

ZÜRCHER HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN  
DEPARTEMENT LIFE SCIENCE UND FACILITY MANAGEMENT  
INSTITUT FÜR UMWELT UND NATÜRLICHE RESSOURCEN

## **Laktofermentation von Fäkalien aus Komposttoiletten**



Bachelorarbeit

von

**Hansen Iris**

Bachelorstudiengang 2010

Abgabedatum 19.01.2015

Umweltingenieurwesen

Fachkorrektoren:

Schönborn Andreas

Life Sciences und Facility Management, Grüental, 8820 Wädenswil

Rüesch Laila

Kompotoi, Pfannenstielstrasse 159, 8706 Meilen

## **Impressum**

### **Schlagworte**

Laktofermentation, Effektive Mikroorganismen, EM, Fäkalien, Komposttoilette, Kompotoi, Terra Preta Sanitation, TPS, Fäzes, Urin, Milchsäuregärung, Melasse, Neuartige Sanitärsysteme, NASS

### **Zitiervorschlag**

Hansen, I. (2015). Laktofermentation von Fäkalien aus Komposttoiletten. Bachelorarbeit ZHAW, unveröffentlicht.

### **Adresse**

ZHAW Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften  
Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen  
Grüental  
8820 Wädenswil

## **Zusammenfassung**

Das Jungunternehmen „Kompotoi“ von Meilen ZH vermietet Komposttoiletten für verschiedene Anlässe. Die Fäkalien (Urin und Fäzes, die mit Strukturmaterial und Toilettenpapier vermischt sind) werden während der Mietdauer in den Toiletten gesammelt und sollen anschliessend aufbereitet, veredelt und wiederverwertet werden. Das Aufbereitungsverfahren ist momentan noch nicht fertig ausgearbeitet. Es soll jedoch die Verfahrensschritte Laktofermentation (LF), Hitzekompost und Wurmkompostierung umfassen. Mithilfe der Laktofermentation (LF) können die Fäkalien stabilisiert, bis zu einem gewissen Punkt hygienisiert und auch geruchsneutralisiert werden.

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit sollen nun die nötigen Bedingungen für eine erfolgreiche Laktofermentierung der Fäkalien durch Kompotoi eruiert werden.

Zur Versuchsdurchführung wurden Fäkalien im Labormassstab in 1 Liter Flaschen gefüllt. Durch Zugabe unterschiedlicher Mengen an Melasse und Milchsäurebakterien (in EM-Lösung enthalten) wurde ermittelt, mit welcher Kombination die Fäkalien am besten stabilisiert und geruchsneutralisiert werden können. Weiter wurde untersucht, ob die Fäkalien durch die direkte Zugabe von Milchsäure stabilisiert werden können. Während den Versuchen wurden die Parameter pH, Gasbildung, Gaszusammensetzung ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ), Trockenmasse, organischer Gehalt und Geruch untersucht.

Anhand der durchgeführten Versuche konnte die optimale Melassekonzentration für die LF der Fäkalien nicht ermittelt werden. Jedoch wurde festgestellt, dass Melassekonzentrationen  $\leq 10\%$  (m/m) meist zu Fehlgärungen führen. Zudem konnte gezeigt werden, dass sich die Zuckerrohrmelasse für die Laktofermentation und zur Geruchsneutralisierung besser eignet als Zuckerrübenmelasse.

Weiter konnte die Dauer der pH-Senkung bei stabilen Temperaturen um die  $30^\circ\text{C}$  von sechs (bei  $16^\circ\text{C}$ ) auf drei Tage reduziert werden. Mit Wasser verdünnte Fäkalien (Trockenmasse von 35% auf 15%) vermochten mit 3% Milchsäure (80%) (m/m) stabilisiert werden. Durch die Zugabe von Melasse und EM wurde ab einer pH Senkung auf ca.  $<5$  der Fäkalgeruch in den meisten Fällen vollständig durch einen Sauerteiggeruch ersetzt. Bei der Stabilisierung mit Milchsäure blieb ein Rest Fäkalgeruch übrig.

Die Fehlgärungen werden auf zu gering gewählte Melassekonzentrationen, den hohen pH-Startwert (8.4) und die hohe Pufferkapazität des Substrates zurückgeführt. Eine Laktofermentation der Fäkalien von Kompotoi mit Melasse und EM ist grundsätzlich möglich. Jedoch muss in weiteren Versuchen das optimale Verfahren noch ermittelt werden.

---

## Abstract

The start-up "Kompotoi" in Meilen, Switzerland rents out composting toilets for different venues. The faecal matter (urine and faeces mixed with structural material and toilet paper) collected in the toilets during the rental period has to be processed, refined and recycled. The treatment process has not been fully developed yet. However it will include lactic acid fermentation, heat- and vermicomposting. The lactic acid fermentation stabilizes and to some degree sanitizes and deodorises the faeces. In this thesis the conditions necessary for a successful lactic acid fermentation of faeces by Kompotoi are to be determined.

Faeces were placed in 1 liter bottles to conduct the experiments on a laboratory scale. By adding different amounts of molasses and lactic acid bacteria (in EM solution) the best ratio to stabilize and deodorise the faeces was determined. Further the possibility to stabilize by direct addition of lactic acid to the faeces was investigated. During the experiments the pH, gas production, gas composition ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ), dry matter, organic content and odor were analysed.

The ideal concentration of molasses for lactic acid fermentation of faeces could not be determined by the experiments. However, the experiments showed that with concentrations of molasses  $\leq 10\%$  (m / m) the fermentation usually failed. In addition it was shown that sugar cane molasses is better suited than sugar beet molasses for lactic acid fermentation and deodorization of faeces.

Furthermore the duration of pH reduction could be reduced from six (at  $16^\circ\text{C}$ ) to three days at stable temperatures of around  $30^\circ\text{C}$ . Faeces diluted in water (dry matter of 15%) can be stabilized by the addition of 3% lactic acid (80 %) (m / m). Faecal odor was fully replaced by a sourdough smell by adding molasses and EM in most cases if a  $\text{pH} < 5$  was reached. In stabilization with lactic acid a residual faecal odor remained.

Failures in fermentation were attributed to too low concentrations of molasses, the high initial pH value (8.4) and the high buffering capacity of the substrate.

Lactic acid fermentation of faeces with molasses and EM is possible. However the ideal procedure has yet to be determined in further experiments.

## **Dank**

An dieser Stelle möchte ich mich bei meinen Eltern, meinen Geschwister und meinem Mann für ihre grossartige und vielfältige Unterstützung während den vergangenen Jahren herzlich bedanken. Ohne diesen Support wäre dieses Studium so kaum möglich gewesen.

Auch möchte ich mich bei meinen Mitbewohner in der Giessenmühle für ihr nicht selbstverständliches aber umso begeisterteres Engagements bei der Materialsammlung für diese Bachelorarbeit bedanken. Jedoch aber auch für ihre phänomenale Unterstützung bei dem Kinder hüten. Als aber auch meiner kleiner, wunderbarer Tochter fürs Mitmachen der manchmal etwas turbulenten Zeiten aufgrund des Studiums.

Der Umgang mit Fäkalien ist an der ZHAW noch nicht etabliert und zudem geniessen sie leider auch nicht den besten Ruf. Deshalb bin ich umso dankbarer für die vielen offenen und sehr hilfsbereiten Menschen, welchen ich an der ZHAW begegnete und welche diese Arbeit so erst ermöglicht haben. So möchte ich Alex Mathis, Urs Baier und seinem Team von der Fachstelle Umweltbiotechnologie, Christa Gufler und ihrem Laborteam im GA 209, Gabriel Gerner, Pascal Schmid und selbstverständlich meinem Korrektor Andreas Schönborn danken. Aber auch Senad Lisica und Daniel Gübelin von den Biotechnologen, welche mir beim Basteln der Flaschen sehr geholfen haben. Bei dem „NASS-Team 2014“ bzw. meinen Kommilitonen David Riederer und Nicola Bulant bedanke ich mich für die vielen interessanten Gesprächen über die NASS-Thematik und den wertvollen Austausch über die jeweiligen Bachelorarbeiten. Und zum Schluss natürlich auch ein riesen Dank an Laila Rüesch und Marco Widmer von Kompotoi für ihre Unterstützung und dafür dass sie mit ihrem Idealismus inspirieren und ein tolles Projekt auf die Füsse gestellt haben!

---

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	2
2	Theoretischer Hintergrund.....	4
2.1	Arbeitssicherheit .....	4
2.2	Fäkalien .....	4
2.2.1	Nährstoffe .....	4
2.2.2	Pathogene .....	4
2.2.3	Geruch .....	5
2.3	Laktofermentation / Silage .....	5
2.3.1	Prozess der Stabilisierung und relevante Organismen.....	6
2.3.2	Prozessrelevante Parameter .....	10
2.4	Stand der Forschung zu Laktofermentation von Fäkalmaterialien.....	13
2.4.1	Nötige Additive zur Stabilisierung und Geruchsneutralisierung.....	13
2.4.2	Hygienisierende Wirkung der Laktofermentation .....	14
3	Allgemeine Materialien und Methoden .....	15
3.1	Vorgehen .....	15
3.1.1	Arbeitsplatz und Arbeitssicherheit .....	15
3.1.2	Mischung der Versuchsreihen .....	15
3.2	Materialien .....	16
3.2.1	Fäkalien Kompotoi .....	16
3.2.2	Verwendete Fäkalien .....	17
3.2.3	Verwendete Behälter .....	18
3.2.4	Bokashi .....	19
3.2.5	Zuckerrübenmelasse .....	19
3.2.6	EM (Effektive Mikroorganismen).....	19
3.3	Chemische und physikalische Analysen.....	20
3.3.1	pH-Messung .....	20
3.3.2	Gasbildung.....	21

---

---

3.3.3	Gaszusammensetzung .....	21
3.3.4	Trockenrest.....	22
3.3.5	Organischer Trockenrest .....	22
3.3.6	Raumtemperatur.....	22
3.3.7	C/N - Verhältnis .....	22
4	Resultate .....	23
4.1	Vorversuch.....	23
4.1.1	Zielsetzung und Fragestellung.....	23
4.1.2	Material und Methode .....	23
4.1.3	Resultate.....	24
4.1.4	Diskussion .....	26
4.1.5	Fazit.....	28
4.2	VERSUCH 1 – Einfluss von Kohle, Steinmehl und Melasse .....	29
4.2.1	Zielsetzung und Fragestellung.....	29
4.2.2	Material und Methode .....	29
4.2.3	Resultate.....	31
4.2.4	Diskussion .....	32
4.2.5	Fazit.....	33
4.3	VERSUCH 2 – Ermittlung der optimalen Melassekonzentration .....	34
4.3.1	Fragestellung .....	34
4.3.2	Material und Methoden .....	34
4.3.3	Resultate.....	35
4.3.4	Diskussion .....	40
4.3.5	Fazit.....	42
4.4	VERSUCH 3 – Temperatur und Milchsäure I .....	43
4.4.1	Fragestellung .....	43
4.4.2	Material und Methoden .....	43
4.4.3	Resultate.....	44
4.4.4	Diskussion .....	48

---

---

4.4.5	Fazit .....	49
4.5	Titrationversuch.....	50
4.5.1	Fragestellung .....	50
4.5.2	Material und Methoden .....	50
4.5.3	Resultate.....	51
4.5.4	Diskussion .....	52
4.5.5	Fazit .....	52
4.6	VERSUCH 4– Zuckerrohrmelasse, EM-1 und Milchsäure.....	53
4.6.1	Fragestellung .....	53
4.6.2	Material und Methode .....	53
4.6.3	Resultate.....	55
4.6.4	Diskussion .....	62
4.6.5	Fazit.....	64
5	Diskussion .....	65
5.1	Methodik .....	65
5.1.1	Beurteilung der Stabilisierung.....	65
5.1.2	Analytik .....	65
5.2	Resultate.....	66
5.2.1	Stabilisierung der Fäkalien „fester Konsistenz“ .....	66
5.2.2	Stabilisierung der Fäkalien „flüssiger Konsistenz“ .....	66
5.2.3	Temperatureinfluss .....	67
5.2.4	Zusätze .....	67
5.2.5	Milchsäure .....	68
5.2.6	Geruchsneutralisierung.....	68
5.3	Hygienisierung .....	69
5.4	Inhomogenität der Fäkalien von Kompotoi .....	69
5.5	Empfehlungen.....	69
5.6	Fazit .....	70
6	Literaturverzeichnis .....	71

---



## Abkürzungsverzeichnis

A	Ausgangsmaterial
EM	Effektive Mikroorganismen
FS	Frischsubstanz
K	Kohle
KbE	Koloniebildende Einheiten
LF	Laktofermentation
M	Melasse
M.R.S.-Agar	De man, Rogosa und Sharpe - Agar
MS	Milchsäure
MSB	Milchsäurebakterien
MW	Mittelwert
Org.TR	Organischer Trockenrest
S	Steinmehl
SK	Steinmehl und Kohle
TPS	Terra Preta Sanitation
TR/TM	Trockenrest/Trockenmasse
TUHH	Technische Universität Hamburg-Harburg

## 1 Einleitung

Eine sichere Nahrungs- und Wasserversorgung als auch intelligentes Abfallmanagement sind für eine Gesellschaft fundamental (Factura et al., 2010). Global betrachtet haben jedoch ca. 2.4 Milliarde Menschen keinen Zugang zu adäquaten Sanitäranlagen. In Folge dessen sterben in Entwicklungsländer jährlich 2.2 Millionen Menschen, davon vorwiegend Kinder, aufgrund von verschmutztem Trinkwasser und mangelnder Hygiene. (WHO, 2000)

In den Industriestaaten, konnten zwar mithilfe von Kanalisationen und anschliessender Wasseraufbereitungsanlagen der hygienische Aspekt gelöst werden. Jedoch werden nebst einem hohen Wasserverbrauch für den Transport, die anfallenden Nährstoffe und org. Substanzen anstatt wiederverwertet, aufwändig entfernt und Restmengen in die Oberflächengewässer weitergeleitet. In den Zürichsee werden Beispielsweise von den Kläranlagen jährlich mindesten 50 Tonnen Phosphor eingeleitet (Otterpohl, 2000; Larsen & Lienert, 2007). Die Abwasserentsorgung der Schweiz inkl. Kanalisation und Wasseraufbereitung kostet jährlich hochgerechnet 1.69 Milliarden CHF. Die Kosten werden zudem aufgrund des zunehmenden Sanierungsbedarfs der Kanalisation in den nächsten Jahren weiter ansteigen (Maurer & Herlyn, 2006). Pro Person und Jahr werden ca. 15'000 Liter Trinkwasser allein für den Abtransport der Exkremente verschmutzt (Krause & Jacobsen, 2011). Ein weiteres Problem globalen Ausmasses stellt die Bodendegradation dar, wovon gemäss Bai et al. (2008) 24% der weltweiten Landesflächen betroffen ist. Dies ist u.a. auf mangelndem org. Gehalt bzw. Humus in den Böden zurückzuführen. Auch problematisch ist aus mehreren Gründen der weitverbreitete und einseitige Einsatz von mineralischen Düngern. Erstens werden sie unter hohem Energie-input hergestellt, zweitens resultieren daraus Pestizideinsätze und zu guter Letzt handelt es sich dabei, zumindest betreffend Phosphor um eine begrenzte Ressource. (Otterpohl, 2011)

Mithilfe von neuartigen Sanitärsystemen (NASS) werden zurzeit verschiedene Lösungsansätze erforscht. Ihr zu Grunde liegendes Ziel ist die Wiederverwendung der Nährstoffe und der org. Substanz der Fäkalien mit zugleich möglichst geringen bis keinem Wasserverbrauch, als auch die Entwicklung von kosteneffizienten Alternativen zu bestehenden Systemen. (DWA, 2008) An dieser Stelle setzt auch das Jungunternehmen „Kompotoi“ von Meilen ZH mit Vermietungen von Komposttoiletten für verschiedene Anlässe an. Die Kernidee von Kompotoi ist die Sammlung der Fäkalien, eine anschliessende Veredelung und eine Wiederverwendung der verarbeiteten menschlichen Fäkalien. Auf diese Weise kann der Nährstoffkreislauf wieder geschlossen und gleichzeitig Wasser gespart werden. Weiter findet auf diese Art zugleich eine Informationsvermittlung zu dem tabuisierten Thema Fäkalien statt, indem es den Leuten eine alternative Methode zu dem Umgang mit Fäkalien aufzeigt. Da das Projekt „Kompotoi“ noch

relativ jung ist, bestehen noch keine ausgereiften und bewährten Veredelungsverfahren. Für den gesammelten Männerurin befindet sich zurzeit eine Nitrifikationsanlage in Bau. Das Veredelungsverfahren der Fäkalien (Fäzes, Toilettenpapier, Strukturmaterial, Frauenurin und Urin, welcher bei der Defäkation entlassen wird) soll sich an der Terra Preta Sanitation (TPS) orientieren. Die von der TUUH in Hamburg entwickelte TPS umfasst eine Laktofermentation der Fäkalien mit darauffolgender Wurmkompostierung. Durch die Zugabe von Pflanzenkohle und Steinmehl entsteht ein wertvoller Kompost mit vielen bodenverbessernden Eigenschaften (Otterpohl, 2011; Factura et al., 2010). Als zusätzliche Hygienebarriere soll zudem als Zwischenschritt ein Hitzekompost dazwischengeschaltet werden.

Mithilfe des ersten Verfahrensschritt, der Laktofermentation (LF), können die Fäkalien sowohl stabilisiert, bis zu einem gewissen Punkt hygienisiert als auch geruchsneutralisiert werden (Yemaneh et al., 2012 & 2014; Factura et al., 2010, Krüger & Scheinemann, 2010)

Bisher mengte Kompotoi den Fäkalien gemäss Yemaneh et al. (2012) ca. 10% Melasse und 10% EM Lösung (Effektive Mikroorganismen) bei. Eine Erfolgskontrolle ergab jedoch, dass nur 17% der Tonnen einen sauren pH-Wert zwischen 3.2 und 3.5 aufwiesen (mündliche Aussage Laila Rüesch von Kompotoi, 2014).

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit sollen nun die nötigen Bedingungen für eine erfolgreiche Laktofermentierung der Fäkalien von Kompotoi eruiert werden. Dazu wird anhand von Versuchen im Labormassstab durch Zugabe unterschiedlicher Mengen von Zucker und Milchsäurebakterien (welche im EM enthalten sind) untersucht mit welcher Kombination die Fäkalien am besten stabilisiert werden können. Zudem soll der Einfluss von Pflanzenkohle und Steinmehl während der LF näher untersucht werden. Zu Beginn wird in einer Literaturrecherche der Prozess der LF noch näher beleuchtet. Das Ziel der Arbeit kann in folgenden Fragestellungen präzisiert werden.

1. Ist es möglich die Fäkalien von Kompotoi mithilfe von Melasse und EM zu laktofermentieren?
2. Wenn ja, welche Menge von Melasse und EM ergeben den optimalsten Prozessverlauf bezüglich Stabilisierung?
3. Wenn ja, wie beeinflusst die Zugabe von Pflanzenkohle und Steinmehl den LF-Prozess?
4. Können die Geruchsemissionen durch Laktofermentation unterbunden werden?

## 2 Theoretischer Hintergrund

### 2.1 Arbeitssicherheit

Beim Umgang mit Fäkalien sind folgende Sicherheitsmassnahmen zu treffen (Berger & Lorenz-Ladener, 2008).

- Einweghandschuhe oder waschbare Handschuhe
- Einweg-Anzug oder 60°C waschbarer Overall
- Gummistiefel, Geräte, Eimer, welche nur für diesen Zweck gebraucht werden und für Kinder unzugänglich verwahrt werden

### 2.2 Fäkalien

#### 2.2.1 Nährstoffe

Ungefähr 80% der Nährstoffe werden mit dem Urin ausgeschieden, während die organischen Substanzen vorwiegend über die Fäzes ausgeschieden werden DWA (2008) (Abbildung 1). Mit 50 l Fäzes und 550 l Urin pro Person und Jahr macht der Urin ca. 90% des Volumens der menschlichen Ausscheidungen aus (Vinneras, 2002)

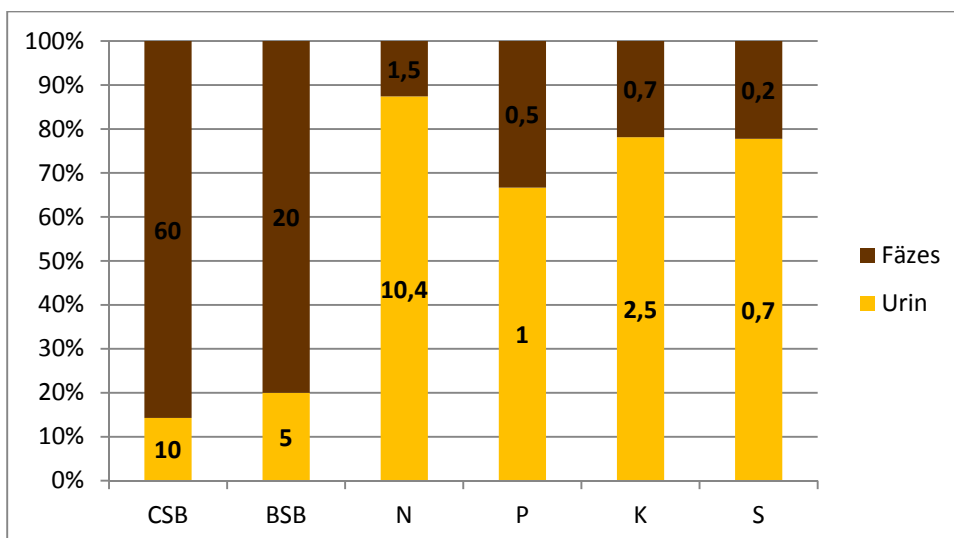


Abbildung 1 Anfallende Nährstoffe und organische Substanz in g pro Person und Tag (Medianwerte) nach DWA (2008)

#### 2.2.2 Pathogene

Die Mehrheit der pathogenen Organismen (Viren, Bakterien, Protozoen und Würmer) werden mit 80-100% über die Fäzes ausgeschieden (Mara & Cairncross, 1989). In Abbildung 2 sind einige ausgewählte Pathogene und ihre Überlebensdauer im Boden dargestellt. Der Urin von gesunden Menschen ist i.d.R. steril. Im akuten Krankheitsfall kann er jedoch auch mit

Pathogenen belastet sein. Im Urin können zudem Medikamentenrückstände und Hormone auftreten. (Langergraber & Muellegger, 2005)

Pathogen	Survival time (days)	
	In soil	On crops
<b>Viruses</b>		
Enteroviruses <sup>a</sup>	< 100 but usually < 20	< 60 but usually < 15
<b>Bacteria</b>		
Faecal coliforms	< 70 but usually < 20	< 30 but usually < 15
<i>Salmonella</i> spp.	< 70 but usually < 20	< 30 but usually < 15
<i>Vibrio cholerae</i>	< 20 but usually < 10	< 5 but usually < 2
<b>Protozoa</b>		
<i>Entamoeba histolytica</i> cysts	< 20 but usually < 10	< 10 but usually < 2
<b>Helminths</b>		
<i>Ascaris lumbricoides</i> eggs	Many months	< 60 but usually < 30
Hookworm larvae	< 90 but usually < 30	< 30 but usually < 10
<i>Taenia saginata</i> eggs	Many months	< 60 but usually < 30
<i>Trichuris trichiura</i> eggs	Many months	< 60 but usually < 30

Abbildung 2 Überlebensdauer von ausgewählten Pathogenen im Boden und auf Pflanzen bei 20-30°C nach Feachem et al. (1983)

### 2.2.3 Geruch

Der unangenehme Geruch der Fäkalien ist zu 90% auf flüchtige Fettsäuren wie Essigsäure, Propionsäure und Buttersäure zurückzuführen. Ammonium macht ebenfalls 6.5 % des schlechten Geruchs aus. Weitere schlecht riechende Substanzen der Fäkalien sind u.a. Indol, Skatol, Pyridin, Pyrrol, Schwefelwasserstoff und Methanthiol. (Sato et al., 2001)

## 2.3 Laktofermentation / Silage

Bei der Laktofermentation handelt es sich um einen anaeroben Prozess analog zur Silageherstellung. Dabei metabolisieren Milchsäurebakterien leichtverfügbare Kohlehydrate zu Milchsäure, was zu einer Senkung des pH- Wertes führt. Das saure Milieu, die produzierten Säuren und antimikrobielle Ausscheidungen der Milchsäurebakterien führen zu einer Hemmung des Stoffwechsels und zur Eliminierung anderer Mikroorganismen. Somit wird das Substrat sowohl stabilisiert als auch hygienisiert. Zudem werden durch die LF die unangenehmen Gerüche der Fäkalien neutralisiert. (Yemaneh et al., 2012)

Der Prozess der Laktofermentation bzw. Milchsäuregärung ist in der Literatur zu Silagen gut beschrieben. Der generelle Ablauf und allgemeingültige Parameter der Milchsäuregärung sollen deshalb in diesem Kapitel abgehandelt werden.

---

### 2.3.1 Prozess der Stabilisierung und relevante Organismen

Die Laktofermentation kann grob in folgende Phasen unterteilt werden (Schroeder, 2004).

#### **Phase 1: Aerobe Phase**

Der vorhandene Luftsauerstoff wird durch Aerobier veratmet und schafft die nötigen anaeroben Bedingungen für die Milchsäuregärung (Schroeder, 2004). In diesem Prozess werden die leichtverfügbaren Kohlenhydrate zu Kohlensäure und Wasser abgebaut, wodurch Wärme entsteht und Nährstoffverluste auftreten (Gross & Riebe, 1974). Je mehr Restsauerstoff vorhanden ist, umso besser können sich die Essigsäurebakterien (Enterobakterien) entwickeln (Wilhelm & Wurm, 1999). Dieser Prozess dauert bei ausreichend gepresstem Material nur wenige Stunden (Pahlow & Hünting, 2011).

#### **Phase 2: Hauptgärungsphase – Essigsäuregärung**

In der Hauptgärungsphase konkurrieren verschiedene Mikroorganismen, welche unter den anaeroben Bedingungen wachsen können mit den Milchsäurebakterien um den Zucker. Hierzu zählen, Enterobakterien, Clostridien einige Bacillusarten sowie Hefepilze (Pahlow & Hünting, 2011). Die Hauptkonkurrenten der Milchsäurebakterien (MSB) sind die fakultativ anaeroben Enterobakterien, welche bereits während der aeroben Phase hohe Keimgehalte entwickeln können, während die MSB noch zu 80% gehemmt sind (Gross und Riebe, 1974; Muck, 2010). Die Enterobakterien werden auch Essigsäurebakterien genannt, da Essigsäure als Hauptprodukt ihrer Fermentation gebildet wird. Der Prozess ist im eigentlichen Sinn jedoch eine gemischte Säuregärung (Tabelle 1) (McDonald et al. 1991; Brechner, 2001). Dabei wird der Zucker über Brenztraubensäure zu Essigsäure, Ameisensäure und Kohlendioxid abgebaut (Gross und Riebe, 1974). Dies führt zu einer pH-Senkung bis zu einem Wert von ca. 5 (Schroeder, 2004). Die Essigsäuregärung ist ein unerwünschter Prozess, weil dabei den MSB der Zucker entzogen und Wärme produziert wird, was je nach Aussentemperatur innerhalb kurzer Zeit zur Überschreitung des optimalen Temperaturbereichs der MSB führen kann. (Gross & Riebe, 1974). Zudem entsteht bei einer reinen Essigsäuregärung, verglichen mit der Milchsäuregärung, ein bis zu zehn Mal höherer Energieverlust. Weiter ist mit der Essigsäuregärung ein massiver Eiweissabbau verbunden (Wilhelm und Wurm, 1999). Jedoch ist bei tiefen pH-Werten ein gewisser Anteil Essigsäure für die LF auch förderlich, da sie u.a. Hefen und Schimmelpilze hemmt (Salminen et al., 2004). Weiter sind die Enterobakterien für die Nitratreduktion und die Denitrifikation verantwortlich, deren Abbauprodukte wiederum die Clostridien hemmen (siehe auch Kapitel 2.3.2) (Sterzenbach, 2000). Wenn der pH durch die Essig- und Milchsäurebildung zwischen 4.5 und 5 fällt, werden die Essigsäurebakterien

gehemmt (Abbildung 3) (Schroeder, 2004; Bischofsberger et al., 2005; Muck; 2010). Diese Phase dauert normalerweise zwischen 24 bis 72 Stunden (Schroeder, 2004).

**Enterobakterien** sind gramnegative, stäbchenförmige und i.d.R bewegliche Bakterien, welche im Darm, im Boden, in Gewässern und in Nahrungsmitteln vorkommen. Wichtige Gattungen sind z.B. Escheria, Shigella, Salmonella, Enterobacter, Klebsiella und Yersinia. (Brechner 2001; McDonald et al., 1991)

### **Phase 3: Hauptgärungsphase – Milchsäuregärung**

Unter einem pH-Wert von 4.5 und unter der Voraussetzung einer ausreichenden Zuckerquelledominieren die Milchsäurebakterien den Gärverlauf. Die dritte Phase ist die zeitlich längste und dauert so lange bis der pH Wert soweit gesunken ist, dass alle anderen Bakterien gehemmt werden und das Substrat somit stabilisiert wird (Schroeder, 2004; Bischofsberger et al., 2005). Voraussetzung für eine einwandfreie Milchsäuregärung sind anaerobe Bedingungen, ausreichend vergärbarer Zucker als auch ein optimaler Temperaturbereich für die MSB (Gross und Riebe, 1974). Der Konservierungseffekt wird von Gross und Riebe (1974) nebst der pH-Absenkung auf die bakterizide Wirksamkeit von Säureresten, als auch auf antagonistisch wirkende Stoffwechselprodukte der MSB mit antibiotikaähnlicher Funktion zurückgeführt.

**Milchsäurebakterien** sind stäbchen- oder kokkenförmige, grampositive, in der Regel unbewegliche, aerotolerante anaerobische Bakterien.

Sie sind meist auf Habitate beschränkt, wo Zucker als Energielieferant vorhanden ist und besiedeln beispielsweise Milch, Pflanzen, Schleimhäute und den Intestinaltrakt des Menschen. Die Milchsäurebakterien werden nach ihrem Metabolismus in heterofermentative und homofermentative Bakterien unterteilt. Während die Homofermentativen den Zucker vollständig in Milchsäure umwandeln, bilden die Heterofermentativen nebst Milchsäure auch CO<sub>2</sub>, Ethanol bzw. Essigsäure (siehe auch Tabelle 1). Da die Milchsäuregärung der heterofermentativen MSB, im Vergleich zu jener der homofermentativen MSB in einer geringerer pH-Senkung und zu fünf bis zehnmal so hohen Trockenmasseverlust resultiert, werden die Homofermentativen in der Silage bevorzugt. (Brechner, 2001, McDonald et al., 1991; Gross & Riebe, 1974)

Der Wachstumsbereich der Meisten MSB liegt bei einem pH zwischen 4- 6.8. Einige können jedoch bis zu einem pH von 3.5 oder 9.6 noch wachsen. Die meisten MSB weisen ein optimales Wachstum bei 30°C auf und wachsen i.d.R. ab 15°C. (McDonald et al., 1991)

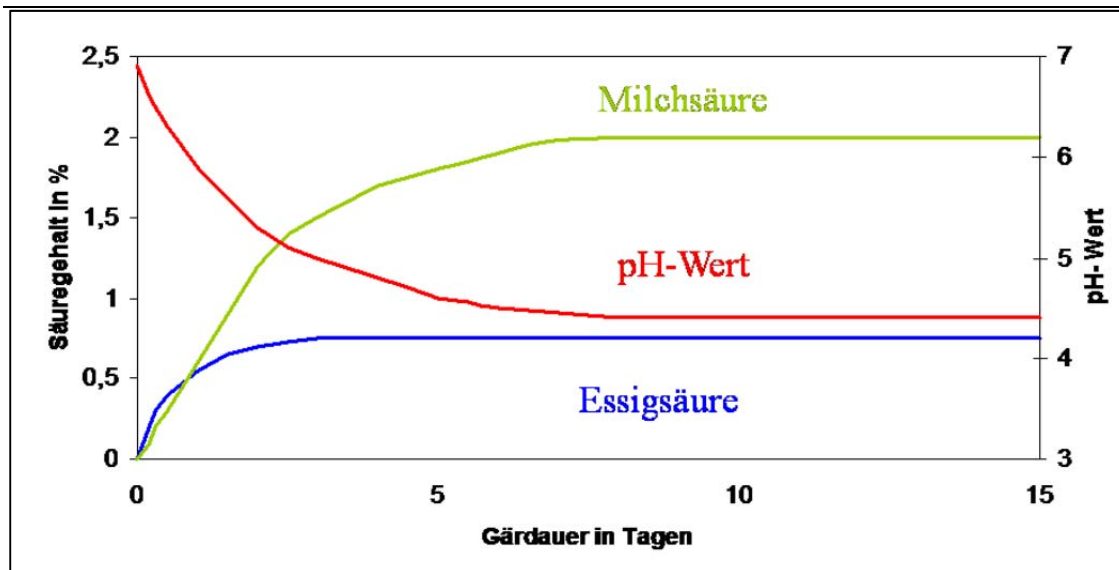


Abbildung 3 Entwicklung der Gärsäuren und pH-Werte bei einwandfreier Milchsäuregärung nach Gross und Riebe (1974)

#### Phase 4: Sekundäre Gärung - Butter – und Propionsäuregärung

Wenn der pH-Wert nicht genügend schnell ein kritisches Niveau erreicht, entwickeln sich die streng anaeroben Clostridien und verursachen eine Buttersäuregärung, auch bekannt als sekundäre Gärung (Abbildung 4). (Pahlow & Hünting, 2011; McDonald et al., 1991)

Es werden saccharolytische und proteolytische Clostridien unterschieden. Die Proteolyten bauen hauptsächlich Eiweiss ab, wodurch Ammoniak entsteht, was zu einer Erhöhung der Pufferkapazität und einem pH-Anstieg führt. Die Saccharolyten bauen hingegen Kohlenhydrate und Milchsäure ab. Vor allem der Milchsäureabbau beeinflusst den Prozess äusserst negativ, da aus zwei Mol Milchsäure nur ein Mol Buttersäure gebildet wird. Die Buttersäure wirkt weniger sauer auf das Milieu als die Milchsäure. Infolgedessen steigt wiederum der pH-Wert und der Konservierungseffekt wird beeinträchtigt. Zudem verbreitet Buttersäure einen üblen Geruch. Zusammenfassend kann der negative Effekt der sekundären Gärung auf den Abbau von Kohlenhydraten, Milchsäure und verschiedenen Aminosäuren zurückgeführt werden, was erhebliche Trockenmasse- und Energieverluste verursacht und in einem pH-Anstieg resultiert (Gross & Riebe, 1974, Pahlow & Hünting, 2011)

In der Silage-Literatur wird stets nur von der Buttersäuregärung der Clostridien gesprochen, jedoch wandeln einige Clostridien die Milchsäure auch zu Propionsäure um (Tabelle 1) (Brechner, 2001).

