gebracht werden.
- Entweder scheint der Ertrag unabhängig von der Lagerdauer von Trester und Trestersilage zu sein, oder die Veränderungen können besser mit veränderten Randbedingungen, wie z.B. der verringerten Raumbelastung bzw. der vermehrten Zugabe von Gülle in der Endphase bei „Mix“ bzw. „Trester“ erklärt werden.
- Weniger Einfluss als zuerst angenommen scheint daher die Ausgasung von frisch aufgetautem Trester bzw. frisch geöffneter Trestersilage in den ersten Tagen⁹² zu haben.

92 Erläuterung dazu vgl. 2.1.1

5 Einsatz von Apfeltrester als Co-Fermentat in BGA

5.1 Politische und wirtschaftliche Rahmenbedingungen

Die Einteilung des Apfeltresters als „Nebenprodukt und nicht als Abfall“⁹³ sowie dessen bevorzugte Verwertung noch vor der Beseitigung regelt das Kreislaufwirtschafts- und Abfallrecht, welches im aktuell debattierten Entwurf nur noch Kreislaufwirtschaftsgesetz heißen soll.⁹⁴ Bisher finden Obsttrester vornehmlich in der Tierfütterung und der Pektinherstellung Verwendung, werden aber auch (je nach Landesgesetzgebung) zur Kurrung von Wild⁹⁵ genutzt oder für die Herstellung von alkoholischen Getränken vergoren. Nach Bioabfallverordnung sind Trester ebenfalls für die Verwertung auf Flächen (dann als Abfall bezeichnet) einsetzbar⁹⁶. Der hohe Energiegehalt des Tresters lässt dessen weitere Nutzung in der Fütterung allerdings bisher am sinnvollsten erscheinen.

Nach eigenen Recherchen bewegen sich auf dem Trester-Markt Zwischenhändler, welche Ankauf, Logistik und Verkauf des Abproduktes übernehmen und Preise zwischen 10 bis 18 € · t⁻¹ frei Kelterei und 33 € · t⁻¹ frei Hof verlangen. Daneben überlassen Keltereien aber auch meist ohne Entgelt den Trester umliegenden Tierbetrieben⁹⁷. Die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten decken den Markt bisher ab. Eine Verwertung in Biogasanlagen hätte somit die Verdrängung aus anderen Sparten zur Folge. Eine Motivation hierfür könnte aus einem positiv ausfallenden ökologischen sowie ökonomischen Vergleich der Verwertungsmöglichkeiten entstehen.

Da die sogenannte „Ökobilanzierung“ den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde, wird lediglich der ökonomische Faktor mittels einer Kostenvergleichsrechnung berücksichtigt.

93 siehe [35] S. 13, § 4

94 vgl. [35] S. 13

95 es dürfen bis zu 5 kg Obsttrester und andere Lockfutter „zum Zwecke der Erlegung von Schalenwild“ in Sachsen ausgebracht werden
siehe [34] S. 10

96 vgl. [43] S. 13

97 vgl. [42]

Nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) in der Novelle von 2009 und der letzten Änderung vom 11.08.2010 wird in Netz eingespeister Strom aus Biogasanlagen mit einer Grundvergütung, welche je nach Einspeiseleistung von $11,76 \text{ ct} \cdot \text{kWh}^{-1}$ bis $7,79 \text{ ct} \cdot \text{kWh}^{-1}$ variiert, abgenommen. Werden besonders innovative Technologien dabei angewandt, vornehmlich NaWaRo oder Gülle eingesetzt, bei der Landschaftspflege anfallendes Material genutzt oder der Gesamtwirkungsgrad der Anlage durch Nutzung der Kraft-Wärme-Kopplung deutlich erhöht so besteht unter Umständen Anspruch auf zusätzliche Vergütungen.

Da Obsttrester im Anhang 2 („Bonus für Strom aus nachwachsenden Rohstoffen“) des EEG lediglich in der Positivliste für rein pflanzliche Nebenprodukte erscheint, dafür aber in der Negativliste für nachwachsende Stoffe aufgeführt ist, kann der sogenannte NaWaRo-Bonus für diesen Stoff nicht geltend gemacht werden. Werden jene „rein pflanzlichen Nebenprodukte“ in Verbindung mit NaWaRo und Gülle eingesetzt, so muss demnach der Bonus nach dem Verhältnis der Frischmassen und nach den im EEG festgeschriebenen Standardbiogaserträgen vermindert werden. Die so veränderte Einspeisevergütung ist durch einen Umweltgutachter zu begutachten und zu bestätigen.⁹⁸

Da der eingesetzte Trester nach Anhang 1 der Bioabfallverordnung als Bioabfall zählt, welcher zudem nicht auf dem eigenen Betriebsgelände verwertet wird, müssten folgende zusätzliche Anforderungen nach BioAbfV erfüllt werden:

- „→ ein Lieferscheinverfahren (...)
- eine thermophile Behandlung ($>55 \text{ °C} / 24 \text{ h}$ mit 20 Tagen Verweilzeit) oder Pasteurisierung von 1 Stunde bei 70 °C bzw. Nachkompostierung (Anhang 2, 2.1 BioAbfV),
- eine direkte Prozessprüfung in vielen Fällen (BioAbfV § 3 Abs. 5),
- die Aufzeichnung der Temperaturverläufe (BioAbfV § 3 Abs. 6),
- die nachweisliche Abtötung von Krankheitskeimen und
- eine Produktanalyse auf Schwermetalle, Fremdstoffe und andere physikalisch-chemische Eigenschaften.“⁹⁹

Würden diese Auflagen durch den Einsatz von Trester erforderlich werden, wäre dessen Vergärung wohl kaum noch zu rechtfertigen. Generell herrscht seitens der Behörden, sowie der Anlagenbetreiber eine große Unsicherheit, welche wohl auch der unscharfen Begriffsdefinition von Rohstoffen, Reststoffen und Abfällen geschuldet ist.

98 vgl. [31] S. 33

99 siehe [36] S. 2

Das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie stellt in seiner Managementunterlage „Biogaserzeugung und -verwertung“ aber klar, dass eine Hygienisierung nach BioAbfV eher für „Fettabfälle, Inhalt von Fettabscheidern und Flotate sowie Küchen- und Kantinenabfälle“ durchzuführen ist.

Das Landesamt stellt klar: Trester, nun als „Agroindustrieller Rohstoff“ bezeichnet, muss weder vorsortiert noch hygienisiert werden.¹⁰⁰

Nach Bundesimmissionsschutzgesetz zählt die in Planung befindliche BGA Bockelwitz nur zu einer genehmigungsbedürftigen Anlage, so folgende Voraussetzungen, welche in der 4. Bundesimmissionsschutzverordnung genannt werden, erfüllt werden:

- Der Motor zur Verstromung des Biogases hat eine Feuerungsleistung von mehr als einem Megawatt.¹⁰¹
 - *Da im Fall Bockelwitz das Biogas lediglich zur Einspeisung ins Erdgasnetz aufbereitet wird, wird diese Voraussetzung nicht erfüllt.*
- Die Durchsatzleistung von nicht gefährlichen oder gefährlichen Abfällen ist größer als $10 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$.¹⁰²
 - *Da die Definition für Abfall auf dem Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz fußt, trifft auch dieser Punkt zumindest für Apfeltrester, wie im ersten Absatz des Kapitels 5.1 erklärt, nicht zu.*¹⁰³
- Es wird mehr als 6500 m^3 Gülle gelagert.¹⁰⁴
 - *Nach Bauplanung hat allein eines der drei Gärproduktlager ein Volumen von 8482 m^3 .*
- Es wird brennbares Gas von mehr als 3 t bis weniger als 30 t gespeichert.¹⁰⁵
 - *Nach Bauplanung werden bis zu 28 t Gas gespeichert.*

Da beide zuletzt benannten Bedingung in der „Spalte 2“ der 4. BImSchV stehen kommt ein Genehmigungsverfahren nach BImSchG nur in Betracht, wenn für die Zulassung der Anlage eine Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) erforderlich ist.¹⁰⁶ Nach Nummer 9.1.4 der UVP wird dies in standortbezogener Vorprüfung entschieden.¹⁰⁷

100 vgl. [50] S. 13-15

101 vgl. [44] Punkt 1.4 S.4-5

102 vgl. [44] Punkt 8.6 S.22

103 zum alleinigen Bezug auf den Anwendungsbereich des KrWG für Reststoffe bei Genehmigungen nach BImSchG siehe Rechtsprechung vom 12.04.2010 in [55]

104 vgl. [44] Punkt 9.36 S.28

105 vgl. [44] Punkt 9.1 S.26

106 vgl. [44] S.2

107 vgl. [47] S. 22

Am 01.01.2012 soll erwartungsgemäß das nivellierte EEG 2012 in Kraft treten. Die Grundlage der Gesetzesänderung bildet der EEG-Erfahrungsbericht, welcher im zweiten Quartal 2011 durch das Bundesumweltministerium fertig gestellt werden soll. Unmittelbar darauf folgt ein erster Arbeitsentwurf des EEG 2012.

Klare Aussagen zur Neuausrichtung des EEG lassen sich erst ab diesem Moment geben. Mögliche Entwicklungen werden aber bereits in den verschiedenen Fachgremien diskutiert.

Für die Problematik relevante Vorschläge und Positionen werden folgend durch den Verein „Fachverband Biogas e.V.“ (als Vertreter von über 4000 Anlagenbetreibern, Herstellern, Planern und Wissenschaftlern) und sowie durch den seit 2009 existenten „Biogasrat e.V.“ (als Verbund vornehmlich großer Energie- und Technologiekonzerne, wie E.ON, GE und Vattenfall) vorgestellt.

Vergütung und Boni

Die Vergütung der Biogasverstromung soll nach dem Biogasrat beibehalten, aber stark vereinfacht werden um die Transparenz der Staffelung zu steigern und somit „Fehllokationen von Investitionsmitteln“ zu vermindern.

Da sich der Einsatz biogener Reststoffe und Abfälle nicht weiterentwickelt habe und der „Druck auf Ackerflächen und lebensmittelfähige Pflanzen“ verstärkt hat wird vorgeschlagen zukünftig NaWaRo und biogene Reststoffe gleichgestellt, somit diskriminierungsfrei, zu vergüten. Dieser Argumentation folgt nun auch Niedersachsens Umweltminister Hans-Heinrich Sander (FDP)¹⁰⁸. Wie die Wirtschaftlichkeitsrechnung in Kapitel 5.3 zeigt hätte dies eine deutliche Anhebung bzgl. des maximalen Bezugspreises des Apfeltresters zur Folge.

Würde der NaWaRo-Bonus, dessen wissenschaftliche Begründung noch aussteht, durch eine solche Gleichstellung aber defacto abgeschafft könnte die verstärkte Nutzung rein pflanzlicher Nebenprodukte (deren Potenzial in Kapitel 1.1.2 grob erfasst wird) die Preisstabilität des Maispreises gefährden. Ein weiterer, durch Überproduktion erzeugter, Preisverfall könnte existenzgefährdend für Landwirte und durch vergrößerten Export dieses Lebensmittels marktverzerrend wirken.

Im Gegensatz zu den als überflüssig empfundenen Boni, wie dem Technologiebonus und dem Formaldehydbonus, soll aber weiterhin am Güllebonus festgehalten werden bzw. nach Auffassung des Fachverbandes Biogas eine vom Einsatz von NaWaRo

¹⁰⁸ vgl. [45]

unabhängige Vergütung eingerichtet werden. Nur so würden „Abfall-Biogasanlagen“ wirtschaftlicher und müssten nicht zusätzlich auf NaWaRo zurückgreifen. Der sachlichen Begründung des Gülle-Bonus, in welcher die anaerobe Faulung von Gülle nicht nur energiepositiv verläuft, sondern ebenso ökologisch zu bevorzugen ist (zumal ausgefaulte Gülle ein besseres Düngemittel darstellt), würde somit Rechnung getragen.

Netzintegration

Im Zuge des zunehmenden Anteils an erneuerbaren Energien sollte als „Annäherung an den Markt“ die Anwendung z.B. als Spitzenlastkraftwerk bzw. die Bereitstellung von Regelstrom gefördert werden. Hierzu müssten aber weitere Anreize hinsichtlich Regeltechnologie und Gasspeicher geschaffen werden.

Anlagenbegriff

Um die bisher rechtlich ungenaue Definition einer Anlage sowie die energetisch unsinnige Aufteilung großer Anlagen auf mehrere kleinere BHKW und Fermenter (welches der nach Anlagengröße unverhältnismäßigen Vergütungsstaffelung geschuldet ist) zu stoppen, soll zum einen der Anlagenbegriff klar definiert werden und zum anderen der Subventionierung unwirtschaftlicher Anlagenkonfigurationen z.B. mit verschärften KWK-Kriterien begegnet werden.¹⁰⁹

109 vgl. [37], [38]

5.2 Technische und wirtschaftliche Annahmen

Der Betrachtung in Kapitel 5.3 werden folgende Annahmen zu Grunde gelegt:

Preisbildung

In einer ausschließlich ökonomischen Betrachtung erscheint der Einsatz von Apfeltrester erst dann als sinnvoll, wenn dessen Anteil als Substitut für Maissilage einen geringeren Rohgaspreis erzielt. Die Wirtschaftlichkeit des Einsatzes des Tresters wird daher in einer Kostenvergleichsrechnung ermittelt.

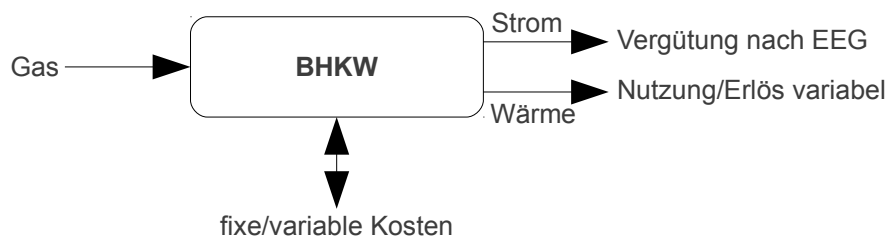


Abb. 58: ökonomische Bilanz für ein BHKW (stark vereinfacht) – eigene Darstellung

Abbildung 58 zeigt stark vereinfacht ökonomisch relevante Ein- und Ausgänge mit der Bilanzgrenze um ein BHKW. Grundsätzlich finden Kosten und Erlöse nur dann Beachtung, wenn diese bei Mais und Trester unterschiedlich sind. Daher werden Investitionskosten und Personalkosten nicht berücksichtigt. Die Betriebskosten könnten, unter der Annahme, dass ein dünneres Substrat (siehe Kapitel 4.2.2) eine Energieeinsparung durch verminderten Vermischungsaufwand hervorruft, etwas geringer sein. Da sich diese Einsparung aufgrund der Datenlage bisher nicht kalkulieren lässt und auch weitere mögliche Kosten z.B. durch erhöhte Korrosionserscheinungen des BHKWs bei Apfeltrester unbekannt sind, werden die Betriebskosten ebenso gleich gesetzt.

Als grundlegend unterschiedlich angenommen und damit betrachtet werden folgende Faktoren:

- Bezugskosten (Bezug frei Kelterei, Transport und Lagerung inklusive Lagerverluste)
- Methanerträge beider Stoffe
- Erlöse nach Einspeisevergütung

Wie bereits erwähnt kann der NaWaRo-Bonus nicht für Apfeltrester geltend gemacht werden und wird heraus gerechnet. Problematisch bei diesem Vorgehen ist die bisher nicht vereinheitlichte Vorgehensweise. Das EEG gibt dazu lediglich Standard-Biogaserträge nach Frischmassegewicht und elektrischer Energie an. Jedoch wird dabei weder:

- der Trockensubstanzgehalt des Inputsubstrates,
- der Wirkungsgrad für die Umwandlung der chemisch gebundenen Energie in elektrische Energie sowie das
- Verhalten bei abweichenden Gaserträgen beachtet.

Seitens des Umweltgutachters aber auch des Anlagenbetreibers gibt es daher Möglichkeiten den Anteil der Vergütung ohne NaWaRo-Bonus zu verändern und somit den NaWaRo-Bonus selbst (welcher mit $7 \text{ ct} \cdot \text{kWh}_{\text{el}}^{-1}$ angesetzt ist) zu manipulieren.

Fällt die Stromgewinnung über dem nach Standarderträgen zu erwarteten Wert aus, so könnte im Zuge des anteiligen Abzuges der Standardertrag aller Inputsubstrate erhöht werden. Damit würde zwar anteilig der NaWaRo-Bonus erhalten bleiben, dafür aber entweder die Prozessführung oder aber die Inputsubstrate diskriminiert werden.

Würde lediglich der Standardertrag vom Gesamtertrag abgezogen würde folglich ein darüber hinaus gehender Ertrag dem Substrat zugeschrieben, welches durch den NaWaRo-Bonus abgedeckt ist – in dem Falle Maissilage.

Bei Verwendung „reinpflanzlicher Nebenprodukte“ mit höherem Trockensubstanzgehalt, z.B. abgepresster Trester könnte der Abzug des NaWaRo-Bonus ebenfalls verringert werden.

Auch wird der Wirkungsgrad einer BHKW-Anlage nicht definiert. Da dieser die Stromausbeute aus dem Biogas bestimmt, hätte er im Gesetz bzw. einer angehängenen Verordnung oder Richtlinie Verwendung finden müssen.

