

**Masterarbeit in der Studienfachrichtung
Renewable Energy Design**

**Untersuchung zur Leistungsfähigkeit
eines Biomeilers**

Daniel Schelter

Abgabedatum: 29.08.2014

1. Gutachter/in: Prof. Dr. Frank Setzer
2. Gutachter/in: Prof. Dr. Henning Bredenbeck

Zusammenfassung

Der Biomeiler kann durch die Kompostierung von Holzabfällen und der damit verbunden Erzeugung von Wärme und Kompost als gutes Beispiel für eine ressourcenschonende Energieerzeugung dienen. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich aus diesem Grund mit der Untersuchung der Leistungsfähigkeit dieses Systems. Hierzu wurde ein Versuchsmodell eines Biomeilers in einer Größe von 1 m³ entwickelt und messtechnisch begleitet. Bezüglich der Auswahl des Substrates und dessen optimalen Beschaffenheit wurde auf die Empfehlungen in der Literatur sowie Expertenbefragungen zurückgegriffen. Die Berechnung der Wärmeleistung in Abhängigkeit von der Größe des Biomeilers brachte keine zufriedenstellenden Ergebnisse. Hierfür werden die geringe Größe des Modells sowie eine Störung des mikrobiellen Gefüges als Ursache gesehen. Als Ausblick werden wichtige Hinweise für weitere Versuche mit einem Modell-Biomeiler gegeben. Dieser sollte auf 10 m³ vergrößert werden. Außerdem muss der Wärmeübertrager durch den Biomeilerkern verlaufen, um die Spitzentemperaturen optimal auszunutzen. Hierbei darf die gegenseitige Abhängigkeit des aeroben Randbereichs und der nahezu anaeroben Mitte nicht außer Acht gelassen werden, was zu einer natürlichen Isolierung des Biomeilers führt.

Abstract

The Biomeiler can provide through the composting of wood residues and the related generation of heat and compost as a good example for a resource-saving energy. The present paper deals therefore with the study of the performance of this system. For this purpose, an experimental model of a Biomeiler was developed in a size of 1 m³ and accompanied by measurement. Regarding the selection of the substrate and the optimum condition was resorted to the recommendations in the literature and expert surveys. The calculation of the heat capacity as a function of the size of the Biomeiler did not yield any satisfactory results. For this, the small size of the model as well as a disturbance of the microbial structure are seen as the cause. As an outlook important clues for further experiments are given with a model Biomeiler. Therefore the Biomeiler should be increased to 10 m³. In addition, the heat exchanger must pass through the Biomeiler center to optimally utilize the peak temperatures. Here, the mutual

dependence of aerobic edge region and the nearly anaerobic center must not be ignored, resulting as natural insulator of the Biomeiler.

Inhaltsverzeichnis

	Abbildungsverzeichnis.....	V
	Tabellenverzeichnis.....	VII
1.	Einleitung	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Zielstellung.....	2
2.	Stand der Technik.....	3
2.1	Der Biomeiler nach Jean Pain.....	3
2.2	Die Weiterentwicklung des Biomeilers durch Native Power.....	5
2.3	Zusammensetzung und Beschaffenheit des Substrats.....	7
2.3.1	Allgemein	7
2.3.2	Holz	7
2.3.3	Wasser.....	8
2.3.4	Mist.....	9
2.4	Biochemischer Vorgang	10
2.4.1	Der Wassergehalt	13
2.4.2	Die Sauerstoffversorgung.....	13
2.4.3	Das Kohlenstoff / Stickstoff-Verhältnis.....	14
2.4.4	Der pH-Wert.....	15
2.4.5	Temperatur	15
2.5	Vorstellung bestehender Biomeiler.....	17
2.5.1	Biomeiler Schloss Tempelhof / Kreßberg	17
2.5.2	Biomeiler Gattendorf	18
3.	Material und Methode	20
3.1	Versuchsprogramm.....	21
3.1.1	Versuchsplan	22
3.1.2	Versuchsskizze	24
3.2	Konstruktiver und Messtechnischer Aufbau.....	26
3.3	Zusammensetzung und Herstellung des Substrats	31
3.4	Messungen und Analysen	34
3.4.1	Temperaturmessungen	34
3.4.2	Bestimmung der Korngrößenverteilung des Häckselgutes	36

3.4.3	Labortechnische Analyse der Nährstoffe im Substrat	38
3.4.4	pH-Wert-Bestimmung.....	39
4.	Versuchsablauf und Ergebnisse.....	40
4.1	Temperaturentwicklung	40
4.1.1	Temperaturverhalten während der Wärmeentnahme	49
4.2	Entnommene Wärmemenge im Versuchszeitraum.....	52
4.3	Ergebnisse der Nährstoffanalyse des Substrates	54
4.4	Ergebnisse der pH-Wertmessung	56
5.	Auswertung und Diskussion	57
6.	Fazit und Ausblick.....	61
	Literaturverzeichnis.....	ii
	Anhangverzeichnis.....	v
	Selbstständigkeitserklärung.....	vi

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Pain bei der Kompostvorbereitung	3
Abbildung 2: Biomeiler mit Kunststoffrohren als Wärmeübertrager	4
Abbildung 3: Biomeiler Grundaufbau	5
Abbildung 4: Heizspiralen	5
Abbildung 5: Biomeiler Schloss Tempelhof	17
Abbildung 6: Wärmeübertragung im Gewächshaus	17
Abbildung 7: Biomeiler Gattendorf	19
Abbildung 8: Einbindung in das Heizungssystem	19
Abbildung 9: Versuchsskizze Biomeiler ISO-Ansicht.....	24
Abbildung 10: Versuchsskizze Biomeiler Draufsicht.....	24
Abbildung 11: Vorbereitung der IBC-Gitterbox	26
Abbildung 12: Abdichten der Kabelverbindung.....	27
Abbildung 13: Anbringung der Messfühler an Bambusrohr	27
Abbildung 14: Modell-Biomeiler mit Wärmeübertrager und Messstäben	28
Abbildung 15: Wasserbehälter mit Zulaufleitung	29
Abbildung 16: Isolierung Modell-Biomeiler	29
Abbildung 17: Belüftungsrohre	30
Abbildung 18: Datenlogger mit Notebook zur Datenauswertung	30
Abbildung 19: Weiden vor dem Häckseln.....	31
Abbildung 20: Gehäckseltes Schnittholz	32
Abbildung 21: Korngrößenverteilung des Hackgutes nach DIN 18123	32
Abbildung 22: Aufgefangener Sickersaft	33
Abbildung 23: Temperaturfühler am Wärmeübertragerrohr	34
Abbildung 24: Temperaturfühler Wärmeübertragerausgang.....	35
Abbildung 25: Temperaturfühler Wärmeübertragereingang.....	35
Abbildung 26: Raumtemperaturfühler	35
Abbildung 27: Siebanalyse nach DIN 18123	37
Abbildung 28: Aufheizphase des Modell-Biomeilers	40
Abbildung 29: Ausschnitt der Vorversuchswoche.....	42
Abbildung 30: Biomeiler am Tag 15 bis 18.....	43
Abbildung 31: Tag 34 bis 37	44
Abbildung 32: Tag 38 bis 41	46
Abbildung 33: Tag 60 bis 63	47
Abbildung 34: Wärmeentnahme eine Stunde	49

Abbildung 35: Wärmeentnahme zwei Stunden.....	49
Abbildung 36: Entnahmezeit drei Stunden	50
Abbildung 37: Entnahmezeit vier Stunden	50
Abbildung 38: Entnahmezeit 2 Tage	51

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bakterien und Pilze und Ihre Bedeutung	12
Tabelle 2: C/N- Verhältnisse verschiedener Rohstoffe	14
Tabelle 3: Wachstumstemperaturen der Mikroorganismen	16
Tabelle 4: Eckdaten des Biomeilers Schloss Tempelhof	17
Tabelle 5: Eckdaten des Biomeilers Gattendorf	18
Tabelle 6: Versuchsplan zur Untersuchung der Leistungsfähigkeit eines Biomeilers ..	22
Tabelle 7: Messstäbe mit Temperaturfühlern	34
Tabelle 8: Bestimmung der Korngrößenverteilung nach DIN 18123.....	36
Tabelle 9: Labortechnische Analyse der Nährstoffe im Substrat	38
Tabelle 10: Ermittlung der Wärmemenge und -leistung.....	52
Tabelle 11: Ergebnisse der Nährstoffanalyse.....	54
Tabelle 12: pH-Wert des Substrats	56

1. Einleitung

„Die Bundesregierung ist bestrebt, die Bioenergienutzung auszubauen. Die verstärkte Nutzung von Biomassen aus der Landschaftspflege und die energetische Nutzung von Reststoffen liegen hierbei im besonderen politischen und gesellschaftlichen Interesse.“¹

Das Zitat belegt, dass ressourcenschonende Energiegewinnung ein aktuelles politisches und gesellschaftliches Thema ist. Die effektive Verwertung von organischen Reststoffen kann einen wichtigen Beitrag zur Schonung endlicher Ressourcen leisten. Ein Teil davon wird dem Landschaftspflegematerial zugeordnet, welches beispielsweise bei der Freihaltung von Wegen, Straßen, Gewässern, Bahntrassen oder auf kommunalen bzw. privaten Grünflächen bei Pflegearbeiten anfällt. Das Potenzial des holzartigen Anteils, das sogenannte Landschaftspflegeholz, beläuft sich in Deutschland auf schätzungsweise 1,4 Mio. t FM/a². Ein Ansatz zur Verwertung dieses Holzes ist, neben der Verbrennung in Heizkraftwerken, die Nutzung der bei der Kompostierung anfallenden Wärme. Hierfür wird vor allem der dem Landschaftspflegeholz zugehörige Baum- und Strauchschnitt verwendet, der je nach Jahreszeit ein sehr variables Gemisch darstellt und deshalb als Holzbrennstoff ungeeignet ist. Erstmals wurde dieses Prinzip von dem Franzosen Jean Pain im Jahre 1970 in der Provence angewendet³. Mittlerweile gibt es auch in Deutschland einige Anlagen, die dem Kompostierungsprozess Wärme entnehmen. Im deutschen Sprachraum hat sich hierfür der Begriff des Biomeilers etabliert. Allerdings befinden sich diese Anlagen meist in der Pilotphase bzw. werden nicht ausreichend wissenschaftlich betreut.

1.1 Problemstellung

Der Anlass für diese Arbeit ergab sich aus einer Anfrage an die Thüringer Bioenergie-Region RAG Saale-Holzland e. V. zur Planung und Auslegung eines Biomeilers für einen mittelständischen Obstbetrieb in Schöngleina. In Kooperation mit der Bioenergieregion sollte im Rahmen einer Masterarbeit ein Konzept für dieses

¹ Schütte, A. 2014, S.1

² Vgl. Seyfert, U. et al. 2011, S. 21

³ Vgl. Stang, M. 2013, S.2

Vorhaben erstellt werden. Die dafür durchgeführte Literaturrecherche bezüglich der erforderlichen Größe und Leistung eines Biomeilers führte lediglich zu Schätzwerten aus wissenschaftlich nicht belegten Erfahrungen⁴. Dies erschwerte eine genaue Empfehlung, die den Anforderungen des Bauherrn gerecht werden konnte.

1.2 Zielstellung

Ziel dieser Arbeit ist es, auf der Grundlage eines Versuchsaufbaus, die Wärmeleistung eines Biomeilers in Abhängigkeit von dessen Größe zu bestimmen. Die in der Literatur gefunden Angaben bezüglich der Größe und Wärmeleistung eines Biomeilers sind zu überprüfen.

Die daraus abgeleitete Aufgabenstellung beinhaltet den Aufbau und Versuchsbetrieb eines Modell-Biomeilers sowie das Auffinden und Optimieren prozessrelevanter Parameter. Bezüglich der Auswahl des Substrates und dessen optimalen Beschaffenheit wird auf die wenigen Empfehlungen in der Literatur sowie Expertenbefragungen zurückgegriffen.

⁴ Vgl. Stang, M. 2013, S. 4

2. Stand der Technik

Zur Planung der Untersuchungen zum Thema Untersuchung zur Leistungsfähigkeit eines Biomeilers wurde die Literatur diesbezüglich ausgewertet. Die für die durchgeführten Untersuchungen relevanten Fakten werden in diesem Abschnitt zusammenfassend dargestellt. Dabei werden die Entstehung der Idee des Biomeilers sowie deren Weiterentwicklung und dessen biochemischer Vorgang beschrieben.

2.1 Der Biomeiler nach Jean Pain

„Die Idee des Biomeilers geht auf den französischen Forstinspektor Jean Pain (1928-1981) zurück, der in den 1970er Jahren nach einer Verwertungsmöglichkeit für das bei der Durchforstung anfallende Unterholz gesucht hat.⁵ Diese Durchforstung diente der Vorbeugung vor Waldbrandproblemen in den umliegenden Wäldern seiner Heimatgemeinde. Um die Rentabilität dieser Maßnahmen sicher zu stellen, hatte er die Idee, dieses „Buschwerk“⁶ zu kompostieren und den dabei entstehenden organischen Dünger zu verkaufen. Des Weiteren sollten damit die Struktur der ausgemergelten Böden verbessert und ausgelaugte humusarme Böden wieder fruchtbar gemacht werden⁷.

Zur Herstellung dieses Kompostes befeuchtete er das zerkleinerte Material und stapelte es dann zu einem mehrere Meter hohen Meiler auf, den er noch nachträglich verdichtete (siehe Abbildung 1). Dabei machte er die Entdeckung, dass sich mit dem Verfahren neben dem wertvollen Kompost auch nutzbare Wärme generieren lässt. Dafür legte er Kunststoffrohre spiralförmig in den Komposthaufen und



Abbildung 1: Pain bei der Kompostvorbereitung (Quelle: Pain, 1980, S.14)

⁵ Korthöber, H. 2013, S.5

⁶ Pain, J. 1980, S.11-12

⁷ Vgl. ebd.

leitete in diese Wasser ein, das sich durch die entstehende Hitze auf über 60°C erwärmte (siehe Abbildung 2). In seinem Buch schreibt er dazu:

“Unsere Experimente haben gezeigt, dass eine Kompostmiete von 50 Tonnen in der Lage ist, 60°C warmes Wasser mit einer Kapazität von 4 Liter pro Minute (das gilt für Wasser mit einer Anfangstemperatur von 10°C) und das während 6 Monaten zu produzieren, ohne das die Kompostierung darunter leidet.”⁸



Abbildung 2: Biomeiler mit Kunststoffrohren als Wärmeübertrager (Quelle: Pain, 1980 S.49)

Jean Pain hat in seinen Publikationen verschiedene Wärmeleistungen eines Biomeilers veröffentlicht, die jedoch keine genauen Rückschlüsse auf die effektive Leistung zu lassen. Aufbauend auf seine Überlegungen lassen sich folgende Berechnung anstellen:

Um einen Liter Wasser um ein Grad zu erwärmen braucht man eine Energie von 0,0012 kWh / (Kg · K).

Bei einem angenommenen 12-Stundenbetrieb pro Tag ergibt sich folgende Tages- und Jahresleistung des Biomeilers von Jean Pain:

Tagesleistung: 172,8 kWh / 24 h⁹

Jahresleistung: 63072 kWh/a

In der einschlägigen Literatur sind weitere Leistungszahlen auffindbar, leider sind sie über den theoretischen Ansatz nie herausgekommen oder lehnen sich stark an die Zahlen von Jean Pain an.