**Clostridien** sind meist gerade oder leicht gekrümmte bewegliche Stäbchen mit peritricher Begeißelung und gehören zu den grampositiven, Endosporen bildenden Bakterien mit geringem



GC-Gehalt. Reife Endosporen überstehen Hitze, Trockenheit als auch aerobe Bedingungen (Brechner, 2001). Sie kommen sowohl im Boden als auch in Fäzes vor (McDonald, 1991). Wichtige humanpathogene und toxinbildende Arten sind *C. botulinum* (Nahrungsmittelvergiftung), *C. tetani* (Wundstarrkrampf) und *C. perfringens* (Gasbrand). (Brechner, 2001)

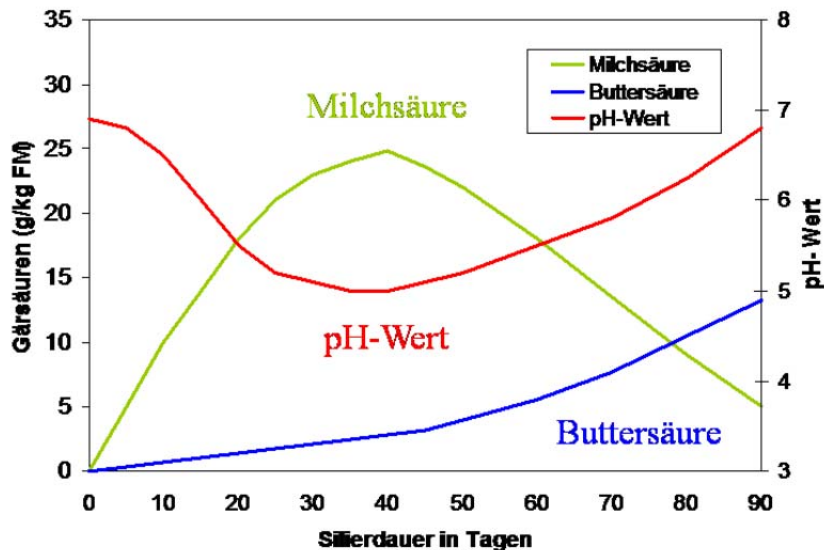


Abbildung 4 Buttersäuregärung in feuchten, zuckerarmen Silagen gemäss Pahlow und Hünting (2011)

### Phase 5: Öffnung der Silage – Nacherwärmung

Durch das Öffnen der Silage gelangt wieder Sauerstoff ins System, was zu einer Entwicklung von Hefen und Schimmelpilzen führen kann. Diese bauen unter Bildung von  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  und Wärme die vorhandenen Nährstoffe ab, was zudem zu einem hohen Verlust an Trockensubstanz von 10% - 20% führen kann (McDonald et al., 1991). Der pH-Wert, welcher in einer Silage erreicht wird vermag die Hefen nicht zu hemmen, da diese auch noch bei einem pH von 3.5 wachsen können. Im anaeroben Zustand fermentieren die Hefen Restzucker zu Ethanol und  $\text{CO}_2$  (Tabelle 1). Dies kann bei hohen Zuckerresten bis zu einem Ethanolgehalt von >20 g/Kg Trockensubstanz führen. (Muck, 2010)

Gelangt jedoch wieder Sauerstoff ins System können die Hefen verschiedene organische Säuren umsetzen, u.a. auch Milchsäure. Dies führt zu einem pH-Anstieg und begünstigt daraufhin auch andere Gärschädlinge wie Essigsäurebakterien und Schimmelpilze.

Durch die Zugabe von *L. plantarum*  $10^5$  KBE/g konnte eine hemmende Wirkung auf die Hefen festgestellt werden. Weiter wirken jedoch auch undissoziierte kurzkettige organische Säuren, wie Milchsäure und v.a. Essigsäure inhibierend auf Hefen (Kapitel 2.4.2). (Gross & Riebe, 1974)

**Tabelle 1 Allgemeine Gärungen und einige der beteiligten Organismen nach Madigan et al. (2013) und Wilkinson (2005)**

Typ	Reaktion	Organismen
alkoholisch	Hexose $\rightarrow$ 2 Ethanol + 2 CO <sub>2</sub>	Hefe, Zymomonas
homofermentativ	Hexose $\rightarrow$ 2 Lactat <sup>-</sup> + 2 H <sup>+</sup>	Einige Lactobazillen
heterofermentativ	Hexose $\rightarrow$ 2 Lactat <sup>-</sup> + Ethanol + CO <sub>2</sub> + H <sup>+</sup>	Einige Lactobazillen
	3 Fructose $\rightarrow$ Lactat <sup>-</sup> + Acetat <sup>-</sup> + 2 Mannitol + CO <sub>2</sub> + H <sup>+</sup>	
Buttersäure <sup>b</sup>	Hexose $\rightarrow$ Butyrat <sup>-</sup> + 2 H <sub>2</sub> + 2 CO <sub>2</sub> + H <sup>+</sup>	Clostridium butyricum
	2 Lactat <sup>-</sup> $\rightarrow$ Butyrat <sup>-</sup> + 2 H <sub>2</sub> + 2 CO <sub>2</sub> + H <sup>+</sup>	Clostridium tyrobutyricum
Propionsäure	3 Lactat <sup>-</sup> $\rightarrow$ 2 Propionat <sup>-</sup> + Acetat <sup>-</sup> + CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O	Propionibacterium Clostridium propionicum
Gemischte Säuregärung <sup>a,b</sup>	Hexose $\rightarrow$ Ethanol + 2,3 Butandiol + Succinat <sup>2-</sup> + Lactat <sup>-</sup> + Acetat <sup>-</sup> + Formiat <sup>-</sup> + H <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub>	Enterobakterien Inkl. Escherichia, Salmonella, Shigella, Klebsiella, Enterobacter
acetogen	Fructose $\rightarrow$ 3 Acetat <sup>-</sup> + 3 H <sup>+</sup>	Clostridium aceticum
Butanol <sup>b</sup>	2 Hexose $\rightarrow$ Butanol + Aceton + 5 CO <sub>2</sub> + 4 H <sub>2</sub>	Clostridium acetobutylicum
Caproat/Butyrat	6 Ethanol $\rightarrow$ 3 Acetat <sup>-</sup> + 3 Butyrat <sup>-</sup> + Caproat <sup>-</sup> + 2 H <sub>2</sub> + 4 H <sub>2</sub> O + H <sup>+</sup>	Clostridium kluyveri

<sup>b</sup> Nur wichtigste Produkte dargestellt. Weitere Produkte sind etwas Aceton und bei der Buttersäuregärung geringe Mengen an Ethanol

<sup>a</sup> Nicht alle Organismen machen dieselben Produkte. Die Reaktionsgleichung ist nicht ausgeglichen

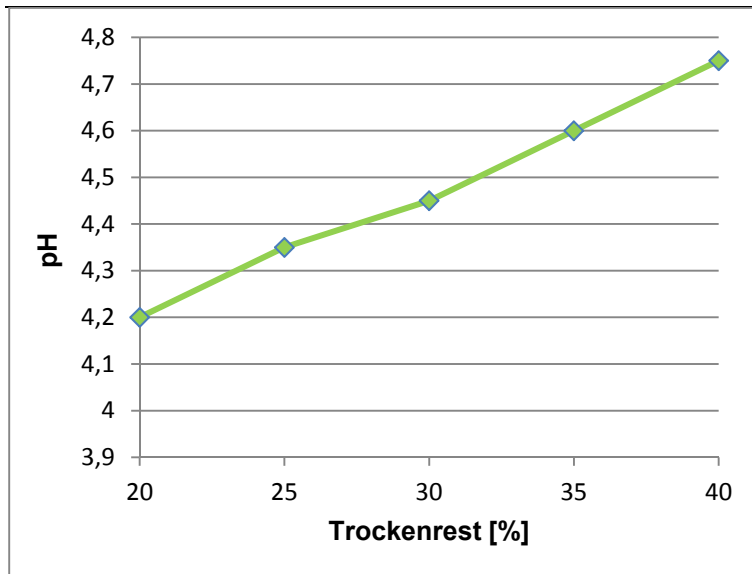
### 2.3.2 Prozessrelevante Parameter

#### Pufferkapazität

Je höher die Pufferkapazität eines Substrates ist, umso mehr Milchsäure muss gebildet werden um eine Stabilisierung zu erreichen. Die puffernden Substanzen führen zu einer Verlangsamung der pH-Senkung oder verhindern diese gar. Zu ihnen zählen Proteine, Ammoniak und hohe Aschegehalte bzw. Mineralgehalte. Die Pufferkapazität wird in Menge Milchsäure definiert, welche es benötigt um einen pH von 4 zu erreichen (MS/Kg Trockensubstanz). (Gross und Riebe, 1974)

#### Trockensubstanzgehalt

Der Trockengehalt des Substrates nimmt einen direkten Einfluss auf den pH-Wert, welcher nötig ist, um die Silage zu stabilisieren. Die feuchteliebenden Clostridien reagieren aufgrund des erhöhten osmotischen Druckes empfindlicher auf Säure, je weniger ihnen freies Wasser zur Verfügung steht. Demzufolge liegt der sogenannte „kritische pH-Wert“ um die säureempfindlichen Gärschädlichen zu unterdrücken mit zunehmendem Trockengehalt höher (Abbildung 5). (Weissbach, 2002; Nussbaum, 2007)



**Abbildung 5 Kritische pH- Werte von Silagen in Abhängigkeit des Trockensubstanzgehaltes nach Weissbach (2002)**

In Silagen werden Trockenmassegehalte zwischen 30% und 40% Prozent angestrebt. Kommt der TR unter 28% zu liegen, wird von einer Feuchtsilage gesprochen, welche vermieden werden sollte. Ersten tritt eine höhere Wahrscheinlichkeit zu Sickersaftbildung und damit zu Nährstoffverlusten auf. Zweitens werden dadurch die feuchteliebenden Clostridien gefördert. Aus diesem Grund muss die pH Absenkung bei geringen TR schneller vor sich gehen, da ansonsten die Wahrscheinlichkeit hoch ist, dass die Clostridien dominieren. In nassen Silagen muss im Vergleich zu trockenen Silagen mehr Milchsäure gebildet werden, um denselben pH-Wert zu erreichen. (Galler, 2011)

Es besteht jedoch auch einen Zusammenhang, zwischen hohem TR und langsamer pH-Senkung, da sich die MSB in trockenerem Milieu ebenfalls langsamer entwickeln (Weissbach, 2002). Weisst der TR mehr als 40% auf, ist die Verdichtung des Substrates erschwert, was zu einer Verlängerung der aeroben Phase führt. Aus diesem Grund setzt die Milchsäuregärung erst verspätet ein (ADLER, 2002). Zudem besteht bei der Entnahmephase ein erhöhtes Risiko für aerobe Abbauprozesse (Gross & Riebe, 1974).

### Nitratgehalt

Einen erhöhten TR 30-40% hat zur Folge, dass die pH-Senkung, aufgrund der langsameren Entwicklung der MSB, mehr Zeit benötigt. Bis der pH den kritischen Wert erreicht, ist es besonders wichtig die Clostridien zu hemmen (Sterzenbach, 2000). Dies kann gemäss Sterzenbach (2000) ab einem Nitratgehalt von 0.05% des TR und nach (Galler, 2011) ab 0.1% des TR erreicht werden. Denn während des Gärprozesses im Silo wird von den Enterobakterien (z.B. E-Coli) zu Beginn der Gärung Nitrat zu Nitrit und daraufhin anhand der Denitrifikation zu

Stickstoffmonoxid (NO), Distickstoffmonoxid und molekularem Stickstoff (N<sub>2</sub>) reduziert. Dabei wirken die Stoffe Nitrit und Stickstoffmonoxid hemmend auf die Buttersäurebakterien (Sterzenbach, 2000; Madigan et al., 2013).

### **Wasserlösliche Kohlenhydrate und Versäuerungspotential**

Nach Gross und Riebe (1974) ist Zuckermangel der Hauptgrund für Fehlgärungen. Zu den vergärbaren Kohlenhydraten zählen vor allem Monosaccharide, Oligosaccharide und Fructosane (Gross & Riebe, 1974). Nach Sterzenbach (2000) sind mind. 37 g wasserlösliche Kohlenhydrate je kg Siliergut für eine erfolgreiche Milchsäuregärung notwendig. Der nötige Zuckergehalt ist jedoch von der Pufferkapazität abhängig. Mithilfe des Quotienten der wasserlöslichen Kohlenhydrate (Z) und der Pufferkapazität (PK), lässt sich das Säuerungspotential (Z/PK) berechnen (Weissbach, 2002). Das Säuerungspotential sollte bei einem TR von 30% bei 2 liegen (Sterzenbach, 2000). Die Einheiten sind jeweils auf die Trockenmasse bezogen.

### **Vergärbarkeitskoeffizient und minimaler Trockengehalt**

Die Vergärbarkeit ist abhängig von dem TR und des Versäuerungskoeffizienten und kann mithilfe des Vergärbarkeitskoeffizienten (VK) berechnet werden ( $VK = TS (\%) + 8 \cdot Z/PK$ ). Bei einem VK unter 35 gilt das Substrat als schwer und mit einem VK über 45 als leicht vergärbar. Weiter lässt sich aufgrund des Versäuerungspotentials auch der minimale Trockenrest zur Erreichung des kritischen pH-Wertes berechnen:  $TM_{min} = 450 - 80 Z/PK$  (Sterzenbach, 2000).

---

## 2.4 Stand der Forschung zu Laktofermentation von Fäkalmaterialien

### 2.4.1 Nötige Additive zur Stabilisierung und Geruchsneutralisierung

Yemaneh et al. (2012) führte an der TUHH in Zusammenhang mit der Terra Preta Sanitation Versuche mit reinen menschlichen Fäzes bei Zimmertemperaturen durch. Die Resultate von Yemaneh et al. (2012) ergaben, dass die schnellste und tiefste pH-Senkung mit 10% (m/m) Zuckerrohrmelasse und einer Zugabe von 10% (m/m) MSB-Kombination von *L. plantarum*, *L. casei* und *P. acidilactici* erreicht wurde. Dabei senkte sich der pH von 5.2 auf 3.9 innerhalb von ca. 7 Tagen. Mit der Zugabe von 10% (m/m) EM-a konnte eine pH-Senkung bis 4.1 erzielt werden, wobei die pH-Senkung jedoch mehr Zeit in Anspruch nahm. Hingegen erfolgte ohne zusätzliche Zuckerzugabe keine pH-Senkung und mit 5% Melasse stieg der pH nach anfänglichem sinken wieder an. Die LF bei der Zugabe der Fäzes von Urin im Verhältnis 1:10 verhielt sich analog zu den Versuchen mit reiner Fäzes. Auch die Zugabe von 10% Kohle beeinträchtigte die LF nicht und bewirkte nur einen etwas höheren pH – Wert um 0.1 Einheiten. Der Geruch wurde nur bei einer Zugabe von 10% Melasse, kombiniert mit einem MSB-Inokulum vollständig unterdrückt.

Yemaneh et al. (2014) wiesen zudem nach, dass auch durch eine Zugabe von mind. 40% Küchenabfällen (Zuckergehalt 9.6% von FS) als Zuckerquelle, die Fäzes ebenfalls laktofermentiert werden können. Vorbehandlungen der Küchenabfälle durch Hitzebehandlung (70°C) oder Vorfermentierung beeinflussten den LF-Prozess verglichen mit unbehandelten Küchenabfällen nicht relevant. Jedoch rochen die fermentierten Ansätze mit Küchenabfällen, abhängig von deren Zusammensetzung ziemlich stark. Dem könnte möglicherweise durch Zugabe von Pflanzenkohle abgeholfen werden (Yemaneh et al., 2014).

Schmid (2012) untersuchte für die „UrbanFarmers“ in Basel, mithilfe von verschiedenen Versuchen das optimale Verfahren zur Laktofermentation von Fischgülle. Dazu verwendete er als Zuckerquelle, Glukose und dieselben MSB – Stämme wie Yemaneh et al. (2012). Die Versuche wurden ständig bei einer Temperatur von 37°C geschüttelt. Das beste Resultat wurde bei einer Konzentration von 2% Glukose und einer Anzahl MSB von  $2.7E+07$  KbE/g je Stamm erzielt. Die pH-Senkung erfolgte bereits innerhalb des ersten Tages auf ca. 3.6. Je höher die zugegebene Menge Milchsäurebakterien war, konnte eine umso höhere Milchsäurebildung und schnellere pH – Absenkung als auch eine umso geringere Essig – und Buttersäurekonzentrationen nachgewiesen werden. Die Zugabe von mehr als 5% Glukose, führte ab Tag fünf, bei konstantem pH zu massiven Gasbildungen. Der Geruch konnte ab einer

---

Zugabe von 2% Glukose neutralisiert werden. Ab einem pH von unter 4.5 wurden kaum noch flüchtige Fettsäuren gebildet. (Schmid, 2010)

### 2.4.2 Hygienisierende Wirkung der Laktofermentation

Die hygienisierende Wirkung der Laktofermentation kann auf das saure Milieu, der Bildung kurzkettiger organische Säuren und die Ausscheidung von Bacteriocine der MSB zurückgeführt werden. Die organischen Säuren wirken vorwiegend in undissoziiertem Zustand inhibierend. Da die Milchsäure mit einem pKa von (3.08) bei einem pH von 4 nur zu 11% dissoziiert vorliegt, wirkt sie nur schwach antimikrobiell. Die starke antimikrobielle Wirkung ist v.a. auf die schwachen Säuren wie die Essig- (pKa 4.87) -und Propionsäure (pKa 4.75) zurückzuführen, welche bei einem pH von 4 zu 85% respektive 92% dissoziiert vorliegen. (Salminen et al., 2004). Die undissoziierten Säuren gelangen aufgrund ihrer Fettlöslichkeit durch passive Diffusion ins Zellinnere der Hefen, wo sie sich unter Freilassung eines  $H^+$ -Ion dissoziieren, was zu einer rapiden interzellulären pH-Senkung führt. Werden die  $H^+$  - Ionen nicht durch aktiven Transport wieder aus der Zelle befördert führt dies zu einem schnellen Zelltod. (Gross & Riebe 1974; Salminen et al., 2004)

Die Milchsäure hingegen ist besonders wichtig um den pH-Wert zu senken. Jedoch konnte auch nachgewiesen werden, dass die Milchsäure die Membrandurchlässigkeit erhöht, was wiederum den Effekt der übrigen antimikrobiellen Substanzen erhöht.

Essigsäure vermag Hefen, Schimmelpilze als auch Bakterien zu schädigen, wohingegen die Propionsäure vorwiegend nur Hefen und Schimmelpilze beeinträchtigt.

Bacteriocine sind ribosomal synthetisierte Verbindungen welche von den MSB gebildet werden um das Wachstum von anderen Bakterien zu inhibieren. Bisher konnte bei praktisch allen MSB die Bildung von Bacteriocine nachgewiesen werden. Bacteriocine könne als Antibiotika betrachtet werden, welche sich jedoch durch einige Kriterien unterscheiden. So werden sie ribosomal gebildet, die Wirtszelle ist immun dagegen, sie unterscheiden sich in der Wirkungsweise und haben nur ein enges Tötungsspektrum. Meistens eliminieren sie nur nahverwandte Bakterien. So haben die von den MSB gebildete Bacteriocine i.d.R. keine Wirkung auf gramnegative Bakterien. (Salminen et al., 2004).

### **3 Allgemeine Materialien und Methoden**

Die in diesem Kapitel beschriebenen Materialien und Methoden gelten für alle Versuche, sofern nicht anders deklariert. Abweichungen oder Ergänzendes wird bei jedem Versuch zusätzlich beschrieben.

#### **3.1 Vorgehen**

##### **3.1.1 Arbeitsplatz und Arbeitssicherheit**

Da es aufgrund Befürchtungen betreffend der Gewährleistung der Hygiene als auch aufgrund von Platzknappheit nicht möglich war die Versuche in einem Labor durchzuführen, wurden die Arbeiten grösstenteils in einem „Aussenlabor“ durchgeführt. Das Abfüllen und Entleeren der Flaschen wurde ausschliesslich über dem Abflussbecken des Waschplatzes mit ARA - Anschluss durchgeführt. Zur Lagerung der Versuche stand ein ungeheizter aber gut isolierter Raum zur Verfügung. Die pH – Messung konnte hingegen in einem Folientunnel durchgeführt werden. Die Arbeitsfläche wurde nach jeder Benutzung mit 80 % Ethanol gewaschen. Die Werkzeuge wurden jeweils nach Versuchsabbruch autoklaviert oder wenn dies aufgrund der Materialzusammensetzung nicht möglich war, ebenfalls von Hand mit Ethanol (80%) und Wasser gut gereinigt und anschliessend in der Spülmaschine gewaschen. Der Abfall (Servietten, benutzte Handschuhe) wurden in einem verknoteten Plastiksack im Abfalleimer entsorgt. Bei der Arbeit mit den Fäkalien wurde Handschuhe getragen.

##### **3.1.2 Mischung der Versuchsreihen**

Nach der Entnahme wurden die Fäkalien mit einer Bohrmaschine von Bosch und einem Schlagsahne-Aufsatz in einer kleinen Wanne so gut wie möglich homogenisiert. Die Mischungen wurde draussen mithilfe einer Mettler Toledo Wage auf 1 Gramm genau durchgeführt, da die Waage aufgrund des Windes oft Mühe hatte sich zu stabilisieren. Die Zutaten wurden pro Versuchsreihe in einen Kübel abgewogen und nach jeder Zugabe erneut gemixt. Dabei wurde zuerst die Melasse und das EM, daraufhin die Fäkalien und zuletzt die Kohle und das Steinmehl beigemischt.

Anschliessend wurde gewichtsmässig so viel Material in die Flaschen gefüllt, dass alle 300 g Fäkalien beinhalteten sollten. Mit Ausnahme von Versuch 1 wurden jeweils zwei Wiederholungen angesetzt.

## 3.2 Materialien

### 3.2.1 Fäkalien Kompotoi

Das Ziel von Kompotoi ist es grundsätzlich den gesamten Urin getrennt zu sammeln. Bis anhin wird jedoch nur der Männerurin mithilfe von Pissoirs separiert. Die Separets zur Trennung des Urins im Klo haben sich während den Vermietungen nicht bewährt, da sie sich oftmals durch Einstreu und Toilettenpapier verstopft haben. Aus diesem Grund werden bisher der Frauenurin und der Urin, welcher während dem Stuhlgang entlassen wird, zusammen mit den Fäzes gesammelt. Als Sammlungsbehälter der Fäkalien dienen 100 l Tonnen aus Plastik PE (Abbildung 6). Die Behälter werden mit einem kompostierbaren Plastik ausgelegt damit der Inhalt einfacher entleert werden kann und die Tonnen einfacher zu reinigen sind.

Die anteilmässige Zusammensetzung von Urin und Fäzes ist je nach Art der Einsätze sehr unterschiedlich. So fallen bei Kurzzeitvermietungen (meistens 1 Tag oder Abend, manchmal ein Wochenende) verhältnismässig viel mehr, bis fast nur Urin an, während die grossen Mengen an Fäzes v.a. bei Langzeitvermietungen (von einer Woche bis mehrere Monate) entstehen. Vor der Vermietung wird der Boden der Tonnen mit ca. 20 - 40 cm Sägestreu und Strohpellets zur Urinabsorption gedeckt. Dabei wird für Kurzzeitvermietungen aufgrund der hohen Menge zu erwartendem Urin mehr Bodeneinstreu eingefüllt. Nach jedem Toilettengang wird vom Benutzer eine Handvoll Einstreu in die Toilette gegeben. Die Einstreu setzt sich aus Sägespänen von einer Sargschreinerei und ca. 10-20 % Bokashi zusammen. Die Einstreu dient einerseits zur Geruchneutralisierung und andererseits als Strukturmaterial während der Kompostierung. Durch das Beimischen der Einstreu von Bokashi, wird bereits im Voraus eine Animpfung des Materials mit Milchsäurebakterien bewirkt.



Abbildung 6 Sammelbehälter Fäkalien

Für diese Bachelorarbeit interessiert in erster Linie das Material aus der Langzeitvermietung, da wie gesagt die Idee ist, zukünftig eine Lösung für das Problem bei der Urinabtrennung zu finden und nur die Fäzes nach obig beschriebenen Verfahren zu behandeln (Laktofermentation,



Hitzekompost, Wurmkompost). Da jedoch unklar ist wie lange die Lösungsfindung dauern wird, müssen die Verfahren so konzipiert werden, dass sie für all die verschiedenen Zusammensetzungen funktionieren.

Es stellte sich auch die Frage ob alle nötigen Materialien bereits vor der Laktofermentation zugeben werden könnten, damit das gesamte Material nur einmal gemischt werden muss. Aus diesem Grund wurde das C/N- Verhältnis und die Trockensubstanz der Materialien, welche wichtige Parameter für die nachfolgende Kompostierung darstellen in einer Voranalyse bestimmt (Tabelle 2). Die drei Analysen der Langzeitsammlung aus der Geisshalde WG in Tabelle 2 veranschaulichen die Inhomogenität des Materials bereits innerhalb der ein und derselben Tonne.

Der Pferdemist in Tabelle 2 wurde analysiert weil sich in der Nähe von Kompotoi viele Pferdeställe befinden und Betracht gezogen wird der Hitzekompostierung Pferdemist zur Hitzeentwicklung beizufügen.

**Tabelle 2 C/N – Verhältnis und Trockenreste der verwendeten Materialien von Kompotoi**

Material	Corg [%]	TN [%]	C/N	TR [%]	Sammlung	Bemerkungen
Fäzes & Frauenurin + Einstreu	49.0	2.4	20.5	27.9	Langzeitsammlung WG Geisshalde. Alle drei Proben aus derselben Toilette zum selben Zeitpunkt entnommen.	
Fäzes & Frauenurin + Einstreu	50.5	2.2	22.6	31.0		
Fäzes & Frauenurin + Einstreu	51.4	3.1	16.7	25.6		
Frauenurin + Holzstreu	46.1	0.7	67.5	31.5	WM Bar 2014 Zürich	
Fäzes + Holzstreu	45.7	3.7	12.2	49.9	Langzeitvermietung für einen Garten	Hat bereits begonnen zu Kompostieren
Bokaschi	51.3	2.1	24.8	64.0		
Holzstreu	49.5	0.2	230.7	83.9		
Strohpellets	46.6	0.8	58.3			Von Schmid (2012)
Pferdemist	39.5	1.7	23.8	21.9		draussen gelagert, hat Wasser aufgesogen

### 3.2.2 Verwendete Fäkalien

Ab Versuch 1 wurden Fäkalien aus einer Komposttoilette von Kompotoi, welche im Garten unserer Wohngemeinschaft (10 Erwachsene, 4 Kinder) aufgestellt wurde, verwendet.

Gesammelt wurden nur die Fäzes und der Urin welcher bei dem Stuhlgang ausgeschieden wurde. Während einer Dauer von drei Wochen und 2 Tagen (10.8.2014 – 2.9.2014) wurde während der Sammlung alle Materialien gewogen um zu eruieren wie sich diese anteilmässig zusammensetzten. Der Fassgrund wurde vor dem ersten Stuhlgang mit Holzstreu und

Strohpellets zur Absorption des Urins gefüllt. Die Einstreu setzte sich aus Holzstreu und Bokashi im Verhältnis 1:5 bzw. 17 % Bokashi zusammen. Für das Wägen wurde eine Küchenwaage benutzt, da nichts anderes zuhanden war. Diese wies eine Genauigkeit von 0.5 g auf. Der gesamte Inhalt wog zum Ende der Sammlung 27.1 Kg. Die Materialzusammensetzung kann der Tabelle 3 entnommen werden.

**Tabelle 3 Materialzusammensetzung der Sammlung**

<b>Material</b>	<b>Anteil in % (m/m)</b>
Holzstreu	24.4
Stohpellets	5.5
Einstreu Holz	11.2
Einstreu Bokashi	2.3
Fäkalien	56.6

### **3.2.3 Verwendete Behälter**

Da die Gasentwicklung während des Prozesses der Laktofermentation erfasst werden sollte, wurden gasdichte Flaschen benötigt. Zudem mussten die Flaschen mit einem Zweiweg - Gasentlassungshahn ausgestattet sein, damit der Druck abgelesen und das Gas gesammelt werden konnte.

Da das verwendete Materialgemisch einen hohen Feststoffanteil aufwies, wurde zu Beginn angenommen, dass sich die üblichen Gasbildung GB21 -Flaschen wie bei Schmid (2011) verwendet, aufgrund des engen Flaschenhalses für diesen Versuch nicht eignen. Aus diesem Grund wurde an ein Liter PE Flaschen, welche über einen breiteren Flaschenhals verfügten, Gasentlassungshähne gebastelt (Abbildung 8). Das Volumen des Flascheninhalts wurde mit der Wassermasse und der Dichte, welche mit der gemessenen Wassertemperatur ermittelt wurde, ausgelitert. Bei der Durchführung des ersten Versuches stellte sich jedoch heraus, dass sich diese Flaschen nicht eignen, da sie sich erstens bei Druckentwicklung aufblähen und so nicht auf das genaue Gasvolumen rückgeschlossen werden kann. Zweitens befand sich am Gewinde eine Dichtigkeitsschwachstelle, wo bei einigen Flaschen ab 1 bar das Gas entwich. So konnte nie ganz sichergestellt werden, ob die gesamte Gasbildung erfasst wurde. Aus diesem Grund wurde ab dem 2. Versuch gläserne GB21- Flaschen verwendet (Abbildung 8 & 7). Mit einem Trichter und einem Polylöffel zum Stopfen, gelang es trotzdem recht gut das Material durch den engen Flaschenhals zu befördern. Die Volumenangaben der GB21- Flascheninhalte standen im Vornherein zur Verfügung da sie bereits von der Fachstelle Umweltbiotechnologie des IBT eruiert wurden.



Abbildung 7 Photo der Ansätze von Versuch 4 in GB21 Flaschen



Abbildung 8 Photo der Ansätze des Vorversuchs in den selbst gebastelten Flaschen

### 3.2.4 Bokashi

Das verwendete Bokashi in der Einstreu, „Terra Preta Bokashi“ wurde von EM Schweiz AG (Ebnetwies 9, 9502 Braunau TG) hergestellt und bezogen. Es handelt sich dabei um eine mit EM und Zuckerrohrmelasse fermentierte Mischung aus Weizenkleie, Holzkohle und EM SuperCera®C Keramik-Pulver.

### 3.2.5 Zuckerrübenmelasse

Die Zuckerrübenmelasse wurde von der Landor AG (Landi) bezogen.

Obwohl Yemaneh et al. (2012) und EM Schweiz mit Zuckerrohrmelasse arbeiten, wurde für diesen Versuch die einheimisch produzierte Zuckerrübenmelasse verwendet. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Kompotoi die Zuckerrohrmelasse aufgrund des weiten Transportweges aus den Tropen möglichst nicht verwenden möchte.

### 3.2.6 EM (Effektive Mikroorganismen)

Anstelle von reinen Milchsäurebakterienkulturen wird in dieser Arbeit mit sogenannten „Effektiven Mikroorganismen“ gearbeitet. Bei EM handelt es sich um eine Kombination von verschiedenen Mikroorganismen, welche in Symbiose miteinander leben. Aufgrund ihrer starken antioxidierenden Wirkung fördern sie die positive Mikrobiologie in Boden, Pflanze, Wasser, Tier und Mensch. Sie setzen sich u.a. aus Milchsäurebakterien, Hefen, Photosynthesebakterien und Aktinomyzeten zusammen. (Rackl, 2006)

Da Kompotoi die Infrastruktur fehlt, um mit reinen Bakterienstämmen zu arbeiten, bietet sich mit EM eine praktische Alternative an. Diese können ohne grosse Infrastruktur, kostengünstig selbst vermehrt werden.

Für die Versuche dieser Arbeit wurde EM Silo-Fit verwendet. Kompotoi arbeitet hingegen mit EM 1 und Yemaneh et al. (2012) verwendete EM – a (mit Zuckerrohrmelasse aktivierte Form von EM 1). Bei beiden EM Mischungen handelt es sich um Mikroorganismenkulturen, welche mit Zuckerrohrmelasse und Wasser fermentiert wurden und einen pH unter 3.8 aufweisen.

Das EM Silo – Fit wird als Hilfsmittel bei der Silage eingesetzt um den Prozess zu fördern und zu beschleunigen. Dementsprechend beinhaltet EM Silo-Fit eine über zehn Mal höhere Konzentration MSB, als auch weniger *S. cerevisiae* und *R. palustris* als EM 1 (Tabelle 4). Bei EM 1 handelt es sich um die sogenannte EM –Urlösung. Aufgrund der höheren MSB Konzentration von EM Silo-Fit erhoffte ich mir bei gleichbleibender Mengzugabe eine schnellere und höhere pH Senkung verglichen zu EM 1. Den Zusammenhang zwischen höherer Anzahl MSB und schnellerer pH – Senkung wurde von Schmid (2012) nachgewiesen (siehe auch Kapitel 2.4.1). EM muss kühl gelagert werden. Zudem sollte EM Silo-Fit im speziellen keinen hohen Temperaturschwankungen ausgesetzt werden. (EM Schweiz, kein Datum)

Sowohl EM Silo-Fit als auch EM 1 wurde von der EM Schweiz AG bestellt.

**Tabelle 4 Mikroorganismen in EM Silo-Fit und EM 1 nach Produktanschrift und McDonald (1991) und Madigan et al., 2013**

Mikroorganismen	Metabolismus	Silo-Fit KBE/ml	EM 1 KBE/ml
<i>Lactobacillus casei</i>	homofermentative Milchsäuregärung	1.2 E+07	1.3 E+07
<i>Lactobacillus plantarum</i>	homofermentative Milchsäuregärung	1.3 E+08	
<i>Saccharomyces cerevisiae</i> (Backhefe)	.	3.3 E+05	3.3 E+04
<i>Rhodopseudomonas palustris</i>		1.6 E+02	1.6 E+04

### 3.3 Chemische und physikalische Analysen

#### 3.3.1 pH-Messung

Die pH-Messung wurde mit einer 0.01 M CaCl<sub>2</sub> – Extraktion nach der Referenzmethode von Agroscope für Recyclingdünger durchgeführt (ART/ACW, 2012). Einzig die Probemenge wich von der SOP ab. So wurde anstelle von 50 g Probe (FS) und 500 ml CaCl<sub>2</sub>- Lösung, jeweils 5 g Probe (FS) und 50 ml CaCl<sub>2</sub>- Lösung verwendet. Dabei wurde zuerst die Fäkalien in ein 50 ml Falcon-Tube gegeben und anschliessend mit einer 50 ml Pipette die CaCl<sub>2</sub>- Lösung zugegeben. Daraufhin wurden die Proben während einer Stunde bei 110 U/Minute auf einem Schüttler der

Marke Edmund Bühler geschüttelt und zum Schluss der pH mit der Multisonde von Hach Lange gemessen. Die 5 g Fäkalien wurden jeweils von ganz oben des Substrates entnommen.

### 3.3.2 Gasbildung

Um die Gasbildung zu eruieren wurde möglichst täglich den gebildeten Druck mit einem Manometer LEO 2 von Keller abgelesen und anschliessend abgelassen. Da die Flaschen für die pH – Messung jeweils geöffnet werden mussten, wurden die Flaschen danach zwei Mal mit gasförmigen N<sub>2</sub> bis knapp über 1 bar geflutet um den Sauerstoff wieder zu entfernen. Die entstandene Menge an Gas wurde mithilfe der Kombination der Gesetze von Gay-Lussac und Amonton berechnet und bei Normbedingung (0 °C, 1013 mbar) angegeben (Abbildung 9).

$$\text{Normvolumen [ml]} = \frac{\text{Kopfvolumen [ml]} \times 273\text{K} \times \text{Druckrohrwerte [mbar]}}{\text{Versuchstemperatur [K]} \times 1013 \text{ mbar}}$$

Abbildung 9 Formel zur Berechnung des entstandenen Gasvolumens bei Normbedingungen (0 °C, 1013 mbar)

Da die Fäkalien eine feste Konsistenz mit Porenvolumen aufwiesen, war es nicht ganz einfach das Gasvolumen in der Gasflasche zu eruieren. Als erstes wurde versucht, das Material zu stopfen, die Obergrenze zu markieren und zum Schluss das Volumen durch das Auffüllen mit Wasser bis zur Marke zu eruieren. Dies ergab jedoch keine plausiblen Daten, da das Stopfen in den Flaschen mit den engen Hälsen nicht einheitlich durchgeführt werden konnte. So wurde um das Volumen zu eruieren die Dichte der einzelnen Materialien (Fäkalien, Melasse, EM,) bestimmt und aufgrund der bekannten Masse das Volumen berechnet. Um die Dichte der Fäkalien zu bestimmen, wurde eine bestimmte Masse an Fäkalien in einen Messzylinder gegeben, ein vordefiniertes Volumen Wasser beigefügt, gewartet bis sich beide gut vermischt hatten und daraufhin das Volumen abgelesen. Bei den Versuchen mit Festsubstanz wurde für die pH – Messung jeweils 5 g entnommen. Das Volumen dieser 5 g wurde in der Berechnung des Gasvolumens jeweils dazugerechnet. Zudem wurde die jeweilige Temperatur zum Zeitpunkt der Messung in der Formel berücksichtigt.