In der folgenden Rechnung wird dieses Problem wie folgt behandelt:

- elektrischer Wirkungsgrad des BHKWs: 0,38 (fiktiv)
- Trockensubstanzgehalt: nach Begleituntersuchungen der eigenen Versuche
- Methanertrag: Mittelwerte des kontinuierlichen Versuchs

Nachdem sich aus Rohstoff-, Transport, Lagerungs-, Beschickungs- und Silierkosten für Mais dessen Bezugskosten frei Eintragungssystem ergeben, wird der Rohgaspreis aus Methanertrag, Trockensubstanzgehalt und Wirkungsgrad des BHKWs errechnet. Um die maximalen Bezugskosten frei Kelterei von Apfeltrester zu ermitteln wird ausgehend von diesem Preis zurückgerechnet. Da der NaWaRo-Bonus den Erlös vermindert, muss im Umkehrschluss auch der Rohgaspreis bei Trester nach folgender Formel verringert werden:

$$P_{Trester} = P_{Maissilage} - (\eta_{el} \cdot E_{NaWaRo} \cdot z_{real EEG}) \quad (1)$$

$P_{Trester}$	... Rohgaspreis für Apfeltrester	[€ · kWh _{chem} ⁻¹]
$P_{Maissilage}$	... Rohgaspreis für Maissilage	[€ · kWh _{chem} ⁻¹]
η_{el}	... Wirkungsgrad des BHKWs	[-]
E_{NaWaRo}	... NaWaRo-Bonus	[ct · kWh _{el} ⁻¹]
$z_{EEG/real}$	... Korrekturfaktor aus Differenz des Standard- Ertrages zu den gemessenen Erträgen im Versuch	[-]

Dabei ist der Korrekturfaktor z nur anzuwenden, wenn davon ausgegangen wird, dass die realen Methanerträge des Tresters von angesetzten Standard-Erträgen für Obsttrester im EEG¹¹⁰ abweichen und zusätzliche Erträge den anderen NaWaRo-Bonus-fähigen Substraten zugerechnet werden. In der folgenden Rechnung werden zwei Mittelwerte des Methanertrages des Tresters verwendet:

- ein über alle gewerteten Versuchstage gemittelter Wert (von 369,27 l · kg_{oTS}⁻¹) sowie
- der Mittelwert der letzten Versuchsphase (mit 447,21 l · kg_{oTS}⁻¹)

Umgerechnet und ins Verhältnis mit dem im EEG beschriebenen Wert gesetzt vermindert sich der abzuziehende NaWaRo-Bonus von 7 ct · kWh_{el}⁻¹ auf nur noch 3,7 bis 4,4 ct · kWh_{el}⁻¹.

Anfall des Apfeltresters

Menge, Zeitraum und Schwankungsbreite wurden bereits in Kapitel 2.1.1 ausführlich dargestellt. Aus der unsicheren Anfallmenge des Tresters besonders zu Beginn und Ende der Erntesaison¹¹¹ und dem Gebot bei wechselnden Substraten nur behutsam das Zugabeverhältnis zu steigern, sollten zu Beginn wie auch zum Ende

¹¹⁰ angeben mit 187 kWh_{el} · t_{FM}⁻¹ – nach [10] - „Kostenvergleichsrechnung“ umgerechnet zu 233,63 l · kg_{oTS}⁻¹ – dies entspricht zu 82,85 % den Gaserträgen des KTBL für Apfeltrester

¹¹¹ vgl. [40]

Belastungssituationen vermieden werden – zumal (zumindest im Rahmen dieser Arbeit) keinerlei Belastungsversuche mit stark schwankenden Substratverhältnissen durchgeführt wurden, welche eine hierfür erforderliche Prozessstabilität belegen könnten. Es wird empfohlen, die Bezugsmenge für diese Zeiten wenn nötig vom Anfall zu entkoppeln und z.B. eine Containerladung von ca. 8 t (was einem Trester/Mais-Verhältnis von 5,63 % entsprechen würde)¹¹² als Bezugswert für die tägliche Beschickung zu nehmen. Auch wenn der maximale Anfall des Tresters 25 t beträgt, so fallen durchschnittlich während der Arbeitstage von Montag bis Donnerstag „nur“ 20 t an. Bezogen auf sieben Wochentage ergibt dies einen täglichen Anfall von 11,43 t.

Lagerung, Transport und Beschickung

In den Vergleichsfällen wird – aufgrund des oben betrachteten geringen und auf wenige Monate verteilten Anfall des Tresters – die Silierung zur Haltbarmachung nicht betrachtet. Erst wenn Trester überregional bezogen würde, könnte der Anfall die maximal mögliche Beschickung von 69,64 t Trester pro Tag¹¹³ erreichen und müsste eingelagert werden. Hierfür sei auf die Möglichkeit der Schlauchsilierung hingewiesen, in welcher das Schüttgut direkt in einen Silierschlauch geschüttet wird. Zwar ist diese Methode mit Mehrkosten im Vergleich zur Silierung im Gradwandsilo verbunden, jedoch ermöglicht sie es den variablen Anfall ohne Zwischenlagerung direkt ins Silo zu befördern. Nach [46] sei dies in der Praxis jedoch mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden, weil der hohe Wasseranteil die Pressfähigkeit des Tresters beeinträchtigt.

Da der tägliche Anfall im Regelfall die maximale Zugabe nicht übersteigt, kann er direkt vom Container auf den Schubboden geschüttet werden. Bei erhöhtem Anfall ist es auch möglich den Trester für wenige Tage an einer Silowand zwischenzulagern oder aber in umliegenden Biogasanlagen, wie der BGA Hasslau einzusetzen¹¹⁴.

Für die fixen und variablen Transportkosten werden Kostenvoranschläge umliegender Speditionsfirmen¹¹⁵ berücksichtigt.

Für die Beschickung wird, wenn möglich, das Inputsubstrat vom Transportcontainer direkt auf den Schubboden gekippt. Dies wird ermöglicht durch den 18 · 7 m² großen Schubboden, unter Annahme dass die Schütthöhe nur 1,5 m der vorhandenen 3 m

112 dies ergibt sich aus folgendem Verhältnis: $8t_{\text{Trester}} \cdot (150t - 8t)_{\text{Mais}}^{-1}$

113 unter Annahme, dass täglich 150 t Mais beschickt werden und der maximale Anteil des Tresters dem der Variante „Mix“ entspricht.

114 vgl. [27]

115 vgl. [40]

erreicht und die Schüttdichte $0,8 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$ entspricht. Das resultierende maximale Beschickungsgewicht von 151 t reicht aus, um die Beschickung von mindestens einer Tagesfracht sicherzustellen.

Sollte der Trester zwischengelagert werden, so wird er zu einem späteren Zeitpunkt zusammen mit der Maissilage mit Radladern vom Lagerort zum Schubboden gefördert.¹¹⁶ Mehrkosten durch Lagerung und Beschickung werden in Form einer Fallunterscheidung berücksichtigt, im Anhang A - 6 erläutert und in den Tabellen 30 bis 33 dargestellt. Es zeigt sich, dass die dargestellten Einzelfälle ohne Betrachtung der Wirtschaftlichkeit noch keine klare Entscheidung ermöglichen. Jedoch wird deutlich, dass die Nutzung größerer Transportkapazitäten den höchsten Beschickungskostenfaktor aufweist sowie (je nach Fall) die längste mittlere Lagerzeit für Trester bedingt. Wird der tägliche Eintrag des Tresters auf zehn Tonnen limitiert, sollte, wenn der angefallene Trester komplett abgenommen wird, der Anfall auf eine weitere BGA verteilt werden. Bezüglich Lagerzeit und Beschickungskostenfaktor ist dabei eine nach Möglichkeit gleiche Verteilung auf beide BGA der alleinigen Abgabe des Überschusses vorzuziehen. Ist die Transportmenge größer als die tägliche Beschickung, so wird davon ausgegangen, dass es kein direktes Abkippen auf den Schubboden gibt, da dies zu ungenau wäre. Der Beschickungskostenfaktor ist daher 1. Die für die folgende Rechnung angenommenen substratbezogenen Größen sowie angenommene Kosten zur Ermittlung eines Rohgaspreises stellt Tabelle 15 dar.

Tab. 15: Substratbezogene Annahmen für die Wirtschaftlichkeitsrechnung

		Mais	Apfeltrester
oTS-Gehalt	[%FM]	30,72	21,06
Ausgasung/Siliverluste	[%FM]	6	keine*
Bezug frei	[€ · t ⁻¹]	24	siehe Tabelle 17
Halm/Kelteiei			
Transportkosten	[€ · t ⁻¹]	8	siehe Tabelle 16
Silerkosten	[€ · t ⁻¹]	1,6	-
Beschickungskosten	[€ · t ⁻¹]	1,5	1,5
Bezugskosten frei	[€ · t ⁻¹]	35,10	
Eintragungssystem			
Methanertrag	[l _N · kg _{oTS} ⁻¹]	377,61**	369,27** (bzw. 447,21***)
Heizwert Methan	[kWh · l _N ⁻¹]	0,01	0,01
Rohgaspreis	[ct]	3,22	siehe Formel 1

* Verluste durch Ausgasung werden nicht betrachtet, da die mittlere Lagerzeit kleiner als die Lagerzeit der verwendeten Tresterprobe der obigen Versuchsreihe ist; ** Mittelwert aller gewerteten Versuchstage;

*** mittlerer Methanertrag aus der Endphase

¹¹⁶ ortsgebundene Annahmen sind [41] entnommen

5.3 Vorstellung der Vergleichsfälle

Folgend werden Vergleichsfälle für die energetische Verwendung von Apfeltrester in Biogasanlagen unter veränderlichen Umgebungsbedingungen beschrieben. Die derzeitige Verwendung des Tresters wurde bereits in Kapitel 5.1 ausführlich behandelt. Die Vielzahl veränderlicher Faktoren, welche den zu ermittelnden maximalen Bezugspreis für Apfeltrester bestimmen, bedingen eine geteilte und aufeinander aufbauende Fallunterscheidung.

5.3.1 Optimierung hinsichtlich diskreter Parameter des Transports

Tab. 16: Vergleich der Transportkosten für Trester
vgl. [10] - „Kostenvergleichsrechnung_2“

Speditions- unternehmen ¹¹⁷		Spedition (A)	Spedition (A)	Spedition (B)	Kelterei Sachsenobst
Transport via		10 m ³ Container	40m ³ Abrollmulde	31m ³ Container	10 m ³ Container
Transportmasse	[t]	8	20 - 25	25	8 - 10
fixe Kosten	[€ · t ⁻¹]	6,88	3,75	-	-
variable Kosten	[€ · (t*km) ⁻¹]	0,12	0,05	-	-
BGA „Bockelwitz“ (2)					
Entfernung zur Kelterei				30	
Gesamtkosten	[€ · t⁻¹]	10,55	5,33	23	19,33
BGA „Hasslau“ (1)					
Entfernung zur Kelterei				7,7	
Gesamtkosten	[€ · t⁻¹]	7,81	4,15		6,44

Tabelle 16 zeigt eine Auswahl von zwei preisgünstigen und umliegenden Transportunternehmen sowie der kalkulierten Transportkosten im Falle der Übernahme des Transports durch die Kelterei selbst.

Die doch erheblichen Kosten allein für den Transport des Tresters zeigen, dass die Auswahl der primär anzufahrenden BGA den Preis bestimmen wird. Aufgrund der deutlich geringeren Kosten für den Transport zur technisch ähnlich ausgelegten BGA Hasslau wird fortan jene BGA als „BGA 1“ bezeichnet und soll somit bevorzugt mit Trester beliefert werden, zumal die technischen Voraussetzungen denen der BGA Bockelwitz („BGA 2“) stark ähneln.

¹¹⁷ Klarnamen und Konditionen siehe [49]

Sollen bevorzugt kleinere Chargen ausschließlich zur BGA 1 gefahren werden, so sollte die Kelterei Sachsenobst selbst den Transport übernehmen – bei größeren Transportmassen und Transporten zur BGA 2 wäre die Spedition (A) zu empfehlen. Kommen Mischtransporte in beide BGA in Frage sind weitere, folgend dargestellte, Überlegungen notwendig, da die Aufteilung der Trestertransporte die Logistik, bestehend aus Anlieferung, z.T. mehrtägiger Befüllung, Abnahme und Abtransport unnötig belasten würde.

5.3.2 Optimierung hinsichtlich der Verteilung des Tresters

Anhang A - 6 zeigt drei Möglichkeiten von Anlieferung und Beschickung auf:

- jeglicher in der Kelterei anfallender Trester wird in die BGA 1 gefahren
- Überschüsse werden zur BGA 2 gefahren
- der Trester wird – möglichst gleichmäßig – auf beide BGA aufgeteilt.

Wie in A - 6 beschrieben, weist jede dieser Möglichkeiten gewisse Vorzüge, aber auch Nachteile auf. Zusammen mit dem Einbezug von 8 t bzw. 20 t als Transportmasse, sowie der verschiedenen Transportunternehmen ergeben sich folgende Vergleichsfälle:

- **(1)**: Transportmasse: 8 t, Transport durch Kelterei, Alles in BGA 1
- **(2)**: Transportmasse: 8 t, Überschuss in BGA 2
 - **a)** Transport durch Kelterei – betrachtet wird BGA 1
 - **b)** Transport durch Kelterei – betrachtet wird BGA 2
 - **c)** Transport durch Spedition (A) - betrachtet wird BGA 1
 - **d)** Transport durch Spedition (A) - betrachtet wird BGA 2
- **(3)**: Transportmasse: 8 t, Verteilung auf beide BGA mittels Spedition (A)
 - **a)** BGA 1; **b)** BGA 2
- **(4)**: Transportmasse: 20 t, Transport durch Spedition (A), Alles in BGA 1
- **(5)**: Transportmasse: 20 t, Überschuss in BGA 2 mittels Spedition (A)
 - **a)** BGA 1; **b)** BGA 2
- **(6)**: Transportmasse: 20 t, Verteilung auf beide BGA mittels Spedition (A)
 - **a)** BGA 1; **b)** BGA 2

Tab. 17: Vergleich des maximalen Bezugspreises für die Vergleichsfälle (1) bis (6)
vgl. [10] - „Kostenvergleichsrechnung_2“

	Einheit	Mais	(1)	(2a)	(2b)	(2c)	(2d)	(3a)	(3b)	(4)	(5a)	(5b)	(6a)	(6b)
Differenz durch NaWaRo-Bonus (7ct)	[ct · kWh _{el} ⁻¹]	0,00	4,43	4,43	4,43	4,43	4,43	4,43	4,43	4,43	4,43	4,43	4,43	4,43
... bezogen auf Wirkungsgrad	[ct · kWh ⁻¹]	0,00	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68
Rohgaspreis	[ct · kWh⁻¹]	3,22	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54
Summe frei Eintragungssystem	[€ · t_{FM}⁻¹]	35,10	11,96	11,96	11,96	11,96	11,96	11,96	11,96	11,96	11,96	11,96	11,96	11,96
Beschickungskostenfaktor	[-]	1,00	0,60	0,50	1,00	0,50	1,00	0,33	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Beschickung	[€ · t]	1,50	0,90	0,75	1,50	0,75	1,50	0,50	0,00	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
Bezug frei BGA	[€ · t]	32,00	11,06	11,21	10,46	11,21	10,46	11,46	11,96	10,46	10,46	10,46	10,46	10,46
Transportkosten	[€ · t _{FM} ⁻¹]	8,00	6,44	6,44	19,33	7,82	10,55	7,82	10,55	4,15	4,15	5,33	4,15	5,33
Bezug frei Halm/Kelterei	[€ · t _{FM} ⁻¹]	24,00	4,61	4,76	-8,88	3,39	-0,09	3,64	1,41	6,30	6,30	5,13	6,30	5,13
Bezug frei Kelterei – auf beide Fälle bezogen	[€ · t_{FM}⁻¹]		4,61	2,03		2,69		2,74		6,30	5,83		5,72	

Die Werte aus Tabelle 17 fußen auf den Annahmen aus Kapitel 5.2, im Besonderen Tabelle 15.

Es zeigt sich, dass die zusätzlichen Kosten, welche durch den (je nach Fall unterschiedlichen) Beschickungsaufwand entstehen, im Vergleich zu den Transportkosten vernachlässigbar sind. Die Vergleichsfälle (2b) und (2d) weisen sogar negative Kosten frei Kelterei auf. Das bedeutet, dass gleiche Gewinne mit Trester im Vergleich zur Maissilage nur gemacht werden können, wenn die „Entsorgung“ des Tresters bereits honoriert würde. Beide Fälle beziehen sich aber nur auf Kosten durch die Anlieferung zur BGA 2. Werden diese bezogen auf die Liefermengen mit dem jeweiligen Vergleichsfall für die Belieferung der BGA 1 zusammengefasst, so ergibt sich wiederum ein positiver Bezugspreis frei Kelterei von 2,03 € bzw. 2,69 €. Würde jener Bezugspreis ausschließlich für die Fallbewertung herangezogen, so ist der Vergleichsfall (4) den anderen Fällen vorzuziehen, da dieser alleinig einen maximalen Bezugspreis von 6,30 € ermöglicht.