⁸ Pain, I. 1980, S.49

⁹ 4 Liter Wasser/min · 0,0012 kWh/(kg · K) · (60-10) K · 720 min

2.2 Die Weiterentwicklung des Biomeilers durch Native Power

In Fortführung des Erbes des bereits verstorbenen Jean Pain gründete sich der gemeinnützige Verein Native Power, der die Idee aufgriff und weiterentwickelte. Auf der Grundlage der vom Verein herausgegebenen Literatur soll im Folgenden der grundlegende Aufbau eines Biomeilers beschrieben werden.

Die weitverbreitetste Bauform des Biomeilers ist in Abbildung 3 dargestellt. Sie ist kreisrund und besteht aus einem Grundgerüst aus Baustahlmatten oder vergleichbarem Material. Die runde Form bietet sich an, da sich unter Berücksichtigung eines Seitenabstandes im Gegensatz zu einer eckigen Bauweise mehr Wärmeübertragungsfläche einbringen lässt. Üblich sind je nach Anwendung ein



Abbildung 3: Biomeiler Grundaufbau
(Quelle: Native Power, 2008)

Durchmesser von bis zu neun Metern und eine Höhe von bis zu drei Metern. Der Boden des Biomeilers kann entsprechend der Größe entweder mit einem Betonfundament oder einer Teichfolie ausgeführt werden. Dies verhindert eine Verunreinigung des Grundwassers durch Sickerwasser aus dem Biomeiler, gefordert durch das Wasserhaushaltsgesetz¹⁰. Weiterhin sollte ein Gefälle in Richtung eines Auffangbehältnisses geschaffen werden. In diesem Behältnis wird der bei der Bewässerung des Biomeilers entstehende nährstoffreiche Sickersaft aufgefangen. Die Flüssigkeit wird regelmäßig wieder auf den Biomeiler aufgebracht, um eine Ausschwemmung von Mikroorganismen zu verhindern¹¹. Abbildung 4 zeigt den Aufbau des Wärmeübertragers im Inneren des Biomeilers. Dieser wird in mehreren Ebenen

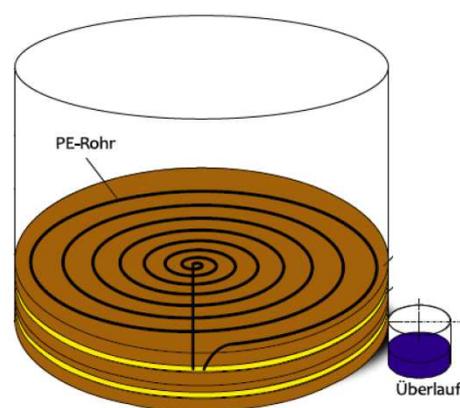


Abbildung 4: Heizspiralen (Quelle: Stang, 2013, S.6)

¹⁰ § 34 (1), (2) WHG von 2009

¹¹ Vgl. Stang, M. 2013, S.6

in Form einer Spirale in den Biomeiler gelegt. Die Anzahl der Ebenen ist abhängig von der Größe des Biomeilers und kann mehrere Ebenen beinhalten. Die äußeren Schichten des Biomeilers fungieren als Wärmedämmung sie sollten 60 bis 80 cm nicht unterschreiten¹². Wird der Biomeiler gedämmt, kann das Wärmeübertragerrohr bis auf 30 cm an den Rand heran ausgelegt werden¹³. Die Oberfläche des Biomeilers kann nicht gedämmt werden, denn dort befinden sich Bakterien, die Sauerstoff- und UV-abhängig sind¹⁴. Die Rohre werden mit Hilfe von Hölzern, Stahlmatten oder Seilen fixiert, um ein Verrutschen zu verhindern¹⁵. Die Heizspiralen sind in Reihe geschaltet. Die Wärmeträgerflüssigkeit wird in den äußeren Kreis mittels einer Umwälzpumpe hineingepumpt, erwärmt sich und fließt anschließend von der Mitte nach draußen (vgl. Abbildung 4)¹⁶. Die Heizspiralen werden üblicherweise außerhalb des Biomeilers zusammengeführt, um mögliche Leckagen schnell zu beheben.

Für die Heizspirale wird ein PE HD (Polyethylen high density)- Rohr mit einem Außendurchmesser von 32 Millimetern und einem Innendurchmesser von 26 Millimetern verwendet. Dieses Rohr wird oft im Gartenbau oder in der Landwirtschaft verwendet und hält Temperaturen bis zu 80°C aus. Zudem hat es eine hohe chemische Beständigkeit. Bei der Verwendung des PE-Rohrs muss darauf geachtet werden, dass der Biomeiler über einen Platten-Wärmeübertrager an das Heizsystem angeschlossen ist, da es nicht diffusionssicher ist und über einen längeren Zeitraum Sauerstoff ziehen kann. Dies ist schädigend für alle Stahlleitungen, Kessel und sonstige heizungstechnische Anlagen¹⁷. Sollte aus speziellen Gründen der Biomeiler direkt an das Heizsystem angeschlossen werden, muss ein diffusionssicheres Rohr verwendet werden, wie z.B. ein Aluminium-Mehrschichtverbundrohr (auch PEX-Rohr).

Als Wärmeträgermedium kommt Wasser zum Einsatz. Soll der Biomeiler über die Wintermonate genutzt werden, muss dem Wasser ein Anteil Glykol zugemischt werden, um einen ausreichenden Frostschutz zu gewährleisten. Eine weitere Idee ist, statt Wasser Luft als Wärmeträgermedium zu nehmen. Hierfür können z.B. Drainage-

¹² Vgl. Stang, M. 2013, S.8

¹³ Vgl. Mollay, M. u.A. 2011, S.13

¹⁴ Vgl. Mollay, M. u.A. 2011, S.11

¹⁵ Vgl. Stang, M. 2013, S.8

¹⁶ Vgl. Stang, M. 2013, S.9

¹⁷ Vgl. Mollay, M. u.A. 2011, S.7

Rohre beim Aufbau in den Meiler integriert und die erwärmte Luft mit Hilfe eines kleinen Gebläses direkt in ein Gebäude gebracht werden¹⁸. Diese Variante ist technisch einfacher umzusetzen, hat aber einen geringeren Wirkungsgrad, da die Wärmeleitfähigkeit von Luft gegenüber Wasser geringer ist.

2.3 Zusammensetzung und Beschaffenheit des Substrats

2.3.1 Allgemein

Während bei der klassischen Kompostierung das Substrat mehrmals umgesetzt wird, um dem Abbauprozess Sauerstoff zuzuführen, wird beim Aufbau des Biomeilers das Ausgangssubstrat einmal gemischt, dann verdichtet und so belassen. Die Hauptbestandteile des Biomeilers sind Holz, Wasser und Mist. Diese sollen nachfolgend in ihrer Menge und Beschaffenheit erläutert werden.

2.3.2 Holz

Für den Biomeiler wird Baum- und Strauchschnitt verwendet. Dieser soll aus Astwerk mit möglichst viel Rinde und Blättern bestehen, sowie möglichst frisch gehäckselt auf einen Haufen kommen. Die Blätter und Rinde dienen als Stickstoffquelle. Die verwendeten Gehölze sollten einen Durchmesser von 10 cm¹⁹ nicht übersteigen, da dadurch gewährleistet wird, dass der Rinden- und Feuchtigkeitsanteil ausreichend hoch ist. Für die Auswahl der Baumart werden in der einschlägigen Literatur keine ausdrücklichen Empfehlungen angegeben. Meist orientiert man sich hier an den örtlichen Gegebenheiten und Ressourcen. Neben der Weide kommen auch Pappel, Linde, Esche, Akazie, Hainbuche, Rotbuche, Weißdorn, Obstbäume sowie Ziersträucher in Frage²⁰. Der Zerkleinerungsgrad des gehäckselten Materials ist abhängig von der gewünschten Nutzungsdauer des Biomeilers. Sind die Aststücken stark zerkleinert und vor allem zerfasert, ist die Angriffsfläche für die Mikroorganismen

¹⁸ Vgl. Stang, M. 2013, S.9

¹⁹ Stang, M. 2013, S.5

²⁰ Vgl. Schuchardt, F. 1984, S.190

umso größer und umso intensiver und schneller geht der Rotteprozess vonstatten²¹. Wird das Material hackschnitzelartig in Häckseln von 4-6 cm Länge und 1-2 cm Stärke verwendet, ist der Rotteprozess langlebiger und kann bis zu 18 Monate Wärme liefern²².

2.3.3 Wasser

„Je nach frische & feuchte des Ausgangsmaterials muss bis zu einem Drittel Wasser hinzugefügt werden. Das Wasser verdrängt einerseits die Luft im Inneren des Meilers (welche nicht erwünscht ist für anaerobische Reaktionen) und dient den Mikroorganismen als Lebensraum.“²³

Ist der Biomeiler zu feucht, kommt es im Inneren zur Faulung und der Rotteprozess kann nicht optimal ablaufen. Ist er zu trocken bilden sich sogenannte Trockennester und der Rotteprozess kommt ebenfalls zum Erliegen (siehe auch Seite 13).

²¹ Vgl. Schuchardt, F. 1984, S.191

²² Vgl. Stang, M. 2013, S.2

²³ Stang, M. 2013, S.5

2.3.4 Mist

Optional kann dem Biomeiler nach Jean Pain noch ein Anteil Mist beigemischt werden. Hiermit wird eine zusätzliche Stickstoffquelle eingebracht, die zu einer verkürzten und intensiveren Rotte mit einer entsprechend hohen Wärmeentwicklung führt²⁴. Der dabei entstehende Kompost enthält mehr Stickstoff, ist stärker auskompostiert und schneller einsetzbar²⁵. Der Mistanteil des Biomeilers sollte 10-30 %²⁶ betragen. Bei der Zugabe von Mist sollte darauf geachtet werden, dass mindestens 40 % ligninhaltiges Material enthalten ist²⁷. Der Rest kann aus sonstigen Grünabfällen wie Blättern und Grasschnitt bestehen.

Als Mist kann je nach Verfügbarkeit Pferde-, Kuh-, Ziegen-, Schweine- oder Hühnermist verwendet werden. Es empfiehlt sich Schweine- und Hühnermist bei geringen Abständen zu Wohnhäusern nur in sehr geringen Mengen einzusetzen, da er sehr geruchsintensiv ist. Mist, der aus kommerziellen Massentierhaltungsbetrieben stammt, ist ungeeignet. Die Tiere werden regelmäßig mit Antibiotika gefüttert, welches von den Tieren wieder ausgeschieden wird. Das Antibiotikum tötet die Mikroorganismen im Biomeiler und es kann keine Wärme entstehen.²⁸

²⁴ Vgl. Schuchardt, F. 1984, S.194

²⁵ Vgl. Stang, M. 2013, S.2

²⁶ Ebd.

²⁷ Vgl. Stang, M. 2013, S.5

²⁸ Vgl. Stang, M. 2013, S.4

2.4 Biochemischer Vorgang

Der Biomeiler wird durch einen aeroben Prozess an der Oberfläche sowie an den Randbereichen und einen nahezu anaeroben Prozess im Inneren durch Mikroorganismengruppen und deren Enzyme abgebaut²⁹. Vereinfacht können diese in Bakterien, Actinomyceten und Pilze unterschieden werden. Die aeroben Bakterien am Rand gelten als Voraussetzung, um die erwünschten nahezu anaeroben Prozesse im Kern des Biomeilers zu unterstützen. Im Unterschied zur klassischen Kompostierung sind nahezu anaerobe Zustände und eine Rottezeit von 6 bis 18 Monaten gewünscht. Zu Beginn des Rotteprozesses, der sogenannten Vorrotte, sind vor allem Mikroorganismen wie Bakterien und Pilze aktiv, die sich von leicht abbaubaren Substanzen wie z.B. Glucose, schwefelfreie Aminosäuren oder Stärke ernähren und innerhalb des Biomeilers stark vermehren³⁰. Wenn sie beispielsweise leicht abbaubare Kohlenhydrat-Moleküle wie Glucose zersetzen, entsteht dabei überschüssige Energie, die in Form von Wärme nach außen abgegeben wird. Die Oxidationsprozesse beim Abbau von Glucose erfolgen, vereinfacht dargestellt in Gl. 1, wie folgt:

(Gl. 1)



Durch die intensive Bakterientätigkeit laufen viele exotherme Reaktionen ab, die zu einem Temperaturmaximum im Biomeilerkern von etwa 60 bis 70°C führen können³¹. Anschließend an die Vorrotte beginnt die Hauptrotte mit dem Abbau der schwerer zugänglichen Stoffe wie z.B. Ligninen, Fetten und Wachsen. Der im Biomeiler verwendete Baum und Strauchschnitt hat einen Ligninanteil von ca. 20-30 %³². Lignozellulose bildet die Zellwand verholzter Pflanzen. Als Gerüst dient dabei Cellulose und Hemicellulose. Lignin ist ein Polymer. Es gibt den Pflanzen ihre mechanische Festigkeit und schützt sie vor einem mikrobiellen Angriff³³. Darin gründet auch die schwere Abbaubarkeit während des Rotteprozesses. Der Abbau des Lignins erfolgt

²⁹ Vgl. Stang, M. 2013, S.3

³⁰ Vgl. Guggenberger, G. 2008, S.11

³¹ Vgl. Baldauf, S. & Bergmeister, S. 2006, S.8

³² Vgl. Krogmann, 1994, S. 231

³³ Vgl. Redaktion Pflanzenforschung.de 2012

durch in der Vorrotte entstandene Pilze, die Cellulose und Hemicellulose als Wachstumssubstrat benötigen³⁴.

„Um Lignin abbauen zu können, exkretiert der Pilz sowohl Enzyme als auch Moleküle, bei deren Oxidation H_2O_2 entsteht, das wiederum für den Abbau von Lignin benötigt wird.“³⁵

Das Lignin wird hauptsächlich von holzerstörenden Weißfäule- und Moderpilzen abgebaut, kann aber auch von anderen Schimmelpilzen und Hefen partiell abgebaut werden³⁶.

³⁴ Vgl. Fuchs, G. 2007, S.293

³⁵ Ebd.

³⁶ Vgl. Scholz, V.& Idler, C. 2005, S.10

Die am Rotteprozess beteiligten Bakterien und Pilze und Ihre Bedeutung soll in Tabelle 1 verdeutlicht werden.

Tabelle 1: Bakterien und Pilze und Ihre Bedeutung (Quelle: Baldauf / Bergmeister, 2006, S.9)

Gruppe	Bedeutung
Mesophile Bakterien	<ul style="list-style-type: none"> - Abbau der leicht abbaubaren Kohlenhydrate und Proteine - Erhöhung der Temperatur für die nachfolgenden thermophilen Mikroorganismen
Thermophile Bakterien	<ul style="list-style-type: none"> - Abbau von Protein und Nicht-Cellulose-Kohlenstoff - Angriff von Fetten und Hemicellulose
Thermophile Actinomyceten	<ul style="list-style-type: none"> - Abbau von Hemicellulose und wahrscheinlich auch Cellulose - werden wegen der größeren Toleranz gegen hohe Temperaturen in der Heißrotte gegenüber den Pilzen dominant
Mesophile Pilze	<ul style="list-style-type: none"> - Abbau von Cellulose und Hemicellulose
Thermophile Pilze	<ul style="list-style-type: none"> - Sind hauptsächlich für den Abbau von Cellulose und Hemicellulose verantwortlich

Folgende Parameter nehmen Einfluss auf den Rotteprozess: Wassergehalt, Sauerstoffversorgung, Kohlenstoff- / Stickstoff-Verhältnis, pH-Wert und Temperatur. Mittels der ersten drei Parameter kann der Rottevorgang gesteuert werden. Die restlichen Parameter ergeben sich aus dem Substrat und kennzeichnen somit den Prozess.

