

Institut für Nutzpflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz  
- Fachbereich Pflanzenernährung -  
der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

---

Untersuchungen zur Steuerung und Kontrolle  
der Vermikompostierung  
von organischen Abfällen

**Inaugural-Dissertation**

zur Erlangung des Grades

Doktor der Agrarwissenschaften (Dr. agr.)

der Landwirtschaftlichen Fakultät

der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität

Bonn

vorgelegt von

**Axel Heck**

aus

Rheinbach



Referent: Prof. Dr. H. Goldbach

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. P. Schulze-Lammers

Tag der mündlichen Prüfung: 07.03.2016

Erscheinungsjahr: 2016

Ein Großteil dieser Arbeit wurde im Rahmen des BMBF-geförderten "Komplett-Projektes" erstellt.



## Kurzfassung

Die Abwasserbehandlung muss die Aufgaben der Abwasseraufbereitung und der hygienisierenden Behandlung der Feststoffe erfüllen. Besonders in Wassermangelgebieten und dünn besiedelten Regionen bietet sich darüber hinaus die Möglichkeit an, im Abwasserstrom enthaltene Nährstoffe zurückzugewinnen. Ein Großteil dieser Arbeit wurde im Rahmen des Komplett-Projektes erstellt, in dem ein neuartiges dezentrales Recyclingsystem zur Schließung von Wasser- und Stoffkreisläufen entwickelt wurde. Gegenstand der vorliegenden Arbeit war die Entwicklung einer Anlage (im Technikumsmaßstab für ca. 200 Personen) zur direkten Behandlung der Feststoffe aus der Abwasserreinigung und anderer organischer Abfälle. Ziel war ein weitgehend automatisierter Betrieb, der eine direkte Verwendung des behandelten Substrates als nährstoffreiches und hygienisch unbedenkliches Düngemittel ermöglichen sollte. Aufgrund der Beschaffenheit der erwarteten Reststoffe sowie der Vorgabe, möglichst hohe Anteile der Nährstoffe zu erhalten, wurde als Behandlungsform die Vermikompostierung (mit der Wurmart *Dendrobaena veneta*) gewählt.

Es zeigte sich, dass die Feststoffe aus der Abwasserreinigung des Komplett-Projektes ohne weitere Vorbehandlung und ohne die Verwendung von Co-Substraten direkt zur Vermikompostierung verwendet werden konnten. Organische Siedlungs- und Küchenabfälle waren jedoch ohne weiteren Voraufschluss (z.B. in Form einer Heißrotte) nicht geeignet, da die eingesetzten Würmer nicht in der Lage waren, die frischen Bioabfälle aufzunehmen. Der Wassergehalt der Substratmischung wurde als entscheidender Parameter für die Vermikompostierung der untersuchten Feststoffe (Fäkalien und häuslicher Bioabfall) identifiziert. Dieser kann im System deutlichen Schwankungen unterliegen, was bei hohem Wassergehalt zu Anoxie, bei zu geringem Wassergehalt zum Austrocknen und Absterben der Tiere führt.

Weiterhin wurde die Möglichkeit geprüft, die Vermikompostierung zu überwachen und zu steuern. Zu diesem Zweck wurde untersucht, ob die Geräusche, die von den Würmern beim Durchwandern des Substrates erzeugt wurden, als Kontrollparameter genutzt werden können. Nach Isolation eines „Wurmgeräusches“ unter idealisierten Bedingungen und Festlegen einer Zielfrequenz zur Überwachung konnten die Geräuschemuster einer Vermikompostierung mit Fäkalien mit geeignetem Wassergehalt klar von denen einer entsprechenden Durchführung unter trockeneren Bedingungen unterschieden werden. Die akustischen Eigenschaften verschiedener Substrate sind voneinander unterschiedlich. Daher müsste das System für abweichende Materialmischungen neu kalibriert werden. Die Technisierung der Vermikompostierung war in weiten Teilen möglich, eine umfassende Automatisierung konnte nicht erreicht werden.

Diese Untersuchungen zeigen, dass die Vermikompostierung eine sinnvolle Form der Behandlung von Feststoffen aus der Abwasserreinigung zur Schließung von Stoffkreisläufen ist, wobei ein extensiver Betrieb empfohlen wird. Es konnte eine zweckmäßige Technisierung erreicht werden. Die Kontrolle der Vermikompostierung über die akustischen Signale der Vermikompostierung erscheint möglich, für die Implementierung einer Steuerung ist jedoch weiterer Forschungsbedarf gegeben.

## Summary

Especially in areas with water shortage and in secluded, sparsely populated regions, wastewater treatment has to serve for sanitation and besides, may help to recycle valuable nutrients. In the "Komplett-Projekt", a new decentralized recycling system for closing water- and nutrient-cycles was developed, and within this project, the task of the present work was the development of a ("intermediate-scale") unit for the direct treatment of biosolids from the wastewater treatment plus further organic residues, as obtained in smaller settlements or hotel kitchens. The main objectives were a largely automated operation and the quality of the obtained substrates as a nutrient rich and hygienically safe fertilizer was assessed. Given texture and nutrient concentrations of the residues, it was tested whether vermicomposting using the species *Dendrobaena veneta* could be used as a treatment alternative.

In a series of experiments, vermicomposting of organic residues was tested as an option for the given conditions. It was found that solids from the "Komplett"-wastewater treatment could be used for vermicomposting without further treatment or amendment of co-substrates. The organic residues and domestic bio-waste could not be applied directly, as *Dendrobaena veneta* cannot thrive on fresh intact tissues. Thus, the vermicomposting process requires input of pre-digested material. In any case, an additional pre-treatment (i.e. composting) is recommended. The water content was found to be the most crucial parameter for vermicomposting of the substrates (feces and domestic bio-waste) as high fluctuations may occur. High moisture contents may lead to anoxia. Thus both, drying out as well as low oxygen levels, lead to the death of earthworms.

The vermicomposting process has to be tightly controlled for a continuous turn-over of the substrates by the worm species for a sanitized and suitable compost. Thus, the "noise" produced by the animal activity (migrating through the substrate) was tested for monitoring the process. Under tightly controlled and acoustically isolated conditions, single "noise" peaks could be identified and a centre frequency of 5000 Hz +/- 882 Hz was selected. This acoustic system was subsequently used to monitor the vermicomposting of feces. It could clearly separate two different conditions (dry vs. moist) with different worm activities. As the acoustic properties of the substrates are very specific, the monitoring of the worm-sounds could not be universally applied, as a comprehensive calibration for every substrate-mixture is required.

It was possible to mechanize large parts of the vermicomposting-process, although full automation could not yet be achieved due to the difficulty to unequivocally monitor the vermicomposting process.

It thus can be stated, that vermicomposting is a suitable treatment for separated solids from wastewater treatment (in our case tested with a device designed for approx. 200 persons) to close nutrient cycles, where an extensive operation is recommended. The process could be

reasonably mechanized. The monitoring of the vermicomposting-process using the acoustic signals from the worm activity is promising, but before it can be implemented on a larger scale, the control system needs further research and development.

## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Abbildungsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis.....	VI
Formelverzeichnis.....	VII
1 Einführung.....	1
1.1 Das Komplett-Projekt .....	2
1.2 Vermikompostierung .....	3
1.3 Fragestellung / Hypothesen.....	5
2 Literaturlauswertung.....	8
2.1 Der Prozess der Vermikompostierung .....	8
2.1.1 Kompostwürmer .....	8
2.1.2 Futteraufnahme und Zersetzung .....	9
2.1.3 Beeinflussung hygienischer Parameter durch die Vermikompostierung .....	9
2.1.4 Leitparameter der Vermikompostierung.....	9
2.2 Einsatz der Vermikompostierung.....	12
2.2.1 Betriebssysteme und -arten.....	13
3 Material und Methoden.....	14
3.1 Vermikompostierung .....	14
3.1.1 Verwendete Wurmart <i>Dendrobaena veneta</i> .....	15
3.1.2 Beschreibung der verwendeten Kompostreaktoren .....	16
3.1.3 Messmethoden.....	26
3.2 Akustische Kontrolle der Kompostwürmer .....	28
3.2.1 Hintergrundinformationen zur Akustik.....	28
3.2.2 Durchführung der Versuche .....	29
Voruntersuchungen .....	29
Testphase .....	29

---

Anwendung .....	31
3.2.3    Auswertung der Versuche .....	32
Voruntersuchungen .....	32
Testphase .....	32
Anwendungsphase .....	34
4    Ergebnisse .....	35
4.1    Vermikompostierung / Biologie .....	35
4.1.1    Voruntersuchungen .....	35
4.1.2    Testphase .....	45
4.1.3    Betrieb des Komposters in der Anwendung .....	62
4.2    Akustische Überwachung der Aktivität von <i>Dendrobaena veneta</i> .....	64
4.2.1    Voruntersuchungen .....	65
4.2.2    Testphase .....	67
4.2.3    Anwendung .....	80
5    Diskussion .....	82
5.1    Vermikompostierung von organischen Abfallstoffen .....	82
5.1.1    Eignung der eingesetzten Materialien .....	82
5.1.2    Eignung des produzierten Vermikompostes für den Einsatz in Landwirtschaft und Gartenbau .....	86
5.2    Nutzen der akustischen Signale der Vermikompostierung zur Prozesssteuerung und Beschleunigung des Umsatzes .....	88
5.3    Automatisierung der Vermikompostierung .....	89
6    Schlussfolgerungen .....	91
7    Ausblick .....	92
8    Anhang: zusätzliche Material-und Methodenzuordnung zu den einzelnen Versuchen ...	94
8.1.1    Voruntersuchungen .....	94
8.1.2    Testphase .....	98
8.1.3    Anwendung .....	101
9    Literatur .....	103

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung der Schichtung im Kompost-Reaktor und der Entwicklung der Würmer.....	6
Abbildung 2: Schematischer Aufbau einer 60-L-Holzbox zur Durchführung der Vermikompostierung.....	17
Abbildung 3: Gitterboden der 500-L-Box .....	18
Abbildung 4: 500-L-Box mit Auffangbehälter .....	18
Abbildung 5: Schema der 500-L-Box.....	19
Abbildung 6: 9-L-Versuchs-Komposter .....	20
Abbildung 7: Außenansicht der 300-L-Rottoreaktoren.....	21
Abbildung 8: Innenansicht der 300-L-Rottoreaktoren.....	21
Abbildung 9: Konstruktionszeichnung des Komposters .....	22
Abbildung 10: Applikationseinheit des Komposters .....	23
Abbildung 11: Applikationseinheit des Komposters mit Tropfbalken.....	24
Abbildung 12: Ablagebild der Applikationseinheit auf dem Komposter bei Vorversuchen mit Überschussschlamm. ....	24
Abbildung 13: Gesamtansicht des Komposters.....	25
Abbildung 14: Skizze zur Positionierung der Mikrophone im Container.....	31
Abbildung 15: Schematische Darstellung des „Frequenz-Fensters“ zur Eingrenzung des Messbereiches. ....	33
Abbildung 16: Ansatz „Biomüll ohne Essensreste + Fäkalien“ nach 9 Wochen. ....	38
Abbildung 17: Bedarfsfütterung mit Bioabfall ohne Zitrusfrüchten und Fäkalien. ....	39
Abbildung 18: Wurmanzahl, Gesamtwormgewicht und mittleres Wormgewicht der Akzeptanzuntersuchungen in Überschussschlamm zu Beginn des Versuches und nach 2 Monaten.....	43
Abbildung 19: Futtermisch in 500-L-Box.....	44
Abbildung 20: Verlauf der Wassergehalte der verschiedenen Substratmischungen über die Zeit .....	45
Abbildung 21: Ausgangssubstrat Fäkalien und die Mischungen mit zwei verschiedenen Zuschlagsstoffen .....	46
Abbildung 22: Einsetzen der Würmer in die Versuche mit den Co-Substraten.....	47
Abbildung 23: Verlauf der Aschegehalte der unbehandelten Feststoffe über die Dauer des Versuches .....	48
Abbildung 24: Mittelwerte der Aschegehalte der Gesamt-Ernten aus Komposter II im Verlauf der Nachrotte.....	49

---

Abbildung 25: Beispielhafte Aschegehalte der Ausgangsstoffe (Fäkalien) und der Sieb - Fraktionen einer Ernte (2 Monate gelagert) .....	50
Abbildung 26: Verlauf der C/N-Verhältnisse der unbehandelten Feststoffe (Futtermengen) über die Dauer der Versuche .....	51
Abbildung 27: N-, P- und K-Gehalte in Substraten unterschiedlichen Alters .....	52
Abbildung 28: Kresstest mit Vermikompost mit den Körnungen > 4 mm und < 4 mm. ....	53
Abbildung 29: AT <sub>4</sub> -Werte für Vermikompost unterschiedlichen Alters .....	53
Abbildung 30: Gesamt-Futtermenge und Ernte für Komposter III. ....	57
Abbildung 31: Umgesetztes Material an getrocknetem Ausgangssubstrat .....	58
Abbildung 32: Vergleich der Konzentration von E. coli [KBE/g] in Vermikompost (aus Fäkalien) unterschiedlichen Alters und einer handelsüblichen Blumenerde ...	60
Abbildung 33: Würmer im Substrat (Überschussschlamm + Bioabfall) .....	62
Abbildung 34: Ablagebild der Applikationseinheit .....	63
Abbildung 35: Mikrophone zur akustischen Kontrolle der Kompostwürmer .....	65
Abbildung 36: Screenshot des Audioeditors „audacity“ bei Aufnahmen mit einem Mikrofon im Substrat. ....	66
Abbildung 37: Screenshot des Audioeditors „audacity“ bei Aufnahmen mit zwei Mikrofonen über dem Substrat. ....	66
Abbildung 38: Fourier-Transformation über die gesamte Tonsequenz .....	68
Abbildung 39: Einzelnes Wurmgeräusch in Fäkalien bei stark vergrößertem Zeitausschnitt.	69
Abbildung 40: Darstellung der größten Komponente eines Wurmgeräusches in Fäkalien	69
Abbildung 41: Kumulierte Ereignisse über 2 min eines gut positionierten und dimensionierten Fensters .....	71
Abbildung 42: Kumulierte Ereignisse eines schlecht positionierten und dimensionierten Fensters .....	72
Abbildung 43: Vergleich der Zählraten aller im Container errichteten Mikrophone über einen Zeitraum von gut 4 Stunden .....	73
Abbildung 44: Kumulierte Ereignisse bei einem Grenzwert von 100 Ereignissen je Sekunde.. .....	74
Abbildung 45: Kumulierte Ereignisse bei einem Grenzwert von 30 Ereignissen je Sekunde.	75
Abbildung 46: Kumulierte Ereignisse bei einem Grenzwert von 10 Ereignissen je Sekunde.	75
Abbildung 47: Summierte Ereignisse für Komposter I, Komposter II und Substrat ohne Würmer (Grenzwert 100 Ereignisse je Sekunde) .....	76
Abbildung 48: Summierte Ereignisse für Komposter I, Komposter II und Substrat ohne Würmer (Grenzwert 30 Ereignisse je Sekunde) .....	77
Abbildung 49: Summierte Ereignisse für Komposter I, Komposter II und Substrat ohne Würmer (Grenzwert 10 Ereignisse je Sekunde) .....	77

---

Abbildung 50: Summierte Ereignisse um die Zählungen über dem Substrat ohne Würmer bereinigt (Grenzwert 100 Ereignisse je Sekunde) .....	78
Abbildung 51: Summierte Ereignisse um die Zählungen über dem Substrat ohne Würmer bereinigt (Grenzwert 30 Ereignisse je Sekunde) .....	79
Abbildung 52: Summierte Ereignisse um die Zählungen über dem Substrat ohne Würmer bereinigt (Grenzwert 10 Ereignisse je Sekunde) .....	79
Abbildung 53: Kumulierte Zählungen bei unterschiedlichen Grenzwerten über der Vermikompostierung mit „Überschussschlamm + Bioabfall“ .....	81
Abbildung 54: Auszählen der Salztoleranzversuche .....	97
Abbildung 55: Komposter III mit 25 kg Fäkalien .....	100
Abbildung 56: Start der Vermikompostierung in Oberhausen. ....	102

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übersicht über allgemeine Parameter zur Beschreibung der Bedingungen einer Vermikompostierung.....	10
Tabelle 2:	Übersicht über die Versuche und die verwendeten Substrate.....	14
Tabelle 3:	Boniturskala für die Beurteilung des Zustands der Würmer während der Vermikompostierung.....	16
Tabelle 4:	Übersicht über die genutzten Messmethoden zu Messung der allgemeinen chemischen und physikalischen Parameter sowie der Nährstoffe.....	26
Tabelle 5:	Zusammenhänge zwischen Rottegrad, Atmungsaktivität und Selbsterhitzung bei der Untersuchung von Komposten.....	27
Tabelle 6:	Messungen der Leitparameter in den verwendeten Substraten der Vorratsfütterung I.....	36
Tabelle 7:	pH-Werte in der Vorratsfütterung II.....	37
Tabelle 8:	Hauptparameter in der Bedarfsfütterung.....	39
Tabelle 9:	Ausgesuchte Parameter in verwendetem Bioabfall und Überschussschlamm im Vergleich zu den bisher verwendeten Feststoffen aus der Abwasserreinigung (Fäkalien).....	42
Tabelle 10:	Einteilung des produzierten Vermikompostes nach Alter abhängig von der Sauerstoffzehrung ( $AT_4$ ) in Rottegrade nach BGK.....	54
Tabelle 11:	Ausgesuchte Parameter zur Beurteilung der Kompostqualität für die Vermikompost-Fractionen < 4 mm aus den Durchführungen mit Fäkalien nach einer Nachrotte von 9 Monaten.....	54
Tabelle 12:	Gesamtfutter- und Outputmengen [g TS] der einzelnen Komposter sowie die Startmasse an Würmern [g Frischmasse].....	56
Tabelle 13:	Konzentrationen von <i>E. coli</i> , Enterokokken und Coliphagen in den Ausgangsstoffen Bioabfall, Überschussschlamm und Fäkalien.....	59
Tabelle 14:	Konzentrationen hygienisch-mikrobiologischer Parameter im Vermikompost aus Fäkalien im Verlauf der Nachrotte.....	60
Tabelle 15:	Konzentrationen der Schwermetalle Blei (Pb), Cadmium (Cd), Chrom (Cr), Nickel (Ni), Zink (Zn), Kupfer (Cu) und Quecksilber (Hg) in Vermikomposten aus Fäkalien und der Substratmischung „Überschussschlamm + Bioabfall“. .	61
Tabelle 16:	Hauptparameter der Materialien vor („Überschussschlamm“ und „Bioabfall“) und nach („Ernte > 4 mm“ und „Ernte < 4 mm“) dem Betrieb des Komposters in der Anwendungsphase.....	63
Tabelle 17:	Verhältnisse (a) und Zusammenstellungen (b) der Substrate bei der Vorratsfütterung I.....	95

---

Tabelle 18:	ausgesuchte Parameter in verwendetem Bioabfall und Überschussschlamm im Vergleich zu den bisher verwendeten Fäkalien .....	98
Tabelle 19:	Substratmischungen und deren Hauptparameter.....	99
Tabelle 20:	verwendete Substratmengen für den manuellen Betrieb der 300 L-Komposter. .....	100
Tabelle 21:	Hauptparameter der in der Anwendung eingesetzten Substrate .....	101

## Formelverzeichnis

Formel 1:	Fourier-Transformation .....	32
Formel 2:	Diskrete Fourier-Transformation .....	32



## 1 Einführung

Sauberes Trinkwasser und gesunde Nahrung zählen zu den menschlichen Grundbedürfnissen. Die Verfügbarkeit beider Güter ist in vielen Regionen der Welt nicht in ausreichendem Umfang gegeben. Die Situation wird noch dadurch verschärft, dass sauberes Wasser durch anthropogene Einträge zum Beispiel im Rahmen der Spülkanalisation verunreinigt wird, so dass eine direkte Nutzung nicht mehr möglich ist (Shalabi 2006).

Düngemittel stammen zum Teil aus knappen Ressourcen, so dass ein bewusster Umgang erforderlich ist. Das wichtigste Beispiel im Zusammenhang mit Abwasser ist hier sicher der Phosphor. Dieser wird in der Regel aus Erzen gewonnen, die zunehmend schwieriger zu erschließen oder in höherem Maße mit Cadmium und Uran verunreinigt sind (Dissanayake und Chandrajith 2009; Schnug und Haneklaus 2012). Damit wird die Bereitstellung von qualitativ hochwertigen Phosphaten für Düngezwecke immer aufwändiger und damit teurer.

Der verantwortungsvolle Umgang mit Nährstoffen zu Düngezwecken umfasst die Kreislaufführung von Nährstoffen – also die Rückgewinnung und Wiederverwertung der Nährstoffe aus den Abfallstoffen unseres täglichen Lebens. An erster Stelle steht natürlich die Abfallvermeidung, aber der Anfall bestimmter anthropogener Abfälle ist unvermeidlich. In diesen Abfallstoffen finden sich in der Regel nicht unerhebliche Anteile wertvoller Stoffe wie zum Beispiel Nährstoffe, woraus sich die unmittelbare Notwendigkeit einer Abfallbehandlung und Rückgewinnung der wertgebenden Stoffe ergibt.

Für das Beispiel der häuslichen Abwasserentsorgung besteht hinsichtlich der Nährstofffracht ein großes Wiederverwertungspotential. Besonders für die Makronährstoffe Stickstoff (4-5 kg / Person und Jahr), Phosphor (etwa 0,75 kg / Person und Jahr) und Kalium (rund 1,8 kg / Person und Jahr) ist das Schließen kurzer Kreisläufe möglich, indem ein Düngemittel produziert wird, welches direkt in der Landwirtschaft eingesetzt werden kann (Otterpohl et al. 1997).

Dafür ist es notwendig, dass möglichst direkt und ohne weitere Vermischung eine Behandlung durchgeführt wird, die die enthaltenen Nährstoffe in pflanzenverfügbarer Form konserviert, aber auch die relevanten hygienischen Parameter reguliert.

In Abfällen sind jedoch nicht nur wertgebende Stoffe enthalten, sondern auch Schadstoffe wie zum Beispiel Schwermetalle. Wenn es nicht möglich ist, diese Inhaltsstoffe zu entfernen, muss darauf geachtet werden, dass die Konzentrationen unschädlich bleiben. Das beinhaltet auch die Berücksichtigung einer potentiellen Anreicherung (Bilanzierung). Der Aufwand wird

minimiert, wenn bereits die Ausgangsstoffe nur niedrige Schadstoffkonzentrationen enthalten und keine weiteren Einträge stattfinden. Daher sind Abfälle möglichst direkt zu behandeln und weitere Vermischungen zu vermeiden, wie das zum Beispiel im Kanalnetz bei einer zentralen Abwasserbehandlung der Fall sein kann.

Die Wiederverwertung besitzt nicht nur ökologische Aspekte, sondern auch wirtschaftliche, denn mit qualitativ hochwertigen Recyclingprodukten kann zur Maximierung des ökonomischen Nutzens einer Behandlung beigetragen werden. Die Behandlung verursacht damit nicht nur Kosten, sondern ergibt durch den Verkauf oder das Benutzen der Recyclingprodukte und damit das Ersetzen und/oder Einsparen neuer Produkte neben den ökologischen auch ein ökonomische Anreize.

Diese Thematik wird (u.a.) ausführlich im Rahmen des „ecosan“ – Prinzips behandelt (ecosan = ecological sanitation, siehe zum Beispiel bei IWA<sup>1</sup>). Das Komplet-Projekt (siehe 1.1), in dem große Teile dieser Arbeit durchgeführt wurden, fügt sich in die ecosan-Betrachtung ein, indem es gleich zwei der wichtigsten Aufgaben behandelt: die Bereitstellung sauberen Nutz- und Trinkwassers sowie die Kreislaufführung der im Abwasserbehandlungsprozess enthaltenen Nährstoffe als unbedenkliche Düngemittel. Gegenstand dieser Arbeit ist die Behandlung der abgeschiedenen Feststoffe (und weiterer organischer Abfälle) mit dem Ziel der Wiederverwertung der Nährstoffe.

## 1.1 Das Komplet-Projekt

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten dreijährigen Verbundprojektes „Komplet“ (2005 – 2008; [www.komplett-projekt.de](http://www.komplett-projekt.de)) wurde ein neuartiger Ansatz zur Schließung von Wasser- und Stoffkreisläufen verfolgt.

Die Projektpartner entwickelten ein dezentrales High-Tech-Recyclingsystem speziell für Wassermangelgebiete und abgelegene, dünn besiedelte Regionen.

Inhalt der Untersuchungen, im Rahmen derer Teile dieser Arbeit erstellt wurden, war die Entwicklung einer Anlage („mid-scale unit“) zur direkten Behandlung der Feststoffe aus der Abwasserreinigung. Weiterhin sollten organische Abfälle, wie sie zum Beispiel in (Hotel-) Küchen anfallen, mitbehandelt werden können.

Im Vordergrund stand ein weitgehend automatisierter Betrieb, der eine direkte Verwendung des behandelten Substrates als nährstoffreiches und hygienisch unbedenkliches Düngemittel

---

<sup>1</sup> IWA = International Water Association, [www.iwahq.org](http://www.iwahq.org)

ermöglicht. Die Behandlung der Feststoffe sollte als zusätzliches Modul zur Abwasserbehandlung angeboten und eingebunden werden können, wobei ein Einsatz in verschiedensten Klimaten und Siedlungsstrukturen möglich sein sollte.

Das Komplett-Projekt bindet sich sowohl in das ecosan-Prinzip als auch in die Erfüllung des Millennium Development Goals No. 7 der United Nations<sup>2</sup> ein („Umweltverträglichkeit sicherstellen“, bes. 7.A: „Integrieren der Prinzipien der nachhaltigen Entwicklung in die Landespolitik und –programme sowie das Abwenden der Verluste von Umweltressourcen“). Neben der Aufbereitung von Abwasser zur Erreichung von nutzbaren, hygienisch sicheren Wasserqualitäten ist es das Ziel, die enthaltenen Wertstoffe (Nährstoffe) möglichst umfassend wiederverwerten zu können.

Mit der Aufbereitung von Abwässern verschiedener Verunreinigungsstufen zu Nutzwässern mit verschiedener Reinheit bis hin zu Trinkwasser erfüllt der Komplett-Ansatz eine zentrale Anforderung. Darüber hinaus ist mit der zentralen Erfassung und Behandlung der Abwässer am Ort des Anfalls nicht nur der (kostenintensive) Transport über weite Strecken hinfällig, auch die im Abwasserstrom enthaltenen Nährstoffe (Nährstoffe) können nach der Behandlung direkt wieder verwendet werden. Das erfüllt einen weiteren wichtigen Ansatz im ecosan-Konzept: die im Abwasser enthaltenen Feststoffe werden als Wertstoffe betrachtet, nicht pauschal als Abfall. Ziel ist die Wiederverwertung dieser enthaltenen Wertstoffe (vornehmlich Nährstoffe und die organischen Substanz). Damit wird eine kurz geschlossene und nachhaltige Kreislaufführung erreicht, was den Zukauf von Düngemitteln einschränken kann. Eine Möglichkeit, die anfallenden Feststoffe einer stabilisierenden und hygienisierenden Behandlung zu unterziehen, ist die Nutzung von Kompostwürmern („Vermikompostierung“). Diese Technologie ist Inhalt der vorliegenden Arbeit.

## 1.2 Vermikompostierung

Vermikompostierung bezeichnet den Umbau von organischem Material durch Mikroorganismen und Würmer zu einem erdigen Substrat. Je nach klimatischen Bedingungen werden entsprechend adaptierte Wurmarten verwendet, die meist aus epigäisch lebenden Arten rekrutiert werden (Dominguez 2004). Die Würmer durchmischen und belüften über ihre Bewegung das Substrat und nehmen mikrobiell voraufgeschlossenes Material auf, verdauen es und scheiden es wieder aus (Dominguez et al. 1997). Die Würmer können dabei täglich über die Hälfte ihres Körpergewichtes aufnehmen, wobei sie nur 5-10% des aufgenommenen Materials für ihren eigenen Bedarf benötigen. Der Rest wird als

---

<sup>2</sup> [www.un.org/millenniumgoals/](http://www.un.org/millenniumgoals/)

„Vermikompost“ ausgeschieden (Dominguez et al. 1997; Edwards 1972). Bei diesem Prozess wird ein Teil der enthaltenen organisch gebundenen Nährstoffe mineralisiert und in eine pflanzenverfügbare Form überführt. Darüber hinaus enthält der Vermikompost einen hohen Anteil an organischer Substanz, die die Bodenbedingungen hinsichtlich Wasserhaltekapazität, Kationenaustauschkapazität etc. verbessern kann (Arancon et al. 2008; Edwards und Arancon 2004; Scheffer und Schachtschabel 2002).

Allgemein bevorzugen die Kompostwürmer stickstoffreiche Substrate wie z.B. Tierausscheidungen, sie können jedoch in vielerlei Arten von organischen Reststoffen leben, wobei eine Durchmischung und ein mikrobieller Voraufschluss (Vorrötte) förderlich sind (Gunadi et al. 2002).

Im Vergleich zu einer herkömmlichen Kompostierung („Heißrotte“) entsteht bei der Vermikompostierung keine Hitze. Damit sind geringere gasförmige Verluste von Stickstoff zu erwarten (Fuchs 2005; Witter und Lopez-Real 1988). Vermikomposte aus Fäkalien zeigen eine deutlich reduzierte mikrobielle Belastung gegenüber dem Ausgangsmaterial. So sind zum Beispiel nach zwei Monaten Nachrotte 99,9 % und nach sechs Monaten um 99,99 % weniger *E.coli* Bakterien nachweisbar als im Ausgangsmaterial (Rechenburg 2005).

Die Anforderungen an die Behandlung der Feststoffe im Projekt waren, ein hygienisch unbedenkliches, stabilisiertes Material zu produzieren, bei dessen Herstellung möglichst große Teile der enthaltenen Nährstoffe erhalten bleiben. Die Entscheidung, im Rahmen des Projekts eine Vermikompostierung für die Behandlung der Fäkalien zu wählen, begründet sich in folgenden Punkten:

Eine Kompostierung (Heißrotte) der Materialien wurde als ungeeignet eingestuft, denn der Anfall der Fäkalien in dem bearbeiteten System wird stetig in kleinen Mengen angenommen, so dass eine gesteuerte umfassende Behandlung über eine Heißrotte nicht sichergestellt werden konnte. Es war abzusehen, dass die Fäkalien aus den Abscheidern im System mit einem Wassergehalt von deutlich >60 % anfallen werden – was für eine alleinige Behandlung via Heißrotte ungeeignet ist. Zudem wurde die erwartete Zusammensetzung der anfallenden Feststoffe aufgrund der mangelnden Struktur und damit unzureichenden Belüftung als ungeeignet für eine Heißrotte bewertet (Vinneras et al. 2003).

Eine anaerobe Behandlung mittels Vergärung wurde ebenfalls ausgeschlossen, da die Gasausbeute in der geplanten Umsetzung als zu gering für eine sinnvolle Verwertung als Biogas (z.B. Kompression oder Einspeisung ins Gasnetz) eingeschätzt wurde (J. Clemens, mündliche Mitteilung). Um die nährstoffreichen Reststoffe sicher verwerten zu können, würde es darüber hinaus einer weiteren Behandlung zur Hygienisierung bedürfen.

Die Entscheidung fiel auf die Vermikompostierung, da so nicht nur eine direkte Behandlung der verhältnismäßig feuchten Ausgangsstoffe möglich ist, sondern darüber hinaus

insbesondere  $\text{NH}_3$ -Verluste während der Heißrottephase zu vermeiden sind und so mehr Nährstoffe (v.a. Stickstoff) erhalten werden können. Nach einer Nachrotte ist die Hygienisierungsleistung der Vermikompostierung mit der einer Heißrotte vergleichbar (Komplett 2009).

### 1.3 Fragestellung / Hypothesen

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Intensivierung und Automatisierung der Vermikompostierung zur Behandlung von Feststoffen aus der Abwasserreinigung.

Dazu wurde ein Betriebssystem entwickelt, welches auf der Annahme basiert, dass bei einem vertikalen Betrieb mit Substratzugabe von oben und Ernte von unten eine horizontale Schichtung entsteht. Durch abgestimmte Ernte und Substratzugabe sollte sich ein stabiles System entwickeln, in dem die einzelnen Schichten in einem Gleichgewicht bestehen bleiben. Der Durchsatz sollte dabei so abgestimmt werden, dass sich abgelegte Kokons entwickeln können und die Jungtiere noch im Kompostreaktor schlüpfen. Es ist anzunehmen, dass diese dann ebenfalls in die Regionen mit geeigneten Futtersubstraten wandern (Haimi und Huhta 1986). Abbildung 1 zeigt eine schematische Darstellung dieser Prozesse. Verendete Tiere werden in diesem Prozess entweder umgesetzt oder mit der Ernte ausgetragen. In einem so abgestimmten System erhält sich die aktive Wurmpopulation von selbst auf einem angepassten Niveau.

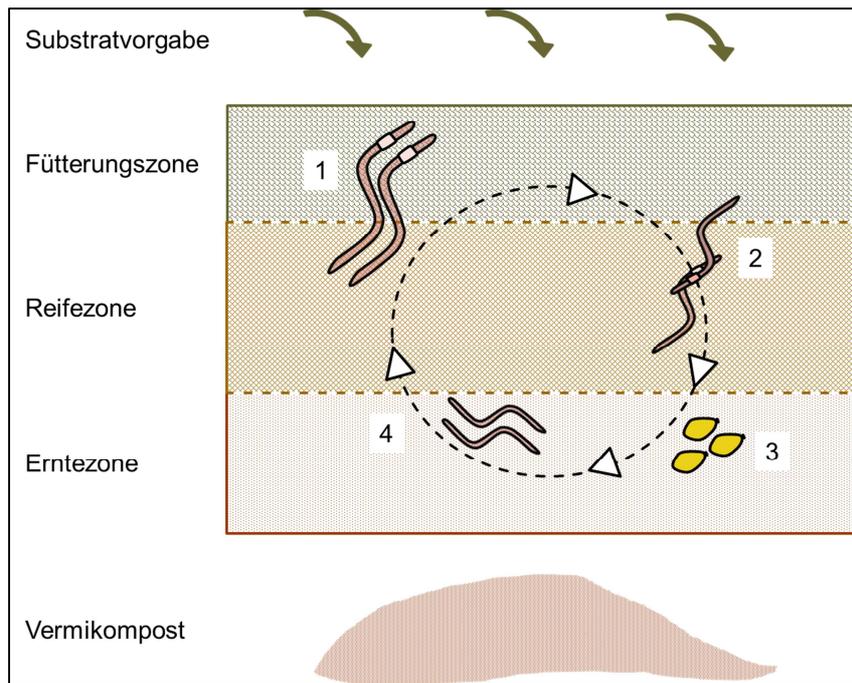


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Schichtung im Kompost-Reaktor und der Entwicklung der Würmer. In der „Fütterungszone“ wird das frische Substrat vorgegeben und von den Würmern aufgenommen (1). In der Reifezone“ verbleiben die Wurmausscheidungen (mit gewissen Anteilen an nicht aufgenommenem Material), in der Erntezone befindet sich nahezu nur noch Wurmausscheidungen. Diese Zone wird nicht mehr von Würmern durchzogen; die Würmer bewegen sich hauptsächlich in der mittleren und oberen Schicht. Dort findet auch die Vermehrung statt (2), die abgelegten Kokons (3) reifen während sie mit dem Material nach unten wandern. In den unteren Bereichen schlüpfen die Jungwürmer und bewegen sich ebenfalls in die oberen Schichten (4).

Für den Betrieb musste zuerst ermittelt werden, ob die Behandlung von Feststoffen aus der Abwasserreinigung des Komplett-Projektes möglich ist und welche Parameter hier entscheidend sind.

Für die Automatisierung war neben einer passenden Technisierung zu ermitteln, ob es substrat- und systemspezifische zentrale Einflussgrößen gibt und wie diese zur Überwachung und Steuerung herangezogen werden können.

Zusätzlich zu der Eignung bestimmter physikalischer und chemischer Parameter wurde die Möglichkeit der Kontrolle der Vermikompostierung über die akustische Überwachung der Kompostwürmer untersucht. Würmer erzeugen beim Durchwandern des Substrates Geräusche, die mit dem Ohr wahrgenommen werden können. Diese Geräusche sollten für die Überwachung der Vermikompostierung genutzt werden. Daher sollte die räumliche Zuordnung und Häufigkeit der typischen Wurmgeräusche verwendet werden, um zu prüfen, wie diese geeignetes Material intensiv besiedeln und weniger oder ungeeignetes Material vermeiden.

Die sich aus diesen Vorüberlegungen ergebenden Hypothesen dieser Arbeit sind:

- A Feststoffe aus der (dezentralen) Abwasserreinigung lassen sich mittels einer Vermikompostierung stabilisieren und hygienisieren, das Produkt kann in der Landwirtschaft oder dem Gartenbau verwertet werden.
- B Wurmaktivität und –Wohlbefinden können über akustische Signale erfasst werden. Diese Signale können zur Prozesssteuerung verwendet werden.
- C Diese Steuerung kann zur Beschleunigung der Umsetzungsprozesse verwendet werden.
- D Die Vermikompostierung der Feststoffe aus der Abwasserreinigung ist automatisierbar und ermöglicht einen weitgehend wartungsfreien Betrieb.

## 2 Literaturlauswertung

### 2.1 Der Prozess der Vermikompostierung

Vermikompostierung ist ein aerober Prozess, der von Kompostwürmern („vermis“ lat. – der Wurm) und Mikroorganismen getragen wird. Die Kompostwürmer stammen aus der Familie der Lumbriciden, welche nach Otto Graff (Graff 1984) in zwei Gattungsgruppen unterschieden werden. Die Gattungsgruppen sind morphologisch unterscheidbar und besitzen unterschiedliche ökologischen Ansprüche: einerseits sind dies rot pigmentierte Arten, andererseits Arten, die nie rot pigmentiert sind, sondern verschiedenste Farbvarianten von schwarz über grau und bläulich bis grünlich aufweisen; z.B. *Octoclasium*, *Eiseniella* und *Allobophora*. Die in unseren Breiten gängigen Kompostwürmer der Gattung *Eisenia* und *Dendrobaena* sowie der in allgemein bekannte „Regenwurm“ der Gattung *Lumbricus* gehören zu den rot pigmentierten Würmern. Sie weisen eine vorwiegend epigäische/hypogäische (*Dendrobaena* und *Eisenia*) oder hypogäische/endogäische (*Lumbricus*) Lebensweise auf, was vor allem die erstgenannten Arten interessant für den Einsatz als Kompostwurm macht. Sie zersetzen die voraufgeschlossene organische Substanz und leben dann in diesem Substrat und tendieren nicht dazu, ihre Ausscheidungen mit in tiefere Bodenschichten zu nehmen und damit einer möglichen Ernte zu entziehen (Dominguez und Edwards 2004).