In den Fällen (1), (2a) und (2b) sind jedoch Bezugspunkt und Spedition identisch. Es wäre daher zu prüfen, ob der Bezugspreis frei BGA von über 11 € ein besseres Angebot als der Bezugspreis frei Kelterei (für Fall 4: 6,30 €) darstellt. Da dies allerdings erst nach Fertigstellen der Arbeit eruiert werden kann beziehen sich die angeschlossenen Betrachtungen auf den Vergleichsfall (4).

Unter der Annahme, dass mit der Spedition (A) weitere lokale Abprodukte, wie Kartoffelschrempe, transportiert werden, würden die hier veranschlagten Transportkosten weiter sinken.

Die Instabilität des Bezugspreises für Trester wird in Tabelle 18 durch die Darstellung von drei Extremfällen für den Vergleichsfall (4) gezeigt. Fall (4-I) zeigt dabei die Auswirkungen bei vollem Abzug des Nawaro-Bonus auf. Fall (4-II) bezieht sich auf eine „diskriminierungsfreie“ Vergütung, wie in Kapitel 5.1 beschrieben.

Wird davon ausgegangen, dass Apfeltrester einen Methanertrag wie in den letzten Tagen des kontinuierlichen Versuchs (siehe Tabelle 10) ermöglicht, erhöht sich der Bezugspreis für diesen Fall (4-III) unter sonst gleichbleibenden Bedingungen um über 5 € auf 11,59 €. Hinsichtlich dieser enormen Veränderung sollte nach dem praktischen Einsatz in der BGA unbedingt eine Neuberechnung des Bezugspreises stattfinden, da diese Differenz bezogen auf den maximalen jährlichen Gesamtanfall (von 2000 t) bereits einen Gewinnunterschied von 10.580 € bedeuten würde.

Variationen von Vergleichsfall (4):

- I) Vollständiger Abzug des NaWaRo-Bonus in Höhe von 7 ct
- II) NaWaRo-Bonus wird nicht abgezogen
- III) hoher Methanertrag von $447,21 \text{ l}_N \cdot \text{kg}_{\text{OTS}}^{-1}$ für Apfeltrester angenommen

Tab. 18: Vergleich des maximalen Bezugspreises unter Variation von (4)
vgl. [10] - „Kostenvergleichsrechnung_2“

	Einheit	(4-I)	(4-II)	(4-III)
Differenz durch NaWaRo-Bonus (7ct)	[ct · kWh_{el}⁻¹]	7,00	0,00	3,66
... bezogen auf Wirkungsgrad	[ct · kWh ⁻¹]	2,66		1,39
Rohgaspreis	[ct · kWh⁻¹]	0,56	3,22	1,83
Summe frei Eintragungssystem	[€ · t _{FM} ⁻¹]	4,36	25,05	17,24
Beschickungskostenfaktor	[-]	1,00	1,00	1,00
Beschickung	[€ · t]	1,50	1,50	1,50
Bezug frei BGA	[€ · t]	2,86	23,55	15,74
Transportkosten	[€ · t _{FM} ⁻¹]	4,15	4,15	4,15
Bezug frei Kelterei	[€ · t_{FM}⁻¹]	-1,30	19,39	11,59

Den Einfluss des Bezugspreises frei Halm von Mais auf den resultierenden maximalen Bezugspreis für Trester zeigt Abbildung 59. Der lineare Bezug ergibt sich dabei aus Formel 1. Es zeigt sich, dass der Ersatz von Maissilage durch Apfeltrester nach aktueller politischer Förderlage bereits ab Bezugskosten frei Halm für Mais in Höhe von 15 € wirtschaftlich darstellbar ist.

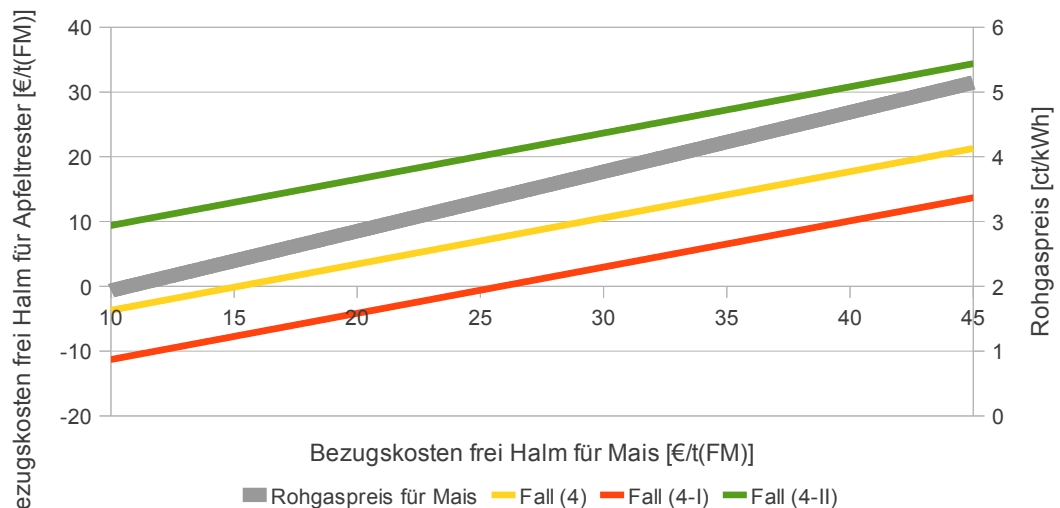


Abb. 59: Entwicklung der maximalen Bezugskosten frei Kelterei unter variablen Bezugskosten für Mais vgl. [10] - „Kostenvergleichsrechnung_2“

5.3.3 Verwertung des Gärrestes

In der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung blieb die Entsorgung bzw. Vermarktung des Gärrestes außen vor.

Dieser soll, wie vertraglich festgeschrieben, entsprechend dem Anteil der belieferten Inputsubstrate auch wieder durch die Landwirte abtransportiert werden. Naheliegender wäre, dass die Kelterei den Gärrest nicht wieder zurück nimmt, da diese zumindest nicht direkt über Felder verfügt, auf welchen der Gärrest ausgebracht werden könnte. Durch den Eintrag des Tresters sowie weiterer Reststoffe entstünde somit ein Überschuss, dessen Verwendung noch nicht abschließend geklärt ist.

Obwohl, wie Tabelle 19 zeigt, die Ausgaben durch das Ausbringen von Stallgülle infolge der Einsparung von mineralischem Dünger verringert werden, wird Fermentergülle bisher kein Wert zugeschrieben, zumal dieser zum größten Teil von den Transportkosten von der BGA zum Feld abhängt.¹¹⁸

¹¹⁸ vgl. [27]

Zur Abschätzung der Größe eines Abnehmerkreises soll folgend eine maximale Transportentfernung für die Abnahme des Gärrestes bestimmt werden.

Durch die unterschiedlichen Preise der verschiedenen Düngesubstrate stellt sich die Frage, ob die Qualität des Gärrestes durch das Einbringen von Apfeltrester in den Fermenter verändert wird. Als Kenngröße soll der Gehalt an Gesamtstickstoff sowie darunter der Anteil an Ammoniumverbindungen dienen.

Wie die Berechnung in Anhang A - 7 zeigt, kann die These, nach welcher sich Trester negativ auf den Stickstoffgehalt auswirkt¹¹⁹, nicht untersetzt werden. Es wird in der folgenden Betrachtung daher davon ausgegangen, dass der Einsatz von Trester keine Unterschiede bzw. der Qualität der Gärrestes erzeugt.

An den Preis für landwirtschaftliche Erzeugnisse angelehnt ist der Preis für Düngemittel mitunter starken Schwankungen unterlegen. Diese spiegeln sich auch in der Berechnung der maximalen Transportentfernung und des minimalen Frei-Halm-Preises wieder.

Da die Erläuterung aller Faktoren, welche den Bezugspreis für Mais sowie Fermentergülle beeinflussen, nicht mehr im Rahmen der Arbeit abgedeckt werden kann, zeigt Tabelle 19 lediglich eine Zusammenfassung jener Rechnung, welche in Gänze in [10] - „Verwertung Gärrest“ aufgeführt ist.

Der Preis für Fermentergülle errechnet sich aus der Differenz der unterschiedlichen Bezugspreise für Mais unter:

- (1) Abnahme des Gärrestes durch den Landwirt
- (2) Verbleib des Gärrestes in der BGA und damit einhergehende Zusatzausgaben für den Bezug von Mineraldünger zum Ersatz des Nährstoffentzuges.

Fall (3) richtet die Transportentfernung von BGA zum Feld nach dem in (2) erhöhten Bezugspreis aus und ermittelt so jene maximale Entfernung, welche auch vertragsfremde Landwirte für den Bezug des Gärrestes in Kauf nehmen könnten.

Sind die Abkürzungen „**MAX**“ und „**MIN**“ angehängt, so werden maximale und minimale Düngemittelpreise¹²⁰ der Jahre 2007 und 2008 verwendet. Die Berechnung der Düngemittelpreise, sowie die Entwicklung der Preise von 2006 bis 2011 zeigt Anhang A - 8.

119 vgl. [51] S. 5

120 vgl. Quelle: [52]; Berechnung [10] - „Verwertung Gärrest“

Tab. 19: Variation des Mais-Bezugspreis und maximale Transportentfernung für überschüssigen Gärrest
vgl. [10] - „Verwertung Gärrest“

	(1)	(2)	(3)	(2)	(3)	(2)	(3)
				MAX	MAX	MIN	MIN
Mais Bezugspreis frei Halm [€ · t _{FM} -1]	21,04	26,33	26,33	29,81	29,81	21,86	21,86
Gesamtkosten							
Gärrestausbringung [€ · ha-1]	117,25	-	350,57	-	495,57	-	350,57
Kosten des Mineraldüngers [€ · ha-1]	50,53	400,93	50,53	554,21	58,82	203,86	27,00
Entfernung BGA zu Feld [km]	5,00	5,00	34,85	5,00	53,40	5,00	12,65

Den Fällen (1) und (2) der Tabelle 19 kann entnommen werden, dass das Ausbringen des Gärrestes die Kosten für Mineraldünger um mehr als 300 € · ha⁻¹ senkt und somit eine Preisersparnis um 5,29 € · t_{FM}⁻¹ hervorruft. Diese Ersparnis entspräche kalkulatorisch dem „Marktwert“ des Gärrestes und wird im Fall (3) mit einer maximalen Entfernung zwischen BGA und den Feld als Gärresthalde verrechnet.

Es zeigt sich, dass der Abtransport des Gärrestes aktuell bis zu einer Entfernung von 34,85 km für den Landwirt wirtschaftlich darstellbar ist. Erreichen die Düngemittelpreise wieder ähnlich hohe Preise wie im Jahre 2008, so erhöht sich diese Entfernung auf 53,4 km. Sollten die Preise allerdings wieder auf die Werte von 2007 fallen, könnten nur noch 12,65 km zurückgelegt werden.

6 Fazit

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Problemlage der übermäßigen Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen aufgeführt und als Alternative der verstärkte Einsatz von industriellen Reststoffen am Beispiel Apfeltrester diskutiert. Es wurde versucht, das Thema ganzheitlich zu behandeln.

Abschließend können folgende Ergebnisse genannt werden:

Das im Batch-Versuch ermittelte Ertragspotential für Apfeltrester übertrifft deutlich die nach KTBL und EEG benannten Gaserträge und zeigt auf, dass die alleinige Kategorisierung nach „Obsttrester“ nicht ausreichend ist.

Wider anfänglicher Bedenken konnte gezeigt werden, dass der Einsatz von Apfeltrester in anaerober Vergärung weder die Prozessstabilität negativ beeinflusst, noch die Methanerträge deutlich herabsetzt. Als Restprodukt könnte ein vermehrter Einsatz in BGA den weiteren Ausbau der Energiepflanzen eindämmen und dem Gedanken der Kreislaufwirtschaft besser entsprechen.

Die dynamische Kalkulation des kontinuierlichen Gärversuchs ermöglichte die kontinuierliche Anpassung der Prozessparameter. Diverse Korrekturrechnungen befreiten die genommenen Messwerte weitestgehend von störenden Umwelteinflüssen. Es konnte gezeigt werden, dass die Lagerdauer des Tresters keinen sichtbaren Einfluss auf die erzielten Methanerträge hatte und eine Silierung als substratstabilisierendes Mittel ohne Prozesshilfsmittel angewandt werden kann.

Sich ergebende Fragestellungen nach den Unterschieden der Beschaffenheit und Düngequalität des Gärrestes konnten nicht abschließend behandelt werden. Dies betraf auch Unterschiede bezüglich der Versorgung und des Bedarfs an Spurenelementen von Apfeltrester und Maissilage.

Weiterhin wurde im Zuge eines erfolgreichen und wirtschaftlichen darstellbaren Einsatz in BGA festgestellt, dass der bisher vernachlässigte Einsatz der „reinpflanzlichen Nebenprodukte“ den teilweise unscharfen Begriffsdefinitionen und vagen Verordnungen, aber auch der aktuell unattraktiven Vergütung zuzuschreiben ist. Sich langsam abzeichnende Veränderungen der Vergütungsstruktur im kommenden EEG 2012 könnten jedoch den Weg zum flächendeckenden Einsatz ebnen.

Die den wirtschaftlichen Einsatz des Substrates beeinflussenden Parameter, wie Transport-, Lager- und Beschickungslogistik wurden optimiert und Schwankungsbreiten eines maximalen Bezugspreises für Apfeltrester in Abhängigkeit der Auslegung, der Rechtslage, dem Maispreis, aber auch dem vom Düngemittelpreis abhängigen Markt zur Abnahme des Gärrestes aufgezeigt.

Für den diskutierten Fall der Abnahme des anfallenden Tresters einer Kelterei und anschließenden Verwertung in umliegenden BGA ist die Wirtschaftlichkeit theoretisch gegeben, bis zum Inkrafttreten des EEG 2012 praktisch aber weiter zu prüfen.

Es wurde festgestellt, dass in der aktuellen Marktlage eine Verwertung des Tresters in BGA die Verdrängung dessen aus anderen Sparten zur Folge hätte. Zusätzlich zur wirtschaftlichen Betrachtung wäre daher eine ökologische Bilanzierung der untersuchten Wertschöpfungskette ratsam.

Literaturverzeichnis

- [1] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.: Biogas – eine Einführung. 6. überarbeitete Auflage, Juli 2009
- [2] Wagner, Andreas: Photovoltaik Engineering - Handbuch für Planung, Entwicklung und Anwendung - 2., bearbeitete Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. ISBN–10 3-540-30732-x
- [3] Sørensen, Bent: Renewable Energy - Its physics, engineering, use, environmental impacts, economy and planning aspects. Third Edition. Roskilde: Elsevier Science, 2004. ISBN 0-12-656150-8
- [4] Kaltschmitt, Martin; Hartmann , Hans; Hofbauer, Hermann: Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren. 2., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin Heidelberg: Springer 2009. ISBN 978-3-540-85094-6
- [5] Wuppertaler Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH : Nutzungskonkurrenzen bei Biomasse - Endbericht 25. April 2008
- [6] Heise Zeitschriften Verlag GmbH & Co. KG: <http://www.heise.de/tp/r4/artikel/19/19202/1.html>. 18.01.2005. Abgerufen am 11.12.2010
- [7] Meyer , Rolf; Börner, Jan: Bioenergieträger – eine Chance für die „Dritte Welt“ . Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag. Berlin: edition sigma, 2002. ISBN 3-89404-820-4
- [8] VDI-Richtlinie 4630: Vergärung organischer Stoffe. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure, April 2006
- [9] Bedrich, Karl: Fotografien während des Bachelor-Praktikums, September - Dezember 2010
- [10] Bedrich, Karl: Kalkulation der Versuche des Bachelor-Praktikums, September-Januar 2010

-
- [11] Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL): Gasausbeute in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. 2. überarbeitete Auflage. Darmstadt, 2010
- [12] Bioreact GmbH: <http://www.biogaswissen.de/index.php/substratdaten.html>. Abgerufen am 21.11.2010
- [13] Austermann-Haun , Ute: Inbetriebnahme anaerober Festbettreaktoren . Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Universität Hannover. Hannover, 1997. ISBN: 3-921-421-22-5
- [14] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) : Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung. 4. unveränderte Auflage. Gülzow, 2009. ISBN: 3-00-014333-5
- [15] Landesbetriebes Hessisches Landeslabor: interne Prüfmethoden. Abgerufen September – Dezember 2010
- [16] Telschow, Dorothea: Untersuchung des Einflusses von Enzymen auf die Biogasbildung. Bauhaus-Universität Weimar. 2006
- [17] Böhm, Werner: Mündliche Mitteilung von 14.12.2010. Mitarbeiter des Landesbetriebes Landwirtschaft Hessen – Standort Eichhof
- [18] Landesbetrieb Hessisches Landeslabor – Standort Kassel: diverse Futtermittelanalysen 2008 – 2010
- [19] Weißbach, F.: Die Korrektur des TS-Gehaltes von Silagen als Substrat für die Biogasgewinnung. In: 120. VDLUFA-Kongress „Erhöhte Biogasmassennachfrage – eine neue Herausforderung für die Landwirtschaft“. Präsentationsmaterial. 2008
- [20] Weißbach, F.: Bewertung des Gasbildungspotentials. In: Internationale Wissenschaftstagung Biogas Science 2009 Band 3 der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft. Freising, 2009. ISSN 1611-4159