2.4.1 Der Wassergehalt

Der Wassergehalt des Substrats ist für den Rotteprozess entscheidend, da die Mikroorganismen Nährstoffe als auch Sauerstoff nur in gelöster Form aufnehmen³⁷. Der optimale Wassergehalt zum Rottebeginn liegt bei etwa 40 bis 65 %. Ab einem Wassergehalt von weniger als 30 % wird der Nährstofftransport verlangsamt bzw. blockiert und es kommt zum Stillstand der Rotte³⁸.

2.4.2 Die Sauerstoffversorgung

Wie in Gleichung 1 (siehe S. 7) dargestellt, wird bei der Oxidation von Kohlenstoffverbindungen und der resultierenden Energiegewinnung ausreichend Sauerstoff benötigt. Die Luftzufuhr des Biomeilers muss von allen Seiten gegeben sein. Im Biomeiler werden ca. 12– 20 % Sauerstoff benötigt um den Rotteprozess am Leben zu erhalten³⁹.

Die Sauerstoffzufuhr kann durch folgende Belüftungsmethoden erfolgen:

- natürliche Belüftung
- passive Belüftung
- Zwangsbelüftung

„Bei der natürlichen Belüftung erfolgt die Sauerstoffzufuhr der Rotte durch Diffusion von Luft in den Mietenkörper und der Sauerstofftransport innerhalb der Rotte erfolgt durch thermischen Auftrieb. Die passive Belüftung ist ähnlich der natürlichen Belüftung, jedoch wird hierdurch in den Mietenkörper eingebaute perforierte Röhren die Sauerstoffaufnahme erleichtert. Bei der Zwangsbelüftung wird durch in den Mieten eingebaute perforierte Röhren oder durch einen perforierten Boden Luft in die Mieten gepresst bzw. durch sie hindurchgesaugt.“⁴⁰

³⁷ Vgl. Guggenberger, G. 2008, S.10

³⁸ Vgl. Baldauf, S. & Bergmeister, S. 2006 S.11

³⁹ Vgl. Mollay, M. 2012, S.7

⁴⁰ Ulbricht, H. 2002, S.31

Die Zwangsbelüftung ist aufgrund der Beschaffenheit des Biomeilers in den meisten Fällen nicht nötig. Wenn es doch benötigt wird, kann z.B. ein perforiertes Drainagerohr, das mittels eines Rohrventilators Luft zirkuliert, in den Biomeiler eingebracht werden⁴¹.

2.4.3 Das Kohlenstoff / Stickstoff-Verhältnis

Als charakteristische Größe zur Nährstoffversorgung wird das Kohlenstoff/Stickstoff-Verhältnis (C/N-Verhältnis) herangezogen. Für die Umsetzungsprozesse benötigen die Mikroorganismen neben dem schon genannten Wasser und Sauerstoff auch genügend Nährstoffe. Die wichtigsten Nährstoffe, die benötigt werden, sind Stickstoffverbindungen, um körpereigenes Eiweiß für Wachstum und Vermehrung aufzubauen sowie energiereiche Kohlenstoffverbindungen, um die Prozesse am Leben zu halten⁴². In Tabelle 2 werden C/N-Verhältnisse von verschiedenen Rohstoffen aufgeführt:

Tabelle 2: C/N- Verhältnisse verschiedener Rohstoffe (Quelle: Kompostforum Schweiz, 2004)

Rohstoffe	C/N-Verhältnis N=1)	Rohstoffe	C/N-Verhältnis (N=1)
Hühnermist	10	Laub	30-60
Gemüseabfälle	13	Getreidestroh	60-100
Rasenschnitt	12-25	Baumschnitt	100-150
Rindermist	20	Rinde	100-130
Gartenabraum	20-60	Pferdemist	25

Um die höchsten Abbauraten zu erzielen, sollte das Ausgangsmaterial des Biomeilers ein C/N-Verhältnis von ca. 1:35 bis 1:45⁴³ haben. Bei einem zu engen C/N-Verhältnis stellt Kohlenstoff, bei einem zu weiten C/N-Verhältnis Stickstoff, einen begrenzenden Zuwachsfaktor dar.

⁴¹ Vgl. Mollay, M. 2012, S.7

⁴² Vgl. Müller-Kopp, A. S.68

⁴³ Krogmann, U. 1994, S. 231

2.4.4 Der pH-Wert

Damit die Mikroorganismen optimal arbeiten können, sollte der pH-Wert im Bereich von 5,5 bis 8 liegen. Am Anfang der Rotte treten vermehrt Säurebildner auf, wodurch es kurzzeitig zu einer Ansammlung von organischen Säuren kommt. Der pH-Wert befindet sich im sauren Bereich. Ist die Umsetzung dieser sauren Stoffwechselprodukte abgeschlossen, steigt der pH-Wert wieder und liegt im basischen Bereich von 7,5 bis 8,5⁴⁴.

2.4.5 Temperatur

In der Temperaturerhöhung der Rotte zeigt sich zum einem deren mikrobielle Aktivität und zum anderen wird durch die Temperatur die Tätigkeit der Mikroorganismen angeregt. Rippel-Baldes schreibt hierzu:

*"Innerhalb der das Leben eines Organismus umfassenden Temperaturspanne fördert steigende Temperatur die Lebenstätigkeit nach dem van 't Hoff'schen Gesetz, wonach eine Temperatursteigerung um 10°C die Reaktionsgeschwindigkeit verdoppelt bis verdreifacht."*⁴⁵

⁴⁴ Vgl. Guggenberger, G. 2008, S.11

⁴⁵ Rippel-Baldes, A. 1955, S.143

Unter Beachtung der arttypischen Wachstumstemperaturen können die Mikroorganismen in drei Gruppen nach Tabelle 3 eingeteilt werden:

Tabelle 3: Wachstumstemperaturen der Mikroorganismen (Quelle: Niese, 1978, S.77)

	Minimum	Optimum	Maximum
Psychrophile Organismen	- 5 - 0°C	10 – 15°C	15 – 20 °C
Mesophile Organismen	10 – 15°C	20 – 35 °C	40 – 45 °C
Thermophile Organismen	30 – 35 °C	50 – 60 °C	70 – 80 °C

2.5 Vorstellung bestehender Biomeiler

2.5.1 Biomeiler Schloss Tempelhof / Kreßberg

Unter der Anleitung und Aufsicht von Michael Stang betreibt die Gemeinschaft Schloss Tempelhof in Bayern einen Biomeiler zur Beheizung des anliegenden Gewächshauses (siehe Abbildung 5). Die Eckdaten des Biomeilers sind in nachfolgender Tabelle zusammengefasst:

Tabelle 4: Eckdaten des Biomeilers Schloss Tempelhof

Größe:	150 m³
Substrat	Grünschnitt, Pferdemist (frisch), Hühnermist (trocken)
Wärmeübertrager:	300 m PE-Rohr, d = 32 mm
Anwendung:	Beheizung eines 400 m² Gewächshauses
Entnahmezeit:	November-März

Die Beheizung des Gewächshauses wird über einen in den Boden eingebrachten Wärmeübertrager aus PE-Rohr (siehe Abbildung 6) bewerkstelligt. Mit Hilfe des Biomeilers konnte das Gewächshaus so von November bis März nahezu frostfrei gehalten werden. An extrem kalten Tagen mit Temperaturen ab -15°C stieß der Biomeiler an seine Grenzen und eine alleinige Lastabdeckung war nicht mehr möglich.



Abbildung 5: Biomeiler Schloss Tempelhof



Abbildung 6: Wärmeübertragung im Gewächshaus

Im Gespräch mit Stang gab dieser die Empfehlung, die Oberfläche des Biomeilers nicht zudecken, da einige der Mikroorganismen Sonnenlicht benötigen⁴⁶. Des Weiteren wurde in Erfahrung gebracht, dass die Temperaturen des Biomeilers nicht unter 38 °C fallen sollten, da dann die Mikroorganismenaktivität gehemmt wird und der Rotteprozess zum Erliegen kommen kann. Um in diesem Fall den Rotteprozess wieder neu zu entfachen wurde seitens des Betreibers die Zugabe von Glucose empfohlen.⁴⁷

2.5.2 Biomeiler Gattendorf

Im bayrischen Gattendorf steht der erste Biomeiler, der in einem reinen Wohngebiet errichtet wurde (siehe Abbildung 7). Der Biomeiler befindet sich in der Pilotphase und dient zur Untersuchung eines kostengünstigen und umweltverträglichen Verfahrens für die unterstützende Heizungs- und Warmwasserversorgung eines Wohnhauses im Winter.

Tabelle 5: Eckdaten des Biomeilers Gattendorf

Größe:	45 m³
Substrat	Grünschnitt
Wärmeübertrager:	150 m Alu-Verbundrohr, d = 20 mm
Anwendung:	Heizungsunterstützung und Warmwassererzeugung Einfamilienhaus
Entnahmezeit:	Dezember-Februar

Das angestrebte Ziel des Betreibers ist eine kontinuierliche Beladung des Solarpufferspeichers auf über 50 °C. Dieses Ziel konnte in der ersten Versuchsphase noch nicht erreicht werden, da nach einer zweitägigen Beladung des Speichers mit 60°C die Temperaturen des Biomeilers zu stark abgesunken sind. Ein erneuter Entnahmeversuch war erst nach ca. einer Woche wieder möglich. Alle weiteren Entnahmeversuche lieferten ca. 5 bis 7 Minuten Wärmeübertragerflüssigkeit mit einer

⁴⁶ Vgl. Stang, M. 2013, S.9

⁴⁷ Gespräch M. Stang am 6. Juni 2014

Temperatur von 55 °C. Die Menge der Solarflüssigkeit im Biomeiler soll aus diesem Grund von derzeitigen 50 auf 100 Liter über eine zusätzliche Einbringung einer weiteren Wärmeübertragerebene aufgestockt werden. Des Weiteren soll die Substratmenge erhöht und zusätzlich mit einem Anteil Mist vermengt werden, um die Leistung zu steigern. Ein Erreichen der gewünschten Leistung mit Hilfe der angestrebten Optimierungen muss sich in einer zweiten Versuchsperiode zeigen. Der Biomeiler ist über eine Nahwärmeleitung (siehe Abbildung 8) an einem bestehenden Solarpufferspeicher im Heizungsraum angeschlossen. Der Vor- und Rücklauf des Biomeiler wird manuell über zwei Absperrhähne zu- und abgeschaltet.



Abbildung 7: Biomeiler Gattendorf



Abbildung 8: Einbindung in das Heizungssystem (Quelle: Kaiser, 2013)

3. Material und Methode

Entsprechend der Zielstellung dieser Arbeit wurde ein Versuchsaufbau zur Bestimmung der Wärmeleistung eines Biomeilers entwickelt. Um repräsentative Werte zu erhalten, wäre die messtechnische Begleitung eines Biomeilers in praxisrelevanter Größe ab 10 m^3 (entspricht in etwa 1 kW) sinnvoll gewesen. Aufgrund des geringen Platzangebotes und der vorhandenen Messtechnik war eine Realisierung in der entsprechenden Größe im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich. Aus diesem Grund entstand die Idee, einen Biomeiler im Modellmaßstab von 1 m^3 aufzubauen. Dieses Modell soll durch äußere Isolierung weitgehend von der Umgebungstemperatur unabhängig gemacht und Wärmeverluste minimiert werden. Es wird zunächst davon ausgegangen, dass eine Belüftung über die Oberfläche bei der geringen Größe des Biomeilers ausreicht.

Die experimentellen Untersuchungen zur Bestimmung der Wärmeleistung des Biomeilers im Modellmaßstab wurden in den Versuchsgewächshäusern der FH Erfurt durchgeführt.

Nachfolgend werden zunächst das Versuchsprogramm mit dem Versuchsplan und der Versuchsskizze vorgestellt. Anschließend wird der konstruktive und messtechnische Aufbau, das verwendete Substrat, die durchgeführten Messungen und Analysen sowie die dazu verwendeten Geräte und Methoden erläutert.

3.1 Versuchsprogramm

Die Untersuchungen eines Biomeilers im Modellmaßstab dienen der Erfassung von Einflussgrößen, die bei halbtechnischen oder bei Großversuchen nicht oder nur mit hohem Aufwand erfasst werden können.

Versuchsziel: Bestimmung der Wärmeleistung eines Biomeilers in Abhängigkeit von dessen Größe und die damit verbundenen Auswirkungen auf die Temperaturen im Rotteprozess.

Versuchsfragen: Welche Wärmemenge kann abgenommen werden? Welche Auswirkungen hat die Wärmeabnahme auf die Temperatur im Inneren des Biomeilers? Bei welchem Lastverhalten kommt es zum Auskühlen des Biomeilers?

Folgende Parameter wurden im Modell-Biomeiler gemessen bzw. analysiert:

- Temperaturen im Inneren des Biomeilers
- Wasser-Eingangstemperatur
- Wasser-Ausgangstemperatur
- Lufttemperatur
- Massenstrom des Wassers
- Bestimmung der Korngrößenverteilung des Hackgutes
- Regenerationszeit des Biomeilers
- Bestimmung der Wärmemenge
- Labortechnische Analyse der Nährstoffe im Substrat
- pH-Wert

3.1.1 Versuchsplan

Zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit eines Biomeilers wurde in Tabelle 6 folgender Versuchsplan aufgestellt:

Tabelle 6: Versuchsplan zur Untersuchung der Leistungsfähigkeit eines Biomeilers

Versuchswoche	Entnahmezeit	Messgrößen*	
Vorversuchswoche 16.06.-20.06.		Anbringung der Isolierung, Dichtigkeitsprüfung des Wärmeübertragers, Überprüfung der Messfühler, Einstellung des Massestroms	
Versuchswoche 1 23.06.-27.06.14	1h	1-5	
	1h	1-5	
Versuchswoche 2 30.06.-04.07.14	2h	1-5	
	2h	1-5	
Versuchswoche 3 07.07.-11.07.14	3h	1-5	
	3h	1-5	
Versuchswoche 4 14.07.-18.07.14	4h	1-5	1 Temperaturen im Biomeiler
	4h	1-5	2 Wasser Ein- und Ausgangstemp.
	4h	1-5	3 Lufttemperatur
	4h	1-5	4 Massenstrom des Wassers
	4h	1-5	5 Regenerationszeit des Biomeilers

*Messgrößen

In einem Versuchszeitraum von vier Wochen wird dem Modell-Biomeiler bei einer wöchentlichen Anhebung der Entnahmezeit von einer auf vier Stunden Wärme über den Wärmeübertrager entnommen. Dabei werden kontinuierlich alle in Tabelle 6 genannten Temperaturen mittels des Datenloggers aufgezeichnet. Der Massenstrom des Wassers und die Regenerationszeit des Biomeilers werden manuell ermittelt.