### 3.3.3 Gaszusammensetzung

Um einen Ansatzpunkt zu haben was für Gasbildungsprozesse während dem Versuch ablaufen, wurde das Gas in 3 Liter SKG-Gassäcke gesammelt und mit dem Mehrgas – Messgerät Dräger X-am 7000 von Dräger die Konzentrationen von CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>S gemessen. Dazu wurde ein Mindestgasvolumen von ca. einem Liter benötigt. Um genügend Gas für die Analyse zu gewinnen und weil die Anzahl der verfügbaren Gassäcke begrenzt war, wurde das Gas pro Versuchsansatz in jeweils einem Gassack kombiniert.

### **3.3.4 Trockenrest**

Die Proben wurden bei 105 °C in einem Trockenschrank bis zur Gleichgewichtskonstante getrocknet (Dauer 7-10 Tage). Das Gewicht wurde jeweils mit einer Milligramm genauen Waage von Sartorius M-Power gewogen. (Fachstelle Bodenökologie, 2013a)

### **3.3.5 Organischer Trockenrest**

Zur Bestimmung des organischen Trockenrestes wurden die getrockneten Proben auf 2 mm gesiebt. Daraufhin wurden sie mit Ethanol benetzt, abgeflammt und in einem Muffelofen bei 550 °C während drei Stunden verglüht. (Fachstelle Bodenökologie, 2013a)

### **3.3.6 Raumtemperatur**

Zur Erfassung der Umgebungstemperatur während den Versuchen wurde mit 2 Termochron iButtons Temperaturloggern von Maxim Integrated im 1 h Rhythmus die Temperatur aufgezeichnet. Die Logger wurden an der Innenseite der Plastikbehälter in welchen die Proben gelagert wurden, befestigt. Die beiden Temperaturlogger wiesen maximal einen Temperaturunterschied von 0.5 °C auf, woraus der Mittelwert verwendet wurde.

### **3.3.7 C/N - Verhältnis**

Für die Voranalyse (Tabelle 2) wurde für jede Stichprobe sowohl für den organischen Kohlenstoff als auch den totalen Stickstoff eine Doppelbestimmung durchgeführt und für die Berechnungen den Mittelwert beider Messungen verwendet. Die Proben wurden vorgängig getrocknet (Kapitel 3.3.4). Zur Probenvorbereitung wurde von allen Proben ca. 5 g mit der Schwingmühle von Retsch 5 Minuten zu Pulver gemahlen. Daraufhin wurden die Proben auf 0.10 g genau eingewogen und mit dem TruSpec CNH Macro Analyser von der Firma Leco gemessen. Die Bestimmung des Corg erfolgte bei einer Temperatur von 550 °C und die des TN bei 950 °C. Aus den beiden Messungen wurde das C/N- Verhältnis berechnet (Fachstelle Bodenökologie, 2013c)

## 4 Resultate

### 4.1 Vorversuch

#### 4.1.1 Zielsetzung und Fragestellung

Das Ziel des Vorversuches war es herauszufinden, ob die Laktofermentation von Fäkalien mit 10% EM und 10% Melasse gemäss Yemaneh et al. (2012) auch für die hier verwendete Zusammensetzung der Fäkalien grundsätzlich funktionieren würde. Zudem sollten die Resultate dieses Versuches als Grundlage für die darauffolgenden Versuche dienen. Gleichzeitig sollte verifiziert werden, ob sich die gewählte Methodik bewährt.

#### Fragestellung

1. Wird der für die Stabilisierung notwendige kritische pH-Wert mit den gewählten Konzentrationen von EM und Melasse erreicht?
2. Wie lange dauert die pH-Absenkung?
3. Kann nach der zu erwartenden hohen Gasbildung der ersten Tage die Gasbildung im Vergleich zur Referenz unterschritten werden?

#### 4.1.2 Material und Methode

#### Versuchsübersicht

Für diesen Versuch wurden zwei Ansätze für eine Dauer von acht Tagen angesetzt (10.8.2014-18.8.2014). Der Versuchsaufbau kann der Tabelle 5 entnommen werden.

**Tabelle 5 Versuchsübersicht des Vorversuches (absolute Mengenangaben sind dem Anhang I zu entnehmen)**

	Referenz	10% M; 10% EM
Fäkalien in %(m/m)	100	100
*EM Silo-Fit in %(m/m)		10
Zuckerrübenmelasse in % (m/m)	0	10
Wiederholungen	2	2

\*Die 10 % EM entsprechen einer MSB-Zugabe von insgesamt  $1.42 \text{ E}+07 \text{ KbE /g Fäkalien}$ .

#### Fäkalien

Die Fäkalien stammten aus der Komposttoilette der Wohngemeinschaft Geisshalde in Meilen. Das Material setzte sich aus Frauenurin, Urin welcher während dem Stuhlgang entlassen wird, Fäzes und Einstreu zusammen (siehe auch Kapitel 3.2.1). Es handelte sich um eine

Langzeitsammlung, die Zeitspanne über welche das Material gesammelt wurde war jedoch nicht bekannt. Das Material wies einen Trockenrest von 25-31 % auf (Tabelle 2).

### EM Silo-Fit

Das EM wurde bis zum Versuchsstart in einem Kühlraum bei 3-11 C° gelagert.

### Gasbildung

Die Messung des Gasvolumens wurde gemäss Kapitel 3.3.2 durchgeführt. Da die verwendeten Flaschen jedoch vor der Bestimmung des Flaschenvolumens im Autoklav schmolzen, wurde zur Berechnung der Mittelwert der Volumen der restlichen selbstgebastelten Flaschen verwendet.

### Gaszusammensetzung

Da die Versuchsreihe der „Referenz“ für die Messung ein zu geringes Gasvolumen entwickelte, konnte die Gaszusammensetzung nicht bestimmt werden. Das Gas wurde bis zum achten Tag gesammelt.

### 4.1.3 Resultate

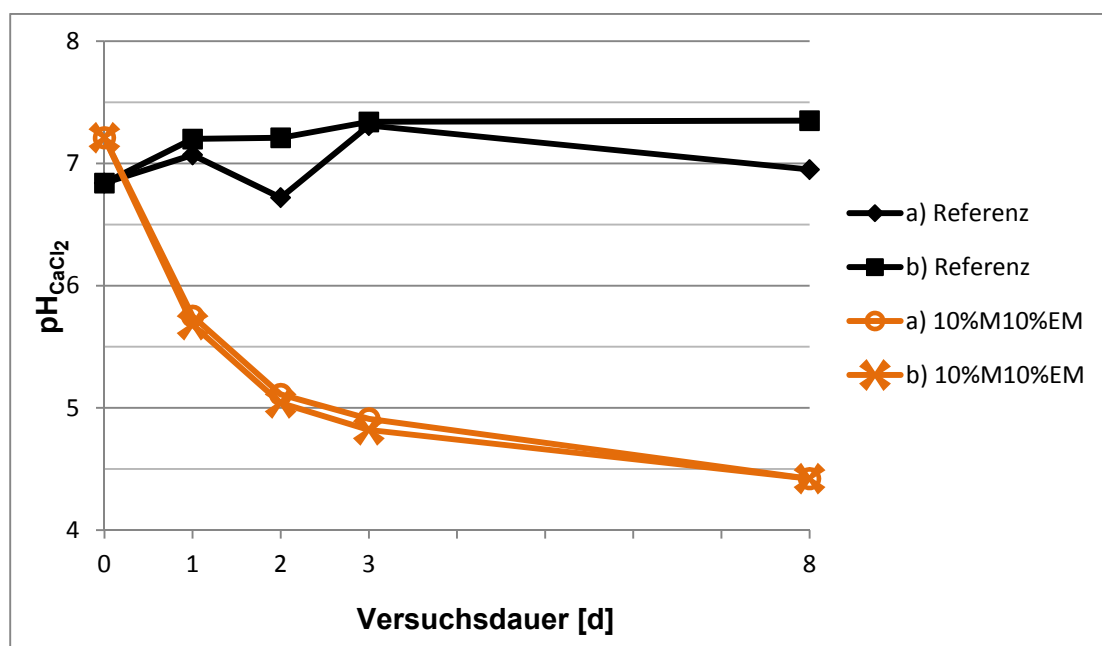


Abbildung 10 pH-Verlauf des Vorversuches

Wie der Abbildung 10 entnommen werden kann, sank der pH durch die Zugabe von 10% Melasse und 10% EM bei beiden Ansätzen innerhalb von acht Tagen von 7.2 auf 4.4. Die höchste Senkung war dabei in den ersten drei Tagen zu verzeichnen. Der pH-Wert der Referenz verharrte hingegen um 7.



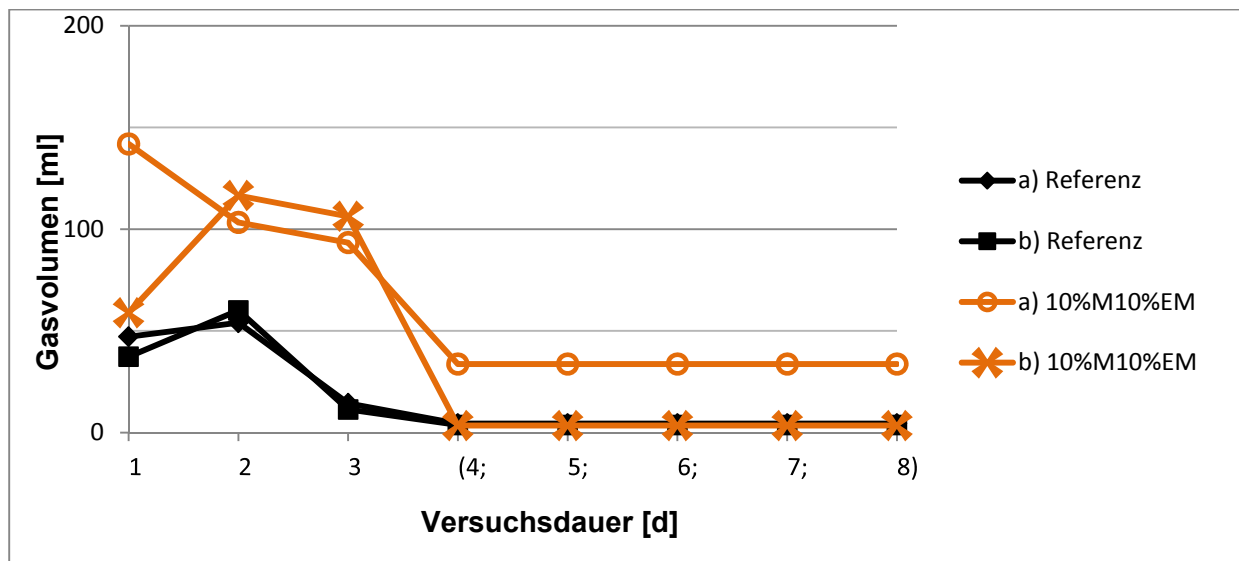


Abbildung 11 Verlauf der Gasentwicklung von jeweils 300 g Fäkalien (Frischgewicht) und den jeweiligen Zugaben (EM, Melasse) des Vorversuchs. Die Ziffern innerhalb der Klammer der horizontalen Achsenbeschriftung bedeuten, dass es sich um Mittelwerte über die jeweiligen Tage handelt

Sowohl bei der Referenz als auch bei dem Ansatz „10%M 10% EM“ fand innerhalb der drei ersten Tagen die grösste Gasbildung statt. Verglichen mit der Referenz entwickelt dabei der Ansatz „10%M 10% EM“ ca. doppelt so viel Gas. Über die folgenden Tage reduzierte sich die Gasbildung der Referenz und der Wiederholung b) des Ansatzes „10%M 10% EM“ auf ca. 4 ml/Tag. Die entsprechende Wiederholung a) lag bei 33 ml/Tag (Abbildung 11).

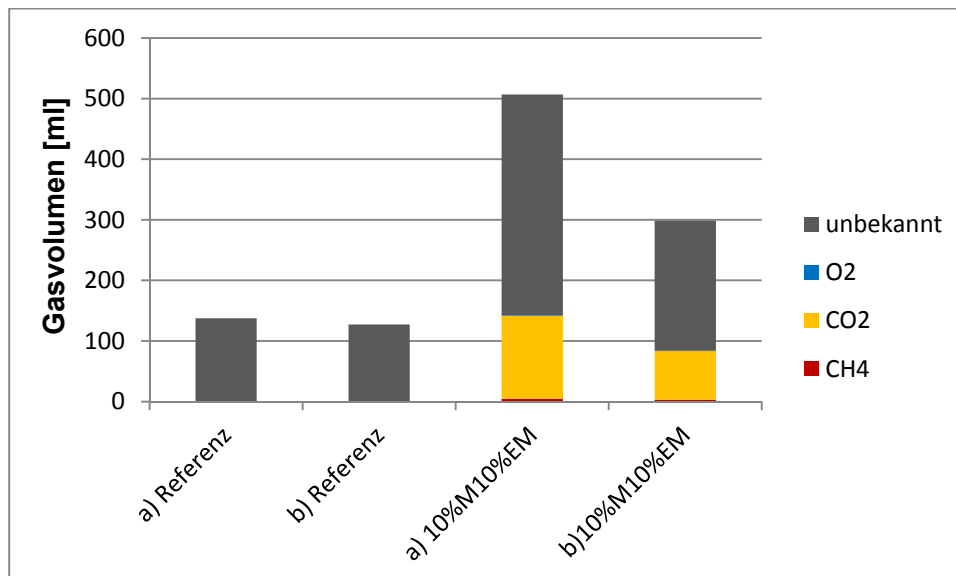


Abbildung 12 Gesamter Gasverlust innerhalb der 8 Tagen und die Gaszusammensetzung nach Vol.-%

Abbildung 12 zeigt, dass der Ansatz „10%M 10% EM“ verglichen mit der Referenz mindestens einen doppelt so hohen Gasverlust aufweist. Zudem ist erkennbar, dass die Wiederholung a) des Ansatzes „10%M 10% EM“ um den Faktor 1.5 mehr Gas entwickelt hat als die

entsprechende Wiederholung b). Bei Ansatz „10%M 10% EM“ wurde anteilmässig am meisten CO<sub>2</sub> gebildet. Die Gasanteile von Methan und Sauerstoff machten jeweils weniger als 1 Volumenprozent aus. Es wurden zudem 11 ppm Schwefelwasserstoff gebildet, welcher aufgrund der geringen Menge im Diagramm nicht dargestellt werden konnten.

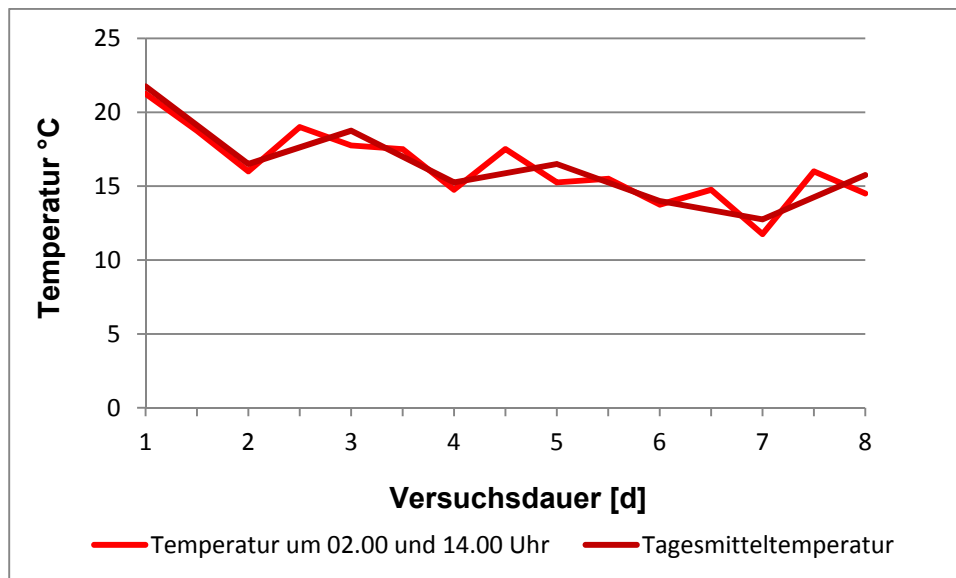


Abbildung 13 Temperaturverlauf während dem Vorversuch

Die Temperatur im Versuchsraum sank während der Versuchsdauer relativ gleichmässig von 21.25 °C auf 15.75 °C. Zudem war eine Temperaturschwankung von den Tages- zu den Nachttemperaturen feststellbar. Der maximale und minimale Temperaturwert während der gesamten Versuchsdauer betrug 24.5 °C bzw. 10.5 °C und der Mittelwert 16.4 °C (Abbildung 13).

#### 4.1.4 Diskussion

Der erreichte pH-Wert von 4.4 liegt im Bereich des kritischen pH von 4.35 und 4.45 (TM nach Kapitel 3.2.1). Jedoch ist in der Literatur nicht erwähnt ob der pH mit CaCl<sub>2</sub>- oder H<sub>2</sub>O Extraktionsmethode angegeben wird. Denn der pH-Wert der mit der hier angewendeten CaCl<sub>2</sub>-Extraktionsmethode kann im Vergleich zu der Wasserextraktionsmethode 0.3-0.8 pH Werte tiefer liegen (Fachstelle Bodenökologie, 2013b). Laut Galler (2011) wird der pH von Silagen mithilfe von Spezialindikatorpapier gemessen, weshalb angenommen werden kann, dass der hier gemessene pH eigentlich einen höheren Wert hätte, wenn er mit den Angaben der Silageliteratur verglichen wird. Aus diesem Grund war die pH-Senkung möglicherweise doch nicht genug stark um die Clostridien vollständig zu hemmen, was auch die Gasbildung nach der pH-Absenkung des fermentierten Ansatzes erklären würde.

Die Menge an Melasse von 10% (m/m) und an MSB 10 % (m/m) scheint jedoch genügend hoch zu sein, damit eine Milchsäureproduktion stattfinden kann. Dies wird aus dem pH-Wert von <4.5 geschlossen, welcher die für die Essigsäuregärung verantwortlichen Enterobakterien hemmt und ab welcher vorwiegend Milchsäure gebildet wird (Bischofsberger et al., 2005; Gross & Riebe, 1974). Andernfalls hätte wahrscheinlich als Folge zu geringer Zuckermengen eine reine Essigsäuregärung stattgefunden (Bischofsberger et al., 2005). Dabei hätte sich der pH vermutlich bei 5 oder mehr eingependelt. Gemäss den Resultaten von Krüger & Scheinemann (2010) und Schmid (2012) war dies der Fall, wenn Essigsäure den grössten Anteil an flüchtigen Fettsäuren ausmachte. .

Je höher der TR ist, desto langsamer verläuft die pH-Absenkung, da die MSB durch den erhöhten osmotischen Druck gehemmt werden (Weissenbach, 2002). Dies erklärt auch die schnelle pH-Senkung innerhalb eines Tages bei der Laktofermentation von Fischgülle (Schmid, 2012), welche einen viel tieferen TR von 5-15% aufwies.

Die Zeitdauer für die pH – Senkung konnte nicht bestimmt werden, da diese innerhalb der acht Tage nicht zwingend abgeschlossen sein muss und sich möglicherweise noch weiter gesenkt hätte. Es hätte jedoch auch aufgrund unzureichender Hemmung der Clostridien eine sekundäre Gärung unter Bildung von Butter – und/ oder Propionsäure und ein daraus resultierender pH Anstieg einsetzen können.

Die Gasbildung war bei den fermentierenden Ansätzen wie erwartet zu Beginn aufgrund der Melassezugabe höher als bei der Referenz. Während sich der Ansatz b) „10%M 10% EM“ zum Schluss bei einem Gasverlust ähnlich der Referenz einpendelte, produzierte der Ansatz a) in den letzten Tage 10 Mal mehr Gas. Die unterschiedliche Gasmengenbildung der fermentierten Ansätze kann möglicherweise auf Unterschiede der Ausgangsmaterialien zurückgeführt werden.

Die Reduktion der Gasbildung nach Tag 3 ist vermutlich nicht einzig auf die pH-Absenkung zurückzuführen. Derselbe Effekt ist auch bei der Referenz mit stabilem pH beobachtbar und hängt vermutlich mit der Temperatursenkung während dem Versuch zusammen. Die Temperatur liegt mit einem Mittelwert von 16.4 °C im Wachstumsbereich der MSB (14°C - 45°C), wird jedoch einzeln auch unterschritten und befindet sich eher an der unteren Grenze für eine optimale Entwicklung der MSB.

Bei dem produzierten Gas handelt es sich mit grosser Wahrscheinlichkeit fast ausschliesslich um CO<sub>2</sub>, welches in der Abbildung mit 26 Vol.-% angegeben ist. Das undefinierte Restgas setzt

sich vermutlich fast nur aus Stickstoff zusammen, welches zur Sauerstoffentfernung ins System eingespiessen wurde (Abbildung 12). Das CO<sub>2</sub> dürfte vorwiegend aus der ersten Versuchsphase stammen und von aeroben Mikroorganismen, welche den Startsaurestoff veratmet haben, verursacht worden sein. Der Rest an Sauerstoff, welcher in der Gasphase nachgewiesen werden konnte, belegt, dass zumindest zu Beginn Sauerstoff im System vorhanden war. Die CO<sub>2</sub>-Produktion nach dem Sauerstoffverbrauch ist vorwiegend auf die Aktivität von Enterobakterien und Clostridien zurückzuführen (Muck, 2010).

#### **4.1.5 Fazit**

Grundsätzlich können die Fäkalien aus Kompotol-Toiletten mit EM Silo-Fit und Melasse laktofermentiert werden. Der kritische pH-Wert wurde jedoch wahrscheinlich nicht ganz erreicht. Auch war die Gasbildung des laktofermentierten Ansatzes nicht tiefer als jener der Referenz. Zudem kann noch nichts über die Dauerhaftigkeit der pH-Senkung ausgesagt werden. Dazu müsste die LF über einen längeren Zeitraum beobachtet werden. Eine längere Versuchsdauer ist aber auch nötig, damit beurteilt werden kann, ob eine Langzeitstabilisierung erfolgreich erzielt werden kann. Weiter gilt es noch herauszufinden, ob durch Variation der Mengenzugabe von Melasse und EM der pH-Wert noch weiter gesenkt und somit auch die Gasbildung minimiert werden kann. Die verwendete Messmethodik hat funktioniert und kann auch weiter angewendet werden.

## 4.2 VERSUCH 1 – Einfluss von Kohle, Steinmehl und Melasse

### 4.2.1 Zielsetzung und Fragestellung

Aufgrund der Resultate von Schmid (2012), bei welchem hohe Zuckerkonzentrationen zu massiven Gasbildung führten, wurde angenommen, dass bei geringerer Melassezugabe als beim Vorversuch die Gasbildung minimiert werden kann. Gleichzeitig sollte untersucht werden, welchen Einfluss die Zugabe von Pflanzenkohle und Steinmehl auf die Laktofermentation haben. Sollte sich ergeben, dass diese beiden Komponenten den LF- Vorgang nicht negativ beeinflussen, hätte dies den Vorteil, dass mit dem EM und der Melasse bereits alle nötigen Zutaten für eine Terra Preta Erde in einem Arbeitsschritt gemischt werden könnten.

#### Fragestellung

1. Bei welchen Ansätzen wird der für eine Stabilisierung notwendige kritische pH erreicht?
2. Mit welcher Kombination, welche den kritischen pH-Wert erreicht, entsteht die geringste Gasbildung?
3. Wird der kritische pH-Wert auch bei Zugabe von Steinmehl und Pflanzenkohle erreicht?

### 4.2.2 Material und Methode

#### Versuchsübersicht

Die geplante Versuchsdauer dieses Versuches betrug drei Wochen und startete am 2.9.2014. Die Zusammensetzung der Versuchsreihen kann der Tabelle 6 entnommen werden. Anhand der Ansätze mit 7.5 % Melasse sollte die Wirkung von Steinmehl, Pflanzenkohle sowie deren Kombination eruiert werden. Bei den Ansätzen mit 5% und 2.5% wurden die beiden Zusätze nur in Kombination zugegeben, da die Mischung aller Zutaten ohnehin nur durchgeführt werden könnte, wenn die beiden Materialien in Kombination die pH-Senkung nicht beeinträchtigen würden.

**Tabelle 6 Versuchsübersicht von Versuch 1 (Absolute Mengenangaben sind dem Anhang II zu entnehmen)**

	Referenz	5% M	7.5 % M	10% M	15% M
<b>Fäkalien in % (m/m)</b>	100	100	100	100	100
<b>EM Silo-Fit in %(m/m)</b>	57	57	57	57	57
<b>Zuckerrübenmelasse in % (m/m)</b>	0	5	7.5	10	15
<b>Wiederholungen</b>	2	2	2	2	2

\*Die 10 % EM entsprechen einer MSB-Zugabe von insgesamt 1.42 E+07 KbE /g Fäkalien

### **Fäkalien**

Die Fäkalien wurden innerhalb von 23 Tagen (10.8.2014 – 2.9.2014) gemäss Kapitel 3.2.2 gesammelt. Es befanden sich auffallend viele Maden in den Fäkalien.

### **EM Silo-Fit**

Das EM Silo-Fit wurde bis zu Versuchsbeginn bei 15 °C gelagert.

### **Pflanzenkohle**

Die bei Versuch 1 verwendete Pflanzenkohle stammte von der Verora GmbH (Edlibach ZG). Die Kohle wird aus sauberem Strauch – und Baumschnitt hergestellt, welches in einem PYREG® -Ofen bei 500-600°C pyrolysiert wird. Der Durchmesser der Kohle liegt bei < 20 mm. (Verora, kein Datum). Der pH – Wert der Kohle befindet sich gemäss den jährlichen Analysen der Kohle von 2012-2014 zwischen 8.4 und 11.6 (Anhang VIII).

### **Steinmehl**

Als Steinmehl wurde BIO-LIT® von der Landor AG (Landi) verwendet. Es handelt sich dabei um Diabas-Steinmehl vulkanischen Ursprungs, welches fein gemahlen wurde (95 % der Korngrösse unter 0.09 mm) und eine spezifische Oberfläche grösser als 2500 m<sup>2</sup>/kg aufweist. Im Anschluss an das Mahlen wird das Steinmehl mithilfe eines Sprühtrocknungsverfahren mit nützlichen Mikroorganismen besprüht, welche nach Kontakt mit einer feuchten Umgebung aktiviert werden. Die Silikate des Steinmehls fördern die Stabilisierung von Bodenkrümel und die Mikroorganismen beeinflussen die Bodenflora positiv. Die Inhaltsstoffe von BIO\_LIT können der Tabelle 7 entnommen werden.

**Tabelle 7 Gehalt von BIO-LIT® gemäss Produktanschrift**

Kieselsäure SiO <sub>2</sub>	49.71%
Kalium K <sub>2</sub> O	2.22%
Kalzium CAO	1.68%
Magnesium Mg	2.50%
Natrium Na	3.72%
Bor, Molybdän, Mn, Zn, Cu	In Spuren

### 4.2.3 Resultate

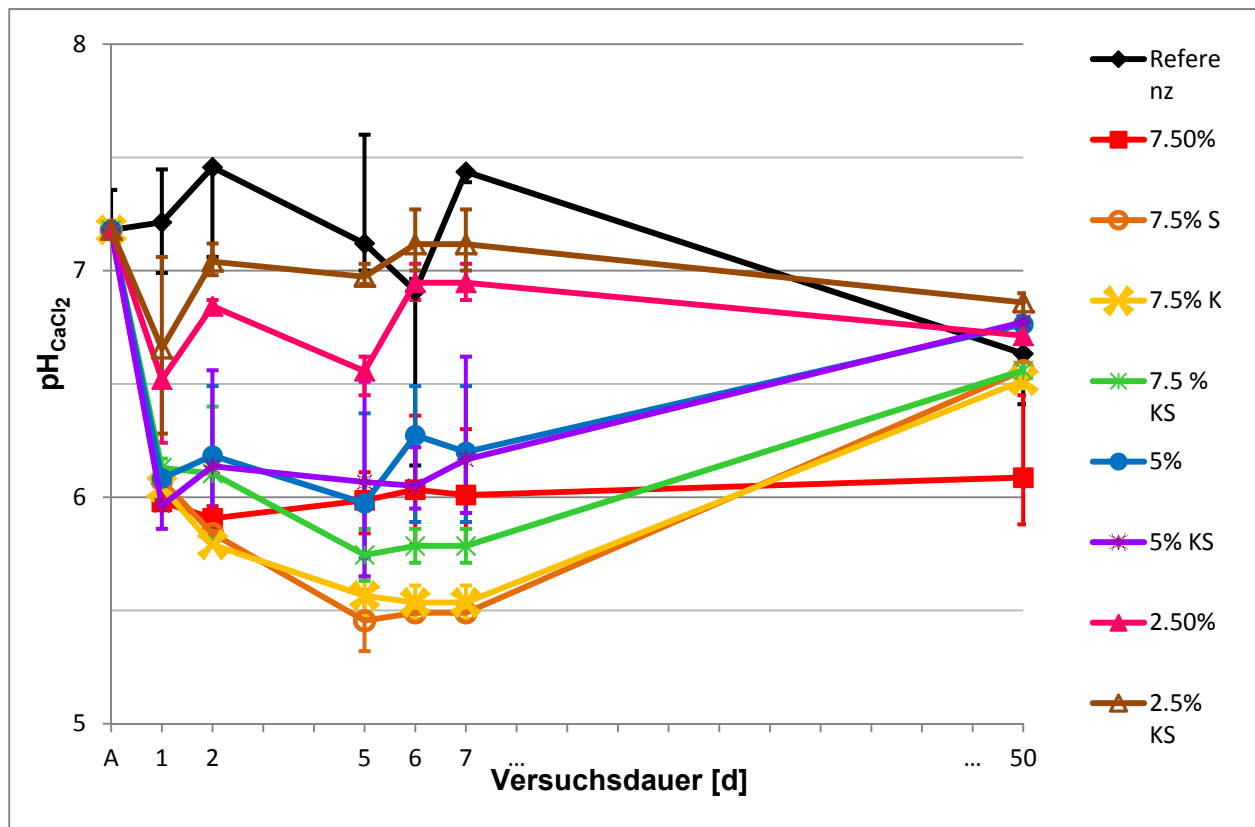


Abbildung 14 Mittelwerte mit Minimum -und Maximumbalken des pH-Verlaufs von Versuches 1. (Das Zeitintervall zwischen Tag 7 und 50 beträgt nur 10 Zeiteinheiten und entspricht somit nicht dem zeitlichen Verlauf)

In Abbildung 14 ist erkennbar, dass die Versuche innerhalb der Ansätze inhomogen verlaufen sind. Von Tag 5 bis Tag 7 war zudem bei allen Ansätze eine Stagnation oder sogar eine Erhöhung des pH – Wertes feststellbar. Allgemein zeichnete sich keine konstante pH-Senkung vergleichbar zu dem Vorversuch ab. Aus diesen Gründen wurde der Versuch ab Tag 7 abgebrochen und es wurden keine weiteren Messungen durchgeführt, die Flaschen jedoch stehen gelassen. Zur Kontrolle wurde der pH – Wert nach 50 Tagen nochmals gemessen, wobei sich der pH bei allen Versuchen bei ca. 6.8 eingependelt hat. Bei den Ansätzen mit 2.5% Melasse hatte sich der pH so gut wie nicht gesenkt. In den Versuchen mit 5% Melasse konnte der pH-Wert immerhin um 0.5 bis 1 reduziert werden. Die tiefsten pH-Werte erreichten die Ansätze mit einer 7.5 %igen Melassezugabe bis maximal pH 5.5. Interessant war, dass bei den Ansätzen mit 7.5% Prozent Melasse durch die Zugabe von Steinmehl und Kohle ein tieferer pH-Wert erreicht werden konnte im Vergleich zu alleiniger Zugabe von Melasse. Durch die Animpfung der Referenz mit 10% EM konnte keine pH- Senkung erzielt werden.

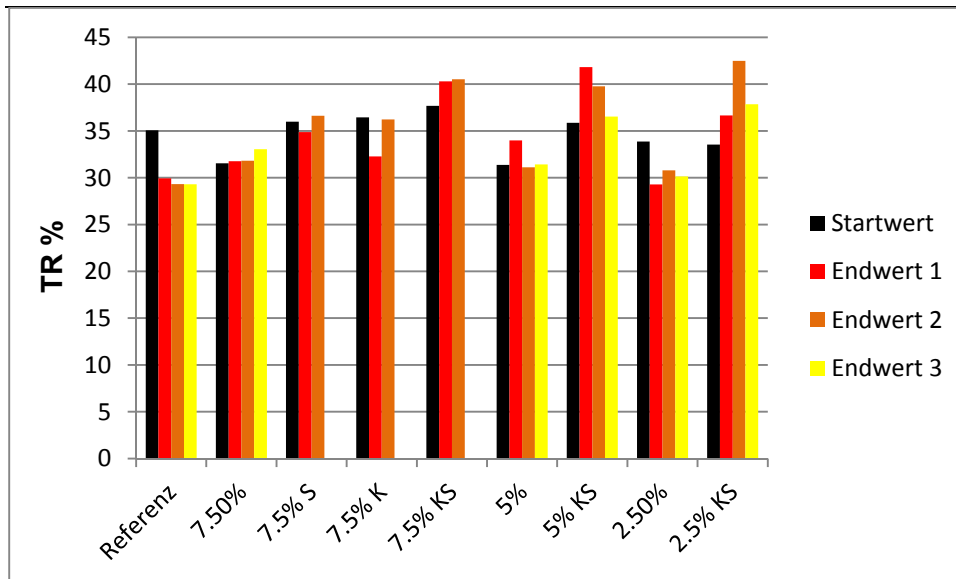


Abbildung 15 Trockenreste von Versuch 1 (Startwert; t<sub>0</sub>. Endwert; t<sub>50</sub>)

Der Startwert des TR bewegte sich zwischen 30 und 35%. Bei den Versuchsreihen, wo Kohle und Steinmehl zugegeben wurde, stieg der TR tendenziell an während er bei den „Referenz“- und „2.5%“-Ansätzen eher abnahm. Bei den übrigen Ansätzen veränderte sich der TR – Gehalt kaum (Abbildung 15).

### Temperatur

Der Mittelwert der Temperatur während der ersten sieben Tage betrug 18.75 °C. Die minimale Temperatur lag bei 14 °C und die Maximale, bedingt durch den Transfer der Proben in einen besonnten Folientunnel zur pH-Messung, bei 24.5°C.

### Qualitative Resultate

Die Maden und andere Insekten waren bereits nach einem Tag alle tot. Diejenigen Reihen, welche Kohle beinhalten, stanken kaum. Alle anderen Proben rochen hingegen stark nach Fäkalien.

### 4.2.4 Diskussion

Bei keinem der Ansätze konnte der kritische pH-Wert erreicht werden. Zu Beginn wurde angenommen, dass aufgrund der fehlenden pH-Absenkung etwas mit den MSB nicht stimmte. So wurde spekuliert, ob die MSB durch die UV-Strahlen der Sonne, welchen sie während der Versuchsmischung für einige Stunden in einem offenen Behälter ausgesetzt waren, teilweise abgetötet wurden. Wahrscheinlicher ist jedoch, dass die gewählte Melassekonzentration von 7.5% und weniger zu gering war. So wird auch von verschiedenen Autoren erwähnt, dass die Chance auf eine Fehlgärung bei einem Mangel an leichtverfügbarem Zucker erhöht wird, da



---

den MSB die leichtverfügbaren Zuckerquellen zur Milchsäuregärung fehlt (Wilkinson, 2005; Gross & Riebe, 1974).

Yemaneh et al. (2012) konnte bei einem Melasseanteil von 5% bei der LF reiner Fäzes ebenfalls einen pH-Anstieg ab ca. dem 4.Tag feststellen. Hingegen stellte sich bei der LF von Fischgülle ein Zuckeranteil von 2.5 % als optimale Zuckerkonzentration heraus, was ca. 5% Melasse entspricht (Schmid 2012). Daraus lässt sich ableiten, dass die menschlichen Fäkalien im Vergleich zu Fischgülle eine höhere Pufferkapazität aufzuweisen. An zu tiefen Temperaturen kann das Scheitern der LF kaum gelegen haben, da diese relativ stabil waren und im Durchschnitt zum Vorversuch sogar um 2 °C höher lagen.