-
- [21] Nußbaum, Hansjörg: Silagen aus Apfeltrester für die Wildtierfütterung. Bildungs- und Wissenszentrum Aulendorf (LVVG), 2010
- [22] Obstland Dürreweitzschen AG: www.sachsenobst.de abgerufen am 15.12.2010
- [23] Zimmermann, Wolfgang: Mündliche Mitteilung vom 17.09.2010. Mitarbeiter der Kelterei Sachsenobst GmbH, Ebersbach
- [24] Landwirtschaftliche Kommunikations- und Service GmbH – Boden und Futtermittellabor: Futtermitteluntersuchungen Trub und Trester. 2008
- [25] Greppmaier, Martin: Experimentelle Untersuchungen an einer zweistufigen fuzzy-geregelten anaeroben Abwasserreinigungsanlage mit neuartigem Festbettmaterial. Lehrstuhl für Energie- und Umwelttechnik der Lebensmittelindustrie der Technischen Universität München. 2002
- [26] Zerr, Walter: Mündliche Mitteilung vom 21.12.2010. Laborleiter LHL Eichhof
- [27] Neumann, Mike: Mündliche Mitteilungen von Januar 2011. Mitarbeiter DREWAG/WME
- [28] Hölker, Udo: Temperatur der Biogasanlage. Bioreact GmbH, 11.02.2009
- [29] Bioreact GmbH: <http://www.biogaswissen.de/index.php/anlagendaten.html>. Abgerufen am 21.11.2010
- [30] Bioreact GmbH: <http://www.biogaswissen.de/>. Abgerufen am 21.11.2010
- [31] Deutscher Bundestag: Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (EEG). Ausfertigung: 2008, letzte Änderung: 11.08.2010
- [32] Bioreact GmbH: <http://www.biogaswissen.de/index.php/analysedaten.html>. Abgerufen am 21.11.2010
- [33] Deutsche Landwirtschafts Gesellschaft e.V.: DLG-Information 2/2006 – Grobfutterbewertung. Teil B. Frankfurt am Main, 2006

-
- [34] Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft über die Jagd: Sächsische Jagdverordnung (SächsJagdVO). 29.10.2004
- [35] Referentenentwurf eines Gesetzes zur Neuordnung des Kreislaufwirtschafts- und Abfallrechts: Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG). 06.08.2010
- [36] Arbeitsgemeinschaft Landtechnik und landwirtschaftliches Bauwesen in Bayern e.V.: Hinweise zum Einsatz rein pflanzlicher Nebenprodukte in NawaRo-Anlagen. Nr. V – 4/2009. Freising
- [37] Biogasrat e.V.: Position des Biogasrat e.V. zur Reform des EEG - „EEG 2012 – schlank, marktnah und effizient“. Beschluss der außerordentlichen Mitgliederversammlung am 29.September 2010. Berlin
- [38] Fachverband Biogas e.V.: Positionspapier des Fachverbandes Biogas e.V. zur EEG-Novelle 2011/2012. Stand 16.11.2010. Berlin
- [39] Matthias Koch: Ökologische und ökonomische Bewertung von Co-Vergärungsanlagen und deren Standortwahl – Dissertation. Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe, 2009. ISBN: 978-3-86644-355-6
- [40] Neumann, Jörg: Mündliche Mitteilungen von Januar 2010. Freier Berater im Auftrag der DREWAG
- [41] DREWAG: Aufstellungsplan Biogasanlage „Bockelwitz“ - 1:500. 2010
- [42] Bedrich, Karl: Eigene Recherche zu Tresterverwendung und Tresterpreisen. Januar 2010
- [43] Bundesministerium für Umwelt: Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden (Bioabfallverordnung - BioAbfV). 09.11.2010
- [44] Bundesminister des Inneren: Vierte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (4. BimSchV). 26.11.2010

-
- [45] top agrar: www.topagrar.com/index.php?option=com_content&task=view&id=23234&itemid=516. Abgerufen am 25.01.2011
- [46] Hoppe, Luise: Mündliche Mitteilung vom Januar 2011. Mitarbeiterin Obstland
- [47] Deutscher Bundestag: Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung - UVPG. 11.08.2010
- [48] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.: Biogasmessprogramm II. 1. Auflage. Gülzow, 2010. ISBN 978-3-9803927-8-5
- [49] Klarnamen und Konditionen der betrachteten Speditionen
- [50] Sächsisches Landesamt für Landwirtschaft: Biogaserzeugung und -verwertung. Managementunterlage. Dresden, 2003
- [51] BIOGAS NORD Anlagenbau GmbH , Sebastian Eschenbacher : Anaerobe Behandlung von Reststoffen aus der Nahrungsmittelproduktion - Trauben- und Obsttrester. Anlagenkonzept. Bielefeld, 2008
- [52] Deutscher Landwirtschaftsverlag GmbH: <http://dlz.agrarheute.com/dlz-betriebsmittel>. Abgerufen am 10.02.2011
- [53] LZ-Rheinland: <http://www.agrarmarkt-nrw.de/duengermarkt.shtm>. Abgerufen am 10.02.2011
- [54] Frankfurter Allgemeine Zeitung GmbH: <http://www.fazfinance.net/Aktuell/Boerse-und-Anlage/Agrarboom-treibt-Duengemittepreise-massiv-nach-oben-2890.html>. Abgerufen am 10.02.2011
- [55] VGH Mannheim: Immissionsschutzrechtliche Genehmigungsbedürftigkeit von Biogasanlagen. Beschluss vom 12.4.2010, 3 S 2786/09 .
- [56] Agentur für Erneuerbare Energien: <http://www.unendlich-viel-energie.de/de/bioenergie/detailansicht/article/105/potenziale-der-bioenergie.html>. Abgerufen am 11.02.2011

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Kohlenstoffbilanzen des mikrobiellen Abbaus.....	7
Abb. 2: Energieverluste im Verlauf der Kohlenstoffassimilation in Pflanzen.....	8
Abb. 3: Stoffbilanz einer Pflanzengesellschaft am Beispiel eines Hainbuchenwaldes..	8
Abb. 4: Biogaserträge verschiedener Substrate.....	9
Abb. 5: Mikrobiologischer Weg des mehrstufigen anaeroben Abbaus organischer Materialien zu Biogas.....	11
Abb. 6: Relative Häufigkeitsverteilung der mittleren Betriebstemperaturen der Biogasanlagen.....	15
Abb. 7: Undissoziierte Anteile wichtiger Substrate und Hemmstoffe in Abhängigkeit vom pH-Wert.....	16
Abb. 8: Beziehung zwischen hydraulischer Verweilzeit und der zur KTBL relativen Substratausnutzung von Anlagen mit weniger als 1/3 Eintrag durch Gülle.....	19
Abb. 9: Probenahme des Apfeltresters.....	21
Abb. 10: Siliergläser am 04.10.2010.....	21
Abb. 11: Siliergläser am 10.12. 2010.....	21
Abb. 12: Herausquellen des Tresters am 05.10.2010.....	22
Abb. 13: Schimmelansatz des silierenden Tresters am 17.11.2010.....	22
Abb. 14: Gasvolumenmessung mittels Folienbeutel.....	28
Abb. 15: Aufbau eines Reaktors für Batch-Versuche.....	28
Abb. 16: Versuchsaufbau des kontinuierlichen Versuchs.....	31
Abb. 17: theoretische Berechnung des Austrages des Inoculums und der Vermehrung anaerober Bakterien.....	33
Abb. 18: Beschickung eines Fermenters mit Maissilage.....	35
Abb. 19: Vorrichtung zur Entnahme des Gärrestes	36
Abb. 20: Typische Verläufe von Gasbildungskurven.....	38
Abb. 21: Gasausbeute des Inoculums (Fermentergülle).....	39
Abb. 22: Gasausbeute des Co-Fermentats (Cellulose).....	40
Abb. 23: Gasausbeute des Co-Fermentats (Apfeltrester 600 g).....	41
Abb. 24: Gasausbeute des Co-Fermentats (Apfeltrester 1200 g).....	41
Abb. 25: Gaserträge und Raumbelastung – normiert auf 24 h (Variante „Null“).....	47
Abb. 26: pH-Wert des Gärrestes (Variante „Null“).....	47
Abb. 27: theoretische Zusammensetzung des Fermentats (Variante „Null“).....	47
Abb. 28: Korrelation des relativen Gasertrages zur Füllzeit (Variante „Null“).....	47

Abb. 29: Gaserträge und Raumbelastung - berichtigt um Fehlerträge, normiert auf 24 h (Variante "Mais").....	51
Abb. 30: pH-Wert des Gärrestes (Variante "Mais").....	51
Abb. 31: FOS/TAC und Essigsäureäquivalente des Gärrestes (Variante "Mais").....	52
Abb. 32: Beschickungsverhältnis der Frischmassen - ohne Wasser (Variante "Mais")	52
Abb. 33: theoretische Zusammensetzung des Fermentats (Variante „Mais“)	52
Abb. 34: Korrelation von Methanerträgen und Raumbelastung beider Fermenter (Variante "Mix").....	52
Abb. 35: Korrelation des relativen Gasertrages zur Füllzeit (Variante „Null“).....	52
Abb. 36: Gaserträge und Raumbelastung - berichtigt um Fehlerträge, normiert auf 24 h (Variante "Mix").....	55
Abb. 37: pH-Wert des Gärrestes (Variante "Mix").....	55
Abb. 38: FOS/TAC und Essigsäureäquivalente des Gärrestes (Variante "Mix").....	56
Abb. 39: Beschickungsverhältnis der Frischmassen - ohne Wasser (Variante "Mix").	56
Abb. 40: theoretische Zusammensetzung des Fermentats (Variante „Mix“)	56
Abb. 41: Korrelation des relativen Gasertrages zur Füllzeit (Variante „Mix“).....	56
Abb. 42: Korrelation von Methanerträgen und Raumbelastung beider Fermenter (Variante "Mix").....	56
Abb. 43: Gaserträge und Raumbelastung - berichtigt um Fehlerträge, normiert auf 24 h (Variante "Trester").....	60
Abb. 44: pH-Wert des Gärrestes (Variante "Trester").....	60
Abb. 45: FOS/TAC und Essigsäureäquivalente des Gärrestes (Variante "Trester").....	61
Abb. 46: Beschickungsverhältnis der Frischmassen - ohne Wasser (Variante "Trester").....	61
Abb. 47: theoretische Zusammensetzung des Fermentats (Variante „Trester“)	61
Abb. 48: Korrelation des relativen Gasertrages zur Füllzeit (Variante „Trester“).....	61
Abb. 49: Korrelation von Methanerträgen und Raumbelastung beider Fermenter (Variante "Trester").....	61
Abb. 50: Gaserträge und Raumbelastung - berichtigt um Fehlerträge durch übergelaufene Reaktoren bzw. Gasaustritt, normiert auf 24 h (Differenz der Varianten "Mix" zu „Mais“	71
Abb. 51: FOS/TAC und Essigsäureäquivalent des Gärrestes (Differenz der Varianten "Mix" zu "Mais").....	71
Abb. 52: pH-Wert des Gärrestes (Differenz der Varianten „Mix“ zu „Mais“).....	71
Abb. 53: Fermentat des Fermenters 76 der Variante "Mais" - Versuchsabbruch.....	73
Abb. 54: Fermentat des Fermenters 80 der Variante "Trester" - Versuchsabbruch ...	73

Abb. 55: Fermentat des Fermenters 77 der Variante "Mix" - Versuchsabbruch	73
Abb. 56: Differenz der Stoffzusammensetzungen der Varianten "Mix" zu "Mais".....	74
Abb. 57: Differenz der Stoffzusammensetzungen der Varianten "Trester" zu "Mais" ..	74
Abb. 58: ökonomische Bilanz für ein BHKW (stark vereinfacht) – eigene Darstellung	81
Abb. 59: Entwicklung der maximalen Bezugskosten frei Kelterei unter variablen Bezugskosten für Mais.....	90
Abb. 60: Regressionsgerade für TS-Korrektur.....	111
Abb. 61: Korrelation des relativen Gasertrages zur Füllzeit der Variante "Mix".....	119
Abb. 62: Vergleich der gemessenen Methangehalte des kontinuierlichen Versuchs.	123
Abb. 63: pH in Abhängigkeit von der Messtemperatur.....	124
Abb. 64: Phosphordünger in NRW von 2009 bis 2011.....	137
Abb. 65: Düngemittelpreise von 2006 bis 2008.....	137
Abb. 66: Stickstoffdünger in NRW von 2009 bis 2011.....	137
Abb. 67: Kali-Dünger in NRW von 2009 bis 2011.....	137

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Übersicht über Anfall und Methanertrag einiger industrieller Abprodukte im Vergleich zu NaWaRo	10
Tab. 2: Erforderliche Konzentrationen einiger Spurenelemente für einen optimalen anaeroben Abbau.....	17
Tab. 3: Analyseergebnisse für Apfeltrester und Apfeltrestersilage.....	23
Tab. 4: Analyseergebnisse für Maissilage	24
Tab. 5: Analyseergebnisse für Stallgülle.....	26
Tab. 6: Analyseergebnisse für Fermentergülle.....	26
Tab. 7: Einwaagen der Substrate des Batch-Versuches.....	29
Tab. 8: Fermenterkonfiguration des kontinuierlicher Versuchs.....	32
Tab. 9: Wiederkehrende Tätigkeiten im Rahmen des kontinuierlichen Versuchs	34
Tab. 10: Methanertragsvergleich von Trester und Mais der Reinvarianten „Trester“ und „Mais“.....	69
Tab. 11: Methanertragsvergleich von kalkuliertem und realen 30%-Trester-Mix	69
Tab. 12: Differenz der Mittelwerte von pH-Wert, FOS/TAC und Essigsäureäquivalent der Varianten „Mix“ zu „Mais“.....	70
Tab. 13: Stabilitätsvergleich der Varianten „Mais“, „Mix“ und „Trester“.....	70
Tab. 14: Vergleich von Abbaugeschwindigkeit und Restgaspotential.....	72
Tab. 15: Substratbezogene Annahmen für die Wirtschaftlichkeitsrechnung.....	85
Tab. 16: Vergleich der Transportkosten für Trester.....	86
Tab. 17: Vergleich des maximalen Bezugspreises für die Vergleichsfälle (1) bis (6)....	88
Tab. 18: Vergleich des maximalen Bezugspreises unter Variation von (4).....	89
Tab. 19: Variation des Mais-Bezugspreis und maximale Transportentfernung für überschüssigen Gärrest.....	92
Tab. 20: theoretische Gasausbeute und Methankonzentration bei vollständigem Abbau der Substrate.....	113
Tab. 21: Relevante Maßnahmen in der Anfahrphase (Variante „Mais“).....	125
Tab. 22: Relevante Maßnahmen in der Belastungsphase (Variante „Mais“).....	125
Tab. 23: Relevante Maßnahmen in der Endphase (Variante „Mais“).....	126
Tab. 24: Relevante Maßnahmen in der Anfahrphase (Variante „Mix“).....	127
Tab. 25: Relevante Maßnahmen in der Belastungsphase (Variante „Mix“).....	127
Tab. 26: Relevante Maßnahmen in der Endphase (Variante „Mix“).....	128
Tab. 27: Relevante Maßnahmen in der Anfahrphase (Variante „Trester“).....	129

Tab. 28: Relevante Maßnahmen in der Belastungsphase (Variante „Trester“)	129
Tab. 29: Relevante Maßnahmen in der Endphase (Variante „Trester“)	130
Tab. 30: Lager- und Beschickungszenario: „Alles in eine BGA“ - 8 t	132
Tab. 31: Lager- und Beschickungszenario: „Überschuss in BGA 2“ - 8 t	132
Tab. 32: Lager- und Beschickungszenario: „Verteilung in beide BGA“ - 8t	133
Tab. 33: Lager- und Beschickungszenario: „Verteilung in beide BGA“ - 25t	133
Tab. 34: Einfluss der Inputsubstrate auf den N-Gehalt am 79. Versuchstag	134
Tab. 35: Verwendete Düngemittelpreise für die Berechnung der maximalen Transportentfernung zum Abtransport des Gärrestes	136

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Ort, Abgabedatum

Unterschrift des Verfassers

Anhang

A - 1	Analysemethoden.....	107
A - 1.1	Biogasrate.....	107
A - 1.2	Methangehalt.....	107
A - 1.3	pH-Wert.....	107
A - 1.4	Essigsäureäquivalent.....	108
A - 1.5	FOS/TAC.....	108
A - 1.6	Temperatur.....	109
A - 1.7	Umgebungsdruck.....	109
A - 1.8	Gravimetrie.....	109
A - 1.9	TS und oTS.....	109
A - 1.10	Dichtemessung.....	111
A - 1.11	HPLC.....	112
A - 1.12	Gesamtstickstoff nach Kjeldahl.....	112
A - 1.13	Ammoniumstickstoff.....	112
A - 2	Berechnung der Untersuchungskenngrößen.....	113
A - 2.1	Theoretische Berechnung des Methanertrages.....	113
A - 2.2	Absaugmasse.....	115
A - 2.3	Faulraumbelastung.....	116
A - 2.4	Hydraulische Verweilzeit.....	117
A - 2.5	Normgasvolumen.....	117
A - 2.6	Zeitkorrektur des Biogasertrages.....	118
A - 2.7	Methankonzentration des Trockengases.....	119
A - 2.8	Güllekorrektur des Gasertrages.....	119
A - 2.9	spezifischer Gasertrag.....	120
A - 2.10	Kopfraumkorrektur.....	121
A - 2.11	Beschickungsverhältnis der Frischmassen.....	121
A - 2.12	theoretische Zusammensetzung des Fermentats.....	122
A - 3	Messfehler oder biologische Schwankung?.....	123
A - 4	Korrektur des pH-Wertes nach Temperatur und Standzeit.....	124
A - 5	Versuchsprotokoll des kontinuierlichen Versuchs.....	125
A - 5.1	Variante „Mais“.....	125
A - 5.2	Variante „Mix“.....	127
A - 5.3	Variante „Trester“.....	129
A - 6	Falluntersuchung für Beschickung und Lagerung.....	131
A - 7	Düngewert der Inputsubstrate.....	134
A - 8	Entwicklung des Düngemittelpreises von 2006 bis 2011.....	136
A - 9	Inhalt der CD.....	138

A - 1 Analysemethoden

A - 1.1 Biogasrate

Die Biogasrate wurde mit Trommelzählern der Firma Ritter gemessen. Der hierfür benötigte Unterdruck, welcher das Biogas aus den Gasbags sog wurde mit Hilfe einer Wasserpumpe erzeugt. Zusätzlich wurden bei jeder Messung die Gastemperatur sowie der Gasdruck aufgenommen.