3.1.2 Versuchsskizze

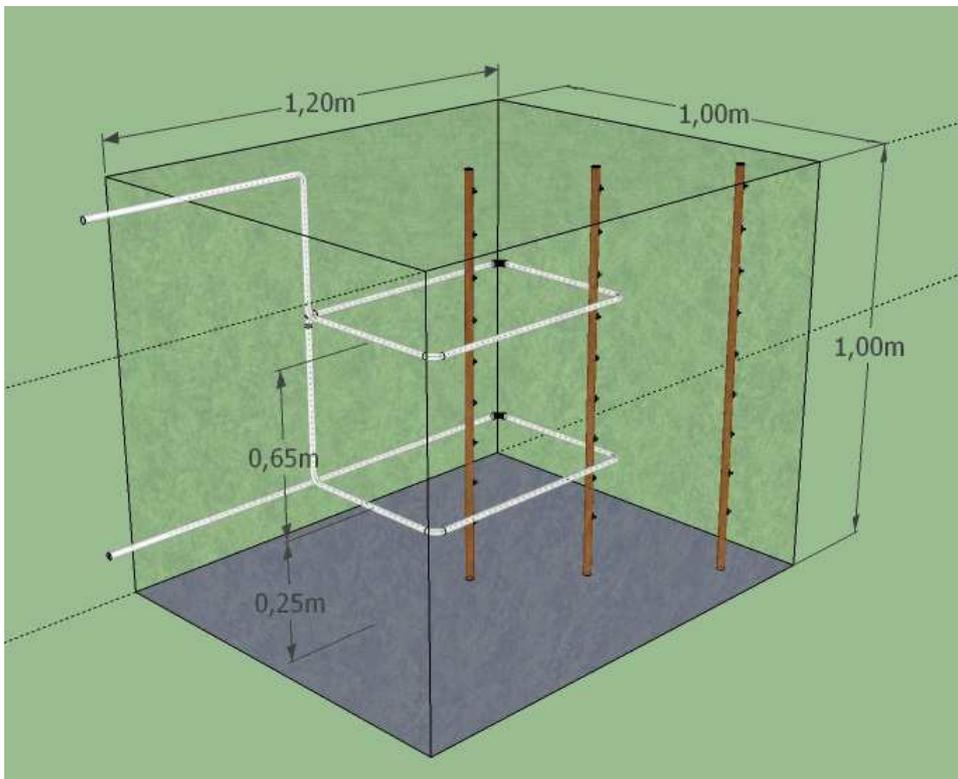


Abbildung 9: Versuchsskizze Biomeiler ISO-Ansicht

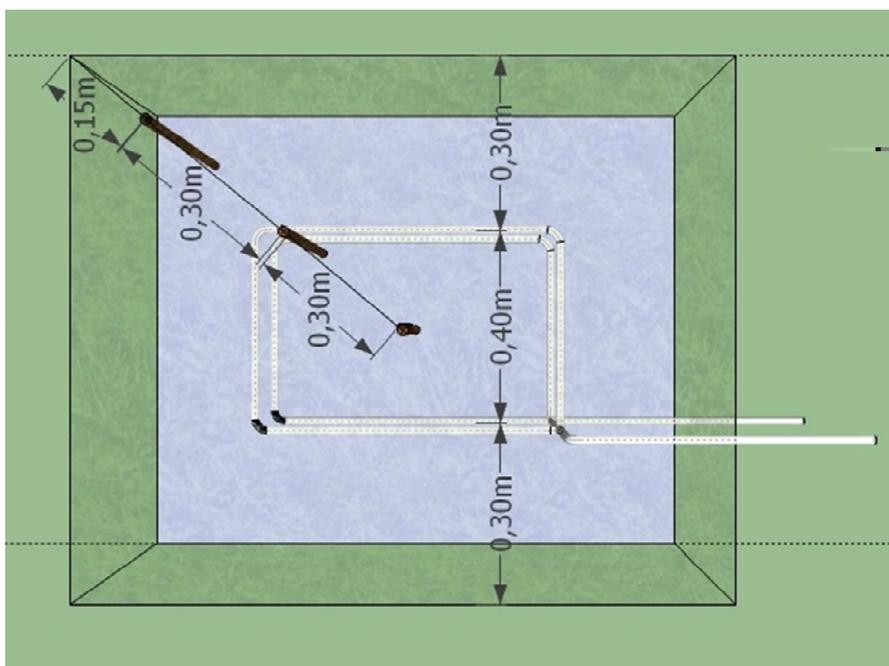


Abbildung 10: Versuchsskizze Biomeiler Draufsicht

Abbildung 9 und 10 zeigen die Skizze des Versuchsaufbaus. Dargestellt ist der quaderförmige Substratbehälter mit dem weißen Wärmeübertragerrrohr und den senkrecht eingebrachten Temperaturmessstäben. Die einzelnen Messfühler an den Stäben sind mit schwarzen Punkten angedeutet.

3.2 Konstruktiver und messtechnischer Aufbau

Die Grundlage des Modell-Biomeilers bildet eine Stahlgitterbox eines handelsüblichen IBC-Wassertanks (Intermediate Bulk Container). Sie besteht aus einem Stahlrohrrahmen, der auf einer Kunststoffpalette montiert ist. Die Abmessungen der Gitterbox betragen 100 cm x 100 cm x 120 cm (Höhe x Breite x Tiefe). Die Gitterbox hat sich als vorteilhaft erwiesen, da sie auch im gefüllten Zustand mittels eines Hubwagens verschoben werden kann. Des Weiteren bietet der Rohrahmen eine gute Grundlage zur Anbringung einer äußeren Isolierung. An der Vorderseite der Gitterbox befindet sich eine Aussparung, die zur Entnahme des austretenden Sickersaft, verwendet wurde.

Die Gitterbox wurde mit einer PE-Folie ausgekleidet und mit Hilfe eines Metall-Tackers fixiert, um ein Durchrutschen des Häckselgutes zu verhindern (siehe Abbildung 11). Der Boden der Gitterbox wurde mit Styroporplatten mit einer Stärke von 2 cm ausgelegt. Die Styroporplatten dienten zur Fixierung der später angebrachten Messstäbe und zum Verhindern von Wärmeverlusten an der unteren Seite der Gitterbox.



Abbildung 11: Vorbereitung der IBC-Gitterbox

In einem zweiten Arbeitsschritt wurde die für den Versuchsaufbau vorgesehene Messtechnik vorbereitet. Zur Positionierung und Anbringung der Messfühler im Modell-Biomeiler wurden Bambusstäbe mit einer Länge von 110 cm verwendet. Bambusstäbe verhindern durch ihre geringe Wärmeleitfähigkeit ein Aufnehmen der Substrattemperatur, so dass etwaige Messfehler unterbunden werden können. Alle Temperaturmessungen wurden mit Widerstands-Temperaturfühlern der Geberart Ntc Typ N mit einem Messbereich von -20°C bis $+125^{\circ}\text{C}$ durchgeführt. Sie haben im Bereich 0 bis 70°C eine Messgenauigkeit von $\pm 0,1$ Kelvin. Die Temperaturfühler wurden in einer Höhe von 15 cm, 25 cm, 35 cm, 45 cm, 55 cm, 65 cm, 75 cm und 85

cm an die Bambusstäbe angebracht und mit Kabelbindern fixiert (siehe Abbildung 12). Diese Einteilung wurde gewählt um Randeffekte auszuschließen und um ein gleichmäßiges Temperaturprofil zu generieren. Anschließend wurden die Temperaturfühler über Lüsterklemmen mit einer in der Messtechnik üblichen Elektronikleitung angeschlossen. Um die Verbindung vor Feuchtigkeit zu schützen, wurden die Lüsterklemmen mit PE-Folie umwickelt und mit weiteren Kabelbindern befestigt (siehe Abbildung 13). Zusätzlich wurde der fertige Messstab noch einmal mit Gewebeklebeband umwickelt. Das andere Ende der Elektronikleitung wurde ebenfalls über eine Lüsterklemme mit einem Stecker für NTC-Fühler verbunden.



Abbildung 12: Anbringung der Messfühler an Bambusrohr



Abbildung 13: Abdichten der Kabelverbindung

Nach der Fertigstellung der Messstäbe erfolgte die Vorbereitung und Einbringung des Wärmeübertragers. Dieser wurde rechteckig in zwei Ebenen in den Modell-Biomeiler eingebracht. Eine runde Anordnung des Wärmeübertragers in Form einer Spirale, wie auf Seite 5 beschrieben, war aufgrund der kleinen Fläche des Modell-Biomeilers und der Beschaffenheit des verwendeten Rohres nicht möglich.

Die erste Ebene liegt auf einer Höhe von 25 cm und die zweite Ebene auf einer Höhe von 65 cm. Beide Wärmeübertragerebenen haben eine Kantenlänge von 40 cm x 60 cm. Die Abstände zum Rand betragen an allen Seiten 30 cm (siehe S. 24). Diese Position wurde gewählt, um den höchst möglichen Wärmeertrag zu erzielen. Die Rohrstücke wurden auf die benötigten Längen zugeschnitten und mittels PE-Rohrbögen verbunden. Für den Wärmeübertrager wurde ein PE-Rohr vom Typ Meteor Systems B PE-LD Ø 16 verwendet. Das Rohr hat einen Innendurchmesser von 13 mm und eine Wandstärke von 1,5 mm. Insgesamt wurde im Modell-Biomeiler eine

Rohrlänge von 535 cm eingebracht. Um den Wärmeübertrager in seiner Position zu halten, wurde er mit Schnüren an der Gitterbox befestigt.

Nach Einbringung des Wärmeübertragers wurden die Messstäbe positioniert. Um den Kern des Modell-Biomeilers zu messen, wurde ein Messtab genau in der Mitte positioniert. Der zweite Messtab wurde diagonal in 30 cm Entfernung in Richtung der hinteren linken Ecke positioniert. Der dritte Messtab wurde weitere 30 cm dahinter positioniert und soll den Randbereich des Modell-Biomeilers abbilden (siehe Abbildung 14). Die Messstäbe wurden ebenfalls mit Schnüren in Position gehalten, um eine nachträgliche Positionsänderung bei der Befüllung des Biomeilers zu verhindern. Anschließend wurde der Wärmeübertrager-Zulauf mittels Schlauchkupplungen an einen in der Nähe liegenden Brauchwasserhahn angeschlossen.



Abbildung 14: Modell-Biomeiler mit Wärmeübertrager und Messstäben

Nach einem ersten Testversuch wurde festgestellt, dass die durchfließende Wassermenge und die Wassereingangstemperatur stark schwankten. Des Weiteren konnte festgestellt werden, dass der Querschnitt des Rohres nur zu einem Viertel mit Wasser durchflossen wurde. Um eine optimale Wärmeübertragung vom Rohr auf das Medium Wasser zu gewährleisten, ist



Abbildung 15: Wasserbehälter mit Zulaufleitung

aber ein Durchfluss über den gesamten Querschnitt erforderlich. Um dieses Problem zu beheben, wurde der Versuchsaufbau dahingehend geändert, dass das Wasser nun über einen Sammelbehälter eingespeist wird (siehe Abbildung 15). Dieser Sammelbehälter befindet sich ca. 70 cm oberhalb des Modell-Biomeilers und ist mit diesem über ein PE-Rohr verbunden. Der Massenstrom kann über einen Absperrhahn am Sammelbehälter reguliert werden. Am Ende des Wärmeübertragers wurde eine PVC Endkappe gesetzt und ein kleines Loch in das Rohr gebohrt, um einen möglichst kleinen Massenstrom zu ermöglichen. Das aufgeheizte Wasser wird in fünf Liter Messbehältern aufgefangen.

Um die Wärmeverluste des Modell-Biomeilers zu minimieren und um das Innere eines Biomeilers zu simulieren, wurde eine Isolierung an die Gitterbox angebracht (siehe Abbildung 16). Die Wärmedämmung wurde mittels einer Gewächshaus-Luftpolsterfolie realisiert. Diese wurde mit Hilfe von Schnüren, Kabelbindern und Gewebeband befestigt. Damit wurde eine Dämmstärke von ca. 5 cm erreicht. Die Isolierung wurde erst nach vier Tagen angebracht, um in der Startphase genügend Sauerstoff für das Aufheizen des Modell-Biomeilers zu gewährleisten.



Abbildung 16: Isolierung Modell-Biomeiler

Um den Modell-Biomeiler trotz Isolierung mit genügend Sauerstoff zu versorgen, wurden nachträglich an der Vorder- und Rückseite jeweils vier perforierte PE-Rohre eingebracht (siehe Abbildung 17). Die Rohrstücken haben eine Länge von 25 cm und wurden an der Vorderseite mit Gewebepband zugeklebt, um ein Eindringen des Substrats zu verhindern. Sie wurden 15 cm tief in den Modell-Biomeiler eingeschoben. Das Rohr hat einen Außendurchmesser von 3 cm.



Abbildung 17: Belüftungsrohre

Die vom Modell-Biomeiler ausgehenden Messleitungen wurden mit Hilfe der Fühlerstecker an einen Datenlogger vom Typ ALEMO 8590-9 der Firma Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH angeschlossen (siehe Abbildung 18). Das Messwerterfassungsmodul ist modular aufgebaut und hat neun Messeingänge pro Modul sowie zwei Ausgänge für Ausgangsmodule wie Analog-, Daten-, Trigger-, Relaiskabel und Speicher.

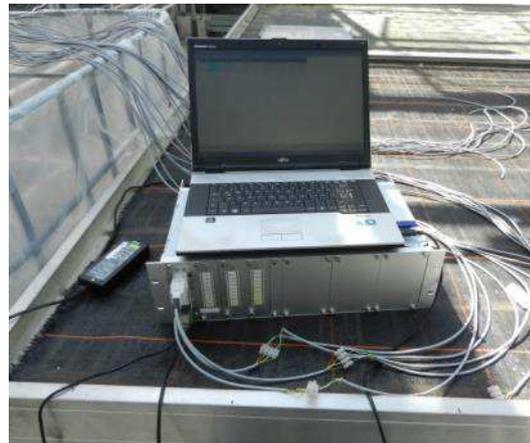


Abbildung 18: Datenlogger mit Notebook zur Datenauswertung

Über ein V24-Datenkabel wurden die erfassten Daten auf ein Notebook übertragen. Zur Messwerterfassung und Messdatenverarbeitung wurde die Software AMR-Control und AMR WinControl der Firma Ahlborn verwendet. Die Software AMR-CONTROL dient zur einfachen Abfrage und Änderung der gesamten Programmierung. Mit dem Programm AMR WinControl können Messwerte dargestellt, mathematisch verarbeitet, gespeichert, ausgedruckt und zur weiteren Verarbeitung in andere Programme exportiert werden.

3.3 Zusammensetzung und Herstellung des Substrats

Im Folgenden soll die Beschaffung und Zusammensetzung des Biomeiler-Substrats erläutert werden. Der Biomeiler wurde mit einem Kubikmeter Baum- und Strauchschnitt sowie einem zehnpromzentigen Anteil Pferdemist aufgesetzt (siehe S. 9). Bei einer Dichte des Baum- und Strauchschnittes von 0,3 t/m³⁴⁸ ergibt sich so eine Menge von 30 kg.



Abbildung 19: Weiden vor dem Häckseln

Das Schnittholz wurde dem Landschaftslehrpark der FH Erfurt entnommen. Hierbei wurde aus einer Weidenreihe Astmaterial mit einem Durchmesser von 3 bis 10 cm auf Stock gesetzt (siehe Abbildung 19). Es kamen die folgenden Weidenarten zur Anwendung:

- Ohr-Weide (*Salix aurita*)
- Aschweide (*Salix cinerea*)
- Ppurweide (*Salix pupurea*)

Somit konnten die bestehenden Ressourcen des Landschaftslehrparks genutzt werden. Bei allem Material handelte es sich um Frischholz mit grüner Rinde.