Dass die Pflanzenkohle einen guten Geruchsneutralisierer darstellt, konnte in diesem Versuch bestätigt werden. Aus diesem Grund wäre es auch von grossem Vorteil wenn die Kohle bereits bei der Sammlung zugegeben werden könnte. Ein weiterer Vorteil der Kohlezugabe während der LF stellt die von Yemaneh et al. (2012) erwähnte schnellere Stabilisierung des Substrates bei darauffolgender Wurmkompostierung dar.

Anhand der Resultate der „7.5% M“-Ansätze lässt sich vermuten, dass Pflanzenkohle die pH-Absenkung nicht negativ beeinflusst (Abbildung 14). Aufgrund des hohen pH-Wertes der Pflanzenkohle, welche i.d.R. mit einer hohen Kationenaustauschkapazität einhergeht (Lehmann, 2007) wäre jedoch anzunehmen, dass die Pufferkapazität signifikant erhöht wird. Dem widersprechen jedoch die Resultate von Yemaneh et al. (2012), welcher bei einer Zugabe von 10% Pflanzenkohle während der LF von Fäzes nur einen geringen Anstieg des End pH-Wertes von 3.92 auf 4.05 feststellen konnte. In seiner Studie fehlen jedoch Angaben zu den Eigenschaften der verwendeten Kohle.

#### **4.2.5 Fazit**

Die Fragestellungen welche zu Beginn des Versuches gestellt wurden, konnten nicht beantwortet werden. Der Zeitpunkt zur Untersuchung über die Wirkung der Kohle und des Steinmehles war zu früh gewählt. In weiteren Versuchen muss dazu zuerst untersucht werden mit welchen EM- und Melassekonzentrationen der kritische pH-Wert mit der geringst möglichen Gasbildung erzielt werden kann.

### 4.3 VERSUCH 2 – Ermittlung der optimalen Melassekonzentration

#### 4.3.1 Fragestellung

1. Bei welcher Melassekonzentration wird der kritische pH-Wert erreicht und gleichzeitig der geringste Gasverlust erzielt?

#### 4.3.2 Material und Methoden

##### Versuchsübersicht

Die Zusammensetzung der Ansätze können der Tabelle 8 entnommen werden. Die Versuchsdauer betrug drei Wochen (22.09.2014-13.10.2014). Um die Temperatur zu erhöhen wurde dieser Versuch in einem Folientunnel durchgeführt. Um auszuschliessen, dass die Anzahl der MSB einen limitierenden Faktor darstellen, wurde so viel EM Silo-fit zugegeben, dass die Anzahl MSB in KbE pro g Fäkalien der empfohlenen Konzentration von Schmid (2012) entsprach. Dies ergab 170 ml auf 300 g Fäkalien, was einer Gesamtanzahl MSB von  $8.05 \text{ E}+07$  KbE / g entspricht (Schmid  $8.1 \text{ E}+07$  KbE / g).

**Tabelle 8 Versuchsübersicht von Versuch 2 (absolute Mengenangaben sind dem Anhang III zu entnehmen)**

	Referenz	5% M	7.5 % M	10% M	15% M
Fäkalien in % (m/m)	100	100	100	100	100
EM Silo-Fit in %(m/m)	57	57	57	57	57
Zuckerrübenmelasse in %(m/m)	0	5	7.5	10	15
Wiederholungen	2	2	2	2	2

##### Fäkalien

Die Fäkalien stammten aus der Sammlung im Zeitraum zwischen 10.8.2014 - 16.9.2014 aus der Komposttoilette unserer Wohngemeinschaft (siehe Kapitel 3.2.2). Das Material wurde nach der Entnahme noch für eine Woche bei ca. 16 °C in einem schwarzen Plastiksack gelagert.

##### EM silo-fit

Das EM war voller kleiner weisser Ausfällungen. Nach einer telefonischen Aussage eines Mitarbeiters von EM Schweiz (22.09.2014) handelte es sich dabei um eine Hefe, welche aufgrund der Sauerstoffzufuhr durch das Öffnen des Behälters für den vorherigen Versuch gewachsen ist. Die Laktofermentation sollte jedoch dadurch nach Aussage des Mitarbeiters von EM Schweiz nicht beeinträchtigt werden. Das EM roch auch noch gut / säuerlich. Die Lagerungstemperatur vor dem Versuch betrug ca. 15 °C.

##### Gaszusammensetzung

Die Gaszusammensetzung wurde bis zu Tag 15 gesammelt.

### 4.3.3 Resultate

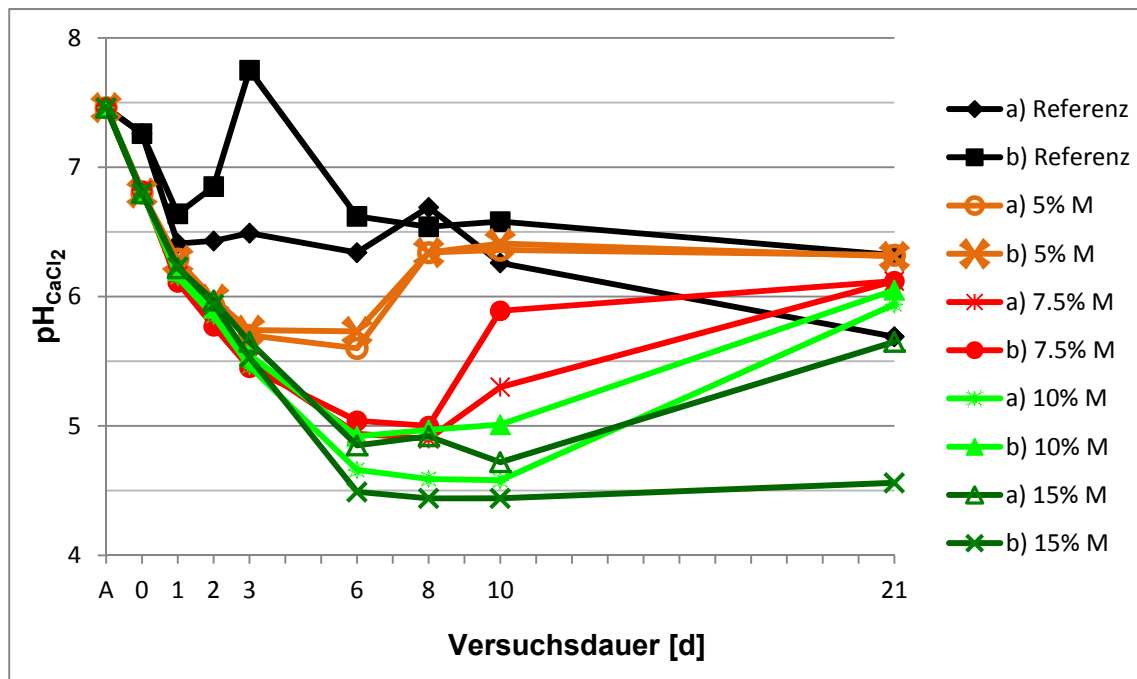


Abbildung 16 pH-Verlauf des Versuches 2. (A; Ausgangsmaterial, 0; nach Ansatzmischung).

In einem Fall (15% Mb) sank der pH Wert innert 6 Tagen auf pH 4,4 und blieb auf diesem tiefen Wert bis am 21. Tag. Bei allen anderen Ansätzen mit Melasse sank der pH weniger tief, erreichte eine Plateauphase und begann nach 6 Tagen (5% M) bis 10 Tagen (10% M) wieder zu steigen. Die Referenzansätze (mit MSB, ohne Melasse) zeigten ebenfalls eine Moderate pH Absenkung. Es fällt auf, dass die Replikate teilweise stark voneinander abwichen. (Abbildung 16).

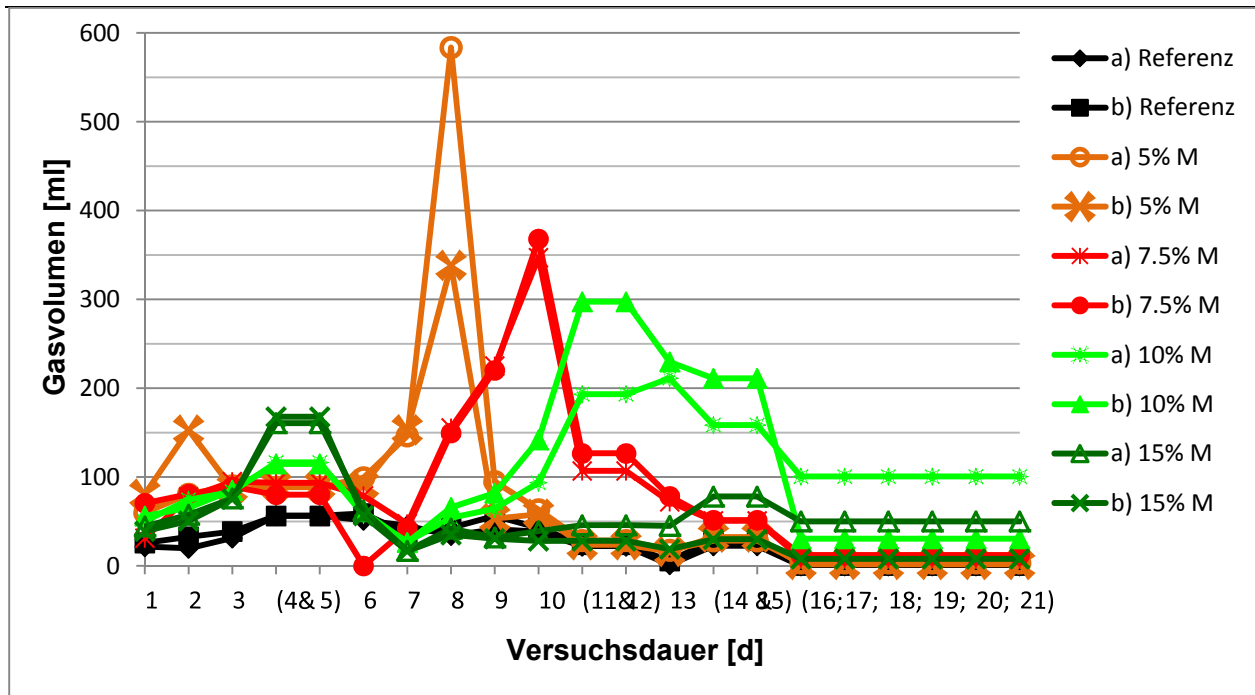


Abbildung 17 Verlauf der Gasentwicklung von jeweils 300 g Fäkalien (Frischgewicht) und den jeweiligen Zugaben (EM, Melasse) des Versuches 2. Die Ziffern innerhalb der Klammer der horizontalen Achsenbeschriftung bedeuten, dass es sich um Mittelwerte über die jeweiligen Tage handelt.

Bei Abbildung 17 ist die zeitlich versetzte hohe Gasbildung mit zunehmender Zuckerkonzentration der Ansätze 5%-10% Melasse augenfällig. Nach der Maximalen Gasbildung, pendelte sich die Gasbildung dieser Ansätze auf einem relativ tiefen Niveau ein. Sowohl die Referenz als auch die 15% Melasse –Ansätze verzeichneten über den vierten und fünften Tag die maximale Gasbildung. Diese betrug bei der Referenz 56 ml/d und bei „15% M“ 160 ml/d. Der Gasbildungsverlauf der Referenz nahm daraufhin ab Tag elf auf durchschnittlich 23 ml/d ab und ab Tag 16 auf 0.5 bzw. 0 ml/d ab. Das Replikat „15% Mb“ bildete ab Tag 16 noch 8 ml/d, während „15% Ma“ noch 50 ml/d Gas produzierte.

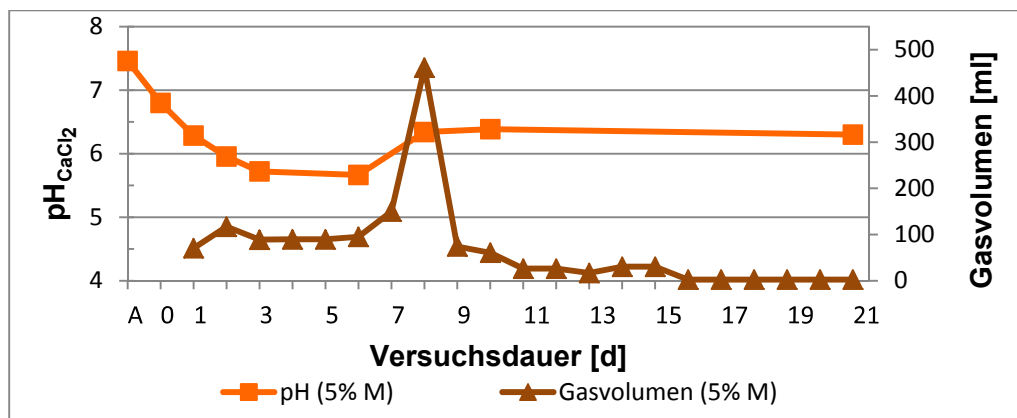


Abbildung 18 Mittelwerte des pH- und Gasbildungsverlaufs des Ansatzes „5% M“ des Versuches 3

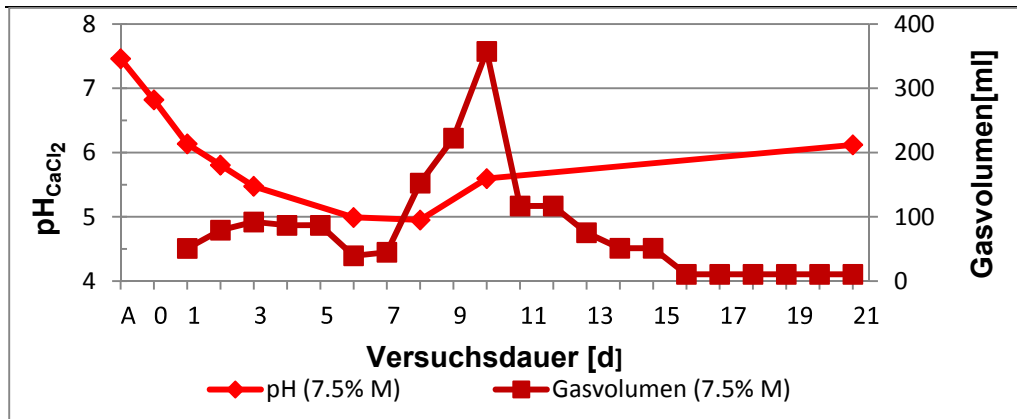


Abbildung 19 Mittelwerte des pH- und Gasbildungsverlaufs des Ansatzes „7.5 % M“ des Versuches 2

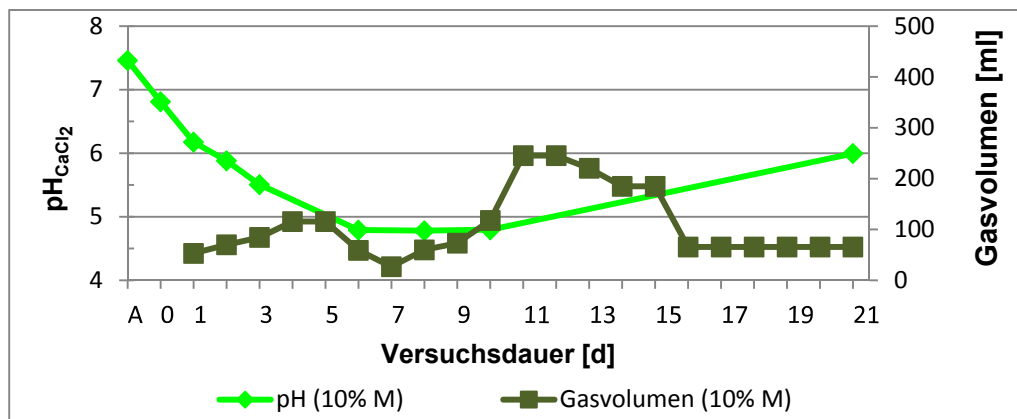


Abbildung 20 Mittelwerte des pH- und Gasbildungsverlaufs des Ansatzes „10 % M“ des Versuches 2

In den Abbildungen 18, 19 und 20 wurden der pH-Verlauf und die Gasbildung der Ansätze „5% M“, „7.5% M“ und „10% M“ zusammen dargestellt. Bei den Ansätzen „10% M“ und „7.5% M“ war im Anschluss an eine höhere Gasbildung eine pH-Steigerung zu beobachten. Beim Versuch mit 5 % Melassezugabe stiegen der pH-Wert und die Gasbildung fast parallel an.

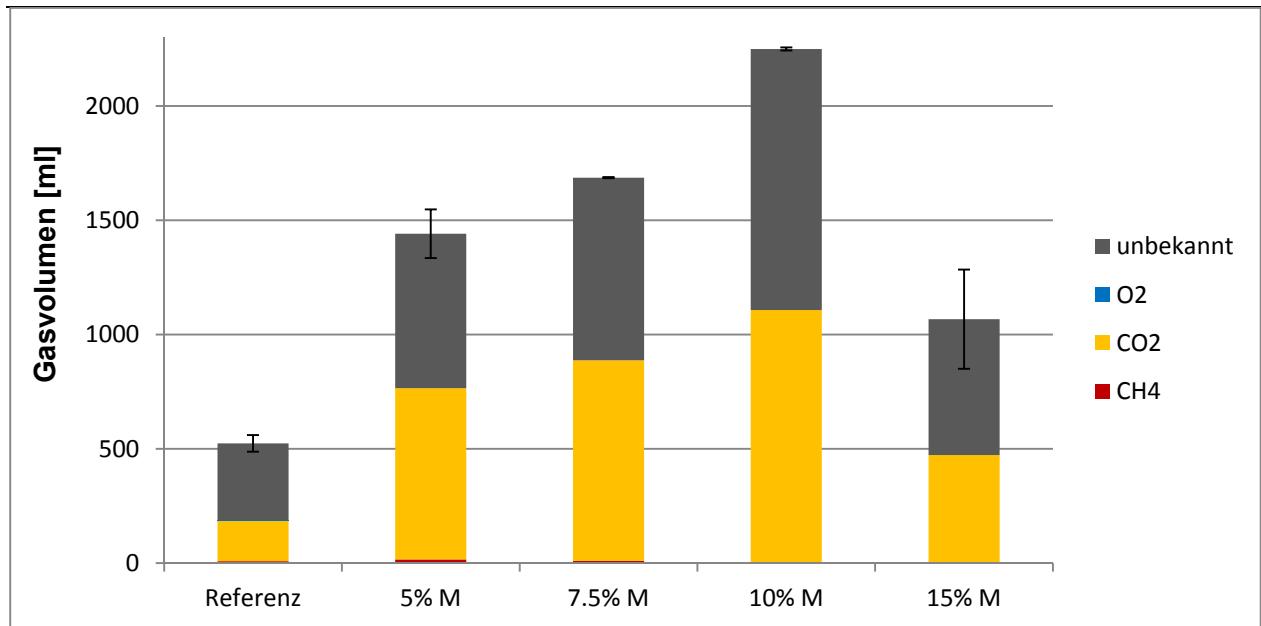


Abbildung 21 Gesamter Gasverlust innerhalb der 21 Tagen und die Gaszusammensetzung des Versuches 2. Die Balken stellen die Minima- und Maximawerte des gesamten Gasverlustes dar.

Die Referenz wies über die 21 Tage die geringste Gasproduktion auf. Das Gasbildungsvolumen stieg bis und mit Ansatz „10% M“ mit zunehmender Melassekonzentration an. Bei „15% M“ wurde von den Ansätzen mit Melasse am wenigsten Gas produziert. Von den analysierten Gasparametern wurde mit Abstand am Meisten CO<sub>2</sub> gebildet. O<sub>2</sub> konnte nur bei der Referenz mit 0.4 Vol.-% gemessen werden. Der Methangehalt macht bei allen Ansätzen weniger als 1.6 Vol.-% aus (Abbildung 21).

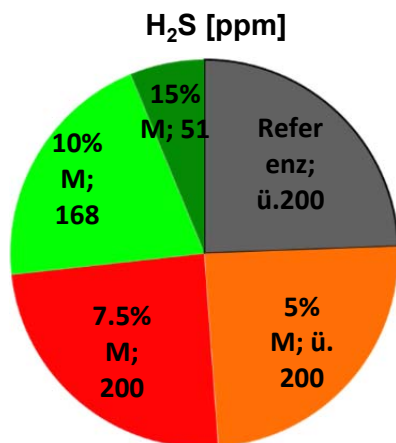


Abbildung 22 Anteile von H<sub>2</sub>S in ppm der jeweiligen Ansätze von Versuch 2

Die Referenz und „5%M“ überschritten die Messgrenze für H<sub>2</sub>S von 200 ppm. Bei dem Ansatz „15% M“ wurde im Vergleich zu den anderen Ansätzen mit Melassezugabe mindestens 1/3 weniger Schwefelwasserstoff gebildet (Abbildung 22).

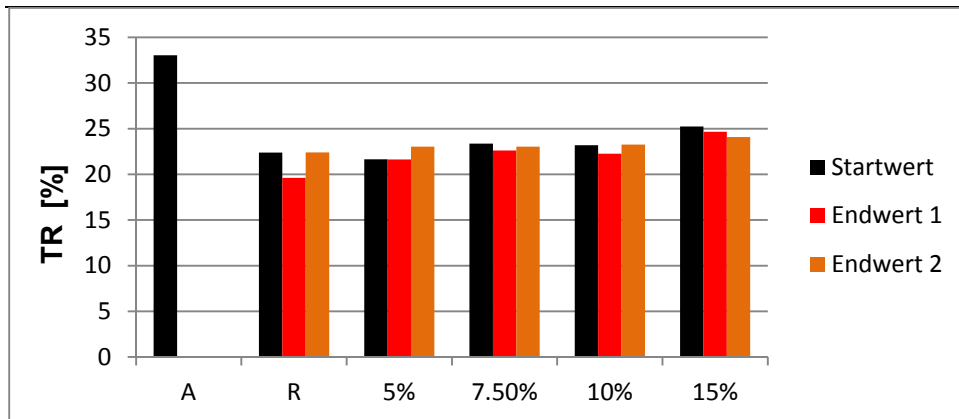


Abbildung 23 Trockenreste von Versuch 2 (Startwert; t0. Endwert; t21)

Das Ausgangsmaterial wies einen TR von 33 % auf. Der Starttrockenrest nach der Zugabe von EM und Melasse betrug 21 bis 25 %. Die Trockenreste nahmen bis am Ende des Versuches bei den meisten Ansätzen leicht ab (Abbildung 23).

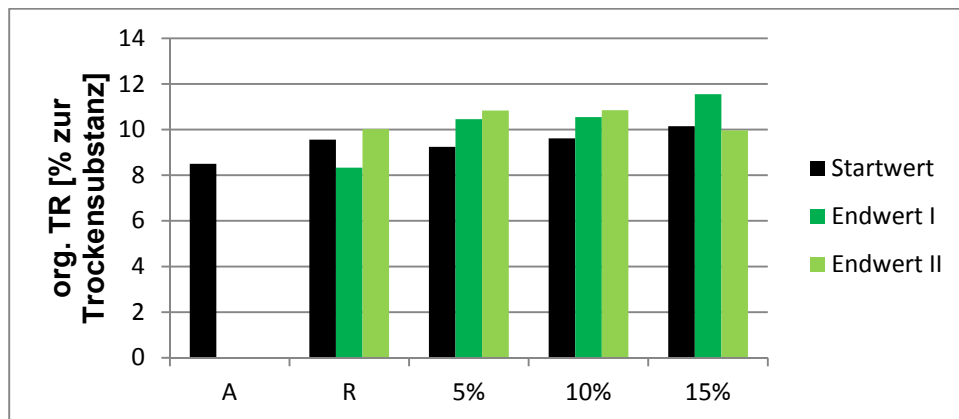


Abbildung 24 org. Trockenreste von Versuche 2

Nach Zugabe von EM und Melasse wiesen die Startwerte im Vergleich zum Ausgangsmaterial 1-2 % höhere org.TR auf. Teilweise ergaben sich nach Versuchsende höhere org.TR als zu Beginn (Abbildung 24).

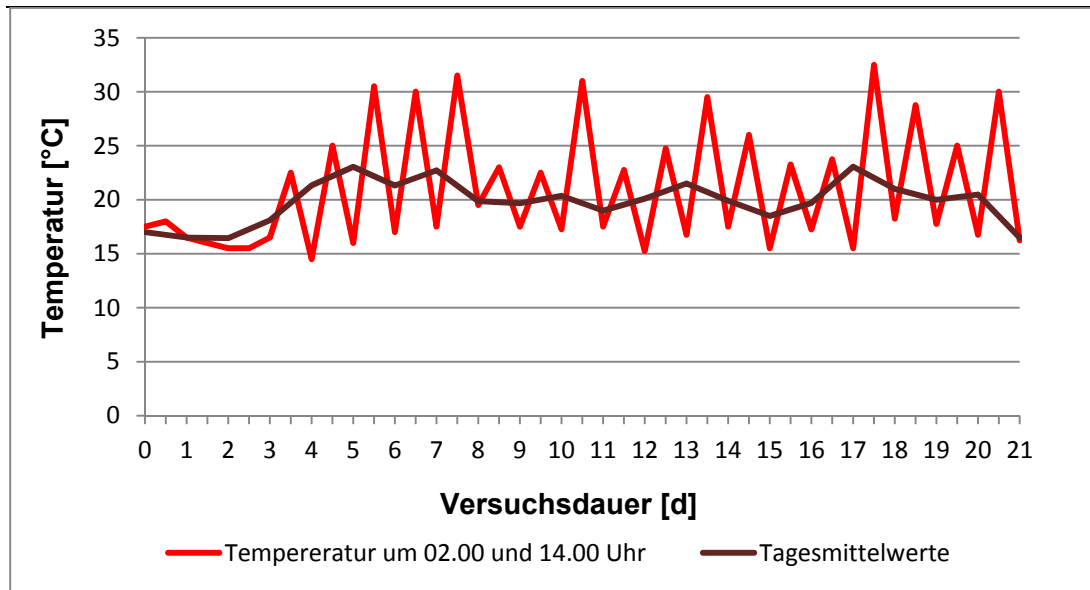


Abbildung 25 Temperaturverlauf während dem Versuch 2

Der Temperaturmittelwert über den gesamten Versuch betrug 19.1 °C. Die Temperaturschwankungen der Tag und Nachttemperaturen reichten bis zu 14.5 °C. Die minimal erreichte Temperatur betrug 13 °C und die Höchsttemperatur 34.75 °C. (Abbildung 25)

### Qualitative Resultate

Gegen Ende des Versuches stank die Referenz stark nach faulen Eiern. Die Ansätze „5% M“ und „7.5% M“ wiesen einen säuerlich-fäkalischen Geruch auf und die Ansätze mit einer Zugabe von 10% und 15 % Melasse rochen ähnlich wie Sauerteig.

### 4.3.4 Diskussion

Aufgrund der hohen EM-Zugabe wurde der Ausgangs TR dieser Versuche im Vergleich zu den Vorhergehenden gesenkt und befand sich im Bereich zwischen 21 und 25 %. Dies hat zur Folge, dass ein pH-Wert unter 4.2 bis 4.35 erreicht werden muss, damit auch die Clostridien gehemmt werden (Weissbach, 2002). Der Ansatz „15% M“ erreichte ab Tag sechs mit 4.4 beinahe den kritischen pH und vermochte ihn bis Versuchsende aufrechtzuerhalten.

Unerfreulicherweise stabilisierte sich die entsprechende Wiederholung nicht wie erwartet. Die Absenkung des pH –Wertes schien zu langsam verlaufen zu sein, was den unerwünschten, säureempfindlichen „Schadorganismen“ Zeit gab sich zu vermehren und die LF zu „kippen“ (Weissbach, 2002). Der unterschiedliche Verlauf der beiden Wiederholungen war jedoch schwierig erklärbar. Möglicherweise lag es an einem Unterschied der Anfangsbakteriengemeinschaft oder der Trockensubstanz. Denn auch wenn versucht wurde die Materialien so gut wie möglich zu homogenisieren, beinhalteten einige einen höheren Anteil



---

Fäkalien und andere mehr Holzanteil. Dies könnte auch die Ergebnisse der org. TR erklären, welche eine unmögliche Zunahme der organischen Substanz über die Versuchsdauer verzeichneten.

Bei den Ansätzen mit einer Zugabe von 5%, 7.5 % und 10% Melasse war klar erkennbar, wie die CO<sub>2</sub>-Entwicklungen mit einem pH-Anstieg einhergehen. Da im System kein Sauerstoff mehr vorhanden war, ist die Gasbildung mit hoher Wahrscheinlichkeit auf Enterobakterien oder Clostridien zurückzuführen, da die pH-Werte zu deren Inhibition nicht schnell genug oder gar nicht erreicht wurden. Das Wachstum der Clostridien dürfte jedoch auch durch den reduzierten Trockengehalt gefördert worden sein, da diese feuchte Substrate bevorzugen (Weissbach, 2002).

Um bei langsamen pH-Senkungen die Vermehrung der Clostridien in Grenzen zu halten, wird in Silagen eine Nitratkonzentration von über 0.5 - 1% empfohlen. Die Abbauprodukte von Nitrat (Nitrit und Stickstoffmonoxid), welche bereits in einem frühen Stadium der Silage gebildet werden, hemmen die buttersäurebildenden Clostridien. (Sterzenbach, 2000; Galler, 2011) Obwohl der Stickstoffgehalt des in den Fäkalien vorkommenden Urins bis 1.7 % betragen kann, liegt der Stickstoff nur zu 45 µg/l als Nitrat vor (Meinzinger & Oldenburg, 2009; Kirchmann & Pettersson, 1995).

Zusammengefasst könnten die Fehlgärungen der Ansätze 5 %, 7.5% und 10 % auf einen zu geringen Zuckergehalt zurückzuführen sein, wodurch der pH bei den oben beschriebenen Bedingungen nicht schnell genug gesenkt werden konnte. Zudem könnten die hohen Temperaturschwankungen die Entwicklung der MSB negativ beeinflusst haben. Dies könnte erklären, weshalb die pH-Absenkung bei einer Zugabe von 10% Melasse innerhalb von acht Tagen nur bis 4.6 bzw. 4.9 erfolgte, im Vorversuch aber bis 4.4.

Für den starken Geruch der Referenz nach faulen Eiern war der hohe Anteil von Schwefelwasserstoff verantwortlich. Schwefelwasserstoff entsteht durch die Sulfat- und Schwefelreduktion bei bereits relativ geringem Redoxpotential (Madigan et al., 2013). Die Bildung des H<sub>2</sub>S ist u.a. vom Schwefelgehalt des Substrates, dem pH- Wert und der Temperatur abhängig (mündliche Aussage Urs Baier, Leiter Fachstelle Umweltbiotechnologie ZHAW, Departement N). Aufgrund des tiefen pH-Wertes des Ansatzes „15% M“, kann auf diese Weise die geringere H<sub>2</sub>S- Produktion im Vergleich zu den anderen Ansätzen erklärt werden. Jedoch auch aufgrund des höheren pH die hohe H<sub>2</sub>S-Bildung bei der Referenz.

Die Menge der zugegebenen MSB von  $8.05 \text{ E}+07 \text{ KbE/g}$  wurde als mehr als genügend beurteilt. In Silagen benötigt es in der Regel  $1 \text{ E}+05$  bis  $1 \text{ E}+06 \text{ KbE/g}$  (Weinberg & Muck 1996). Die zu Beginn gewählte EM – Zugabe von 10% überschritt diesen Wert mit  $1.47+07 \text{ KbE/g}$  bereits um einiges und sollten eigentlich, wie im Vorversuch auch bestätigt, genügen. Da Schmid (2012) eine höhere Milchsäurebildung mit zunehmender Menge MSB feststellen konnte, soll in einem nächsten Versuch eruiert werden, ob eine Zugabe von 15% EM verglichen mit 10% EM einen positiven Effekt auf die LF erzielt.

#### **4.3.5 Fazit**

Ein Replikat von „15% M“ vermochte beinahe den kritischen pH-Wert zu erreichen und zu halten. Jedoch konnte auch bei dem tiefen pH von 4.4 die Gasbildung der Referenz nicht unterschritten werden. Es wird vermutet, dass die pH-Senkung mithilfe von 10% Melasse im Vergleich zum Vorversuch aufgrund der hohen Temperaturschwankungen und kleineren TR geringer war. Aus diesem Grund soll in einem nächsten Versuch mit den beiden Melassekonzentrationen 10% und 15% weiter gearbeitet werden. Es wird erhofft, dass durch günstigere Temperaturbedingungen und Senkung der TR im Vergleich zu diesem Versuch bei beiden Wiederholungen der kritische pH-Wert erreicht und zusätzlich der Gasverlust minimiert werden kann.

Aufgrund der Inhomogenität des Materials, eignet sich der org.TR nicht zur Beurteilung des Abbaus der organischen Substanz. Deshalb wird er in den weiteren Versuchen auch nicht weiter analysiert.

## 4.4 VERSUCH 3 – Temperatur und Milchsäure I

### 4.4.1 Fragestellung

1. Kann bei einer stabilen Temperatur mithilfe von 10% und 15% Melasse der kritische pH-Wert erreicht werden?
2. Wird die LF durch eine erhöhte MSB Zugabe von 15% im Vergleich zu 10% positiv beeinflusst?
3. Können die Fäkalien durch die Zugabe von 2.5 % Milchsäure stabilisiert werden?

### 4.4.2 Material und Methoden

#### Versuchsübersicht

Die Versuchsdauer betrug wiederum drei Wochen (20.10.2014 - 10.11.2014).

Da die Aussentemperaturen unter 10 °C fielen, wurde zur Gewährleistung von stabilen und geeigneten Temperaturbedingungen für die MSB eine elektrische Heizung in den Raum gestellt. Zur Stabilisierung der Fäkalien mit Hilfe von Milchsäure wurde eine Konzentration von 2.5% gewählt. Diese Wahl wurde aufgrund der Resultate von Schmid & Schönborn (2014) getroffen, welche eine Stabilisierung von Fischgülle bereits bei einer Milchsäurekonzentration von 1.5% nachweisen konnten. Die Versuchsübersicht kann der Tabelle 9 entnommen werden.

**Tabelle 9 Versuchsübersicht von Versuch 3 (absolute Mengenangaben sind dem Anhang IV zu entnehmen)**

	Referenz	10%M; 10%EM	10%M; 15%EM	15%M; 10%EM	15%M; 15%EM	Milchsäure
Fäkalien in % (m/m)	100	100	100	100	100	100
*EM Silo-Fit in % (m/m)	0	10	15	10	15	
Zuckerrübenmelasse in % (m/m)	0	10	10	15	15	
Milchsäure in % (m/m)						2.5
	2	2	2	2	2	2

\*Die 10 % EM entsprechen einer MSB-Zugabe von insgesamt 1.42 E+07 KbE /g Fäkalien und 15% EM 2.13 E+ 07 KbE MSB pro g Fäkalien.

#### Fäkalien

Die Fäkalien stammten von der Sammlung im Zeitraum zwischen 10.08.2014 -20.10.2010 aus der Komposttoilette unserer Wohngemeinschaft (Kapitel 3.2.2).

#### EM silo-fit

Das EM Silo-Fit wurde frisch bestellt.

#### Gasbildung

Während der Datensammlung sind zwei Fehler unterlaufen. Erstens konnten die

Flaschennummern den Ansätzen nicht mehr zugeordnet werden, weshalb der Mittelwert der Flaschenvolumen aller benutzten Flaschen verwendet wurde, was max. einen Fehler von 2.3 ml Gasvolumen pro Flasche verursachte. Zudem konnte der notierte Messwert von Tag 4 und 5 nicht mehr wiedergefunden werden.

Da die Temperaturen während der pH- Messung im Folientunnel tiefer waren als im Lagerraum, wurde das durch den Temperaturanstieg verursachte Gas nach einer halben Stunde entlassen.

#### 4.4.3 Resultate

Die Zugabe der Milchsäure erzielte überhaupt keinen Effekt auf den gesamt pH, da sie sofort lokal von den Fäkalien aufgesogen wurde. Aus diesem Grund wurde diese Versuche gleich am ersten Tag abgebrochen.