A - 1.2 Methangehalt

Der Methangehalt wurde während der Messung der Biogasrate photometrisch mittels des IR-Spektrometers NDIR Modul, Typ IRM 100 der Firma GS Messtechnik erfasst. Um den Unterdruck der Wasserpumpe für die Messung abzubauen, wurde nach dem Unterbrechen des Absaugvorgangs durch Drücken auf das Gasbag ein zusätzlicher Druck aufgebaut, welcher dem restlichen Unterdruck im System entgegenwirken sollte. Zum Ablesen des Methangehaltes wurde auch dieser Druck abgebaut und gewartet, bis sich der angezeigte Wert stabilisiert hatte.

A - 1.3 pH-Wert

Die Bestimmung des pH-Wertes erfolgte nach Methode 11.12 des Methodenbuchs II.1 des VDLUFA.¹²¹ Dabei wurde potentiometrisch mittels einer pH-Elektrode des Typs pH-Meter 691 der Firma Metrohm (nach Kalibrierung auf Umgebungstemperatur) der angezeigte pH-Wert, sowie die Temperaturdifferenz zwischen der Probe und der Umgebung erfasst. Mit Hilfe einer Temperatur- und Standzeitenkorrektur wurde der angezeigte pH-Wert entsprechend berichtigt.¹²²

Für Messungen des pH-Wertes von Feststoffen wurden diese auf 25 g abgewogen und mit 125 ml destilliertem Wasser versetzt. Nach einer Stunde Standzeit (darin zweimaliges Schütteln des Soluten) wurde der pH-Wert in der Flüssigphase gemessen.

¹²¹ vgl. [15] - Bestimmung des pH-Wertes

¹²² vgl. A - 4

A - 1.4 Essigsäureäquivalent

Das Essigsäureäquivalent als Summe freier Fettsäuren wurde nach Methode 4.5.6.683.01¹²³ ermittelt. Hierbei wurden ca. 50 g des zu untersuchenden Gärrestes eingewogen, mit 9 ml Phosphorsäure versetzt und in einer Destillationsanlage destilliert. Danach wurde der Vorstoß, welcher noch zuvor mit 100 ml destilliertem Wasser gefüllt wurde 10 Minuten in einer Heizhaube gekocht. Das Entweichen des Destilates verhinderte dabei ein Wasserkühler. Danach wurde die Flüssigkeit, nach Abkühlen auf Raumtemperatur titriert. Dabei gilt:

$$Hac_{\text{äq}} = \frac{Vb * 15 * Ti * 1000}{m_{EW}} \quad (2)$$

$Hac_{\text{äq}}$	... Essigsäureäquivalent	$[mg_{Hac} \cdot kg_{\text{Fermentat}}^{-1}]$
Vb	... Verbrauch an 0,24N NaOH	[ml]
Ti	... Titer NaOH	$[ml \cdot ml^{-1}]$
m_{EW}	... Einwaage	[g]

A - 1.5 FOS/TAC

Der dimensionslose Quotient FOS/TAC gibt das Verhältnis von flüchtigen organischen Säuren [g FOS/kg] zum den im Gärrest befindlichen Carbonaten $[g \text{ CaCO}_3 \cdot \text{kg}^{-1}]$ an und gibt daher Auskunft über die Pufferkapazität des Fermentats. Er wurde nach Methode 4.5.6.685.01¹²⁴ bestimmt. Hierbei wurden 5 g Gärrest (welcher vor der Beschickung entnommen wurde) eingewogen und auf 20 g mit destilliertem Wasser verdünnt. Das Gemisch wurde danach mit 0,1 N Schwefelsäure zuerst auf einen pH-Wert von 5 und danach auf einen Wert von 4,4 titriert.

123 vgl. [15] - Bestimmung der Summe der freien Fettsäuren (Essigsäureäquivalent)

124 vgl. [15] - Bestimmung des Verhältnisses von flüchtigen organischen Säuren zum Gesamtcarbonatgehalt - Schnellmethode

Der jeweilige Verbrauch ergibt nach folgender Formel den Quotienten FOS/TAC:

$$\frac{FOS}{TAC} = \frac{((B * Vf * 1,66) - 0,15) * 500}{A * Vf * 250} \quad (3)$$

FOS	... flüchtige organische Säuren im Gärrest	[mg · l ⁻¹]
TAC	... Carbonate im Gärrest	[mg · l ⁻¹]
A	... Verbrauch an Schwefelsäure bis zum pH-Wert 5	[ml]
B	... Verbrauch an Schwefelsäure bis zum pH-Wert 4,4	[ml]
Vf	... Verdünnungsfaktor der Probe (hier: 4)	

A - 1.6 Temperatur

Die Temperatur wurde mit verschiedenen Alkoholthermometern gemessen.

A - 1.7 Umgebungsdruck

Der Umgebungsdruck wurde durch die Wetterstation des Landwirtschaftszentrums Eichhof FMA86 durch einen Barometer aufgenommen. Es wurden automatisiert stündlich Mittelwerte erfasst und an das zentrale Datenverarbeitungssystem weitergeleitet zu dem auch das LHL Zugriff hatte.

A - 1.8 Gravimetrie

Das Gewicht wurde (bis auf wenige Ausnahmen) mit Präzisionswaagen der Firma Satorius gemessen. Es wurden dabei Genauigkeiten von wenigen Milligramm bis zu wenigen Hundertstel Gramm im Bereich bis zu 400 g, von wenigen Zehntel Gramm im Bereich bis zu 3000 g und darüber in Gramm erreicht.

A - 1.9 TS und oTS

Die Bestimmung der Trockenmasse bzw. organischen Trockenmasse erfolgte in Anlehnung an die Methode 4.4.1.102.06¹²⁵ bzw. 4.5.6.688.01 des DIN-Standarts DIN/EN 12880 und VDLUVA III/8.1 „Bestimmung der Rohasche“. Dabei wurden die zu untersuchenden Proben in Ascheschälchen oder Horden vor und nach der Trocknung

¹²⁵ vgl. [15] - Bestimmung des Trockenmassegehaltes

in einem Trockenschrank (mindestens 3 h bei 105 °C und anschließender Abkühlung auf Raumtemperatur im Exsikkator) gewogen. Der Trockenmassegehalt ergibt sich nun nach folgender Formel:

$$TS = \frac{m_{AW} * 100}{m_{EW}} \quad (4)$$

TS	... Trockenmassegehalt	[%]
m_{AW}	... Masse der getrockneten Probe	[g]
m_{EW}	... Masse der Probe	[g]

Danach wurden die Proben mindestens vier Stunden in einem Muffelofen bei 550 °C verbrannt und die übrig gebliebene Asche (nach Abkühlen auf Raumtemperatur) erneut gewogen. Der Gehalt an organischer Trockenmasse wird analog zur obigen Formel berechnet.

Da bei der Trocknung bei 105 °C ebenfalls flüchtige organische Substanzen entweichen sollte der TS-Wert nach Ermittlung korrigiert werden, da sonst der sonst unterbewertete TS-Gehalt ein zu hohes Biogaspotential ergibt.

Für die Korrektur bieten sich, je nach Datenbestand, verschiedene Methoden an:

- Erfassung der flüchtige Stoffe nach DIN 38414-19 und Addition zu oTS¹²⁶
- Nutzung einer exakten Korrekturgleichung
- Nutzung einer vereinfachten Korrekturgleichung

Die exakte Korrekturgleichung¹²⁷ für Maissilage lautet beispielsweise:

$$TS_k = TS_n + 0,95 FS + 0,08 MS + 0,77 PD + AA \quad (5)$$

TS _k	... korrigierter TS-Gehalt	[%FM]
TS _n	... nicht korrigierter TS-Gehalt	[%FM]
FS	... Summe der Gehalte an niederen Fettsäuren (C2...C6)	[%FM]
MS	... Gehalt an Milchsäure	[%FM]

¹²⁶ vgl. [8] S. 59

¹²⁷ vgl. [19] S. 11 – da es für Apfeltrester keine analoge Gleichung gibt, wurde die Korrektur mit der selben Gleichung vorgenommen

PD	... Gehalt an 1,2-Propandiol	[%FM]
AA	... Summe der Gehalte an Alkoholen (C1...C4)	[%FM]

Für die vereinfachte Korrekturgleichung wird lediglich der nicht korrigierte TS-Wert benötigt. Diese Korrektur besitzt aber, wie Abbildung 60 zeigt, eine hohe Fehleranfälligkeit. Die Gleichung¹²⁸ lautet:

$$TS_k = 2,45 + 0,98 TN_n \quad (6)$$

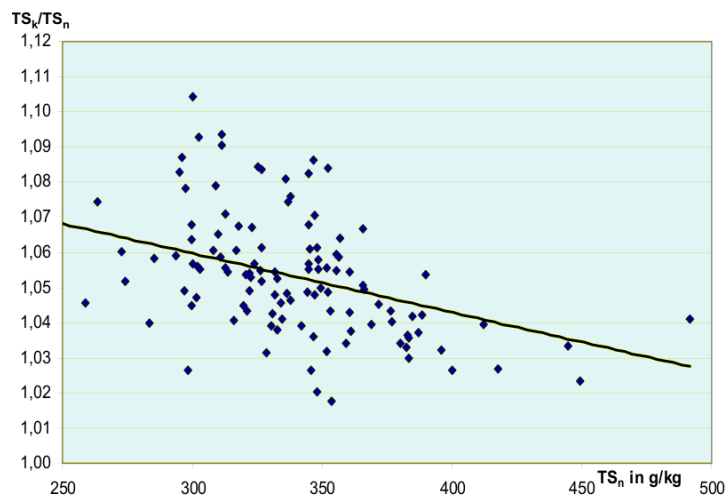


Abb. 60: Regressionsgerade für TS-Korrektur
vgl. [19] S. 14

A - 1.10 Dichtemessung

Zur Messung der Dichte wurden die Feststoffe oder Flüssigkeiten in einen Messkolben gefüllt und danach mit destilliertem Wasser der Messkolben bis zur Eichmarke aufgefüllt. Durch leichtes Schwenken des Kolbens wurde das in der Lösung noch gefangene Gas ausgetrieben. Die Dichte des Feststoffes errechnet sich nach folgender Formel:

$$\rho_{EW} = \frac{m_{EW}}{1 - \frac{(m_{Ges} - m_{EW})}{\rho_{H_2O}}} \quad (7)$$

ρ_{EW}	... Dichte des eingewogenen Stoffes	[g · l ⁻¹]
m_{EW}	... Einwaage des zu messenden Stoffes	[g]

128 vgl. [19] S. 12

m_{Ges}	... Gesamtmasse bestehend aus Stoff und destilliertem Wasser	[g]
$\rho_{\text{H}_2\text{O}}$	... Dichte von destilliertem Wasser für die Temperatur der Flüssigkeit	[g · l ⁻¹]

A - 1.11 HPLC

Die Hochleistungsflüssigkeitschromatografie (HPLC) wurde nach Messmethode LHL M4.5.6.640.01 „Bestimmung von Konservierungsmittel und deren Salze“ durchgeführt.

A - 1.12 Gesamtstickstoff nach Kjeldahl

Die Messung des Gesamtstickstoffgehaltes erfolgte nass-chemisch gemäß Methode 3.5.1.1 des Methodenbuchs II.1 des VDLUFA. Genauere Ausführungen sind [15] zu entnehmen.

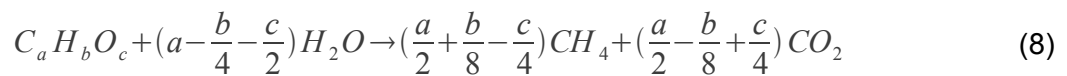
A - 1.13 Ammoniumstickstoff

Der Gehalt an Ammoniumstickstoff wurde mit der Destilationsmethode nach M. 4.5.6.689.01 durchgeführt. Genauere Ausführungen sind [15] zu entnehmen.

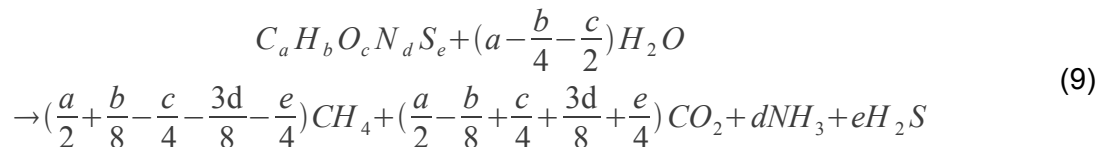
A - 2 Berechnung der Untersuchungskenngrößen

A - 2.1 Theoretische Berechnung des Methanertrages

Ist die Zusammensetzung eines Stoffes bekannt, so kann deren maximaler Methanertrag errechnet werden. BUSWELL und MÜLLER bzw. BOYLE stellten dazu 1952 bzw. 1977 folgende stöchiometrische Gleichungen¹²⁹ auf:



bzw.



Doch diese Gleichungen gelten für Reinstoffe und stellen den theoretisch maximalen Methanertrag dar. Handelt es sich nicht um Reinstoffe, so können dennoch Aussagen zum zu erwartenden Methanertrag getroffen werden, wenn der zu untersuchende Stoff auf den Anteil an den drei folgenden Stofffraktionen herunter gebrochen wird.

Tab. 20: theoretische Gasausbeute und Methankonzentration bei vollständigem Abbau der Substrate
vgl. [8] S. 52

Substrattyp	theoretische Biogasausbeute (v) [l _N · kg _{OTS} ⁻¹]	theoretische Methankonzentration (C) [%]
Kohlenhydrate	750	50
Fette	1390	72
Proteine	800	60

Da der Umsatz dieser Fraktionen aber in der Praxis von Substrat zu Substrat variiert sollte zusätzlich die jeweilige Verdaulichkeit der Stofffraktion berücksichtigt werden.

¹²⁹ vgl. [8] S. 53

Nach folgender Formel¹³⁰ kann nun der Methanertrag abgeschätzt werden:

$$v_{CH_4} = \sum v_i * \frac{C_i}{100} * \frac{Vd_i}{100} \quad (10)$$

V_{CH_4}	... theoretischer Methanertrag	[l · kg _{oTS} ⁻¹]
V_i	... theoretische Biogausausbeute des Substrattypes	[l · kg _{oTS} ⁻¹]
C_i	... theoretische Methankonzentration	[%]
Vd_i	... Verdaulichkeit des Substrattypes des jeweiligen Substrates	[%]

Die in der Literatur angegebenen Verdaulichkeiten beziehen sich auf Vorgänge im Magen von Wiederkäuern. Diese sind zwar mit dem anaeroben Abbau in Biogasanlagen vergleichbar, aber z.B. durch unterschiedliche Synergieeffekte und Verweilzeiten nicht gleichzusetzen.

Es ist daher erforderlich für verlässliche Angaben die Methanerträge empirisch zu ermitteln.¹³¹

Eine möglicherweise genauere und zugleich einfachere Möglichkeit den Methanertrag theoretisch zu berechnen gibt WEIßBACH mit seiner Berechnung nach dem Modell der „fermentierbaren organischen Trockensubstanz“ (FoTS) an. Grundidee des Modells ist es außer dem Abzug des Gehaltes an Rohasche von der Trockensubstanz (welches die organische Trockensubstanz ergibt) zusätzlich den Anteil an biologisch nicht nutzbarer oTS abzuziehen.

Da sich die Angaben an Rohfett und Rohproteinen innerhalb einer Substratart nur wenig ändern, flossen beide Angaben als gemittelter Wert direkt in die Gleichung ein. Es blieben substratspezifische Gleichungen, welche nur von dem Gehalt an Rohasche und Rohfaser (bzw. enzymunlösliche organische Substanz: EuIOS bei Gräsern) abhängig sind. Es wird davon ausgegangen, dass ein kg FoTS 800 l Biogas mit 52,5 % Methan (also 420 l Methan) erzeugt.