Die Zerkleinerung erfolgte mit einem Scheibenradhacker vom Typ Schliesing 200 MX mit Handbeschickung durch eine Arbeitskraft. Das gehäckselte Material wurde anschließend über den Auswurfkanal der Maschine auf die Ladefläche eines Multicars geblasen. Ein Teil der Blattmasse wurde am Stamm belassen, um einen zusätzlichen

⁴⁸ Gutjahr, A. & Rau, C. 2013, S.9

Stickstoffeintrag zu generieren. Dabei ist darauf geachtet worden, dass der Blattanteil nicht überwiegt, da es dadurch zu Verklumpungen im Biomeiler kommen kann.

Die Geometrie des gehäckselten Schnittholzes lässt sich nicht einheitlich beschreiben. Das Material ist aufgrund seines hohen Wassergehalts und der kleinen Durchmesser der entnommenen Äste, sehr zerfasert (siehe Abbildung 20). Die Durchmesser des Hackgutes wurden mit Hilfe der Korngrößenbestimmung nach



Abbildung 20: Gehäckseltes Schnittholz

DIN 18123 bestimmt (siehe auch S.36). In Abbildung 21 ist zu erkennen, dass ein Großteil des Materials einen Durchmesser von 4 bis 2 mm hat. Die Teilchenlänge liegt zwischen 2-150 mm.

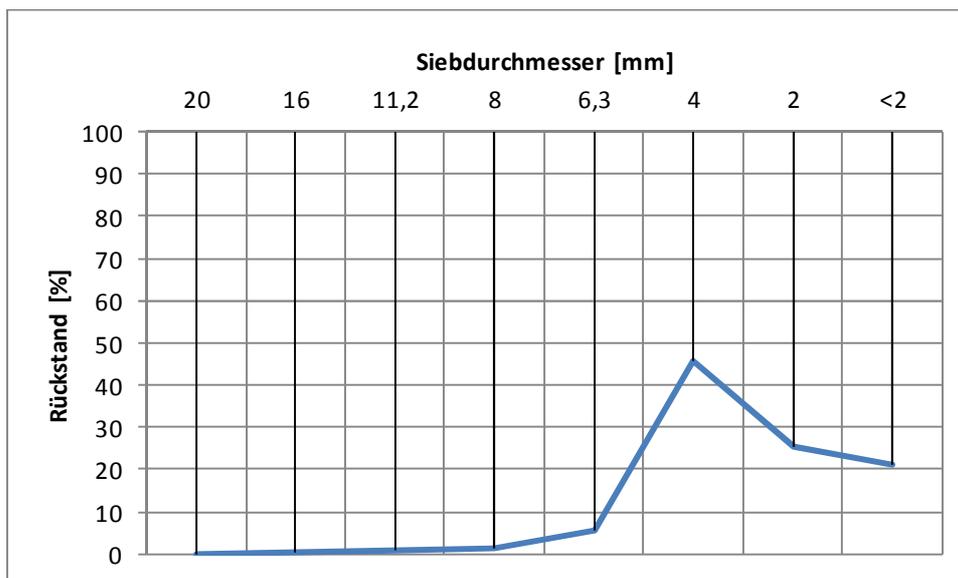


Abbildung 21: Korngrößenverteilung des Hackgutes nach DIN 18123

Vor der Befüllung des Modell-Biomeilers wurde das Material in der Nähe des Versuchsstandortes abgekippt und mit Pferdemist vermischt. Der Pferdemist wurde von einer örtlichen Pferdepenne bezogen. Bezüglich der beigefügten Menge des Mistes richtete man sich nach der Empfehlung einschlägiger Literatur. Hier wird von dem Richtwert eines dreißigprozentigen Anteils abgewichen und ein Anteil von zehn Prozent angesetzt. Dies liegt darin begründet, dass sich mit dem höheren Mistanteil nicht die gewünschten hohen Temperaturen von 70°C in der Heißrotphase erreichen lassen⁴⁹.

Die Materialmischung wurde nach ihrer Fertigstellung vorsichtig in den Modell-Biomeiler eingefüllt. Dabei wurde zum einen darauf geachtet, dass die Messfühler der Messstäbe nicht verbogen werden und zum anderen, dass der Wärmeübertrager in seiner eingemessenen Position bleibt. Nachdem das Substrat in den Modell-Biomeiler eingebracht wurde, wurde es mit einer Gießkanne befeuchtet, um eine Sättigung mit Wasser zu erreichen. Die optimale Wassermenge wurde in Anlehnung an die einschlägige Literatur mit einem Drittel im Verhältnis zur Substratmenge angesetzt⁵⁰.

Unter Berücksichtigung der Feuchtigkeit des Ausgangsmaterials ergab sich so eine Wassermenge von 250 Litern. Die überschüssige Flüssigkeit, die nicht vom Holz aufgenommen werden konnte, sammelte sich in der PE-Folie an der hinteren Aussparung der Gitterbox. Daraufhin wurde an dieser Stelle ein Loch in die Folie gestochen um die angesammelte Sickersaft aufzufangen.



Abbildung 22: Aufgefangener Sickersaft

Hierbei konnten nach zwei Tagen zehn Liter Sickersaft gesammelt werden (siehe Abbildung 22). Der Sickersaft wurde anschließend wieder auf den Modell-Biomeiler aufgebracht. Dies ist ein wichtiger Schritt, um das Ausschwemmen von wichtigen Nährstoffen bzw. Mikroorganismen zu verhindern.

⁴⁹ Vgl. Stang, M. 2013, S.2

⁵⁰ Vgl. Stang, M. 2013, S.5

3.4 Messungen und Analysen

3.4.1 Temperaturmessungen

Die Temperatur ist ein wichtiger Indikator für die Prozesse, die innerhalb des Biomeilers ablaufen. Um diese Prozesse erfassen zu können, wurden im Modell-Biomeiler umfangreiche Temperaturmessungen vorgenommen. Die Temperaturen im Inneren des Modell-Biomeilers wurden mit folgenden Messstäben, dargestellt in Tabelle 7, erfasst (siehe auch Abbildung 9 u. 10, S.24).

Tabelle 7: Messstäbe mit Temperaturfühlern

	Mess- stellen-Nr.	Höhe		Mess- stellen-Nr.	Höhe		Mess- stellen-Nr.	Höhe
Mess- stab Mitte	0.70	15 cm	Mess- stab Halb	0.4	15 cm	Mess- stab Rand	0.8	15 cm
	0.10	25 cm		0.14	25 cm		0.18	25 cm
	0.1	35 cm		0.5	35 cm		0.20	35 cm
	0.11	45 cm		0.15	45 cm		0.30	45 cm
	0.2	55 cm		0.6	55 cm		0.21	55 cm
	0.12	65 cm		0.16	65 cm		0.31	65 cm
	0.3	75 cm		0.7	75 cm		0.22	75 cm
0.13	85 cm	0.17	85 cm	0.32	85 cm			

Zusätzlich wurden im Inneren des Modell-Biomeilers vier weitere Temperaturfühler eingebracht, um den Wärmeübergang vom Substrat auf das Wärmeübertragerrohr darzustellen. Wie in Abbildung 23 ersichtlich, wurde ein Temperaturfühler direkt auf das Rohr geklebt. Weitere wurden im Abstand von 1 cm, 4 cm und 7 cm vom Rohr angebracht.



Abbildung 23: Temperaturfühler am Wärmeübertragerrohr

Zur Bestimmung der abgenommenen Wärmemenge wurden darüber hinaus Temperaturfühler am Ein- und Ausgang des Wärmeübertragers angebracht (siehe Abbildung 24 und 25). Sie wurden über vorher gebohrte Löcher eingebracht und anschließend mit einem Kunststoffkleber wieder verdichtet. Das Fühlerkabel wurde mit einem Kabelbinder befestigt, um eine Zugentlastung zu erreichen.



Abbildung 24: Temperaturfühler Wärmeübertragerausgang



Abbildung 25: Temperaturfühler Wärmeübertragereingang

Die Raumtemperatur in der Gewächshaus-Kabine wurde mit einem belüfteten Temperaturfühler gemessen (siehe Abbildung 26). Zur Vermeidung von Messfehlern durch Sonneneinstrahlung ist in der Vorrichtung ein kleiner Ventilator eingebaut.



Abbildung 26: Raumtemperaturfühler

3.4.2 Bestimmung der Korngrößenverteilung des Häckselgutes

C:\DATLAB\WINKORN\BIOMEILER.LAB

 FACHHOCHSCHULE ERFURT UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES	Zentrallabor Chemie Bereich Bodenphysik Altonaer Str. 25 99085 Erfurt	Prüfungs-Nr.: Anlage: zu:		
Bestimmung der Korngrößenverteilung Naß-/Trockensiebung nach DIN 18123				
Prüfungs-Nr.: Bauvorhaben: Biomeiler Ausgeführt durch: Scheller, Daniel am: 11.08.2014 Bemerkung:	Entnahmestelle: Station: m rechts der Achse Entnahmetiefe: m unter GOK Bodenart: Art der Entnahme: Entnahme am: durch:			
Siebanalyse: Einwaage Siebanalyse me: 3257,10 g Abgeschlämmer Anteil ma: 0,00 g Gesamtgewicht der Probe mt: 3257,10 g				
	Siebdurchmesser [mm]	Rückstand [g]	Rückstand [%]	Durchgang [%]
1	20,000	0,00	0,00	100
2	16,000	4,60	0,14	100
3	11,200	29,30	0,88	99
4	8,000	42,00	1,26	98
5	6,300	181,10	5,42	92
6	4,000	1521,70	45,53	47
7	2,000	850,80	25,46	21
	Schale	712,40	21,32	0
Summe aller Siebrückstände:		S =	3341,90 g	Größtkorn [mm]: 20,00
Siebverlust:		SV = me - S =	-84,80 g	
		SV' = (me - S) / me * 100 =	-2,60 %	
Bemerkungen:				

© By IDAT-GmbH 1996 - 2013 V4.23 4834

Tabelle 8: Bestimmung der Korngrößenverteilung nach DIN 18123

Tabelle 8 zeigt die Ergebnisse der Siebanalyse. Das mit dem Scheibenradhacker hergestellte Häckselgut wurde im Trockenschrank bei 60 °C innerhalb von drei Tagen getrocknet. Anschließend wurde mittels einer Siebanalyse nach DIN 18123 die Korngrößenverteilung ermittelt. Die Analyse wurde im Zentrallabor Chemie



Abbildung 27: Siebanalyse nach DIN 18123

Bereich Bodenphysik an der FH Erfurt durchgeführt. Zur Anwendung kamen Metallsiebe mit quadratischen Maschen. Das Material wurde stufenweise abwärts durchgesiebt und die Rückstände abgewogen (siehe Abbildung 27).

3.4.3 Labortechnische Analyse der Nährstoffe im Substrat

Die chemisch-stofflichen Parameter, mit Ausnahme der Bestimmung des pH-Wertes, wurden in den Laboren der Abteilung Futtermittel- und Produktprüfung der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL) nach den in Tabelle 9 aufgeführten Verfahren und Normen durchgeführt:

Tabelle 9: Labortechnische Analyse der Nährstoffe im Substrat

 Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft	
<p>Teilprüfbericht für Auftrag 2039/14</p> <p>Auftraggeber: Fachhochschule Erfurt Fachrichtung Gartenbau Dr. Blankenburg PF 45 01 55 99051 Erfurt</p> <p>Probenart: Kompost Pflanzen <i>v. 08.07.2014</i></p> <p>Probenahme: Auftraggeber</p>	<p>Referat Futtermittel- und Produktprüfung</p> <p>Eingangsdatum: 09.07.2014 Prüfungszeitraum: 10.07.2014 bis: 22.07.2014 Ausgangsdatum: 22.07.2014</p>

Prüfverfahren

Parameter	Verfahren	Norm
Trockensubstanz	im Trockenschrank	VO(EG) 152/2009, ANHANG III, A
Gesamt-Stickstoff	mit Kjeldahldestillation	VO(EG) 152/2009, ANHANG III, C
Ca (RFA)	mit Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA)	HAUSMETHODE SOP V1-260-01
P (RFA)	mit Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA)	HAUSMETHODE SOP V1-260-01
Na (RFA)	mit Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA)	HAUSMETHODE SOP V1-260-01
Mg (RFA)	mit Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA)	HAUSMETHODE SOP V1-260-01
K (RFA)	mit Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA)	HAUSMETHODE SOP V1-260-01
Cu (RFA)	mit Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA)	HAUSMETHODE SOP V1-260-01
Mn (RFA)	mit Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA)	HAUSMETHODE SOP V1-260-01
Zn (RFA)	mit Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA)	HAUSMETHODE SOP V1-260-01
Fe (RFA)	mit Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA)	HAUSMETHODE SOP V1-260-01
S (RFA)	mit Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA)	HAUSMETHODE SOP V1-260-01
Cl (RFA)	mit Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA)	HAUSMETHODE SOP V1-260-01
C	Gesamtkohlenstoff mit Elementaranalyse	AN-A-220205-D-01 (ELEMENTAR)

3.4.4 pH-Wert-Bestimmung

Die pH-Wert-Bestimmung wurde mit dem Messgerät pH AGRAR 2000 der Firma Stelzner durchgeführt. Über eine pH-Glaseinstechelektrode konnte die Bestimmung des pH-Wertes aufgrund der hohen Feuchte des Substrats durch eine Direktmessung erfolgen. Die Messung erfolgte an zwei Stellen im Zentrum des Modell-Biomeilers und im Randbereich auf einer Höhe von ca. 60 cm.

4. Versuchsablauf und Ergebnisse

4.1 Temperaturentwicklung

Im Nachfolgenden werden die Temperaturverläufe des Modell-Biomeilers chronologisch dargestellt. Die Zeitabschnitte, in denen eine kontinuierliche Entwicklung erkennbar war, wurden zusammengefasst.

Tag 1 bis 3:

Temperaturmessstab Mitte: Unmittelbar nach der Einbringung und Bewässerung des Substrats stiegen die Temperaturen im Versuchs-Biomeiler kontinuierlich an (siehe Abbildung 28). Innerhalb von drei Tagen wurde auf einer Höhe von 65 cm eine Maximaltemperatur von 62 °C erreicht.

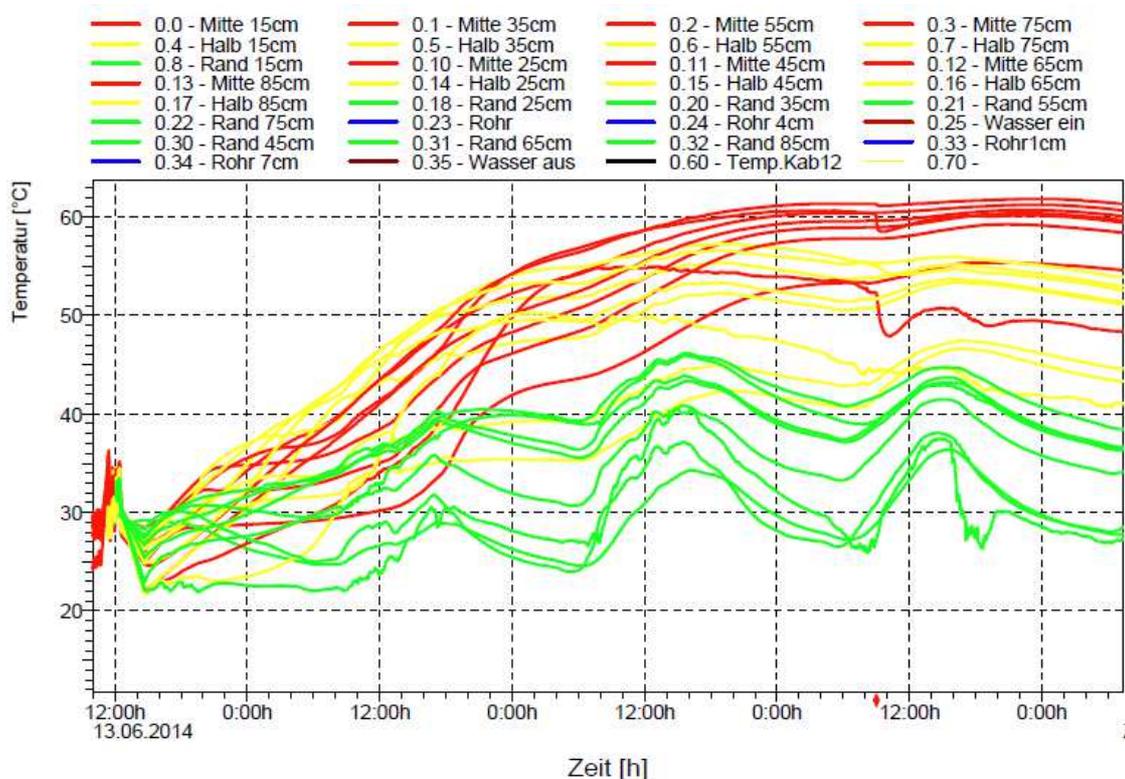


Abbildung 28: Aufheizphase des Modell-Biomeilers

Auf einer Höhe von 15 cm und 85 cm wurde nach zwei Tagen eine Temperatur von ca. 55 °C und 50 °C gemessen. An der höchsten Messstelle kommt es aufgrund von Sonneneinstrahlung und nachträglicher Bewässerung zu Temperaturschwankungen.