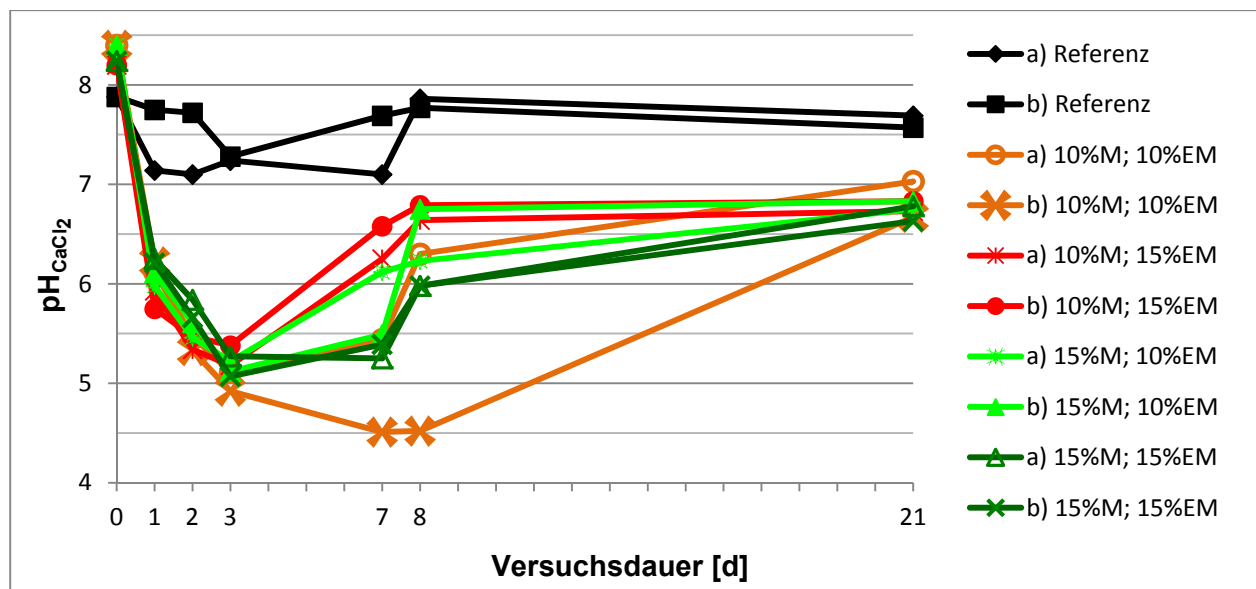


Abbildung 26 pH-Verlauf des Versuches 3. (0;nach Ansatzmischung).

Die Referenz wies während der gesamten Versuchsdauer einen pH-Wert zwischen 8 und 7 auf. Bei den anderen Ansätzen sank der pH-Wert hingegen innerhalb von drei Tagen von 8.4 auf ca. 5 und stieg darauf bis Tag 21 auf etwa 6.8. Einzig bei der Wiederholung des Ansatzes „10% M; 10% EM b“ sank der pH-Wert bis Tag acht weiter bis auf 4.5. Daraufhin stieg auch dieser pH bis Tag 21 auf 6.6. (Abbildung 26)

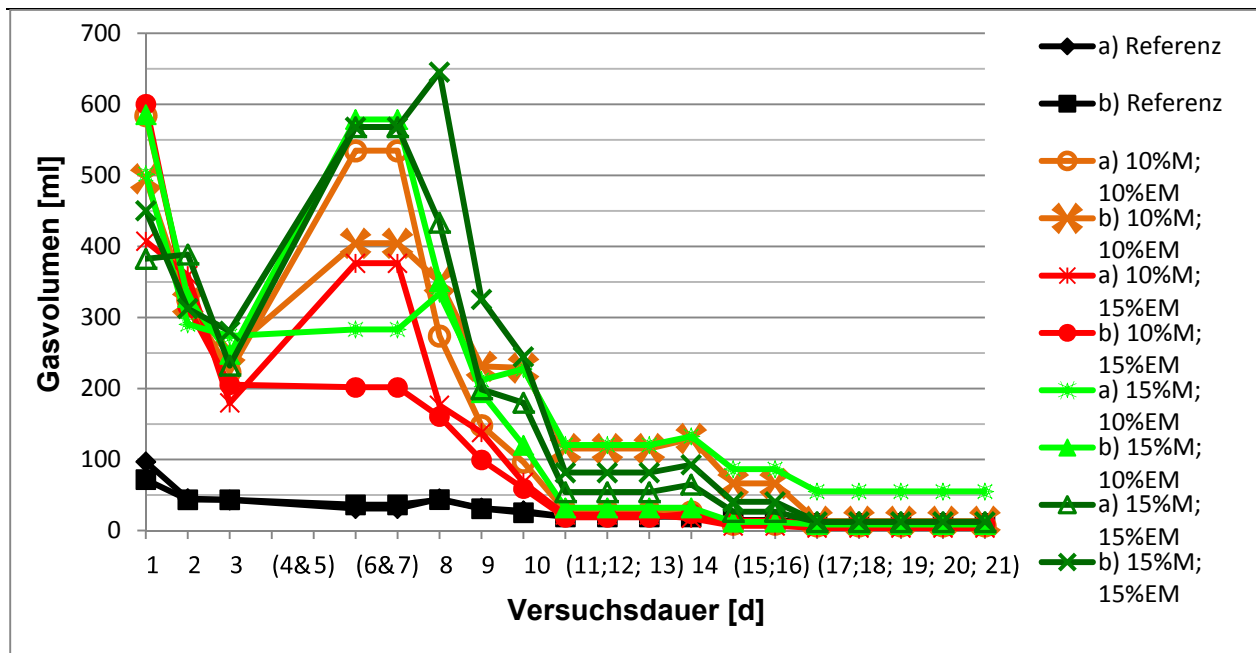
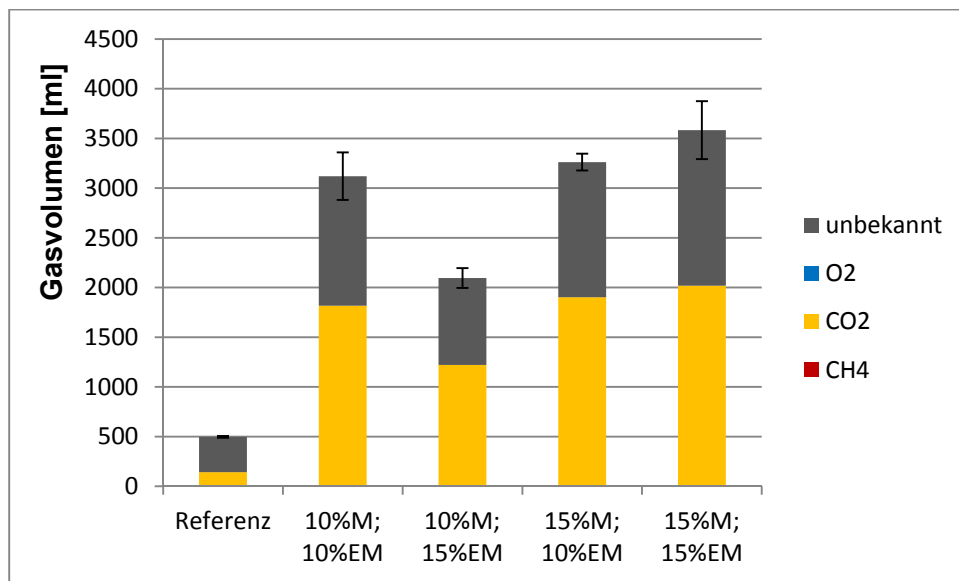


Abbildung 27 Verlauf der Gasentwicklung von jeweils 300 g Fäkalien (Frischgewicht) und den jeweiligen Zugaben (EM, Melasse) des Versuches 3. Die Ziffern innerhalb der Klammer der horizontalen Achsenbeschriftung bedeuten, dass es sich um Mittelwerte über die jeweiligen Tage handelt.

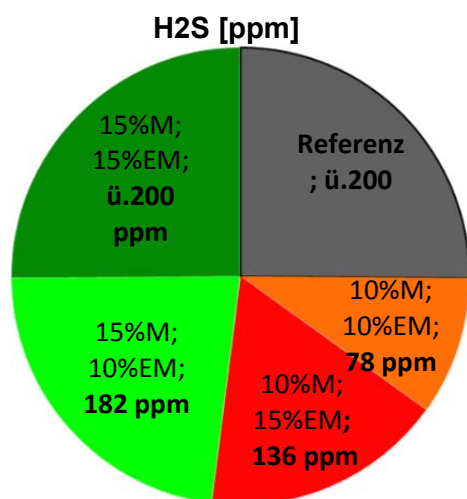
Alle Ansätze mit MSB wiesen in den ersten zwei Tagen eine vier- bis sechsmal so hohe Gasbildung wie die Referenz auf. Diese reduzierte sich am dritten Tag auf etwa 200 ml/d, woraufhin sie bis zu Tag sieben wieder ein Maximum ähnlich zu den ersten Tagen erreichte. Die Ansätze mit 10 % Melasse wiesen verglichen mit den 15% Melasseansätzen generell eine geringere Gasbildung auf. In den letzten vier Tagen des Versuchs pendelten sich mit Ausnahme von „15% 10% EM a“ alle Ansätze bei durchschnittlich weniger als 12 ml Gas pro Tag ein (Abbildung 27).



**Abbildung 28 Gesamter Gasverlust innerhalb der 21 Tagen und die Gaszusammensetzung des Versuches 3.**  
Die Balken stellen die Minima- und Maximawerte des gesamten Gasverlustes dar.

Die Ansätze mit 15% Melasse wiesen mit 3177 bis 3875 ml den höchsten Gasverlust auf. Bei den Ansätzen mit 10% Melasse bildeten jene mit 15% EM ca. 1000 ml weniger Gas als jene mit 10% EM. Die Referenz bildete während der gesamten Versuchsdauer nur 500 ml Gas.

Sauerstoff konnte bei keinem der Ansätze nachgewiesen werden. Der Methangehalt des Gases betrug für die Referenz 1.6 Vol.-% und für die anderen Versuchsreihen 0.3 Vol.-% (Abbildung 28).



**Abbildung 29 Anteile von H<sub>2</sub>S in ppm der jeweiligen Ansätze von Versuch 3.**

Die Referenz und „15%M, 15%EM“ überschritten die Messgrenze von 200 ppm. Die geringste Menge H<sub>2</sub>S bildete der Ansatz „10%M; 10%EM“ (Abbildung 29).

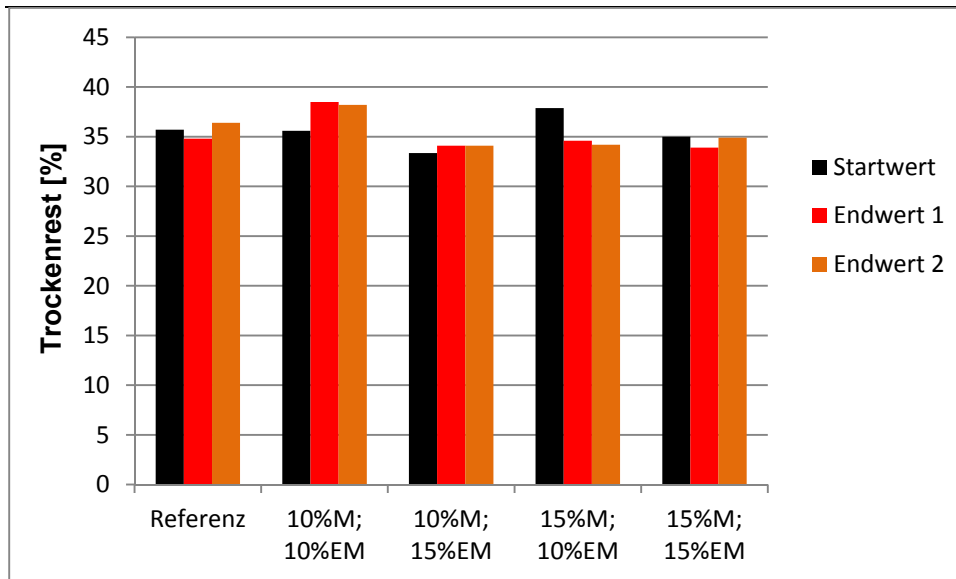


Abbildung 30 Trockenreste von Versuch 3. (Startwert; t0. Endwert; t21)

Die Startwerte der Trockensubstanz variierten von 33.4 bis 37.9 %. Bis Versuchsende blieben die Trockenreste der Referenz relativ stabil. Der Trockengehalt der Ansätze mit 10% Melassezugabe nahmen bis Tag 21 um 0.9 bis 2.9 Procente zu, während die Trockengehalte bei 15%iger Melassezugabe um 0.1-3.7 Procente abnahmen (Abbildung 30).

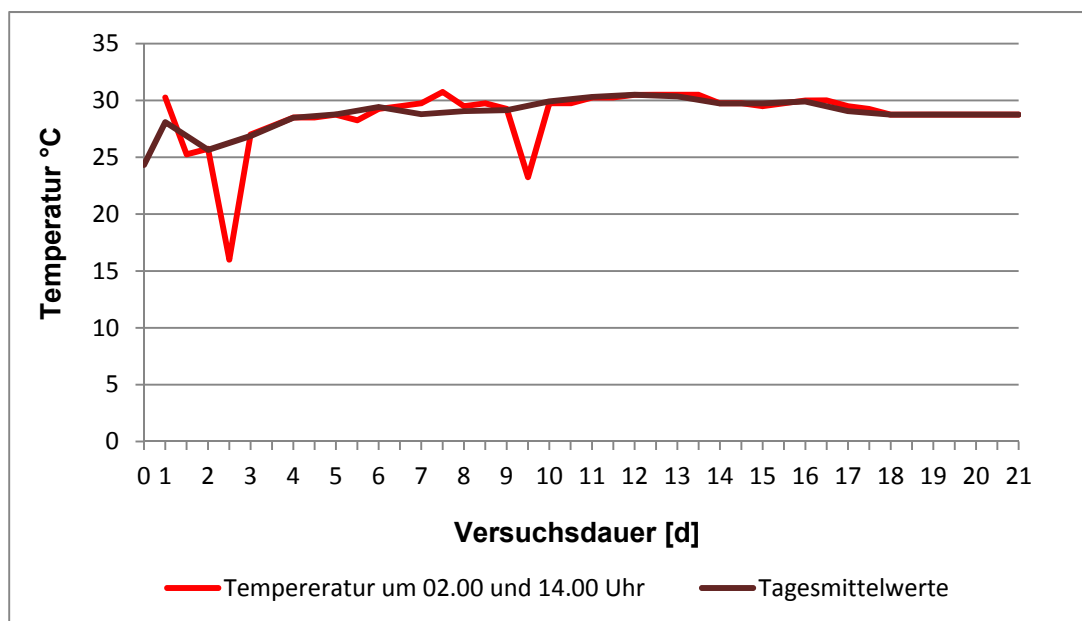


Abbildung 31 Temperaturverlauf während dem Versuch 3.

Der Temperaturmittelwert über die gesamte Versuchsdauer betrug 28.9 °C. Die maximal gemessene Temperatur betrug 32.3 °C, die Minimale 15.3°C. Die tiefen Temperaturschwünge, welche auch in Abbildung 31 erkennbar sind, betrafen jeweils den Zeitpunkt der pH Messung im

---

kühleren Folientunnel. Ohne Beachtung der Ausreisser verlief die Temperatur zwischen 25.3 und 32.3 °C.

### **Qualitative Resultate**

Ab Tag zwei roch die Referenz wie in Versuch 2 stark nach faulen Eier. Die restlichen Ansätze rochen säuerlich, jedoch verbunden mit einem schwachen Fäkalgeruch.

#### **4.4.4 Diskussion**

Anhand der angesetzten Versuchsreihen konnte weder der kritische pH-Wert noch eine Minimierung der Gasbildung erreicht werden. Die gebildeten Gasmengen übertrafen diejenigen des Versuches 2 bei den 15% Melassekonzentrationen um das Dreifache. Die stabilen und höheren Temperaturen schienen jedoch verglichen mit den vorhergehenden Versuchen zu einer schnelleren und höheren pH- Senkung geführt zu haben. Und dies trotz der erhöhten TR-Gehalten, welche die pH-Senkung normalerweise verlangsamen (Weissbach, 2002). Der pH sank bei allen zu fermentierenden Ansätzen bereits innerhalb von drei Tagen um 3 pH-Einheiten. Hingegen wurde bei den vorherigen Versuchen die maximale Senkung erst nach sechs bis acht Tagen erreicht. Zudem betrug die maximale Differenz des pH-Wertes bei Versuch 2 nur 2.3 Einheiten. Dass die Stabilisierung trotzdem erfolglos blieb, ist vermutlich auf den hohen pH- Startwert von 8.2 – 8.4 zurückzuführen. Die vorhergehenden Versuche wiesen zu Versuchsbeginn im Vergleich einen pH-Wert zwischen 6.8 und 7.2 auf. Der hohe pH-Wert des Ausgangsmaterials ist vermutlich auf die Hydrolyse des Harnstoffes im Urin zurückzuführen, welche bei einer Lagerung in der Regel bereits innerhalb einer kurzen Zeitfrist beginnt. Dabei wird der Harnstoff zu Ammonium, Ammoniak und Hydrogencarbonat abgebaut, was zu einem pH-Anstieg führt (Udert et al., 2006).

Für Kompotol bedeutet dies, dass die Melasse und EM Bakterien so früh wie möglich beigemischt werden sollten. Jedoch ist davon auszugehen, dass sich der Harnstoff während Langzeitvermietungen bereits hydrolysiert wird. Aufgrund dessen sollte die nötige Menge Melasse und EM so berechnet werden, dass sich genügend Milchsäure bilden kann, damit auch bei derart hohen pH-Startwerten der kritischen pH-Wert erreicht werden kann.

Nach McDonald et al. (1991) erreichen die MSB bei einer Temperatur von 30°C die höchste Anzahl, was auch die schnellere und höhere pH-Senkung erklärt.

Auch wenn durch die stabileren und höheren Temperaturen der LF-Prozess optimiert werden konnte, wurde das nötige Verfahren zur Stabilisierung der Fäkalien nicht gefunden.



#### **4.4.5 Fazit**

Ein stabiler Temperaturverlauf im Bereich von 28°C vermochte die pH-Senkung zu erhöhen als auch zu beschleunigen. Es konnte jedoch vermutlich aufgrund des hohen Start - pH keine Stabilisierung erzielt werden. Auch konnte kein Unterschied der pH-Verläufe zwischen 15% EM und 10% EM festgestellt werden. Zudem eignet sich eine direkte Zugabe von Milchsäure nicht um Fäkalien mit einem Trockengehalt von 30% zu stabilisieren, da diese sofort lokal aufgesogen wird.

Bisher wurde experimentell und mithilfe von Literaturangaben versucht das nötige Verfahren zur LF der Fäkalien zu eruieren. Die optimale Lösung wurde jedoch bis anhin noch nicht gefunden. Verglichen mit Yemaneh et al. (2012 & 2014), welche mit 10% Melasse Fäkalien erfolgreich laktofermentierten, fallen einige Abweichungen auf. Erstens enthalten die Fäkalien bei Yemaneh kein Strukturmaterial und weisen einen TR von 17 % auf. Weiter wird Zuckerrohrmelasse verwendet und mit reinen MSB-Kulturen gearbeitet. Und schlussendlich und wahrscheinlich massgebend, beträgt der pH-Startwert 5.3 oder sogar weniger als 5. In einem nächsten Versuch soll deshalb untersucht werden, wie sich einerseits die Senkung der TR auf ca. 17% und andererseits die Verwendung von Zuckerrohrmelasse auf den LF-Prozess auswirken. In einem ersten Schritt sollen jedoch vorerst bessere Kenntnisse über die Eigenschaften des Substrates gewonnen werden. Dazu soll anhand eines Titrationsversuches die Pufferkapazität der verwendeten Fäkalien ermittelt werden.

## **4.5 Titrationsversuch**

### **4.5.1 Fragestellung**

1. Wie viel Wasser muss den Fäkalien beigemischt werden, um eine flüssige Konsistenz zu erhalten?
2. Welche Menge Milchsäure ist nötig um einen pH - Wert von 4 zu erreichen?

### **4.5.2 Material und Methoden**

#### **Zielsetzung und Vorgehen**

Mithilfe dieses Versuches sollte eruiert werden, wie stark die Fäkalien den pH puffern. Gleichzeitig sollte auch herausgefunden werden wieviel Wasser benötigt wird, damit die Fäkalien eine flüssige Konsistenz annehmen. Letzteres diene zweierlei Zwecke. Erstens sollte untersucht werden, ob die Laktofermentation in flüssigem Zustand besser funktionieren würde und zweitens mussten die Fäkalien in eine flüssige Form gebracht werden, um die Titration durchzuführen. Damit die Fäkalien für diesen Versuch möglichst homogen waren, wurden sie vorgängig mit einem Küchenstabmixer gemixt. Daraufhin wurde mithilfe einer Bürette schrittweise soweit deionisiertes Wasser zu 20 g Fäkalien zugegeben bis der Eindruck entstand, dass der Magnetrührer die Masse zu mischen vermochte. Als nächstes wurde wiederum mit einer Bürette in kleinstmöglichen Mengen Milchsäure (80%) dazugegeben. Der pH wurde nach jeder Säurezugabe mit dem Hach Lange pH-Meter so lange gemessen bis er sich stabilisiert hatte. Der Versuch wurde drei Mal wiederholt und zum Schluss noch mit deionisiertem Wasser durchgeführt. Die Rohdaten des Titrationsversuches können dem Anhang V entnommen werden.

#### **Milchsäure**

Die verwendete Milchsäure wies eine Konzentration von 80 % auf. Bestellt wurde sie bei Ulrich von der Haide, Brauereistrasse 39a, 19306 Neustadt Glewe.

#### **Fäkalien**

Analog Versuch 4.

### 4.5.3 Resultate

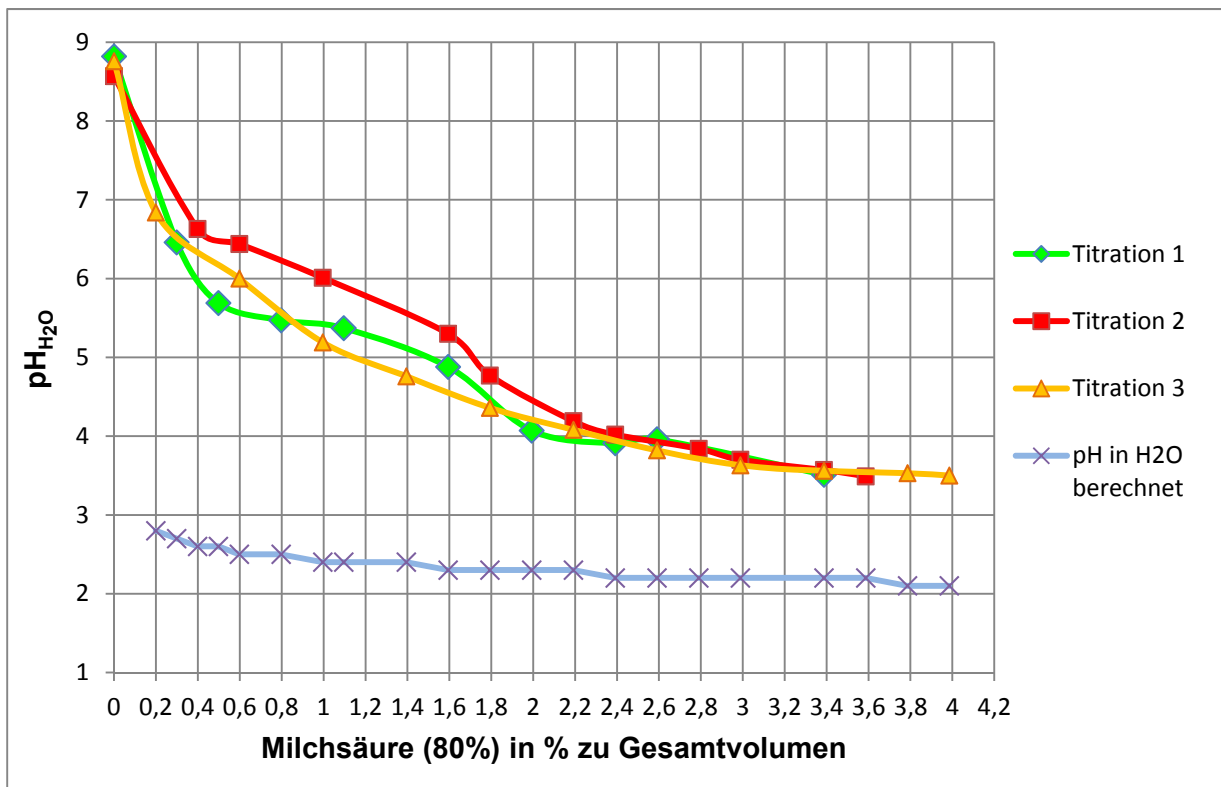


Abbildung 32 Titration mit Milchsäure (80%) von 20 g Fäkalien, gemischt mit 30 ml deionisiertem Wasser

Der Abbildung 32 kann entnommen werden, dass eine Zugabe von 3% Milchsäure (80%) benötigt wird, um den pH von 20 g Fäkalien auf 3.7 zu senken. Bei der Annahme, dass die gesamte Glukose zu Milchsäure umgesetzt wird, werden 2.8 g bzw. 12.5 % (m/m) Melasse benötigt um einen pH-Wert von 3.7 zu erreichen (Berechnung näher in Anhang V beschrieben). Die Pufferkapazität gemäss Weissbach (2002) beträgt 149.9 g MS/Kg TM (MS: Milchsäure; TM: Trockenmasse).

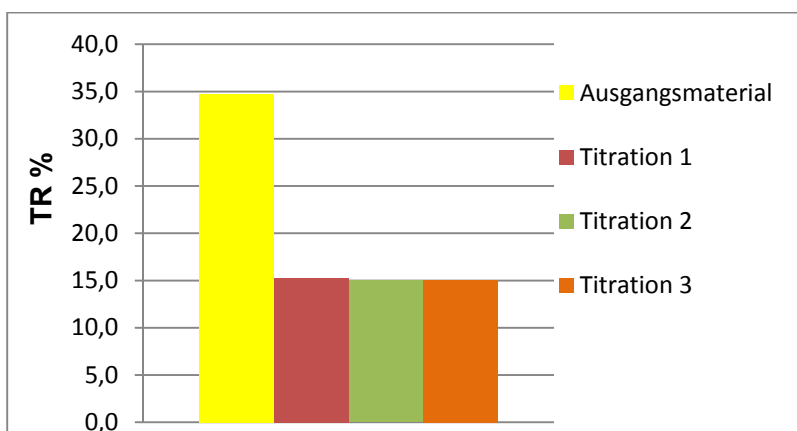


Abbildung 33 Trockenrestgehalte des Titrationversuchs

Wie in Abbildung 33 ersichtlich, wurde durch eine Verdünnung der Fäkalien mit Wasser in einem Verhältnis 1:1.5 der TR von 35% auf 15% gesenkt.



**Abbildung 34** Fäkalien gemischt mit Wasser in einem Verhältnis von 1:1.5

In Abbildung 34 kann ein optischer Eindruck der mit Wasser verdünnten Fäkalien gewonnen werden.

### **Qualitative Resultate**

Die Fäkalien nahmen bereits bei einer Zugabe von Wasser im Verhältnis 1:1 eine flüssige Konsistenz an, konnten jedoch von dem Magnetrührer noch nicht so gut gerührt werden.

#### **4.5.4 Diskussion**

Das verwendete Material wies aufgrund der Lagerung und der damit verbundenen Harnstoffhydrolyse einen hohen Start-pH auf. Für frische Fäkalien mit einem geringeren pH-Wert, wäre die berechnete Melassekonzentration womöglich zu hoch. Dies könnte zu einer Vergärung des Restzuckers durch Hefen zu Ethanol und CO<sub>2</sub> führen (Muck, 2010). Die Pufferkapazität der Fäkalien mit 149.9 g MS/Kg TM ist verglichen mit derjenigen von Grünfuttersilagen mit 32-74 g MS/Kg TM mindestens doppelt so hoch (Weissbach, 2002).

#### **4.5.5 Fazit**

Bei vollständigem Abbau des Zuckers zu Milchsäure werden 12.5 (m/m)% Melasse benötigt um einen pH von 3.7 zu erreichen. Um die Fäkalien in eine flüssige Konsistenz zu überführen, muss Wasser in einem Verhältnis von 1:1 bis 1:1.5 beigemischt werden.

## 4.6 VERSUCH 4– Zuckerrohrmelasse, EM-1 und Milchsäure

### 4.6.1 Fragestellung

1. Kann mit Zuckerrohrmelasse anstelle der bisher verwendeten Zuckerrübenmelasse eine erfolgreichere Stabilisierung der Fäkalien bewirkt werden?
2. Verhält sich die LF mithilfe von EM 1 verglichen mit Silo-Fit unterschiedlich?
3. Kann mithilfe der berechneten Melassekonzentration des Titrationsversuchs von 12.5% der kritische pH-Wert erreicht werden?
4. Können die Fäkalien in flüssiger Konsistenz besser stabilisiert werden?
5. Können die Fäkalien in flüssiger Konsistenz mit 3% Milchsäure (80%) stabilisiert werden?

### 4.6.2 Material und Methode

Die Versuchsdauer betrug drei Wochen (23.11.2014 – 14.12.2014). Die Versuchsübersicht kann der Tabelle 9 entnommen werden. Der Raum wurde wie bereits im Versuch 3 beheizt. Da EM 1 ca. 10-mal weniger MSB/ml beinhaltet als EM Silo-Fit, wurde von EM1 die 2.5-fache Menge zugegeben. In Zahlen ausgedrückt wurden für EM Silo – Fit  $1.42 \text{ E}+07 \text{ KbE MSB/g}$  und für EM1  $3.25 \text{ E}+06 \text{ KbE MSB pro g Fäkalien}$  zugegeben. Dabei wies EM Silo-Fit immer noch die vierfach höhere MSB Konzentration auf.

Bisher waren die 100% immer auf 300 g Fäkalien bezogen gewesen (siehe auch Kapitel 3.1.2). Da dies bei den flüssigen Ansätzen zu einem sehr hohen Volumen geführt hätte, wurden für die flüssigen Ansätze nur 120 g Fäkalien eingefüllt. Zur Verdünnung der Fäkalien wurde die im Titrationsversuch ermittelte 1.5-fache Wassermenge beigemischt.

**Tabelle 10 Versuchsübersicht von Versuch 4 (absolute Mengenangaben sind dem Anhang V zu entnehmen)**

	Referenz	Silo-Fit fest	EM 1 fest	Silo-Fit flüssig	Silo-Fit flüssig	Milchsäure
Fäkalien in %(m/m)	100	100	100	100	100	100
EM 1 in %(m/m)			25		25	
EM Silo-Fit in %(m/m)	0	10		10		
Zuckerrohrmelasse in %(m/m)	0	12.5	12.5	12.5	12.5	
Milchsäure in % (m/m)						3
Hahnenwasser in % (m/m)				150	150	150
Wiederholungen	2	2	2	2	2	2

### Fäkalien

Die Fäkalien stammten von der Sammlung des Zeitraums zwischen 10.8.2014 – 2.11.2014 aus der Komposttoilette der Wohngemeinschaft wie in Kapitel 3.2.2 beschrieben. Das Material

wurde vor Versuchsbeginn in einem schwarzen Plastiksack für ca. 3 Wochen bei Aussentemperatur gelagert, da die Versuchsvorbereitung noch nicht abgeschlossen war.

### **Zuckerrohrmelasse**

Die Zuckerrohrmelasse wurde von der EM Schweiz AG unter dem Handelsname „schwarze Zuckerrohrmelasse“ bestellt. Die Melasse wird aus tropischem Zuckerrohr gewonnen.

Genauere Angaben zu den Inhaltstoffen sind der Tabelle 11 zu entnehmen..

**Tabelle 11 Inhaltstoffe Zuckerrohrmelasse gemäss Produktanschrift**

Gesamtzucker	Min. 48%
TS	Min. 74 %
Brix-Wert	Min. 78.5
Zink nativ	10 mg/kg
Mangan nativ	20 mg/kg
Eisen nativ	200 mg/kg
Selen nativ	0.02 mg/kg

### **EM Silo-Fit**

Lagerung bis Versuchsbeginn bei 3-11°C im Kühlraum.

### **EM 1**

Bis zu Versuchsbeginn in einer Lagerhalle für ca. 3 Wochen gelagert.

### **Milchsäure**

Analog Kapitel 4.5.2.

### **pH-Messung**

Der pH der flüssigen Ansätze wurde jeweils direkt mit der pH-Sonde gemessen. Für die festen Ansätze wurde hingegen wie bisher die  $\text{CaCl}_2$ -Extraktionsmethode verwendet (siehe auch Kapitel 3.3.1). Bei der Messung des Ausgangsmaterials wurde ein pH-Unterschied von 0.5 Einheiten festgestellt. Dies ist auf die tieferen pH-Werte der  $\text{CaCl}_2$ -Extraktionsmethode zurückzuführen (Fachstelle Bodenökologie, 2013b). Aus diesem Grund wurden bei den Ansätzen mit festen Fäkalien zur besseren Vergleichbarkeit bei der Darstellung des pH-Verlaufes jeweils 0.5 pH Einheiten subtrahiert.

.

### **Gasbildung**

Da die flüssigen Ansätze nur 120 g Fäkalien beinhalteten, wurde die Gasbildung für diese Ansätze mit dem Faktor 2.5 multipliziert. Somit wurde die Gasbildung auf die damit sie ebenfalls 300 g Fäkalien entsprach. Somit wurde gewährleistet, dass die Gasbildungen auf dieselbe

Menge Fäkalien bezogen wurden. Da die Temperaturen während der pH- Messung tiefer waren als im Lagerraum, wurde das durch den Temperaturanstieg verursachte Gas nach einer halben Stunde entlassen.

### Gaszusammensetzung

Da die flüssigen Ansätze nur 120 g Fäkalien beinhalteten, wurde die Gasbildung für diese Ansätze mit dem Faktor 2.5 multipliziert. Somit wurde gewährleistet, dass die Gasbildungen auf dieselbe Menge an Fäkalien bezogen wurden. Da die Temperaturen während der pH- Messung tiefer waren als im Lagerraum, wurde das durch den Temperaturanstieg verursachte Gas nach einer halben Stunde abgelassen.

#### 4.6.3 Resultate

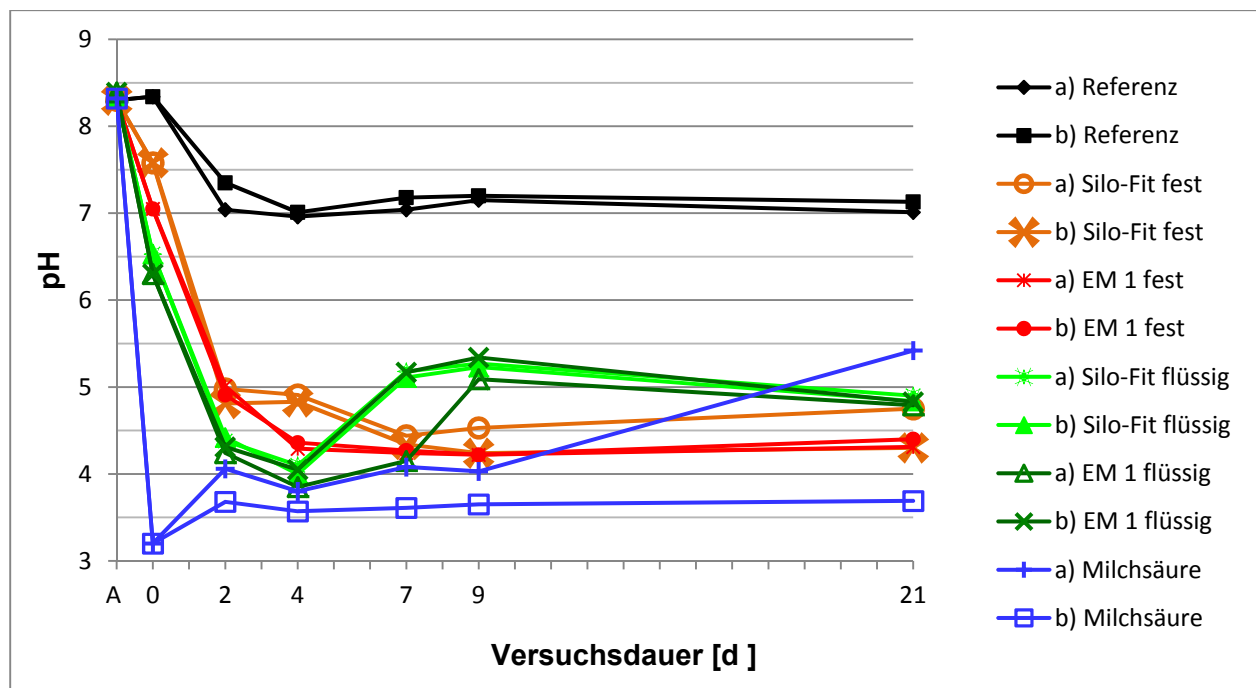


Abbildung 35 pH-Verlauf des Versuches 4. (A; Ausgangsmaterial, 0;nach Ansatzmischung).