#### 2.1.1 Kompostwürmer

Für die Vermikompostierung werden verschiedene Arten eingesetzt, die sich in der Regel aus regional vorhandenen und angepassten Arten rekrutieren. Die bekanntesten für moderate Klimazonen sind *Eisenia fetida* (Savigny, 1826), *Eisenia andrei* (Bouché, 1972), *Dendrobaena rubida* (Savigny, 1826) und *Dendrobaena veneta* (Rosa, 1886); für tropische Klimazonen sind es *Eudrilus eugeniae* (Kinberg, 1867), *Perionyx excavatus* (Perrier, 1872) und *Pheretima elongata* (Perrier, 1872) (Dominguez und Edwards 2004).

Die bekannteste und am häufigsten eingesetzte Art ist *Eisenia fetida*, die wegen ihrer hohen Toleranz gegenüber verschiedenen Umweltbedingungen (nahezu ubiquitär vorhanden) und ihrer hohen Reproduktionsrate eine besondere Eignung besitzt und sich oftmals in den meisten offenen Vermikompostierungen eigenständig ansiedelt (Dominguez und Edwards 2004).

### **2.1.2 Futteraufnahme und Zersetzung**

Die Würmer nehmen angerottete organische Substanz und Mikroorganismen auf (Ziegenlasch 1984). Dieses Material wird im Verdauungstrakt der Würmer weiter zerkleinert und mit Verdauungssekreten und weiteren Mikroorganismen versetzt (Graff 1984). Die Würmer nutzen etwa 5 – 10 % des aufgenommenen Materials für die eigene Ernährung (Sharma et al. 2005) und scheiden ein halbverdautes Material aus („Vermikompost“), welches intensiv mit Mikroorganismen besiedelt ist. Während der Passage durch den Wurm wird die Oberfläche des Materials durch Verkneten und Zerkleinern erhöht, was den Mikroorganismen eine größere Angriffsfläche bietet (Graff 1984; Aira et al. 2006; Sharma et al. 2005). Die Mikroorganismen zersetzen das Material weiter und bringen die enthaltenen Nährstoffe in eine pflanzenverfügbare Form (Edwards und Fletcher 1988).

Die Würmer dienen also als eine Art Katalysator für die mikrobielle Umsetzung der organischen Substanz (Lazcano et al. 2008). Sie beeinflussen den Abbau darüber hinaus durch ihre Bewegung durch das Substrat, wodurch dieses belüftet und durchmischt wird, was die Lebensbedingungen für die beteiligten Mikroorganismen verbessert. Durch die Ausscheidungen der Würmer wird das Substrat zudem zusätzlich mit Mikroorganismen versetzt (Dominguez und Edwards 2011).

### **2.1.3 Beeinflussung hygienischer Parameter durch die Vermikompostierung**

Obwohl es im Gegensatz zu einer konventionellen Kompostierung nicht zu einer intensiven Hitzeentwicklung („Heißrotte“) kommt, werden durch eine Vermikompostierung diverse Erreger in Ihrer Anzahl reduziert oder sogar eliminiert (Dominguez 2004). Die Hygienisierung erfolgt durch verschiedene Wirksysteme wie Verdrängung und Phagozytose durch Mikroorganismen, selektive Reduktion bestimmter Erreger im Verdauungstrakt der Würmer (Eastman 1999; Eastman et al. 2001; Mathur et al. 2006; Edwards und Fletcher 1988) sowie durch Veränderung der Lebensbedingungen durch das Abtrocknen des Substrates in der anschließenden Nachrotte (aerobe Lagerung, W. Philipp, mündliche Mitteilung).

### **2.1.4 Leitparameter der Vermikompostierung**

Die Vermikompostierung ist als Prozess empfindlicher als die Heißrotte. Die allgemeine Eignung eines Substrates für eine Vermikompostierung wird in der Literatur meist mit den Parametern Wassergehalt, Temperatur, pH-Wert, Leitfähigkeit (Salzgehalt) und C/N-Verhältnis beschrieben. In Tabelle 1 ist eine Übersicht der Daten (teilweise aus Übersichtsarbeiten) in ihrer Bandbreite gegeben.

Tabelle 1: Übersicht über allgemeine Parameter zur Beschreibung der Bedingungen einer Vermikompostierung nach (Edwards und Fletcher 1988; Edwards und Neuhauser 1988; Dominguez 2004; Dominguez und Edwards 2004; Nguyen et al. 2008; Fayolle et al. 1997; Loehr et al. 1985; Viljoen et al. 1992; Kaplan et al. 1980; Hughes et al. 2009; Owojori et al. 2009; Neuhauser et al. 1988; Neuhauser et al. 1980)

Parameter	Anforderung
Wassergehalt	50 – 90 %
Temperatur	0 - 35 °C
pH-Wert	5 – 9
Leitfähigkeit	< 4,5 mS/cm
Salzgehalt	< 0,5 %
C/N-Verhältnis	+/- 25

Die Ansprüche der verschiedenen Wurmarten unterscheiden sich hinsichtlich der genannten Parameter unter Umständen deutlich und sind zudem abhängig von weiteren Faktoren wie zum Beispiel der Art („Frische“) und Zusammensetzung des Futters (Edwards und Bohlen 1996).

#### Belüftung

Würmer benötigen Sauerstoff und nehmen diesen über ihre feuchte Außenhaut auf (durch Diffusion). Sie können für gewisse Zeit unter anoxischen Bedingungen überleben, sind aber sehr empfindlich gegenüber anaeroben Bedingungen (Edwards und Bohlen 1996). Entscheidend sind hier aber auch die Prozesse, die unter anaeroben Bedingungen in der Umgebung ablaufen. Unter anaeroben Bedingungen kann z.B. Nitrit entstehen, welches stark giftig für die Würmer ist (Dominguez 2004).

#### Wassergehalt

Der Wassergehalt hat einen weitreichenden Einfluss auf die Vermikompostierung. Sowohl ein Übermaß als auch ein Mangel an Wasser beeinflussen den Zustand der Würmer und damit die Vermikompostierung (Loehr et al. 1985). Ein Übermaß an Wasser kann zu anaeroben Bedingungen führen, ein Mangel an Wasser kann die Würmer austrocknen (ROU 2007). Kompostwürmer können allgemein in einem recht weiten Bereich zwischen 50 und 90 % Wassergehalt des Substrates überleben (Dominguez und Edwards 2011; Munroe). Die Beurteilung der Eignung des Futtersubstrates bemisst sich dabei anhand des Wurmwachstums (individuelle Biomasse), der Reproduktion (Kokons) und der Fertilität (Jungtiere pro Kokon). Muyima et al. (1994) und Edwards und Fletcher (1988) haben für die Art *Dendrobaena veneta* angegeben, dass diese in einem deutlich breiteren Spektrum von Wassergehalten überleben kann als die anderen (europäischen) Kompostwurmarten. Der Hauptaktivitätsbereich für *Dendrobaena veneta* wird mit 67 – 84 % Wassergehalt

angegeben. Andere Arbeiten beschreiben für *Eisenia fetida* die Eignung für hohe Wassergehalte bis 90 % (Loehr et al. 1985; Neuhauser et al. 1988), in den meisten vergleichenden Arbeiten wird jedoch *Dendrobaena veneta* als die toleranteste Art gegenüber dem Parameter Wassergehalt dargestellt (Dominguez und Edwards 2011; Edwards 1972).

#### Temperatur

Kompostwürmer können je nach Art Temperaturen von 0 – 35 °C überleben (Dominguez 2004), optimale Bedingungen für die meisten Kompostwürmer liegen bei 15 – 25 °C vor (Neuhauser et al. 1988). Temperaturen ab 30 °C führen zu vermindertem Wachstum, ab 35 °C zum Verenden der Tiere (Loehr et al. 1985). Temperaturen unter 10° C haben eine verminderte oder keine Futteraufnahme zur Folge, und unter 4 °C werden keine Kokons mehr abgelegt und die Entwicklung von jungen Würmern unterbleibt (Edwards und Bohlen 1996). Für *Dendrobaena veneta* wird der Temperaturbereich von 20 – 25 °C als ideal angesehen, wobei Produktivität und Kokonablage bei 25 °C höher als bei 20 °C sind, die Anzahl der geschlüpften Jungtiere ist jedoch bei 20 °C größer (Viljoen et al. 1992; Fayolle et al. 1997).

#### pH-Wert

Kompostwürmer besitzen eine recht weite Toleranz gegenüber pH-Werten von 5 bis 9. Auch hier gibt es artspezifische Abweichungen, aber generell bevorzugen sie einen leicht sauren bis neutralen pH-Bereich. Wenn sie die Möglichkeit haben, besiedeln sie Material mit einem pH-Wert von 5 (Dominguez 2004; Nguyen et al. 2008; Ansari und Ismail 2012). Die Bereiche ab pH 4,5 und niedriger werden gemieden (Edwards und Bohlen 1996).

Die Würmer können eine gewisse Säurepufferung des Futtermaterials durch Abgabe von Calciumcarbonat aus Kalkdrüsen in ihrem Verdauungstrakt (Speiseröhre) erreichen (Graff 1984; Dominguez 2004).

In den höheren Bereichen ab pH 8 steigt besonders in organischen Abfällen die Gefahr der Bildung von Ammoniak, welches bereits in geringen Konzentrationen ab 1 mg NH<sub>3</sub> / g Substrat toxisch für die Würmer wirkt (Bick 1999; Edwards und Neuhauser 1988; Neuhauser et al. 1988).

#### Leitfähigkeit / Salzgehalt

Der Einfluss des Salzgehaltes auf die Würmer ist deutlich abhängig von der Art des Salzes. Untersuchungen von Owojori et al. (2009) mit Speisesalz (NaCl) zeigen für *Eisenia fetida* eine deutliche Beeinträchtigung der Würmer ab einer Konzentration von 4000 mg NaCl / kg Boden (TS). Der Effekt von Natriumsulfat (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) auf Würmer ist nach Hughes et al. (2009)

deutlich geringer als der von NaCl. Edwards und Arancon (2004) beschreiben auch Natriumcarbonat ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) als weniger toxisch.

Nach Nguyen (2012) ist die Messung der Leitfähigkeit als Summenparameter nicht zwingend geeignet, da auch Nährstoffe den Messwert erhöhen, die in pflanzenverfügbarer Form (als Ionen, z.B.  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{K}^+$ ) ein angestrebtes Ergebnis der Vermikompostierung sind.

Bei der Vermikompostierung von Feststoffen aus der Abwasserreinigung ist jedoch nicht mit Salzkonzentrationen zu rechnen, die den Betrieb negativ beeinflussen (Kaplan et al. 1980).

### C/N-Verhältnis

Das C/N-Verhältnis ist für die Vermikompostierung ein zentraler Parameter, denn anhand des Verhältnisses von Kohlenstoff zu Stickstoff ergibt sich die Eignung des Materials zum mikrobiellen Abbau. Im Rahmen der Vermikompostierung verschiedener Materialien wird bei einem Ausgangs-C/N-Verhältnis von 25 die höchste biologische Stabilisierung des Materials erreicht (Ndegwa und Thompson 2000; Jadia und Fulekar 2008). Das ist nach Ndegwa und Thompson (2000) auch das beste Verhältnis für die mesophilen Mikroorganismen, die den Voraufschluss für die Würmer leisten. Das C/N-Verhältnis verringert sich im Verlauf der Vermikompostierung, was Suthar (2010) und Hait und Tare (2011) durch den Einbau von Kohlenstoff in Wurm-Biomasse und Veratmung (Abgabe als  $\text{CO}_2$ ) durch die Würmer und vor allem die Mikroorganismen erklären.

Das C/N-Verhältnis dient darüber hinaus zur Beschreibung der Reife des Vermikompostes und zur Einstufung der Eignung für den Einsatz in Gartenbau und Landwirtschaft. Ein C/N-Verhältnis von  $< 15$  gilt für die meisten Böden als geeignet (Morais und Queda 2003).

## 2.2 Einsatz der Vermikompostierung

Schon Darwin (1883) hat die große Bedeutung der Regenwürmer bei der Humifizierung und dem Abbau der organischen Substanz im Boden beschrieben. Die Nutzung der Würmer zur Behandlung verschiedener organischer Reststoffe in einer Vermikompostierung, sowohl die von Einzelstoffen als auch die von Gemischen, hat sich mittlerweile etabliert. Häusliche Abfälle und Gartenabfälle (ARRPET; Huang et al. 2014; Slocum) werden ebenso behandelt wie Kantinenabfälle (SWANA 2002; Sherman-Huntoon 2000), kommunale Abfälle (Sharma et al. 2005; Kharrazi et al. 2014) und landwirtschaftliche Reststoffe incl. Tierausscheidungen wie Schweine- und Rindermist (Aira und Dominguez 2009; Garg et al. 2006; Gupta und Garg 2008; Lazcano et al. 2008; Munroe). Auch industrielle Reststoffe wie Abwässer aus der Textilindustrie und Altpapier (Garg et al. 2006; Elvira et al. 1997; Gupta und Garg 2008) und sogar biomedizinische Abfälle werden mittels Vermikompostierung behandelt (Mathur et al. 2006).

In vielen Fällen wird der Vermikompostierung eine Heißrotte vorgeschaltet, was dem gesteuerten Voraufschluss der organischen Substanz und damit einer Effizienzerhöhung (Yadav et al. 2012; Frederickson et al. 1997) und der Sicherstellung der Hygienisierung dient (Frederickson et al. 2007).

Die Vermikompostierung wird auch für abwasserbürtige Feststoffe untersucht und eingesetzt. Dabei werden sowohl Klärschlämme aus der zentralen Abwasserbehandlung verwendet (Khwairakpam und Bhargava 2009; Clarke et al. 2007), als auch Feststoffe, die direkt nach dem Hausanschluss aus dem Abwasserstrom abgeschieden werden (Simons et al. 2005, Shalabi 2006; Yadav et al. 2012).

Die Vermikompostierung wird darüber hinaus in Pflanzenkläranlagen integriert (Mahmood et al. 2013) und zur Behandlung von Fäkalien aus Trenn- und Komposttoiletten (Nguyen 2012; Otterpohl et al. 1997; Yadav et al. 2010) sowie im Rahmen spezieller Vermikompost-Toiletten (Lalander et al. 2013) eingesetzt.

Aufgrund der hohen Wassergehalte der aus dem Abwasserstrom oder dessen Behandlung gewonnenen Stoffe wird entweder zusätzliches Strukturmaterial zugegeben (Yadav et al. 2010; Dominguez et al. 2000; Clarke et al. 2007), oder die Feststoffe werden entwässert (Khwairakpam und Bhargava 2009) oder getrocknet und gemahlen (Gupta und Garg 2008).

### 2.2.1 Betriebssysteme und -arten

Die verwendeten Betriebssysteme reichen von extensiven Mietenkompostierungen über einfache Kisten bis hin zu aufwändiger konstruierten Reaktoren (Frederickson; Sherman-Huntoon 2000). In der Regel wird eine Vermikompostierung zur Produktion von Vermikompost zur Nutzung als Dünger betrieben (Dominguez 2004). Darüber hinaus wird auch die Produktion von Wurmbiomasse für Fischköder (Fayolle et al. 1997) oder als Proteinquelle vornehmlich zur Tierproduktion (Sabine 1978; Edwards und Niederer 1988) genutzt.

Die Betriebsart ist abhängig von der Besatzdichte (Populationsdichte) und der Intensität der Fütterung (Edwards und Neuhauser 1988; Dominguez et al. 2000). Für *Eisenia fetida* haben Ndegwa und Thompson (2000) bei einer Besatzdichte von 1,6 kg Würmern je m<sup>2</sup> die beste Umsatzleistung bei einer Futtermenge von 0,75 kg Futter je kg Wurm und Tag ermittelt, die höchste Biomasseproduktion erfolgte bei einer Futtermenge von 1,25 kg Frischmasse je kg Wurm und Tag. Die Angaben zur optimalen Fütterung für die Umsetzung von organischen Abfällen schwanken teils deutlich, lassen sich aber unter Berücksichtigung der vielen Einflussgrößen (z.B. schwankende Futtermengen und -qualitäten oder wechselnde Umweltbedingungen) auf 0,5 kg Futter je kg Wurm und Tag zusammenfassen (Edwards und Bohlen 1996).

### 3 Material und Methoden

#### 3.1 Vermikompostierung

Die verwendeten Substrate und Futtermischungen variierten aufgrund der Entwicklungen in den anderen Teilbereichen des Projektes teils deutlich. In Tabelle 2 ist zum besseren Verständnis eine Übersicht über die Versuche gegeben, nähere Beschreibungen sind unter „Anhang: zusätzliche Material-und Methodenzuordnung zu den einzelnen Versuchen“ (ab Seite 94) aufgeführt.

Tabelle 2: Übersicht über die Versuche und die verwendeten Substrate. „Bioabfall“ stammt, wenn nicht weiter benannt, aus eigener Sammlung, „Biomüll“ von einem Bioladen, „Grobrechengut“ von der Kläranlage Rheinbach.

Technik / Komposter (Angabe der Größe in Liter)	Biologie		Akustik	
	Versuche	Substrate	Versuche	Substrate
<b>Voruntersuchungen</b>				
43 L s. Seite 19	Wurmauswahl	Fäkalien Lamberts-mühle, Kompost der Gewächshaus- Anlage Universität Bonn		
60 L s. Seite 16	Form der Substratvorgabe		Erfassen der Realgeräusche	Fäkalien Kaiserslautern
	Vorratsfütterung I	Küchenabfälle Mensa, Bioabfall Biotonne	Isolation eines Wurmgeräusches	
	Vorratsfütterung II	Bioabfall, Fäkalien Lamberts-mühle	Elimination von Störgeräuschen	
	Bedarfsfütterung A	Bioabfälle ohne Zitrusfrüchte, Fäkalien Lamberts-mühle		
	Bedarfsfütterung B	Bioabfall, Grobrechengut, Essensreste Krankenhaus		
1 L s. Seite 19	Salztoleranz	Einheitserde (RWZ)		
9 L s. Seite 19	Akzeptanzuntersuchung alternative Substrate	Einheitserde (RWZ), Bioabfall (REMONDIS), Überschussschlamm Bonn		
500 L s. Seite 17	Test des Aufbaus Upscaling Gitterboden keine Bedeckung weitere Substrate	Biomüll Bioladen, Einheitserde (RWZ), Grobrechengut		
<b>Testphase</b>				
300 L s. Seite 20	Notwendigkeit von Co-Substraten	Fäkalien Kaiserslautern, Sägespäne (Schreinerei), Papier (Aktvernichter)	Kalibration auf Grundlage verschiedener Wassergehalte	Fäkalien Kaiserslautern
<b>Anwendung</b>				
Komposter s. Seite 22	- Betrieb -	Bioabfall REMONDIS, Überschussschlamm	Kontrolle und Steuerung der Vermikompos- tierung	Bioabfall REMONDIS, Überschussschlamm

### 3.1.1 Verwendete Wurmart *Dendrobaena veneta*

Die verwendeten Würmer stammten von der Firma „Superwurm“<sup>3</sup> und wurden als *Dendrobaena veneta* (Rosa 1886) bezeichnet. Die Würmer wurden in der Sortierung „mittel“ eingekauft und direkt nach Erhalt eingesetzt.

In einigen Werken werden die Arten *Dendrobaena veneta* und *Eisenia hortensis* als identisch angesehen (Dominguez und Edwards 2011).

#### 3.1.1.1 Entwicklung einer Boniturskala zur Beurteilung der Würmer

Zur optischen Beurteilung der Würmer wurde eine Boniturskala (siehe Tabelle 3) entwickelt, die speziell für die verwendete Art *Dendrobaena veneta* gilt. Die Bonitur setzt sich aus drei Einheiten zusammen: einer „Stufe“ zur Beschreibung der Würmer und zwei „Zusätzen“ zur Beschreibung der Feuchte des Substrates und der Verteilung der Würmer im Substrat bzw. über die Fläche des Komposters. Die Kombination „1 S<sub>f</sub>K<sub>w</sub>“ bezeichnet den optimalen Zustand der Vermikompostierung. Alle Abweichungen davon zeigen eine Störung des Prozesses an.

Am Habitus der Würmer kann man schnell erkennen, ob die Würmer Stress unterliegen oder ob optimale Lebensbedingungen vorliegen. Die Würmer sollten deutlich gefärbt sein, einen kräftigen, feuchten Körper haben, über das gesamte Futtersubstrat verteilt sein und schnell vor Licht ins Substrat flüchten. Sind die Umweltbedingungen passend, lassen sich Wurm-Kokons und juvenile Tiere finden (Edwards und Bohlen 1996).

Deutliche Anzeichen für Stress sind eine fahle Färbung, ein dünner Körper und Trägheit, so dass sie sich die Würmer trotz Lichteinstrahlung nicht oder nur langsam ins Substrat zurückziehen. Ein ebenso deutliches Zeichen für Stress ist es, wenn sie nicht mehr das gesamte Substrat besiedeln, sondern sich zu größeren Ansammlungen zusammenfinden. Dieses Verhalten stellt eine Fluchtreaktion vor ungeeigneten Umweltbedingungen dar. Die Würmer besiedeln dann Bereiche mit geeigneten Bedingungen oder versuchen aus dem Kompostreaktor zu flüchten, was jedoch aufgrund des geschlossenen Systems nicht möglich ist. Sie „sammeln“ sich dann in den Randbereichen.

---

<sup>3</sup> Martin Langhoff SUPERWURM e.K., Felix Wankel Straße 8, 52351 Düren

Tabelle 3: Boniturskala für die Beurteilung des Zustands der Würmer während der Vermikompostierung

Stufe	Beschreibung
1	dicker, feuchter Körper, deutliche rote Färbung, agil, lichtflüchtend
2	dünnerer Körper, fahle Färbung, weniger agil, teilweise nicht lichtflüchtend
3	dünner Körper, fahle Färbung, kaum agil, Knäuelbildung, teilweise tote Würmer
4	Würmer in großem Umfang tot
Zusätze	Bedeutung
S <sub>f</sub> / S <sub>ff</sub>	Substrat feucht / nass
S <sub>t</sub>	Substrat trocken
K <sub>w</sub>	Würmer über ganzen Komposter verteilt
K <sub>p</sub>	Würmer durchziehen nur Teile des Substrates

### 3.1.2 Beschreibung der verwendeten Kompostreaktoren

In verschiedenen Stadien der Untersuchungen wurden verschiedene Kompostreaktoren betrieben, deren Konzeption und Gestaltung aufeinander aufbauen.

#### 3.1.2.1 Voruntersuchungen

##### 60-L-Rottebox

Es wurden Holzboxen mit den Ausmaßen L: 50 cm x B: 42 cm x H: 28 cm konstruiert. Die Holzboxen besaßen in der Mitte eine Trennwand, die auf der bodennahen Seite vier Löcher mit 8 cm Durchmesser aufwies. Diese Löcher wurden mit grobmaschiger Gaze (Durchmesser 3 mm) versehen, so dass die Würmer diese Trennwand passieren konnten, die Substrate auf beiden Seiten aber voneinander getrennt blieben. In der Abbildung 2 ist der schematische Aufbau der Holzboxen gezeigt.

Ab dem Status „Bedarfsfütterung A“ wurden 20 Drainagelöcher mit 3 mm Durchmesser in die Böden gebohrt.

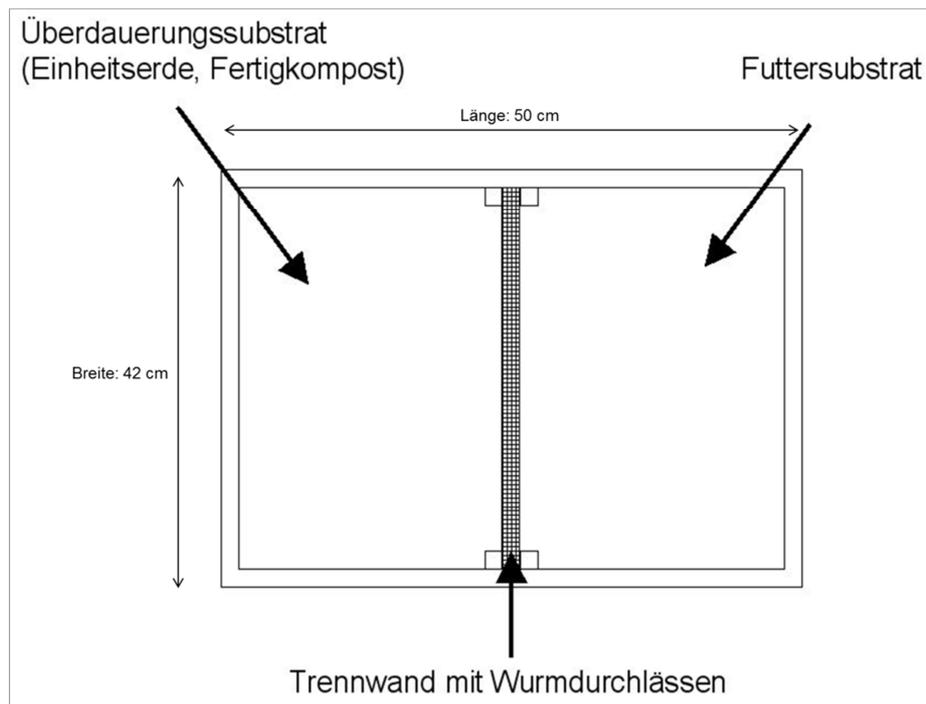


Abbildung 2: Schematischer Aufbau einer 60-L-Holzbox (Draufsicht) zur Durchführung der Vermikompostierung, Maße der Box: Länge: 50 cm, Breite: 42 cm, Höhe: 28 cm.

### 500 L-Rottebox

Basierend auf den Erfahrungen mit den 60-L-Boxen wurde als Zwischenschritt zum Zieldesign eine 500-L-Rottebox gebaut.

Als Ausgangsform diente ein 1m<sup>3</sup>-Kunststofftank, der auf ein Maß von L: 108 cm x B: 98 cm x H: 60 cm zugeschnitten und mit einem Gitterboden aus Bewehrungsstahl versehen wurde. Der Gitterboden wies bei einer Stangenstärke von 10 mm einen Stangenabstand von 9 mm auf (siehe Abbildung 3). Unter dem Gitterboden wurde ein Auffangbehälter positioniert (siehe Abbildung 4 und Abbildung 5).



Abbildung 3: Gitterboden der 500-L-Box



Abbildung 4: 500-L-Box mit Auffangbehälter

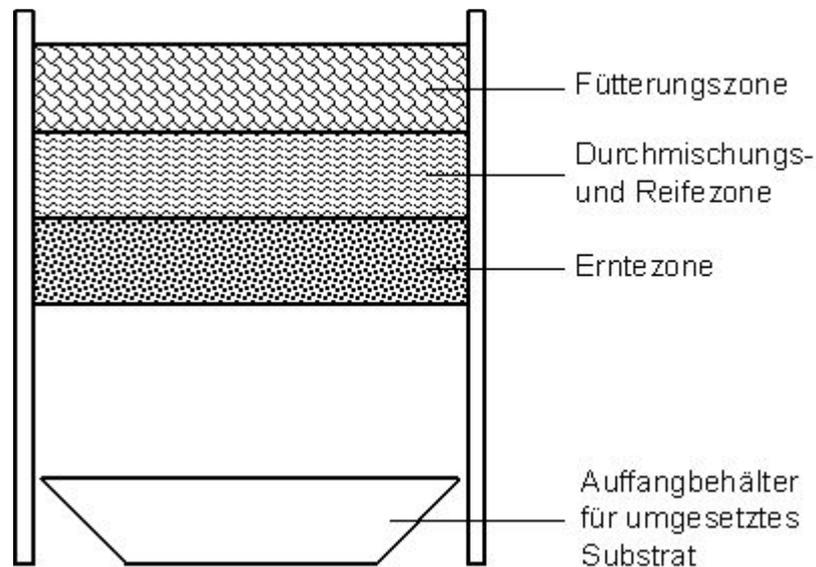


Abbildung 5: Schema der 500-L-Box

Zusätzliche Kompostergrößen und -designs, in denen Untersuchungen durchgeführt wurden:

Wurmauswahl:

Hier wurden „Oscar“-Tonnen aus Kunststoff verwendet. Die Tonnen hatten ein Volumen von 43 L und konnten mit einem Deckel verschlossen werden. Zur Gewährleistung des Gasaustausches und zur Drainage freien Wassers wurden mehrere Löcher mit 3 mm Durchmesser in Wände, Boden und den Deckel gebohrt.

Salztoleranzversuch:

Als Versuchs-Komposter dienten handelsübliche Kunststoff-Blumentöpfe mit einem Volumen von 1 L, die mit Kunststoffplatten abgedeckt wurden.

Akzeptanzuntersuchung alternative Substrate (kommunaler Bioabfall und Überschussschlamm):

PVC-Abwasserrohre mit einem Durchmesser von 20 cm wurden in 30 cm lange Stücke geschnitten. Diese wurden einseitig mit Drahtgeflecht (Maschenweite 1 cm) verschlossen und mit der Drahtboden-Seite nach unten zur Schaffung eines Freiraumes unterhalb der 9-L-Versuchs-Komposter auf jeweils zwei 5 cm hohe (2,5 cm breite und 10 cm lange) Holzstücke einzeln in Alu-Wannen gestellt und mit Kunststoffplatten lichtdicht verschlossen (siehe Abbildung 6).



Abbildung 6: 9-L-Versuchs-Komposter (mit Substrat) für Akzeptanzuntersuchungen mit kommunalem Bioabfall und Überschussschlamm (im Bild: kommunaler Bioabfall).

#### 3.1.2.2 Testphase

Aufbauend auf den vorangegangenen Rottebox-Designs und Versuchsdurchführungen wurden drei identische 300-L-Rottreaktoren konstruiert. Diese bestanden aus Metallgerüsten, in welchen die eigentlichen Vermikompostierungs-Einheiten in einer Höhe von 80 cm enthalten waren. Die Vermikompostierungs-Einheiten hatten die Maße:

L: 140 cm x B: 73 cm x H: 30 cm und waren mit Kunststoffplatten umschlossen. Die Gitterböden bestanden aus Stahl-Stangen mit einem Durchmesser von 10 mm und einem Stangenabstand von ebenfalls 10 mm. Die Komposter konnten mit Kuppeldächern aus lichtdichter Folie verdunkelt werden. Abbildung 7 und Abbildung 8 zeigen den Aufbau der Rottreaktoren.



Abbildung 7: Außenansicht der 300-L-Rottereaktoren



Abbildung 8: Innenansicht der 300-L-Rottereaktoren

### 3.1.2.3 Anwendung

Aufgrund der Erfahrungen aus den einleitenden Aufbauten und Versuchsdurchführungen wurde ein Komposter konstruiert, der für die Behandlung von rund 200 kg Substrat pro Monat ausgelegt war.

Der Komposter hatte die Ausmaße Länge x Breite x Höhe: 5 m x 1,6 m x 0,9 m. Der Rahmen war aus lackiertem Stahl; alle Bauteile, die mit frischem Substrat in Berührung kamen, wurden aus nicht rostendem Stahl gebaut. Zum Auflockern des Materials (Erntehilfe) wurde ein Kratzboden installiert, dessen Zinken zwischen den Stäben des Gitterbodens 1 cm hervorragen. In Abbildung 9 ist eine Konstruktionszeichnung des Komposters gezeigt.

Auf dem Rahmen des Komposters befand sich die Applikationseinheit, die das von einer Excenterschneckenpumpe geförderte Substrat ausbrachte. Die Verteilung erfolgte über das Auspressen des Substrates durch Schlitze (10 cm x 2 cm). Die Schlitze wurden versetzt auf einem Rohr angebracht, das über einem weiteren Rohr saß, welches einen durchgehenden Schlitz (Breite: 2 cm) über die gesamte Länge aufwies. Das äußere Rohr konnte so verdreht werden, dass immer nur ein Schlitz mit dem des inneren Rohres übereinander gebracht wurde, so dass das Substrat dort austreten konnte (siehe Abbildung 11). So konnte der gesamte Komposter belegt werden, die Applikationseinheit bewegte auf der x-Richtung, durch das Verdrehen des Rohres wurde ein Versatz in y-Richtung erreicht. Die Applikationseinheit ist in Abbildung 10 und Abbildung 11 gezeigt.

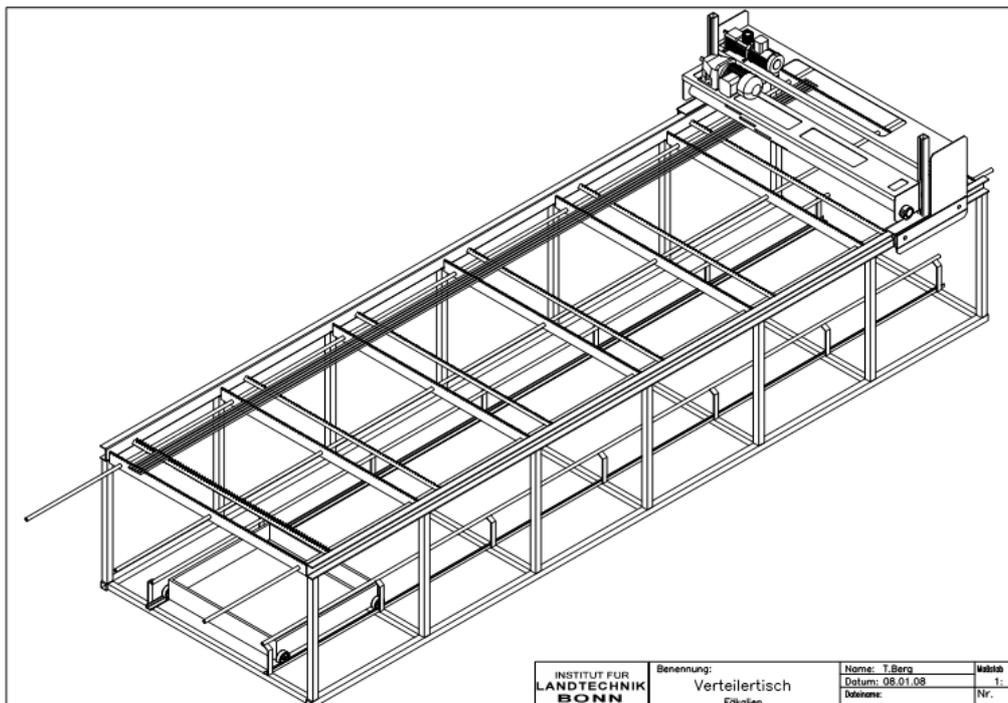


Abbildung 9: Konstruktionszeichnung des Komposters; zur besseren Übersicht sind die Gitterstäbe, auf denen das Material vorgegeben und kompostiert wird, nicht umfassend eingezeichnet



Abbildung 10: Applikationseinheit des Komposters (Markierung: äußeres Rohr) mit den versetzt angebrachten Schlitzfenstern

An der Applikationseinheit war auch die Bewässerungsvorrichtung in Form eines Tropfbalkens angebracht, wie in Abbildung 11 zu erkennen ist. An diesem Tropfbalken waren Tropfer im Abstand von 50 mm angebracht, die pro Überfahrt insgesamt 4,2 L Wasser ausbrachten. Eine höhere Bewässerungsmenge konnte durch wiederholtes Überfahren erreicht werden.

Die Steuerung des Komposters war an die Steuerung einer Excenterschneckenpumpe angeschlossen. Sobald die Pumpe lief (füllmengeninduziert), brachte sich die Applikationseinheit in die letzte Stellung der vorherigen Überfahrt und verteilte das Substrat von dort aus weiter nach vorgegebenem Schema. Sobald die Pumpe stoppte, drehte das äußere Rohr in eine „Null-Stellung“, in der die Applikationseinheit verschlossen war. So wurde ein Antrocknen des Substrates in der Applikationseinheit und damit ein Verstopfen vermieden.

Unter dem Komposter befanden sich mehrere Wagen, in denen das herausfallende Material gesammelt wurde. Der Kompost wurde über Gazebahnen in diese Wagen geleitet und konnte dort entnommen werden (siehe Abbildung 13).

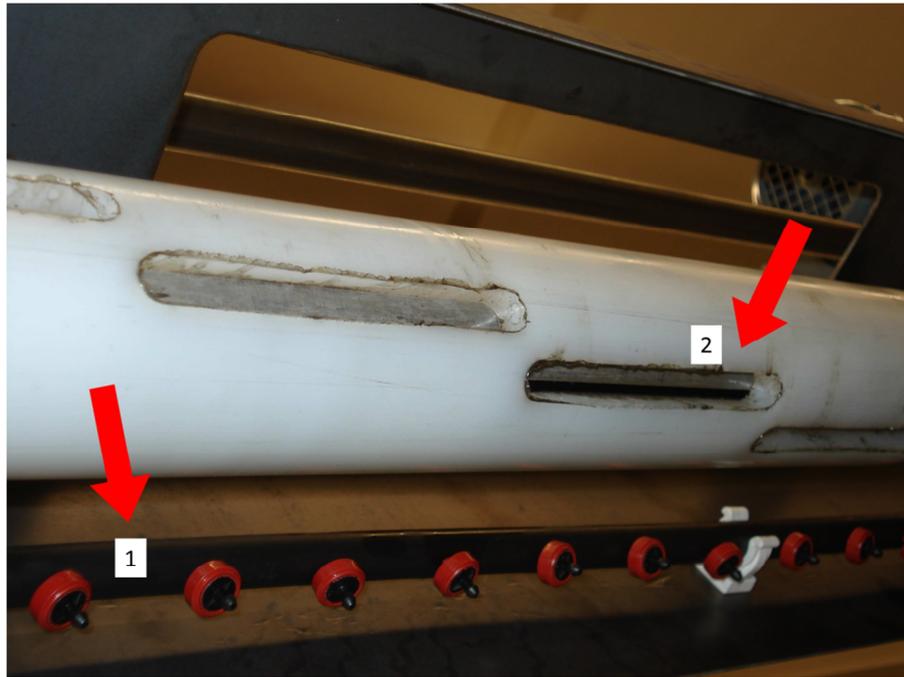


Abbildung 11: Applikationseinheit des Komposters mit Tropfbalken (Markierung 1), Blick von unten. An Markierung 2 ist durch den Schlitz des äußeren Rohres der Schlitz des inneren Rohres zu erkennen (schwarz).

Zur Demonstration des Ablagebildes ist in Abbildung 12 die Durchführung mit einem über Gewebesack und Schwerkraftentwässerung voreingedicktem Überschussschlamm gezeigt.



Abbildung 12: Ablagebild der Applikationseinheit auf dem Komposter bei Vorversuchen mit Überschussschlamm, der Gitterboden wurde mit Folie abgedeckt.



Abbildung 13: Gesamtansicht des zum Teil mit Bioabfall belegten Komposters. Unterhalb des Gitterbodens sind die Gazebahnen und Auffangboxen zu erkennen.

### 3.1.3 Messmethoden

#### 3.1.3.1 Labormethoden für allgemeine Parameter und Nährstoffe

In Tabelle 4 ist eine Übersicht über die genutzten Methoden zur Messung der allgemeinen chemischen und physikalischen Parameter sowie der Nährstoffe gegeben.