Temperaturmessstab Halb: An dieser Position wurden nach zwei Tagen die Maximalwerte erreicht. In den Höhen von 35 bis 75 cm lag die mittlere Temperatur bei 55 °C. In Bodennähe und an der Oberfläche entstand eine mittlere Temperatur von 45 °C.

Temperaturmessstab Rand: Die Temperatur im Randbereich lag nach zwei Tagen bei maximal 46 °C in einer Höhe von 65 cm und bei der tiefsten Temperatur von 35 °C auf einer Höhe von 15 cm. Auffallend sind tageszeitenabhängige Schwankungen. Diese lassen sich vermutlich auf den Einfluss der Umgebungstemperatur zurückführen. Die später installierte Messung der Umgebungstemperatur zeigt ab dem vierten Tag eine entsprechende Abhängigkeit. Die Temperaturmessstäbe Halb und Mitte sind von den Schwankungen der Umgebungstemperatur kaum bzw. nicht erkennbar abhängig.

Tag 4 bis 7:

Während der Vorversuchswoche wurde der Versuchsaufbau um die Isolierung erweitert und es wurden die Messstellen Temp.Kab12 (Umgebungstemperatur), Wasser Ein –und Ausgangstemperatur sowie die Messstellen am Wärmeübertrager aufgeschaltet. Des Weiteren wurde der Wärmeübertrager bei ersten Entnahmeversuchen auf Dichtheit überprüft und der Massenstrom eingestellt. Dabei wurde dem Modell-Biomeiler drei Mal Wärme für jeweils eine Stunde entnommen. Auf die Temperaturverläufe während der Entnahmeversuche wird auf Seite 49 genauer eingegangen.

In Abbildung 29 ist zu erkennen, dass bis Tag 6 die im Vorfeld beschriebenen Temperaturen weitestgehend gehalten werden konnten. Ab Tag 6 ist ein leichtes Abfallen der Temperaturen aller Messstäbe zu erkennen. Trotzdem am vierten Tag die Isolierung angebracht wurde, um den Modell-Biomeiler möglichst unabhängig von der

Umgebungstemperatur zu machen, ist die Abhängigkeit der Messstäbe im Außenbereich, wenn auch leicht abgeschwächt, weiterhin zu erkennen.

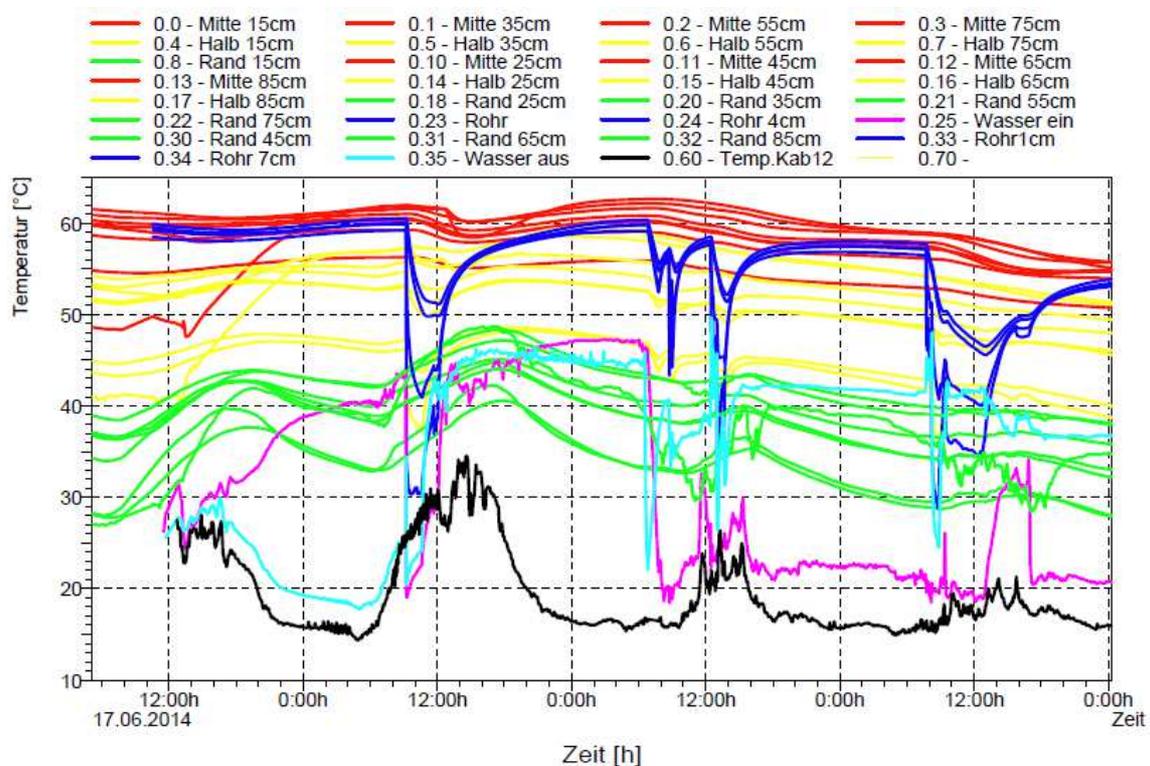


Abbildung 29: Ausschnitt der Vorversuchswoche

Tag 8 bis 19:

In diesem Zeitraum fiel die Temperatur aller Messstäbe kontinuierlich weiter ab und erreichte am Tag 19 ihr Minimum (siehe Abbildung 30). Am zehnten Tag sollte laut Versuchsplan die erste Versuchswoche starten. Diese musste nach zwei Tagen abgebrochen werden, da die Temperaturen des Modell-Biomeilers stetig abfielen und ein weiterer Wärmeentzug diese Entwicklung nur verstärkt hätte. In diesem Zeitraum wurde dem Modell-Biomeiler zweimal für jeweils eine Stunde Wärme entnommen. Nach etwa 14 Tagen erreichte der Modell-Biomeiler in der Mitte die kritische Temperatur von 38 °C (siehe Seite 18).

Temperaturmessstab Mitte: Die Temperaturen lagen hier nach Erreichung des Temperaturminimums auf einer Höhe von 75 cm bei 33 °C und auf einer Höhe von 15 cm bei 26 °C.

Temperaturmessstab Halb: Hier haben sich die Temperaturen weitestgehend der Mitte angeglichen bzw. liegen leicht unter der Mitte und haben ein Temperaturminimum von 23 °C.

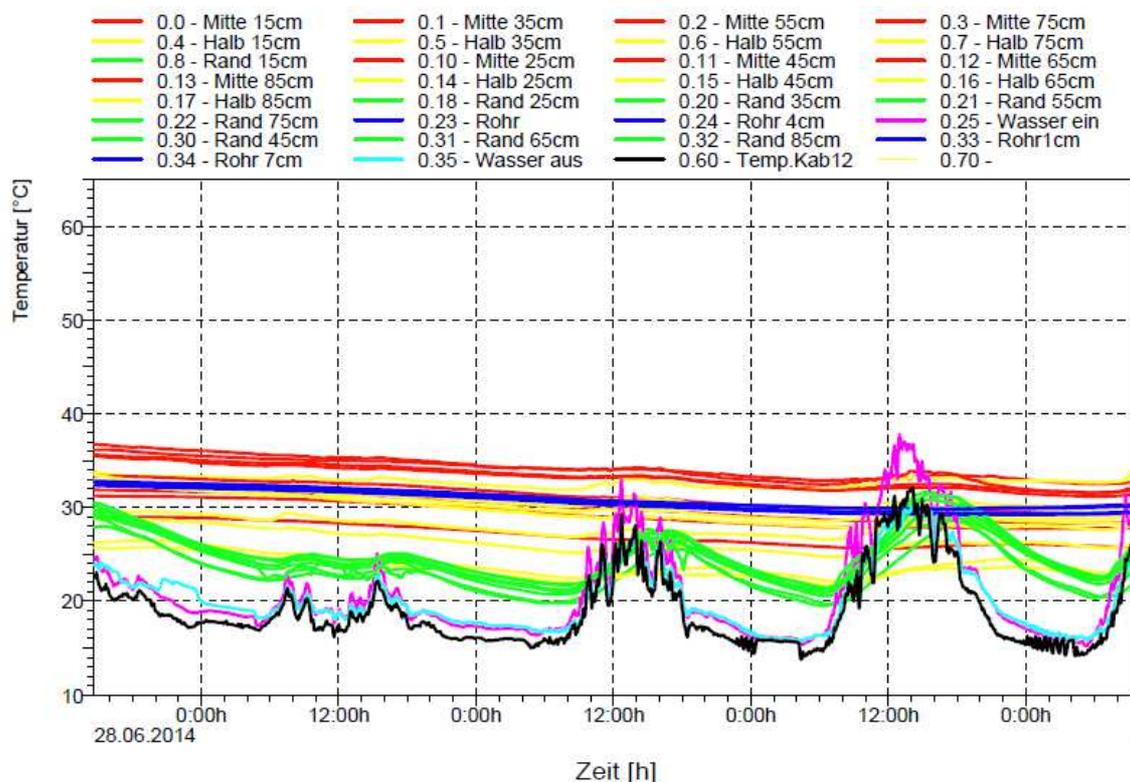


Abbildung 30: Biomeiler am Tag 15 bis 18

Temperaturmessstab Rand: Die Temperaturen liefen weiterhin synchron mit dem Tagesgang der Umgebungstemperatur. Die Temperaturen im Randbereich waren dabei sehr gebündelt. Die höhenbedingte Differenz der Temperaturen war sehr gering und betrug zwischen oben und unten in etwa zwei Kelvin.

Aufgrund der Vermutung, dass durch die angebrachte Isolierung dem Modell-Biomeiler der benötigte Sauerstoff fehlte, wurden am zwölften Tag die auf Seite 30

beschriebenen Belüftungsrohre in den Meiler eingebracht. Bedauerlicherweise konnte aufgrund dieser Optimierung keine direkt erkennbare Verbesserung der Temperaturen festgestellt werden.

Tag 19 bis 37:

Aufgrund der niedrigen Temperaturen wurde an Tag 19 der Versuch unternommen, mittels einer Zuckerlösung den Modell-Biomeiler mit Glucose anzureichern und dadurch die Mikroorganismen-tätigkeit anzuregen. Dazu wurden 200 g handelsüblicher Haushaltszucker in 10 Liter Wasser aufgelöst und dem Modell-Biomeiler zugegeben. Des Weiteren wurde eine transparente PE-Lochfolie aufgebracht um das Austrocknen der Oberfläche des Biomeilers zu verhindern.

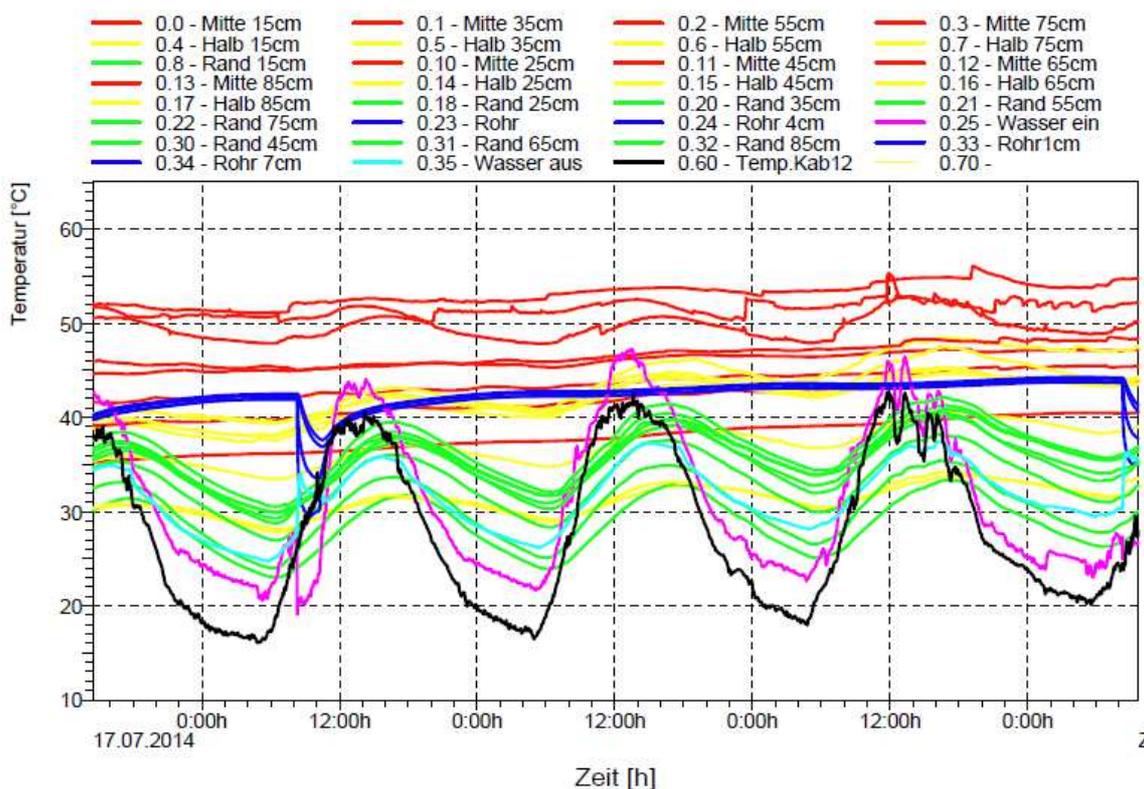


Abbildung 31: Tag 34 bis 37

Die Temperaturen stiegen ab Tag 20 wieder kontinuierlich an und erreichten nach über zwei Wochen an Tag 37 ein Maximum von 55 °C (Temperaturmessstab Mitte, Höhe

65cm). Dies wurde möglicherweise durch das Ansteigen der Umgebungstemperatur auf 40 °C in der Mittagszeit begünstigt. In dieser Zeit wurde wieder mit den Entnahmeversuchen begonnen (siehe Abbildung 31). Dem Modell-Biomeiler wurde drei Mal für jeweils zwei Stunden Wärme entnommen.