Wie in Abbildung 35 ersichtlich, verliefen die pH- Entwicklungen der Ansätze mit MSB relativ homogen. Die flüssigen Ansätze erreichten dabei innerhalb von vier Tagen eine pH-Senkung von 4.4 pH-Einheiten von 8.4 auf 4. Danach stiegen sie jedoch bis Tag neun auf 5.7 und sanken daraufhin bis Tag 21 wieder leicht ab. Das „EM1 fest“ sank etwas schneller als „Silo-Fit fest“ und erreichte bereits am Tag vier einen pH von 4.4 während der Ansatz „Silo-Fit fest“ erst am Tag sieben dasselbe pH - Niveau aufwies. Daraufhin setzte sich die Wiederholung „Silo-Fit fest a“ ab und stieg bis Tag 21 auf einen pH von 4.8, während die anderen festen Ansätzen bis Tag neun auf einen pH von 4.2 sanken und in der Folge bis Tag 21 wieder leicht auf einen pH von 4.3 anstiegen. Durch die Zugabe von 3% Milchsäure sank der pH sofort auf 3.2. Daraufhin

verhielten sich die beiden Wiederholungen jedoch verschieden. So stieg der pH in der Wiederholung a) stetig bis auf einen pH von 5.4 am 21. Tag an, wohingegen die Wiederholung b) bis zu Ende auf einem pH von 3.7 verharrte.

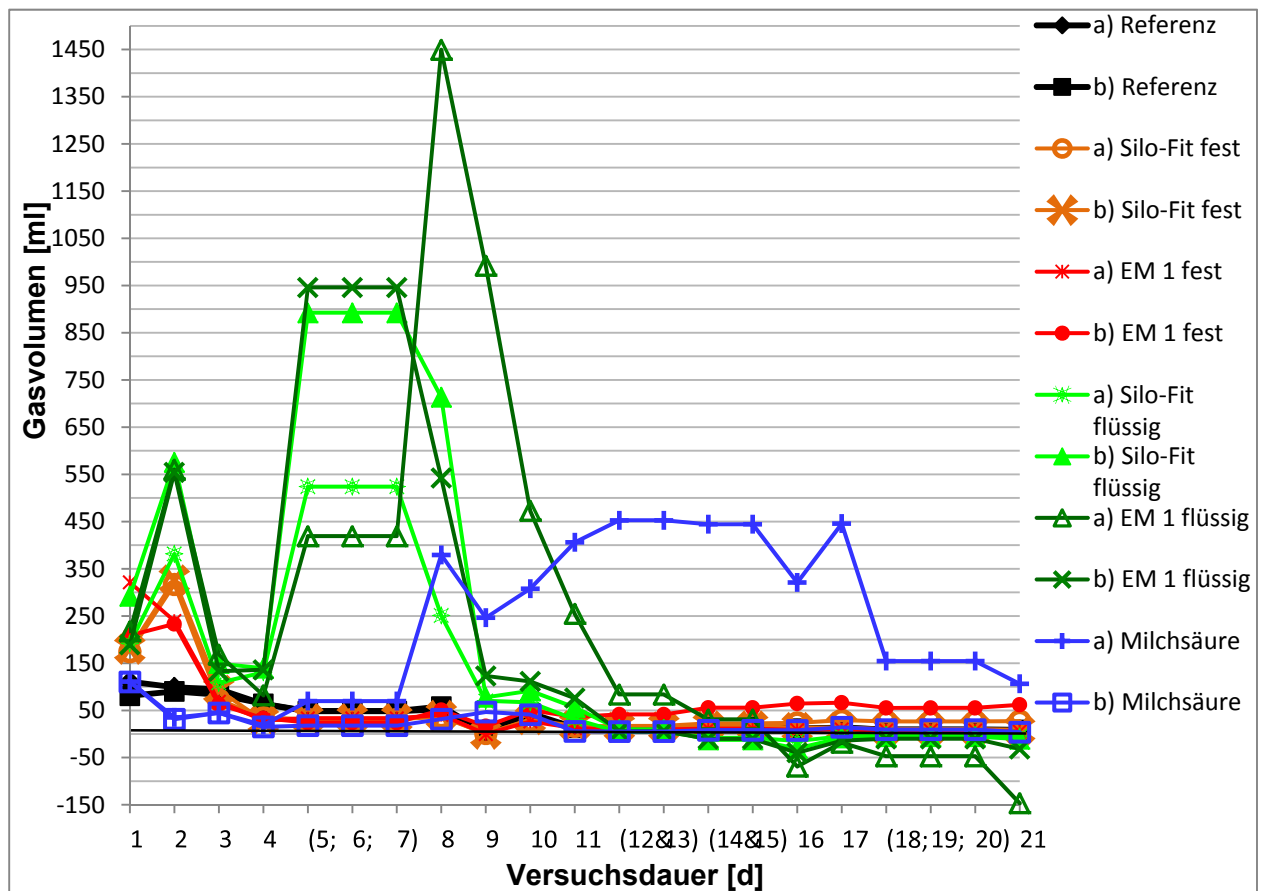


Abbildung 36 Verlauf der Gasentwicklung von jeweils 300 g Fäkalien (Frischgewicht) und den jeweiligen Zugaben (EM, Melasse) des Versuches 4.

Die Ziffern innerhalb der Klammer der horizontalen Achsenbeschriftung bedeuten, dass es sich um Mittelwerte über die jeweiligen Tage handelt.

Am Tag zwei war bei den „festen“ Ansätzen ein Maximum der Gasbildung erkennbar. Daraufhin sank die Gasbildung dieser Ansätze auf weniger als 41 ml/d mit Ausnahme der Wiederholung „EM 1b fest“ welche zeitweise bis 66 ml/d bildete. Die Gasbildung bei der Referenz betrug während den ersten vier Tagen durchschnittlich 93 ml/d, pendelte sich bis Tag elf bei ca. 40-60 ml/d ein und sank während den letzten zehn Tagen unter 15 ml/d.

Die flüssigen Ansätze wiesen einen speziellen Gasbildungsverlauf auf. So wurde ab Tag fünf bis Tag ca. neun bis zu einem Liter mehr Gas gebildet als bei den festen Ansätzen und der Referenz. Über die Tage zwölf und dreizehn pendelte sich die Gasbildung auf einem ähnlichen Niveau wie bei den übrigen Ansätzen ein. Daraufhin begannen die flüssigen Ansätze einen Unterdruck zu bilden. Dieser wurde nur einmal und zwar am Tag 16 abgelassen und stellte sich



am darauffolgenden Tag wieder ein. Der Unterdruck betrug ohne den Faktor 2.5 zwischen -8 bis -75 mBar.

Die Gasbildung der Milchsäure –Ansätze verlief höchst unterschiedlich. Während die Wiederholung a) ab Tag acht bis zu 452.5 ml Gas pro Tag bildete, war die Gasbildung bei der Wiederholung b) meist geringer als bei der Referenz und verzeichnete nach dem ersten Tag maximal 46 ml Gas pro Tag. (Abbildung 36)

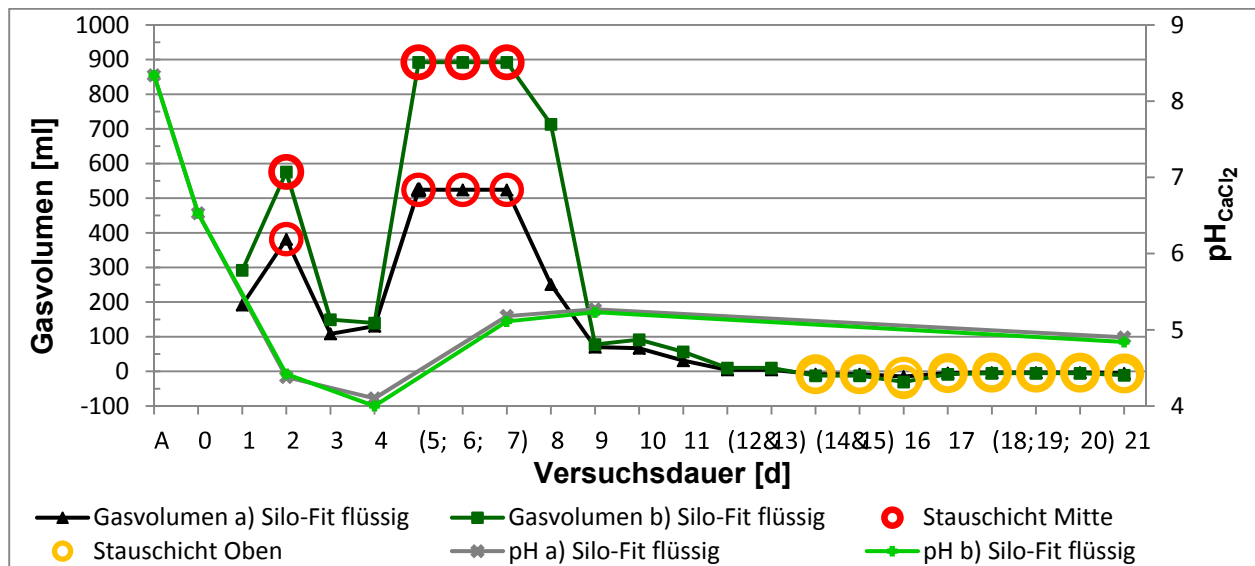


Abbildung 37 pH-Wert und Gasbildungsverlauf des Ansatzes „Silo-Fit flüssig“ des Versuches 4

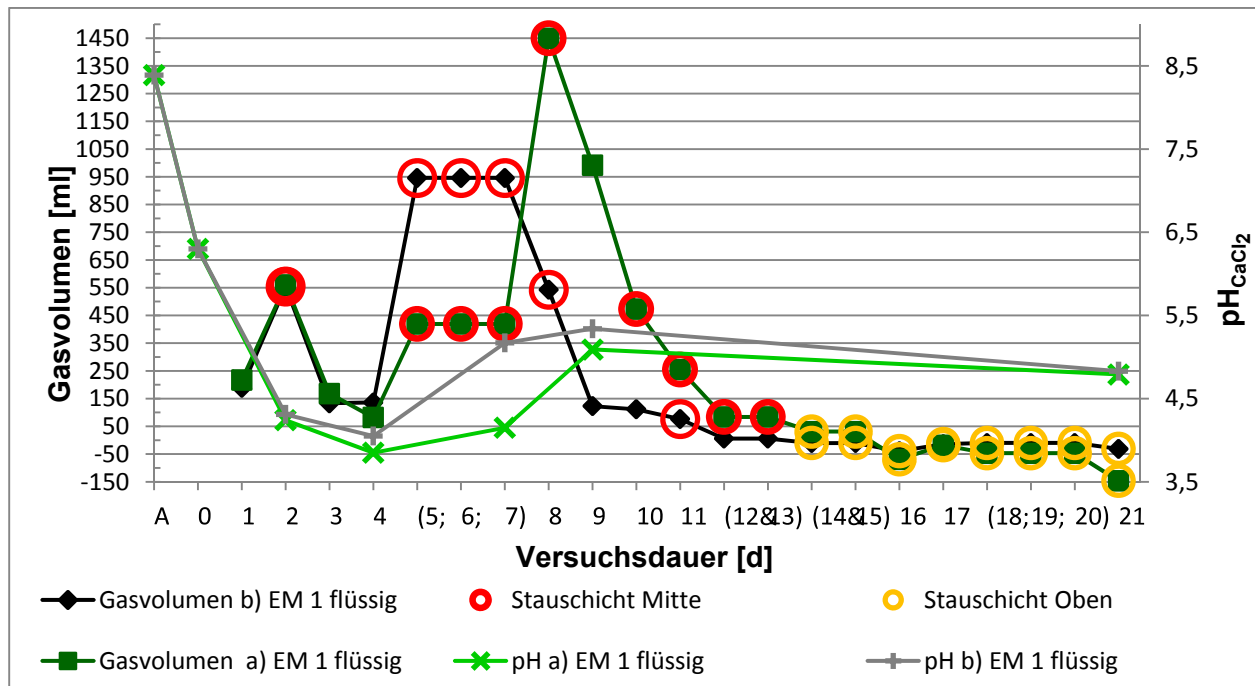


Abbildung 38 pH-Wert und Gasbildungsverlauf des Ansatzes „EM 1 flüssig“ des Versuches 4

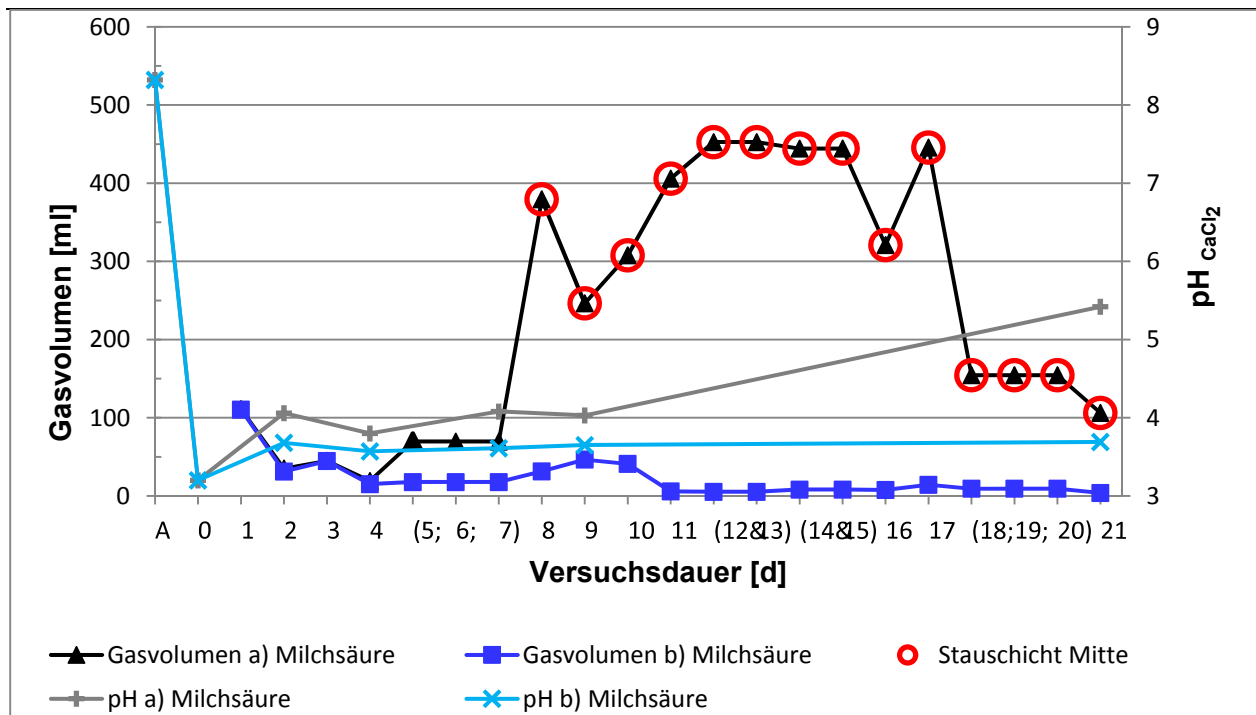


Abbildung 39 pH-Wert und Gasbildungsverlauf des Ansatzes „Milchsäure“ des Versuches 4

Bei den Abbildung 37, 38 und 39 sind zweierlei Sachen beobachtbar. Einerseits geht der pH-Anstieg, wie bereits bei Versuch 2 beobachtet, mit einer erhöhten Gasbildung einher. Andererseits konnte während der Versuchsdauer beobachtet werden, dass bei den flüssigen Ansätzen eine hohe Gasbildung erfolgte, wenn sich in den Flaschen in der Mitte des Substrates eine flüssige Stauschicht bildete. Oberhalb dieser Stauschicht konnte anhand aufsteigender Gasblasen die Gasbildung von Auge beobachtet werden. Hingegen war bei allen Ansätzen, welche einen Unterdruck erzeugten, eine flüssige Stauschicht oberhalb des Substrates beobachtbar. Der produzierte Unterdruck ging zudem mit einer leichten pH-Absenkung einher. Die Wiederholung „b) Milchsäure“, welche von den flüssigen Ansätzen als Einzige einen stabilen Verlauf aufwies, war über die gesamte Versuchsdauer gut durchmischt. Abbildung 40 zeigt ein Photo der Stauschichten.



Abbildung 40 Photo der Stauschichten. V.L.n.R. b) Silo-Fit & a) EM 1: Stauschicht oben. a) Milchsäure: Stauschicht Mitte mit erkennbarer Gasbildung oberhalb. b) Milchsäure: durchmischt.

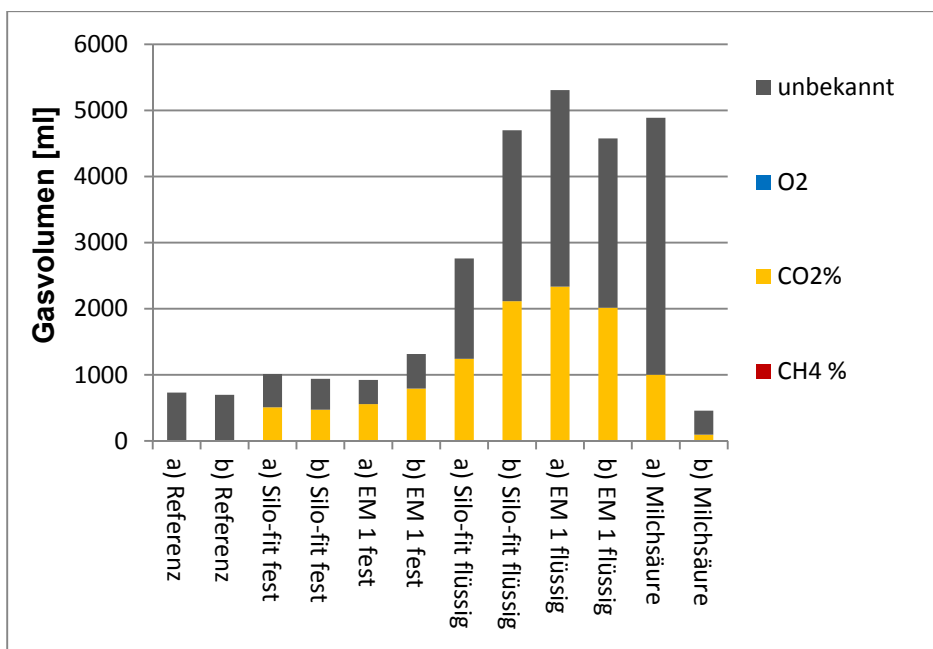


Abbildung 41 Gesamter Gasverlust innerhalb der 21 Tagen und die Gaszusammensetzung des Versuches 4.

Die Referenz bildete über den gesamten Versuch im Mittelwert 714.4 ml Gas. Dies wurde nur von der Wiederholung „b) Milchsäure“ unterschritten. Die festen Ansätze wiesen einen gesamten Gasverlust von 923 – 1315 ml auf. Die flüssigen Ansätze bildeten auf 300 g Fäkalien bezogen bis fünfmal mehr Gas als die Referenz. Es wurde bei allen Ansätzen anteilmässig wiederum am Meisten CO<sub>2</sub> gebildet. Die festen Ansätze bildeten zudem noch 0.3 Vol.-%

Methan, wohingegen bei den flüssigen Ansätzen keine Methanbildung nachgewiesen werden konnte. Sauerstoff wurde bei keinem der Ansätze gemessen (Abbildung 41).

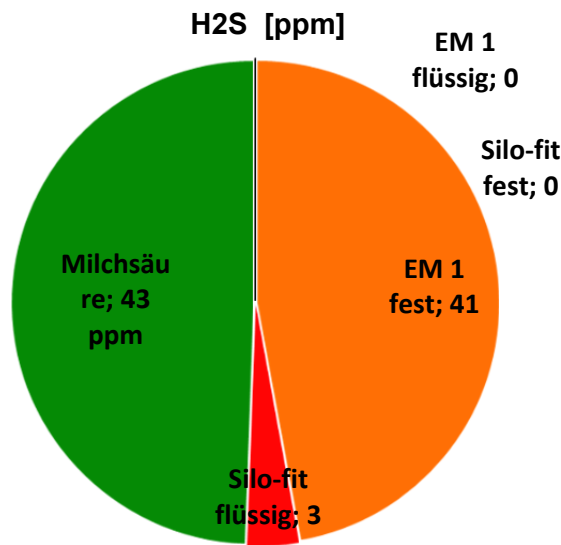


Abbildung 42 Anteile von H<sub>2</sub>S in ppm der jeweiligen Ansätze, ausser der Referenz von Versuch 4.

Die Ansätze „Silo-Fit fest“ und „EM1“ flüssig bildeten kein H<sub>2</sub>S. Auch bei „Silo-Fit flüssig“ wurde nur 3 ppm H<sub>2</sub>S gebildet. Am meisten Schwefelwasserstoff konnte bei den Ansätzen „EM 1 fest“ und „Milchsäure“ nachgewiesen werden (Abbildung 42).

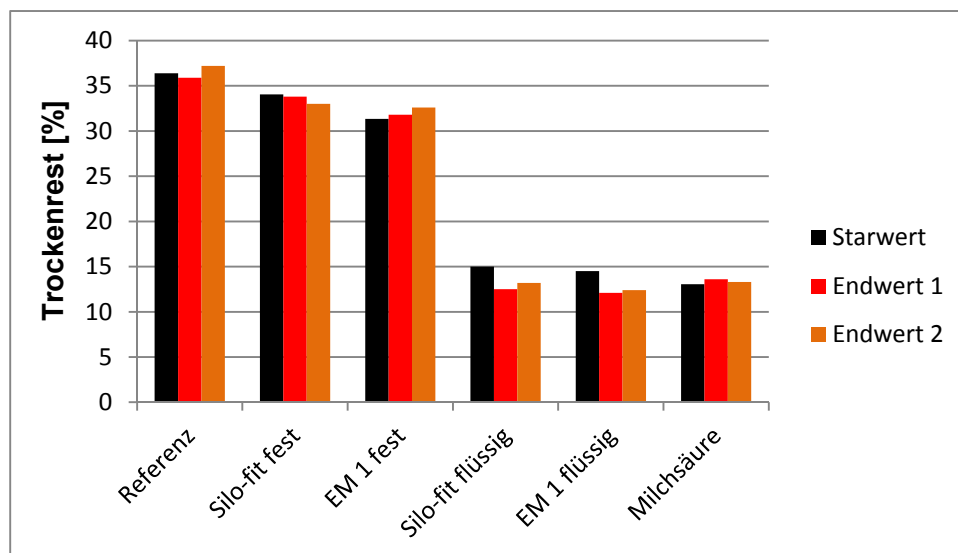


Abbildung 43 Trockenreste von Versuch 4 (Startwert; t<sub>0</sub>. Endwert; t<sub>21</sub>)

Der Trockenrest der Referenz bzw. des Ausgangsmaterials betrug 36.4 %. Verglichen dazu wurde der Starttrockenrest bei den festen Ansätzen auf 34.1% bzw. 31.3% gesenkt. Die Trockenreste der flüssigen zu fermentierenden Ansätze betrugen 15 und 14.5 %. Je höher die EM Zugabe in den Ansätzen war, umso tiefer fielen die TR aus. Der Ansatz mit Milchsäure wies einen Starttrockenrest von 13% auf. Bis Versuchsende verhielt sich der TR bei allen Ansätzen,

ausgenommen die flüssigen Ansätzen mit EM-Zugabe, relativ stabil. Bei Letzteren nahm der TR im Verlaufe des Versuchs um 1.8 bis 2.5% ab (Abbildung 41).

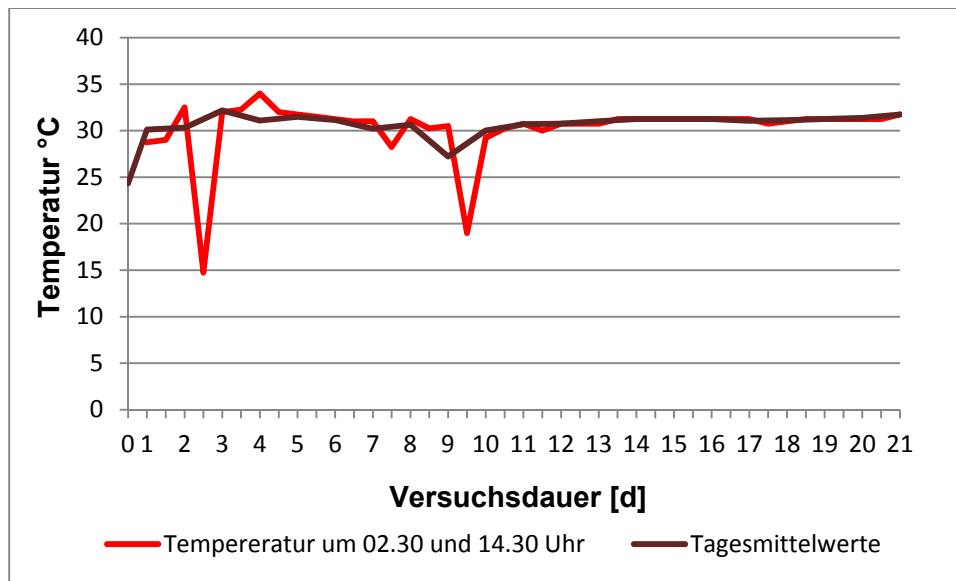


Abbildung 44 Temperaturverlauf während dem Versuch 3

Abbildung 44 kann entnommen werden, dass der Temperaturverlauf während des Versuchs ziemlich stabil knapp über 30°C verlief. Der Mittelwert betrug 31.7 °C, die maximale Temperatur 34.5 °C und die Minimale 11.75°C. Zu 95% der Zeit bewegten sich die Temperaturen zwischen 28 und 34.5 °C. Die tiefen Ausreisser wurden stets zum Zeitpunkt der pH-Messung gemessen.

Tabelle 12 Säuerungspotential und Vergärbarkeitskoeffizient nach Weissbach (2002) und Sterzenbach (2000) berechnet

	EM1 fest	Silo-Fit fest	EM1 flüssig	Silo-Fit flüssig	Wertung
TR	34.1	36.4	15	14.5	
Säuerungspotential (Z/PK)	1.15	1.15	1.15	1.15	Sollte bei 30% TR 2 betragen
Vergärbarkeitskoeffizient (VK= TR (%) + 8* Z/PK )	43.3	44.4	24.23	23.7	VK < 35 schwer vergärbar VK 35-45 mittelschwer vergärbar VK > 45 leicht vergärbar
Nötige Melassezugabe zu FS in % (m/m) für VK > 45	15	13	41	42	
Nötige Melassezugabe zu FS in % (m/m) für VK 35			27	29	

Der Tabelle 12 kann entnommen werden, dass bei den festen Ansätzen durch eine Erhöhung der Melassezugabe auf 15% die Fäkalien als leicht vergärbar klassifiziert würden. Hingegen müsste den flüssigen Ansätzen 27% Melasse zugegeben werden, damit sie immerhin als mittelschwer vergärbar gelten würden.

## Qualitative Resultate

Nach der Beimischung von EM und Melasse rochen die Proben nach der süsslichen Melasse und dem säuerlichen EM. Ab Tag zwei bis zum Schluss rochen alle Proben mit EM und Melasse säuerlich. Die Ansätze mit Milchsäurezugabe rochen zwar auch säuerlich, behielten jedoch bis zum Schluss zusätzlich einen Restduft nach Fäkalien. Die Referenz roch hingegen die ganze Zeit typisch nach Fäkalien.

### 4.6.4 Diskussion

#### Zuckerrübenmelasse vs. Zuckerrohrmelasse

In diesem Versuch konnte eine höhere pH-Senkung erzielt werden als im Versuch 3. Da sich die Menge zugegebener Melasse von 12.5 % innerhalb von 10% und 15% befindet, kann dieser Effekt vermutlich auf die Zuckerrohrmelasse zurückgeführt werden. EM Schweiz arbeitet ebenfalls mit Zuckerrohrmelasse, da sie damit bessere Ergebnisse als mit der Zuckerrübenmelasse verzeichneten. Nach EM Sanierung (kein Datum) wird dies auf verschiedene Eigenschaften der Zuckerrohrmelasse zurückgeführt. So weist die Zuckerrohrmelasse einen tieferen pH-Wert auf (5,1 gegenüber der Zuckerrübenmelasse von 8.7) und enthält weniger Stickstoff. Da der Stickstoff oftmals in Form von Proteinen vorliegt, wird die Pufferkapazität durch die Zuckerrübenmelasse im Vergleich zur Zuckerrohrmelasse erhöht (Nussbaum, 1999). Weiter weist die Zuckerrohrmelasse einen erhöhten Zuckergehalt auf, was die LF ebenfalls fördert. Zuletzt beinhaltet die Zuckerrohrmelasse die vierfache Menge an Phosphorsäure, als auch mehr Spurenelemente wie Germanium und Selen (Tabelle 13). Wie von McDonald (1991) und von Gross und Riebe (1974) beschrieben, stellen MSB komplexe Nährstoffanforderungen, welche im speziellen Vitamine, Mineralien und Aminosäuren betreffen. Als Schlussfolgerung kann daraus abgeleitet werden, dass die Zuckerrohrmelasse für MSB eine optimalere Nahrungsquelle darstellt und für die LF geeignetere Eigenschaften aufweist.

**Tabelle 13 Eigenschaften von Zuckerrübenmelasse und Zuckerrohrmelasse nach EM Sanierung (ohne Datum).**

	<b>Zuckerrübenmelasse</b>	<b>Zuckerrohrmelasse</b>
pH Wert	8,7	5,1
Gesamtzuckergehalt	42 – 47 %	45 – 49 %
Phosphorsäuregehalt	0,02 %	0,08 %
Stickstoffgehalt	1,5 – 2 %	0,2 – 0,8 %

#### EM

Der kritische pH-Wert nach Weissbach (2002) wurde von den Ansätzen „EM1 fest“ (unter 4.5) und „Silo-Fit fest“ (unter 4.6) erreicht. Letzterer benötigte jedoch drei Tage länger um dieses

Niveau zu erreichen und bei einer Wiederholung stieg der pH danach auch wieder an. Die Stabilisierung mit „EM1 fest“ verlief in diesem Versuch erfolgreicher als mit „Silo-Fit fest“. Die Anzahl Wiederholungen sind jedoch zu gering um abschliessend sagen zu können, dass EM1 besser ist. Auch wenn ein saurer pH mittels EM1 erreicht und gehalten werden konnte, wurde im Vergleich zur Stabilisierung mit der Milchsäure und der Referenz immer noch mehr Gas gebildet. Ein tieferer pH wäre wünschenswert, um auch die Gasbildung weiter zu minimieren.

### **Melassenmenge**

Mit der Zugabe von 12.5% Melasse konnte nicht wie berechnet ein pH von unter vier erreicht werden. Es ist auch unwahrscheinlich, dass der gesamte Zucker zu Milchsäure umgewandelt wird. Anhand der Berechnungen des Vergärbarkeitskoeffizienten ist ersichtlich, dass durch die Verdünnung der Ansätze einiges mehr Zucker benötigt wird, um den kritischen pH-Wert zu erreichen.

Wie genau und zuverlässig die berechneten Werte sind, ist unklar. Es wäre jedoch interessant in einem nächsten Versuch zu untersuchen, inwiefern mit den erhaltenen Werten die LF optimiert werden könnte.

### **Flüssige Ansätze**

Bei den flüssigen Ansätzen konnte keine Stabilisierung erreicht werden. Jedoch erfolgte die pH-Senkung bis Tag vier schneller und es wurde ein tieferer pH-Wert als bei den festen Ansätzen erreicht. Dies ist vermutlich auf die günstigere Umgebung für die MSB zurückzuführen, da sie sich in feuchten Substraten besser entwickeln können (Weissbach, 2002). Dies begünstigt jedoch im Gegenzug auch die Clostridien (Weissbach, 2002). Es wird jedoch vermutet, dass die Fehlgärung auf die Stauschicht, welche sich in der Mitte gebildet hat, zurückzuführen ist. Es könnte sein, dass sich dort die MSB angesammelt haben und somit die Schadorganismen oberhalb der Stauschicht die Oberhand gewinnen konnten. Dies scheint zudem plausibel, da oberhalb der Stauschicht die Gasbildung von Auge beobachtet werden konnte. Wahrscheinlich hat es sich dabei um Clostridien gehandelt, da die Enterobakterien bei dem Säuregrad von 4 bereits gehemmt werden (Gross & Riebe 1974). Um die Fäkalien in flüssiger Form zu fermentieren müsste eine gute Durchmischung gewährleistet werden. Für Laborversuche könnten dazu ein Schüttler und für grosse Menge vielleicht ein Silomischer verwendet werden. Ein Vorteil der Verdünnung der Fäkalien wäre das vereinfachte Mischen. Für die Bildung des Unterdrucks, welche sich am Ende des Versuches bei den flüssigen Ansätzen eingestellt hat, konnte keine plausible Erklärung gefunden werden.

## **Milchsäure**

Es konnte gezeigt werden, dass die Stabilisierung der Fäkalien mit Milchsäure möglich ist. Jedoch ist eine stets gute Durchmischung nötig. Bei der Wiederholung mit der hohen Gasbildung hat sich möglicherweise in der Stauschicht Milchsäure gelagert, was die Milchsäurekonzentration oberhalb soweit reduziert hat, dass sich die Clostridien aktivieren konnten. Die Fehlgärung beim Milchsäureansatz wurde mit grosser Wahrscheinlichkeit durch Clostridien verursacht, da keine Zuckerquelle zugegeben wurde. So wurde die Milchsäure entweder zu Propionat oder Butyrat und CO<sub>2</sub> verstoffwechselt. Jedoch eignet sich die direkte Milchsäure etwas weniger gut zur Geruchsneutralisierung als die Laktofermentation.

### **4.6.5 Fazit**

Die Zuckerrohrmelasse eignet sich besser zur Laktofermentation und ermöglicht eine höhere pH-Absenkung. Die gewählte Konzentration von 12.5% Melasse reicht bei drei von vier Versuchen mit fester Konsistenz, um die Fäkalien zu stabilisieren. Jedoch wird anhand von Berechnungen vermutet, dass bei einer höheren Melassezugabe der pH noch weiter gesenkt und die Gasbildung weiter minimiert werden könnte.

EM1 eignet sich ebenfalls zur LF von Fäkalien, möglicherweise sogar besser als Silo-Fit. Dies konnte aufgrund einer zu geringen Anzahl an Wiederholungen jedoch nicht abschliessend geklärt werden. Auch ist nicht bekannt ob eine Zugabe von unter 25% EM1 die LF beeinträchtigen würde.

Die LF der flüssigen Ansätze hat nicht funktioniert. Dies wird hauptsächlich auf die ungenügende Durchmischung des Substrates zurückgeführt. Es könnte aber auch an zu geringen Zuckerquellen liegen.

Mit 3% Milchsäure können die verdünnten Fäkalien stabilisiert werden. Voraussetzung ist jedoch auch hier eine gute Vermischung. Jedoch bleibt bei direkter Milchsäurezugabe ein Restduft nach Fäkalien übrig. Die anderen Ansätze mit MSB konnten alle geruchsneutralisiert werden.