Tabelle 4: Übersicht über die genutzten Messmethoden zu Messung der allgemeinen chemischen und physikalischen Parameter sowie der Nährstoffe (BGK = Methodenbuch der Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V., VDLUFA = VDLUFA Methodenbücher)

Parameter	Methodik	Geräte
Trockensubstanz (TS)	BGK, Kap II, A.1 VDLUFA, A 2.1.1	Waage PG 5002-S (Fa. Mettler Toledo), Trockenschrank (Fa. Heraeus)
organische Trockensubstanz (oTS)	BGK, Kap. III, B 1.1 VDLUFA 15.2	Analysenwaage 2007 MP (Fa. Sartorius, 0,1 mg), Muffelofen AAF 1100 (Fa. Carbolite)
pH-Wert (pH)	BGK, Kap. III, C 1 VDLUFA, A 5.1.1	pH 340-A (Fa. WTW)
Elektrische Leitfähigkeit (LF)	BGK, Kap. III, C 2 VDLUFA, A13.4.1	LF 340 (Fa. WTW)
Atmungsaktivität (AT <sub>4</sub> )	BKG, Kap. IV, A 2	Oxitop C-Messköpfe (Fa. WTW) Sensomat-Scientific (Fa. Aqualytic)
Kohlenstoff- / Stickstoffverhältnis (C/N)	Verbrennung, geschromatographischer Nachweis	Elementaranalysator Euro EA 3000 (Fa. Eurovector)
Gesamt-Stickstoff (N <sub>tot</sub> )	BGK, Kap. III, A 1	Kjeldatabs, Kjeldatherm, Turbosog, Vapodest (Fa. Gerhardt),
Gesamt-Phosphor (P <sub>tot</sub> )	VDLUFA, A 2.4.2.1	Photometer ECOM 6122 (Fa. Eppendorf)
Gesamt-Kalium (K <sub>tot</sub> )	Trockene Veraschung, flammenphotometrischer Nachweis	Flammenphotometer ELEX 6361 (Fa. Eppendorf)
Pflanzenverfügbare Stickstoff (N <sub>pflverf</sub> )	VDLUFA, A 6.1.3.1	UV/VIS Spectrometer Lambda 20 (Fa. Perkin-Elmer)
Pflanzenverfügbare Phosphor (P <sub>pflverf</sub> )	BGK, Kap. III, A 2.2	Photometer ECOM 6122 (Fa. Eppendorf)
Pflanzenverfügbares Kalium (K <sub>pflverf</sub> )	BGK, Kap. III, A 2.2 VDLUFA, A 6.2.1.1	Flammenphotometer ELEX 6361 (Fa. Eppendorf)
Total Ammonium Nitrogen (TAN, Gesamtammonium)	Quantofix N-Test	Scheibler-Apparatur (Uni Bonn)
Pflanzenverträglichkeit (Kressetest)	VDLUFA, A 10.2.1	-
Schwermetalle (Cr, Cu, Ni, Pb, Zn)	EN ISO 11885: 1997	ICP-OES

### Rottegrad

Der Rottegrad ist ein Reifezeiger für Komposte nach Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. (BGK 2006). Es gibt fünf Rottegrade, in die die Komposte eingeteilt werden: I („Kompostrohstoff“) bis V („Fertigkompost“). Die Einteilung gibt in der Reihenfolge von I bis V eine steigende Stabilisierung an, die sich aus der sinkenden Selbsterhitzungsfähigkeit und/oder der sinkenden Sauerstoffzehrung des Materials (gemessen als Atmungsaktivität im Verlauf von 4 Tagen: „AT<sub>4</sub>“) definiert. Die Selbsterhitzung ergibt sich aus dem Vorhandensein leichtverfügbarer Kohlenstoffverbindungen und deren exothermen mikrobiellem Abbau. Je geringer der Anteil leicht abbaubarer Kohlenstoffverbindungen, desto geringer die Selbsterhitzung.

Die einzelnen Stufen sind mit den korrespondierenden AT<sub>4</sub>-Werten und Temperaturbereichen in Tabelle 5 aufgelistet.

Tabelle 5: Zusammenhänge zwischen Rottegrad, Atmungsaktivität und Selbsterhitzung bei der Untersuchung von Komposten (nach: BGK 2006)

Rottegrad	Sauerstoff- verbrauch AT <sub>4</sub> [mg/g FM]	Selbsterhitzung [° C]	Produkt- bezeichnung
I	> 80	> 60	Kompostrohstoff
II	80 – 50,1	50-60	Frischkompost
III	50 – 30,1	40-50	Frischkompost
IV	30 – 20,1	30-40	Fertigkompost
V	≤ 20	<30	Fertigkompost

### Pflanzenverträglichkeit / Kressetest:

Es wird eine definierte Anzahl Kressesamen (*Lepidium sativum*, 0,5 g) in einer definierten Menge Kontrollmedium (hier: Einheitserde, RWZ, 20 g) und einer gleichen Menge Testmaterial (hier: Vermikompost, 20 g) unter identischen Bedingungen zum Keimen gebracht. Nach 4 Tagen (oder mehr) werden die Entwicklungen in den Ansätzen hinsichtlich Keimrate, Aufwuchs und Wurzelentwicklung verglichen. Anhand des Vergleichs lässt sich qualitativ abschätzen, ob im zu untersuchenden Material Hemmstoffe für das Pflanzenwachstum vorhanden sind.

## 3.2 Akustische Kontrolle der Kompostwürmer

Die Würmer erzeugen beim Durchwandern des Substrates Geräusche. Diese Geräusche sollten für die Überwachung (und in einem zweiten Schritt für die Steuerung) der Vermikompostierung genutzt werden. Für die Aufnahme und Auswertung der Geräusche im Substrat wurden verschiedene Techniken, Programme und Einstellungen benutzt.

### 3.2.1 Hintergrundinformationen zur Akustik

Mechanische Schwingungen können sich als Schallwellen in gasförmigen, flüssigen und festen Medien ausbreiten. Ihre Ausbreitung hängt von der Art des Mediums ab. Schallwellen in Flüssigkeiten und Gasen verhalten sich gleichartig, da keine Schubspannungen auftreten können. Daher gibt es in beiden Medien nur Longitudinalwellen, in denen die Schwingungsrichtung parallel zur Ausbreitungsrichtung liegt (Meyer und Neumann 1974).

Von großer Bedeutung für die akustische Überwachung von Kompostwürmern sind die Kugelwellen, bei denen die Schallfeldgrößen außer von der Zeit nur von dem Abstand von einem Zentrum, dem Ort der Entstehung des Wurmgeräusches, abhängen. Für zwei stationäre Mikrophone mit einem bestimmten Abstand voneinander bedeutet dies, dass ein Geräusch, z.B. ein Wurmgeräusch, nur dann identisch aufgenommen wird, wenn der Entstehungsort (die Schallquelle) von beiden Mikrophonen gleich weit entfernt ist. In allen anderen Fällen sind die Schallintensitäten unterschiedlich und die Signale erreichen mit leichter zeitlicher Verzögerung (Laufzeitunterschiede) die Mikrophone. Die Verwendung der Laufzeitunterschiede ist bei den vorhandenen experimentellen Abmessungen der Vermikompostierung nicht praktikabel, da diese wegen der geringen Distanzunterschiede zu gering sind. Aufgrund der veränderten Schallintensitäten (Abnahme mit halbem Radius von der Schallquelle) an unterschiedlich verteilten Mikrophonen könnten jedoch die Wurmgeräusche räumlich zugeordnet werden. Die örtliche Zuordnung könnte jedoch auch durch Trichter erreicht werden, die nur die Geräusche eines geometrisch klar zugeordneten Bereiches an die einzelnen Mikrophone zulassen und Geräusche, die von außerhalb des zugeordneten Bereiches stammen, abschirmen. Inhalt dieser Arbeit war die Klärung, ob die Überwachung über die akustischen Signale der Vermikompostierung überhaupt möglich ist, eine Bewertung der Trennung mehrerer Mikrophone wurde daher nicht untersucht.

### 3.2.2 Durchführung der Versuche

#### Voruntersuchungen

Die Untersuchungen zur Detektion und Aufnahme der Wurmgeräusche wurden in der Anfangsphase in einer der ab Seite 16 beschriebenen 60-L-Boxen im Betrieb mit Fäkalien aus Kaiserslautern (3 kg Fäkalien mit 80 % Wassergehalt, 500 g *Dendrobaena veneta*) und dem Ansatz in der 500-L-Box (4.1.1.5) durchgeführt.

In den ersten Versuchen wurden kurze Tonsequenzen als analoge Signale mit einer handelsüblichen Hörhilfe (Mikrofon mit integriertem Vorverstärker; „Hi-Powered Hearing Enhancer“, Fa. CyberEar) aufgenommen und in ein digitales Signal umgewandelt.

Für die Untersuchungen, ob die Aufnahme der Wurmgeräusche über oder im Substrat effektiver war, wurden von der Fa. INVIVO ein Aufbau mit zwei Hörgerät-Mikrofonen mit externem Vorverstärker genutzt. Ein Mikrofon wurde rund 20 cm über dem Substrat installiert, das andere wurde in einer Schutzhülle aus dünnem Latex etwa 5 cm tief im Substrat positioniert.

Die Aufnahmen von kurzen Tonsequenzen erfolgten während der Voruntersuchungen mittels eines Audioeditors („audacity“; Open-Source-Software), mit dem diese auch wiedergegeben und gespeichert werden konnten. Der Audioeditor wurde genutzt, um beim Abspielen der Tonsequenzen Wurmgeräusche (als „Einzelereignisse“) eindeutig zu identifizieren (auch visuell) und von normalen Umgebungsgeräuschen zu trennen.

#### Testphase

Die Untersuchungen zur Ermittlung der Zielfrequenz wurden in einer der 60-L-Boxen durchgeführt, deren Wände und Deckel zur Schallisolation (Schutz vor Umgebungsgeräuschen) mit 5 cm starkem Wabenschaumstoff ausgekleidet wurden. Die Vermikompostierung wurde mit 3 kg Fäkalien (mit 80 % Wassergehalt) aus Kaiserslautern und 500 g *Dendrobaena veneta* betrieben.

Die weiteren Untersuchungen fanden im Versuchsbetrieb der 300-L- Reaktoren statt (Seite 20). Ein 20-L-Eimer mit 2 kg Fäkalien aus Kaiserslautern mit 87 % Wassergehalt ohne Würmer diente als „Kontrollansatz“ um ausschließen zu können, dass die Geräusche aus dem Substrat selber stammten und nicht von den Würmern produziert wurden.

Der Aufbau zur Aufnahme und Weiterverarbeitung der Wurmgeräusche wurde durch die Fa. INVIVO erstellt:

Die Aufnahme erfolgte über insgesamt 8 baugleiche Mikrophone (Basis waren Hörgerät-Mikrophone) mit externem Verstärker und eigener Spannungsversorgung. Der Aufbau bei den unterschiedlichen Versuchsdurchführungen ist im Folgenden beschrieben:

### Versuche bei Vermeiden von Störgeräuschen

Die Aufnahmen wurden von jeweils zwei Mikrofonen über einem feuchten Ansatz (87 % Wassergehalt; Mik1 und Mik2) und einem trockenerem Ansatz (80 % Wassergehalt; Mik3 und Mik4) gemacht. Die Mikrophone 5, 6 und 7 wurden bei dieser Durchführung nicht beachtet. Mikrophon 8 wurde über dem Ansatz mit Feststoffen ohne Würmer (bei 87 % Wassergehalt) installiert. Damit sollte ausgeschlossen werden, dass die wahrnehmbaren Geräusche von den feuchten Feststoffen produziert wurden und nicht von den Würmern (Anordnung der Mikrophone siehe Abbildung 14).

### Versuchsdurchführung ohne Unterdrücken von Störgeräuschen

Um die Einsatzfähigkeit der akustischen Überwachung der Wurmmaktivität und die biologische Signifikanz der Messereignisse zu überprüfen, wurde die Temperatur innerhalb des Containers auf 12 °C gesenkt. Während der darauf folgenden langsamen Aufheizphase auf 25 °C mit den begleitenden Störgeräuschen (Heizung, Klimaanlage, Belüftung) wurden die Aufnahmen mit dem identischen Aufbau der vorherigen Versuche durchgeführt. Zusätzlich erfassten die Mikrophone 5 bis 7 die Umgebungsgereusche innerhalb des Containers und werteten diese identisch zu den Wurmsignalen aus. Das Mikrophon 8 war in einen Behälter auf Substrat (mit 87 % Wassergehalt) ohne Würmer gerichtet, so dass der Einfluss der akustischen Eigenschaften des Substrates (Schallabsorption, -reflexion) gezielt ohne Wurmgeräusche gemessen werden konnte (siehe Abbildung 14).

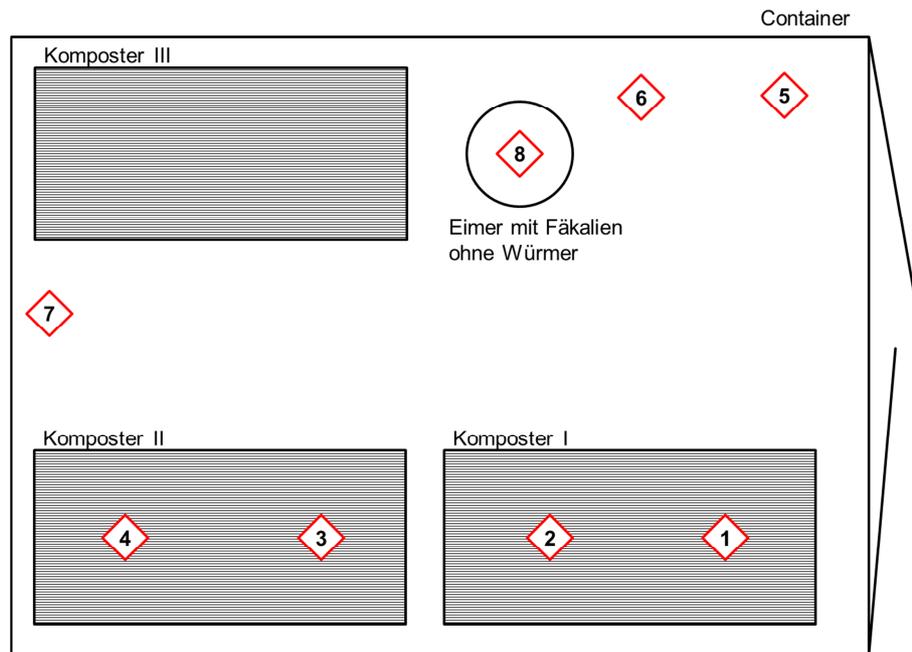


Abbildung 14: Skizze zur Positionierung der Mikrophone (rot umrandet) im Container. Die Mikrophone 1 und 2 befanden sich über Komposter I bei rund 87 % Wassergehalt mit Fäkalien + Würmern, Mikrophone 3 und 4 befanden sich über Komposter II bei etwa 80 % Wassergehalt mit Fäkalien + Würmern, das Mikrophone 8 befand sich über einem Eimer mit Fäkalien mit ebenfalls rund 87 % Wassergehalt ohne Würmer. Die Mikrophone 5, 6 und 7 waren in den Raum gerichtet und erfassten keine Vermikompostierung (für die Durchführung bei Vermeidung von Störgeräuschen wurden die Mikrophone 5, 6 und 7 nicht berücksichtigt). Der Komposter III wurde nicht einbezogen.

Die Weiterleitung erfolgte über ein geschirmtes Datenkabel, um Störungen durch andere Frequenzen zu vermeiden. Die Wandlung der akustischen Signale wurde über eine Messdatenerfassungskarte realisiert, die an einem handelsüblichen PC installiert war. Die weitere Verarbeitung der Signale geschah über das Programmiersystem „LabView“ der Fa. National Instrument, in dem die jeweiligen Behandlungen der Inputdaten vorgegeben werden können. Die Auswertung und graphische Darstellung der digitalisierten Tonsequenzen wurden über Excel (Fa. Microsoft Corporation), Sigmaplot (Fa. Systat Software GmbH) und Origin (Fa. OriginLab Corporation) vorgenommen.

### Anwendung

Die Messungen wurden im Komposter aus 3.1.2.3 während des Standard-Betriebes (Bioabfall, Überschussschlamm, *Dendrobaena veneta*) durchgeführt. Die verwendete Messtechnik entsprach dem Aufbau aus der Testphase, hier wurden jedoch nur zwei Mikrophone verwendet, die unterschiedlich Stellen auf dem Komposter erfassten.

### 3.2.3 Auswertung der Versuche

#### Voruntersuchungen

Die Darstellung der Signale über den Audioeditor „audacity“ erfolgte als Wellenform (siehe Abbildung 36 und Abbildung 37). Diese Darstellung zeigt den relativen Verlauf einer Schwingung, so dass Frequenz (Tonhöhe) und Amplitude (Lautstärke) abgeschätzt und verglichen werden konnten. Diese Darstellung ist jedoch nicht ausreichend, um exakte Angaben zu Frequenz oder Amplitude zu machen.

#### Testphase

Die Frequenzanalyse (allgemein: Überführung von Zeitsignalen in den Frequenzbereich, hier: alle Signale im Frequenzbereich 0 bis 22.000 Hz über die Dauer der Aufnahmen) wurde mittels der Fourier-Analyse durchgeführt (Formel 1). Neben der Zielfrequenz der Wurmgeräusche konnten so auch die Frequenzbereiche der Störsignale ermittelt werden. In Anlehnung an die Standard-Samplingrate von CDs wurde eine Abtastrate von 22 kHz gewählt, so konnten Standard-Wiedergabegeräte genutzt werden.

Die (i. d. R.) auf Computern angewandte Variante der Fourier-Transformation wird als Diskrete-Fourier-Transformation bezeichnet („DFT“, Formel 2), der Unterschied besteht im Austausch der Integration durch eine endliche Summe. Der am häufigsten eingesetzte Algorithmus ist die Fast-Fourier-Transformation (nicht gezeigt).

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt$$

Formel 1: Fourier-Transformation

$$X_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-j \frac{2\pi nk}{N}}$$

Formel 2: Diskrete Fourier-Transformation (k=0, 1, ..., N-1)

Die gemessenen akustischen Signale der Vermikompostierung bestehen aus einer Überlagerung von vielen verschiedenen Frequenzkomponenten, die man mit der Frequenzanalyse voneinander trennen kann. Allerdings ist die Fourier-Transformation (als Fast-Fourier-Transformation) auch auf aktuellen PCs sehr rechenaufwendig, so dass eine online-Überwachung mit kontinuierlicher Frequenzauswertung über Fourier-Transformation zu zeitaufwendig und nicht praktikabel war. Da sich die Wurmgeräusche durch einen

charakteristischen Klang und damit auch durch einen charakteristischen Frequenzbereich auszeichnen, bot sich eine Differenzierung der akustischen Signale an.

Dazu wurde die Frequenz isolierter Wurmgeräusche ermittelt. Das Detektieren erfolgte über die zeitliche Streckung einer Aufnahme mit klar wahrnehmbaren Wurmgeräuschen, bis ein Einzelgeräusch identifiziert werden konnte. Mit den Daten dieser Einzelgeräusche wurde dann eine Frequenzanalyse durchgeführt, um die Mittenfrequenz zu finden. Nach mehreren Durchführungen konnte so ein „Zielfrequenzbereich“ benannt werden

( $2 \cdot \pi \cdot f = 5000 - 6000$  Hz; damit  $f$  („Frequenz“) = 796 - 996 Hz).

Die charakteristischen Werte dieses „Zielfrequenzbereiches“ wurden genutzt, um ein Frequenz-„Fenster“ zu errichten (Prinzip eines Bandpassfilters). Es wurden nur die „Ereignisse“ innerhalb des Frequenzfensters gezählt, Ereignisse mit Werten außerhalb dieses „Fensters“ wurden nicht gezählt (siehe Abbildung 15).

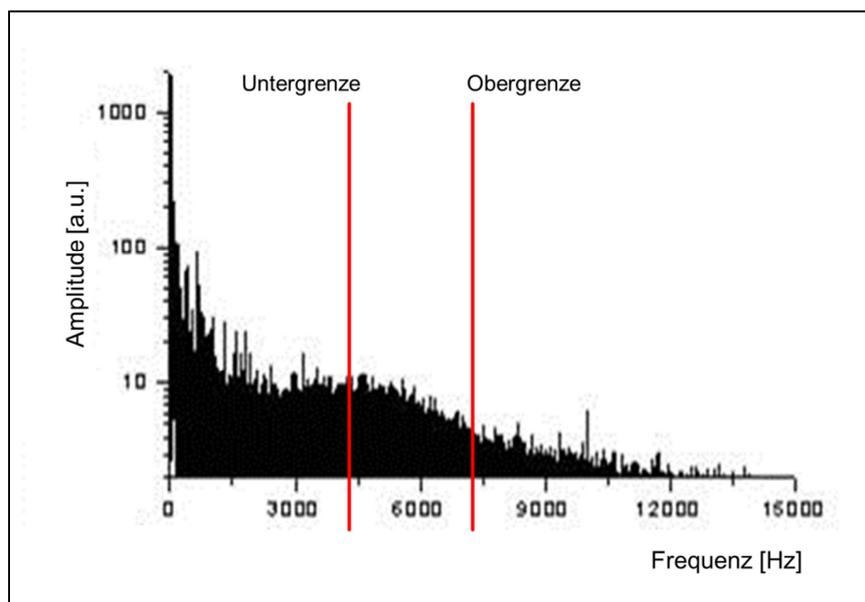


Abbildung 15: Schematische Darstellung des „Frequenz-Fensters“ zur Eingrenzung des Messbereiches am Beispiel der Frequenzanalyse einer Aufnahme über der Vermikompostierung mit Fäkalien. Die Unter- und Obergrenze können variiert werden, im Rahmen der Auswertung werden nur die Frequenzen innerhalb der gesetzten Grenzen berücksichtigt.

Für die Anwendung wurde das „Fenster“ nicht über die Original-Daten gelegt, sondern über die differenzierten Signale (nach Kettenregel abgeleitet). Dabei wurde wie weiter oben beschrieben nur die Frequenz „ $f$ “ betrachtet. Der Zielbereich für das Fenster betrug demnach etwa 800 bis 1000 Hz. Es wurden Versuchsreihen durchgeführt, in denen mit verschiedenen Fenstergrößen und -lagen untersucht wurde, wo die Zählung der Wurmereignisse biologisch sinnvoll war und die Anzahl an falsch zugeordneten Ereignissen minimiert wurde.

Die wesentlichen Vorteile dieser Auswertungsmethode sind:

- a) Die Signalfluktuationen der akustischen Signale werden beseitigt.
- b) Die Frequenzen der akustischen Signale bleiben bei der Differenzierung erhalten. Die erste Ableitung einer Sinusfunktion ist die Cosinusfunktion mit der identischen Frequenz.
- c) Die Wurmsignale zeichnen sich durch eine hohe Frequenz aus. Dadurch ergeben sich für die differenzierten Signale große Werte im Vergleich zu den (meisten) übrigen Umgebungsgeräuschen.
- d) Die Auswertung kann durch eine Zählung der Einzelereignisse erfolgen, sofern die differenzierten Signale in einem bestimmten Wertebereich liegen. Dieser Wertebereich kann durch die oben genannte Frequenzanalyse bestimmt werden.

Für die Messreihen in den 300-L-Kompostern wurde die eben skizzierte Auswertungsvariante mit der Ableitung des akustischen Signals (anstatt der Überwachung über eine dauerhaft installierte Frequenzanalyse) verwendet.

Nach wie vor fielen viele Daten an, aber die Ableitung war schneller durchführbar. Die Anwendung der Kettenregel und die nachfolgende Filterung (nur Ereignisse innerhalb des Fensters zählen) sind auch für moderne Computer deutlich schneller zu erledigen als eine Frequenzanalyse für jede Sekunde Rohdaten. Dadurch konnte eine deutliche Datenmengenreduktion erreicht werden.

#### Anwendungsphase

Im Rahmen der Anwendungsphase wurde das *Akustik-set-up* aus der Testphase verwendet. Auch hier wurden die Rohdaten differenziert (Kettenregel), es wurde ein „Frequenzfenster“ nach den Frequenzanalysen aus der Testphase eingerichtet und nur Einzelereignisse innerhalb dieses Fensters gezählt. Um die von den Fäkalien abweichenden akustischen Eigenschaften der Substratmischung aus Überschussschlamm und Bioabfall zu berücksichtigen, wurden Versuche mit Frequenzfenstern mit verschiedenen Ober- und Untergrenzen durchgeführt.

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Vermikompostierung / Biologie

Da die Untersuchungen im Rahmen des Komplett-Projekt (siehe 1.1) stattfanden, wurden für die geplante Anwendung die Substrate „Feststoffe aus der Abwasserreinigung“ und „Küchenabfälle“ erwartet. Daher musste also die Eignung dieser Materialien unter den geforderten Umständen (frisch, ohne Vorbehandlung) untersucht werden. Darüber hinaus wurden in den Voruntersuchungen zu verschiedenen Stadien noch weitere Substrate eingesetzt, weil die Versuchsanlage der Abwasserreinigung des Komplett-Projektes nicht immer ausreichend Material produzierte, um damit die verschiedenen Untersuchungen betreiben zu können.

#### 4.1.1 Voruntersuchungen

##### 4.1.1.1 Wurmauswahl

(spez. Material und Methoden siehe Seite 94)

Hier wurden in einem Vorversuch die Kompostwürmer *Eisenia fetida* und *Dendrobaena veneta* hinsichtlich einer Eignung zur Vermikompostierung von Fäkalien verglichen.

Während der Dauer von acht Wochen wurde das vorgegebene Material bei Bedarf mit einer Sprühflasche befeuchtet, wobei die Kontrolle des Wassergehaltes optisch und haptisch (Faustprobe) erfolgte.

Die Bewertung fand nur über eine optische Bonitur der Würmer und des Substrates statt. Die Wurmarten zeigten keine deutlichen Unterschiede hinsichtlich Vitalität und Entwicklung. Die Bonitur ergab sowohl für die Durchführungen mit *Eisenia fetida* als auch für die Durchführungen mit *Dendrobaena veneta* 1-2 S<sub>f</sub>K<sub>w</sub>, was für beide Fälle jeweils einen guten Zustand der Vermikompostierung auswies.

Es gab keine deutlichen Unterschiede zwischen den Wurmarten hinsichtlich der Arbeitsleistung, bei beiden Wurmarten war das Substrat nach acht Wochen optisch gut umgesetzt.

Aufgrund seiner Größe ist *Dendrobaena veneta* besser zu handhaben, das Wiederfinden im Substrat fällt leichter. Nach Muyima et al. (1994) hat *Dendrobaena veneta* eine höhere Feuchtetoleranz als *Eisenia fetida*. In den Substraten aus der Abscheideanlage des „Komplett“-Systems wurden Wassergehalte von gut 80 % erwartet. Deshalb fiel die Entscheidung für die weiteren Untersuchungen auf *Dendrobaena veneta*.

#### 4.1.1.2 Form der Substratvorgabe

Grundsätzlich kann zwischen zwei Fütterungsarten unterschieden werden: einer stetigen Fütterung nach kurzfristigem Bedarf und einer diskontinuierlichen Fütterung nach langfristigem Bedarf („Vorratsfütterung“). Beide Arten sind für den automatisierten Betrieb einer Vermikompostierung denkbar, hätten aber unterschiedliche Konstruktionen und Dimensionierungen zur Folge. Daher wurden Untersuchungen zur Eignung der verschiedenen Fütterungsarten durchgeführt.

#### **Vorratsfütterung I**

(spez. Material und Methoden siehe Seite 94)

Die Substratvorgabe erfolgte einmalig orientiert am angenommenen möglichen täglichen Umsatz der Würmer (50 % der Wurmmasse) für 20 Tage im Voraus.

Die Würmer wechselten zu Anfang bei allen Ansätzen vereinzelt ins Substrat über. Nach vier Tagen zogen sich die Würmer zurück, im Substrat verbliebene Würmer verendeten dort. Die Substrate verschimmelten, es fand kein Umsatz durch die Würmer statt. Die Bonitur ergab für alle Ansätze 4 S<sub>r</sub>, die Versuche wurden abgebrochen.

Die Messung der Substratparameter zeigte für den Bioabfall und die Mischungen relativ niedrige pH-Werte und verhältnismäßig hohe Salzgehalte (siehe Tabelle 6), während der Wassergehalt mit 70 – 80 % im optimalen Bereich für die Würmer lag (Muyima et al. 1994).

Tabelle 6: Messungen der Leitparameter in den verwendeten Substraten der Vorratsfütterung I:

Ansatz	Salzgehalt [%]	pH	Wassergehalt [%]
Fäkalien	0,45	6,22	80
Bioabfall	1,21	4,32	68
Substratmischung I	1,05	4,75	76
Substratmischung II	1,27	4,33	70
Substratmischung III	1,02	4,45	65

Eine Vermikompostierung der Substrate in diesen Zusammensetzungen und mit den gemessenen Hauptparametern (niedriger pH, hoher Salzgehalt) erschien nicht möglich.

Die hohen Salzgehalte stammten aus den Essensresten – daher wurde eine weitere Durchführung ohne Essensreste durchgeführt (Vorratsfütterung II).

## Vorratsfütterung II

(spez. Material und Methoden siehe Seite 95)

Die Würmer wechselten auch hier bei allen Ansätzen zu Anfang in das jeweilige Substrat. Nach vier Tagen zogen sich alle Würmer aus dem Ansatz „Bioabfall“ zurück. Dieses Substrat verschimmelte sehr schnell, es fand kein Umsatz durch die Würmer mehr statt. Bei diesem Ansatz lag der Anfangs-pH bei 4,4.

Im Ansatz „Bioabfall / Fäkalien“ verblieben zumindest immer einige Würmer im Substrat, es bildete sich in den ersten 2 Wochen ein leichter Schimmelüberzug. Nach 2 – 3 Wochen wechselten die Würmer in allen drei Wiederholungen dieses Ansatzes ins Futtersubstrat über und setzten dieses über einen Zeitraum von 6 - 8 Wochen teilweise um (siehe Abbildung 16). Bei diesem Ansatz lag der Anfangs-pH bei 4,8; nach den 8 Wochen lag der pH-Wert bei rund 8,0 (siehe Tabelle 7).

Im Ansatz „Fäkalien“ bildete sich in den ersten 2 - 3 Wochen ebenfalls ein leichter Schimmelüberzug, die Würmer verblieben jedoch zum großen Teil im Substrat. Das Material war nach 8 Wochen gut umgesetzt. Der pH-Wert lag zu Anfang bei 6,5; nach 8 Wochen wurden 6,8 bis 6,9 gemessen.

Tabelle 7: pH-Werte in der Vorratsfütterung II (n=3):

Ansatz	pH Messung 10.01.2006	pH Messung 30.03.2006	
		Mittelwert	Standardabweichung
Bioabfall	4,4	vorzeitig abgebrochen	
Bioabfall / Fäkalien	4,8	8,0	0,1
Fäkalien	6,5	6,9	0,1

Eine Vermikompostierung von Bioabfall war auch in diesen Zusammensetzungen ohne weitere Behandlung nicht oder nicht gut möglich.

Der Ansatz „Bioabfall ohne Essensreste + Fäkalien“ wurde umgesetzt, die Umsatzleistung war jedoch nicht zufriedenstellend und die Umsatzdauer zu lange für einen geregelten Betrieb (Bonitur: 2 S<sub>f</sub>K<sub>p</sub>). Die niedrigen pH-Werte der Futtermischung wurden auf den hohen Anteil an Zitrusfrüchten im Bioabfall zurückgeführt.

Die Vermikompostierung der Fäkalien zeigte zufriedenstellende Ergebnisse (Bonitur: 2 S<sub>f</sub>K<sub>w</sub>). Eine Behandlung in Form von Vermikompostierung schien hier aussichtsreich.



Abbildung 16: Ansatz „Biomüll ohne Essensreste + Fäkalien“ nach 9 Wochen, das vorgegebene Material wurde nur teilweise von den Würmern umgesetzt (dunkle, krümelige Struktur).

Aufgrund der Ergebnisse aus den Durchführungen Vorratsfütterung I und II wurde entschieden, die Fütterung nicht auf einen längerfristigen Bedarf von etwa 20 Tagen zu bemessen, sondern nur den kurzfristigen Bedarf (für ca. 4 d) zu decken.

### **Bedarfsfütterung A**

(spez. Material und Methoden siehe Seite 95)

Die Substratvorgabe erfolgte regelmäßig und orientiert am kurzfristigen Umsatz der Würmer. Die Umsatzleistung wurde auf 4 Tage berechnet und optisch kontrolliert.

Im Laufe der Futterumstellung wurden die Rotteboxen vom Gewächshaus (ca. 15 °C mit Tagesgang) in einen dunklen, temperierten Raum mit konstant 24 °C umgesetzt.

Das vorgegebene Futter wurde gut angenommen (siehe Abbildung 17), es bildeten sich nur zu Anfang stellenweise leichte Schimmelüberzüge. Nach dem Einstellen konstanter Temperaturen erfolgte eine deutliche Zunahme der Umsetzungsgeschwindigkeit, so dass das vorgegebene Futter in 1 – 2 Tagen umgesetzt wurde.

Nach 20 Tagen zeigten in 3 von 4 Wiederholungen die Würmer deutliche Stresssymptome (Bonitur: 4 S<sub>r</sub>K<sub>p</sub>), alle Würmer dieser Ansätze verendeten schließlich.

Die gemessenen Hauptparameter (siehe Tabelle 8) zeigten bezogen auf die Literaturangaben günstige Lebensbedingungen für die Würmer auf.

Tabelle 8: Hauptparameter in der Bedarfsfütterung, (n = 4)

	pH	Wassergehalt [%]	Salzgehalt [mS/cm]
Mittelwert	6,9	76,5	1,38
Standardabweichung	0,2	0,6	0,03

Die Bedarfsfütterung nach kurzfristigem Bedarf funktionierte bei den vorgegebenen Substraten besser als die Vorratsfütterung. Der Grund, warum nach 20 Tagen die Würmer drei der Wiederholungen verendeten, ließ sich anhand der gemessenen Parameter nicht ableiten.



Abbildung 17: Bedarfsfütterung mit Bioabfall ohne Zitrusfrüchten und Fäkalien, letzte Substratvorgabe erfolgte 3 Tage vor der Aufnahme des Fotos. Die Bonitur für diesen Zustand ergibt 2-3  $S_{fK_w/p}$ .

### **Bedarfsfütterung B**

(spez. Material und Methoden siehe Seite 96)

Wie unter „Bedarfsfütterung A“ bereits erwähnt, schien die Bedarfsfütterung, d.h. die Futtervorgabe orientiert am möglichen Umsatz der Würmer innerhalb weniger Tage, bei den verwendeten Futterstoffen geeigneter zu sein als die Vorratsfütterung orientiert am längerfristigen Bedarf. Deshalb wurden weitere Versuche zur Bedarfsfütterung durchgeführt.

Die Versuchsansätze liefen jeweils zwischen 4 und 6 Wochen. In dieser Zeit wurde das vorgegebene Futter in 3 bis 4 Tagen umgesetzt. In zwei der 4 Versuchsdurchführungen starben die Würmer nach 4 Wochen ab.

Die Würmer nahmen allgemein das Material gut an, lediglich Materialien wie Baumwolltücher und Kunststofffolien (aus Grobrechengut) wurden erwartungsgemäß nicht umgesetzt. Die gefütterten Essensreste wurden von den Würmern aufgenommen, dies geschah allerdings erst nach einem deutlichen Verschimmeln. Hierbei ist zu bedenken, dass die Essensreste aus dem Elisabeth-Krankenhaus eine ungünstige und nicht-repräsentative Zusammensetzung aufwiesen. Es wurde nur der Inhalt der „Frühstücks-Tonne“ verwendet, der einen hohen Fett-Anteil (Streichfette, Aufschnitt) und viele Getreideprodukte (Brot / Brötchen) enthielt. Diese Mischungen neigen schnell zum Verschimmeln.

Nach 4 Wochen ergaben sich in den Ansätzen trotz identischer Behandlung und Futtermittelgabe unterschiedliche Wassergehalte. Zwei Ansätze wiesen weiterhin Wassergehalte zwischen 78 und 84 % auf (Bonitur 2-3  $S_{\text{K}_{\text{wp}}}$ ). In den beiden anderen Durchführungen stellen sich Wassergehalte von 92 bis 94 % ein (Bonitur: 4  $S_{\text{K}_{\text{p}}}$ ). Dies war anhand der Messungen zunächst nicht zu erkennen, denn die Mischproben dieser Kisten ergaben Wassergehalte von rund 84 %. Dass in den Mischproben die Wassergehaltsmessungen keine höheren Werte ergaben, lag wahrscheinlich an dem in allen Durchführungen optisch vergleichbar trockeneren Material an der Oberfläche. Kratzte man jedoch den Kistenboden der feuchteren Ansätze frei, so sammelte sich freies Wasser auf dem Boden. Bei den Mischproben zur Wassergehaltsbestimmung wurde das trockene Material an der Oberfläche mit dem feuchten Material im unteren Bereich der Kisten vermischt. Das freie Wasser ließ auf anaerobe Bereiche schließen. Dies könnte ein möglicher Grund für das Absterben der Würmer gewesen sein, da diese zwar eine gewisse Zeit unter anoxischen Bedingungen überdauern können, für das Überleben jedoch aerobe Bedingungen benötigen (Dominguez und Edwards 2004; Dominguez und Edwards 2011). Das Vorhandensein freien Wassers war darin begründet, dass sich die Drainagelöcher mit feinerem Material zugesetzt hatten. In den feuchten Ansätzen starb ein Großteil der Würmer ab. Auch in den Kisten mit rund 80 % Wassergehalt starben die adulten Würmer nach 6 Wochen ab, es fanden sich jedoch viele Wurm-Eier und juvenile Tiere.

Das Absterben der Würmer in den weniger feuchten Kisten war nicht direkt mit einem zu hohen Wassergehalt erklärbar. Das Vorhandensein von Eiern und juvenilen Tieren ließ den Schluss zu, dass die Lebensbedingungen (gemessen an Wassergehalt, pH und Salzgehalt) für die Würmer geeignet waren. Ein weiterer Grund für das Absterben der adulten Würmer könnte auch in einem zu hohen Populationsdruck begründet sein. Die Tiere konnten diesem Stress nicht ausweichen (Flucht) und starben ab. Die übrigen Tiere waren evtl. durch diesen Stress ebenfalls geschwächt und konnten sonst vielleicht unkritische Schwankungen

bestimmter Umweltparameter nicht mehr überstehen und starben ebenfalls. Die neue Generation aus den Kokons bildete sich mit gewissem zeitlichem Verzug aus. Die Besatzdichte wurde jedoch mit  $1 \text{ kg}/0,1 \text{ m}^2$  im Bereich der Literaturwerte und Angaben in Anwendungsberichten angesetzt (Appelhoff (1997):  $0,5 \text{ kg}/0,1 \text{ m}^2$ ; Gaddie (1977):  $2,01 \text{ kg}/0,1 \text{ m}^2$ ), so dass hier keine eindeutige Begründung im Populationsdruck gegeben ist.