Mitte: Im Vergleich zur Phase vor dem Temperaturabfall wiesen die Messstellen des mittleren Messstabs größere Temperaturspannen in Abhängigkeit von der Höhe auf. Die mittleren Temperaturen lagen hier an Tag 37 auf einer Höhe von 65 cm bei 55 °C und auf einer Höhe von 15 cm bei 40 °C.

Halb: Die mittleren Temperaturen lagen hier an Tag 37 auf einer Höhe von 45 cm bei 45 °C und auf einer von 15 cm bei 33 °C.

Rand: Die mittleren Temperaturen lagen hier an Tag 37 auf einer Höhe von 85 cm bei 40 °C und auf einer von 15 cm bei 27 °C.

Tag 38 bis 51:

Mitte: Die Temperaturen erreichten an Tag 41 nach einem leichten Abfall in der Mitte zwischen 50 °C auf einer Höhe von 65 cm und 40 °C auf einer Höhe von 15 cm (siehe Abbildung 32). Zugleich ist auch ein leichter Rückgang der Umgebungstemperatur zu erkennen. In diesem Zeitraum wurde dem Modell-Biomeiler drei Mal für jeweils drei Stunden Wärme entnommen.

Halb: Die mittleren Temperaturen lagen hier an Tag 41 auf einer Höhe von 55 cm bei 45 °C und auf einer von 15 cm bei 30 °C.

Rand: Die mittleren Temperaturen lagen hier an Tag 41 auf einer Höhe von 85 cm bei 35 °C und auf einer von 15 cm bei 25 °C.

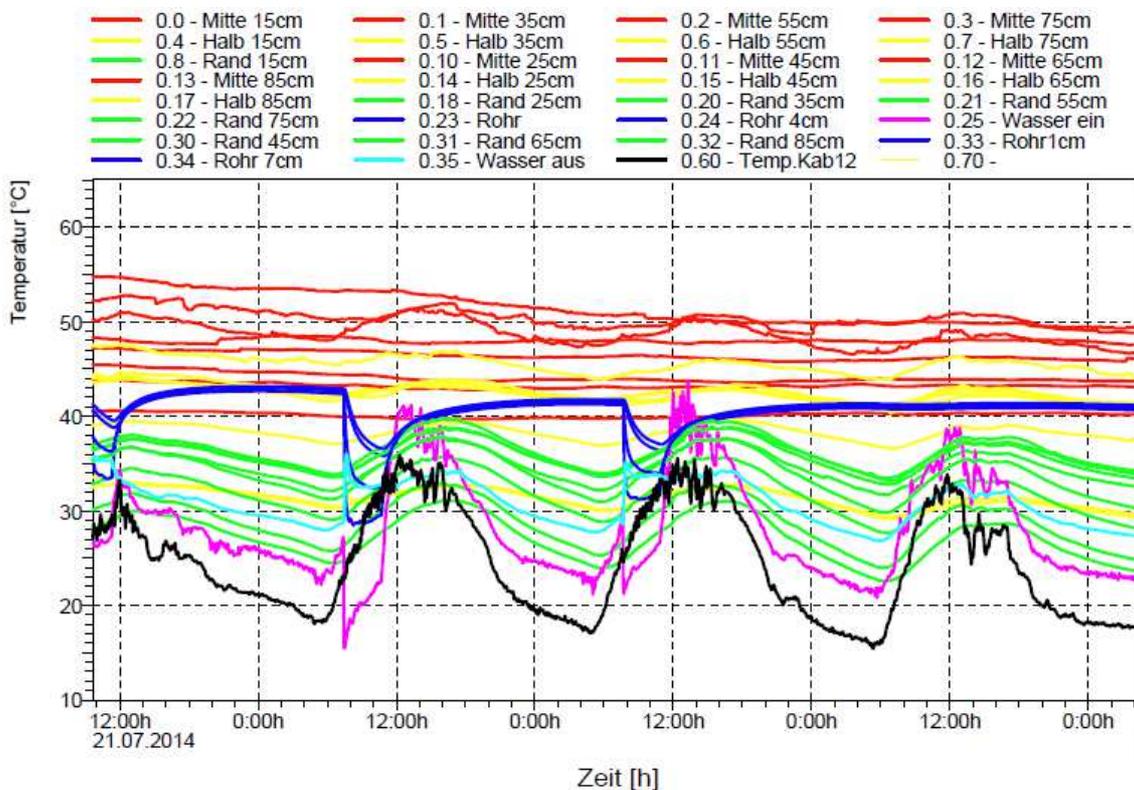


Abbildung 32: Tag 38 bis 41

Tag 52 bis 63

In dieser Zeit fiel das Temperaturmaximum in der Mitte auf einer Höhe von 75 cm weiter ab und pendelte sich nach ca. 10 Tagen bei 45 °C ein. Im Vergleich zur Periode von Tag 19 bis 37 erreichte die Umgebungstemperatur ein deutlich mäßigeres Tagesmaximum von mittleren 25 °C (siehe Abbildung 33). In diesem Zeitraum wurde dem Modell-Biomeiler fünf Mal für jeweils vier Stunden Wärme entnommen.

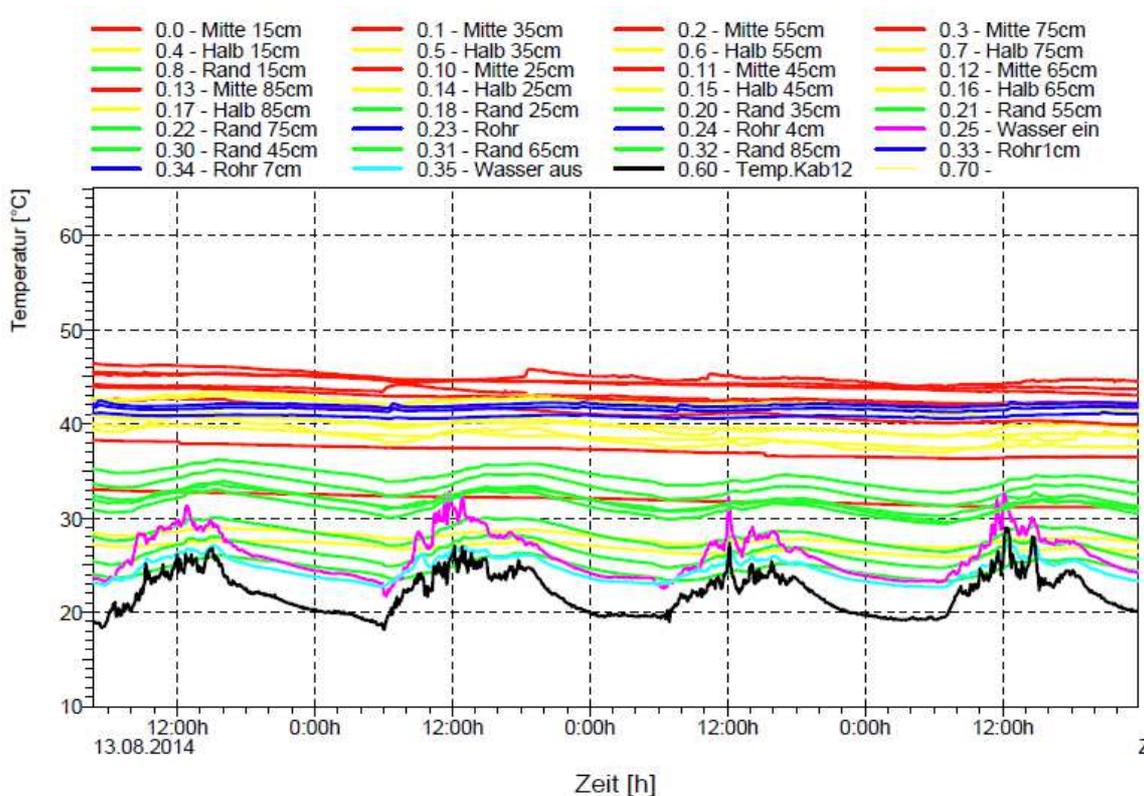


Abbildung 33: Tag 60 bis 63

Mitte: Die Temperaturen erreichten an Tag 63 zwischen 45 °C und 40 °C auf einer Höhe zwischen 35 cm und 85 cm. Auf einer Höhe von 15 cm und 25 cm lagen die Temperaturen bei 30 °C und 36 °C.

Halb: Die mittleren Temperaturen lagen hier an Tag 63 auf einer Höhe von 55 cm bei 40 °C und auf einer von 15 cm bei 25 °C.

Rand: Die mittleren Temperaturen lagen hier an Tag 63 auf einer Höhe von 65 cm bei 30 °C und auf einer von 15 cm bei 25 °C.

4.1.1 Temperaturverhalten während der Wärmeentnahme

An dieser Stelle soll beispielhaft gezeigt werden, wie sich die Temperatur des Modell-Biomeilers während der Wärmeentnahme verhielt. Dazu wird der Verlauf bei einer Entnahmezeit von 1 bis 4 Stunden sowie 2 Tagen ausgewertet. Dabei wurden die Temperaturen am Rohr (R) und im Abstand von 1 cm, 4 cm und 7 cm untersucht (R1, R4, R7). Des Weiteren wurden die Messstäbe Halb und Mitte betrachtet. Der Randbereich wurde außen vor gelassen, da sich hier keine signifikanten Änderungen zeigten.

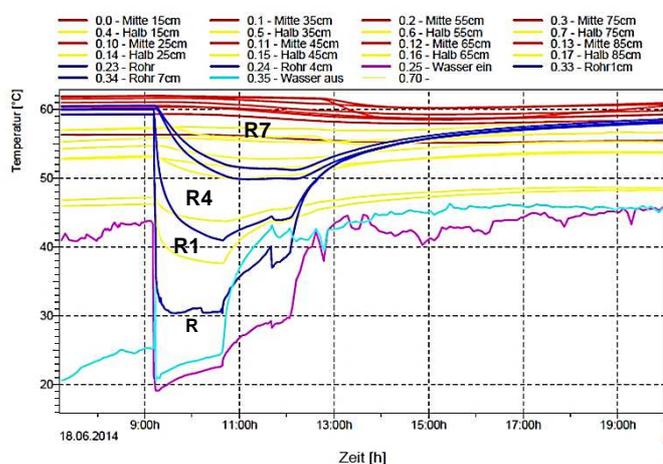


Abbildung 34: Wärmeentnahme eine Stunde

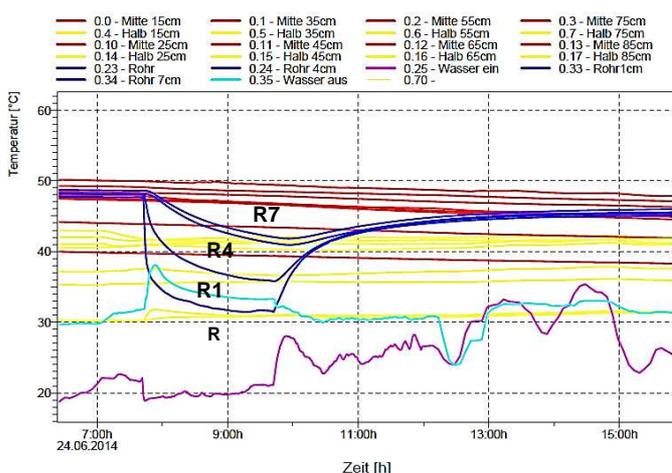


Abbildung 35: Wärmeentnahme zwei Stunden

Entnahmezeit eine Stunde:

Die Temperatur am Rohr fiel um 30 Kelvin ab und erreichte nach 10 h wieder 58 °C (siehe Abbildung 34). In Abhängigkeit zur größer werdenden Distanz zum Rohr fielen die Temperaturen flacher ab und erreichten nach 10 h wieder Ausgangstemperatur. Die Temperaturen am Messstab Halb fielen im Mittel um fünf Kelvin ab. Die Temperaturen in der Mitte fielen um ca. 1 Kelvin.

Entnahmezeit zwei Stunden:

Die Temperatur am Rohr fiel um ca. 15 Kelvin ab und erreichte nach 5 h wieder 45 °C (siehe Abbildung 35). In Abhängigkeit zur größer werdenden Distanz zum Rohr fielen die Temperaturen flacher ab und erreichen nach 5 h wieder nahezu Ausgangstemperatur. Der leichte Abfall der Messstäbe Mitte und Halb kann nicht erkennbar mit der Entnahme in Verbindung gebracht werden.

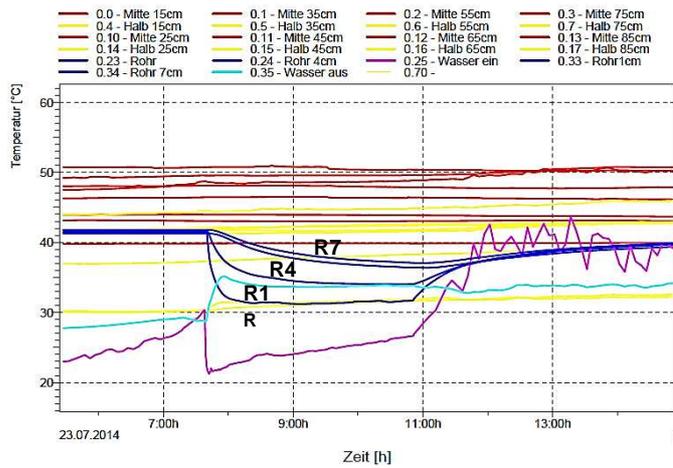


Abbildung 36: Entnahmezeit drei Stunden

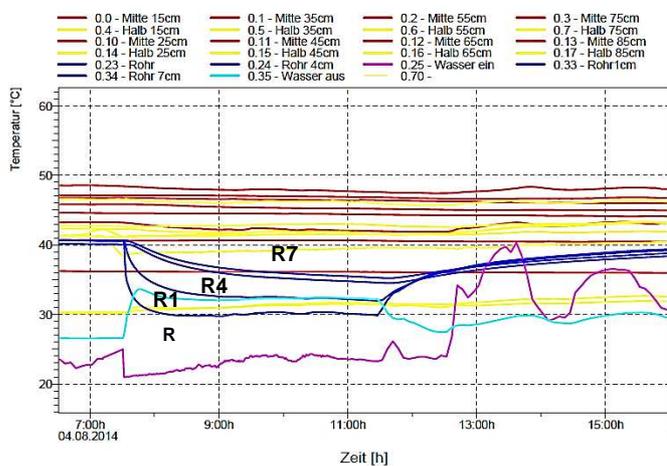


Abbildung 37: Entnahmezeit vier Stunden

Entnahmezeit drei Stunden:

Die Temperatur am Rohr fiel um ca. 10 Kelvin ab und erreichte nach 6 h wieder 42 °C (siehe Abbildung 36). In Abhängigkeit zur größer werdenden Distanz zum Rohr fielen die Temperaturen flacher ab und erreichten nach 6 h wieder nahezu Ausgangstemperatur. Die Temperaturen der Messstäbe Mitte und Halb blieben unverändert.

Entnahmezeit drei Stunden:

Die Temperatur am Rohr fiel um ca. 10 Kelvin ab und erreichte nach 10 h wieder 40 °C (siehe Abbildung 37). In Abhängigkeit zur größer werdenden Distanz zum Rohr fielen die Temperaturen flacher ab und erreichten nach 10 h wieder Ausgangstemperatur. Die Temperaturen der Messstäbe Mitte blieben unverändert. Die Temperaturen am Messstab Halb fielen in der Nähe des Wärmeübertragers um 2 Kelvin.