## **5 Diskussion**

### **5.1 Methodik**

#### **5.1.1 Beurteilung der Stabilisierung**

Der pH- Wert in Kombination mit der Gasbildung eignet sich grundsätzlich gut, um zu beurteilen, inwiefern das Substrat stabilisiert wird. Bleibt der pH nach der Senkung auf einem tiefen Niveau kann eine sekundäre Gärung ausgeschlossen werden (Wilkinson, 2005). Etwas unklar ist, ab welcher Gasbildungsrate eine Stabilisierung angenommen werden kann. In dieser Arbeit wurde davon ausgegangen, dass dies erst bei Unterschreitung der Gasbildung der Referenz erfüllt ist. Diese Definierung stützt sich auf die Resultate von Schmid (2012).

Der kritische pH-Wert, bezogen auf den Trockenmassegehalt, stellt eine praktische Richtlinie des zu erreichenden pH-Wertes dar. Hingegen scheint der „kritische Wert“ in der Praxis, mit der hier verwendeten pH-Messmethode etwas tiefer zu liegen, als der berechnete. Dies wird daraus geschlossen, dass auch bei Erreichung des berechneten Wertes (Versuch 4) der festen Ansätze, der pH erstens teilweise wieder anstieg, als auch teilweise die Gasbildung diejenige der Referenz überschritt.

Um besser beurteilen zu können, welche Prozesse während den Versuchen stattgefunden haben, wäre es vorteilhaft gewesen, sowohl die Milchsäurebildung, die flüchtigen Fettsäuren, als auch Ethanol ebenfalls zu messen. Deshalb sollte bei einem nächsten Versuch, die zu untersuchenden Parameter auf diese Stoffgruppen ausgeweitet werden.

#### **5.1.2 Analytik**

Um Aufschluss über die Wärmeentwicklung der Versuche zu gewinnen, wäre nebst der Raumtemperatur auch die Messung der eigentlichen Substrattemperatur spannend gewesen. Mit einer durchgehend täglichen Messung der Gasbildung, hätte der Gasverlauf detailgetreuer erfasst werden können. Die Mittelwerte über die zusammengefassten Tage erlauben jedoch eine ausreichende Beurteilung der jeweiligen Gasverluste.

Das die Öffnung der Flaschen zur pH-Messung mit anschliessender N<sub>2</sub>- Flutung den LF-Prozess beeinträchtigen, wurde von Schmid (2012) untersucht und widerlegt.

---

## 5.2 Resultate

### 5.2.1 Stabilisierung der Fäkalien „fester Konsistenz“

In dieser Arbeit konnte mit Ausnahme des Versuches 4 mit dem Ansatz „EM-1 fest“ keine Stabilisierung erreicht werden. Jedoch wurde auch in diesem Fall die angestrebte geringere Gasbildung zur Referenz nicht erreicht.

Die Fehlgärungen werden auf zu gering gewählte Melassekonzentrationen, den hohen pH-Startwert und die hohe Pufferkapazität des Substrates zurückgeführt. Der Urin wirkt sich dabei eher negativ auf die Laktofermentation aus, da das durch die Harnstoffhydrolyse gebildete Ammoniak sowohl die Pufferkapazität als auch den pH erhöht (Udert et al., 2006; Gross und Riebe, 1974). Auch bei Yemaneh et al. (2012) stieg der pH von 5.3 auf 6.7 nach einer Zugabe von Urin zu den Fäzes im Verhältnis 1:10. Im Vergleich zu Yemaneh et al. (2012) konnte im Versuch 4 eine höhere pH-Senkung um 3 Einheiten in derselben Zeitdauer erreicht werden. Dies bedeutet, dass die LF-grundsätzlich funktionieren würde, der pH und die Pufferkapazität jedoch für die hier zugegebene Melasse zu hoch war. Es wird vermutet, dass durch Erhöhung der Zuckerrohrmelasse - Konzentration von über 12.5% (m/m) der pH selbst bei einem Startwert von 8.4 auf den kritischen pH-Wert gesenkt werden könnte.

Diese These wird aufgrund der Resultate von Yemaneh et al. (2014) untermauert, welche ergaben, dass eine Melassezugabe von 15% (m/m) oder 20% zu einer höheren Milchsäurebildung (bis zu 40 g/L) führen als eine Zugabe von 10% Melasse (bis 25 g/L).

Die zugegebene Menge EM wird mit  $1.42 \text{ E}+07 \text{ KbE MSB/g}$  (Silo-Fit) und  $3.25 \text{ E}+06 \text{ KbE/g}$  (EM1) als genügend betrachtet. Die Keimzahl der MSB ist somit höher als der in der Silageliteratur als nötig betrachtete Start – Keimbesatz von  $1.00 \text{ E}+05$  bis  $1.00 \text{ E}+06 \text{ KbE/g}$  (Weinberg & Muck 1996). Die empfohlene MSB-Menge von Schmid (2012) von  $8.1 \text{ E}+07 \text{ KbE / g}$  wird somit zwar nicht erreicht. Um der Empfehlung von Schmid (2012) nachzukommen, wäre jedoch eine Konzentration, wie in Versuch 2 von 57% EM nötig. Dies ist für die Praxis eine unrealistisch hohe Menge. Auch war kein auffallend besseres Resultat durch die hohe Menge MSB, im Vergleich zu einer Zugabe von 10% feststellbar.

### 5.2.2 Stabilisierung der Fäkalien „flüssiger Konsistenz“

Es konnte keine Stabilisierung der auf 15% TR stabilisierten Fäkalien erzielt werden. Dies kann einerseits auf die ungenügende Durchmischung zurückgeführt werden. Andererseits wird aber auch vermutet, dass die Melassekonzentration aufgrund der grösseren Flüssigphase massiv, bis ca. 29% (m/m) erhöht werden müsste. Die 29% entsprechen der nötigen Menge Melasse, bei der ermittelten Pufferkapazität von 149.9 g MS/Kg TM, damit das Substrat als mittelschwer vergärbare gilt (nach Weissbach, 2002). Weitere Versuche wären nötig um zu eruieren, ob sich die verdünnten Fäkalien besser zur LF eignen als Unverdünnte. Der Vorteil der flüssigen

---

Konsistenz besteht in einer vereinfachten Mischung und Homogenisierung der Fäkalien.

Andererseits würde auf diese Weise das zu verarbeitende Volumen bis um das Dreifache erhöht. Auch müsste eine stetige Durchmischung des Substrates gewährleistet sein, welche beispielsweise mithilfe eines Silomischers durchgeführt werden könnte.

### **5.2.3 Temperatureinfluss**

Durch eine stabile Temperatur um 30°C konnte im Vergleich zu hohen Temperaturschwankungen oder Temperaturen um 16°C die pH-Senkung von sechs auf drei Tagen beschleunigt werden. Eine schnelle pH-Senkung ist gerade bei fehlendem Nitrat-Gehalt entscheidend um das Risiko einer Fehlgärung zu reduzieren (Weissbach, 2002).

Durch hohe Temperaturen werden jedoch nicht nur die MSB gefördert, sondern auch die Clostridien. So fand bei gleichem Ausgangsmaterial bei 41°C eine durch Clostridien verursachte Fehlgärung statt, während bei 20°C eine Milchsäuregärung erfolgte. Bei Temperaturen von 30°C konnte zwar eine maximale Keimzahl der MSB nachgewiesen werden, wohingegen sie aber bei 15°C und 22°C eine längere Lebensdauer aufwiesen. (McDonald et al., 1991)

Zusammengefasst kann gesagt werden, dass eine stabile Temperatur wichtig für die Entwicklung der MSB ist und Temperaturen um die 20°C für die Langzeitstabilität womöglich besser geeignet sind als 30°C.

### **5.2.4 Zusätze**

Mithilfe von Zuckerrohrmelasse konnte der pH um einen pH-Wert tiefer gesenkt werden als mit der Zuckerrübenmelasse. Die Zuckerrohrmelasse scheint sich aufgrund des niedrigeren pH und der höheren Anzahl Spurenelemente, welche die MSB zum Wachstum benötigen besser zur Laktofermentation zu eignen (EM Sanierung, ohne Datum).

Sowohl EM a als auch EM- Silo-Fit eignen sich grundsätzlich für die Laktofermentation. Mit EM 1 konnte im Vergleich zu EM-Silo Fit, trotz geringerer MSB um den Faktor 2.5 eine schnellere pH-Senkung erzielt werden. Auch machte es den Anschein, als wären die LF mit EM1 stabiler als mit Silo-Fit. Jedoch sollte von EM1 vermutlich eine höhere Menge als 10% (m/m) zugeben werden. Dies kann jedoch nicht abschliessend beurteilt werden.

Etwas schwierig im Umgang mit EM ist, dass nicht mit Sicherheit gesagt werden kann, wie sich die Mikroorganismenkulturen während der Lagerung verhalten. Wahrscheinlich kann jedoch angenommen werden, dass bei Einhaltung der Ablaufdaten des Herstellers der Keimsatz demjenigen der Produktanschrift entspricht.

### **5.2.5 Milchsäure**

Der Einsatz von Milchsäure eignet sich nur für Substrate mit flüssiger Konsistenz (TR 15%). Die Zugabe von 3% Milchsäure (80%) vermochte bisher als einziger Versuch die Gasbildung der Referenz zu unterschreiten. Jedoch wird vermutet, dass die hygienisierende Wirkung bei alleiniger Zugabe von Milchsäure, geringer ausfallen würde, da die antagonistische Wirkung der MSB wegfallen würde und möglicherweise auch die Bildung der zu geringen Mengen wichtigen, flüchtigen Fettsäuren vollständig unterdrückt würde. Die Eignung der Milchsäure wird deshalb vorwiegend in einem möglichen Säuerungszusatz zur Senkung des Start-pH, für die Fermentierung der verdünnten Fäkalien gesehen.

### **5.2.6 Geruchsneutralisierung**

Wie auch bereits von Yemaneh et al. (2012) festgestellt, können unmittelbar nach Zugabe von Pflanzenkohle die unerfreulichen Geruchsemissionen neutralisiert werden. Aus diesem Grund wäre es nach Ermittlung der optimalen Melasse und EM Menge, spannend nochmals zu testen, wie sich die Pflanzenkohle von der Verora AG auf den LF-Prozess der Fäkalien auswirkt.

Yemaneh konnte zwar durch Zugabe von Kohle keine negativen Effekte auf den LF-Prozess feststellen. Auch Factura et al. (2010) erzielte durch Zugabe der Fäkalien von 75% Kohle, 16%  $\text{CaCO}_3$ , 9% Walderde und EM eine Geruchsneutralisierung, hingegen aber keine pH-Senkung.

Es konnte festgestellt, dass durch beimischen der Zuckerrohrmelasse und EM, die Fäkalien sofort einen süsslich-sauren Geruch annahmen. Durch die Zugabe von Zuckerrübenmelasse und EM, war dies nicht so ausgeprägt feststellbar. Mit der 12.5 % digen Zuckerrohrzugabe rochen die Fäkalien bereits ab einem pH von 5 säuerlich. Auch durch die Zugabe von 10%-15% Zuckerrübenmelasse vermochte der Fäkalgeruch trotz Fehlgärung gegen Ende der Versuchsdauer durch einen säuerlichen Duft ersetzt zu werden. Mit Melassekonzentrationen unter 10% konnte der Geruch jedoch nicht vollständig neutralisiert werden. Es kann geschlussfolgert werden, dass bereits alleine durch die Zugabe von EM und Melasse, die Geruchsemissionen der Fäkalien reduziert werden können. Findet jedoch eine pH Senkung auf ca. >5 statt, wird der Fäkalgeruch in den meisten Fällen vollständig durch einen säuerlichen Sauerteiggeruch ersetzt.

### 5.3 Hygienisierung

Kann eine erfolgreiche Stabilisierung erzielt werden, sollten zugleich auch die Rahmenbedingungen, für die Hygienisierung wie in Kapitel 2.4.2 beschrieben erfüllt sein.

So konnten Yemaneh et al. (2012 & 2014) bei einer Erfolgreichen LF von Fäzes, eine vollständige Eliminierung der E-Coli nach 21 Tagen nachweisen.

Eine ausführlichere Untersuchung bezüglich hygienisierende Wirkung bei Fermentierung von Kuhmist wurde von Krüger und Scheinmann (2010) an der Universität Leipzig durchgeführt. Dabei konnten innerhalb von drei Tagen bei 37°C Raumtemperatur eine Reduzierung bis unter die Nachweisgrenze von Gram-positive sowie Gram-Negative pathogene Bakterien (*Listeria monocytogenes*, *Staphylococcus aureus*, *Salmonella anatum*, *Salmonella senftenberg*, *E.Coli*) nachgewiesen werden. Auch ECBO –Viren waren ab Tag 14 nicht mehr nachweisbar. Die Anzahl an Hefen und –Schimmelpilzen konnte nicht vollständig eliminiert werden, sank jedoch um 1-2 Zehnerstufen. Die Clostridienkeimzahl blieb während der Fermentation unverändert. Die resistenten Spulwurmeiern vermochten jedoch durch die LF nicht deaktiviert werden.

### 5.4 Inhomogenität der Fäkalien von Kompotoi

Die grosse Herausforderung zur Konzipierung eines allgemeingültigen Verfahrens für die Fäkalien von Kompotoi besteht in ihrer Inhomogenität. So verändert sich vermutlich je nach Sammlung sowohl die Pufferkapazität als auch die Trockenmasse, was wiederum zu unterschiedlichen Ansprüchen, betreffend der Zuckerquelle führt.

Eine Herangehensweise könnte sein, die Materialien nach Uringehalt in Langzeit und Kurzeitsammlungen zu unterteilen und in weiteren Versuchen für beide individuell ein Verfahren zu konzipieren. Die Inhomogenität innerhalb der Fässer ist ebenfalls problematisch und sollte möglichst durch Mischung vorgebeugt werden. Ansonsten besteht die Gefahr, dass zum Beispiel innerhalb eines Fäzesklumpen keine Hygienisierung stattfindet.

### 5.5 Empfehlungen

Aufgrund der eher ungünstigen Rahmenbedingungen wie hohe Pufferkapazität und hoher pH-Startwert ist es von grosser Wichtigkeit den Prozess weit möglichst zu optimieren.

So vermindert eine stabile Temperatur um die 20°C bis 30°C das Risiko einer Fehlgärung. Eine gute Mischung der Fäkalien mit den Additiven ist zudem entscheidend, da die Milchsäurebakterien nicht mobil sind und nur dort wirken können wo sie hingelangen (Weissenbach, 2002). Auch ist es wichtig die Fäkalien stets schnellst möglichst zu laktofermentieren um der Harnhydrolyse vorzubeugen. Das Material sollte zudem so gut wie möglich gepresst werden, um den Restluftgehalt zu minimieren und auf diese Weise die aerobe Phase möglichst kurz zu halten. Zudem wird die Verwendung von Zuckerrohrmelasse

---

empfohlen, da sich diese für die Laktofermentation, die MSB und zur Geruchsneutralisierung besser eignet als Zuckerrübenmelasse.

Die Startbedingungen der MSB könnten möglicherweise durch Inkubation verbessert werden. Denn sowohl Yemaneh et al. (2012 & 2104) als auch Schmid (2012) inkubierten die MSB über 20 h bei 37°C. Nach Yemaneh (2012) befinden sich die MSB nach dieser Zeit in einem exponentiellen Wachstum. Dabei wurden die MSB mit dem M.R.S.-Medium gemischt, welches reich an Nährstoffe ist und sich nachweislich zur Vermehrung von MSB eignet (Merck Millipore, ohne Datum). Zusammengefasst verfügten die MSB in den Versuchen von Yemaneh et al. (2012 & 2104) als auch Schmid (2012) über günstigere Startbedingungen, verglichen mit der Zugabe der kühl gelagerten EM. Eine Möglichkeit für Kompotoi wäre das EM vor der Zugabe mit Melasse zu mischen und in einem warmen Wasserbad über 20 h zu inkubieren. Als alternative Möglichkeit könnte auch anstelle von Melasse das M.R.S.-Medium zur Inkubation verwendet werden, um spezifisch die MSB zu fördern.

Aufgrund des geringen Nitratgehaltes der Fäkalien (in Kapitel 0 diskutiert) bestände auch die Möglichkeit Siliersalze (Nitrat) zuzugeben, um die Clostridien bereits zu Beginn der Silage zu hemmen und das Risiko einer Fehlgärung zu reduzieren (Galler, 2011).

Eine vielversprechende Idee, ist auch die Vorfermentierung der Einstreu. Somit könnte möglicherweise einen geringeren Start-pH erreicht werden und das Material wäre bereits etwas mit MSB angeimpft. Jedoch müsste dann wahrscheinlich ein Luftdichter Behälter zur Lagerung der Einstreu benutzt werden.

## **5.6 Fazit**

Mit einer Zugabe von 3% Milchsäure (m/m) können mit Wasser verdünnte Fäkalien (Trockenmasse 15%) bei guter Durchmischung stabilisiert werden. Dabei bleibt jedoch ein Rest Fäkalgeruch übrig. Hingegen konnte durch die Zugabe von EM und Melasse ab einer pH Senkung auf ca. <5, der Fäkalgeruch in den meisten Fälle vollständig durch einen säuerlichen Geruch ersetzt werden. Grundsätzlich ist eine Stabilisierung der unverdünnten Fäkalien mit Zuckerrohrmelasse und EM ebenfalls möglich. Eine EM1 Konzentration von 25% (m/m) sollte dabei genügen. Zur Eruiierung der optimalen Melassekonzentration müssen jedoch noch weitere Versuche durchgeführt werden. Diese befindet sich wahrscheinlich über 12.5% (m/m). Um die Laktofermentation als Prozess zu standardisieren werden aber auch Optimierungen während oder nach der Sammlung nötig sein.

## 6 Literaturverzeichnis

ART/ACW. (2012). *Schweizerische Referenzmethode der Forschungsanstalten Agroscope, Band 4, E4.169.d, Methode RD-CC-Ex.*

Bai, Z. G.; Dent, D. L.; Olsson, L.; Schaep, M. E. (2008). Proxy global assessment of land degradation. *Soil Use and Management*. 24 (3), S. 223-234.

Berger, W.; Lorenz-Ladener, C. (2008). *Kompost - Toiletten. Sanitärtechnik ohne Wasser. Stufen bei Freiburg: Ökobuch Verlag.*

Bischofsberger, W.; Dichtl, N.; Rosenwinkel, K. H.; Seyfried, C. F.; Böhnke, B. (2005). *Anaerobtechnik*. Heidelberg: Springer.

Brechner, E. (2001). *Kompaktlexikon der Biologie*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.

DWA. (2008). *Neuartige Sanitärsysteme*. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA).

EM Sanierung. (ohne Datum). Webseite EM Deutschland. Abgerufen am 11. Januar 2015 von <http://www.em-sanierung.de/portal/26/56/warum-melasse-aus-zuckerrohr>

EM Schweiz. (ohne Datum). Webseite EM Schweiz. Abgerufen am 01. Januar 2015 von <http://shop.em-schweiz.ch/de/EMProdukte/SiloFIT>.

Fachstelle Bodenökologie. (2013a). *Bestimmung der Trockensubstanz und des Glühverlustes, SOP-UI1320a. Labormethode ZHAW, unveröffentlicht.*

Fachstelle Bodenökologie. (2013b). *Bestimmung des pH von Bodenproben mit 0.01 molarer CaCl<sub>2</sub>-Lösung nach Agroscope / ART, SOP-UI1350a. Labormethode ZHAW, unveröffentlicht.*

Fachstelle Bodenökologie. (2013c). *CHNO Messung mit TruSpec Macro Analyser, SOP-UI1356a. Labormethode ZHAW, unveröffentlicht.*

- Factura, H.; Bettendorf, T.; Buzie, C.; Pieplow, H.; Reckin, J.; Otterpohl, R. (2010). Terra Preta Sanitation: re-discovered from an ancient Amazonian civilisation - integrating sanitation, bio-waste management and agriculture. *Water Science & Technology*. 61(10), S. 2673–2679.
- Feachem, R. G.; Bradley, D. J.; Garelick, H.; Mara, D. D. (1983). *Sanitation and disease: health aspects of excreta and wastewater management. World Bank studies in water supply and sanitation* 3. Chichester: John Wiley & Sons.
- Galler, J. (2011). *Silagebereitung von A bis Z*. Salzburg: Landwirtschaftskammer Salzburg.
- Gross, F.; Riebe, K. (1974). *Gärfutter*. Stuttgart: Eugen Ulmer.
- Kirchmann, H.; Pettersson, S. (1995). Human urine-chemical composition and fertilizer efficiency. *Fertilizer Research*. 40, S. 149-154.
- Krause, A.; Jacobsen, S. (2011). *Aspekte der Hygienisierung im Kontext der Entwicklung eines neuen Sanitär-Ansatzes*. Berlin: Technische Universität Berlin.
- Krüger, M.; Scheinemann, H. (2010). *Labor- und Felduntersuchung zur Abfall-/Klärschlammverwertung aus dezentralen Abwasserbehandlungen für die Herstellung hochwertiger Schwarzerdeböden (Terra Preta)*. Leipzig: Veterinärmedizinische Fakultät. Institut für Bakteriologie und Mykologie.
- Langergraber, G.; Muelleggera, E. (2005). Ecological Sanitation—a way to solve global sanitation problems? *Environment International*. 31, S. 433– 444.
- Larsen, T. A.; Lienert, J. (2007). *Novaquatis Abschlussbericht. NoMix – Neue Wege in der Siedlungswasserwirtschaft*. Dübendorf: Eawag.
- Lehmann, J. (2007). Bio-energy in the black. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 5(7), S. 381–387
- Madigan, M. T.; Martinko, J. M.; Stahl, D. A.; Clark, D. P. (2013). *Brock Mikrobiologie*. Hallbergmoos: Pearson.



Mara, D.; Cairncross, S. (1989). *Guidelines for the safe use of wastewater and excreta in agriculture and aquaculture*. Genf: Weltgesundheitsorganisation (WHO).

Maurer, M.; Herlyn, A. (2006). *Zustand, Kosten und Investitionsbedarf der schweizerischen Abwasserentsorgung. Schlussbericht*. Dübendorf: EAWAG, 2006.

McDonald, P.; Henderson, A. R.; Heron, S. J. E. (1991). *The Biochemistry of Silage*. Marlow: Chalcombe Publications.

Meininger, F.; Oldenbrug, M. (2009). Characteristics of source-separated household wastewater. *Water Science & Technology*. 59(9), S. 1785-1791.

Merck Millipore. (ohne Datum). 110660 | MRS-Agar. Abgerufen am 17. Januar 2015 von [http://www.emdmillipore.com/CH/de/product/MRS-Agar,MDA\\_CHEM-110660#anchor\\_COA](http://www.emdmillipore.com/CH/de/product/MRS-Agar,MDA_CHEM-110660#anchor_COA).

Morgan, P.; Otterpohl, R.; Paramasivan, S.; Harrington, E. (2012). Ecodesign: The bottom line. *Nature*. 486, S. 186–189.

Muck, R. E. (2010). Silage microbiology and its control through additives. *Revista Brasileira de Zootecnia*. 39, S.183-191.

Nussbaum, H. (2007). *Dreck macht nicht fett - Verschmutzung bei Grassilage*. Aulendorf: Bildungs- und Wissenszentrum Aulendorf, Staatliche Lehr- und Versuchsanstalt für Viehhaltung und Grünlandwirtschaft (LVVG).

Otterpohl, R. (2000). Design of highly efficient source control sanitation and practical experiences. Wageningen, The Netherlands: EURO-Summer School DESAR.

Otterpohl, R. (2011). Fruchtbarer Boden, unsere wichtigste Energiequelle: Terra Preta. *Erneuerbare Energie - Zeitschrift für eine nachhaltige Energiezukunft*. 2.

Pahlow, G.; Hünting, K. (2011). Gärungsbiologische Grundlagen und biochemische Prozesse der Silagebereitung. In Bundesarbeitskreis Futterkonservierung (Hrsg.), *Praxishandbuch Futter- und Substratkonservierung* (8.Ausg). Frankfurt am Main : DLG-Verlag.

Pieper, B.; Poppe, S.; Schröder, A. (ohne Datum). *Tipps zur Herstellung von Topsilagen*.

Neuruppin DE: Dr. Pieper Technologie- und Produktentwicklung GmbH.

Rackl, C. (2006). *Praktische Erfahrungen mit effektiven Mikroorganismen (EM) in Pflanzenbau und Tierhaltung. Diplomarbeit*. Freising: Fachhochschule Weihenstephan, Fachbereich Land- und Ernährungswirtschaft.

Salminen, S.; von Wright, A.; Ouwehand, A. (2004). *Lactic Acid Bacteria. Microbiological and functional aspects*. New York : Marcel Dekker, Inc.

Sato, H.; Hirose, T.; Kimura, T.; Moriyama, Y.; Nakashima, Y. (2001). Analysis of malodorous volatile substances of human waste: feces and urine. *Journal of Health Science*, 47(5), S. 483–490.

Schmid, P. (2012). *Laktofermentation von Fischgülle. Bachelorarbeit ZHAW*, unveröffentlicht.

Schmid, P. und Schönborn, A. (2014). *Schlussbericht. KTI Projekt „Urban Farmers“.*  
*Workpackage 5: Zero-Waste-Systems. 100% output, zero waste on the roof*. Wädenswil:  
Fachstelle Ökotechnologie, ZHAW, unveröffentlicht.

Schroeder, J.W. (2004). *Silage fermentation and preservation*. North Dakota : North Dakota State University Fargo.

Sterzenbach, M. (2000). *Nutzungsmöglichkeiten von Aufwüchsen extensiv bewirtschafteten Grünlandes durch Mutterkühe. Dissertation*. Giessen: Justus-Liebig-Universität.

Udert, K. M.; Larsen, T. A.; Gujer, W. (2006). Fate of major compounds in source-separated urine. *Water Science & Technology* . 54 (11-12), S. 423-420, 2006.

Verora. (ohne Datum). Webseite Verora. Abgerufen am 01. Januar 2015 von  
<http://www.verora.ch/page/de/verora-pflanzenkohle>.

Vinnerås, B. (2002). *Possibilities for sustainable nutrient recycling by faecal separation combined with urine diversion*. Uppsala: Swedish University of Agricultural Sciences.

- Weinberg, Z. G.; Muck, R. E. (1996). New trends and opportunities in the development and use of inoculants for silage. *FEMS Microbiological Reviews*. 19, S. 53-68.
- Weissbach, F. (2002). *Grundlagen und Praxis der Produktion guter Grassilagen*. BAL Gumpenstein: 8. Alpenländisches Expertenforum.
- WHO. (2000). *Global water supply and sanitation assessment 2000 report*. USA: World Health Organization and United Nations Children's Fund
- Wilhelm, H.; Wurm, K. (1999). *Futterkonservierung und Qualität*. Graz: Leopold Stocker Verlag.
- Wilkinson, J. M. (2005). *Silage*. Lincoln: Chalcome Publications.
- Yemaneh, A.; Bulbo, M.; Factura, H.; Buzie, C.; Otterpohl, R. (2012). *Development of system for waterless collection of human excreta by application of lactic acid fermentation process in Terra Preta Sanitation system*. Hamburg: Institute of Wastewater Management and Water Protection, Hamburg University of Technology.
- Yemaneh, A.; Bulbo, M.; Schmale, C.; Otterpohl, R. (2014). Investigation of Low-Cost Sugar Supplement for Lactic Acid Fermentation in Terra Preta Sanitation System. In Bettendorf, T.; Wendland, C.; Otterpohl, R. (Hrsg.), *Terra Preta Sanitation*. Osnabrück: Deutsche Bundesstiftung Umwelt.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Anfallende Nährstoffe und organische Substanz in g pro Person und Tag (Medianwerte) nach DWA (2008).....	4
Abbildung 2 Überlebensdauer von ausgewählten Pathogenen im Boden und auf Pflanzen bei 20-30°C nach Feachem et al. (1983) .....	5
Abbildung 3 Entwicklung der Gärsäuren und pH-Werte bei einwandfreier Milchsäuregärung nach Gross und Riebe (1974) .....	8
Abbildung 4 Buttersäuregärung in feuchten, zuckerarmen Silagen gemäss Pahlow und Hünting (2011) .....	9
Abbildung 5 Kritische pH- Werte von Silagen in Abhängigkeit des Trockensubstanzgehaltes nach Weissbach (2002).....	11
Abbildung 6 Sammelbehälter Fäkalien.....	16
Abbildung 7 Photo der Ansätze von Versuch 4 in GB21 Flaschen .....	19
Abbildung 8 Photo der Ansätze des Vorversuchs in den selbst gebastelten Flaschen.....	19
Abbildung 9 Formel zur Berechnung des entstandenen Gasvolumens bei Normbedingungen (0 °C, 1013 mbar).....	21
Abbildung 10 pH-Verlauf des Vorversuches .....	24
Abbildung 11 Verlauf der Gasentwicklung von jeweils 300 g Fäkalien (Frischgewicht) und den jeweiligen Zugaben (EM, Melasse) des Vorversuchs. Die Ziffern innerhalb der Klammer der horizontalen Achsenbeschriftung bedeuten, dass es sich um Mittelwerte über die jeweiligen Tage handelt .....	25
Abbildung 12 Gesamter Gasverlust innerhalb der 8 Tagen und die Gaszusammensetzung nach Vol.-%.....	25
Abbildung 13 Temperaturverlauf während dem Vorversuch .....	26
Abbildung 14 Mittelwerte mit Minimum -und Maximumbalken des pH-Verlaufs von Versuches 1. (Das Zeitintervall zwischen Tag 7 und 50 beträgt nur 10 Zeiteinheiten und entspricht somit nicht dem zeitlichen Verlauf) .....	31
Abbildung 15 Trockenreste von Versuch 1 (Startwert; t0. Endwert; t50) .....	32
Abbildung 16 pH-Verlauf des Versuches 2. (A; Ausgangsmaterial, 0;nach Ansatzmischung).....	35
Abbildung 17 Verlauf der Gasentwicklung von jeweils 300 g Fäkalien (Frischgewicht) und den jeweiligen Zugaben (EM, Melasse) des Versuches 2. Die Ziffern innerhalb der Klammer der horizontalen Achsenbeschriftung bedeuten, dass es sich um Mittelwerte über die jeweiligen Tage handelt. ....	36
Abbildung 18 Mittelwerte des pH- und Gasbildungsverlaufs des Ansatzes „5% M“ des Versuches 3 .....	36

---

Abbildung 19 Mittelwerte des pH- und Gasbildungsverlaufs des Ansatzes „7.5 % M“ des Versuches 2 .....	37
Abbildung 20 Mittelwerte des pH- und Gasbildungsverlaufs des Ansatzes „10 % M“ des Versuches 2 .....	37
Abbildung 21 Gesamter Gasverlust innerhalb der 21 Tagen und die Gaszusammensetzung des Versuches 2. Die Balken stellen die Minima- und Maximawerte des gesamten Gasverlustes dar. ....	38
Abbildung 22 Anteile von H <sub>2</sub> S in ppm der jeweiligen Ansätze von Versuch 2 .....	38
Abbildung 23 Trockenreste von Versuch 2 (Startwert; t <sub>0</sub> . Endwert; t <sub>21</sub> ) .....	39
Abbildung 24 org. Trockenreste von Versuche 2 .....	39
Abbildung 25 Temperaturverlauf während dem Versuch 2 .....	40
Abbildung 26 pH-Verlauf des Versuches 3. (0;nach Ansatzmischung).....	44
Abbildung 27 Verlauf der Gasentwicklung von jeweils 300 g Fäkalien (Frischgewicht) und den jeweiligen Zugaben (EM, Melasse) des Versuches 3. Die Ziffern innerhalb der Klammer der horizontalen Achsenbeschriftung bedeuten, dass es sich um Mittelwerte über die jeweiligen Tage handelt. ....	45
Abbildung 28 Gesamter Gasverlust innerhalb der 21 Tagen und die Gaszusammensetzung des Versuches 3. Die Balken stellen die Minima- und Maximawerte des gesamten Gasverlustes dar. ....	46
Abbildung 29 Anteile von H <sub>2</sub> S in ppm der jeweiligen Ansätze von Versuch 3.....	46
Abbildung 30 Trockenreste von Versuch 3. (Startwert; t <sub>0</sub> . Endwert; t <sub>21</sub> ) .....	47
Abbildung 31 Temperaturverlauf während dem Versuch 3 .....	47
Abbildung 32 Titration mit Milchsäure (80%) von 20 g Fäkalien, gemischt mit 30 ml deionisiertem Wasser.....	51
Abbildung 33 Trockenrestgehalte des Titrationversuchs .....	51
Abbildung 34 Fäkalien gemischt mit Wasser in einem Verhältnis von 1:1.5.....	52
Abbildung 35 pH-Verlauf des Versuches 4. (A; Ausgangsmaterial, 0;nach Ansatzmischung).....	55
Abbildung 36 Verlauf der Gasentwicklung von jeweils 300 g Fäkalien (Frischgewicht) und den jeweiligen Zugaben (EM, Melasse) des Versuches 4. Die Ziffern innerhalb der Klammer der horizontalen Achsenbeschriftung bedeuten, dass es sich um Mittelwerte über die jeweiligen Tage handelt. ....	56
Abbildung 37 pH-Wert und Gasbildungsverlauf des Ansatzes „Silo-Fit flüssig“ des Versuches 4 .....	57
Abbildung 38 pH-Wert und Gasbildungsverlauf des Ansatzes „EM 1 flüssig“ des Versuches 4 .....	57
Abbildung 39 pH-Wert und Gasbildungsverlauf des Ansatzes „Milchsäure“ des Versuches 4 ..	58

---

---

Abbildung 40 Photo der Stauschichten. V.L.n.R. b) Silo-Fit & a) EM 1: Stauschicht oben. a) Milchsäure: Stauschicht Mitte mit erkennbarer Gasbildung oberhalb. b) Milchsäure: durchmischt. ....	59
Abbildung 41 Gesamter Gasverlust innerhalb der 21 Tagen und die Gaszusammensetzung des Versuches 4. ....	59
Abbildung 42 Anteile von H <sub>2</sub> S in ppm der jeweiligen Ansätze, ausser der Referenz von Versuch 4. ....	60
Abbildung 43 Trockenreste von Versuch 4 (Startwert; t <sub>0</sub> . Endwert; t <sub>21</sub> ) ....	60
Abbildung 44 Temperaturverlauf während dem Versuch 3 ....	61
Abbildung 45 Laboranalysen der Pflanzenkohle von Verora ....	98

---

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Allgemeine Gärungen und einige der beteiligten Organismen nach Madigan et al. (2013) und Wilkinson (2005) .....	10
Tabelle 2 C/N – Verhältnis und Trockenreste der verwendeten Materialien von Kompotoi .....	17
Tabelle 3 Materialzusammensetzung der Sammlung .....	18
Tabelle 4 Mikroorganismen in EM Silo-Fit und EM 1 nach Produktanschrift und McDonald (1991) und Madigan et al., 2013 .....	20
Tabelle 5 Versuchsübersicht des Vorversuches (absolute Mengenangaben sind dem Anhang I zu entnehmen) .....	23
Tabelle 6 Versuchsübersicht von Versuch 1 (Absolute Mengenangaben sind dem Anhang II zu entnehmen) .....	29
Tabelle 7 Gehalt von BIO-LIT® gemäss Produktanschrift .....	30
Tabelle 8 Versuchsübersicht von Versuch 2 (absolute Mengenangaben sind dem Anhang III zu entnehmen) .....	34
Tabelle 9 Versuchsübersicht von Versuch 3 (absolute Mengenangaben sind dem Anhang IV zu entnehmen) .....	43
Tabelle 10 Versuchsübersicht von Versuch 4 (absolute Mengenangaben sind dem Anhang V zu entnehmen) .....	53
Tabelle 11 Inhaltstoffe Zuckerrohrmelasse gemäss Produktanschrift.....	54
Tabelle 12 Säuerungspotential und Vergärbarkeitskoeffizient nach Weissbach (2002) und Sterzenbach (2000) berechnet.....	61
Tabelle 13 Eigenschaften von Zuckerrübenmelasse und Zuckerrohrmelasse nach EM Sanierung (ohne Datum). .....	62
Tabelle 14 Absolute Werte der Versuchsübersicht des Vorversuches .....	82
Tabelle 15 pH-Werte des Vorversuches .....	82
Tabelle 16 Druckmessungen in mBar des Vorversuches .....	83
Tabelle 17 Gaszusammensetzung des Vorversuches .....	83
Tabelle 18 Absolute Werte der Versuchsübersicht des Versuches 1 .....	84
Tabelle 19 pH-Werte des Versuches 1 .....	84
Tabelle 20 Druckmessungen in mBar des Versuches 1 .....	85
Tabelle 21 Gaszusammensetzung des Versuches 1 .....	86
Tabelle 22 Absolute Werte der Versuchsübersicht des Versuches 2 .....	87
Tabelle 23 pH-Werte des Versuches 2 .....	87
Tabelle 24 Druckmessungen in mBar des Versuches 2 .....	88
Tabelle 25 Gaszusammensetzung des Versuches 2 .....	89
Tabelle 26 Absolute Werte der Versuchsübersicht des Versuches 3 .....	90