Aufgrund der Erfahrungen aus diesen Versuchen schien der Wassergehalt und dessen Steuerung bei der zu erwartenden Zusammensetzung des Futters der wichtigste Parameter zu sein.

#### 4.1.1.3 Salztoleranzversuch

(spez. Material und Methoden siehe Seite 96)

Dieser Versuch wurde durchgeführt um zu klären, ob die im Substrat gefundenen Salzgehalte (bis zu  $2,0 \text{ mS/cm}$ ) die Würmer in ihrer Vitalität und damit ihrer Umsatzleistung beeinflussen.

In allen Ansätzen überlebten die Würmer nahezu vollständig, die Bonitur der Würmer ergab für alle Ansätze  $1-2 S_f K_w$ .

Ab einem Salzgehalt von  $1,0 \%$  ( $1,7 \text{ mS/cm}$ ) waren nur noch wenige oder keine Wurmkokons mehr zu finden.

Die mit NaCl eingestellten Salzgehalte beeinflussten die Würmer also nicht oder nicht deutlich in ihrer Vitalität und Umsatzleistung. Die vereinzelt gefundenen toten Würmer waren sehr wahrscheinlich nicht auf den Salzgehalt als Ursache zurückzuführen.

#### 4.1.1.4 Akzeptanzuntersuchung für Überschussschlamm als Ersatzsubstrat für die Feststoffe aus der Abwasserreinigung

(spez. Material und Methoden siehe Seite 97)

Während anfänglichen Betriebes der Pilot-Anlage des Komplett-Projektes fielen weit weniger Feststoffe an als erwartet. In den ersten 9 Wochen des Betriebes konnten etwa  $1 \text{ kg}$  Feststoffe gesammelt werden. Mit dieser Menge wäre eine Vermikompostierung zwar möglich, nicht aber in der geplanten Dimension und Automatisierung.

Da auch für den weiteren Betrieb nicht erwartet wurde, dass die Menge deutlich und dauerhaft steigen würde, wurden Überlegungen angestellt, mit welchen Substraten die Vermikompostierung betrieben werden konnte, so dass ein Bezug zur geplanten Anwendung der Abwasserreinigungseinheit bestehen blieb.

Die Entscheidung fiel auf Bioabfall und Überschussschlamm. Zum Zeitpunkt der Untersuchungen wurde in der Komplett-Anlage der Überschussschlamm nicht weiter

eingedickt und fiel nur in geringen Mengen und mit einer TS von <1 % FM an. In dieser Form und Konzentration war dieser nicht für eine Behandlung mittels Vermikompostierung geeignet, dafür wäre ein TS-Gehalt von >10 % notwendig.

Für den Bioabfall wurden keine Akzeptanzversuche durchgeführt, da die Eignung des Materials zur Vermikompostierung bekannt war (z.B. Sharma et al. 2005; Gunadi et al. 2002; Frederickson et al. 2007). Hier wurden lediglich die für die Vermikompostierung relevanten Parameter bestimmt, um die allgemeine Eignung zu kontrollieren und eine Gefährdung des Prozesses auszuschließen.

Die Akzeptanzuntersuchungen wurden daher nur für den polymereingedickten Überschussschlamm durchgeführt.

Die für die Vermikompostierung wichtigsten Parameter der neu bestimmten Materialien sind im Vergleich mit den in der Testphase eingesetzten Feststoffen aus der Abwasserreinigung in

Tabelle 9 aufgeführt.

Tabelle 9: Ausgesuchte Parameter in verwendetem Bioabfall und Überschussschlamm im Vergleich zu den bisher verwendeten Feststoffen aus der Abwasserreinigung (Fäkalien)

Substrat	TS [% FS]	oTS [% TS]	pH	LF [mS / cm]	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> [mg / 100g FS]	C/N
Bioabfall	15-35	25 – 75	4,0 – 5,9	0,8 – 1,7	n.n.	9 – 25
Überschussschlamm	10 - 15	42	7,1	0,6	n.n.	6
Fäkalien	5 - 15	>90	5,8 – 7,1	0,9 - 1,7	0,3 – 0,7	20 – 31

n.n. = nicht nachweisbar

Die relevanten Prozessdaten des Überschussschlammes lagen mit Ausnahme des C/N-Verhältnisses in Bereichen, die laut Literatur gut für eine Vermikompostierung geeignet sind. Das C/N-Verhältnis von etwa 6 ist zu gering für eine Vermikompostierung (Ndegwa und Thompson 2000; Jadia und Fulekar 2008). Die Untersuchungen zur Verwendung dieses Materials wurden trotzdem durchgeführt, da durch die Mischung mit dem Bioabfall ein Ausgleich erwartet wurde.

Die Würmer hielten sich in den ersten 2 – 3 Tagen in der Schicht zwischen Blumenerde und Überschussschlamm auf. Danach wanderten sie in den Überschussschlamm ein und setzten ihn um. Eine erneute Fütterung von wiederum 500 g (FS) Überschussschlamm wurde nach 10 Tagen vorgenommen. Zu diesem Zeitpunkt wurden auch die Papiertücher, die das Herausfallen von Material verhindern sollten, entfernt.

Nach 2 Monaten wurden die Würmer in den Ansätzen gezählt und gewogen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 18 dargestellt.

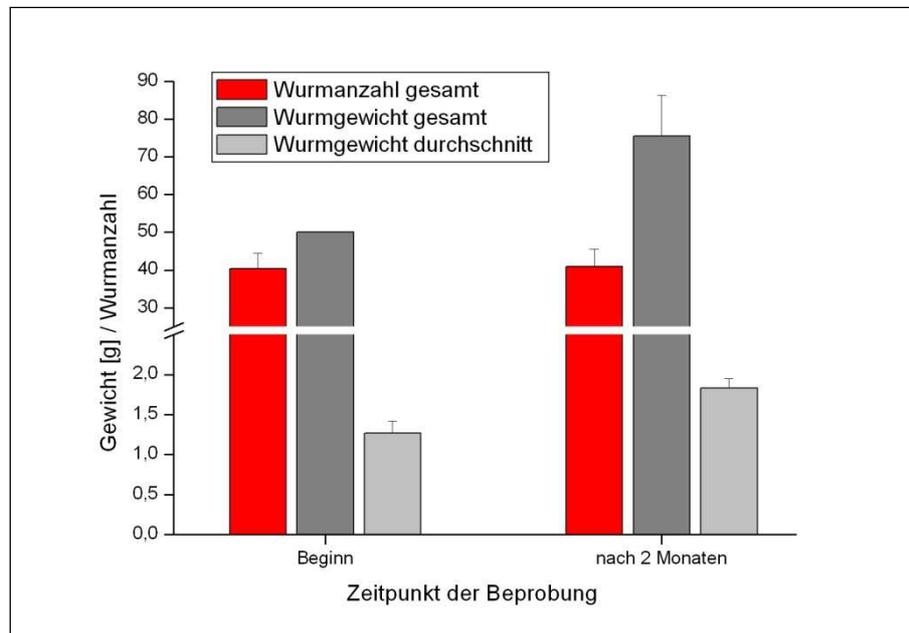


Abbildung 18: Wurmanzahl, Gesamtwurmgewicht und mittleres Wurmgewicht der Akzeptanzuntersuchungen in Überschussschlamm zu Beginn des Versuches und nach 2 Monaten, dargestellt sind Mittelwerte und Standardabweichung

Nach den zwei Monaten Durchführung hatten sowohl das Einzel- als auch das Gesamtgewicht der Würmer zugenommen. Die Gewichtszunahme kann durch einen erhöhten Wassergehalt des Futtersubstrates (Überschussschlamm) im Gegensatz zu dem Überdauerungssubstrat, in dem die Würmer geliefert wurden, begründet sein. Die Würmer lagern in ihrem Körper mehr Feuchtigkeit ein, wenn das umgebende Substrat eine hohe Feuchtigkeit aufweist (das gilt nur für den „optimalen Bereich“, in dem die Würmer nicht negativ durch die Feuchtigkeit beeinflusst werden). Darüber hinaus kann dieser Effekt auch durch eine gute Eignung des Substrates erklärt werden, so dass die Würmer sich optimal entwickelten (Dominguez und Edwards 2004). Eine Messung der Trockensubstanz der Würmer wurde nicht vorgenommen. Da keine Würmer abgestorben waren, wurde von einer Eignung des Materials ausgegangen.

#### 4.1.1.5 Maßstabvergrößerung von 60 L auf 500 L

(spez. Material und Methoden siehe Seite 98)

Basierend auf den Erfahrungen mit den 60-L-Boxen wurde als Zwischenschritt zur Zielgröße ein Versuchsansatz in einer 500-L-Box gestartet. Da vermutet wurde, dass die 60 L-Boxen mit 2 kg Würmern (ca. 1600 Stück; Besatzdichte 1 kg/0,1 m<sup>2</sup>) überbesetzt waren, wurde hier eine geringere Besatzdichte gewählt. In Abbildung 19 ist ein Blick in den Komposter gezeigt.



Abbildung 19: Futtergemisch in 500-L-Box bestehend aus Bioabfall und Grobrechengut

Zu Beginn des Versuches waren größere Mengen der Würmer mit dem umgesetzten Material durch den Gitterboden gefallen (rund 50 Würmer am Tag). Einige dieser Würmer konnten zurück in den Reaktor gegeben werden, viele verendeten jedoch im Auffangbehälter aufgrund der trockenen Bedingungen. Ab einer Schichtdicke von etwa 5 cm fielen nur noch vereinzelt Würmer durch den Gitterboden. Die Würmer verteilten sich über die gesamte Fläche des Reaktors und zeigten einen gesunden Habitus.

Die Vorgabe von frischem Bioabfall hatte im Reaktor einen Wassergehalt von rund 95 % zur Folge. Hier konnte mit Hilfe einer Ventilation der Futterschicht und einer ungehinderten Drainage durch den Gitterboden ein Abtrocknen des gesamten Reaktors auf eine geeignete Feuchte von 78 % erreicht werden. Die Vermikompostierung erholte sich und der Prozess lief weiter. Die Bonitur ergab vor der Ventilation 2 (bis 3)  $S_{f/ff}K_p$ , nach der Ventilation 2  $S_fK_w$ .

Die Vermikompostierung in der 500-L-Box schien stabiler zu funktionieren als in den 60L-Boxen. Daher wurden für weitere Untersuchungen größer dimensionierte Rottreaktoren konstruiert und ein hinsichtlich Platz, Dauer und Besatzdichte weniger intensiver Betrieb angestrebt.

## 4.1.2 Testphase

(spez. Material und Methoden siehe Seite 98)

### 4.1.2.1 Co-Substrate

Die Wassergehalte der Feststoffe aus der Abwasserreinigung aus der Komplett-Anlage waren direkt nach der Abscheidung mit bis zu 95 % sehr hoch. Bei der Entnahme aus dem Fass zur Zwischenlagerung wurde jeweils die obere Schicht abgetragen. Aus dieser Schicht konnte das Wasser während der Lagerung zum Teil nach unten sickern, so dass der Wassergehalt der Futterportionen geringer war. Um einem höheren Wassergehalt in den Futterportionen – und damit einer höheren Gefahr anaerober Bereiche und mangelnder Struktur des Materials - entgegenwirken zu können, wurde die Verwendung von Co-Substraten untersucht. In drei verschiedenen Ansätzen wurde die Akzeptanz getestet: Fäkalien pur, Fäkalien + Papierreste, Fäkalien + Sägespäne. Diese Co-Substrate sollten zu einer Verbesserung der Struktur und damit einer Belüftung und Drainage des Substrates führen. Die Co-Substrate Papierreste und Sägemehl wurden gewählt, da sie sehr kostengünstige organische Abfallprodukte sind und ebenfalls im Rahmen einer Vermikompostierung umgesetzt werden können (ARRPET; Munroe).

Der Wassergehalt des Futters wurde bei jeder Fütterung bestimmt, da durch die hohe Feuchtigkeit der Feststoffe die größte Beeinflussung erwartet wurde. In Abbildung 20 sind die Verläufe der Wassergehalte der verschiedenen Mischungen über die Zeit dargestellt.

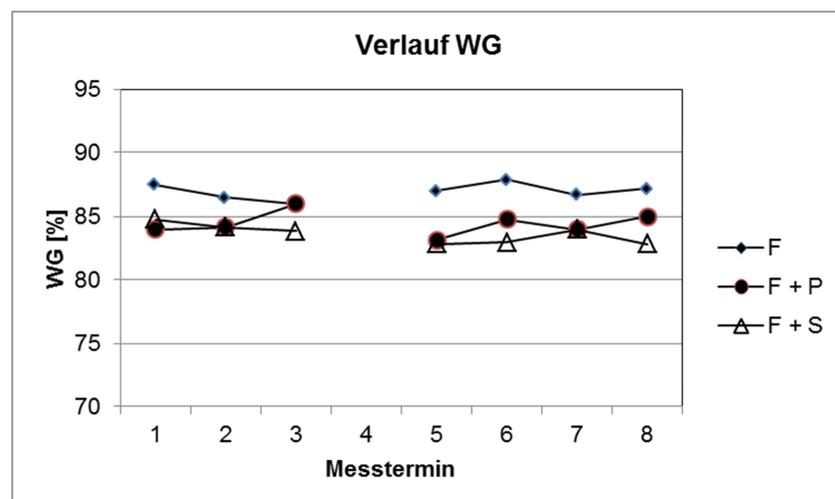


Abbildung 20: Verlauf der Wassergehalte (WG) der verschiedenen Substratmischungen über die Zeit. F = Substrat pur; F + P = Substrat + Papierreste; F + S = Substrat + Sägespäne; Dauer der Versuche: 2 Monate, Probenahme 4: Datenlücke

Der pH-Wert und Salzgehalt des Futters wurden stichprobenartig bestimmt. Hier zeigten sich nur minimale Veränderungen, die Werte lagen mit einer Leitfähigkeit von 0,3 bis 0,5 mS/cm und pH-Werten zwischen 6,8 und 7,1 im laut Literatur „optimalen Bereich“ für die Vermikompostierung (siehe Seite 11).

Wie in Tabelle 19 (Seite 99) ersichtlich, unterschieden sich die Hauptparameter der verschiedenen Ansätze kaum voneinander. Die Mischungen mit einem Co-Substrat wiesen gegenüber dem reinen Substrat mehr Struktur auf (siehe Abbildung 21). Das erschien wichtig, da aufgrund der Homogenität und der feuchten, breiigen Konsistenz des reinen Substrates bei größeren Mengen durch eine gewichtsbedingte Verdichtung anaerobe Bedingungen erwartet wurden. Unter anaeroben Verhältnissen ist eine Vermikompostierung nicht möglich, da die Würmer diese Bedingungen meiden (Dominguez und Edwards 2004). Darüber hinaus können unter Abwesenheit freien Sauerstoffs unter Umständen toxische Stoffe gebildet werden (z.B. Nitrit, siehe „Belüftung“, Seite 10), was bis zum Absterben des kompletten Wurmbesatzes führen kann.



Abbildung 21: Ausgangssubstrat Fäkalien und die Mischungen mit zwei verschiedenen Zuschlagsstoffen (Papierreste und Sägespäne)

Die Würmer nahmen die Feststoffe aus der Abwasserreinigung aus dem Komplett-Projekt gut an (siehe Abbildung 22). Sowohl die Substratmischungen als auch das reine Substrat wurden von den Würmern durchzogen und umgesetzt. In den Reaktoren fanden sich bald Eier und juvenile Tiere, die adulten Tiere zeigten einen guten Habitus: eine deutliche Rotfärbung, dicke Körper und eine ausgeprägte Lichtflucht. Die Bonitur ergab für alle Ansätze 1-2  $S_fK_w$ .



Abbildung 22: Einsetzen der Würmer in die Versuche mit den Co-Substraten. „Start“: Würmer plus Überdauerungssubstrat (dunkel) sind frisch zugegeben, nach 2 Tagen ist das Überdauerungssubstrat bereits durch die Aktivität der Würmer breit verteilt, nach 4 Tagen haben die Würmer das Überdauerungssubstrat in die Fäkalien eingemischt (Bild zeigt Blick in das Material).

Aufgrund eines mehrstündigen Ausfalls der Ventilation stieg die Umgebungstemperatur auf 50 °C an. Dabei verendeten nahezu alle Würmer, weshalb eine abschließende Bewertung der Versuche nicht mehr möglich war.

Um der Temperaturempfindlichkeit der Kompostwürmer Rechnung zu tragen, wurde eine Klimatisierung installiert, die eine mittlere Temperatur von 24°C (Spanne: 20 °C bis 28 °C) halten konnte. In diesem Temperaturbereich ist keine gravierende negative Beeinflussung der Würmer zu erwarten (Viljoen et al. 1992; Fayolle et al. 1997).

#### 4.1.2.2 Charakterisierung der Futtermaterialien und des Vermikompostes anhand chemischer und physikalischer Parameter

(spez. Material und Methoden siehe Seite 99)

Zur weitergehenden Beschreibung der Futterstoffe über die Parameter Wassergehalt, pH-Wert und Salzgehalt hinaus sowie des produzierten Vermikompostes hinsichtlich der Reife und der Eignung zum Einsatz in Landwirtschaft und Gartenbau wurden Untersuchungen auf geeignete Parameter durchgeführt.

Des Weiteren dienten diese Untersuchungen dazu, eine Bewertung der Parameter zur Kontrolle einer Vermikompostierung bzw. zur Beschreibung der Reife eines Vermikompostes vornehmen zu können.

#### „Aschegehalt“

Der Parameter Aschegehalt wurde für die Ausgangsmaterialien („Futter“) und den Vermikompost gemessen, um die Eignung als Reifezeiger zu untersuchen.

Die Konzentrationen des Aschegehaltes in den Fäkalien aus der Abscheidung im Komplett-Projekt schwankten über die Dauer der Messungen zwischen 2 und 6 % der TM, wobei der Großteil der Messungen Werte zwischen 4 und 5 % der TM ergaben. Abbildung 23 zeigt die

Aschegehalte der unbehandelten Feststoffe („Futtermaterial“) über den Verlauf des Versuches. Die Proben zur Bestimmung des Aschegehaltes der Feststoffe wurden nach den Probenahmen tiefgefroren, so dass hier keine weitere Mikroorganismenaktivität stattfinden konnte.

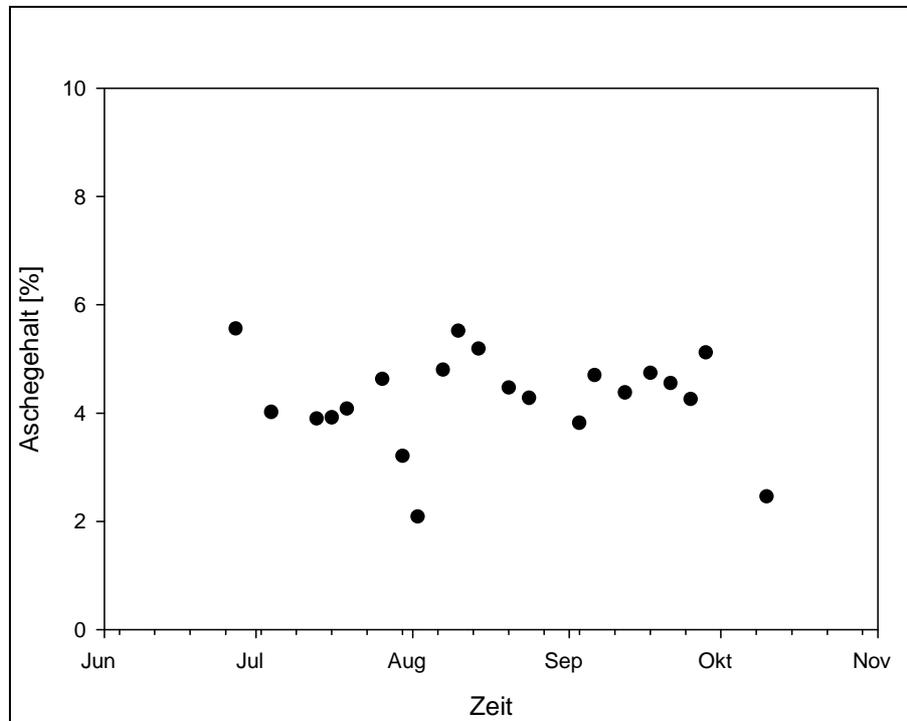


Abbildung 23: Verlauf der Aschegehalte der unbehandelten Feststoffe über die Dauer des Versuches

Wenn die Würmer das Material ausscheiden, findet eine Nachrotte statt. Das heißt, dass die Mikroorganismen, die in den Ausscheidungen enthalten sind, das Material weiter aufschließen („mineralisieren“, Aira et al. 2006). Die Aschegehalte der frisch geernteten Vermikomposte lagen mit rund 10 % TM etwa doppelt so hoch wie die des unbehandelten Ausgangsmaterials (etwa 4 bis 5 % TM; siehe Abbildung 23), ein deutlicher Anstieg des Aschegehaltes fand aber erst mit einer bestimmten Dauer der Nachrotte statt und erreichte nach 2-3 Monaten Nachrotte mit über 20 % der TM das Fünffache des Ausgangswertes der Futtermittel. In der Abbildung 24 ist beispielhaft die Veränderung des Aschegehaltes über den Verlauf der Nachrotte gezeigt.

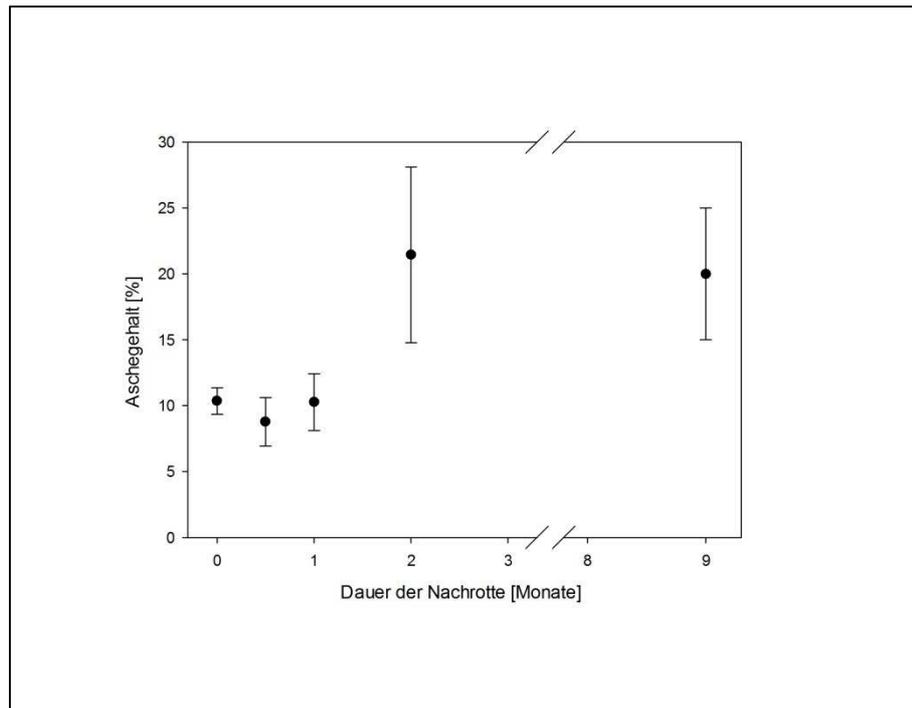


Abbildung 24: Mittelwerte der Aschegehalte der Gesamt-Ernten aus Komposter II im Verlauf der Nachrotte. Dauer „0“ = frisch geerntet, die Darstellung umfasst alle Fraktionen. n = 5 bei allen Probenahmen

Auch die verschiedenen Korngrößen einer Ernte unterschieden sich in der Regel deutlich in ihrem Aschegehalt. Die groben Fraktionen (>4 mm) können wegen ihrer Größe nicht von den Würmern verdaut worden sein, die kleineren Fraktionen (<4 mm) hingegen schon. Das zeigt sich auch im Aschegehalt. In der Abbildung 25 ist erkennbar, dass die Aschegehalte der einzelnen Fraktionen bei einer 2-monatigen Nachrotte mit abnehmender Korngröße auf bis zu 33 % zunehmen.

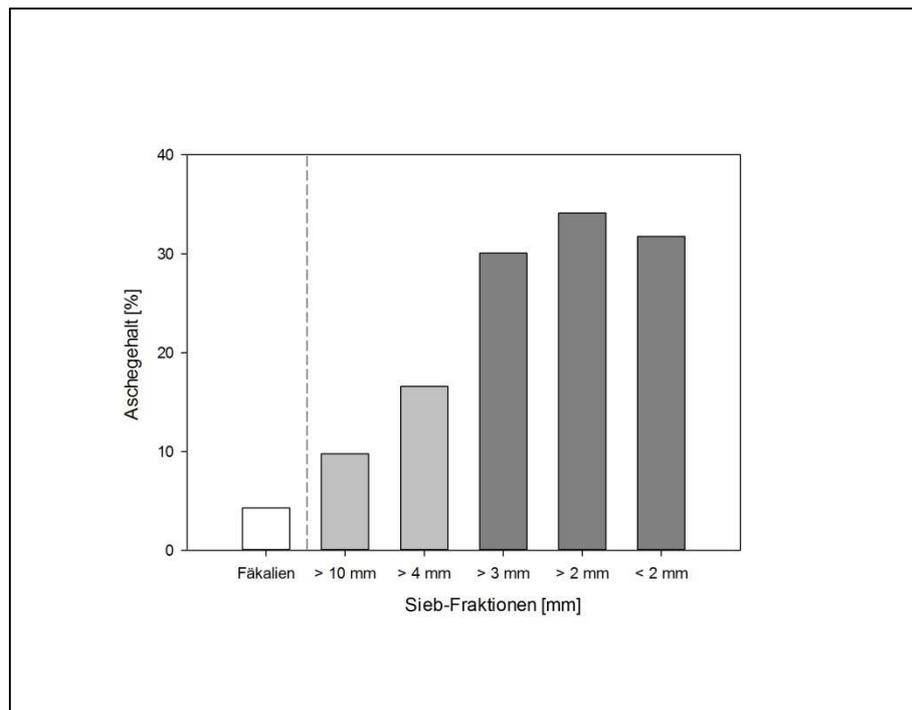


Abbildung 25: Beispielhafte Aschegehalte der Ausgangsstoffe (Fäkalien) und der Sieb - Fraktionen einer Ernte (2 Monate gelagert)

Die höheren Aschegehalte der Fraktionen >10 und >4 mm im Vergleich zu den frischen Feststoffen lassen sich mit der Tätigkeit der Mikroorganismen erklären, die auch in diesen Fraktionen tätig waren.

Für die Fraktionen <4 mm gilt, dass durch die Passage durch den Wurm die Mikroorganismenaktivität intensiviert wird, so dass der Aschegehalt im Vergleich zum nicht aufgenommenen Material (>4 mm) steigt. Zusätzlich klebten auch kleinere Fraktionen an den größeren Partikeln, die ebenfalls den Aschegehalt erhöhten (siehe Abbildung 31).

Bei manchen Ernten war die Verteilung des Aschegehaltes anders als in Abbildung 25 gezeigt, es bestanden dann keine deutlichen Unterschiede zwischen den einzelnen Korngrößen. Das war damit zu erklären, dass dieses Material noch relativ feucht war, als es aus dem Komposter fiel. Das feuchte Material klebte stark aneinander, so konnten die einzelnen Korngrößen bei der Siebung nicht sicher voneinander getrennt werden. Das von den Würmern umgesetzte Material erhöhte so den Aschegehalt der nicht umgesetzten Teile.

### **C/N-Verhältnis**

Das C/N-Verhältnis ist entscheidend für die Umsetzbarkeit bzw. Umsatzgeschwindigkeit des vorgegebenen Substrates. In der Abbildung 26 ist gezeigt, dass die Ausgangsstoffe (Feststoffe aus der Abwasserreinigung aus der Testphase) über die Dauer der Versuche C/N-Verhältnisse von 18 bis 26 (mit einzelnen Ausnahmen) aufwiesen.

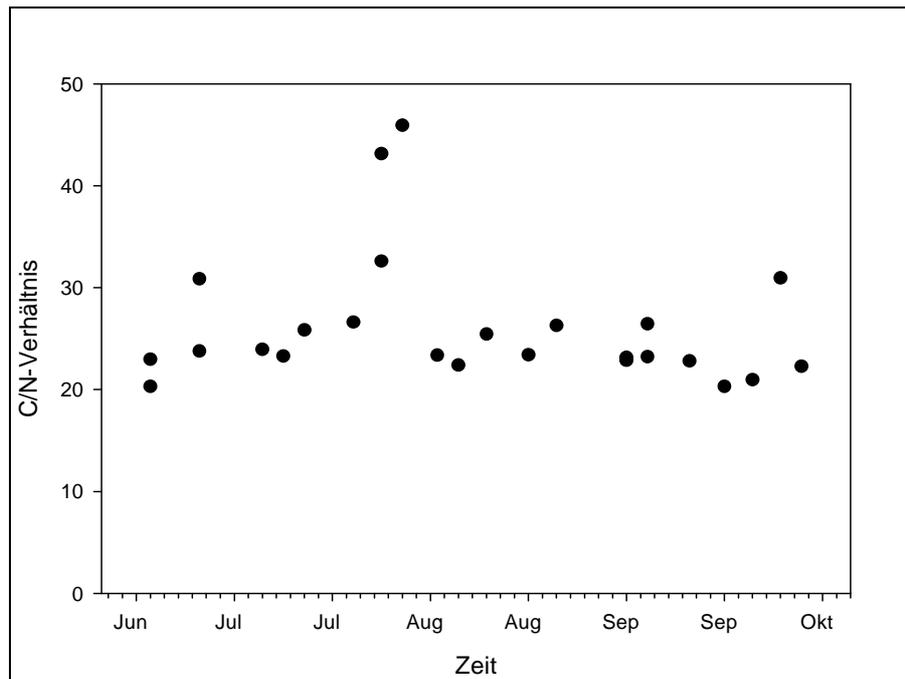


Abbildung 26: Verlauf der C/N-Verhältnisse der unbehandelten Feststoffe (Futtergaben) über die Dauer der Versuche

Ndegwa und Thompson (2000) benennen ein optimales C/N-Verhältnis von 25, damit liegen die Feststoffe mit den gemessenen Werten in einem guten Bereich für die Vermikompostierung.

### Nährstoffe und Reife der Vermikomposte

In Abbildung 27 sind die Gesamtgehalte der Hauptnährstoffe Stickstoff (N), Phosphor (P) und Kalium (K) in Substraten unterschiedlichen Alters dargestellt. Darüber hinaus sind die pflanzenverfügbaren Anteile aufgezeigt.

Die N-, P- und K-Gesamtkonzentrationen des frisch geernteten Vermikompostes ( $t = 0$ ) lagen bei 31; 3 bzw. 1 g kg<sup>-1</sup> TS. Nach einem Monat lagen die Werte bei 32 g N kg<sup>-1</sup> TS, 6 g P kg<sup>-1</sup> TS und 2 g K kg<sup>-1</sup> TS. Der Anstieg der Konzentrationen von P und K ist mit der Reduktion der Ausgangsmasse zu erklären, welcher hauptsächlich auf C-Verlusten beruht (v.a. Ausgasung und Veratmung). P und K unterliegen im Gegensatz zu N keinen gasförmigen Verlusten, so dass damit deren Anteil an der Gesamtmasse ansteigt. Die N-Konzentration veränderte sich kaum, die P- und K-Konzentrationen stiegen im Laufe des ersten Monats der Nachrotte jedoch an. Hier entstanden vermutlich gasförmige N-Verluste (NH<sub>3</sub>), die sich mit der Reduktion der Ausgangsmasse ausglich. Während der nächsten 5 Monate veränderten sich die P- und K-Konzentrationen kaum, nur N fiel um etwa 50 % von 32 auf 16 g kg<sup>-1</sup> TS ab. Dies kann ebenfalls auf gasförmige Verluste zurückgeführt werden.

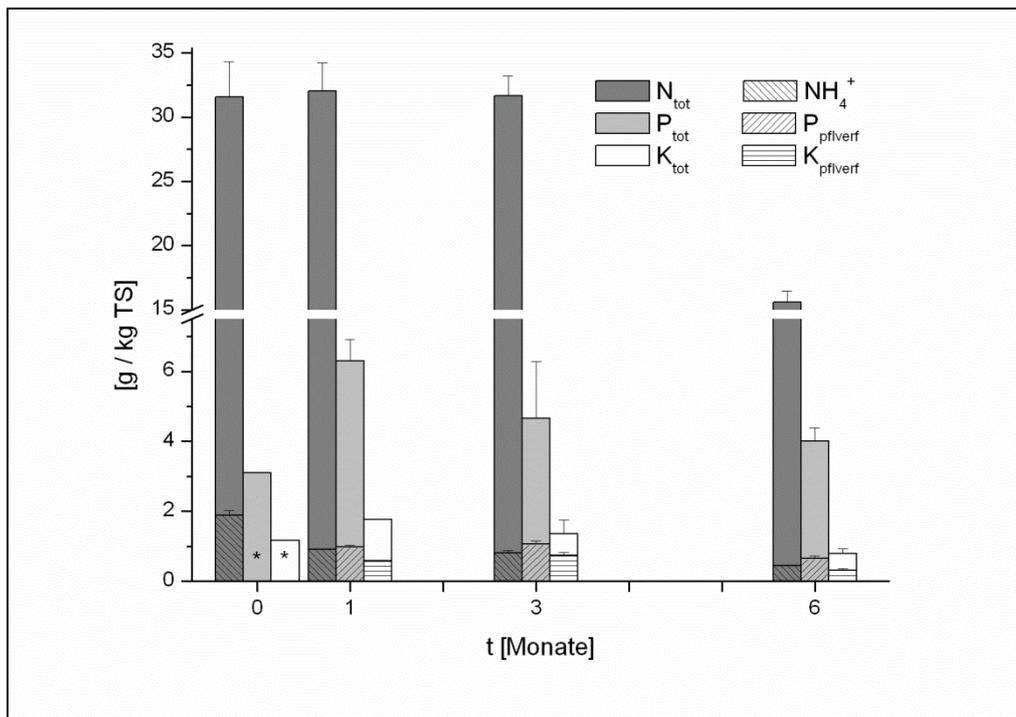


Abbildung 27: N-, P- und K-Gehalte in Substraten unterschiedlichen Alters, aufgliedert in Gesamtgehalte („tot“) und pflanzenverfügbare Gehalte („pflverf“: CAL-extrahierbar (P, K); CaCl<sub>2</sub>-extrahierbar (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)). Angaben in g kg<sup>-1</sup> TS.  
\* = keine Daten

Die pflanzenverfügbaren Anteile von N, P und K betragen nach 6 Monaten 0,5; 0,7 und 0,3 g kg<sup>-1</sup> TS. Die gemessenen Werte entsprechen denen anderer Arbeiten über Vermikompostierung von Fäkalien wie z.B. in Simons et al. (2005).

### Pflanzenverträglichkeit

Die Bestimmung der Pflanzenverträglichkeit mittels Kresstest für den untersuchten Vermikompost nach 6-monatiger und 9-monatiger Nachrotte ergab, dass in den Vermikomposten >4 mm die Keimung deutlich verzögert und nicht vollständig stattfand, in den Vermikomposten <4 mm keimten nahezu alle Samen mit etwa 1 Tag Verzögerung zur Kontrolle (Abbildung 28 rechts). Der weitere Aufwuchs und das Wurzelwachstum der Kresse waren über eine Dauer von 6-10 Tagen nicht verschieden von der Entwicklung in einer handelsüblichen Pflanzerde. Ein deutlicher Unterschied zwischen Kontrolle und Ansätzen mit Vermikompost bestand in der Entwicklung eines Pilzmycels in den Substraten mit Vermikompost während des Kresstests. Dieses bildete sich im Material nach 9 monatiger Nachrotte deutlich weniger aus. Die Bestimmung durch das Mycologie-Labor der Universität Bonn ergab, dass es sich um Pilze der Mucor-Gattung handelte. Diese Pilze kommen natürlicherweise in der Umwelt vor und hatten sich wahrscheinlich eigenständig im Substrat angesiedelt. Die Sporen besitzen ein hohes Überdauerungspotential und wurden durch die unterbleibende Erhitzung nicht abgetötet oder sind erst im Laufe der Nachrotte ins Material

gelangt. Sie konnten unter den auch für sie günstigen Bedingungen im Kressetest ihren Entwicklungszyklus fortsetzen. Eine Gesundheitsgefährdung für den Menschen resultiert daraus nicht (Komplett 2009).

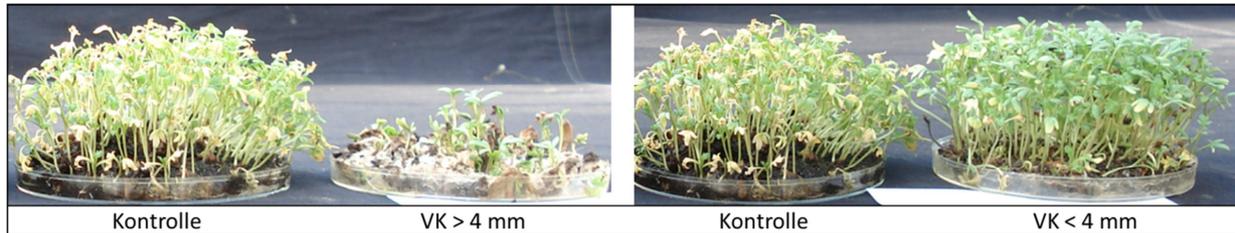


Abbildung 28: Kressetest mit Vermikompost („VK“) mit den Körnungen >4 mm und <4 mm im Vergleich zu Referenzansätzen in Blumenerde („Kontrolle“).

### Atmungsaktivität

Die  $AT_4$ -Tests wurden mit Vermikompost unterschiedlichen Alters durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 29 dargestellt, in Tabelle 10 sind die Rottegrade für die einzelnen Materialalter zugewiesen.