130 nach [14] S. 30

131 vgl. [14] S. 29-30

Die Formel zur Berechnung des Anteils an FoTS für Maissilage lautet:

$$FoTS = 984 - 10(XA) - 4,7(XF) - 0,104(XF^2) \quad (11)$$

FoTS	... fermentierbare organische Trockensubstanz	[g · kgTS ⁻¹]
XA	... Rohasche	[%TS]
XF	... Rohfaser	[%TS]

Der Methanertrag [l/kgTS] berechnet sich nun wie folgt:

$$v_{CH_4} = 0,42 * FoTS \quad (12)$$

Nicht nur in den eigenen Ergebnissen konnte WEIßBACH die in der Praxis erreichten Wert gut abbilden.¹³² Auch die berechneten Methanerträge für die im kontinuierlichen Gärversuch eingesetzte Maissilage konnten mit diesem Verfahren deutlich besser angenähert werden (siehe 2.1.2).

A - 2.2 Absaugmasse

Obwohl der Gärrest nur im Abstand von drei Tagen entnommen wurde, wurde er für jeden Tag anhand folgender Formel berechnet:

$$m_{Absaug.} = \sum m_{Absaug.kalkuliert} - \sum m_{Absaug.real} - \sum m_{KorrW.} + m_{KorrF.} \quad (13)$$

wobei:

$$m_{Absaug.kalkuliert} = \sum m_{EW.Vortag} - m_{Biogas} \quad (14)$$

$$m_{Biogas} = \frac{V}{\rho_{Biogas}} \quad (15)$$

und abgeleitet von der idealen Gasgleichung:

$$\rho_{Biogas} = \frac{100 * P_{Gas}}{T_{Gas}} * \left(\left(\frac{C_{CH_4}}{100} * \frac{1}{R_{CH_4}} \right) + \left(\frac{100 - C_{CH_4}}{100} * \frac{1}{R_{CO_2}} \right) \right) \quad (16)$$

¹³² vgl. [20] S. 519ff

m_{Absaug}	... täglich zu entnehmende Absaugmasse	[g]
$m_{\text{Absaug,kalkuliert}}$	... kalkulierte Absaugmasse	[g]
$m_{\text{Absaug,real}}$	... die bei der Entnahme des Gärrestes abgesaugte Masse	[g]
$m_{\text{KorrW.}}$	... einmaliger Korrekturwert, welcher sich durch die Wägungen der Fermenter und der entstandenen Differenz von kalkuliertem und realen Fermentergewicht ergibt	[g]
$m_{\text{KorrF.}}$	... täglicher Korrekturfaktor, welcher sich auf dem ermittelten täglichen Fehler ergibt	[g]
$m_{\text{EW.Vortag}}$	... Gesamtmasse des Inputmaterials vom Vortag	[g]
m_{Biogas}	... Masse des emittierten Biogases	[g]
V	... Biogasrate	[l]
ρ_{Biogas}	... Dichte des Biogases	[g · l ⁻¹]
P_{Gas}	... Gasdruck	[hPa]
T_{Gas}	... Gastemperatur	[K]
C_{CH_4}	... Methangehalt	[%]
R_{CH_4} bzw. R_{CO_2}	... Gaskonstante von CH ₄ bzw. CO ₂	[J · (kg · K) ⁻¹]

Der Wassergehalt bleibt aufgrund seines geringen Einflusses bei der Berechnung der Masse des Biogases unberücksichtigt.

A - 2.3 Faulraumbelastung

Die Faulraumbelastung ergibt sich als Verhältnis der Tagesfracht zum Fermentervolumen aus folgender Formel¹³³:

$$B_R = \frac{\sum (m_i * \frac{oTS_i}{100})}{V_{\text{Fermenter}} - \frac{m_{\text{Absaug}}}{\rho_{\text{Gärrest}}}} \quad (17)$$

B_R	... Faulraumbelastung	[g · (l · d) ⁻¹]
m_i	... Masse des Inputmaterials	[g · d ⁻¹]

133 nach [8] S. 10 – ergänzt um Abweichung zum Norm-Fermentervolumen

oTS	... Anteil der organischen Trockensubstanz des Inputmaterials	[%]
$V_{\text{Fermenter}}$	... Fermentervolumen	[l]
m_{Absaug}	... Absaugmasse	[g]
$\rho_{\text{Gärrest}}$	... Dichte des Gärrestes	[g · l ⁻¹]

A - 2.4 Hydraulische Verweilzeit

Die hydraulische Verweilzeit ergibt sich als Quotient des Arbeitsvolumens zum täglich zugeführten Substratvolumen nach folgender Gleichung¹³⁴:

$$HRT = \frac{V_{\text{Fermenter}} - \frac{m_{\text{Absaug}}}{\rho_{\text{Gärrest}}}}{\sum \frac{m_i}{\rho_i}} \quad (18)$$

HRT	... hydraulische Verweilzeit (hydraulic retention time)	[d]
$V_{\text{Fermenter}}$	... Fermentervolumen	[l]
m_{Absaug}	... Absaugmasse	[g]
$\rho_{\text{Gärrest}}$	... Dichte des Gärrestes	[g · l ⁻¹]
m_i	... Masse des Inputmaterials	[g · d ⁻¹]
ρ_i	... Dichte des jeweiligen Inputmaterials	[g · l ⁻¹]

A - 2.5 Normgasvolumen

Das Normgasvolumen rechnet wie folgt die tägliche Gasrate auf Normbedingungen unter Abzug des Wasserdampfgehaltes aus¹³⁵:

$$V_0^{\text{nr}} = V * \frac{(p - p_w) * T_0}{p_0 * T} \quad (19)$$

134 nach [8] S. 9 – ergänzt um Abweichung zum Norm-Fermentervolumen

135 vgl. [8] S. 55

Darin der Sättigungsdampfdruck nach MAGNUS:

$$p_w = 6,11213 * e^{\frac{17,5043 * t}{241,2 + t}} \text{ für } -45^\circ C \leq t \leq 60^\circ C \quad 136 \quad (20)$$

V_0^{tr}	... Normgasvolumen	[l]
V	... gemessene Biogasrate	[l]
p	... gemessener Gasdruck	[hPa]
p_w	... Sättigungsdampfdruck des Wassers	[hPa]
T_0 bzw. p_0	... Normtemperatur (273 K) bzw. -druck (1013 hPa)	[K bzw. hPa]
T bzw. t	... gemessene Gastemperatur	[K bzw. °C]

A - 2.6 Zeitkorrektur des Biogasertrages

Da der Wechsel der Gasbags nicht jeden Tag zur gleichen Zeit erfolgen konnte wurde eine entsprechende Zeitkorrektur eingeführt, welche das Normgasvolumen auf 24 h bezog. Abbildung 61 zeigt, dass dabei der Zusammenhang der Füllzeit und dem emmitierten Normgasvolumen kein linearer ist. Allerdings kann er für den Zeitkorrekturfaktor in einem gewissen Rahmen linear approximiert werden. Das auf eine Füllzeit von 24 h bezogene Normgasvolumen errechnet sich nun nach der Geradengleichung:

$$V_{0,24h}^{tr} = V_0^{tr} + (V_0^{tr} * \Delta t * \text{KorrF}_{.t}) \quad (21)$$

Δt	... zeitliche Differenz zwischen zwei Bagwechselln	[h]
	<ul style="list-style-type: none"> z.B. Bagwechsel Tag x: 11:30; Bagwechsel Tag x+1: 13:00 → $\Delta t = 1,5$ h 	
$\text{KorrF}_{.t}$	... Zeitkorrekturfaktor	
	<ul style="list-style-type: none"> ermittelt aus dem Anstieg der Regressionsgeraden der Darstellung des relativen Gasertrages über der Füllzeit (für Abb. 61: $\text{KorrF}_{.t} = 0,66$) 	

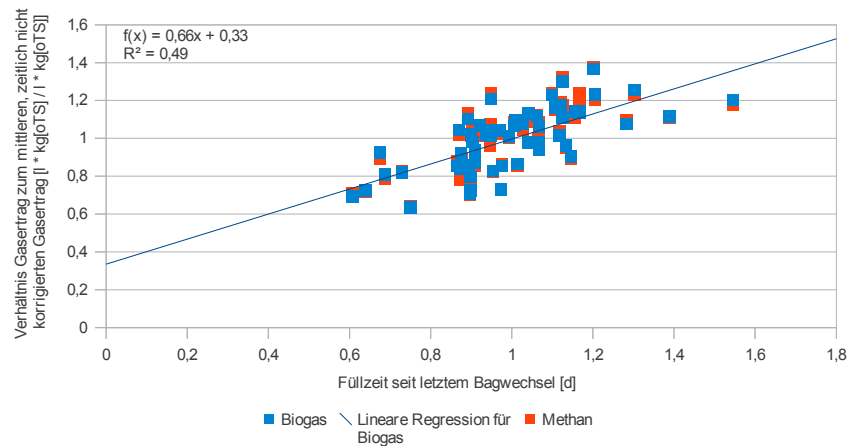


Abb. 61: Korrelation des relativen Gasertrages zur Füllzeit der Variante "Mix" vgl. [10] - „Diag. 77-78“

A - 2.7 Methankonzentration des Trockengases

Nachdem die Gasrate auf Normbedingungen bezogen wurde musste die Methankonzentration ebenfalls nach folgender Gleichung¹³⁷ korrigiert werden:

$$C_{CH_4}^{tr} = C_{CH_4}^f * \frac{p}{p - p_w} \quad (22)$$

$C_{CH_4}^{tr}$	... Methankonzentration des trockenen Gases	[%]
$C_{CH_4}^f$	... gemessene Methankonzentration des feuchten Gases	[%]
p	... gemessener Gasdruck	[hPa]
p_w	... Sättigungsdampfdruck (siehe A - 2.5)	[hPa]

A - 2.8 Güllekorrektur des Gasertrages

Da auch die verwendete Stallgülle Biogas emittiert muss, um den Gasertrag durch die Co-Fermentate zu ermitteln, der auf Normbedingung und auf 24 h bezogene Gasertrag nun noch anteilig um den Gasertrag aus der Stallgülle vermindert werden¹³⁸:

¹³⁷ vgl. [8] S. 55

¹³⁸ in Anlehnung an [8] S. 57

$$V_{\text{korr.24h}}^{\text{tr}} = V_{0.24\text{h}}^{\text{tr}} - \left(V_{\text{Null.24h}}^{\text{tr}} * \frac{m_{\text{Gülle}}}{m_{\text{Gülle.Null}}} \right) \quad (23)$$

Im Regelfall weist das aus dem „Null“-Versuch emittierte Biogas eine höhere Methankonzentration als bei den anderen Versuchen auf. Deshalb muss obige Korrektur ebenfalls auf den Methanertrag angewandt werden:

$$V_{\text{CH4.korr.24h}}^{\text{tr}} = \left(\frac{V_{0.24\text{h}}^{\text{tr}} * C_{\text{CH4}}^{\text{tr}}}{100} \right) - \left(\frac{V_{\text{Null.24h}}^{\text{tr}} * C_{\text{Null.CH4}}^{\text{tr}}}{100} * \frac{m_{\text{Gülle}}}{m_{\text{Gülle.Null}}} \right) \quad (24)$$

$V_{\text{korr.24h}}^{\text{tr}}$	... Normbiogasertrag nach Zeit- und Güllekorrektur	[l]
$V_{0.24\text{h}}^{\text{tr}}$	... Normbiogasertrag nach Zeitkorrektur	[l]
$V_{\text{Null.24h}}^{\text{tr}}$	... Normbiogasertrag nach Zeitkorrektur des „Null“-Versuches	[l]
$m_{\text{Gülle}}$	... Masse der (täglich) zugegebenen Gülle	[g]
$m_{\text{Gülle.Null}}$	... Masse der (täglich) zugegebenen Gülle des „Null“-Versuches	[g]
$V_{\text{CH4.korr.24h}}^{\text{tr}}$	... Normmethanertrag nach Zeit- und Güllekorrektur	[l]
$C_{\text{CH4}}^{\text{tr}}$	... Methankonzentration des Trockengases	[%]
$C_{\text{Null.CH4}}^{\text{tr}}$	... Methankonzentration des Trockengases des „Null“-Versuches	[%]

A - 2.9 spezifischer Gasertrag

Bekanntermaßen kann Biogas lediglich aus der organischen Trockensubstanz entstehen. Es bietet sich daher an den Gasertrag von den Frischmassen (mit ihrem Wasser- und Ascheanteil) zu trennen. Dies geschieht mit dem Bezug auf den oTS-Anteil des Inputsubstrates¹³⁹:

$$v_{\text{BG}} = \frac{V_{\text{korr.24h}}^{\text{tr}}}{\sum (m_i * \frac{oTS_i}{100})} \quad v_{\text{CH4}} = \frac{V_{\text{CH4.korr.24h}}^{\text{tr}}}{\sum (m_i * \frac{oTS_i}{100})} \quad (25)$$

v_{BG} bzw. v_{CH4}	... spezifischer Biogas- bzw. Methanertrag	[l · kg _{oTS} ⁻¹]
$V_{\text{korr.24h}}^{\text{tr}}$	... Normbiogasertrag nach Zeit- und Güllekorrektur	[l]

139 nach [8] S. 57

$V_{CH_4.korr.24h}^{tr}$	... Normmethanertrag nach Zeit- und Güllekorrektur	[l]
m_i	... Masse des Inputmaterials	[g]
oTS	... Anteil der organischen Trockensubstanz des Inputmaterials	[%]

A - 2.10 Kopfraumkorrektur

Eine Kopfraumkorrektur ist besonders für Batch-Versuche notwendig, kann aber auch immer dann bei kontinuierlichen Versuchen angewandt werden, wenn das Fermentat in einen neuen Fermenter gegeben wird. Durch das dann im Fermenter noch vorliegende Inertgas wird das emittierte Biogas verdünnt und sinkt die Methankonzentration. Dies kann mittels folgender Formel korrigiert werden¹⁴⁰:

$$C_{CH_4.korr}^{tr} = C_{CH_4.t2}^{tr} + (C_{CH_4.t2}^{tr} - C_{CH_4.t1}^{tr}) * \frac{V_K}{V_B} \quad (26)$$

$C_{CH_4.korr}^{tr}$	... Methankonzentration des trockenen Gases nach Kopfraumkorrektur	[%]
$C_{CH_4.t1}^{tr}$	... Methankonzentration des trockenen Gases des Folgetages nach dem Umfüllen/Einfüllen des Fermentats in einen neuen Fermenter	[%]
$C_{CH_4.t2}^{tr}$	... Methankonzentration des trockenen Gases an den darauf folgenden Tagen	[%]
V_K	... Kopfraumvolumen	[l]
V_B	... Gesamtbioogasrate seit dem Umfüllen in den neuen Fermenter bis zum Zeitpunkt t2	[l]

A - 2.11 Beschickungsverhältnis der Frischmassen

Das Beschickungsverhältnis der Frischmassen der Inputsubstrate ergibt sich aus:

$$C_{IS} = \frac{m_i}{\sum m_i} \quad (27)$$

C_{IS}	... Konzentration der Inputsubstrate	[%]
----------	--------------------------------------	-----

140 vgl. [8] S. 56

m_i	... Einwaage des jeweiligen Inputsubstrates	[g]
$\sum m_i$	... Einwaage aller Inputsubstrate	[g]

Wasser blieb bei der Berechnung unberücksichtigt, da es (von der Verdünnung abgesehen) keinen Einfluss auf die Gärbiologie hat.

A - 2.12 theoretische Zusammensetzung des Fermentats

Um Aussagen über den Grad der Annäherung des Fermentats an die Beschickungskonfiguration und damit über die Stabilität des Gärprozesses zu erhalten wurde die Anteil der Inhaltsstoffe des Fermentats durch eine Prozessbilanzierung nach folgendem Schema theoretisch ermittelt:

$$V_i^n = V_i^{n-1} + \frac{m_i^n}{\rho_i^n} - \left(\frac{m_{\text{Absaug}}^n}{\rho_{\text{Absaug}}^n} * \frac{C_i^{n-1}}{100} \right) \quad (28)$$

wobei:

$$C_i^n = \frac{V_i^n}{\sum V_i^n} * 100 \quad (29)$$

V_i^n	... Gesamtvolumen des jeweiligen Inputmaterials am Tag n im Fermenter	[l]
V_i^{n-1}	... Gesamtvolumen des jeweiligen Inputmaterials am Tag n-1 im Fermenter	[l]
m_i^n	... Einwaage des jeweiligen Inputsubstrates am Tag n	[g]
ρ_i^n	... Dichte des jeweiligen Inputmaterials am Tag n	[g · l ⁻¹]
m_{Absaug}^n	... Masse des entnommenen Gärrestes am Tag n	[g]
ρ_{Absaug}^n	... Dichte des entnommenen Gärrestes am Tag n	[g · l ⁻¹]
C_i^{n-1}	... Anteil des jeweiligen Inputmaterials am gesamten Fermentat am Tag n – 1	[%]
C_i^n	... Anteil des jeweiligen Inputmaterials am gesamten Fermentat am Tag n	[%]
$\sum V_i^n$	... Gesamteinwaage des Inputmaterials am Tag n	[g]

A - 3 Messfehler oder biologische Schwankung?