---

---

Tabelle 27 pH-Werte des Versuches 3 .....	90
Tabelle 28 Druckmessungen in mBar des Versuches 3 .....	91
Tabelle 29 Gaszusammensetzung des Versuches 3 .....	91
Tabelle 30 Rohdaten Titration .....	92
Tabelle 31 Berechnung Titration .....	93
Tabelle 32 Absolute Werte der Versuchsübersicht des Versuches 4 .....	94
Tabelle 33 gemessene pH-Werte des Versuches 4 .....	95
Tabelle 34 Druckmessungen in mBar des Versuches 4 .....	95
Tabelle 35 Gasmessung des Versuches 4 .....	96
Tabelle 36 Dichtebestimmung der verwendeten Materialien zur Berechnung des Gasvolumens .....	97



## **Anhangsverzeichnis**

**Anhang I - Rohdaten Vorversuch**

**Anhang II - Rohdaten Versuch 1**

**Anhang III - Rohdaten Versuch 2**

**Anhang IV - Rohdaten Versuch 3**

**Anhang V - Rohdaten Titrationsversuch**

**Anhang VI - Rohdaten von Versuch 4**

**Anhang VII - Dichtebestimmung der Materialien**

**Anhang VIII - Laboranalysen der Pflanzenkohle von Verora**

**Anhang IX – Aufgabenstellung**

**Anhang X - Plagiatserklärung**

## Anhang I – Rohdaten Vorversuch

Tabelle 14 Absolute Werte der Versuchsübersicht des Vorversuches

<b>GEWICHT (eingewogen)</b>	<b>Referenz</b>	<b>10%M;10%EM</b>
Fäkalien in g	300	300
EM-Silo-fit in g		30
Melasse in g		30
Gesamtgewicht	300	360
<b>VOLUMEN (berechnet)</b>		
Fäkalien in ml	352.94	352.94
EM-Silo-fit in ml	0.00	30.00
Melasse in ml	0.00	15.00
Gesamtvolumen	330.00	384.00
<b>Dichte Gesamtmaterial</b>	<b>0.91</b>	<b>0.94</b>
Mittelwert der Dichte des Gesamtmaterial	0.92	
Mittelwert Volumen (ml) von 5 g	5.42	

Tabelle 15 pH-Werte des Vorversuches

		<b>0 (nach Mischung der Ansätze)</b>	<b>t1</b>	<b>t2</b>	<b>t3</b>	<b>t8</b>
a)	Referenz	6.8	7.1	6.7	7.3	7.0
b)	Referenz	6.8	7.2	7.2	7.3	7.4
a)	10%M;10%EM	7.2	5.8	5.1	4.9	4.4
b)	10%M;10%EM	7.2	5.7	5.0	4.8	4.4

**Tabelle 16 Druckmessungen in mBar des Vorveruches**

		<b>t1</b>	<b>t2</b>	<b>t3</b>	<b>t8</b>
a)	Referenz	67	75	20	30
b)	Referenz	53	84	16	26
a)	10%M;10%EM	217	155	141	247
b)	10%M;10%EM	90	163	158	25
<b>Mittelwert Tagestemperatur °C</b>		21.25	16.5	18.75	15.75

**Tabelle 17 Gaszusammensetzung des Vorversuchs**

	<b>CH4 [Vol %]</b>	<b>CO2 [Vol %]</b>	<b>O2 [Vol %]</b>	<b>H2S ppm</b>
<b>10%M; 10%EM</b>	0.9	27	0.2	11

## Anhang II – Rohdaten Versuch 1

Tabelle 18 Absolute Werte der Versuchsübersicht des Versuches 1

	Referenz	7.5% M	7.5 % M;S	7.5% M;K	7.5% M; KS	5%M	5%M; KS	2.5% M	2.5% M; SK
<b>Fäkalien in g</b>	300	300	300	300	300	300	300	300	300
<b>EM Silo-Fit in g</b>	30	30	30	30	30	30	30	30	30
<b>Zuckerrüben-melasse in g</b>		22.5	22.5	22.5	22.5	15	15	7.5	7.5
<b>Pflanzkohle in g</b>				30	30		30		10
<b>Steinmehl in g</b>			30		30		30		0

Tabelle 19 pH-Werte des Versuches 1

		Ausgangsmaterial	t1	t2	t5	t7	t50
a)	Referenz	7.2	7.0	7.1	7.0	7.4	6.4
b)	Referenz	7.2	7.3	7.7	7.1	7.5	6.7
c)	Referenz	7.2	7.4	7.6	7.2	7.4	6.8
a)	7.50%	7.2	6.0	6.0	5.8	6.3	5.9
b)	7.50%	7.2	6.0	5.9	6.1	5.8	5.9
c)	7.50%	7.2	6.0	5.9	6.0	5.9	6.5
a)	7.5% S	7.2	6.1	5.9	5.3	5.5	6.5
b)	7.5% S	7.2	6.1	5.8	5.6	5.5	6.6
a)	7.5% K	7.2	6.1	5.8	5.7	5.5	6.6
b)	7.5% K	7.2	6.0	5.8	5.5	5.6	6.5
a)	7.5 % KS	7.2	6.1	5.8	5.6	5.7	6.5
b)	7.5 % KS	7.2	6.2	6.4	5.9	5.9	6.6
a)	5%	7.2	6.1	5.9	5.7	6.5	6.7

b)	5%	7.2	6.1	6.1	5.8	5.9	6.8
c)	5%	7.2	6.1	6.5	6.4	6.2	6.8
a)	5% KS	7.2	6.1	6.6	6.5	6.6	6.8
b)	5% KS	7.2	5.9	6.0	6.0	5.9	6.8
c)	5% KS	7.2	5.9	5.9	5.7	6.0	6.7
a)	2.50%	7.2	6.7	6.8	6.6	6.9	6.7
b)	2.50%	7.2	6.6	6.9	6.6	6.9	6.7
c)	2.50%	7.2	6.2	6.9	6.5	7.0	6.7
a)	2.5% KS	7.2	6.6	7.0	7.0	7.1	6.8
b)	2.5% KS	7.2	7.1	7.1	7.0	7.3	6.9
c)	2.5% KS	7.2	6.3	7.0	6.9	7.0	6.9

Tabelle 20 Druckmessungen in mBar des Versuches 1

		t1	t2	t3	t(4&5)/2	t6	t7
a)	Referenz	47	83	64	36.5	33	35
b)	Referenz	14	89	57	37	45	37
c)	Referenz	20	102	69	36.5	37	32
a)	0.075	517	491	129	49	35	35
b)	0.075	605	495	128	46	33	31
c)	0.075	390	471	128	41	31	25
a)	7.5% S	306	633	201	61.5	51	41
b)	7.5% S	282	608	178	49	55	30
a)	7.5% K	308	410	191	68.5	0	0
b)	7.5% K	267	485	224	83	64	52
a)	7.5 % KS	350	510	194	59	40	29
b)	7.5 % KS	159	33	27	7.5	0	0
a)	5%	563	453	157	53.5	69	70

b)	5%	544	502	150	56.5	75	73
c)	5%	533	513	157	53	49	53
a)	5% KS	445	371	162	47.5	80	72
b)	5% KS	390	382	167	49	82	72
c)	5% KS	445	450	166	47	50	56
a)	2.50%	556	181		13.5	82	70
b)	2.50%	570	190	143	68.5	66	83
c)	2.50%	508	289	162	60	87	153
a)	2.5% KS	297	194	111	44.5	43	77
b)	2.5% KS	Vers.offen	122	110	45.5	31	61
c)	2.5% KS	256	125	107	42.5	34	62

Tabelle 21 Gaszusammensetzung des Versuches 1

	CH4 [Vol. %]	CO2 [Vol. %]	O2 [Vol. %]	H2S [ppm]
Referenz	0.5	16.5	1.1	20
7.50%	0.7	44	0	36
7.5% S	0.6	42	0	39
7.5% K	0.5	44	0	33
7.5% KS	0.7	42	0	34
5%	0.7	42	0	50
2.50%	1	41	0	39

## Anhang III - Rohdaten Versuch 2

Tabelle 22 Absolute Werte der Versuchsübersicht des Versuches 2

<b>GEWICHT (eingewogen)</b>	<b>R</b>	<b>5% M</b>	<b>7.5% M</b>	<b>10 % M</b>	<b>15% M</b>
Fäkalien in g	300.00	300.00	300.00	300.00	300.00
EM-Silo-fit in g	170.00	170.00	170.00	170.00	170.00
Melasse in g		15.00	22.50	30.00	45.00
Gesamtgewicht	470.00	485.00	492.50	500.00	515.00
<b>VOLUMEN (berechnet)</b>					
Fäkalien in ml	352.94	352.94	352.94	352.94	352.94
EM-Silo-fit in ml	170.00	170.00	170.00	170.00	170.00
Melasse in ml	0.00	11.54	17.31	23.08	34.62
Gesamtvolumen	522.94	534.48	540.25	546.02	557.56
<b>Dichte Gesamtmaterial</b>	0.90	0.91	0.91	0.92	0.92
Volumen (ml) von 5 g	5.56	5.51	5.48	5.46	5.41
Mittelwert Volumen (ml) von 5 g	5.49				

Tabelle 23 pH-Werte des Versuches 2

	<b>A (Ausgangsmaterial)</b>	<b>t0 (nach Mischung der Ansätze)</b>	<b>t1</b>	<b>t2</b>	<b>t3</b>	<b>t6</b>	<b>t8</b>	<b>t10</b>
<b>Referenz</b>	7.5	7.3	6.4	6.4	6.5	6.3	6.7	6.3
<b>Referenz</b>	7.5	7.3	6.6	6.9	7.8	6.6	6.5	6.6
<b>5% M</b>	7.5	6.8	6.3	5.9	5.7	5.6	6.3	6.4
<b>5% M</b>	7.5	6.8	6.3	6.0	5.7	5.7	6.3	6.4

<b>7.5% M</b>	7.5	6.8	6.2	5.8	5.5	4.9	4.9	5.3
<b>7.5% M</b>	7.5	6.8	6.1	5.8	5.5	5.0	5.0	5.9
<b>10% M</b>	7.5	6.8	6.2	5.9	5.5	4.7	4.6	4.6
<b>10% M</b>	7.5	6.8	6.2	5.9	5.6	4.9	5.0	5.0
<b>15% M</b>	7.5	6.8	6.2	6.0	5.7	4.9	4.9	4.7
<b>15% M</b>	7.5	6.8	6.2	5.9	5.5	4.5	4.4	4.4

Tabelle 24 Druckmessungen in mBar des Versuches 2

		t1	t2	t3	t(4&5)/ 2	t6	t7	t8	t9	t10	t(11&1 2)/2	t13	t(14&1 5)/2	t(SUM 16- 21)/6
a)	R	99	88	137	245	219	188	144	175	161	92.5	6	93.5	0
b)	R	117	145	168	242.5	250	148	179	238	178	99.5	24	117.5	2
a)	5%	286	376	411	400.5	441	632	2556	421	275	124	79	121.5	14
b)	5%	384	709	396	408	403	658	1476	235	252	102.5	72	138.5	7
a)	7.50%	154	373	446	436	361	210	701	1028	1556	478	332	224	38
b)	7.50%	345	385	415	370.5		187	670	997	1637	562	358	225.5	52
a)	10%	251	363	398	551	266	122	248	298	426	876	986	710	439
b)	10%	282	320	407	544	284	119	302	380	646	1350.5	1074	947.5	133
a)	15%	236	297	383	803.5	305	80	202	156	187	218.5	221	368	229
b)	15%	211	265	385	851	281	79	171	151	136	136	94	143	37
<b>Temperatur °C zum Ablesezeitpunkt</b>		16	15.5	16	14	15.5	26.5	18	21.5	22.75	22	30.75	18.5	17.25



**Tabelle 25 Gaszusammensetzung des Versuches 2**

	<b>CH4 [Vol. %]</b>	<b>CO2 [Vol. %]</b>	<b>O2 [Vol. %]</b>	<b>H2S [ppm]</b>
<b>Referenz</b>	1.6	34	0.4	↑↑↑↑
<b>5% M</b>	1.1	52	-	206
<b>7.5% M</b>	0.6	52	-	153
<b>10% M</b>	0.2	49	-	168
<b>15% M</b>	0.3	44	-	51

	<b>CH4 [%]</b>	<b>CO2 [%]</b>	<b>O2 [%]</b>	<b>H2S [ppm]</b>
<b>Referenz</b>	<b>1.6</b>	<b>34</b>	<b>0.4</b>	↑↑↑↑
<b>5% M</b>	<b>1.1</b>	<b>52</b>	-	<b>206</b>
<b>7.5% M</b>	<b>0.6</b>	<b>52</b>	-	<b>153</b>
<b>10% M</b>	<b>0.2</b>	<b>49</b>	-	<b>168</b>
<b>15% M</b>	<b>0.3</b>	<b>44</b>	-	<b>51</b>

## Anhang IV - Rohdaten Versuch 3

Tabelle 26 Absolute Werte der Versuchsübersicht des Versuches 3

GEWICHT (eingewogen)	Referenz	10%M; 10%EM	10%M; 15%EM	15%M; 10%EM	15%M; 15%EM
Fäkalien in g	300	300	300	300	300
EM-Silo-fit in g	0	30	45	30	45
Melasse in g	0	30	30	45	45
Gesamtgewicht	300	360	375	375	390
<b>VOLUMEN (berechnet)</b>					
Fäkalien in ml	352.94	352.94	352.94	352.94	352.94
EM-Silo-fit in ml	0.00	30.00	45.00	30.00	45.00
Melasse in ml	0.00	23.08	23.08	34.62	34.62
Gesamtvolumen	352.94	406.02	421.02	417.56	432.56
<b>Dichte Gesamtmaterial</b>	0.85	0.89	0.89	0.90	0.90
Volumen (ml) von 5 g	5.88	5.64	5.61	5.57	5.55
Mittelwert Volumen (ml) von 5 g	5.65				

Tabelle 27 pH-Werte des Versuches 3

		t0 (nach Mischung der Ansätze)	t1	t2	t3	t7	t8	t21
a)	Referenz	7.9	7.1	7.1	7.2	7.1	7.9	7.7
b)	Referenz	7.9	7.8	7.7	7.3	7.7	7.8	7.6
a)	10%M; 10%EM	8.4	6.1	5.5	5.1	5.4	6.3	7.0
b)	10%M; 10%EM	8.4	6.2	5.3	4.9	4.5	4.5	6.7
a)	10%M; 15%EM	8.2	5.9	5.3	5.2	6.3	6.6	6.7
b)	10%M; 15%EM	8.2	5.8	5.5	5.4	6.6	6.8	6.8

a)	15%M; 10%EM	8.4	6.0	5.5	5.2	6.1	6.2	6.8
b)	15%M; 10%EM	8.4	6.1	5.6	5.1	5.5	6.8	6.8
a)	15%M; 15%EM	8.2	6.3	5.8	5.3	5.3	6.0	6.8
b)	15%M; 15%EM	8.2	6.2	5.7	5.1	5.4	6.0	6.6

Tabelle 28 Druckmessungen in mBar des Versuches 3

	mBar	t1	t2	t3	t(4 & 5)/2	t(6 & 7)/2	t8	t9	t10	t(SUM 11-13)/3	t14	t(15 & 16)	t(SUM 17-21)/5
a)	Referenz	266	121	115		83.5	119	83	73	51.7	57	34	25.2
b)	Referenz	197	117	116		98	116	81	66	51	51	39.5	26.2
a)	10%M; 10%EM	1844	1005	684		1651	833	442	289	82.3	79	27.5	20.4
b)	10%M; 10%EM	1563	990	772		1249	1065	691	686	346.3	388	198.5	39.2
a)	10%M; 15%EM	1343	1158	574		1212	559	430	212	69	54	20.5	11
b)	10%M; 15%EM	1979	1016	656		649.5	509	310	185	58.3	75	43.5	27.4
a)	15%M; 10%EM	1637	927	866		903	1047	654	703	373.3	410	267	169.4
b)	15%M; 10%EM	1911	1048	785		1845.5	1100	599	371	99.3	99	37	26
a)	15%M; 15%EM	1306	1297	767		1892	1420	640	580	175	209	85	38.6
b)	15%M; 15%EM	1537	1043	927		1892	2115	1048	789	263.7	299	130.5	39.8
Temperatur °C zum Ablesezeitpunkt		27	25.3	27.3		29.8	29.8	29.3	29.8	30.5	29.8	29.8	28.8

Tabelle 29 Gaszusammensetzung des Versuches 3

	CH4 [Vol. %]	CO2 [Vol. %]	O2 [Vol. %]	H2S [ppm]
Referenz	1.6	27	0	M.Ü.
10%M; 10%EM	0.2	58	0	78
10%M; 15%EM	0.3	58	0	136
15%M; 10%EM	0.3	58	0	182
15%M; 15%EM	0.3	56	0	256

## Anhang V – Rohdaten Titration

Tabelle 30 Rohdaten Titration

Gesamt- volumen	Volumen dazu- gegebene Milchsäure (80%) in ml	pH 1 gemessen	pH 2 gemessen	pH 3 gemessen	pH 1 in H2O gemessen	pH 3 in H2O gemessen	pH in H2O berechnet	Dazu-gegebene Milchsäure (80%) in % zu Gesamt- volumen
50.18	0	8.8	8.6	8.8	6.7	6.5		0.0
50.28	0.1			6.8		2.6	2.8	0.2
50.33	0.15	6.5					2.7	0.3
50.38	0.2		6.6		2.7		2.6	0.4
50.43	0.25	5.7					2.6	0.5
50.48	0.3		6.4	6.0			2.5	0.6
50.58	0.4	5.5					2.5	0.8
50.68	0.5		6.0	5.2			2.4	1.0
50.73	0.55	5.4					2.4	1.1
50.88	0.7			4.8			2.4	1.4
50.98	0.8	4.9	5.3				2.3	1.6
51.08	0.9		4.8	4.4			2.3	1.8
51.18	1	4.1					2.3	2.0
51.28	1.1		4.2	4.1			2.3	2.2
51.38	1.2	3.9	4.0				2.2	2.4
51.48	1.3	4.0		3.8			2.2	2.6
51.58	1.4		3.8				2.2	2.8
51.68	1.5		3.7	3.6			2.2	3.0
51.88	1.7	3.5	3.6	3.6			2.2	3.4
51.98	1.8		3.5				2.2	3.6
52.08	1.9			3.5			2.1	3.8
52.18	2			3.5			2.1	4.0

Tabelle 31 Berechnung Titration

Bezeichnung	Menge	Einheit
Fäkalien	20	g
Volumen Milchsäure 80% für pH 3.7	0.0015	l
Konzentration Milchsäure 80%	800	g/l
Stoffmengenkonzentration Milchsäure	8.88	mol/l
Molare Masse Milchsäure	90.08	g/mol
Mol Milchsäure	0.01332149	mol
Masse Milchsäure (100%)	1.20	g
Prozent MS (100%) zu Substrat	<b>6.00</b>	%
Fäkalien	20	g
benötigte Milchsäure	1.2	g
benötigter Zucker	1.2	g
Benötigte Zuckerrohrmelasse (48% Zucker)	<b>2.5</b>	g
Prozent Melasse zu Substrat	<b>12.5</b>	%

## Anhang VI – Rohdaten von Versuch 4

Tabelle 32 Absolute Werte der Versuchsübersicht des Versuches 4

<b>GEWICHT (eingewogen)</b>	<b>Referenz</b>	<b>Silo-Fit fest</b>	<b>EM-1 fest</b>	<b>Silo-Fit flüssig</b>	<b>EM-1 flüssig</b>	<b>Milchsäure</b>
Fäkalien in g	300	300	300	120	120	120
EM-1 in g			75		30	
EM Silo-Fit in g		30		12		
Zuckerrohrmelasse in g		37.5	37.5	15	15	
Milchsäure in g						9
Hahnenwasser in ml				180	180	180
Gesamtgewicht	300	367.5	412.5	327	345	309
<b>VOLUMEN (berechnet)</b>						
Fäkalien in ml	352.94	352.94	352.94	141.18	141.18	141.18
EM-1 in ml	0.00	0.00	75.00	0.00	30.00	0.00
EM-Silo-fit in ml	0.00	30.00	0.00	12.00	0.00	0.00
Zuckerrohrmelasse in ml	0.00	26.79	26.79	10.71	10.71	0.00
Milchsäure	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9.00
Hahnenwasser	0.00	0.00	0.00	180.00	180.00	180.00
Gesamtvolumen	352.94	409.73	454.73	343.89	361.89	330.18
<b>Dichte Gesamtmaterial</b>	0.85	0.90	0.91	0.95	0.95	0.94
Volumen (ml) von 5 g	5.88	5.57	5.51	5.26	5.24	5.34
Mittelwert Volumen (ml) von 5 g	5.47					

Tabelle 33 gemessene pH-Werte des Versuches 4

		A (Ausgangsmaterial)	t0 (nach Mischung der Ansätze)	t2	t4	t7	t9	t21
a)	R	8.3	8.3	7.0	7.0	7.0	7.2	7.0
b)	R	8.3	8.3	7.4	7.0	7.2	7.2	7.1
a)	Silo-fit fest	8.3	7.6	4.98	4.9	4.4	4.5	4.8
b)	Silo-fit fest	8.3	7.6	4.81	4.8	4.3	4.2	4.3
a)	EM 1 fest	8.3	7.1	5.0	4.3	4.2	4.2	4.3
b)	EM 1 fest	8.3	7.1	4.9	4.4	4.3	4.2	4.4
a)	Silo-fit flüssig	8.8	7.0	4.9	4.6	5.7	5.8	5.4
b)	Silo-fit flüssig	8.8	7.0	4.9	4.5	5.6	5.7	5.3
a)	EM 1 flüssig	8.9	6.8	4.7	4.4	4.7	5.6	5.3
b)	EM 1 flüssig	8.9	6.8	4.8	4.6	5.7	5.8	5.3
a)	Milchsäure	8.8	3.7	4.6	4.3	4.6	4.5	5.9
b)	Milchsäure	8.8	3.7	4.18	4.1	4.1	4.2	4.2

Tabelle 34 Druckmessungen in mBar des Versuches 4

		t1	t2	t3	t4	t(5 &6 &7)/3	t8	t9	t10	t11	t(12& 13)/2	t(14& 15)/2	t16	t17	t(18 &19 &20)/ 3	t21
a)	Referenz	308	276	263	177	134	145	18	106	40	31	37	28	36	25	24
b)	Referenz	225	252	231	180	134	162	9	121	37	34	43	32	37	25	24
a)	Silo-fit fest	561	1025	233	113	100	117	4	93	52	55	72	76	94	86	88
b)	Silo-fit fest	579	1054	298	93	105	126	0	99	54	46	55	43	44	32	28
a)	EM 1 fest	1039	778	222	95	107	131	0	86	40	31	36	27	31	24	17
b)	EM 1 fest	772	866	232	124	89	188	58	186	133	153	206	239	245	205	229
a)	Silo-fit flüssig	284	568	161	196	777	372	100	99	46	7	-12	-22	-7	-5	-8
b)	Silo-fit	316	626	162	153	967	773	81	99	61	11	-14	-33	-9	-6	-12

	<b>flüssig</b>															
a)	<b>EM 1 flüssig</b>	236	611	183	90	455	1575	1036	513	276	91	34	-75	-20	-51	-160
b)	<b>EM 1 flüssig</b>	214	631	151	156	1072	615	134	126	86	7	-12	-45	-16	-12	-36
a)	<b>Milchsäure</b>	126	40	51	22	79	431	269	349	460	515	506	365	507	176	121
b)	<b>Milchsäure</b>	116	33	47	16	19	33	47	43	6	6	9	8	15	10	4
<b>Temperatur °C zum Ablesezeitpunkt</b>		30.5	32	31.25	34.5	30.75	30.75	19	30.25	30	31	31.25	31.25	31.25	31.25	31.75

**Tabelle 35 Gasmessung des Versuches 4**

	<b>CH4 [vol %]</b>	<b>CO2 [vol %]</b>	<b>O2 [vol %]</b>	<b>H2S [ppm]</b>
<b>Silo-fit fest</b>	0.3	50	0	0
<b>EM 1 fest</b>	0.3	60	0	41
<b>Silo-fit flüssig</b>	0	45	0	3
<b>EM 1 flüssig</b>	0	44	0	0
<b>Milchsäure</b>	0	20.5	0	43



## Anhang VII - Dichtebestimmung der Materialien

Tabelle 36 Dichtebestimmung der verwendeten Materialien zur Berechnung des Gasvolumens

	Gewicht [g]	Volumen [ml]	Dichte [ml]	Dichte Mittelwert	Bemerkung
<b>EM Silo- Fit</b>	30	31	0.97	<b>1.0</b>	
	12	13	0.92		
	65	67	0.97		
	45	47	0.96		
<b>EM 1</b>				<b>1.0</b>	
	30	31	0.97	1.0	
	75	76.5	0.98		
	187.9	189	0.99		
<b>Zuckerrohrmelasse</b>				<b>1.4</b>	
	35.04	25	1.40		
<b>Zuckerrübenmelasse</b>				<b>1.3</b>	
	8.44	7	1.21	1.257231556	
	14.67	11.9	1.23		
	20.47	16	1.28		
	30.81	23.5	1.31		
<b>Fäkalien Referenz</b>				<b>0.85</b>	
	20.01	23	0.87	0.85	Referenz VV_EM
	20.03	25	0.80		Referenz VV_EM
	20.03	23	0.87		Referenz VV_Finale

## Anhang VIII - Laboranalysen der Pflanzenkohle von Verora

### Laboranalysen von Pflanzenkohle (Eurofins Umwelt Ost GmbH)

		Probe		Delinat	Verora	Verora	Verora
		Labor Nr.		112037219	112039596	1010106	1010106002
		Probedatum		07.08.2012	08.08.2012	21.03.2013	13.02.2014
		Ausgangsmaterial					
Parameter	Einheit	Sollwert basic	Sollwert premium				
Schüttdichte	kg/m <sup>3</sup>			552	340	200	255
spez. Oberfläche	m <sup>2</sup> /g					165.9	292.7
TS	%			26.8	68.3	83.1	73.5
Asche 550 °C	%			18.6	20.1	18.6	9.9
Brennwert (Ho.V)	KJ/kg			26808	25994	27165	30886
Heizwert (Hu.p)	KJ/kg			26704	25708	26866	30604
Kohlenstoff gesamt (TC)	% in TS	>50	>50	75	77.4	78.3	85.7
Carbonat CO <sub>2</sub>	% in TS					4.51	3.26
H/C Verhältnis molar		<0.6	<0.6	0.074	0.21	0.21	0.18
O/C Verhältnis molar		<0.4	<0.4	0.041	0	<0.01	0.02
pH-Wert		<10	<10	10.1	11.6	8.4	8.8
Leitfähigkeit	µS/cm			3000	1730	1290	1050
Stickstoff N	% in TS			1.8	1.02	0.78	0.84
Phosphor P	% in TS			0.13	0.3	0.202	0.17
Kalium K	% in TS			1.04	0.98	0.99	0.92
Magnesium Mg	% in TS			0.3	0.3	0.351	0.21
Calcium Ca	% in TS			4.22	4.74	4.83	3.1
Natrium Na	% in TS			0.07	0.08	0.054	0.035
Eisen Fe	% in TS			0.24	0.16	0.158	0.057
Silicium Si	% in TS			2.33	1.91	1.69	0.57
Schwefel S	% in TS			0.04	0.06	0.035	0.019
Blei Pb	mg/kg TS	<150	<120	<2	4	3	<2
Cadmium Cd	mg/kg TS	<1.5	<1	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2
Kupfer Cu	mg/kg TS	<100	<100	16	31	35	13
Nickel Ni	mg/kg TS	<50	<30	17	9	6	2
Quecksilber Hg	mg/kg TS	<1	<1	<0.07	0.07	<0.07	<0.07
Zink Zn	mg/kg TS	<400	<400	70	190	120	56
Chrom Cr	mg/kg TS	<90	<80	27	9	16	3
Bor B	mg/kg TS			39	40	40	22
Mangan	mg/kg TS					250	110
Salzgehalt	mg/100g TS			838	972	6.96	7.59
Summe 16 PAK	mg/kg TS	<12	<4	0.48	0.66	1.6	3
PCB Gehalt exkl. BG	mg/kg TS	<0.2	<0.2	0.00148	0.000377	0.00269	0.000811
Indikator PCB	mg/kg TS	<0.2	<0.2	0.0016	0.000377	0.00294	0.000811
Dioxin Gehalt	ng/kg TS	<20	<20	0.801	nb	0.021	nb
Furan Gehalt	ng/kg TS	<20	<20	0.844	nb	0.028	nb

Abbildung 45 Laboranalysen der Pflanzenkohle von Verora

## Anhang IX - Aufgabenstellung

<b>Studienjahrgang</b>	UI10	
<b>Titel</b>	Analyse der Wirkung von Hygienebarrieren durch Laktofermentation, Thermokompostierung und Wurmkompostierung für menschliche Fäkalien	
<b>7 Vertraulich</b>	<input type="checkbox"/> ja <input checked="" type="checkbox"/> nein	
<b>Fachgebiet</b>	Naturmanagement	
<b>Namen</b>	StudentIn	Hansen Iris
	1. KorrektorIn	<p>Schönborn Andreas</p> <p>Life Sciences und Facility Management, Grüental, 8820 Wädenswil</p> <p>Telefon: 058 934 58 10</p> <p>E-Mail: <a href="mailto:andreas.schoenborn@zhaw.ch">andreas.schoenborn@zhaw.ch</a></p>
	2. KorrektorIn	<p>Laila Rüesch</p> <p>Pfannenstielstrasse 159</p> <p>8706 Meilen</p> <p>Telefon: 076 477 50 25</p> <p>E-Mail: <a href="mailto:laila@kompotoi.ch">laila@kompotoi.ch</a></p>

<b>Aufgabenstellung</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Ausgangslage</b></li> <li>• <b>Zielsetzungen</b></li> <li>• <b>Zusätzliche Auftragsmodalitäten</b></li> </ul>	<b>Ausgangslage</b> <p>Das Jungunternehmen „Kompotoi“ bietet die Vermietung von Komposttoiletten für verschiedene Anlässe an. Die Fäkalien (Urin, sowie Fäzes, die mit Strukturmaterial und Toilettenpapier vermischt sind) werden während der Mietdauer in den Toiletten gesammelt und sollen anschliessend aufbereitet, möglichst in einen Wertstoff umgewandelt („veredelt“) und dann wiederverwertet werden. Damit sollen Nährstoffe im Kreislauf gehalten und Wasser gespart werden.</p> <p>Das Aufbereitungsverfahren ist momentan noch nicht fertig ausgearbeitet. Es soll sich am Terra Preta Sanitation Modell orientieren, mit dem Ziel, ein möglichst schadstofffreies, hygienisch unbedenkliches Endprodukt mit Boden verbessernden Eigenschaften zu erreichen.</p> <p>Diese Bachelorarbeit befasst sich mit Hygienebarrieren bei Veredelungsverfahren für Fäzes, die die hygienische Unbedenklichkeit des Endprodukts sicherstellen sollen. Konkret sollen dabei die Verfahrensschritte Lactofermentation, Thermokompostierung und Vermicompostierung näher untersucht werden.</p> <p><b>Zielsetzung</b></p> <p>Mit den von Kompotoi gesammelten Fäzes sollen die folgenden Verfahrensschritte durchgeführt und ihre Auswirkungen auf ausgewählte, hygienisch relevante Parameter näher untersucht werden:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lactofermentation</li> <li>• Thermokompostierung</li> <li>• Vermicompostierung</li> </ul> <p>Arbeitshypothese: Der Einsatz der drei Verfahren erlaubt die Produktion eines hygienisch unbedenklichen Endprodukts aus menschlichen Fäzes, mit bodenverbessernden Eigenschaften.</p> <p>Mögliche Parameterliste (kann auf Basis der Literaturrecherche erweitert werden): E.coli, Schwermetalle und Nährstoffe</p> <p><b>Zusätzliche Auftragsmodalitäten</b></p> <p><u>Erwartete Resultate</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bachelorarbeit, gem. Weisungen ZHAW</li> <li>▪ Spezieller Inhalt der Bachelorarbeit: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Literaturrecherche zu Hygienebarrieren bei den Verfahren Lactofermentation, Thermokompostierung und Vermikompostierung von Fäkalien</li> </ul> </li> </ul>
	<p>100</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Literaturrecherche zu geeigneten Messparametern</li> <li>○ Recherche zu geeigneten Massnahmen bezüglich Arbeitssicherheit</li> <li>○ Planung und Durchführung der Versuche</li> <li>○ Analyse des Substrats und der Produkte auf verschiedene Parameter (noch zu definieren)</li> </ul>

	<u>Inhaltsverzeichnis</u>	
1	Einleitung	1
2	Theorie	2
2.1	Gesetzliche Anforderungen an den Kompost	2
2.1.1	Hygiene	2
2.1.2	Nährstoffe	2
2.2	Inhaltsstoffe Fäkalien	2
2.2.1	Fäzes	2
2.2.2	Urin	2
2.3	Lactofermentation	2
2.3.1	Prozess	2
2.3.2	Prozessbedingungen	2
2.3.3	Zusatzmaterialien	2
2.4	Thermokompostierung	2
2.4.1	Prozess	3
2.4.2	Prozessbedingungen	3
2.4.3	Zusatzmaterialien	3
2.4.4	Hygienisierung	4
2.5	Vermikompostierung	4
2.5.1	Prozess	4
2.5.2	Prozessbedingungen	4
2.5.3	Würmer	4
3	Material und Methoden	5
3.1	Anlage	5
3.2	Fäkalien Material	
	<u>5 material</u>	
		101
3.3	Lactofermentation	5
3.4	Thermokompostierung	5
3.5	Vermikompostierung	5
3.6	Analyse	5

Termine		Feb.		März		April		Mai		Juni		Juli		August		Sempt		Okt		Nov																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
		7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4

<b>Bemerkungen (z.B. Budgetplan)</b>	<p>Material: Kompostanalyse</p>          <p>Finanzen: <input type="checkbox"/> Nein (es werden keine Kosten entstehen)  <input checked="" type="checkbox"/> Ja (gemäss Budgetplan)</p>	
<b>Arbeitsort</b>	ZHAW Wädenswil,	
<b>8 Unterschrift KorrektorIn 1</b>  Ort, Datum  _____		<b>9 Unterschrift KorrektorIn 2</b>  Ort, Datum  _____
<b>10 Unterschrift StudentIn</b>  Ort, Datum  _____		<b>11</b>

---

## Anhang X - Plagiatserklärung



### Erklärung betreffend das selbständige Verfassen einer Bachelorarbeit im Departement Life Sciences und Facility Management

Mit der Abgabe dieser Bachelorarbeit versichert der/die Studierende, dass er/sie die Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst hat.

Der/die unterzeichnende Studierende erklärt, dass alle verwendeten Quellen (auch Internetseiten) im Text oder Anhang korrekt ausgewiesen sind, d.h. dass die Bachelorarbeit keine Plagiate enthält, also keine Teile, die teilweise oder vollständig aus einem fremden Text oder einer fremden Arbeit unter Vorgabe der eigenen Urheberschaft bzw. ohne Quellenangabe übernommen worden sind.

Bei Verfehlungen aller Art treten Paragraph 39 und Paragraph 40 der Rahmenprüfungsordnung für die Bachelor- und Masterstudiengänge an der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften vom 29. Januar 2008 sowie die Bestimmungen der Disziplinarmassnahmen der Hochschulordnung in Kraft.

Ort, Datum:

Unterschrift:

.....

.....