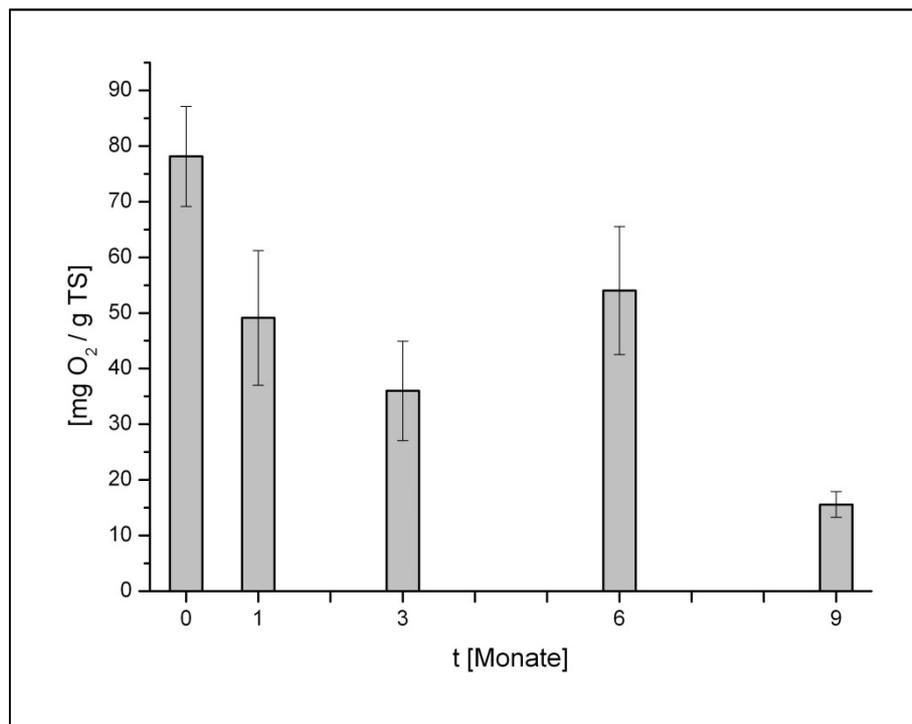


Abbildung 29:  $AT_4$ -Werte für Vermikompost unterschiedlichen Alters (Dauer der Nachrotte, „0“ = frisch geerntet), Angabe als Mittelwerte, Fehlerbalken = Standardabweichung aus je 4 Durchführungen

Tabelle 10: Einteilung des produzierten Vermikompostes nach Alter (=Lagerungsdauer, „0“ = frisch geerntet) abhängig von der Sauerstoffzehrung ( $AT_4$ ) in Rottegrade nach BGK

Substratalter [Monate]	Sauerstoffverbrauch [mg O <sub>2</sub> / g FM]	Produktbezeichnung	Rottegrad
0	79 – 84	Frischkompost / Kompostrohstoff	I – II
1	41 – 58	Frischkompost	II – III
3	27 – 48	Fertigkompost / Frischkompost	III – IV
6	42 - 76	Frischkompost	II - III
9	10 – 19	Reifekompost	V

Nach 3-monatiger Lagerung wies das Substrat eine Sauerstoffzehrung auf, die nach der Einteilung der BGK dem Rottegrad III bis IV (Frischkompost / Fertigkompost) entspricht. Nach 9-monatiger Nachrotte betrug die Sauerstoffzehrung nur noch <20 mg O<sub>2</sub> / g FM entsprechend Rottegrad V. Nach 6 Monaten stieg die Sauerstoffzehrung zwischenzeitlich wieder auf Werte zwischen 42 und 76 mg O<sub>2</sub> / g FM (Rottegrad II – III). Dieser Anstieg war nicht zu erwarten. Die einzelnen Chargen wurden identisch gelagert und untersucht. Der Anstieg kann eventuell auf Heterogenitäten der Chargen zurückgeführt werden, was bedeutet, dass der Rottegrad gewissen Schwankungen unterlag. Die Tendenz der Sauerstoffzehrung über den Verlauf der Nachrotte ist trotzdem klar zu erkennen. Es wird vermutet, dass das Material den Rottegrad V nach weniger als 9 Monaten erreicht, zum sicheren Erreichen des Rottegrades V muss mit den vorliegenden Ergebnissen jedoch eine Nachrotte von 9 Monaten eingehalten werden.

In Tabelle 11 sind die wichtigsten beschreibenden Parameter für den aus den Feststoffen aus der Abwasserreinigung produzierten Vermikompost nach einer Nachrotte von 9 Monaten zusammengefasst.

Tabelle 11: Ausgesuchte Parameter zur Beurteilung der Kompostqualität für die Vermikompost-Fractionen <4 mm aus den Durchführungen mit Fäkalien (Kaiserslautern) nach einer Nachrotte von 9 Monaten

Fraktion	TS [%]	oTS [%]	pH	LF [mS / cm]	AT <sub>4</sub> [mg O <sub>2</sub> / g TS]	C/N
< 4 mm	91	79,3	6,5	1,3	10,7 – 18,5	15,4

Mit dem pH-Wert von 6,5 war das Material für eine Anwendung im Garten- und Landschaftsbau gut geeignet. Der Salzgehalt betrug 1,3 – 1,6 mS/cm bzw. 3,8 – 4,6 g/L, was nach der Einteilung der Bundesgütegesellschaft Kompost e.V. (BGK) einer Kompostgüteklasse 2 entspricht. Das erlaubt eine allgemeine Anwendung, ein Einsatz in besonders salzempfindlichen Kulturen oder als Anzucherde sollte jedoch nicht in unvermishtem Zustand erfolgen.

Mit  $AT_4$ -Werten von 10,7 – 18,5 [mg O<sub>2</sub> / g TS] entsprach das Substrat dem Rottegrad V und war somit als „Fertigkompost“ zu bezeichnen, was eine weitgehende Stabilisierung bedeutet. Das C/N-Verhältnis von 15,4 für die Fraktion <4 mm lag in einem Bereich, der die Verwendung als Kompost auf landwirtschaftlich oder gärtnerisch genutzten Böden erlaubt (Kuntze et al. 1994).

### **Umsatzleistung der Vermikompostierung**

Die Umsatzleistung der Vermikompostierung (angegeben als Verwertung in kg Futter / kg Wurmmasse je Tag) ist eine wichtige Größe zur Beschreibung der Eignung des Systems zur Behandlung der Feststoffe. Aufgrund der ermittelten Umsatzleistung erfolgt die Dimensionierung des Komposters für die gewünschte Anwendung. Voraussetzung für die Bestimmung der Umsatzleistung in der gewählten Betriebsart der Vermikompostierung ist ein stabiler Betrieb. In einem bestehenden „steady-state“ kann so auf Basis von eingesetzter Futtermenge, herausgefallenem Material und Veränderung der Schichtdicke im Kompost-Reaktor die Umsatzleistung abgeschätzt werden.

Die Versuche wurden in drei identischen Kompostern betrieben (siehe 3.1.2.2).

Die Komposter I und II dienen vornehmlich zur Datenerhebung für die akustische Kontrolle der Kompostwürmer. Um sicherzustellen, dass die Substratmenge für die verschiedenen Experimente ausreichend war, wurden diese Komposter mit weniger Substrat betrieben als Komposter III (siehe Abbildung 55), der zur Beschreibung einer Massenbilanz von Input („Fütterung“) und Output („Vermikompost“) und damit zur Abschätzung der Umsatzleistung der Würmer diente. Die Komposter I und II wurden mit einer nicht ausreichenden Menge an Feststoffen betrieben, um die Komposterfläche komplett zu bedecken. Die freien Ränder des Materials (etwa 5 bis 10 % der Gesamtfläche) trockneten trotz Bewässerung aus und wurden nicht von den Würmern durchzogen. Diese Anteile sind in dieser Aufstellung nicht enthalten. Zum Ende dieser Versuche wurde die Trockensubstanz dieser Anteile ermittelt und von der Gesamtfütterung abgezogen.

Die schon umgesetzten, aber noch nicht herausgefallenen Anteile sind ebenfalls in dieser Aufstellung nicht enthalten.

Der Output (Vermikompost) wurde entnommen, wenn ausreichend Material für alle Untersuchungen vorhanden war. Dies war etwa alle drei Wochen der Fall.

Die vergleichsweise geringe Gesamtmasse des Outputs bei Komposter III ergab sich aus der kürzeren Laufzeit dieses Ansatzes. Die Komposter I und II wurden in dieser Form etwa 2 Monate länger betrieben.

Die gewählte Form der Vermikompostierung zielte darauf ab, dass sich eine Schichtung im Kompost-Reaktor entwickelt: eine Fütterungsschicht (oben), eine „Ernteschicht“ (unten) und dazwischen eine „Überdauerungs“- oder „Arbeitsschicht“ (siehe Abbildung 1). Ein „steady-state“ wäre dann erreicht, wenn bei regelmäßiger Fütterung und Ernte die Schichtdicke im Komposter weder zu- noch abnimmt und der Betrieb stabil läuft.

In Tabelle 12 sind die gesamten Futter- und Outputmengen für die einzelnen Komposter aufgelistet.

Tabelle 12: Gesamtfutter- und Outputmengen [g TS] der einzelnen Komposter sowie die Startmasse an Würmern [g Frischmasse]

	Komposter I	Komposter II	Komposter III
Würmer - Startmasse [g Frischmasse]	2500	2500	3000
Substrat – Startmasse [g TS]	544	544	2971
Gesamtmasse Futter [g TS]	7686	7062	7681
Gesamtmasse Output [g TS]	2275	3462	1569

### **Beschreibung der Umsatzleistung anhand der Durchführung in Komposter III (25 kg Frischmasse als Startvolumen)**

Wie unter „Umsatzleistung der Vermikompostierung“ (siehe Seite 55) beschrieben, wurde der Komposter III im Unterschied zu den Kompostern I und II flächendeckend befüllt. In Abbildung 30 sind die gesamten zugegebenen und geernteten Mengen für Komposter III dargestellt. Wie bereits zuvor beschrieben, wurde die Fraktion <4 mm als behandeltes Substrat definiert (siehe 4.1.2.2). Der Gesamtfuttermenge sind „Ernte exklusive Innenraum“ und „Ernte inklusive Innenraum“ gegenübergestellt. „Ernte exklusive Innenraum“ beinhaltet nur das Material, was durch den Gitterboden ausgefallen war. Bei „Ernte inklusive

Innenraum“ wurde das im Komposter verbliebene abgetrocknete Material mit einbezogen. Es wurde luftgetrocknet und anschließend gewalzt und gesiebt, um Verklebungen aufzubrechen. So konnten die enthaltenen umgesetzten Fraktionen (<4 mm) abgetrennt werden. Diese wurden dann zu den entsprechenden Fraktionen der „Ernte exklusiv Innenraum“ addiert.

Durch die Vermikompostierung reduzierte sich die Gesamtmenge des Materials um etwa 41% (14,4 kg TS Input gegenüber 8,5 kg TS Output). Dieser Wert überschreitet die Reduktionsleistung, die mit einer konventionellen Kompostierung (Heißrotte) erreicht werden kann (z.B. Vinneras und Jonsson 2002: Reduktion von Fäkalien bei Heißrotte: 21 %).

Trotz einer regelmäßigen Befeuchtung mit einer Sprühflasche trocknete ein Teil des Substrates aus (v.a. Randbereiche) und wurde nicht mehr von den Würmern durchzogen. Dieser ausgetrocknete Anteil erwies sich als nicht mehr anfeuchtbar und wurde deshalb als „nicht behandelt“ definiert und der Fraktion >4 mm zugeordnet.

An dem eingetrockneten Substrat haftete zum Teil behandeltes Material (Vermikompost, dunkle Körner, ca. 3 mm Größe, s. Abbildung 31), welches aber nicht durch den Gitterboden fiel. Ebenso kam es zum Verkleben von visuell umgesetztem, feuchtem Material, das ebenfalls nicht durch den Gitterboden ausfiel.

Der Anteil dieser Fraktion <4 mm an dem abgetrockneten Substrat im Komposter betrug (nach dem Walzen) rund 34 %.

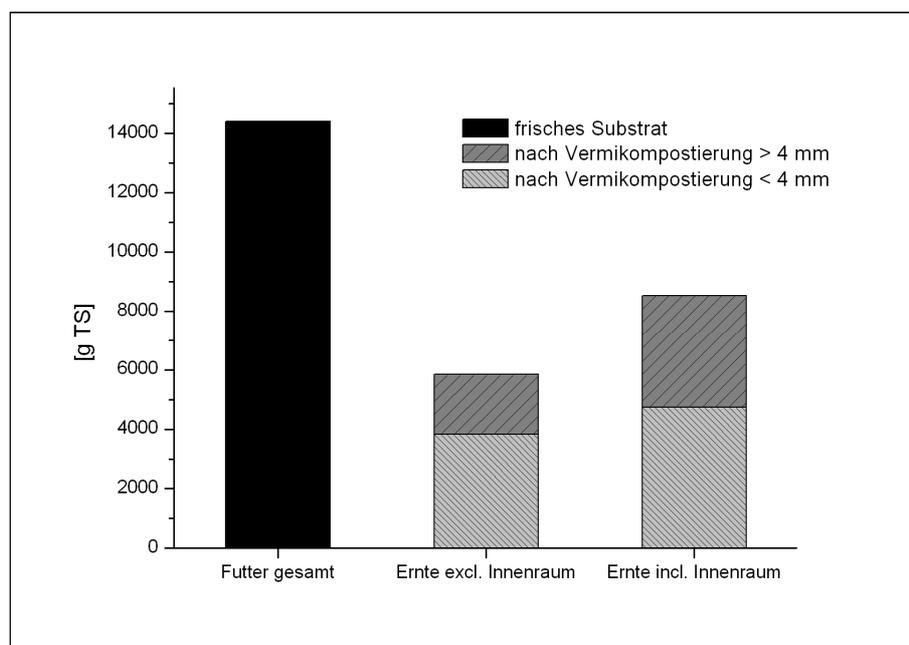


Abbildung 30: Gesamt-Futtermenge und Ernte für Komposter III, Ernte aufgegliedert in Siebfraktionen >4 und <4 mm. Alle Angaben in g TS. „Ernte excl. Innenraum“ beinhaltet nur das durch den Gitterboden aus dem Komposter ausgefallene Material; „Ernte incl. Innenraum“ beinhaltet umgesetztes, aber zum Zeitpunkt der Ernte noch im Komposter verbliebenes Material.



Abbildung 31: Umgesetztes Material (in roter Umrandung) an getrocknetem Ausgangssubstrat

Der Betrieb der Komposter zeigte, dass die vorgegebenen Mengen gut bewältigt wurden. Es kam beim Betrieb mit der Fütterung von 5 kg Fäkalien nach Bedarf (hier: alle 3 Tage; das ergibt bei 3 kg Würmern rund 0,55 kg Fäkalien pro kg Wurm- und Tag) zu keinen deutlichen Füllhöhenveränderungen. Das lässt den Schluss zu, dass eine tägliche Umsatzleistung von 0,5 kg Futter / kg Wurm- und Tag realistisch ist.

### **Hygienisch-mikrobiologische Qualität der Ausgangsstoffe und der Vermikomposte**

Die Arbeiten zur Hygiene wurden vom Institut für Hygiene und öffentliche Gesundheit der Universität Bonn durchgeführt. Die Ergebnisse wurden im Endbericht des Komplett-Projektes veröffentlicht (Komplett 2009).

Die im Rahmen der Vermikompostierung verwendeten Ausgangsstoffe Fäkalien, Bioabfall und Überschussschlamm wurden quantitativ auf die mikrobiologischen Parameter *E. coli*, Fäkalstreptokokken, Salmonellen und somatische Coliphagen untersucht.

Der Vermikompost wurde sowohl direkt nach der Ernte als auch nach einer Nachrotte von mehreren Monaten untersucht. Daneben wurden in den benannten Ausgangssubstraten die zu bestimmenden hygienisch-mikrobiologischen Parameter erfasst. Die höchsten Konzentrationen fanden sich in frischem Bioabfall. Hier fanden sich fast  $10^9$  KBE („Kolonien bildende Einheiten“) Fäkalbakterien pro Gramm Material. Coliphagen lagen in einer Konzentration von 163.000 PBE/g („Plaque bildende Einheiten“ je Gramm) vor. Im Überschussschlamm und in den abgelagerten Fäkalien lag die Konzentration von *E. coli* um ein 1.000faches unter der des Bioabfalls (Tabelle 13). Dies gilt auch für Enterokokken.

Coliphagen sind im Vergleich zum Bioabfall im Überschussschlamm in 10fach geringerer Konzentration vorhanden. In abgelagerten Fäkalien waren sie in Konzentrationen von ca. 10 PBE/g nachweisbar.

Tabelle 13: Konzentrationen von *E. coli*, Enterokokken und Coliphagen in den Ausgangsstoffen Bioabfall, Überschussschlamm und Fäkalien; KBE = „Kolonien bildende Einheiten“; PBE = „Plaques bildende Einheiten“

	<i>E. coli</i> [KBE/g]	Enterokokken [KBE/g]	Coliphagen [PBE/g]
Bioabfall	890.000.000	500.000.000	163.000
Überschussschlamm Kläranlage Bonn	455.000	536.000	20.600
Fäkalien (etwa 3 Wochen gelagert)	640.000	> 100	< 10

In den Vermikomposten fanden sich direkt nach der Ernte sowohl *E. coli*, Fäkalstreptokokken sowie somatische Coliphagen in den Proben. Salmonellen wurden nur in frischen Komposten nachgewiesen. Im späteren Verlauf der Nachrotte waren keine Salmonellen nachweisbar. Die Ergebnisse der mikrobiologischen Analysen Proben aus dem Komposter III (Fäkalien) sind in Tabelle 14 dargestellt.

Im frischen Vermikompost lag die Anzahl der Enterokokken pro Gramm Kompost um das 10fache höher als die Konzentration von *E. coli*. Im Verlauf der Nachrotte verringerte sich dieses Verhältnis und kehrte sich sogar um, aber zum Ende des Versuchszeitraumes fanden sich wieder ähnliche Verhältnisse wie am Anfang. Coliphagen fanden sich in Konzentrationen von maximal 223 PBE/g. Nach 3,5 Monaten waren keine Phagen nachweisbar. Während der späteren Beprobungen ließen sich jedoch wieder Phagen in Konzentrationen <10 PBE/g Kompost nachweisen.

Eine Ausnahme stellten die Proben nach 5,75 Monaten, 8 Monaten und 8,5 Monaten dar. Hier wurde ein massiver Konzentrationsanstieg aller untersuchten Parameter beobachtet. Besonders stark war dieser Anstieg beim Parameter *E. coli*, der in Konzentrationen von  $>10^6$  KBE/g nachweisbar war. Ebenso deutlich war aber auch der folgende Konzentrationsabfall in den nächsten 1-2 Monaten. Es wird angenommen, dass eine Fremdkontamination z.B. durch Mäuse (Lagerung frei zugänglich in Kellerräumen eines älteren Gebäudes) oder ein Probenahmefehler vorlag, da dieser Verlauf nicht typisch und kaum anders zu erklären ist.

Tabelle 14: Konzentrationen hygienisch-mikrobiologischer Parameter im Vermikompost aus Feststoffen aus der Abwasserreinigung (Fäkalien) im Verlauf der Nachrotte

Alter (Monate)	<i>E. coli</i> [KBE/g]	Enterokokken [KBE/g]	Coliphagen [PBE/g]
10 Tage	3.293	24.240	70
1,5	27.870	352.400	0
1,75	1.010	3.100	223
3,5	6.720	1.340	0
3,75	4.485	160.810	0
5,25	40	30	0
5,75	>248.000.000	42.700	<10
6,25	56.372	14.360	6
7,5	200	73	5
8	>1.000.000	14.500	171
8,5	190	2.540	84
9	20	3.180	2,4

In weiteren Versuchen, bei denen es nicht wie in Tabelle 14 gezeigt zu zwischenzeitlichem Anstieg der Werte kam, zeigten sich ebenfalls deutliche Reduktionen der hygienisch-mikrobiologischen Parameter (Ergebnisse nicht dargestellt). Vergleiche der Konzentrationen an *E. coli* zwischen Vermikomposten aus Fäkalien und im Handel erhältlicher Blumenerde zeigten, dass der Vermikompost nach einer Nachrotte von rund 4 Monaten ein vergleichbares Niveau wie die Blumenerde aufwies (siehe Abbildung 32).

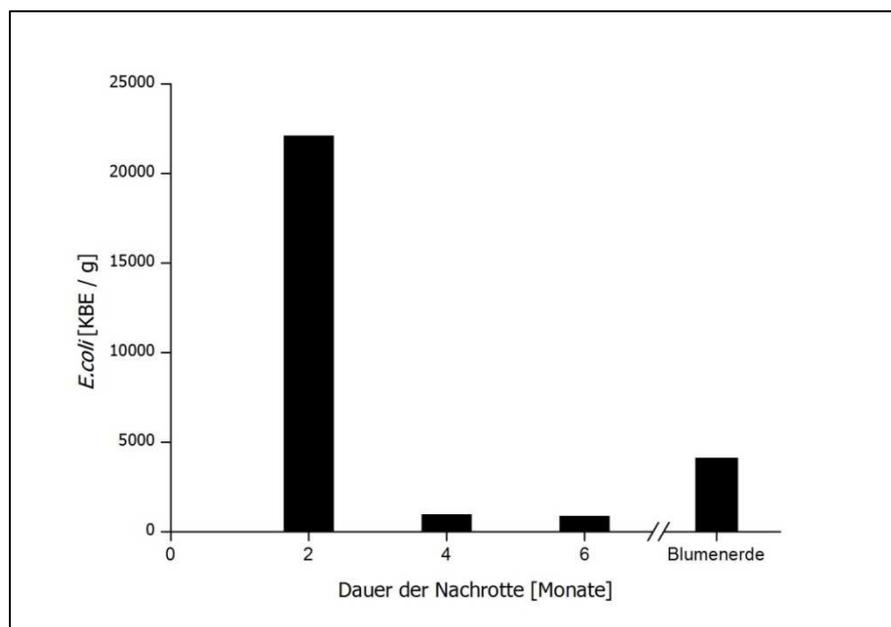


Abbildung 32: Vergleich der Konzentration von *E. coli* [KBE/g] in Vermikompost (aus Fäkalien) unterschiedlichen Alters und einer handelsüblichen Blumenerde (nach Rechenburg)

### Schwermetallkonzentrationen in Vermikomposten aus unterschiedlichen Ausgangsstoffen

Die Vermikomposte aus Fäkalien (aus der Testphase, Nachrotte >9 Monate) und aus der Mischung „Überschussschlamm und Bioabfall“ (aus der Anwendungsphase, siehe 4.1.3, Mittelwerte aus Vermikompost nach 1 und 2 Monaten Nachrotte) wurden auf die Schwermetalle Blei, Cadmium, Chrom, Nickel, Zink, Quecksilber und Kupfer untersucht. In Tabelle 15 sind die Konzentrationen aufgezeigt und hilfsweise mit den Grenzwerten der Klärschlammverordnung (Anonymus 1992, „AbfKlärV“), der Bioabfallverordnung (Anonymus 1998, „BioAbfV“, Aufwandmenge 20 t ha<sup>-1\*3a</sup>) und der Düngemittelverordnung (Anonymus 2012, „DüMV“) verglichen.

Die Grenzwerte der AbfKlärV und der DüMV wurden von allen Substraten für alle gemessenen Schwermetalle sicher eingehalten. Die Grenzwerte der BioAbfV wurden bis auf den für Kupfer ebenfalls eingehalten. Die Konzentrationen an Zink in den Vermikomposten aus Überschussschlamm und Bioabfall erreichten bzw. überschritten den Grenzwert der BioAbfV (für 20 t ha<sup>-1\*3a</sup>). Die Konzentration an Kupfer in dem Vermikompost aus Fäkalien lag relativ nah am Grenzwert der BioAbfV.

Tabelle 15: Konzentrationen der Schwermetalle Blei (Pb), Cadmium (Cd), Chrom (Cr), Nickel (Ni), Zink (Zn), Kupfer (Cu) und Quecksilber (Hg) in Vermikomposten aus Fäkalien (>9 Monate abgelagert) und der Substratmischung „Überschussschlamm (ÜSS) + Bioabfall“ (Mittelwerte aus Untersuchungen in 1 und 2 Monate abgelagerten Vermikomposten) im Vergleich mit den Grenzwerten der Klärschlammverordnung (AbfKlärV), der Bioabfallverordnung (BioAbfV, Grenzwerte für Aufwandmenge 20 t/(ha\*3a)) und der Düngemittelverordnung (DüMV).

<sup>1</sup>nach 84 Monaten nachbestimmt

Parameter	Fäkalien	ÜSS + Bioabfall	Grenzwerte BioAbfV	Grenzwerte AbfKlärV	Grenzwerte DüMV
	[mg/kg TM ]	[mg/kg TM ]	[mg/kg TM ]	[mg/kg TM ]	[mg/kg TM ]
Pb	n.n.	73	150	900	150
Cd <sup>1</sup>	0,41	n.b.	1,5	10	1,5
Cr	5,4	19,6	100	900	-
Ni	9,4	16,4	50	200	80
Cu	87,9	44,4	100	800	900
Zn	237	407	400	2500	5000
Hg <sup>1</sup>	0,126	n.b.	1	8	1

„n.b.“ = nicht bestimmt; „n.n.“ = nicht nachgewiesen; „-“ = nicht vorhanden

### 4.1.3 Betrieb des Komposters in der Anwendung

(spez. Material und Methoden siehe Seite 101)

Im Rahmen der Anwendungsphase fielen bei der Abwasserreinigung des Komplett-Projektes (Pilotbetrieb in Oberhausen) deutlich weniger Feststoffe an als erwartet. Daher wurde das in Kapitel 4.1.1.4 auf die Eignung zur Vermikompostierung untersuchte Substratgemisch aus Bioabfall und polymereingedicktem Überschussschlamm benutzt (siehe auch Seite 101).

Die Würmer hatten sich gut im Substrat etabliert. Eine gesteuerte Bewässerung der Randbereiche mittels des Tropfbalkens war nicht vorgesehen, daher trockneten diese aus und wurden nicht durchzogen. Die Beurteilung excl. der Randbereiche ergab die Bonitur 1 S<sub>r</sub>K<sub>w</sub>. Das durchschnittliche Wurmgewicht nahm innerhalb von zwei Monaten von 1,26 g um 18 % auf 1,49 g zu. Zusätzlich fanden sich im Substrat viele Kokons – was für gute Umweltbedingungen spricht. In Abbildung 33 ist ein Blick ins Substrat gezeigt (Deckschicht weggeräumt).



Abbildung 33: Würmer im Substrat (Überschussschlamm + Bioabfall)

Der Betrieb der Applikationseinheit ergab auch in der Anwendung in Oberhausen ein gutes Ablagebild (siehe Abbildung 34). Die dort zu erkennenden größeren Bereiche ohne Überschussschlamm stammten wahrscheinlich von Fäkalienresten aus der Feststoffabscheidung des Pilotbetriebes der Abwasserreinigung des Komplett-Projektes (Siebtrommel), die in der Vorlage verblieben sind. Aufgrund der unterschiedlichen Konsistenzen wurden die Materialien unterschiedlich schnell ausgebracht. Bei einem Betrieb der Applikationseinheit nur mit Überschussschlamm ist ein lückenloses Ablagebild zu

erwarten. Die (technisch vorgegebenen) freien Bereiche zwischen den Ablagebahnen wurden durch die Substratbewegung der Würmer geschlossen.



Abbildung 34: Ablagebild der Applikationseinheit (ausgebrachtes Material: Überschussschlamm), in den roten Umrandungen sind Lücken im Ablagebild markiert.

Während der 2-monatigen Betriebsdauer kam es nicht zu Ansammlungen von unbehandeltem Substrat. Die Schichtdicke auf dem Komposter betrug max. 12 cm, was im Rahmen der Planung lag. Die Ernte über den Kratzboden wurde nach jeweils einem Monat durchgeführt. Die Schicht direkt über dem Gitterboden wurde aufgelockert und es fiel zusätzliches Material aus dem Komposter. Mit dem Material fielen einige wenige Würmer aus, die zurück auf den Komposter gegeben wurden.

Das geerntete Material wurde gesiebt (4 mm) und die Hauptparameter wurden bestimmt. In Tabelle 16 sind die Ergebnisse für alle beteiligten Substrate zusammengefasst.

Tabelle 16: Hauptparameter der Materialien vor („Überschussschlamm“ und „Bioabfall“) und nach („Ernte >4 mm“ und „Ernte <4 mm“) dem Betrieb des Komposters in der Anwendungsphase

Substrat	TS	oTS	pH	LF	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>
	[%]	[%]		[mS/cm]	[g/L]
Überschussschlamm	10-15	42	7,1	0,6	-
Bioabfall	25	25-75	4,0-5,9	0,8-1,7	-
Ernte > 4 mm	53	46	7,1	4,1	0,1
Ernte < 4 mm	57	43	7,0	4,3	-

## 4.2 Akustische Überwachung der Aktivität von *Dendrobaena veneta*

Um eine Automatisierung der Vermikompostierung zu erreichen, ist es notwendig, geeignete Parameter zur Steuerung und Überwachung des Prozesses zu identifizieren. Diese Parameter müssen online gemessen werden und zur Steuerung des Systems herangezogen werden können. Die in der Literatur immer wieder genannten Haupteinflussgrößen auf die Vermikompostierung sind Feuchtigkeit, pH-Wert und Leitfähigkeit. Diese Parameter konnten in den bisherigen Untersuchungen bestätigt werden, sind aber aufgrund der Messmethodik nicht zur online-Bestimmung geeignet - zumindest nicht in dem Aufbau, der für die Durchführung der Vermikompostierung gewählt wurde.

Der Ansatz, die Kontrolle der Vermikompostierung über eine akustische Kontrolle zu bewerkstelligen, beruht auf der Tatsache, dass die Kompostwürmer bei ihrer Bewegung im Substrat hörbare Geräusche verursachen. Darüber hinaus versuchen die Kompostwürmer bei Stress (z.B. ungeeignete Umweltbedingungen: zu trocken, zu nass) aus diesen Bereichen zu flüchten. Da die Komposter räumlich begrenzt sind, bilden sich an den Randbereichen größere Ansammlungen.

Die Geräusche – und deren räumliche Auflösung über die Fläche der Vermikompostierung – sollten für eine kontinuierliche akustische Kontrolle der biologischen Aktivität der Würmer eingesetzt werden. Sind überall über den Komposter verteilt biologisch sinnvolle Zählraten (Ereignisanzahlen je Zeiteinheit) zu messen, so zeigt das eine gute allgemeine Eignung des Futtersubstrates und gute Bedingungen für die Vermikompostierung an. Ist die Ereignisanzahl lokal deutlich erhöht oder großflächig verringert, kann von einer Störung ausgegangen werden. In diesem Fall könnte dann z.B. eine Meldung an Wartungspersonal ausgegeben werden oder bei Kenntnis des Stress-Auslösers sogar automatisiert spezifische Gegenmaßnahmen initiiert werden. Die so erzeugten Zählraten stellen somit eine weitaus komplexere Information über den Zustand im lebenden System dar, als sie durch die Messung chemischer oder physikalischer Einzelparameter (Feuchtigkeit des Substrates, pH Wert, etc.) erzielt werden können.

Für die Entwicklung des Systems wurden zunächst die bei der Vermikompostierung entstehenden Geräusche identifiziert und analysiert. In der Folge wurde eine Methode ermittelt, mit der die Geräusche als „Einzelereignisse“ gezählt und aufsummiert werden konnten. Anschließend erfolgte die biologische Interpretation der gewonnenen Daten.

#### 4.2.1 Voruntersuchungen

##### Akustische Kontrolle der Kompostwürmer

Die Vermikompostierung in dem 500 L-Komposter wurde mit verschiedenen Mikrofonen abgehört. Nach einleitenden (hier nicht weiter dargestellten) Versuchen mit einem Mikrofon mit integriertem Vorverstärker („Hi-Powered Hearing Enhancer“) wurden Mikrophone mit externem Vorverstärker (Eigenbau, Fa. INVIVO, siehe Abbildung 35) über und im Substrat (in Schutzhülle) benutzt. Die Aufnahme und Wiedergabe der Geräusche erfolgte über einen Audioeditor („audacity“).

In den Vorversuchen konnte in den Aufnahmen nachvollzogen werden, dass die Würmer unter ungünstigen Bedingungen andere Geräuschemuster erzeugten als unter günstigen Bedingungen.

Bei den Aufnahmen im Substrat gab es deutliche Ausschläge (siehe Abbildung 36), die wahrscheinlich von einem Kontakt der Würmer mit der Schutzhülle herrührten. Diese deutlichen Ausschläge gab es bei den Aufnahmen über dem Substrat nicht (siehe Abbildung 37).

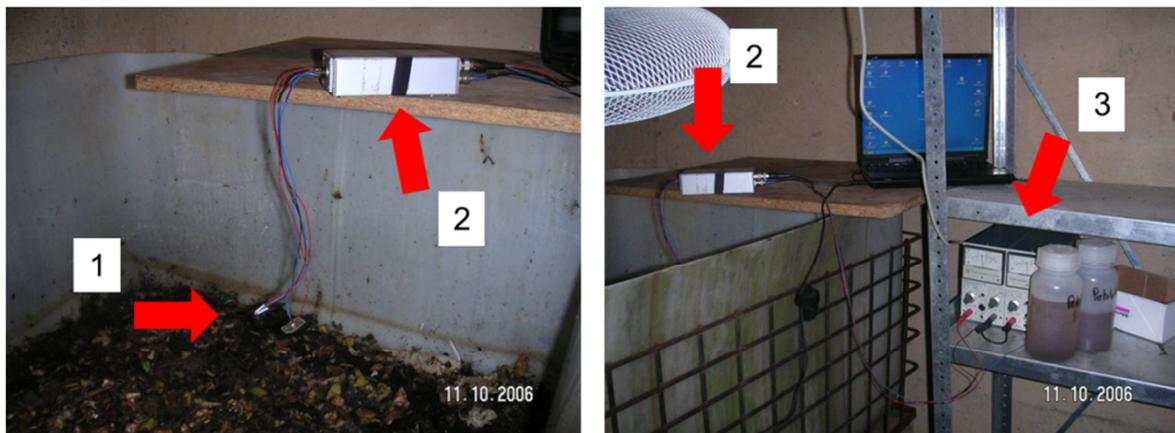


Abbildung 35: Mikrophone (Markierung 1) zur akustischen Kontrolle der Kompostwürmer mit eigener Spannungsversorgung (Markierung 3) und Vorverstärkung (Markierung 2). Positionierung über dem Substrat.

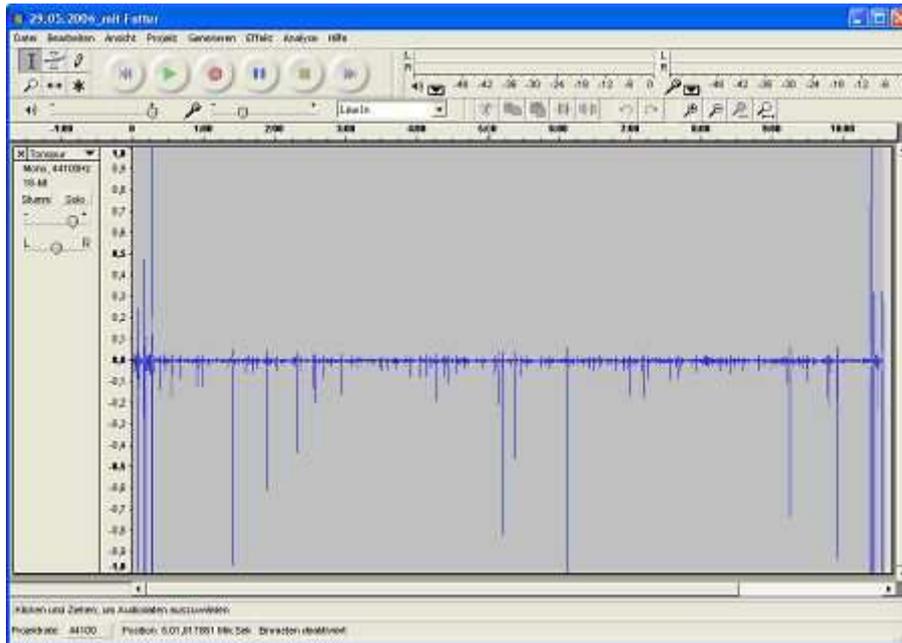


Abbildung 36: Screenshot des Audioeditors „audacity“ bei Aufnahmen mit einem Mikrophon im Substrat. Dargestellt als Wellenform werden Amplitude und Frequenz der Audiosignale (hier = Lautstärke und Tonhöhe, y-Achse) über die Zeit der Aufnahme (x-Achse). Je deutlicher der Ausschlag, umso lauter war das Geräusch. Die intensiven Auslenkungen nach oben oder unten ist bestimmt durch den Mikrophonverstärker und die Phasenlage des Signals und hat hier keine Bedeutung. Die deutlichen Ausschläge stammten sehr wahrscheinlich vom direkten Kontakt der Würmer mit dem Mikrophon.

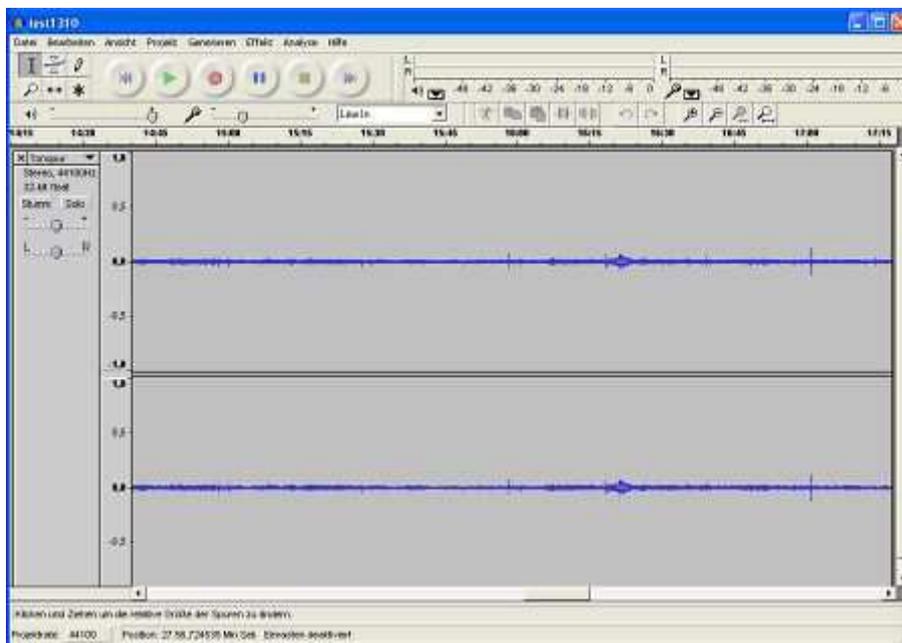


Abbildung 37: Screenshot des Audioeditors „audacity“ bei Aufnahmen mit zwei Mikrofonen über dem Substrat. Dargestellt als Wellenform werden Amplitude und Frequenz der Audiosignale (hier = Lautstärke und Tonhöhe, y-Achse) über die Zeit der Aufnahme (x-Achse). Je deutlicher der Ausschlag, umso lauter war das Geräusch. Die intensiveren Auslenkungen nach oben oder unten ist bestimmt durch den Mikrophonverstärker und die Phasenlage des Signals und hat hier keine Bedeutung. Im Vergleich zur Abbildung 36 gab es hier keine vergleichbar intensiven Ausschläge. Die erkennbaren Auslenkungen sind Störgeräusche mit höherer Lautstärke (z.B. Schließen der Tür).