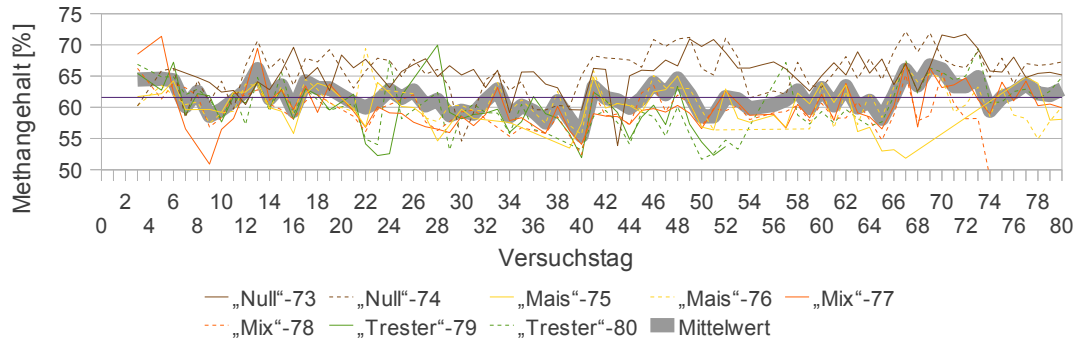


Abb. 62: Vergleich der gemessenen Methangehalte des kontinuierlichen Versuchs
vgl. [10] - „Statistik und Fehlerrechnung“

Anmerkungen:

- es lassen sich keine Varianten-spezifischen oder mittleren Tendenzen im Verlauf der Methangehalte erkennen
- obwohl von der gleichen Person fast alle in Abbildung 62 erfassten Messwerte genommen wurden, sowie ebenfalls Prüfgas ohne erhöhte Methankonzentration gemessen wurde, liegen alle Mittelwerte der Varianten über den in der Literatur angegebenen CH₄-Gehalten
- die Messwerte beider Fermenter einer Variante ähneln sich meist in ihrem Abstand zum Mittelwert

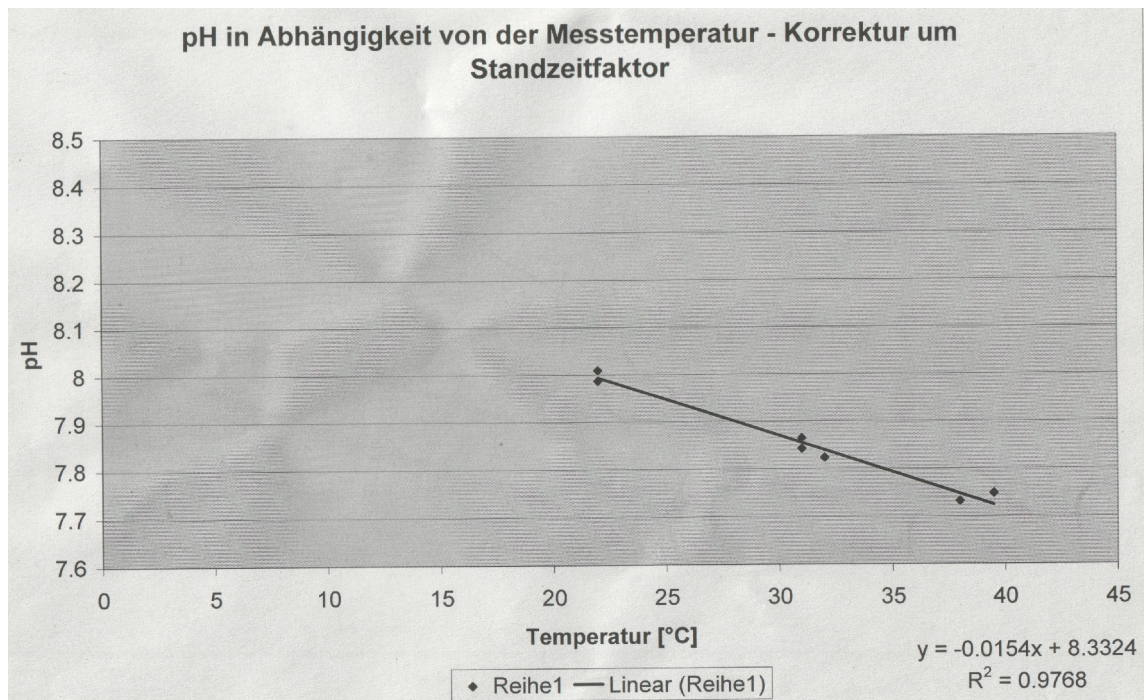
A - 4 Korrektur des pH-Wertes nach Temperatur und Standzeit

Abb. 63: pH in Abhängigkeit von der Messtemperatur
vgl. [15]

A - 5 Versuchsprotokoll des kontinuierlichen Versuchs

A - 5.1 Variante „Mais“

Anfahrphase (Tag 1 – 25):

Tab. 21: Relevante Maßnahmen in der Anfahrphase (Variante „Mais“)
vgl. [10] - „Reaktortagebuch“

Tag	75	76	Vorfall
		141	
15	X		Rührmotor defekt - behoben
19	X	X	Zur Überprüfung des Abbaus und zum Abbau eines möglichen Restgaspotenzial wurden die Fermenter nicht beschickt .
23		X	Fermenter ist übergelaufen
24		X	Fermenter ist in der Nacht übergelaufen
25	X	X	Um die Belastung durch die Substratzugabe und den damit einhergehenden pH-Abfall zu vermindern wird fortan zwei mal täglich beschickt . X Fermenter ist zwischen beiden Beschickungen übergelaufen
26		X	Fermenter aufgrund verstopfter Gastülle übergelaufen und nur einmal (häufig) beschickt
27	X	X	Fermenter sind vor dem zweiten Beschicken (durch verstopfte Gastüllen) leicht übergelaufen
28	X	X	Fermenter in der Nacht übergelaufen
29	X		Fermenter ist nur noch wenig in der Nacht übergelaufen

Belastungsphase (Tag 26 – 63):

Tab. 22: Relevante Maßnahmen in der Belastungsphase (Variante „Mais“)
vgl. [10] - „Reaktortagebuch“

Tag	75	76	Vorfall
30	X	X	Fermenter in der Nacht leicht übergelaufen
31	X		Fermenter vor zweiter Beschickung leicht übergelaufen
32	X		Fermenter in der Nacht leicht übergelaufen
33	X	X	Aufgrund des häufigen Überlaufens und der sinkenden Erträge B_R um 0,5 auf 6 korrigiert (am Tag 36 durch Wägung ermittelt, das die reale B_R maximal 0,5 über der Kalkulierten lag) X X Fermenter übergelaufen
34	X	X	Fermenter nach dem ersten Beschicken übergelaufen , daher zweite Beschickung eingestellt
35	X		Fermenter vor zweiter Beschickung leicht übergelaufen
36	X		Fermenter in der Nacht leicht übergelaufen

	X	X	Aufgrund der fehlenden Stabilität nun auch bei der Variante „Mix“ wird B_R bei dieser und der Variante „Mais“ auf 4,5 gesenkt
37	X	X	in der Nacht bzw. vor dem zweiten Beschicken übergelaufen
38	X		Gasaustritt ohne Überlaufen des Fermenters – diese Undichtigkeit wurde durch abheben des Deckels und Einsetzen einer neuen Dichtung behoben
		X	Fermenter stärker übergelaufen
	X	X	Durch Fermenter 75 wurde entdeckt, dass dessen Kopfraum der Reaktoren komplett mit Schaum gefüllt war, welches durch Verstopfen der Gastülle das häufige Überlaufen verursacht haben könnte – zum Lösen des Schaums wurden ca. drei Tropfen Octanol¹⁴² hinzugegeben
39	X	X	Fermenter in der Nacht übergelaufen
	X	X	Als „ultima ratio“ wurde der Fermenterdeckel abgehoben und die gebildete Schwimmschicht händisch untergerührt
41	X		Fermenter leicht übergelaufen
48		X	Vermuteter Gasaustritt durch defekten Gasbag
50		X	Erneut niedrige Methanerträge – Gasbag ausgetauscht
51		X	Tauchrohr im Fermenter defekt – Absaugen so nicht mehr möglich – Reaktor wurde ausgetauscht
52		X	Die ungewöhnlich tiefen Methanerträge ergeben sich aus der erst später entdeckten Undichtigkeit des Fermenters
53		X	[siehe oben]
54	X	X	Beschickung wird ausgesetzt, da die niedrigen Methanerträge [siehe oben] erst auf ein mögliches Umschlagen hinwiesen und ein Fermenter der Variante „Mix“ ebenfalls getauscht werden musste ¹⁴³
55	X	X	Da B _R vermindert wurde und die Fermenter nicht mehr übergelaufen sind wurde nur noch einmal täglich beschickt
57	X	X	Da festgestellt wurde, dass die Waage der letzten Korrekturwägung falsche Ergebnisse lieferte, wurde nachgewogen
		X	Einsatz einer anderen Maissilage (siehe 2.1.2)
58		X	Die Undichtigkeit des Fermenters wurde entdeckt und behoben

Endphase (64 – 80):

Tab. 23: Relevante Maßnahmen in der Endphase (Variante „Mais“)
vgl. [10] - „Reaktortagebuch“

Tag	75	76	Vorfall
65	X	X	Da erst an diesem Tag die neuen TS bzw. oTS-Werte in die Rechnung eingetragen wurden (vorher war nicht klar, dass die eingesetzte Silage seit Tag 57 anderen

142 Octanol vermindert nachweislich die Oberflächenspannung von Flüssigkeiten und wird daher u.a. als Entschäumer eingesetzt

143 muss ein Fermenter ersetzt werden, so wird das Fermentat von dem alten in den neuen Fermenter geschüttet – der Sauerstoffkontakt ist hierbei sehr groß und kann die Prozessstabilität gefährden

			Ursprung war – die späte Korrektur verursachte fehlerhafte B_R
66	X	X	Aufgrund der negativen Entwicklung des Fermenters 75 (und dem grenzwertigen pH-Wert von Fermenter 78) wird B_R bis zur nächsten Gärrestanalyse nicht wieder entsprechend angehoben
67	X		Reaktor im Umschlag begriffen – um die Variante „Mix“ nicht zu beeinflussen wird dieser Fermenter aus dem Vergleich herausgenommen
76	X		Wird nach der Zugabe von 46 g Köschkalk (und aufgrund des guten pH-Wertes) wieder mit Mais beschickt
77		X	die Tendenz der Analyseergebnisse lässt möglicherweise einen baldigen Umschlag erkennen – BR wird daher auf 3,5 herabgesetzt

A - 5.2 Variante „Mix“

Anfahrphase (Tag 1 – 24):

Tab. 24: Relevante Maßnahmen in der Anfahrphase (Variante „Mix“)
vgl. [10] - „Reaktortagebuch“

Tag	77	78	Vorfall
8	X		Da Absaugen des Fermenters nicht mehr möglich und Gasertrag relativ gering sind, wird eine Undichtigkeit vermutet und der Fermenter ausgetauscht .
	X	X	Frischer Trester aus der Tiefkühlzelle eingesetzt
19	X	X	Zur Überprüfung des Abbaus und zum Abbau eines möglichen Restgaspotenzial wurden die Fermenter nicht beschickt
24	X	X	Fermenter in der Nacht übergelaufen

Belastungsphase (Tag 25 - 72):

Tab. 25: Relevante Maßnahmen in der Belastungsphase (Variante „Mix“)
vgl. [10] - „Reaktortagebuch“

Tag	77	78	Vorfall
25		X	Da der Gashahn fälschlicher Weise verschlossen blieb konnte kein Gas in den Gasbag strömen – der Fermenter ist übergelaufen
	X	X	Um die Belastung durch die Substratzugabe und den damit einhergehenden pH-Abfall zu vermindern wird fortan zwei mal täglich beschickt
32		X	Fermenter in der Nacht übergelaufen .
33	X	X	Aufgrund des häufigen Überlaufens der Referenzvariante wurde B_R um 0,5 auf 6 korrigiert (am Tag 36 durch Wägung ermittelt, das die reale B _R maximal 0,5 über der Kalkulierten lag)
		X	Fermenter übergelaufen
34		X	Fermenter nach dem ersten Beschicken übergelaufen ,
	X	X	Daher zweite Beschickung eingestellt
36	X	X	Fermenter in der Nacht leicht übergelaufen
	X	X	Aufgrund der fehlenden Stabilität bei der Variante „Mais“ und der aktuell niedrigen

		Erträge wird B_R bei dieser und der Variante „Mais“ auf 4,5 gesenkt
37	X	Fermenter in der Nacht leicht übergelaufen
38	X	Fermenter in der Nacht und vor dem zweiten Beschicken übergelaufen
	X	Durch Fermenter 75 wurde entdeckt, dass dessen Kopfraum komplett mit Schaum gefüllt war, welches durch Verstopfen der Gastülle das häufige Überlaufen verursacht haben könnte – zum Lösen des Schaums wurden ca. drei Tropfen Oktanol hinzugegeben
39	X	Gasaustritt ohne Überlaufen
	X	Als „ultima ratio“ wurde der Fermenterdeckel abgehoben und die gebildete Schwimmschicht händisch untergerührt
40	X	Frischer Trester aus der Tiefkühlzelle eingesetzt
54	X	Da sich das Tauchrohr, bei der letzten Beschickung gelöst hat musste der Fermenter ausgetauscht werden.
	X	Aufgrund der Erfahrung mit mit Fermenter 76, welcher nach dem Austausch starke Ertragseinbußen aufwies, wurde die Beschickung nun auch hier vorerst ausgesetzt
55	X	Da B_R vermindert wurde und die Fermenter nicht mehr übergelaufen sind wurde nur noch einmal täglich beschickt
57	X	Beide Gasbags ersetzt , da die dort ausgetretenen niedrigen Erträge nur dadurch zu erklären waren.
	X	Da festgestellt wurde, dass die Waage der letzten Korrekturwägung falsche Ergebnisse lieferte, wurde nachgewogen
	X	Einsatz einer anderen Maissilage (siehe 2.1.2)
61	X	Frischer Trester aus der Tiefkühlzelle eingesetzt
65	X	Da erst an diesem Tag die neuen TS bzw. oTS-Werte in die Rechnung eingetragen wurden (vorher war nicht klar, dass die eingesetzte Silage seit Tag 57 anderen Ursprungs war) verursachte die späte Korrektur fehlerhafte B_R
66	X	Aufgrund der negativen Entwicklung des Fermenters 75 (und dem grenzwertigen pH-Wert von Fermenter 78) wird B_R bis zur nächsten Gärrestanalyse nicht wieder entsprechend angehoben
67	X	Die positiven Analyseergebnisse veranlassten wieder auf B_R von 4,5 zu gehen
	X	Frische Trestersilage aus Glas „2“ eingesetzt
71	X	Frische Trestersilage aus Glas „4“ eingesetzt

Endphase (Tag 73 - 80):

Tab. 26: Relevante Maßnahmen in der Endphase (Variante „Mix“)
vgl. [10] - „Reaktortagebuch“

Tag	77	78	Vorfall
73	X		FOS/TAC, pH und die niedrigen Methanerträge deuten auf einen Umschlag hin – daher wird Fermenter 78 von dem Vergleich mit der Referenzvariante „Mais“ herausgenommen
76	X		Versuchte Neutralisation mit 110 g Löschkalk, Gärrest stark nach „Müll“ riechend
	X		Frische Trestersilage aus Glas „5“ eingesetzt

77	X	Die zur Untersuchung benötigte repräsentative Probe des Gärrestes konnte wegen fortwährender Verstopfung beim Absaugen nicht mehr gewonnen werden
	X	Da die Analyseergebnisse vermuten lassen, dass sich der Fermenter 76 der Variante „Mais“ einem möglichen Umschlag nähert, wird B_R auf 3,5 herab gesetzt

A - 5.3 Variante „Trester“

Anfahrphase (Tag 1 – 24):

Tab. 27: Relevante Maßnahmen in der Anfahrphase (Variante „Trester“)
vgl. [10] - „Reaktortagebuch“

Tag	79	80	Vorfall
8	X	X	Frischer Trester auf der Tiefkühlzelle eingesetzt X Fermenter vermutlich übergelaufen
19	X	X	Zur Überprüfung des Abbaus und zum Abbau eines möglichen Restgaspotenzial wurden die Fermenter nicht beschickt
23		X	Am Abend mit großer Schaumbildung übergelaufen
24		X	Fermenter in der Nacht übergelaufen X Bei der Entnahme übergelaufen X X Ca. eine Stunde nach der Entnahme so stark übergelaufen , dass die Zugabe von Gülle zur zweiten Beschickung nicht mehr möglich war

Belastungsphase (Tag 25 – 51):

Tab. 28: Relevante Maßnahmen in der Belastungsphase (Variante „Trester“)
vgl. [10] - „Reaktortagebuch“

Tag	79	80	Vorfall
25	X		Während Wägung stark übergelaufen X X Fermenter werden die folgenden zwei Tage nicht beschickt, da der pH-Wert sehr stark abgesunken ist
26		X	Der schief auf dem Fermenter aufgeschraubte Deckel lässt eine Undichtigkeit des Fermenters vermuten
27	X	X	Um die Belastung durch die Substratzugabe und den damit einhergehenden pH-Abfall zu vermindern wird fortan zwei mal täglich beschickt X X Beginn der Monovergärung von Apfeltrester (mit Wasser)
28		X	Deckel wieder richtig verschraubt
31		X	Fermenter vor zweiter Fütterung leicht übergelaufen
38		X	Gasbag des Fermenters undicht – wurde ausgetauscht
39		X	Ebenfalls zweiter Gasbag undicht – wurde ausgetauscht
40	X	X	Frischer Trester aus Tiefkühlzelle eingesetzt

Endphase (Tag 52 – 80):