Die Geräusche der Vermikompostierung konnten also mit einfachen Mikrofonen aufgenommen werden. Mit der verwendeten Technik wurden jedoch viele in den Aufnahmen hörbare Störgeräusche mit erfasst. Bei der Wiedergabe über den Audioeditor, bei der zeitgleich die graphische Darstellung erfolgte, konnte nicht allen hörbaren Wurmgeräusche ein deutlicher Ausschlag zugeordnet werden oder waren alle deutlichen Ausschläge auf Wurmgeräusche zurückzuführen.

#### **4.2.2 Testphase**

##### **Ermitteln der Zielfrequenz**

Hier sollte anhand der Frequenz der Wurmgeräusche (akustisch wahrnehmbar als „Knackser“) in einer Vermikompostierung mit Fäkalien der untersuchte Frequenzbereich auf eine Zielfrequenz eingeeengt werden.

Im Unterschied zu den Voruntersuchungen wurden empfindlichere Mikrophone und leistungsstärkere Verstärker eingesetzt. Da bei der akustischen Kontrolle der Kompostwürmer mit mehreren Mikrofonen eine räumliche Auflösung der Wurmaktivität ermittelt werden sollte, wurde zur Auswertung die Fourier-Transformation benutzt. Dabei wurden die Häufigkeiten der einzelnen Frequenzen über die Dauer der Aufnahme ermittelt. Welcher Frequenzbereich dabei von den Würmern stammte, war nicht zu erkennen, da viele Störgeräusche weitaus häufiger vorkamen als die „Knackser“ der Würmer (Abbildung 38 und Abbildung 39).

Um den Frequenzbereich zu ermitteln, in dem die Wurmgeräusche liegen, wurde ein optimierter Versuchsaufbau (Abschirmung von Störgeräuschen durch eine schallisolierte Box) erstellt. Bei einer starken Vergrößerung des Abbildungsmaßstabs der Zeitachse konnten so im Abgleich mit der akustischen Wiedergabe einzelne Wurmgeräusche identifiziert werden. Die Frequenzanalyse ergab eine Frequenz im Bereich von 5-6 kHz, die Hauptkomponente eines Wurmgeräusches ist beispielhaft in Abbildung 40 gezeigt.

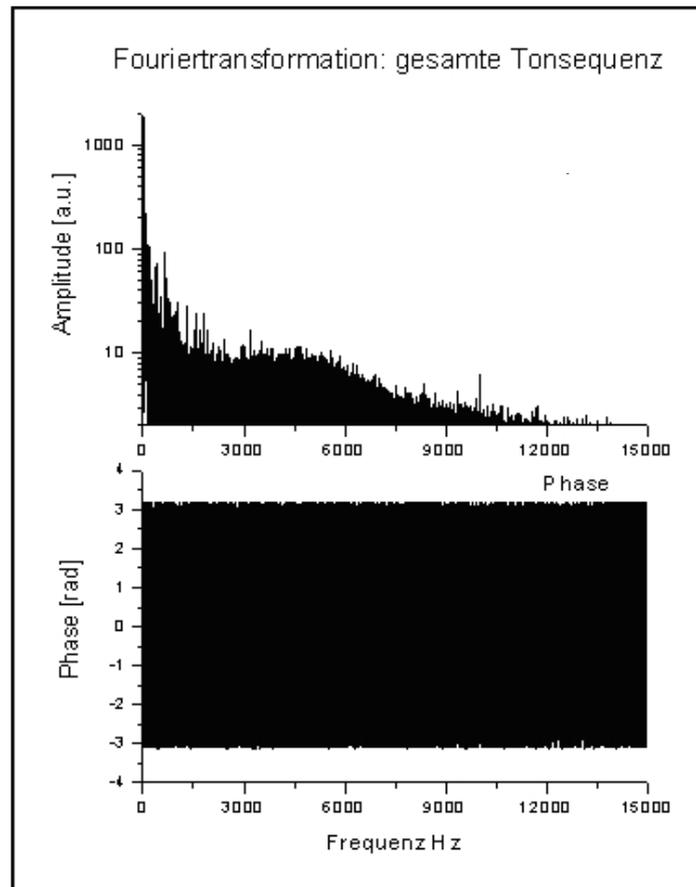


Abbildung 38: Fourier-Transformation über die gesamte Tonsequenz (Aufnahme incl. Störgeräusche), dargestellt ist die Amplitude (hier = Häufigkeit) der einzelnen Frequenzen sowie die Phase (als Bogenmaß ( $0 \leq \text{Phase} \leq 2\pi$ ) der Schwingungen (hier: „Summe der Einzelgeräusche“) über das gesamte Aufnahmespektrum. Im unteren Teil kann man erkennen, dass es sich bei der Aufnahme um viele verschiedene Einzelgeräusche und damit Einzelfrequenzen handelt. Bei einem klaren Ton würde die Darstellung der Phase eine deutliche (Sinus-) Wellenform zeigen.

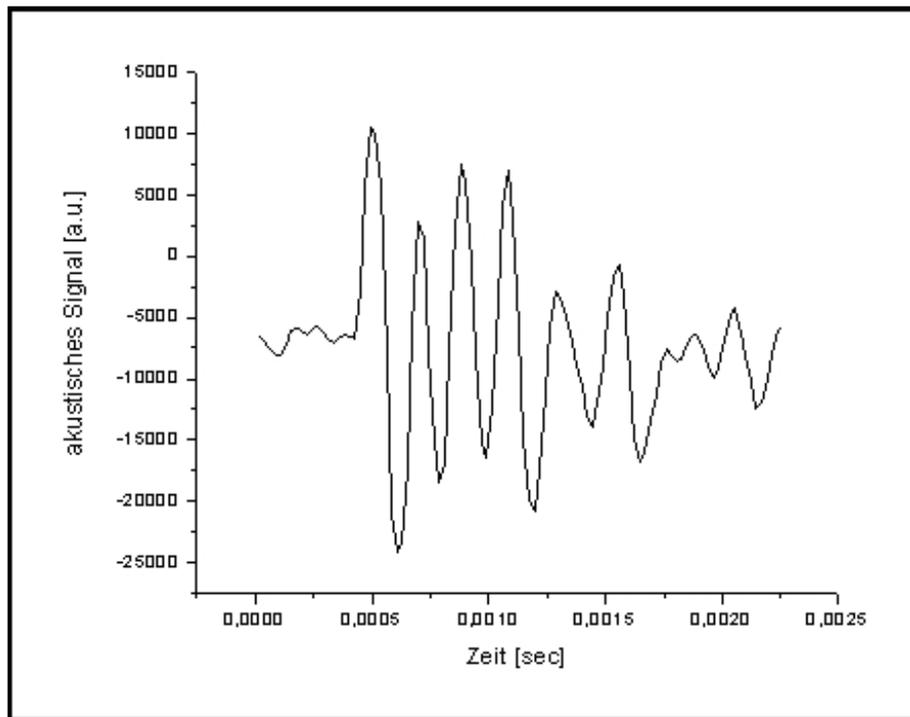


Abbildung 39: Einzelnes Wurmgeräusch in Fäkalien (85 % Wassergehalt) bei stark vergrößertem Zeitausschnitt

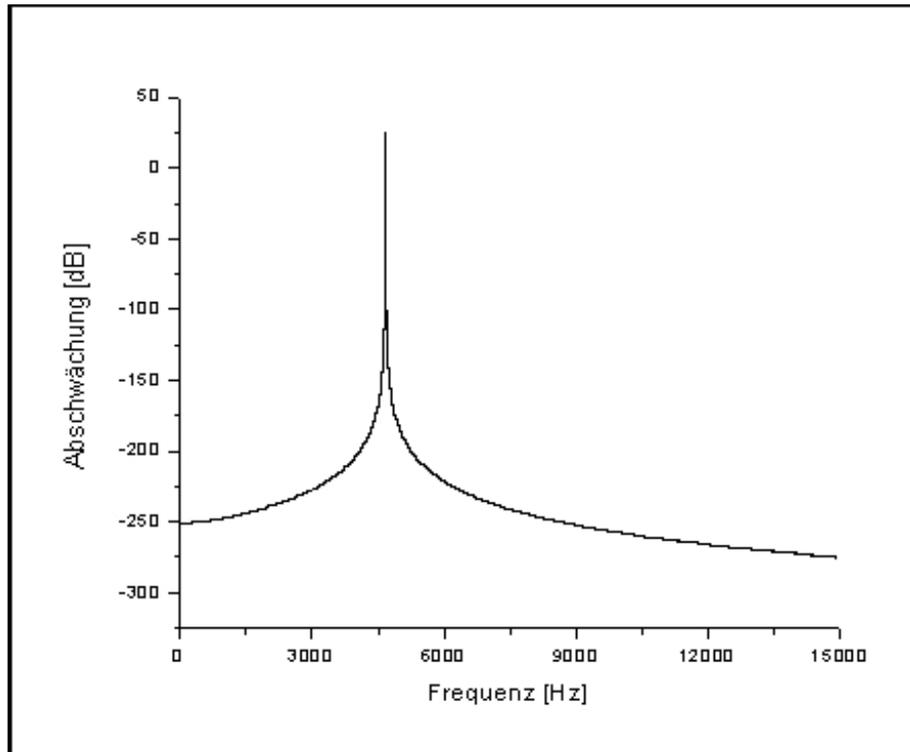


Abbildung 40: Darstellung der größten Komponente eines Wurmgeräusches in Fäkalien (85 % Wassergehalt), Ergebnis der Frequenzanalyse der Hauptkomponente: Mittenfrequenz 5 kHz, +/- 882 Hz

Die Mikrophone befanden sich immer über dem Substrat. Von einer akustischen Kontrolle innerhalb des Substrates wurde Abstand genommen, da eine genaue Positionierung der Mikrophone in einer bestimmten Zone (z.B. Fütterungszone) nicht möglich war, weil sich diese verschieben kann.

Die akustische Kontrolle der Kompostwürmer, bei der das Mikrophon über dem Substrat angebracht war, zeigte vielversprechende Ergebnisse. Die Auswertung und Darstellung mit der Fourier-Transformation zeigte, dass eine akustische Überwachung der Kompostwürmer möglich ist.

Sie ist aber für einen online-Betrieb nicht geeignet, da zum einen das eigentliche Wurmsignal in der Vielzahl der häufigeren Geräusche „untergeht“, zum anderen kann die Rechnerleistung ein limitierender Faktor sein.

Vor dem Hintergrund, dass der Frequenzbereich der Wurmgeräusche bekannt ist, wurde eine alternative Auswertung getestet, bei der der Frequenzbereich der Würmer gesondert verstärkt bzw. die übrigen Frequenzen abgeschwächt wurden und nur die eigentlichen Einzelereignisse eines Wurmgeräusches gezählt wurden. Die Auswertung erfolgte über eine Ableitung der Geräuschintensität der wurmtypischen Signale. Die ersten Ergebnisse waren vielversprechend, und die erforderlichen Berechnungen konnten mit einem normalen PC erfolgen, so dass eine online-Überwachung möglich erschien.

Für die Anwendung an der Vermikompostierung in den 300-L-Kompostern wurden zwei Versuchsreihen durchgeführt: in der ersten wurde versucht, alle möglichen Störgeräusche (z.B. Ventilation, Fütterung, Arbeiten im Container) zu vermeiden, in der zweiten wurden diese Störgeräusche nicht unterdrückt.

### **Versuche bei Vermeiden von Störgeräuschen**

In Abbildung 41 sind die kumulierten Ereignisse über den Verlauf von 2 Minuten eines gut positionierten und dimensionierten Fensters gezeigt. Es wurden nach dem Prinzip eines Bandpassfilters nur „Ereignisse“ (Geräusche) gezählt, die in einem fest vorgegebenen Frequenzbereich („Fenster“) lagen. Abbildung 42 zeigt die kumulierten Ereignisse von 2 Minuten eines schlecht positionierten und dimensionierten Fensters.

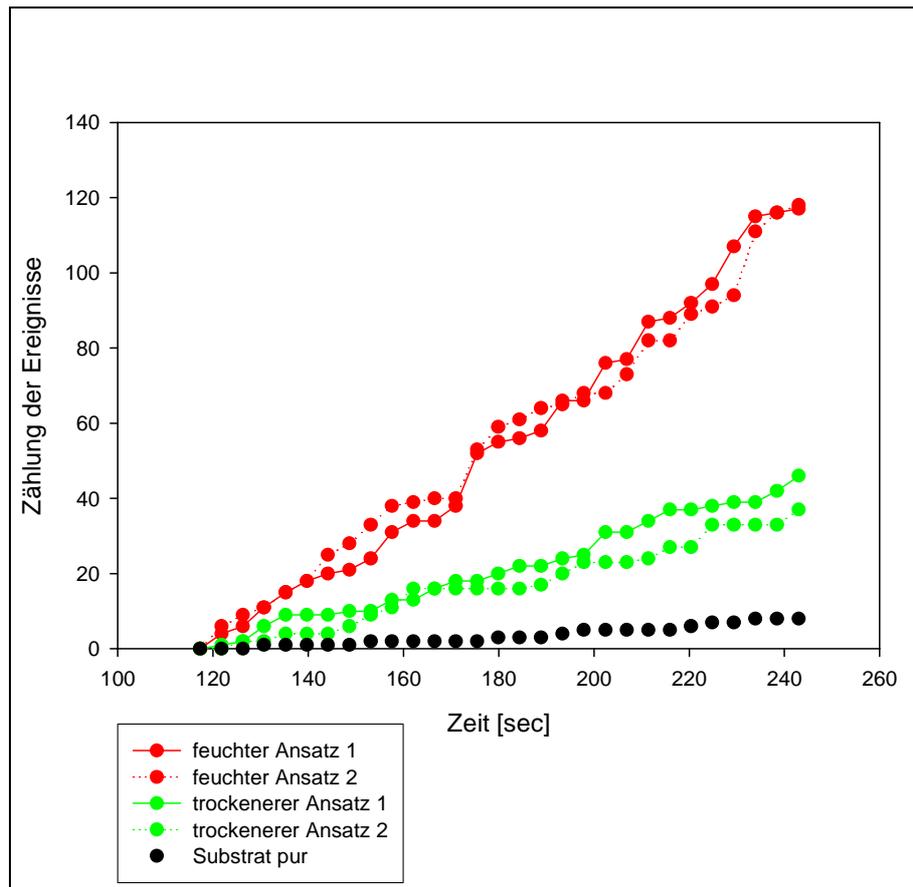


Abbildung 41: Kumulierte Ereignisse über 2 min eines gut positionierten und dimensionierten Fensters (500 – 1300 Hz)

Die Abbildung 41 zeigt, dass in der Messung über den Feststoffen ohne Würmer („Substrat pur“) deutlich weniger Ereignisse gezählt wurden als bei den Messungen über Komposter I (feuchter Ansatz) und II (trockenerer Ansatz). Die über den Feststoffen gezählten Ereignisse waren offensichtlich Störgeräusche, die, wie oben angesprochen, zu gewissen Teilen immer mit in die Messung eingehen. Die Messungen über den Kompostern I und II entsprachen dem subjektiven akustischen Eindruck: im Komposter I wurden mehr Ereignisse gezählt als im Komposter II. Die Summe der Zählungen im Verlauf von 2 Minuten erschien die biologische Aktivität gut zu erfassen.

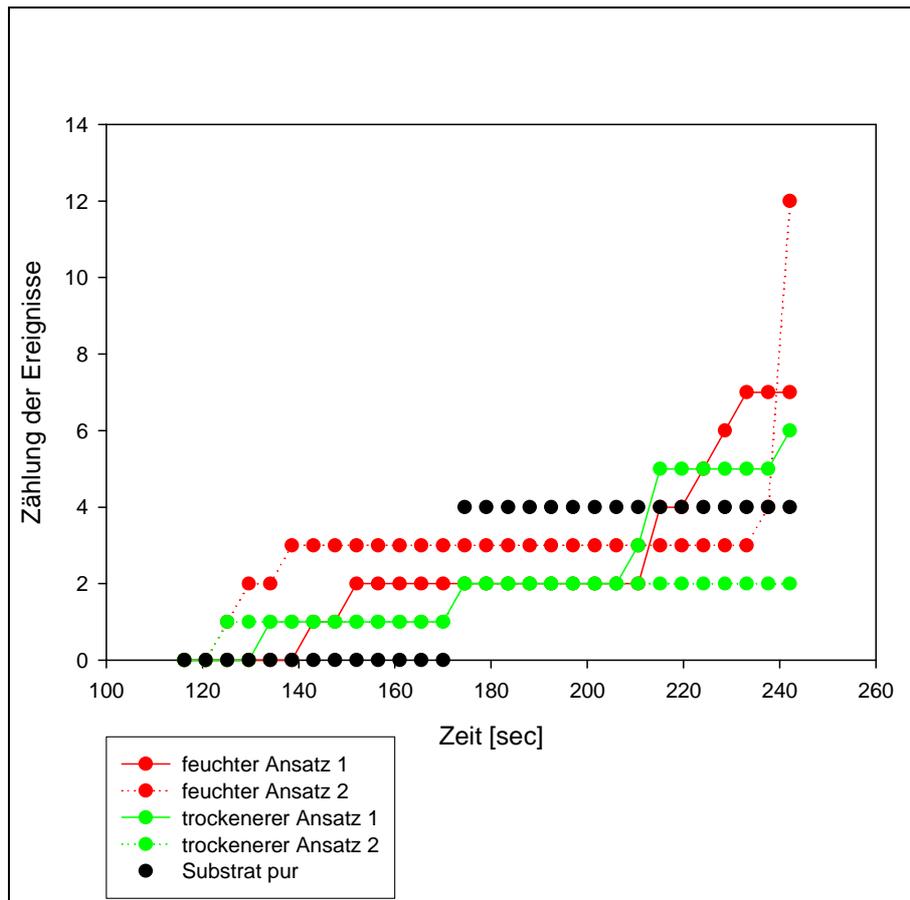


Abbildung 42: Kumulierte Ereignisse eines schlecht positionierten und dimensionierten Fensters (1300 – 1500 Hz)

Die Abbildung 42 zeigt keine deutlichen Unterschiede zwischen den einzelnen Ansätzen. Es wurden in 2 Minuten sehr wenige Ereignisse gezählt (vergleiche mit Abbildung 41). Eine realistische Beschreibung der Ansätze mit diesem Fenster erschien nicht möglich.

### Versuchsdurchführung ohne Unterdrücken von Störgeräuschen

Bei einem Vergleich der erfassten Einzelereignisse aller Mikrophone (Abbildung 43) fiel auf, dass für einige Messzyklen alle Mikrophone sehr hohe Zählraten aufwiesen.

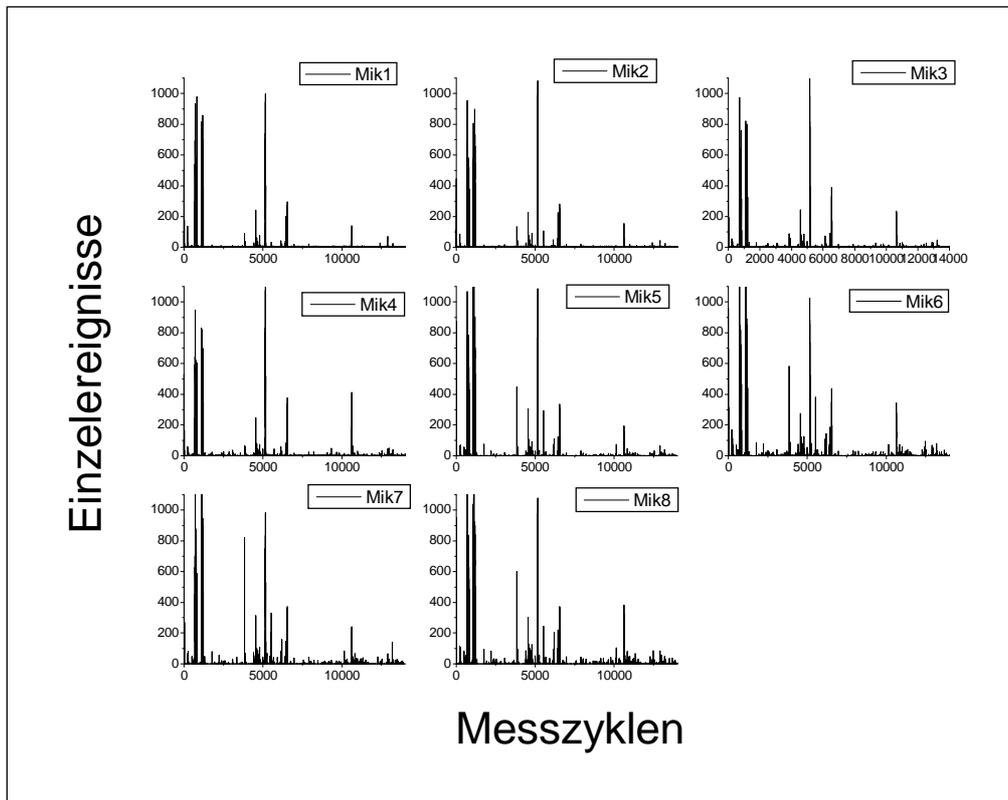


Abbildung 43: Vergleich der Zählraten aller im Container errichteten Mikrophone (Mik) über einen Zeitraum von gut 4 Stunden (Messzyklus = 1 Sekunde). Mik 1 und 2 befanden sich über einer Vermikompostierung mit Fäkalien bei rund 87 % Wassergehalt, Mik 3 und 4 über einer Vermikompostierung mit Fäkalien bei etwa 80 % Wassergehalt. Mik 5, 6 und 7 waren in den Raum gerichtet, Mik 8 befand sich über einem Behälter mit Fäkalien ohne Würmer mit rund 87 % Wassergehalt. Gezählt wurden alle Ereignisse (Geräuschmuster), die innerhalb eines festgelegten Frequenzbereiches lagen (500-1300 Hz).

Die hohen Zählraten kamen sehr wahrscheinlich durch Störgeräusche zustande und wurden für die Auswertung aus den Messdaten gestrichen, sofern sie durch alle Mikrophone erfasst wurden. Die Erkennung der Wurmgeräusche erfolgte über eine Analyse in einem bestimmten akustischen Frequenzbereich (siehe „Ermitteln der Zielfrequenzbereich“:  $2 \cdot \pi \cdot f = 5000 - 6000$  Hz; damit  $f = 796 - 996$  Hz). Für die hier durchgeführte biologische Messung wurde der Messbereich mit einem Fenster bei dem Frequenzbereich von 500 – 1300 Hz deutlich breiter gewählt als der ermittelte Zielfrequenzbereich (796 – 996 Hz), so dass insgesamt höhere Zählraten erzielt wurden. Die erfassten Ereignisse stammten offensichtlich von Wurmereignissen und Störgrößen, die für eine biologische Aussage voneinander getrennt werden mussten.

Für die weitere Auswertung konnte der Einfluss von Störgeräuschen folgendermaßen minimiert werden: Zählraten oberhalb definierter Grenzwerte (als „Ereignisse je Sekunde“) wurden für die Auswertung nicht herangezogen. Dadurch sollten die Wurmgeräusche in einem biologisch/subjektiv erklärbaren Rahmen sicher erfasst und die Zählung von Fehlereignissen verringert (Bsp.: Regen) werden. Für das biologische Experiment wurden

die Grenzwerte auf 100, 30 und 10 Ereignisse je Sekunde festgelegt und ausgewertet. Für einen besseren Vergleich sind in Abbildung 44 die Einzelzählraten kumuliert dargestellt.

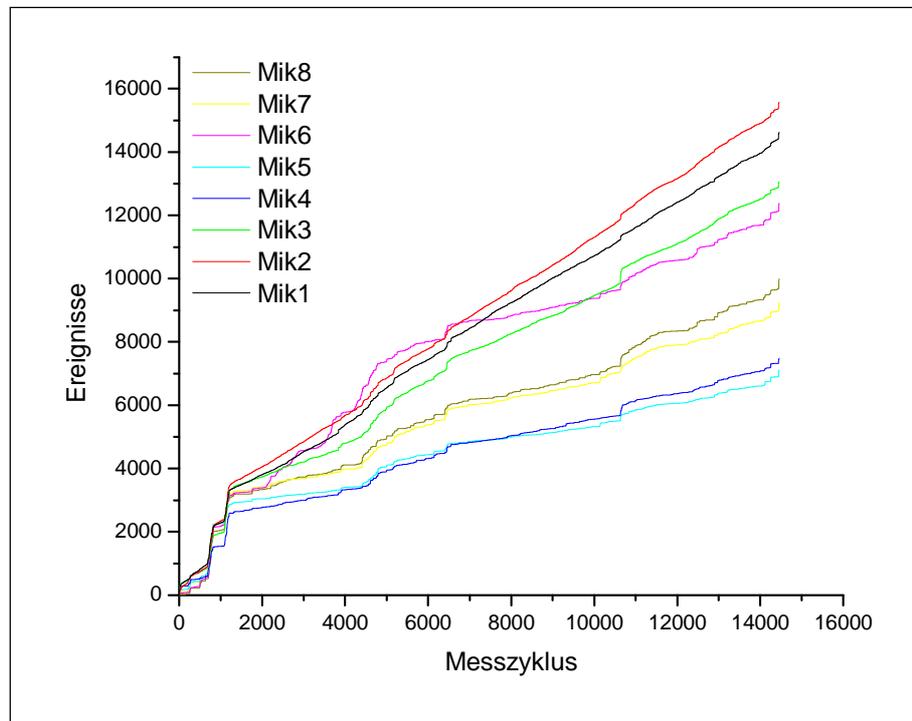


Abbildung 44: Kumulierte Ereignisse bei einem Grenzwert von 100 Ereignissen je Sekunde. Mik 1 und 2 befanden sich über einer Vermikompostierung mit Fäkalien bei rund 87 % Wassergehalt, Mik 3 und 4 über einer Vermikompostierung mit Fäkalien bei etwa 80 % Wassergehalt. Mik 5, 6 und 7 waren in den Raum gerichtet, Mik 8 befand sich über einem Behälter mit Fäkalien mit rund 87 % Wassergehalt ohne Würmer. Gezählt wurden alle Ereignisse (Geräuschmuster), die innerhalb eines festgelegten Frequenzbereiches lagen (500 – 1300 Hz).

Anhand der kumulierten Ereignisse erkennt man, dass sich die Zählraten der einzelnen Mikrophone deutlich voneinander unterschieden. Die steilen Stufen zu Beginn (ca. Messzyklus 1000) wiesen auf hohe Zählraten bei allen Mikrophonen hin, die keine biologische Bedeutung haben konnten. Demnach war der Grenzwert von 100 Ereignissen je Sekunde zu hoch gewählt und es kamen noch zu viele Störgeräusche durch.

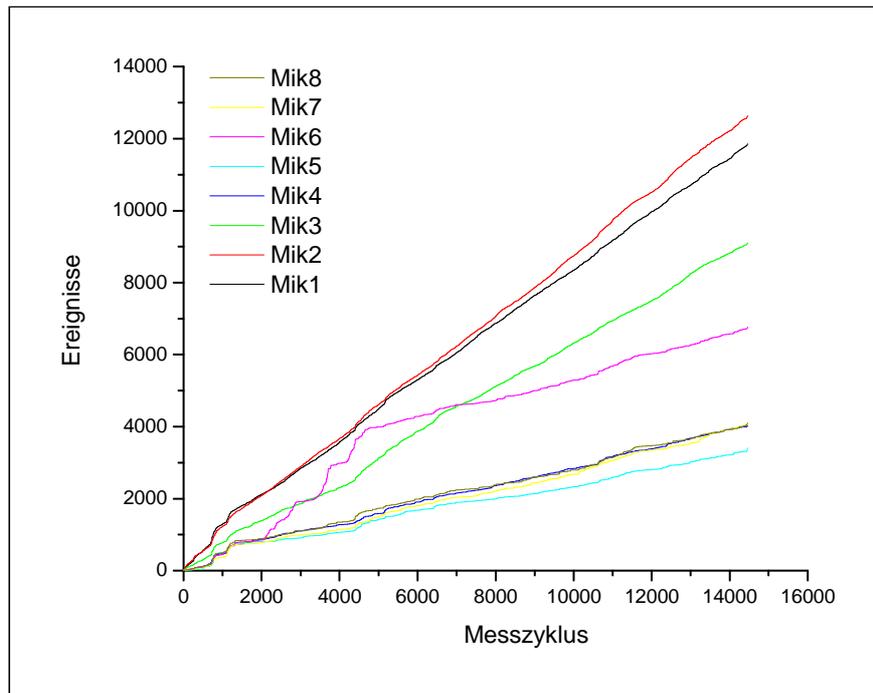


Abbildung 45: Kumulierte Ereignisse bei einem Grenzwert von 30 Ereignissen je Sekunde (Erläuterung siehe Abbildung 44)

Im Vergleich zu Abbildung 44 (Grenzwert = 100 Ereignisse je Sekunde) sieht man in Abbildung 45 (Grenzwert = 30 Ereignisse je Sekunde), dass die steilen Stufen (sehr hohe Ereignisdichte) zu Beginn verschwunden sind. Insofern wurde mit dem Grenzwert 30 Ereignisse je Sekunde schon ein wesentlicher Anteil an Störgeräuschen unterdrückt.

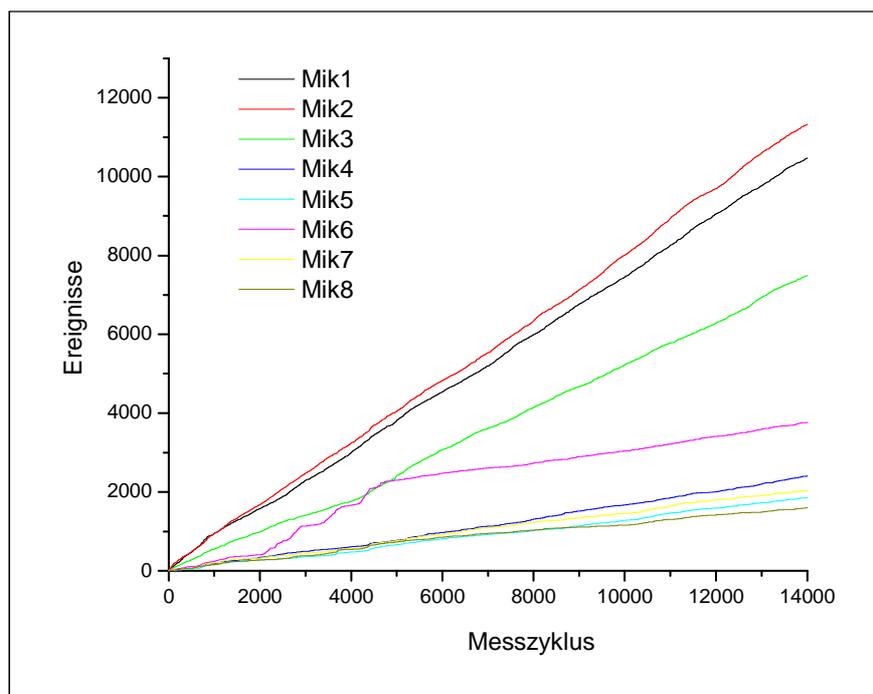


Abbildung 46: Kumulierte Ereignisse bei einem Grenzwert von 10 Ereignissen je Sekunde (Erläuterung siehe Abbildung 44)

Die kumulierten Ereignisse verliefen mit einem Grenzwert von 10 Ereignissen je Sekunde noch flacher. Das zeigte, dass noch mehr Störgeräusche abgeschnitten wurden (Abbildung 46). Allerdings konnte nicht mehr ausgeschlossen werden, dass auch erste biologisch signifikante Signale unterdrückt wurden.

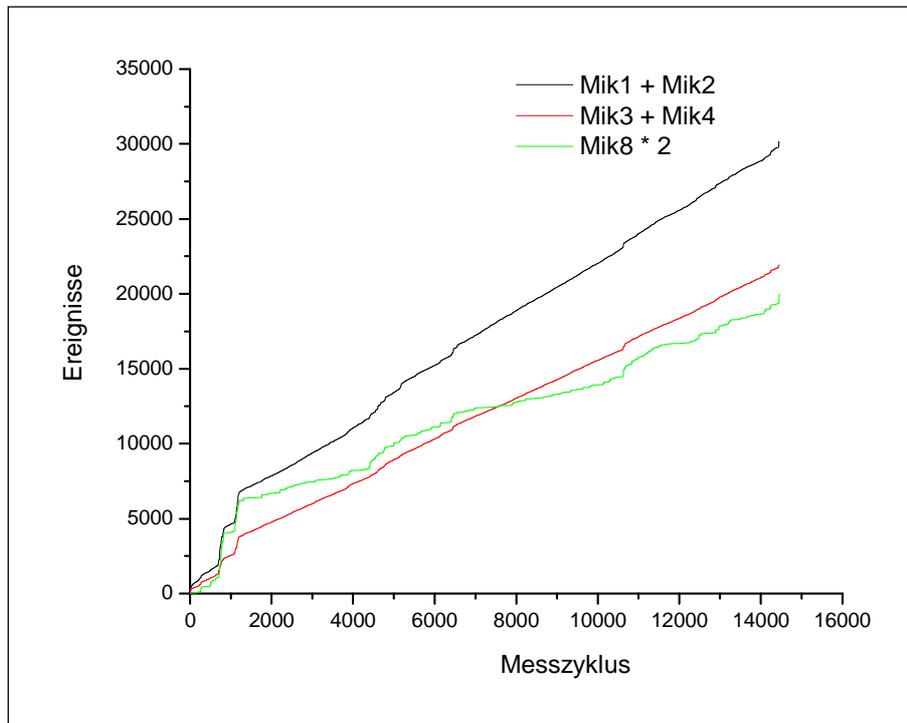


Abbildung 47: Summierte Ereignisse für Komposter I (87 % Wassergehalt, Mik1 + Mik2) und Komposter II (80 % Wassergehalt, Mik3 + Mik4) und Mikrofon 8 über Substrat ohne Würmer (Grenzwert 100 Ereignisse je Sekunde)

Ein vergleichbares Bild der Messsituation ergibt sich, wenn man anstelle der einzelnen kumulierten Mikrophonesignale die Komposter I (Mik1 + Mik2) und Komposter II (Mik3 + Mik4) vergleicht (s. Abbildung 47). Hierzu wurden die Ereignisse in jedem Komposter addiert und mit der doppelten Ereigniszahl von Mikrofon 8 (Mikrofon über reinem Substrat ohne Wurm) verglichen.

Man erkennt, dass sich für den Grenzwert 100 Ereignisse je Sekunde die Komposter I und II deutlich voneinander unterscheiden. Allerdings verläuft die Kurve des Vergleichsmikrophons (ohne Würmer) zwischen Messzyklen 1000 und 7000 oberhalb der Kurve für Komposter II (mit Würmern).

Mit einem Grenzwert von 30 Ereignissen je Sekunde veränderte sich die Situation (s. Abbildung 48). Wie bereits bei den kumulierten Ereignissen der Einzelmikrophone verringerten sich die steilen Stufen bei 1000 Messzyklen. Ebenso wurden die Störgeräusche von Mikrofon 8 soweit reduziert, dass die Kurve unterhalb der von Komposter II verlief.

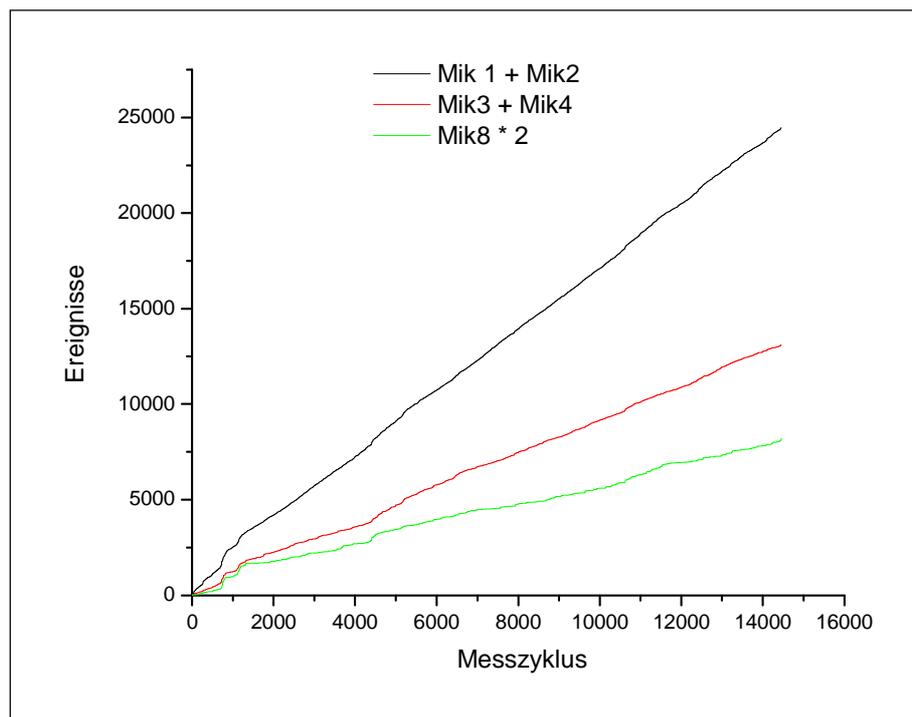


Abbildung 48: Summierte Ereignisse für Komposter I (87 % Wassergehalt, Mik1 + Mik2) und Komposter II (80 % Wassergehalt, Mik3 + Mik4) und Mikrophon 8 über Substrat ohne Würmer (Grenzwert 30 Ereignisse je Sekunde)

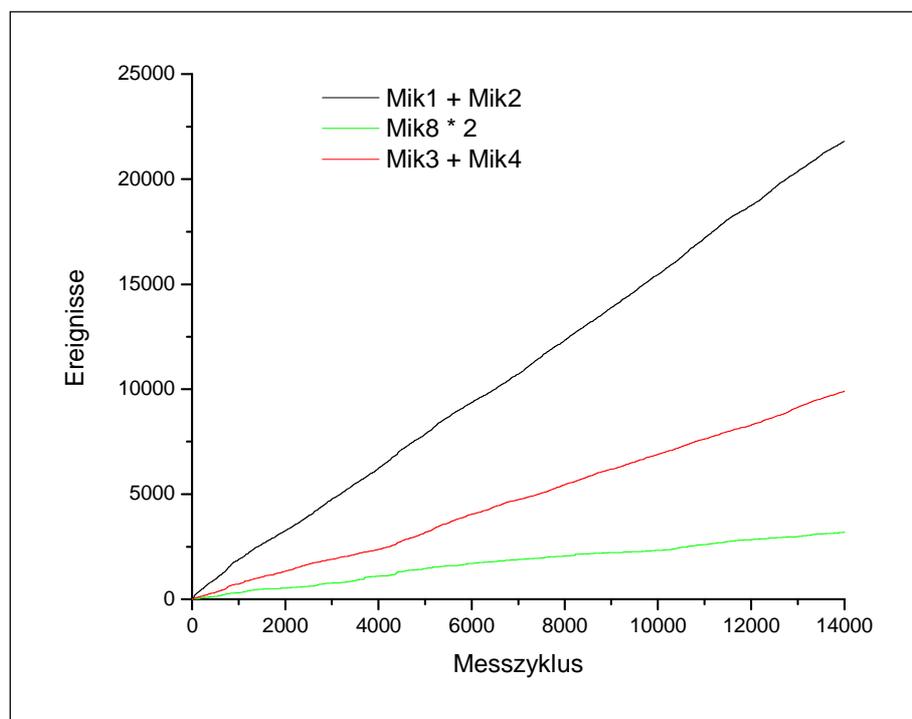


Abbildung 49: Summierte Ereignisse für Komposter I (87 % Wassergehalt, Mik1 + Mik2) und Komposter II (80 % Wassergehalt, Mik3 + Mik4) und Mikrophon 8 über Substrat ohne Würmer (Grenzwert 10 Ereignisse je Sekunde)

Im Vergleich zu den Grenzwerten 100 Ereignisse je Sekunde und 30 Ereignisse je Sekunde werden die kumulierten Kurven bei einem Grenzwert von 10 noch flacher (Abbildung 49). Allerdings ist wie oben bereits erwähnt bei diesem niedrigen Grenzwert nicht mehr auszuschließen, dass unter den gewählten Bedingungen biologische Signale abgeschnitten wurden.

In den folgenden Darstellungen wurden die Ereignisse des Mikrophons über dem Substrat ohne Würmer subtrahiert.

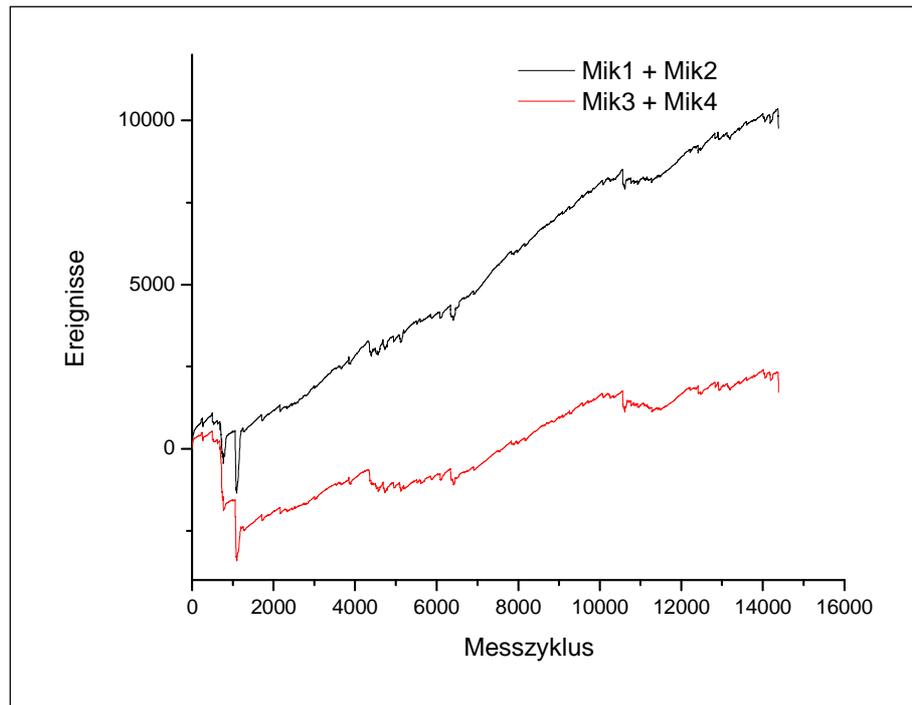


Abbildung 50: Summierte Ereignisse um die Zählungen über dem Substrat ohne Würmer bereinigt (Grenzwert 100 Ereignisse je Sekunde) (Mik1 + Mik2 Komposter I, 87 % Wassergehalt; Mik3 + Mik4 Komposter II, 80 % Wassergehalt)

Qualitativ erhält man dadurch für die Aufnahme mit einem Grenzwert von 100 (Abbildung 50) das gleiche Ergebnis wie in Abbildung 47 (= summierte Ereignisse ohne Abzug der Umgebungsgläusche). Die um die Störgeräusche bereinigten Zählraten von Komposter II werden negativ und sind daher biologisch nicht sinnvoll.

Für die engeren Grenzwerte von 30 Ereignissen je Sekunde und 10 Ereignissen je Sekunde besteht dieses Problem nicht mehr und die Zählraten sind im gesamten Bereich positiv.

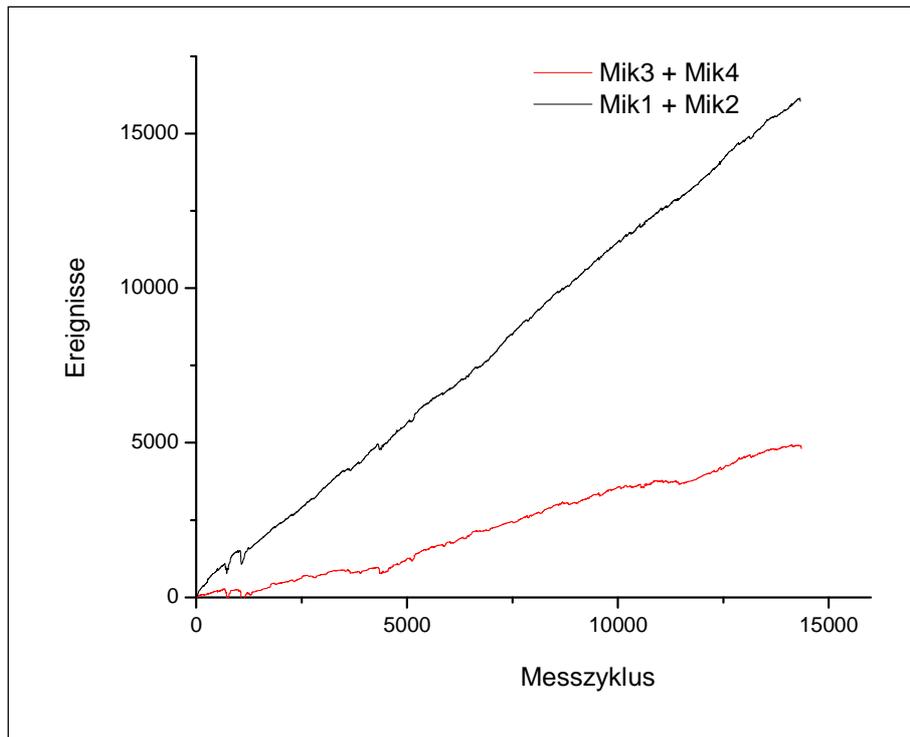


Abbildung 51: Summierte Ereignisse um die Zählungen über dem Substrat ohne Würmer bereinigt (Grenzwert 30 Ereignisse je Sekunde) (Mik1 + Mik2 Komposter I, 87 % Wassergehalt; Mik3 + Mik4 Komposter II, 80 % Wassergehalt)

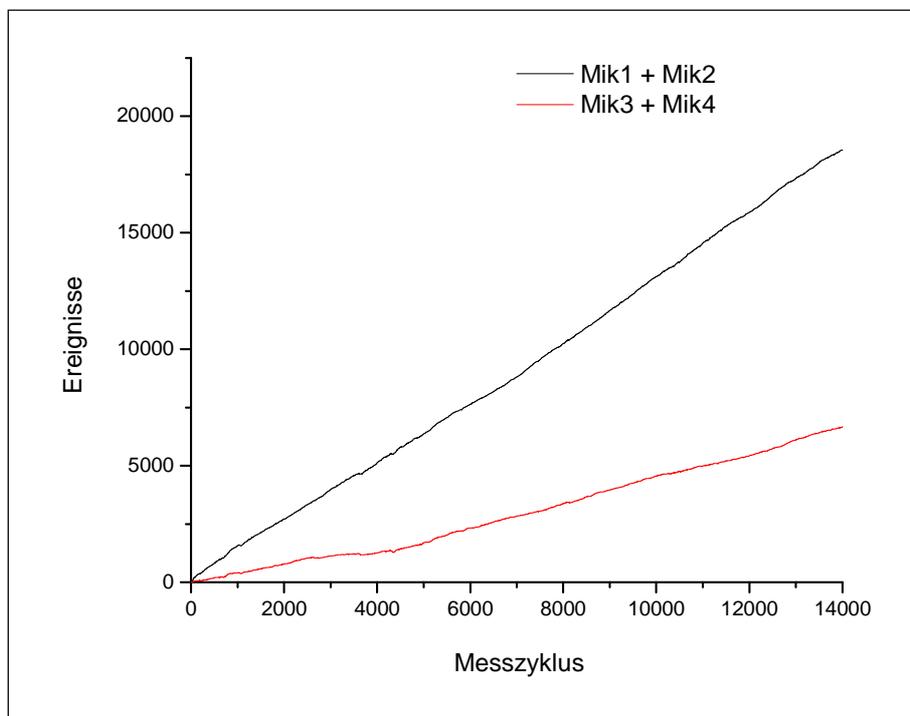


Abbildung 52: Summierte Ereignisse um die Zählungen über dem Substrat ohne Würmer bereinigt (Grenzwert 10 Ereignisse je Sekunde) (Mik1 + Mik2 Komposter I, 87 % Wassergehalt; Mik3 + Mik4 Komposter II, 80 % Wassergehalt)

Man erkennt, dass die bereinigten Zählraten für kleinere Grenzwerte (30 Ereignisse je Sekunde: Abbildung 51, 10 Ereignisse je Sekunde: Abbildung 52) deutlich größer sind als für z.B. den Grenzwert 100 Ereignisse je Sekunde. Dies kann darin begründet sein, dass der Behälter mit dem Substrat ohne Würmer andere Ausmaße (deutlich kleiner) besaß als die beiden Komposter. Dadurch ergeben sich andere akustische Eigenschaften in Bezug auf Schallabsorption und Schallreflexion von Störgeräuschen.

Anhand des vorliegenden biologischen Experimentes konnte gezeigt werden, dass die akustische Wurmüberwachung deutlich unterschiedliche Zählraten für die beiden Komposter mit unterschiedlichen Feuchtigkeitsgehalten ermittelte.

#### **4.2.3 Anwendung**

Für die alternativen Substrate (polymereingedickter Überschussschlamm und Bioabfall aus der kommunalen Sammlung) wurde aufgrund der zu Fäkalien abweichenden Materialstruktur und –zusammensetzung und damit verbundener unterschiedlicher Schallabsorption und-reflexion ein anderes Klangbild erwartet. Die Messungen in den alternativen Substraten wurden mit dem Aufbau der akustischen Kontrolle durchgeführt, der aus den Ergebnissen der Testphase entwickelt wurde. Die Messungen wurden jedoch mit anders positionierten und dimensionierten „Fenstern“ durchgeführt (siehe Abbildung 53). Für die Messungen wurden mögliche Störgeräuschquellen wie Ventilation und sonstige Motoren abgeschaltet. Die so erzielten Ergebnisse sind in Abbildung 53 dargestellt.

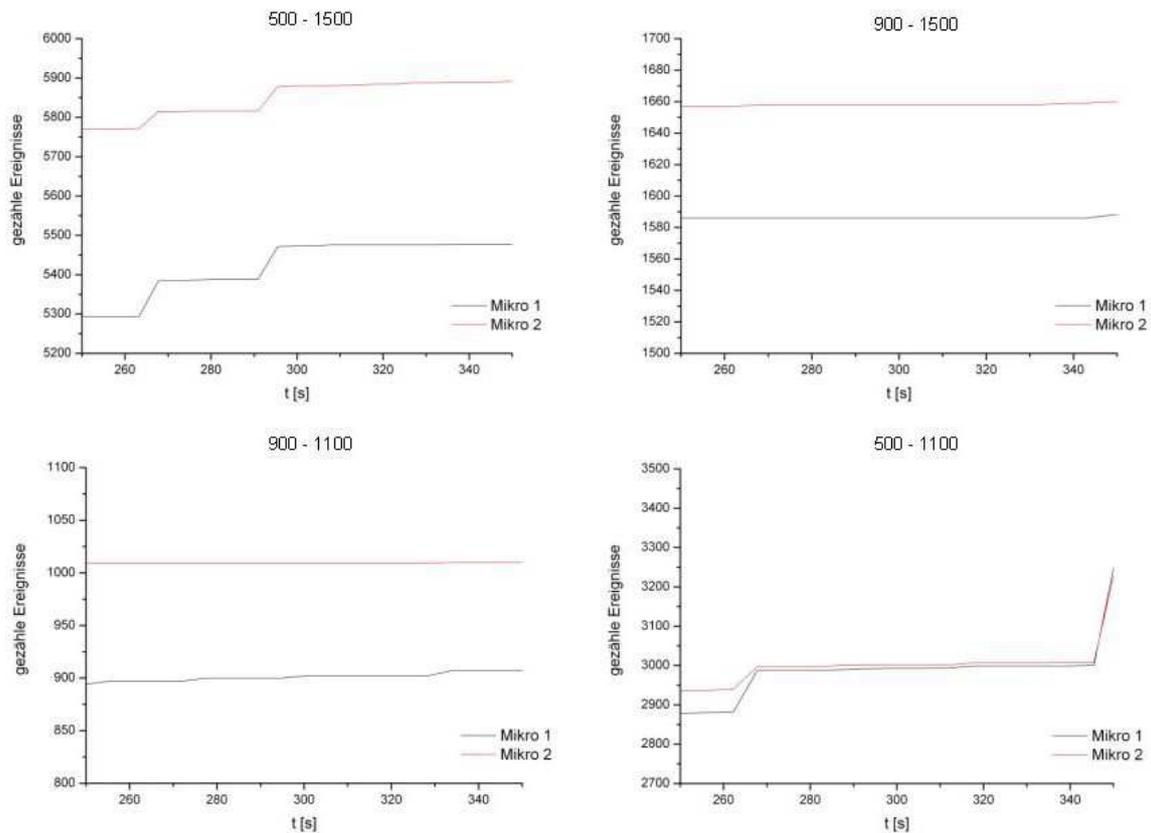


Abbildung 53: Kumulierte Zählungen bei unterschiedlichen Grenzwerten (angegeben über den Graphen) mit dem Überwachungsaufbau aus der Testphase über der Vermikompostierung mit „Überschussschlamm + Bioabfall“ in der Anwendungsphase. Mikro 1 und Mikro 2 sind an unterschiedlichen Stellen auf dieselbe Vermikompostierung gerichtet.

Die Zählungen lagen unabhängig von den Grenzwerten auf einem recht hohen Niveau. Die erreichten Ereigniszahlen waren zu hoch, als dass die entsprechenden Zählraten die biologische Aktivität widerspiegeln konnten. Das spricht dafür, dass im Rahmen der Anwendung weitere Störgeräusche auftraten (z.B. von der benachbarten Abwasserreinigung), die mit der bisherigen Einstellung nicht eliminiert werden konnten. Der steilste Anstieg der Zählungen erfolgte in den ersten Minuten (Daten nicht dargestellt), so dass diese Häufung eventuell auf die beim Verlassen des Containers produzierten Geräusche zurückzuführen ist. Der Verlauf der Graphen in den flacheren Abschnitten ist wegen der Gesamtzahl der gezählten Ereignisse (Auflösung y-Achse) nicht zu erkennen. Die Zählungen hier sind bei allen Einstellungen sehr niedrig und stimmen nicht mit den real wahrnehmbaren Ereignissen überein. Die steileren Kurvenabschnitte in „500 – 1500“ ( $t = 265$  und  $290$ ) und „500 – 1100“ ( $t = 265$  und  $345$ ) sind ebenfalls nicht mit der Wurmaktivität zu erklären und werden auf externe Störgeräusche zurückgeführt.

## 5 Diskussion

Die Zielstellungen dieser Arbeit waren die Behandlung organischer Abfallstoffe mittels Vermikompostierung, die Automatisierung der Vermikompostierung und das Finden einer Möglichkeit zur Kontrolle des Prozesses.

Die Untersuchungen wurden mit organischen Abfallstoffen durchgeführt, so wie sie im Rahmen einer Anwendung des Komplett-Projektes (z.B. Hotel oder dezentrale Siedlung) erwartet wurden.

### 5.1 Vermikompostierung von organischen Abfallstoffen

#### 5.1.1 Eignung der eingesetzten Materialien

Die Versuche im Rahmen der vorgestellten Arbeit wurden mit den verschiedenen beschriebenen Materialien und Mischungen durchgeführt. Der Fokus lag auf den Feststoffen aus der Abwasserreinigung, darüber hinaus wurden unbehandelte Bioabfälle und Essensreste untersucht. Da die Abwasserreinigung des Projektes nicht durchgehend ausreichend Feststoffe produzierte, wurden als alternative Substrate kommunale Bioabfälle und Überschussschlamm herangezogen.

Zusätzlich zu den vorgestellten Untersuchungen wurde in Zusammenarbeit mit Nguyen ein multifaktorieller Stresstest durchgeführt, um die Lebensbedingungen der Würmer genauer zu untersuchen und die optimalen Betriebsbedingungen näher eingrenzen zu können. Die Ergebnisse wurden von Nguyen veröffentlicht (Nguyen et al. 2008; Nguyen 2012) und werden hier in Auszügen kurz wiedergegeben.

Inhalt der Untersuchungen war der Einfluss verschiedener Parameter auf den Kompostwurm *Eisenia fetida*. Da die üblichen (europäischen) Arten von Kompostwürmern hinsichtlich ihrer Lebensbedingungen ähnliche Ansprüche haben (Loehr et al. 1985), wurde die Möglichkeit der Übertragung der Ergebnisse auf die Art *Dendrobaena veneta* mit gewissen Abstrichen angenommen.

Untersucht wurde der Einfluss von pH-Wert, Leitfähigkeit, Ammonium und Ammoniak auf die Überlebensdauer von *Eisenia fetida*. Die Untersuchungen wurden sowohl für die benannten Einzelparameter als auch für alle Parameter in Kombination als multifaktorieller Stresstest durchgeführt.

Zentrale Aussage dieser Versuche ist, dass selbst mit einem Verringern der Aussagekraft der Ergebnisse bei der Übertragung von der Art *Eisenia fetida* auf *Dendrobaena veneta* die Konzentrationen der benannten Parameter in den bisherigen Untersuchungen verwendeten Futtersubstraten keine direkt toxische Wirkung auf die Würmer haben sollten.

Die Feststoffe aus der (Komplett-) Abwasserreinigung wiesen bezüglich der nach den Literaturangaben bestimmten Leitparameter zur Eignung des Materials für eine Vermikompostierung mit Wassergehalten von rund 80 %, pH-Werten von 5,8 bis 7,2, Salzgehalten von 0,9 bis 1,7 mS/cm und C/N-Verhältnissen von 20 bis 31 Werte auf, die eine hohe Eignung beschreiben (Edwards und Bohlen 1996). Die Feststoffe bestehen zu größten Teilen aus Fäkalien, die durch die Verdauung aufgeschlossen sind. Das ermöglicht eine direkte Aufnahme durch die Würmer, da die Kompostwürmer größere Zellverbände nicht verwerten können und einen mikrobiellen Voraufschluss benötigen (Ziegenlasch 1984). Die Ergebnisse der Untersuchungen der Feststoffe bestätigen die Arbeiten von Simons (2008) und Shalabi (2006), die die Vermikompostierung ähnlicher Materialien untersucht hatten. Die Untersuchungen haben auch gezeigt, dass bei der gewählten Betriebsform eine Beimischung von strukturgebenden Co-Substraten zu den Feststoffen aus der Abwasserreinigung des Komplett-Projektes nicht notwendig war. Die Würmer hatten das Material unabhängig der Beimischungen von Sägespänen oder Papierresten umfassend durchgezogen.

Die Bioabfälle wiesen mit Wassergehalten von 70 – 80 % zwar eine gute Eignung auf, pH-Werte von unter 4,5 sind hingegen nicht geeignet für eine Vermikompostierung (Edwards und Bohlen 1996).

Leitfähigkeiten von bis zu über 2 mS/cm stammen zu größten Teilen aus den Essensresten (NaCl, „Kochsalz“) und sind zwar relativ hoch, beeinflussen die Würmer aber nicht nachteilig. Für die beschriebene Anwendung ist nicht mit einer negativen Beeinflussung durch Salze zu rechnen (Kaplan et al. 1980).

Nach Nguyen (2012) ist die Messung der Leitfähigkeit als Summenparameter nicht zwingend geeignet, da auch pflanzenverfügbare Nährstoffe (Ionen wie z.B.  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{K}^+$ ), die ein angestrebtes Ergebnis der Vermikompostierung sind, den Messwert erhöhen.

Das konnte in diesen Untersuchungen bekräftigt werden. In Einzelfällen betrug die Leitfähigkeit bis zu 4,7 mS/cm, wodurch der Prozess aber nicht beeinflusst wurde.

Der Überschussschlamm wies mit einem pH-Wert von rund 7, einer Leitfähigkeit von 0,6 mS/cm und einem Wassergehalt von 85 - 90 % für eine Vermikompostierung geeignete Werte auf (Edwards und Bohlen 1996). Das C/N-Verhältnis von etwa 6 lag zwar sehr niedrig, in der Mischung mit einem Material mit weiterem C/N-Verhältnis (Kompost, C/N rund 25) war die Verwendung jedoch möglich, das gefütterte Substrat wurde von den Würmern gut angenommen und umgesetzt. Das stützt die Aussagen anderer Autoren, die Überschussschlamm in verschiedenen Zuständen und Mischungen eingesetzt haben.

Khwairakpam und Bhargava (2009) haben Überschussschlamm ebenfalls ohne weitere Behandlung, wohl aber mit zusätzlichem Strukturmaterial wie Sägemehl verwendet, bei Clarke et al. (2007) wurde teilstabilisiertem Überschussschlamm Bioabfall und Zeolith beigemischt. Gupta und Garg (2008) haben Überschussschlamm nach einer umfassenden Trocknung vermahlen und in Mischung mit Kuhmist verwendet.

Die Bioabfälle wurden orientiert am möglichen Anfall während eines realen Einsatzes des Systems ohne gesteuerte Vorrotte eingesetzt.

Die Essensreste waren durch den Kochvorgang zwar zum Teil aufgeschlossen, durch die mit den beim Kochen einhergehenden Temperaturen waren sie aber zudem hygienisiert, so dass sich aufgrund des Fehlens von Konkurrenzorganismen sehr schnell eine Neubesiedlung einstellen konnte.

Bei den Voruntersuchungen, in denen als Mischungspartner Bioabfälle, v.a. Essensreste, eingesetzt wurden, zeigten sich deutliche Beeinträchtigungen wie Schimmelbildung und Flucht der Würmer bis hin zum Absterben aller Würmer. Die rasche Entwicklung der Schimmelpilze ist die Folge der für die saprophytischen Pilze besonders günstigen Lebensbedingungen (hohe Feuchtigkeit, voraufgeschlossene Nährstoffe, passende Temperatur etc.).

Frische Bioabfälle bieten keine geeigneten Umweltbedingungen für Schimmelpilze (Zellen noch intakt), womit diese sich (zunächst) nicht ausbreiten können. Es ist davon auszugehen, dass die frischen Bioabfälle in den 60 L-Boxen einem Rotteprozess unterliegen. Dieser wird von mesophilen Mikroorganismen getragen und stellt die erste Stufe der Kompostierung dar („Abbauphase“).

Durch den Abbau der organischen Substanz werden organische Säuren frei, was den pH-Wert zunächst deutlich senkt. Der Abbau dieser Säuren wiederum lässt den pH-Wert ansteigen. Wenn bei diesen Prozessen unter aeroben Bedingungen pH-Werte von  $\geq 8,5$  entstehen, wird das Gleichgewicht zwischen Ammonium und Ammoniak in Richtung des Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) verschoben und die Nitrifikation gehemmt. Ammoniak ist ein starkes Zellgift.

Sollten sich anaerobe Bedingungen einstellen, so kann bei Nitrifikation wie bei der Nitratreduktion Nitrit ( $\text{NO}_2^-$ ) gebildet werden, welches ebenfalls giftig für viele Organismen ist und zusätzlich zum Sauerstoffmangel die Lebensbedingungen für die Würmer verschlechtert.

Dies dürfte erklären, weshalb in verschiedenen Versuchen ab einem bestimmten Punkt die Würmer größtenteils oder sogar komplett abgestorben waren. Das Vorhandensein juveniler Tiere und Kokons in einigen Ansätzen lässt sich dadurch erklären, dass die Kokons während geeigneter Umweltbedingungen abgelegt wurden, die Eier toxische (z.B. anaerobe)

Bedingungen überstanden hatten und die Jungtiere nach Abklingen der toxischen Bedingungen (z.B. Verbesserung der O<sub>2</sub>-Konzentration) geschlüpft waren. Dies dürfte besonders in den 60-L-Boxen durch fehlende oder unzureichende Drainage der Fall gewesen sein.

Verschärfend kommt hinzu, dass die 60-L-Rotteboxen relativ klein waren und für die Würmer – besonders beim Entstehen eines toxischen Gases – keine Ausweichmöglichkeit bestand. Diese Effekte wurden umso intensiver, je größer die Portion der Substratvorgabe je Fläche war – sie kamen also bei der Vorratsfütterung für 20 Tage deutlicher zum Tragen als bei der Futtervorgabe für 2-4 Tage. Daher war die Vorgabe geringerer Mengen besser geeignet.

Hohe Temperaturen waren während der Versuche ausgeschlossen, da das Verhältnis von Volumen zu Oberfläche des Substrates (Wärmeabgabe) keine Selbsterhitzung ermöglichte. Mit den vorliegenden Bedingungen (voraufgeschlossen, feucht, keine thermophilen Mikroorganismen) wäre auch hier das Pilzwachstum in einigen Versuchen zu erklären, da Pilzsporen unter den gegebenen Bedingungen immer vorhanden sein können und diese schneller die nun geeigneten Bedingungen nutzen als die Mikroorganismen und Würmer.

Um diese Vorgänge zu vermeiden, ist ein gesteuerter Voraufschluss zum Beispiel in Form einer Kompostierung nötig. Die Vorgabe von angerottetem Bioabfall („Frischkompost“) hatte keinerlei Beeinträchtigung zur Folge, was die Untersuchungen von (Yadav et al. 2012) und (Frederickson et al. 1997) stützt, die einen Voraufschluss als entscheidend für den ungestörten Verlauf der Vermikompostierung beschreiben.

Einzelne Bestandteile des Substrates wie besonders fleisch- und fetthaltige Essenreste oder Zitrusfrüchte wurden zeitweise zur Unterbindung der Schimmelbildung aussortiert. Diese Beimischungen im Substrat scheinen nach den vorliegenden Ergebnissen (siehe 4.1.2.1) weniger bedeutsam zu sein als ein fehlender gesteuerter Voraufschluss der Bioabfälle durch eine Kompostierung (Frederickson et al. 1997; Yadav et al. 2012).

Das Vergrößern der Ansätze von 60 L auf 500 L führte zur Stabilisierung des Prozesses. Der Anstieg des Wassergehaltes auf 95 % lässt ähnliche Bedingungen wie in den Durchführungen in den 60L-Boxen („Voruntersuchungen“) vermuten, hatte hier jedoch kein stärkeres Absterben der Würmer zur Folge. Es waren Rückzugsregionen vorhanden, wodurch die Würmer toxischen Bereichen ausweichen konnten.

Die in diesen Untersuchungen verwendete Wurmart *Dendrobaena veneta* wurde aufgrund der in der Literatur beschriebenen höheren Toleranz gegenüber erhöhten Wassergehalten gewählt (siehe Seite 10 „Wassergehalt“). Diese Eigenschaft gewährt einen gewissen Puffer im Falle von Fehlfunktionen der Technik, die aber bei dem verwendeten Design des

Rottereaktors nicht besonders ins Gewicht fallen sollten, da eine Drainage und ein räumliches Ausweichen der Würmer im Reaktor möglich ist. Untersuchungen von Nguyen (2012) hatten ergeben, dass auch ein Betrieb mit einer Mischpopulation aus *Dendrobaena veneta* und dem in unseren Breiten bekanntesten Kompostwurm *Eisenia fetida* in einem ähnlichen System keine Umsetzungsvorteile ergeben. Diese Aussage bestätigte verschiedene andere Untersuchungen mit weiteren Substraten und Wurmarten (Loehr et al. 1985). Die Wahl der Wurmart scheint demnach auch für die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Versuche eine untergeordnete Rolle zu spielen.

Die Besatzdichte (Verhältnis Wurmmasse zu Frischfutter) ist ein wichtiger Parameter. Wie unter 2.2.1 beschrieben, werden in der Literatur unterschiedliche Verhältnisse von Wurmmasse zu Futtermenge für unterschiedliche Ziele gegeben (Ndegwa und Thompson (2000): für die Erhöhung des Zuwachses von Wurmmasse: 1,6 kg Frischmasse je kg Wurmmasse; für optimale Umsetzung organischer Abfallstoffe: 0,75 kg Futter je kg Wurmmasse). Eine zu hohe Besatzdichte führt zu Stress und damit zu Veränderungen in der Population (Flucht und/oder Verenden von Würmern). Der Einfluss von weiteren Stressfaktoren, zum Beispiel schwankende Umweltbedingungen, das Fehlen einer Rückzugsmöglichkeit oder ein täglich variierender Anfall von Futter haben zusätzliche Auswirkungen. Unter den Bedingungen, wie sie in den unterschiedlichen Untersuchungsphasen vorlagen, konnte die Angabe von Edwards und Bohlen (1996) bestätigt werden, wonach eine Zugabe von 0,5 kg Frischmasse je kg Wurmmasse und Tag für einen stabilen Betrieb geeignet sind. Das bemisst sich darin, dass es bei einem stabilen Betrieb zu keiner Anhäufung oder deutlichen Substratdickenerhöhung in den Rottereaktoren kommt. Eine exakte Bestimmung der Umsatzleistung mit einer höheren Genauigkeit war für diese Arbeit nicht angestrebt, da nach den bisherigen Erfahrungen ein hochintensiver Betrieb der Vermikompostierung mit den zur Verfügung stehenden Materialien nicht sinnvoll erscheint. Der Betrieb sollte eher gewisse Puffer bereithalten, da der Prozess dann deutlich stabiler läuft. Das bezieht sich nicht nur auf die Größe des Systems, sondern auch auf den kalkulierten Umsatz und die Besatzdichte.

### **5.1.2 Eignung des produzierten Vermikompostes für den Einsatz in Landwirtschaft und Gartenbau**

Die Nährstoffkonzentrationen des Vermikompostes aus den Feststoffen der Abwasserreinigung erlauben eine Einstufung als „Düngemittel“ (nach Düngemittelverordnung für Mehrnährstoffdünger mindestens 1 % N, 0,3 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> oder 0,5 % K<sub>2</sub>O). Der Status „Düngemittel“ ist umso sicherer einzuhalten, je kürzer die Nachrotte dauerte. Die Zusammensetzung erlaubt einen Einsatz für viele Zwecke in Landwirtschaft und Gartenbau.

Selbst wenn die anfangs genannten Nährstoffkonzentrationen nicht erreicht werden, ist der Einsatz aufgrund des hohen Anteils an organischer Substanz (etwa 70 %) und den immer noch vorhandenen Nährstoffen als „Bodenhilfsstoff“ sinnvoll möglich.

Das C/N-Verhältnis von rund 15 für die als behandelt deklarierte Fraktion <4 mm liegt in einem Bereich, der die Verwendung auf landwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden erlaubt (Morais und Queda 2003).

Die Untersuchungen auf Schwermetalle hatten ergeben, dass in den Vermikomposten aus „Überschussschlamm + Bioabfall“ und „Fäkalien“ für Kupfer und Zink Konzentrationen erreicht wurden, die an die Grenzwerte der BioAbfV (für eine Aufwandmenge von 20 t/(ha \* 3a)) heranreichen oder diese sogar überschreiten (siehe Tabelle 15). Die Konzentrationen an Blei, Cadmium, Chrom, Nickel und Quecksilber liegen deutlich unter den angeführten Grenzwerten. Die Konzentrationen von Cu und Zn können auf die Ausgangsmaterialien zurückgeführt werden. Erhöhte Kupfer-Konzentrationen im Abwassersektor stammen üblicherweise aus Abtragungen aus (Trink-) Wasserleitungen, die in vielen Fällen aus Kupfer bestehen. Erhöhte Konzentrationen an Zink sind ebenfalls üblich, was z.B. auf Abtragungen von verzinkten Regenrinnen zurückzuführen ist.

Nicht eindeutig zu entscheiden ist, ob die Grenzwerte nach BioAbfV oder der AbfKlärV heranzuziehen sind. Prinzipiell müssten die Vermikomposte eher nach AbfKlärV beurteilt werden. Überschussschlämme (Klärschlämme) unterliegen eindeutig der AbfKlärV, für Fäkalien aus einer Sammlung vor dem Kanalnetz ist das nicht eindeutig zu beantworten. Nach der AbfKlärV halten die Schwermetall-Konzentrationen beider Materialien die Grenzwerte sicher ein.

Die Reife des Materials wird anhand der Parameter „Atmungsaktivität“ und „Aschegehalt“ beschrieben. Die Sauerstoffzehrung sinkt mit der Dauer der Nachrotte und zunehmender Reife des Materials. Dies korreliert mit dem steigenden Aschegehalt. Gemessen am  $AT_4$ -Wert und dem daraus abgeleiteten Rottegrad ist der Vermikompost nach 6-9 Monaten Nachrotte stabil genug, um auf allen Böden eingesetzt zu werden (Rottegrad III bis V). Dem  $AT_4$ -Wert wird jedoch eine verminderte Aussagekraft beigemessen. Grundsätzlich ist die Atmungsaktivität ein etablierter Parameter zur Beurteilung der Reife von Kompost. Bei manchen der Versuche schienen die  $AT_4$ -Ergebnisse den Reifegrad nicht korrekt zu beschreiben. So kann z.B. eine hohe Atmungsaktivität bei einem Material mit einem verhältnismäßig hohen Aschegehalt ausgewiesen werden, was sich im Prinzip widerspricht. In diesem Falle wäre die Aussage des Aschegehaltes höher zu bewerten, denn die Messung ist weitaus zuverlässiger als die der Atmungsaktivität (es muss dann aber auch der

Ausgangswert der unbehandelten Materialien bekannt sein). Bei der komplexeren AT<sub>4</sub>-Messung sind eher Bedienungsfehler möglich oder es können Fehlbestimmungen durch ungewollte Prozesse wie der sauerstoffzehrenden Zersetzung von Mikroorganismen untereinander auftreten als bei der recht einfachen Bestimmung des Aschegehaltes. Möglicherweise hat die AT<sub>4</sub>-Messung in Feststoffen hier auch ihre Grenzen.

Der Kresstest hat nicht nur die Einstufung der Fraktion <4 mm als „behandelt“ bestätigt, sondern darüber hinaus die Eignung des Vermikompostes für den Einsatz in Landwirtschaft und Gartenbau gezeigt. Die leicht verzögerte Keimung lässt sich mit der stabilen krümeligen Struktur des Vermikompostes erklären, wo im schlechter benetzbaren Material zunächst freies Wasser vorlag und es erst später zu einem Aufquellen des Substrates kam. Kressesamen keimen bei geeigneter Feuchte und Temperatur recht leicht. Möglicherweise ist in den Bereichen, in denen vor dem Aufquellen freies Wasser vorlag, das Wasser verdunstet und hat so keine ausreichende Befeuchtung bewirkt. Darüber hinaus ist es kein sicheres Zeichen für das Vorhandensein von Hemmstoffen, wenn die Samen nicht alle gleichzeitig keimen. Die Wirkung von Vermikompost im Boden ist mit diesem Aufbau nicht direkt zu vergleichen. Die Ergebnisse nach 6 Tagen werden so interpretiert, dass keine keimhemmenden Stoffe vorliegen.

Um das Substrat sicher zu hygienisieren, ist eine gesteuerte aerobe Nachrotte über eine Dauer von mindestens 6 Monaten erforderlich. Damit lässt sich gegenüber einer konventionellen Kompostierung keine Zeitersparnis erreichen. Nach dieser Nachrotte liegen die Konzentrationen der Parameter *E.coli*, Enterokokken, Salmonellen und Coliphagen in Bereichen, die eine Anwendung als Düngemittel oder Bodenhilfsstoff erlauben (Komplett 2009).

## **5.2 Nutzen der akustischen Signale der Vermikompostierung zur Prozesssteuerung und Beschleunigung des Umsatzes**

Die Untersuchungen hatten ergeben, dass die Prozesserfassung der Vermikompostierung durch Aufnahme und Auswertung der durch die Wurmaktivität entstehenden Geräusche möglich ist.

Die Ableitung der Wurmgeräusche und das Einrichten von Minimal- und Maximalgrenzen für ein Frequenz-Fenster haben biologisch sinnvolle Ergebnisse erbracht. Als zentraler Prozessparameter hat sich der Wassergehalt herausgestellt, andere „Leitparameter“ wie

Salzgehalt oder pH-Wert müssen nach den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchungen nicht überwacht werden.

Die Möglichkeit zur Unterscheidung zwischen einer optimalen Feuchte und trockeneren Bedingungen im Vergleich mit einem Ansatz ohne Würmer unter Ausschluss von Störgeräuschen zeigt die prinzipielle Eignung der akustischen Überwachung für die Vermikompostierung. Die Untersuchungen zur Durchführung ohne Unterdrückung der Störgeräusche zeigen, dass der Anteil der Störgeräusche mit den verwendeten Methoden und Techniken nicht klar von den durch Würmer erzeugten Signalen zu unterscheiden ist.

Die in der Testphase mit den für die Anwendung erwarteten Feststoffen aus der Abwasserreinigung entwickelten Einstellungen der akustischen Überwachung ergeben für die Durchführung mit Bioabfall und Überschussschlamm keine biologisch sinnvollen Ergebnisse. Aufgrund der unterschiedlichen Materialeigenschaften muss für jede neue Mischung eine umfangreiche Neukalibrierung vorgenommen werden. Wenn die passenden Einstellungen gefunden sind, erscheint eine Aktivitätsüberwachung jedoch möglich.

### **5.3 Automatisierung der Vermikompostierung**

Der Aufbau des Rottereaktors, wie er in der Anwendung benutzt wurde, erscheint sinnvoll und für die Einbindung einer Vermikompostierung in ein System, wie es im Komplett-Projekt erstellt wurde, geeignet.

Ein wichtiger Bestandteil ist die Bodenkonstruktion. Zum einen kann eventuell auftretendes freies Wasser drainieren, zum anderen kann mit Hilfe des Kratzbodens umgesetztes Material entfernt werden, ohne die Vermikompostierung entscheidend zu stören. Die Dimensionierung erlaubt einen Betrieb mit einem Überschuss an Überdauerungssubstrat, so dass ein extensiver Betrieb möglich ist. Damit können Bereiche mit ungünstigen Lebensbedingungen gemieden werden. Die Konstruktion als freies Bett fördert zwar das Abtrocknen der Randbereiche, erlaubt aber einen intensiveren Gasaustausch, so dass potentiell entstehende toxische Gase eher aus dem System entweichen können.