Tab. 29: Relevante Maßnahmen in der Endphase (Variante „Trester“)
vgl. [10] - „Reaktortagebuch“

Tag	79	80	Vorfall
52	X	X	Falsche Raumbelastung aufgrund Fütterungsfehler
53	X	X	Erneut falsche Raumbelastung aufgrund Fütterungsfehler
54	X	X	Abbauprozess beider Fermenter hinsichtlich zurückgegangener Gaserträge und negativer Analyseergebnisse klar umgeschlagen – Fütterung wird vorerst ausgesetzt , um zu prüfen, ob sich der pH-Wert von selbst wieder erholt
56		X	pH und FOS/TAC sind leicht verbessert – wird wieder mit Gülle und Trester beschickt
	X		pH und FOS/TAC verschlechtert (dazu starker „Müll“-Geruch) – wird nur mit Gülle beschickt
57	X	X	Da festgestellt wurde, dass die Waage der letzten Korrekturwägung falsche Ergebnisse lieferte, wurde nachgewogen
		X	Erster Versuch einer Neutralisation mit 15 g Löschkalk
59	X		Erneute Neutralisation mit 20g Löschkalk
61		X	Frischer Trester auf Tiefkühlzelle zugegeben
63	X		Exakte Menge an Löschkalk (52 g) berechnet und zur Neutralisation hinzugegeben
64	X		Weder FOS/TAC noch pH sind merklich verbessert. – daher letztmalig zur Neutralisation 100 g Löschkalk hinzugegeben
65	X		pH-Wert nun im alkalischen Bereich – da nun keine natürliche Fermenterbiologie mehr vorhanden ist wird der Fermenter aus dem Versuch herausgenommen
67		X	Frische Trestersilage aus Glas „2“ eingesetzt
71		X	Die Verbesserten Analysewerte lassen eine Abnahme der Güllekonzentration auf 14% zu, frische Trestersilage aus Glas „4“ eingesetzt
73		X	Analyseergebnisse leicht verschlechtert, daher wird weiter mit doppelter Güllekonzentration (28%) gefahren
76			Frische Trestersilage aus Glas „5“ eingesetzt

A - 6 Falluntersuchung für Beschickung und Lagerung

Folgend wird einer Auswahl möglicher Szenarien vorgestellt, welche, ausgehend vom maximalen und mittleren Anfall des Apfeltresters, eine daraus resultierende Beschickung und Lagerung beschreibt. Es wurde dabei unterschieden nach:

- ... Transportmasse
 - Je nach verwendeten Transportcontainer können 8 t bzw. mit 25 t der maximale tägliche Anfall des Tresters transportiert werden.
- ... Verteilung auf BGA 1 bzw. BGA 2
 - Beide BGA können aufgrund ihrer Größe den anfallenden Trester der Kelterei Sachsenobst eigenständig verarbeiten – Prozessstabilität, Rechtslage und ökonomische Überlegungen bedingen aber die Unterscheidung nach den folgenden drei Fällen:
 - Fall 1: Alles in BGA 1
 - Fall 2: Überschuss in BGA 2 – um einen Gesamtverbrauch von unter $10 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ zu erreichen werden die dafür überschüssigen Tresterlieferungen auf die BGA 2 umgeleitet
 - Fall 3: Verteilung auf beide BGA – der angefallene Trester wird möglichst gleichmäßig (mit Präferenz auf BGA 1) verteilt

Zur Bewertung der Vergleichsfälle sind folgende Kennzahlen relevant:

- mittlere Lagerzeit: Diese Zahl beschreibt, wie lange der abgeladene Trester zwischengelagert wird, bis er dem Fermenter zugeführt wird.
- Beschickungskostenfaktor: Dieses Faktor bildet das Verhältnis des direkt beschickten Tresters zum gesamt angefallenen Trester ab. Da die Beschickung mit zusätzlichen Kosten verbunden ist, ist es sinnvoll diesen Wert möglichst gering zu halten
- täglicher Verbrauch: Der Verbrauch bezogen auf die BGA 1 zeigt an, wie viel Trester pro Tag beschickt wird. Je nach Rechtsauffassung darf dieser Wert nicht über $10 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ liegen und sollte je nach Kontinuitätsanspruch über jeden Tag konstant sein.

Tab. 30: Lager- und Beschickungszenario: „Alles in eine BGA“ - 8 t
vgl. [10] - „Beschickung“

Alles in eine BGA*					<i>Transportvolumen: 8 t</i>		
Wochentag	Anliefersumme	davon ...	ans	ans	Anliefersumme	täglicher	Lager-
	BGA 1	auf Schubboden	Silo	Silo	BGA 2	Verbrauch	bestand
Montag	16	8	8			11,43	4,57
Dienstag	24	8	8	8		11,43	17,14
Mittwoch	16	8	8			11,43	21,71
Donnerstag	24	8	8	8		11,43	34,29
Freitag						11,43	22,86
Samstag						11,43	11,43
Sonntag						11,43	
Gesamtanfall Trester:			80		... davon in BGA 2: 0		
Mittelwert (Arbeitstage):			20				
Mittelwert (Woche):			11,43				
Mittlere Lagerzeit:			2,4	[d]			
Beschickungskostenfaktor:			0,6	[-]			

* (Alle Angaben, soweit nicht anders beschrieben, in Tonnen)

Tab. 31: Lager- und Beschickungszenario: „Überschuss in BGA 2“ - 8 t
vgl. [10] - „Beschickung“

Überschuss ins BGA 2*					<i>Transportvolumen: 8 t</i>		
Wochentag	Anliefersumme	davon ...	ans	ans	Anliefersumme	täglicher	Lager-
	BGA 1	auf Schubboden	Silo	Silo	BGA 2	Verbrauch	bestand
Montag	16	8	8			9,14	6,86
Dienstag	16	8	8		8	9,14	13,71
Mittwoch	16	8	8			9,14	20,57
Donnerstag	16	8	8		8	9,14	27,43
Freitag						9,14	18,29
Samstag						9,14	9,14
Sonntag						9,14	
Gesamtanfall Trester:			80		... davon in BGA 2: 16		
Mittelwert (Arbeitstage):			16				
Mittelwert (Woche):			9,14				
Mittlere Lagerzeit:			2,5	[d]			
Beschickungskostenfaktor:			0,5	[-]			

* (Alle Angaben, soweit nicht anders beschrieben, in Tonnen)

Tab. 32: Lager- und Beschickungszenario: „Verteilung in beide BGA“ - 8t
vgl. [10] - „Beschickung“

Verteilung in beide BGA*					Transportvolumen: 8 t		
Wochentag	Anliefersumme	davon ...	ans	ans	Anliefersumme	täglicher	Lager-
	BGA 1	auf Schubboden	Silo	Silo	BGA 2	Verbrauch	bestand
Montag	8	8			8	8	0
Dienstag	16	8	8		8	8	8
Mittwoch	8	8			8	8	8
Donnerstag	16	8	8		8	8	16
Freitag						8	8
Samstag						8	0
Sonntag						0	
Gesamtanfall Trester:			80		... davon in BGA 2: 32		
Mittelwert (Arbeitstage):			12				
Mittelwert (Woche):			6,86				
Mittlere Lagerzeit:			1,83	[d]			
Beschickungskostenfaktor:			0,33	[-]			

* (Alle Angaben, soweit nicht anders beschrieben, in Tonnen)

Tab. 33: Lager- und Beschickungszenario: „Verteilung in beide BGA“ - 25t
vgl. [10] - „Beschickung“

Verteilung in beide BGA*					Transportvolumen: 25 t		
Wochentag	Anliefersumme	davon ...	ans	ans	Anliefersumme	täglicher	Lager-
	BGA 1	auf Schubboden	Silo	Silo	BGA 2	Verbrauch	bestand
Montag	20		20			5,71	14,29
Dienstag					20	5,71	8,57
Mittwoch	20		20			5,71	22,86
Donnerstag					20	5,71	17,14
Freitag						5,71	11,43
Samstag						5,71	5,71
Sonntag						5,71	
Gesamtanfall Trester:			80		... davon in BGA 2: 32		
Mittelwert (Arbeitstage):			10				
Mittelwert (Woche):			5,71				
Mittlere Lagerzeit:			3	[d]			
Beschickungskostenfaktor:			1	[-]			

* (Alle Angaben, soweit nicht anders beschrieben, in Tonnen)

A - 7 Düngewert der Inputsubstrate

Der hier diskutierten Berechnung des Einflusses der Inputsubstrate auf den Düngewert, im Speziellen den Gehalt an Gesamtstickstoff sowie Ammoniumstickstoff, liegen folgende Annahmen und Voraussetzungen zu Grunde:

- Der Stickstoffgehalt addiert sich aus den Anteilen der Inputsubstrate.
- Wechselwirkungen, sowie der Einfluss des Abbauprozesses werden vernachlässigt.
- Der Gehalt an Gesamtstickstoff des Inoculums wurde aus einer Voruntersuchung des, im kontinuierlichen Versuch eingesetzten, Inoculums ermittelt. Der Gehalt an Ammoniumstickstoff wurde aus dem Mittelwert des Verhältnisses von Gesamtstickstoff zu Ammoniumstickstoff der Fermenter 75 und 76 ermittelt.
- Der volumetrische Anteil der einzelnen Fraktionen wurde aus der theoretischen Substratzusammensetzung am 79. Versuchstag (wie z.B. in Abb. 27) ermittelt.

Ausgehend davon wurde der unbekannte Einfluss auf den Düngewert aus den bekannten bzw. ermittelten Werten der jeweils oberen Fermenter berechnet.

Tab. 34: Einfluss der Inputsubstrate auf den N-Gehalt am 79. Versuchstag
vgl. [10] - „Stickstoffrechnung“

	N-Gehalt [g · l ⁻¹]	NH₄-Gehalt [g · l ⁻¹]	Stoff	Anteil [Vol.%]	Einfluss auf N-Gehalt [g · l ⁻¹]	Einfluss auf NH₄-Gehalt [g · l ⁻¹]
73	1,39	0,74	Inoculum	10,45	2,90	0,98
			Gülle	30,08	4,32	2,36
74	1,38	0,79	Inoculum	10,45	2,90	0,98
			Gülle	30,08	4,28	2,52
75	1,63	0,74	Inoculum	12,39	2,90	0,98
			Gülle	16,39	4,30	2,44
			Maissilage	26,59	5,06	2,26
76	1,58	0,35	Inoculum	11,44	2,90	0,98
			Gülle	8,54	4,30	2,44
			Maissilage	35,98	3,69	0,65
77	2,37	0,31	Inoculum	11,45	2,90	0,98
			Gülle	9,10	4,30	2,44
			Maissilage	26,81	4,38	1,46
			Apfeltrester	14,48	14,47	1,42
80	1,76	0,19	Inoculum	12,13	2,90	0,98
			Gülle	11,28	4,30	2,44
			Apfeltrester	37,40	3,87	0,11

Ausgehend vom Mittelwert des Stickstoffgehaltes der Gülle der Fermenter 73 und 74 (Variante-„Null“) und dem getrennt davon ermittelten Stickstoffgehalt des Inoculums wurde für die Fermenter 75 und 76 der Gehalt für Mais und mit dessen Mittelwert wiederum der Stickstoffgehalt für Apfeltrester bestimmt. Obwohl sich die Werte für Gülle ähneln, weichen die Werte von Mais bereits um 73 % von einander ab. Mit Gesamtstickstoffgehalten von $14,47 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$ bzw. $3,87 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$ lassen die erhaltenen Werte bei Apfeltrester keinen stichhaltigen Rückschluss auf dessen Einfluss auf den Stickstoffgehalt im Gärrest mehr zu. Die großen Unterschiede der ermittelten Werte sind neben der generell großen Fehleranfälligkeit (siehe Kapitel 4.1), der lediglich theoretisch ermittelten Substratzusammensetzung (siehe Anhang A - 2.12) und dem Problem der „Feststoffakkumulation“ ebenfalls mit der fehlenden Wiederholung dieser Untersuchung zu erklären.

A - 8 Entwicklung des Düngemittelpreises von 2006 bis 2011

Die in Tabelle 35 angezeigten Preise für Düngemittel wurden wie folgt ermittelt:

- Kosten Düngemittel:
 - Mittelwert aller angegebenen Preise bzw. Preisspannen der Düngemittelpreise vom 07.02.2011 aus [53]
- Minimum/Maximum:
 - lokale Extrema einzelner Preisangaben zwischen 2007 und 2008 aus [52]
- Kosten Nährstoff:
 - Düngemittelpreis auf den Anteil des beinhalteten Nährstoffs bezogen
 - Sind weitere Nährstoffe enthalten, ist der Preis um deren Anteil vermindert.

Tab. 35: Verwendete Düngemittelpreise für die Berechnung der maximalen Transportentfernung zum Abtransport des Gärrestes
vgl. [10] - „Verwertung Gärrest“

Datum	Nährstoff	Düngemittel	Anteil Nährstoff	Kosten Düngemittel [€ · t ⁻¹]	Kosten Nährstoff [€ · kg ⁻¹]	Minimum [€ · kg ⁻¹]	Maximum [€ · kg ⁻¹]
28.01.11	Stickstoff	Ammonnitrat- Harnstoff- Lösung	0,28	262,00	0,94	0,50	1,09
12.12.10	P ₂ O ₅	Diammon- phosphat (18/46)	0,46	524,21	0,97	0,43	1,52
15.03.10	K ₂ O	40er (Korn-) Kali	0,40	272,95	0,68	0,35	1,04

Abbildung 65 zeigt die Entwicklung des letzten Spitzenpreises für Düngemittel im Jahre 2008. Obwohl sich dieser Wert kurz darauf wieder verringert hat, zeigen Abbildung 64 bis 67, dass eine Preisstabilität der drei Hauptnährstoffe Stickstoff, Phosphor und Kalium aktuell nicht gegeben ist. Auffällig ist das gegenläufige Verhalten der Preise für Stickstoff bzw. Phosphor zu Kalium.

Angesichts der hohen Preissprünge ist eine stete Neukalkulation der strategischen Verwertung bzw. Vermarktung des Gärrestes anzuraten.

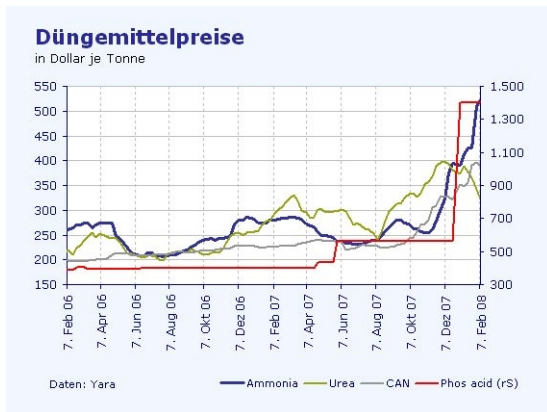


Abb. 65: Düngemittelpreise von 2006 bis 2008
vgl. [54]

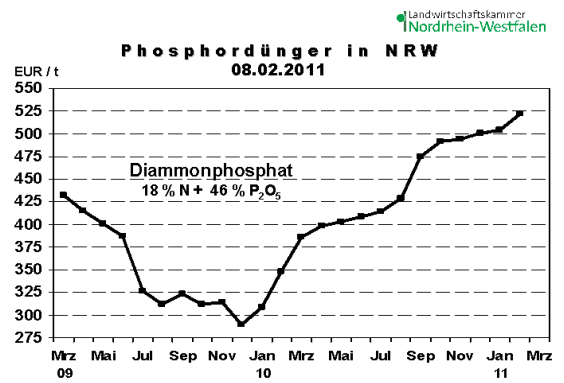


Abb. 64: Phosphordünger in NRW von 2009 bis 2011
vgl. [53]

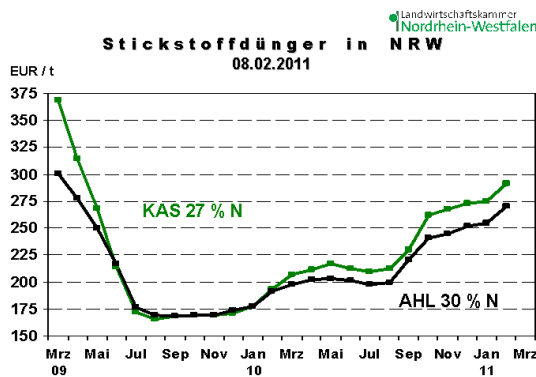


Abb. 66: Stickstoffdünger in NRW von 2009 bis 2011
vgl. [53]

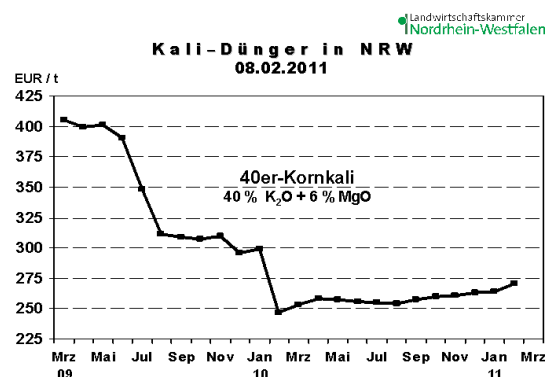


Abb. 67: Kali-Dünger in NRW von 2009 bis 2011
vgl. [53]

A - 9 Inhalt der CD

- Bachelorarbeit formatiert als PDF
- Die zur Erstellung dieser Arbeit verwendeten Quellen