Das Abtrocknen der Randbereiche ist von geringer Bedeutung, wenn diese Randbereiche nur Überdauerungssubstrat mit einem niedrigen hygienischen Gefährdungspotential enthalten – also nicht zwingend einer Behandlung bedürfen. Je größer die Fläche der Anlage, desto geringer wird zudem der Randeffect relativ zum behandelten Volumen.

Eine weiterführende Lösung könnte zudem ein etwas abgeänderter Betrieb sein. Stellt man den Würmern ein geeignetes Überdauerungssubstrat im Überschuss zur Verfügung (z.B. Kompost), in das das Futter nur an wenigen Stellen eingebracht wird (nicht darauf abgelegt), kann auch das oberflächliche Abtrocknen der Futterportion und damit die Notwendigkeit zur Bewässerung reduziert werden. Dieses Vorgehen erfordert jedoch zusätzlichen Platz und

erschwert durch die Ablage im Substrat und die unterschiedlichen Konsistenzen die Automatisierung der Futtervorgabe.

Der Betrieb des Rottereaktors mit vorgerottetem strukturgebendem Bioabfall als Grundsubstrat und der automatisierten Vorgabe von polymereingedicktem Überschussschlamm hat gezeigt, dass die Behandlung dieser Materialien mittels einer Vermikompostierung möglich ist.

Der polymereingedickte und schwerkraftentwässerte Überschussschlamm weist eine ähnliche Konsistenz auf wie die Feststoffe aus der Abwasserreinigung, deren Verwertung im Verbundprojekt untersucht werden sollte. Somit konnte die Automatisierung der Applikation untersucht werden.

Die Applikationseinheit hat in Verbindung mit der Vorlage aus dem Modul „Abwasserreinigung“ ein biologisch verwertbares Ablagebild erzeugt.

Der gesamte Aufbau und die Art des Betriebes sind für die beschriebene Art der Anwendung geeignet.

## 6 Schlussfolgerungen

Bezüglich der Arbeitshypothesen können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- A Feststoffe aus der Abwasserreinigung des Komplett-Projektes lassen sich mittels einer Vermikompostierung mit anschließender rund 6-monatiger Nachrotte stabilisieren und hygienisieren. Das Produkt kann dann in Landwirtschaft und Gartenbau als Düngemittel oder Bodenhilfsstoff eingesetzt werden.  
Die Verwendung von Essensresten und frischem Bioabfall ist ohne Vorbehandlung (z.B. Heißrotte) nicht zu empfehlen.
- B Wurmaktivität und –Wohlbefinden können über akustische Signale erfasst werden. Die Erfassung über die Ableitung der Geräusche ist zwar in Realzeit möglich und es können unter idealisierten Bedingungen optimal feuchte von trockeneren Ansätzen und Ansätzen ohne Würmer unterschieden werden. Durch den nicht bewertbaren Anteil an Störgeräuschen unter realen Bedingungen und die sehr materialspezifische Kalibrierung können die akustischen Signale aber zum jetzigen Stand der Arbeiten noch nicht zur Prozesssteuerung eingesetzt werden.
- C Die Beschleunigung der Umsatzleistung ist mit den untersuchten Ansätzen über das Schaffen optimaler Bedingungen hinaus nicht möglich. Es wird sogar vielmehr ein extensiver Betrieb empfohlen, da so das System deutlich stabiler funktioniert.
- D Die Automatisierung der Vermikompostierung ist möglich, der entwickelte und konstruierte Rottereaktor funktioniert in allen Belangen des Aufbaus gut und ermöglicht einen dauerhaften Betrieb einer Vermikompostierung mit den Feststoffen aus der Abwasserreinigung, so wie sie im Rahmen des Projektes anfielen.  
Eine umfassende Automatisierung und ein vollständig wartungsfreier Betrieb sind unter empfohlenen Bedingungen (siehe C) nicht möglich, da mit der entwickelten Technik nur pastöse, und keine strukturreichen Materialien verteilt werden können.

## 7 Ausblick

Die Vermikompostierung ist eine sinnvolle Form der Behandlung von Feststoffen aus der Abwasserreinigung und wird an diversen Stellen in der Praxis eingesetzt. Somit ist ein Bedarf an Weiterentwicklungen zu erwarten.

Die Automatisierung ist in Anbetracht der hygienischen Eigenschaften der Ausgangsstoffe mit der einhergehenden Reduzierung der manuellen Arbeitsschritte eine zweckmäßige Entwicklung.

Eine Intensivierung der Vermikompostierung ist durch die Anforderungen der Würmer an optimale Lebensbedingungen begrenzt. In einem extensiven Betrieb ist die Stabilität des Prozesses höher.

Der Aufbau des Rottereaktors erscheint für einen Einsatz wie im Komplett-Projekt (Anfall pastöser Stoffe) sinnvoll und kann zum dauerhaften Betrieb eingesetzt werden, allerdings sollte die Automatisierung der Futtervorgabe an die Vorgabe von strukturreichem Futter angepasst oder um eine solche Möglichkeit erweitert werden.

Die Steuerung der Vermikompostierung basierend auf einer akustischen Kontrolle erscheint möglich, das Verfahren ist jedoch noch weiter zu optimieren.

In Anbetracht der aufwändigen Kalibrierung und des noch nicht abzuschätzenden Einflusses von Störgeräuschen ist zu überlegen, ob eine Kontrolle und Steuerung über andere Verfahren sinnvoller sein könnte. Eine vielversprechende Methode wäre zum Beispiel ein bildgebendes Verfahren wie die Nahinfrarotspektroskopie (NIRS). Die gewonnenen Informationen könnten die Aktivität der Würmer insgesamt sowie die Auflösung über die Fläche umfassen und könnten so mindestens die Aussagekraft der Idee der akustischen Kontrolle erfüllen (Aktivität der Würmer, Verteilung der Aktivität über die Fläche). Darüber hinaus könnte man mit dieser Technik auch die Materialfeuchte zumindest an der Oberfläche direkt erfassen. Eine vergleichbar aufwändige Kalibrierung würde nach aktuellem Wissenstand entfallen.

Die im Komplett-Projekt gegebene Kombination einer intensiven und hochtechnisierten Abwasserreinigung in Kombination mit einer Vermikompostierung, die besonders für die Situation eines möglichst intensiven Umsatzes deutlich weniger flexibel hinsichtlich Änderungen in Form und Menge des zu behandelnden Materials ist, ist grundsätzlich auf ihre Kompatibilität hin zu überdenken.

Der Einsatz einer Vermikompostierung ist dann sinnvoll, wenn dem Prozess die notwendige Zeit und der notwendige Platz eingeräumt werden kann, was je nach Material unterschiedlich sein kann. Es können verschiedene organische Materialien eingesetzt werden, die jedoch je nach Beschaffenheit einem Voraufschluss unterzogen werden sollten. Um den Ablauf der Vermikompostierung nicht zu stören, ist darauf zu achten, dass eine Besiedelung durch

ungewollte Organismen wie ungeeignete Pilze und Bakterien (z.B. die für eine Heißrotte verantwortlichen Bakterien) unterbunden wird. Das umfasst nicht nur die Materialeigenschaften, sondern auch die Betriebsführung, die den Erhalt geeigneter Umweltbedingungen beinhaltet. Wie weiter oben bereits angegeben, wird der Betrieb einer Vermikompostierung in extensiver Form mit einer vorgeschalteten Kompostierung der Bioabfälle empfohlen.

## 8 Anhang: zusätzliche Material-und Methodenzuordnung zu den einzelnen Versuchen

### 8.1.1 Voruntersuchungen

#### Wurmauswahl

Das Substrat wurde aus reifem Grüngutkompost aus der Kompostierung der Abfälle des universitätseigenen Gewächshauses und Fäkalien aus dem Lambertsühle-Projekt gemischt. Im Rahmen des Lambertsühle-Projektes wurden die Feststoffe mittels eines Filtersackes aus dem Braunwasserstrom (Trenntoiletten) abgeschieden. In diesen Filtersäcken wurde das Material gesammelt und unterlag für weitere 12 Monate einer Schwerkraftentwässerung. Da zu dem Material bereits Untersuchungen mit der Art *Eisenia fetida* vorlagen, wurden keine weiteren Leitparameter-Untersuchungen durchgeführt (Simons et al. 2005).

- Substrat: Kompost 1,5 kg FM  
Fäkalien 1,5 kg FM
- Würmer: *Dendrobaena veneta*: 200 g  
*Eisenia fetida*: 200 g
- 43-L-Kunststofftonnen

Die Durchführung fand in zweifacher Wiederholung statt.

#### Form der Substratvorgabe

##### **Vorratsfütterung I**

- Mischungen aus Essensresten (Mensa Uni Bonn) + Bioabfall (Biotonne) in drei verschiedenen Verhältnissen (siehe Tabelle 17)
- 60-L-Boxen mit Trennwand, Würmer haben Rückzugsmöglichkeit (Überdauerungssubstrat)
- Ort: Gewächshaus, 15 °C mit Tagesgang
- je Versuchsansatz drei Wiederholungen + eine Kontrolle ohne Würmer
- 500 g Würmer je Ansatz
- Fütterung: einmalig 5 kg
- Dauer des Versuches: 7 Tage
- Kontrolle der Hauptparameter pH, LF, Wassergehalt
- Bewässerung nach optischer/haptischer Kontrolle
- Bonitur der Würmer

Tabelle 17: Verhältnisse (a) und Zusammenstellungen (b) der Substrate bei der Vorratsfütterung I

a)			b)				
Ansatz Nr.	Fäkalien [g]	Bioabfall [g]	Ansatz Nr.	Fäkalien [g]	Bioabfall [g]	ges. Gew. [g]	entspricht Personen [n]
I	150	300	I	1050	2100	3150	7
II	150	600	II	600	2400	3000	4
III	150	900	III	450	2700	3150	3

### Vorratsfütterung II

- Substrat-Mischungen: „Bioabfall ohne Essensreste (Mensa Uni Bonn) mit Fäkalien“ nach Verhältnis I aus Tabelle 17 a); „Bioabfall ohne Essensreste“; „Fäkalien“
- 60L-Boxen mit Trennwand - Würmer haben Rückzugsmöglichkeit (Überdauerungssubstrat)
- Ort: Gewächshaus, 15 °C mit Tagesgang
- je Versuchsansatz drei Wiederholungen + eine Kontrolle ohne Würmer
- 500 g Würmer je Ansatz
- Fütterung: einmalig 5 kg
- Dauer des Versuches: 8 Wochen
- Kontrolle der Hauptparameter pH, LF, Wassergehalt
- Bewässerung nach optischer/haptischer Kontrolle
- Bonitur der Würmer

### Bedarfsfütterung A

Die Substratvorgabe erfolgte regelmäßig orientiert am kurzfristigen Umsatz der Würmer. Die Umsatzleistung wurde auf 4 Tage berechnet und optisch kontrolliert.

- Substrat: Bioabfall ohne Zitrusfrüchte, Fäkalien
- der eigentlichen Fütterung ging eine Umstellungsphase auf „Frischfutter“ voraus, in dieser Phase Fütterung von Bioabfall (ohne Zitrusfrüchte), Fäkalien, Einheitserde (einmalig 3 kg)
- 60-L-Boxen ohne Trennwand und ohne Rückzugsmöglichkeit, 3 mm Löcher zur Drainage freien Wassers in Boden
- Ort: Gewächshaus, 15°C mit Tagesgang; nach Eingewöhnungsphase: dunkel, 24°C konstant
- 4 Wiederholungen

- 1 kg Würmer je Ansatz
- Fütterung nach Bedarf: optische Umsatzkontrolle, dann jeweils 2 kg Futtevvorgabe
- Dauer des Versuches: 20 Tage
- Kontrolle der Hauptparameter pH, LF, WG
- Bonitur der Würmer

### **Bedarfsfütterung B**

- Substrat: Bioabfall, Grobrechengut und Essensreste (Krankenhaus)
- Eingewöhnungsphase für die Würmer an Frischfutter: Bioabfall (ohne Zitrusfrüchte), Fäkalien und Einheitserde, Dauer: 2 Wochen
- 60-L-Boxen ohne Rückzugsmöglichkeit, 3 mm-Löcher in Boden zur Wasserdrainage
- Ort: dunkel, 22°C konstant
- 4 Wiederholungen
- 2 kg Würmer je Ansatz
- Fütterung: 2 kg FM jeden 3. Tag
- Dauer des Versuches: 6 Wochen
- Kontrolle von WG, pH-Wert, LF
- Bewässerung nach optischer/haptischer Kontrolle
- Bonitur der Würmer

### **Salztoleranzversuch**

- Substrat: Einheitserde („Nullerde“, RWZ, Kerpen)
- 1-L-Blumentöpfe (Kunststoff)
- Ort: Gewächshaus, 15 °C mit Tagesgang
- je Ansatz drei Wiederholungen
- je Ansatz: 50 Würmer
- Substratmenge je Ansatz: 300 g
- Einstellen verschiedener Salzgehaltsstufen ([%] NaCl) im Substrat:  
0 – 0,25 – 0,50 – 0,75 – 1,00 – 1,25 – 1,5  
(0 – 0,4 – 0,9 – 1,3 – 1,7 – 2,1 – 2,5 [mS/cm])
- Dauer des Versuches: 10 Tage
- Auszählen und Wiegen der Würmer (siehe Abbildung 54)
- Bewässerung nach optischer/haptischer Kontrolle
- Bonitur der Würmer



Abbildung 54: Auszählen der Salztoleranzversuche

### **Akzeptanzuntersuchung Überschussschlamm**

- Substrate: Bioabfall (REMONDIS, Bonn)  
Überschussschlamm (Kläranlage Salierweg, Bonn)  
Einheitserde („Nullerde“, RWZ, Kerpen)
- 9-L-Komposter, Gitterboden mit Papiertuch abgedeckt
- Ort: dunkel, konstant 19 °C
- je Ansatz: 500 g Einheitserde, 500 g Überschussschlamm, 50 g Würmer
- insgesamt 3 Ansätze
- Kontrolle von TS, oTS, pH, LF,  $\text{NH}_4^+$  und C/N

Der Bioabfall stammte aus der städtischen Sammlung Bonn und wurde direkt vom Entsorger bezogen. Holzige Bestandteile und ganz frische Pflanzenteile wurden aussortiert, da diese nicht direkt von den Würmern aufgenommen werden können.

Dem Bioabfall der städtischen Sammlung wurde zerkleinerter Bioabfall eines Bioladens beigemischt, der ausschließlich aus Obst und Gemüse bestand.

Der Überschussschlamm stammte aus der Kläranlage Salierweg in Bonn. Dieser Überschussschlamm wurde durch Polymerzugabe voreingedickt und schwerkraftentwässert. Das Material wurde mittels eines Gewebesackes nachentwässert (12 h).

Die für die Vermikompostierung wichtigsten Parameter der eingesetzten Materialien sind in Tabelle 18 aufgeführt.

Tabelle 18: ausgesuchte Parameter in verwendetem Bioabfall und Überschussschlamm im Vergleich zu den bisher verwendeten Fäkalien

Substrat	TS [% FS]	oTS [% TS]	pH	LF [mS / cm]	C/N
Bioabfall	ca.25	25 – 75	4,0 – 5,9	0,8 – 1,7	9 – 25
Überschussschlamm	10 - 15	42	7,1	0,6	6

### Maßstabvergrößerung von 60 L auf 500 L

- Substrat: Futtergemisch aus Bioabfall und Grobrechengut
- Startphase: Futtergemisch aus Einheitserde und Papierschnipsel (Papier aus Aktenvernichter)
- 500L-Box
- Ort: dunkel, konstant 19 °C
- Besatzdichte: 240 g/0,1 m<sup>2</sup>
- Fütterung: 3 kg jeden 3.Tag
- Dauer des Versuches: 4 Wochen
- optische Prozessüberwachung
- Bonitur der Würmer

Nach einer Startphase, in der 2,5 kg Würmer in einem Futtergemisch aus Blumenerde und Papier etabliert wurden, wurde die Fütterung auf ein Gemisch aus Bioabfall und Grobrechengut umgestellt. Die Futtervorgabe erfolgte jeden dritten Tag, es wurden jeweils 3 kg Futter vorgegeben.

### 8.1.2 Testphase

#### Co-Substrate

- Substrate: Fäkalien, Fäkalien + Papierreste (aus Aktenvernichter; 4 Gew.-% Beimischung), Fäkalien + Sägespäne (aus Schreinerei, 4 Gew.-% Beimischung) – Wassergehalte siehe Abbildung 20
- 300-L-Komposter, Gitterboden mit Papiertüchern bedeckt
- Ort: Gewächshäuser, beschattet und ventiliert, 9 – 25 °C
- Besatzdichte: 205 g/0,1 m<sup>2</sup>
- Fütterung: 2 kg nach Bedarf (optische Umsatzkontrolle)
- Bestimmung WG der Futterportionen
- Bonitur der Würmer

Tabelle 19: Substratmischungen und deren Hauptparameter

Substrat	Wassergehalt [%]	pH	Salzgehalt [mS/cm]
Fäkalien	82	7,0	0,3
Fäkalien + Papierreste	79	7,1	0,5
Fäkalien + Sägespäne	79	7,0	0,3

Vor Versuchsbeginn wurden die Gitterböden der Reaktoren mit Papiertüchern bedeckt, so dass das Futter nicht durch die Gitter fallen konnte. Darauf wurde erst das Futter gegeben, dann die Würmer (5 kg Futter, 2,5 kg Wurm). Das Papier wurde erst entfernt, nachdem sich nach mehrmaligem Füttern eine gewisse Substratdicke über die gesamte Fläche des Reaktors eingestellt hatte. In dem Substrat sollte so eine Schichtung entstehen (siehe Abbildung 5), die verhindert, dass die Würmer mit dem fertig umgesetzten Material aus dem Reaktor fallen, da diese aus dem umgesetzten Material in die Fütterungs- und Durchmischungszone migrieren.

Das Futter wurde zu Beginn je nach Akzeptanz und Umsatz vorgegeben (zwischen 3 und 5 Tagen), danach jeden dritten Tag (jeweils 5 kg).

### **Charakterisierung Futtermaterialien und Vermikompost**

- Substrat: Fäkalien (Siebtrommel Kaiserslautern)
- Vermikompost nach aerober Nachrotte (offene Lagerung bei 19 °C in geschlossenem Raum, max. 9 Monate)
- 300 L-Komposter (I, II und III), die verwendeten Substratmengen sind in Tabelle 20 zusammengefasst
- Ort: Isoliercontainer, 24°C
- Bewässerung nach optischer/haptischer Kontrolle
- Besatzdichte: Komposter I und II: 2,5 kg Würmer, Komposter III: 3 kg
- Kontrolle von TS, oTS, pH, LF, AT<sub>4</sub> und C/N
- Kresstest
- Siebe (10; 4; 3 und 2 [mm])
- Analyse auf N<sub>tot</sub>, P<sub>tot</sub>, K<sub>tot</sub>, N<sub>pflverf</sub>, P<sub>CAL-extrahierbar</sub>, K<sub>CAL-extrahierbar</sub>

Die Komposter I und II dienten zur Datenerhebung für die akustische Kontrolle der Kompostwürmer. Um sicher zu stellen, dass die Substratmenge für die verschiedenen Experimente ausreichend war, wurden diese Komposter mit weniger Substrat betrieben als Komposter III (siehe Abbildung 55), der zur Beschreibung einer Massenbilanz von Input („Fütterung“) und Output („Vermikompost“) und damit zur Abschätzung der Umsatzleistung der Würmer diente (siehe ab Seite 55).

In Komposter I und II wurde jeweils 5 kg Startmasse vorgegeben. Das hatte zur Folge, dass das Substrat nicht bis zu den Wänden der Komposter reichte. An den Rändern der Fütterung trocknete das Substrat aus. Die Würmer besiedelten diese Bereiche nicht und das Futter wurde dort nicht umgesetzt. Die trockenen Teile wurden zum Ende der Versuche entfernt und bei der Bilanzierung von der Gesamtfütterung abgezogen.

Das umgesetzte Material fiel (zum Teil, siehe auch Abbildung 31) aus dem Komposter heraus und wurde in einer Plastikfolie unter den Kompostern aufgefangen. Von dort wurde das Material entnommen und der Nachrotte (aerobe Lagerung) zugeführt.

Tabelle 20: verwendete Substratmengen für den manuellen Betrieb der 300 L-Komposter

Komposter	Startmasse Substrat [kg FS]	Fütterungsmasse Substrat [kg FS]	Fütterung Intervall [d]
I	5	3	3
II	5	3	3
III	25	5	3



Abbildung 55: Komposter III mit 25 kg Fäkalien

### 8.1.3 Anwendung

- Substrate: Bioabfall (REMONDIS, Bonn)  
Überschussschlamm (Kläranlage Salierweg, Bonn)  
Die Hauptparameter sind in Tabelle 21 aufgeführt.
- Komposter
- Ort: Isoliercontainer, 19 °C
- Fütterung nach Bedarf, optische Kontrolle
- Kontrolle von TS, oTS, pH, LF,  $\text{NH}_4^+$  und C/N
- Bonitur der Würmer

Tabelle 21: Hauptparameter der in der Anwendung eingesetzten Substrate

Substrat	TS [%]	oTS [%]	pH	LF [mS/cm]
Überschussschlamm	10-15	42	7,1	0,6
Bioabfall	25	25-75	4,0-5,9	0,8-1,7

Die Vermikompostierung wurde manuell gestartet. Zuerst wurde vorgerotteter Bioabfall als Grundlage und Überdauerungssubstrat vorgegeben. Diese Schicht hatte auch die Aufgabe, den Überschussschlamm im Komposter zu halten, da dieser trotz einer Schwerkraftentwässerung zu großen Teilen durch den Gitterboden geflossen wäre. Der Überschussschlamm wurde in breiten Bahnen auf den Bioabfall gegeben, dazwischen die Würmer (siehe Abbildung 56). Wären ungeeignete Bedingungen aufgetreten, hätten die Würmer die Möglichkeit gehabt, in den reinen Bioabfall auszuweichen.

Die Mischung der Substrate Überschussschlamm und Bioabfall wurde so gehalten, dass Bioabfall als Überdauerungssubstrat „im Überschuss“ vorgegeben wurde, Überschussschlamm wurde nach der kalkulierten Umsatzleistung der Würmer (50 % Wurmausgangsmasse / d) zugegeben. Es zeigte sich, dass die Bereiche, wo Überschussschlamm zugegeben wurde, deutlich besser besiedelt wurden als der reine Bioabfall.



Abbildung 56: Start der Vermikompostierung in Oberhausen; Grundlage Bioabfall, streifenweise Vorgabe von Überschussschlamm, dazwischen Würmer.

## 9 Literatur

Aira, M. and J. Dominguez (2009). "Microbial and nutrient stabilization of two animal manures after the transit through the gut of the earthworm *Eisenia fetida* (Savigny, 1826)." Journal of Hazardous Materials 161(2-3): 1234-1238.

Aira, M., F. Monroy, et al. (2006). "Microbial Biomass Governs Enzyme Activity Decay during Aging of Worm-Worked Substrates through Vermicomposting." J. Environm. Qual.

Anonymus (1992). Klärschlammverordnung (AbfKlärV) vom 15. April 1992 (BGBl. I S. 912), die zuletzt durch Artikel 9 der VErordnung vom 9. November 2012 (BGBl. I S. 1504) geändert worden ist. BMUB, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit.

Anonymus (1998). Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden (Bioabfallverordnung - BioAbfV) in der Fassung der Bekanntmachung vom 4. April 2013 (BGBl. I S. 658). BMUB, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit.

Anonymus (2012). Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung - DüMV) vom 5. Dezember 2012 (BGBl. I S. 2482). BMUB, Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft.

Ansari, A. A. and S. A. Ismail (2012). "Role of Earthworms in Vermitechnology." Journal of Agricultural Technology 8(2): 403-415.

Appelhoff, M. (1997). Worms Eat My Garbage. Kalamazoo, Michigan USA, Flower Press.

Arancon, N. Q., C. A. Edwards, et al. (2008). "Influences of vermicomposts, produced by earthworms and microorganisms from cattle manure, food waste and paper waste, on the germination, growth and flowering of petunias in the greenhouse." Applied Soil Ecology 39(1): 91-99.

ARRPET Vermicomposting as an Eco-tool in Sustainable Solid Waste Mngement. C. Visvanathan, J. Traenklar, K. Joseph and R. Nagendran, Asian Regional Research Programme on Environmental Technology.

BGK (2006). Methodenbuch zur Analyse organischer Düngemittel, Bodenverbesserungsmittel und Substrate. Köln, Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V.

Bick, H. (1999). Grundzüge der Ökologie, Spektrum Akademischer Verlag.

Clarke, W. P., M. Taylor, et al. (2007). "Evaluation by respirometry of the loading capacity of a high rate vermicompost bed for treating sewage sludge." Biosource Technology 98: 2611 - 2618.

Clearfield\_County (2002). Feasibility of a Vermicomposting Operation For Food Waste at the Clearfield County Prison. G. Fleming.

Darwin, C. (1881). Die Bildung der Ackererde durch die Tätigkeit der Würmer mit Beobachtung über deren Lebensweise Berlin [u.a.] März.

- Dissanayake, C. B. and R. Chandrajith (2009). "Phosphate mineral fertilizers, trace metals and human health." Journal of the National Science Foundation of Sri Lanka 37(3): 153-165.
- Dominguez, J. (2004). State-of-the-Art and New Perspectives on Vermicomposting Research. Earthworm Ecology. C. A. Edwards. Boca Raton, Florida, CRC Press. 2nd Edition: 401-424.
- Dominguez, J. (2004). State of the Art and New Perspectives on Vermicomposting Research. Earthworm Ecology: 401 - 424.
- Dominguez, J. and C. A. Edwards (2004). Vermicomposting organic wastes: A review. Soil Zoology for Sustainable Development in the 21st Century Cairo
- Dominguez, J. and C. A. Edwards (2011). Biology and Ecology of Earthworm Species Used for Vermicomposting. Vermiculture Technology. C. A. Edwards, N. Q. Arancon and R. L. Sherman. Boca Raton, Florida, CRC PRes.
- Dominguez, J., C. A. Edwards, et al. (1997). "A comparison of vermicomposting and composting." BioCycle: 57-59.
- Dominguez, J., C. E. Edwards, et al. (2000). "Vermicomposting of sewage sludge: Effect of bulking materials on the growth and reproduction of the earthworm *Eisenia andrei*." Pedobiologia 44: 24 - 32.
- Eastman, B. R. (1999). "Achieving pathogen stabilization using vermicomposting." Biocycle 40 (11): 62-64.
- Eastman, B. R., P. N. Kane, et al. (2001). "The effectiveness of vermiculture in human pathogen reduction for USEPA biosolids stabilization." Compost Science & Utilization 9(1): 38-49.
- Edwards, C. A. (1972). Biology of earthworms London, Chapman and Hall.
- Edwards, C. A. and N. Q. Arancon (2004). The use of earthworms in the breakdown of organic wastes to produce vermicomposts and animal feed protein. Boca Raton, Florida, CRC Press.
- Edwards, C. A. and N. Q. Arancon (2004). The use of earthworms in the breakdown of organic wastes to produce vermicomposts and animal feed protein. Earthworm Ecology. C. A. Edwards. Boca Raton, Florida, CRC Press: 345-379.
- Edwards, C. A. and P. J. Bohlen (1996). Biology and Ecology of Earthworms. London, Chapman & Hall.
- Edwards, C. A. and K. E. Fletcher (1988). "Interactions between Earthworms and Microorganisms in Organic-Matter Breakdown." Agriculture Ecosystems & Environment 24(1-3): 235-247.
- Edwards, C. A. and E. F. e. Neuhauser (1988). Earthworms in Waste and Environmental Management. The Hague, NL, SPB Academic Publishing.
- Edwards, C. A. and A. Niederer (1988). The production and processing of earthworm protein. Earthworms in Waste and Environmental Management. C. A. Edwards and E. F. Neuhauser. The Hague, NL, SPB Academic Publishing.

- Elvira, C., L. Sampedro, et al. (1997). "Vermicomposting Of Wastewater Sludge From Paper-Pulp Industry With Nitrogen Rich Materials." Soil Biol. Biochem. 29(3/4): 759-762.
- Fayolle, L., H. Michaud, et al. (1997). "Influence of temperature and food source on the life cycle of the earthworm *Dendrobaena veneta* (Oligochaeta)." Soil Biology & Biochemistry 29(3-4): 747-750.
- Frederickson, J. Vermicomposting Trial At the Worm Research Centre: Part 1 - Technical Evaluation. T. O. University. [www.wormfarminsecrets.com/downloads/shankswormreport.pdf](http://www.wormfarminsecrets.com/downloads/shankswormreport.pdf).
- Frederickson, J., K. R. Butt, et al. (1997). "Combining Vermiculture With Traditional Green Waste Composting Systems." Soil Biology & Biochemistry 29(3/4): 725-730.
- Frederickson, J., G. Howell, et al. (2007). "Effect of pre-composting and vermicomposting on compost characteristics." European Journal of Soil Biology 43: S320-S326.
- Fuchs, J. (2005). Wurmkompostierung im Mekong Delta - Stoffflüsse und Hygienisierung von Wurmkomposten unterschiedlicher Ausgangssubstrate. Landwirtschaftliche Fakultät. Bonn, Friedrich Wilhelms-Universität
- Gaddie, R. E. (1977). Earthworms for Ecology and Profit. Ontario, California, Bookworm Pub Co.
- Garg, P., A. Gupta, et al. (2006). "Vermicomposting of different types of waste using *Eisenia foetida*: A comparative study." Bioresource Technology 97(3): 391-395.
- Graff, O. (1984). Unsere Regenwürmer, Schaper, M. & H.
- Gunadi, B., C. Bluount, et al. (2002). "The growth and fecundity of *Eisenia fetida* (Savingny) in cattle solids pre-composted for different periods." Pedobiologia 46(1): 15-23.
- Gupta, R. and V. K. Garg (2008). "Stabilization of primary sewage sludge during vermicomposting." Journal of Hazardous Materials 153(3): 1023-1030.
- Haimi, J. and V. Huhta (1986). "Capacity of various organic residues to support adequate earthworm biomass for vermicomposting." Biology and Fertility of Soils 2: 23-27.
- Hait, S. and V. Tare (2011). "Vermistabilization of primary sewage sludge." Bioresource Technology 102(3): 2812-2820.
- Huang, K., F. S. Li, et al. (2014). "Effects of earthworms on physicochemical properties and microbial profiles during vermicomposting of fresh fruit and vegetable wastes." Bioresource Technology 170: 45-52.
- Hughes, R. J., J. Nair, et al. (2009). "The risk of sodium toxicity from bed accumulation to key species in the vermifiltration wastewater treatment process." Bioresource Technology 100(16): 3815-3819.
- Jadia, C. D. and M. H. Fulekar (2008). "Vermicomposting of vegetable waste: A bio-physicochemical process based on hydro-operating bioreactor." African Journal of Biotechnology 7(20): 3726-3733.
- Kaplan, D. L., R. Hartenstein, et al. (1980). "Physicochemical Requirements in the Environment of the Earthworm *Eisenia-Foetida*." Soil Biology & Biochemistry 12(4): 347-352.

- Kharrazi, S. M., H. Younesi, et al. (2014). "Microbial biodegradation of waste materials for nutrients enrichment and heavy metals removal: An integrated composting-vermicomposting process." International Biodeterioration & Biodegradation 92: 41-48.
- Khwairakpam, M. and R. Bhargava (2009). "Vermitechnology for sewage sludge recycling." Journal of Hazardous Materials 161(2-3): 948-954.
- Komplett (2009). Entwicklung und Kombination von innovativen Systemkomponenten aus Verfahrenstechnik, Informationstechnologie und Keramik zu einer nachhaltigen Schlüsseltechnologie für Wasser- und Stoffkreisläufe. Abschlussbericht.
- Kuntze, H., G. Roeschmann, et al. (1994). Bodenkunde, UTB.
- Lalander, C. H., G. B. Hill, et al. (2013). "Hygienic quality of faeces treated in urine diverting vermicomposting toilets." Waste Management 33(11): 2204-2210.
- Lazcano, C., M. Gomez-Brandon, et al. (2008). "Comparison of the effectiveness of composting and vermicomposting for the biological stabilization of cattle manure." Chemosphere 72(7): 1013-1019.
- Loehr, R. C., E. F. Neuhauser, et al. (1985). "Factors Affecting the Vermistabilization Process Temperature, Moisture Content and Polyculture." Water Res. 19(10): 1311-1317.
- Mahmood, Q., A. Pervez, et al. (2013). "Natural Treatment Systems as Sustainable Ecotechnologies for the Developing Countries." Biomed Research International.
- Mathur, U. B., L. K. Verma, et al. (2006). "Effects of Vermicomposting on Microbiological Flora of Infected Biomedical Waste" ISHWM Journal 5 ((1) ): 28-33.
- Meyer, E. and E.-G. Neumann (1974). Physikalische und Technische Akustik.
- Morais, F. M. C. and C. A. C. Queda (2003). Study of storage influence on evolution of stability and maturity properties of MSW composts. Proceeding of the Fourth International Conference of ORBIT Association on Biological Processing of Organics: Advances for a Sustainable Society Part II. P. Pullammanappallil. Perth, Australia.
- Munroe, G. Manual of On-Farm Vermicomposting and Vermiculture. Nova Scotia, Organic Agriculture Centre of Canada.
- Muyima, N. Y. O., A. J. Reinecke, et al. (1994). "Moisture Requirements of *Dendrobaena veneta* (Oligochaeta), a Candidate for Vermicomposting." Soil Biology & Biochemistry 26(8): 973-976.
- Ndegwa, P. M. and S. A. Thompson (2000). "Effects of C-to-N ratio on vermicomposting of biosolids." Bioresource Technology 75(1): 7-12.
- Neuhauser, E. F., D. L. Kaplan, et al. (1980). "Materials supporting weight gain by the earthworm *Eisenia foetida* in waste conversion systems." Agricultural Wastes 2: 43 - 60.
- Neuhauser, E. F., R. C. Loehr, et al. (1988). The Potential Of Earthworms For Managing Sewage Sludge. Earthworms in waste and environmental management. C. A. Edwards and E. F. Neuhauser. The Hague, SPB Academic Publishing. III: 9-20.

- Nguyen, P.-N. (2012). Vermicomposting of Organic Solid Wastes as a Biological Treatment for Sanitation. Hohe Landwirtschaftliche Fakultät. Bonn, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität. Dr. agr.
- Nguyen, P. N., A. Heck, et al. (2008). A multi-factoral test for the activity of compost-worms as influenced by pH, electric conductivity, Ammonium and Ammonia. The Sanitation Challenge, Wageningen, NL.
- Otterpohl, R., M. Groetteker, et al. (1997). "Sustainable water and waste management in urban areas." Water Science and Technology 35(9): 121-133.
- Owojori, O. J., A. J. Reinecke, et al. (2009). "The combined stress effects of salinity and copper on the earthworm *Eisenia fetida*." Applied Soil Ecology 41(3): 277-285.
- Owojori, O. J., A. J. Reinecke, et al. (2009). "Comparative study of the effects of salinity on life-cycle parameters of four soil-dwelling species (*Folsomia candida*, *Enchytraeus doerjesi*, *Eisenia fetida* and *Aporrectodea caliginosa*)." Pedobiologia 52(6): 351-360.
- Rechenburg, A. (2005). Hygieneuntersuchungen von Fäkalkomposten. Nährstofftrennung und-verwertung in der Abwassertechnik am Beispiel der Lamberts-mühle. INRES-Bonn. Bonn, INRES, Universität Bonn: 133-142.
- ROU (2007). Literature Review of Worms in Waste Management Volume I and II. Sydney, Australia, University of New South Wales.
- Sabine, J. R. (1978). The nutritive value of earthworm meal. Utilisation of Soil Organisms in Sludge Management R. Hartenstein. Springfield, VA: 285-296.
- Scheffer and Schachtschabel (2002). Lehrbuch der Bodenkunde. Heidelberg; Berlin, Spektrum Akademischer Verlag.
- Schnug, E. and N. Haneklaus (2012). "Environmental prospects of uranium from mineral phosphates." Atw-International Journal for Nuclear Power 57(12): 750-+.
- Shalabi, M. (2006). Vermicomposting of faecal matter as a component of source control sanitation. Hamburg, TU Hamburg-Harburg. PhD: 150.
- Sharma, S., K. Pradhan, et al. (2005). "Potentiality of Earthworms for Waste Management and in Other Uses - A Review." The Journal of American Science 1(1): 4-16.
- Sherman-Huntoon, R. (2000). Latest Developments in Mid-To-Large-Scale Vermicomposting. BioCycle.
- Simons, J. (2008). Eignung nährstoffreicher Substrate aus zentraler & dezentraler Abwasserbehandlung als Düngemittel. Hohe Landwirtschaftliche Fakultät. Bonn, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität. Dr. agr.
- Simons, J., J. Clemens, et al. (2005). Biologische Behandlung der Fäkalien. Nährstofftrennung und -verwertung in der Abwassertechnik am Beispiel der "Lamberts-mühle". Bonn, Bonner Agrikuturchemische Reihe.
- Slocum, K. *Dendrobaena veneta* -- For Bin, Bait, or Both, [www.wormdigest.com](http://www.wormdigest.com).
- Suthar, S. (2010). "Pilot-scale vermireactors for sewage sludge stabilization and metal remediation process: Comparison with small-scale vermireactors." Ecological Engineering 36(5): 703-712.

SWANA (2002). Feasibility of a Vermicomposting Operation For Food at the Clearfield Country Prison, Clearfield Country Prison.

Viljoen, S. A., A. J. Reinecke, et al. (1992). "The Influence of Temperature on the Life-Cycle of *Dendrobaena-veneta* (Oligochaeta)." Soil Biology & Biochemistry 24(12): 1341-1344.

Vinneras, B., A. Bjorklund, et al. (2003). "Thermal composting of faecal matter as treatment and possible disinfection method - laboratory-scale and pilot-scale studies." Bioresource Technology 88(1): 47-54.

Vinneras, B. and H. Jonsson (2002). "The performance and potential of faecal separation and urine diversion to recycle plant nutrients in household wastewater." Bioresource Technology 84(3): 275-282.

Witter, E. and J. Lopez-Real (1988). "Nitrogen losses during the composting of sewage sludge, and the effectiveness of clay soil, zeolite, and compost in adsorbing the volatilized ammonia " Biological Wastes 23(4): 279-294.

Yadav, K. D., V. Tare, et al. (2010). "Vermicomposting of source-separated human faeces for nutrient recycling." Waste Management 30(1): 50-56.

Yadav, K. D., V. Tare, et al. (2012). "Integrated composting-vermicomposting process for stabilization of human faecal slurry." Ecological Engineering 47: 24-29.

Ziegenlasch, H. H. (1984). Der unbekannte Regenwurm. Ein praktischer Ratgeber mit Erläuterungen über Nutzen und Verwendung von Regenwürmern. Tuttingen, H. Ziegelasch Vermikultur Verlag.