Entnahmezeit 48 Stunden:

Am Ende der Versuchszeit wurde eine Dauerentnahme von 48 Stunden durchgeführt, um den Einfluss der Entnahme auf den Wärmehaushalt des Modell-Biomeilers besser beschreiben zu können (siehe Abbildung 38). Anders als bei den kurzen Entnahmezeiten konnte hier ein Absinken der Temperaturen der Messstäbe Mitte und Halb beobachtet werden. Damit ist die Abhängigkeit der Temperaturbereiche Mitte und Halb nachgewiesen. Sobald die Entnahme nach 48 Stunden beendet wurde, stiegen die Temperaturen stetig an und erreichten nach drei Tagen nahezu das Ausgangsniveau. Der Messstab Außen blieb davon weitgehend unberührt.

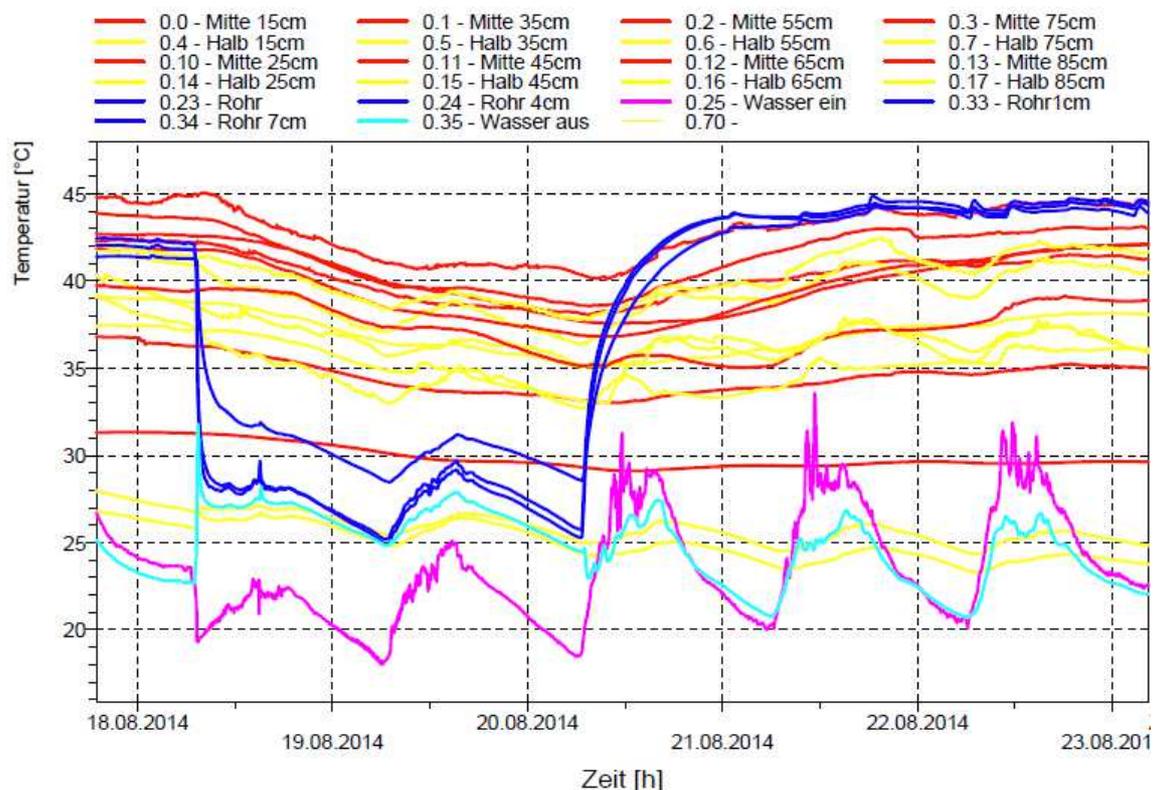


Abbildung 38: Entnahmezeit 2 Tage

Ausgehend von Tabelle 10 wurde mit dem Modell-Biomeiler im Versuchszeitraum eine Wärmemenge von 1,8 kWh erzeugt. Die Leistung variierte in Abhängigkeit der Temperatur des Biomeilers und lag im Mittel bei 43 Watt. Eine erwartete Ausgangstemperatur von 45 °C konnte nicht erreicht werden. Nur in der Anfangsphase wurde zwei Mal kurzzeitig eine mittlere Ausgangstemperatur von ca. 40 °C erzeugt.

4.3 Ergebnisse der Nährstoffanalyse des Substrates

Tabelle 11: Ergebnisse der Nährstoffanalyse

Biomeiler Nährstoffanalyse vom 18.06.2014														
Probenart	Gesamtstickstoff % der TM	C	Trockensubstanz % der FM	Ca (RFA) % der TM	P (RFA) % der TM	Na (RFA) mg/kg TM	Mg (RFA) % der TM	K (RFA) % der TM	Cu (RFA) mg/kg TM	Mn (RFA) mg/kg TM	Zn (RFA) mg/kg TM	Fe (RFA) mg/kg TM	S (RFA) % der TM	Cl (RFA) % der TM
Mitte	0,8	47,9	42,9	0,861	0,0938	71,4	0,082	0,465	4,8	44,7	64,5	296	0,0874	0,0188
Rand	0,79	48,3	43,7	0,923	0,102	53,6	0,0956	0,588	5,01	31,3	70,1	94,9	0,104	0,0099
Biomeiler Nährstoffanalyse vom 07.07.2014														
Probenart	Gesamtstickstoff % der TM	C	Trockensubstanz % der FM	Ca (RFA) % der TM	P (RFA) % der TM	Na (RFA) mg/kg TM	Mg (RFA) % der TM	K (RFA) % der TM	Cu (RFA) mg/kg TM	Mn (RFA) mg/kg TM	Zn (RFA) mg/kg TM	Fe (RFA) mg/kg TM	S (RFA) % der TM	Cl (RFA) % der TM
Mitte	0,61	48,2	32	0,803	0,0994	65,7	0,0925	0,466	4,24	38,4	60	129	0,0956	0,0112
Rand	0,72	48,2	32,9	0,93	0,111	55,5	0,0993	0,547	4,43	38,7	59,1	106	0,105	0,0118

Tabelle 11 zeigt die Ergebnisse der Nährstoffanalyse. Je Analyse wurden dem Modell-Biomeiler zwei Proben auf einer Höhe von 50 cm aus der Mitte und dem Randbereich entnommen. Die erste Substratanalyse wurde nach der Aufheizphase am 18.06.2014 durchgeführt. Die zweite Substratprobe wurde nach dem Abfall der Temperaturen am 07.07.2014 durchgeführt.

Das C/N-Verhältnis der entnommenen Proben der ersten Analyse lag in der Mitte wie auch im Randbereich bei 60:1. Dieser Wert ist auf den hohen Holzanteil zurückzuführen. Das Substrat hat mit einem Trockensubstanzgehalt von rund 40 % ausreichend Feuchtigkeit. Die Hauptnährstoffe liegen in einem guten Bereich. Die Schwermetalle Kupfer und Zink haben die Grenzwerte von 100 und 400 mg/kg⁵¹ nach der Bioabfallverordnung nicht überschritten.

Das C/N-Verhältnis der entnommenen Proben der zweiten Analyse lag in der Mitte bei 80:1 und im Randbereich bei ungefähr 70:1. Der Kohlenstoffanteil ist dabei gleich geblieben und der Gesamtstickstoff ist um 0,10 und 0,20 % der Teilmenge gesunken. Das Substrat hat mit einem Trockensubstanzgehalt von rund 30 % an Feuchtigkeit gewonnen. Dies ist auf die zusätzliche Wässerung während der kalten Phase zurückzuführen. Eine signifikante Änderung der Hauptnährstoffe ist nicht erkennbar. Auch die Schwermetalle Kupfer und Zink haben sich nicht erheblich geändert.

⁵¹ § 4 (3), BioAbfV von 2012.

4.4 Ergebnisse der pH-Wertmessung

Der pH-Wert wurde am Anfang, in der Mitte und am Ende des Versuchszeitraumes gemessen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 12 dargestellt:

Tabelle 12: pH-Wert des Substrats

	Tag 4	Tag 30	Tag 60
pH-Wert			
Rand, Höhe 60 cm	7,01	7,05	7,44
Mitte, Höhe 60 cm	5,90	6,84	7,00

Die ermittelten pH-Werte zeigen in der Mitte einen für die Kompostierung üblichen Verlauf (siehe auch S.15). Der pH-Wert hatte sich nach einer anfangs leicht sauren Periode bei rund 7 eingestellt. Im Randbereich lag der pH-Wert höher, da durch eine höhere Belüftung weniger CO₂ in diesem Bereich angereichert wurde.

5. Auswertung und Diskussion

An dieser Stelle werden die Versuchsdurchführung und die erzielten Ergebnisse im Hinblick auf die verwendete Methodik diskutiert. Ziel dieser Arbeit war es, auf der Grundlage eines Versuchsaufbaus, die Wärmeleistung eines Biomeilers in Abhängigkeit von dessen Größe zu bestimmen. Die in der Literatur gefunden Angaben bezüglich der Größe und Wärmeleistung eines Biomeilers sollten überprüft werden. Es lässt sich feststellen, dass die ermittelten Daten des Modell-Biomeilers nicht geeignet sind, um eindeutige Aussagen über die Wärmeleistung eines Biomeilers in Abhängigkeit von dessen Größe zu treffen. Es können lediglich generelle Angaben über den Funktion eines Biomeilers sowie die Auswirkungen der Wärmenutzung auf den Rotteprozess getroffen werden. Insofern ist eine Überprüfung der einschlägigen Literatur kaum sinnvoll.

Die Gründe, warum ein optimaler Verlauf des Versuchs nicht stattfinden konnte, sollen im Folgenden diskutiert werden. Dazu werden zwei Hauptgründe angenommen:

- Die erzeugte Wärmemenge war unerwartet niedrig und konnte nicht als Grundlage für eine repräsentative Datenauswertung genutzt werden.
- In der Mitte des Versuchszeitraumes kam es zu einem Temperaturabfall, was zum Abweichen vom Versuchsplan führte und somit die Auswertung erschwerte.

Ersteres kann auf zwei Ursachen zurückgeführt werden. Zum einen sollte durch die Isolierung erreicht werden, dass der Modell-Biomeiler relativ unabhängig von der Umgebungstemperatur und mit möglichst geringen Wärmeverlusten betrieben wird. Aufgrund der geringen Größe wurde angenommen, dass sich durch die Isolierung die Temperaturen Halb und Rand an die Mitte annähern und so eine optimale Wärmenutzung stattfinden kann. Dabei wurde vorausgesetzt, dass die Sauerstoffzufuhr über die Oberfläche des Modell-Biomeilers ausreicht. Die Auswertung der Ergebnisse zeigt jedoch, dass nach der Anbringung der Isolierung zunächst kaum Temperaturveränderungen in den Bereichen stattfanden. Des Weiteren konnte nicht

festgestellt werden, dass die Beeinflussung des Randbereichs durch die Umgebungstemperatur eingeschränkt wurde. Somit hat die Isolierung unter diesen Gesichtspunkten nicht die erhoffte Wirkung gezeigt. Eine Optimierung der Isolierung durch Anhebung der Dämmdicke und unter Verwendung anderer Materialien wie Dämmwolle, ist kritisch zu sehen, da, wie im Folgenden gezeigt wird, die Sauerstoffzufuhr für das Funktionieren des Biomeilers sehr wichtig ist. Es kann festgestellt werden, dass auf das Anbringen einer Isolierung bei weiteren Versuchen verzichtet werden kann.

...

Die verhältnismäßig niedrigen Temperaturen im Bereich Halb und Rand hatten demzufolge negative Auswirkungen auf den in diesem Bereich liegenden Wärmeübertrager, was als weitere Ursache für die geringen Wärmemengen gesehen werden kann. Das Einbringen des Wärmeübertragers in den Bereich der Mitte war aufgrund der geringen Größe des Modell-Biomeilers nicht realisierbar. Ein Ansatz zur Lösung dieses Problems wäre die Vergrößerung des Modell-Biomeilers auf 10 m³. Hierbei bestehen die Vorteile darin, dass aufgrund des größeren Volumens der Randbereich als natürliche Isolierung fungieren kann und der Platz für eine mittige Einbringung des Wärmeübertragers vorhanden ist. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass ein Randabstand von 30 cm zu allen Seiten des Wärmeübertragers nicht ausreichend ist und mindestens auf 50 cm erhöht werden muss. Der Nachteil dieser Variante wäre der erhöhte Platzbedarf und der erhöhte messtechnische Aufwand. Im Rahmen der gegebenen Möglichkeiten dieser Arbeit war ein Biomeiler in dieser Größenordnung nicht realisierbar. Es wäre weiterhin denkbar, den Wärmeübertrager anders zu gestalten, um trotz geringer Größe die Temperaturen optimal nutzen zu können. Dabei würde sich ein vertikales Einbringen des Wärmeübertragungsrohres anbieten. Allerdings müsste dabei weiterhin mit einer starken Beeinflussung von außen aufgrund der fehlenden natürlichen Isolation im Randbereich gerechnet werden.

Im Folgenden sollen die Ursachen für das Abfallen der Temperaturen im Verlaufe der ersten Versuchswoche diskutiert werden. Zum einen könnte dies an der fehlenden Sauerstoffversorgung durch die Isolierung liegen. Zum anderen könnte eine Überlastung durch zu starke Entnahme dafür verantwortlich gewesen sein.

Ersteres ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass die Mikroorganismenaktivität im aeroben Randbereich des Biomeilers durch das Fehlen von Sauerstoff gestört wurde.

Dafür würde sprechen, dass die Temperaturen unmittelbar nach der Anbringung der Isolierung abgefallen sind. Trotz der geringen Größe des Modell-Biomeilers muss davon ausgegangen werden, dass die Sauerstoffzufuhr nur über die Oberfläche nicht ausreichte. Es ist anzunehmen, dass der fehlende Sauerstoff die Tätigkeit der aeroben Mikroorganismen einschränkte, da er für deren Umsetzungsprozesse unerlässlich ist. Geht man davon aus, dass aerober und anaerober Bereich sich gegenseitig bedingen, könnte das Erlahmen der Umsetzungstätigkeiten im Randbereich Auswirkungen auf die mikrobakteriellen Prozesse in der nahezu anaeroben Mitte gehabt haben. Um dies zu belegen, müssten jedoch weitere mikrobiologisch begleitete Untersuchungen durchgeführt werden. Dies war im fachlichen Rahmen dieser Arbeit nicht möglich. Es lässt sich lediglich feststellen, dass dieses noch weitgehend unerforschte Feld für eine optimale Nutzung des Biomeilers unabdingbar ist. Außerdem wird es als sinnvoll erachtet, auch den Sauerstoffgehalt an mehreren Stellen vom Rand bis zur Mitte zu messen, um die aeroben und nahezu anaeroben Schichten abzubilden.

Ebenfalls denkbar wäre der Abfall der Temperaturen infolge einer zu starken Belastung durch die Wärmeabnahme am Anfang. Dies wird eher als unwahrscheinlich angesehen da der Entnahmeversuch mit einer Dauer von 48 h gezeigt hat, dass trotz starker Entnahme sich die Temperaturen nach einer gewissen Zeit wieder an das Ausgangsniveau angleichen. Allerdings muss eingeräumt werden, dass mit den Entnahmeversuchen möglicherweise zu früh begonnen wurde und eine Stabilisierung des mikrobiellen Gefüges noch nicht stattgefunden hat.

Die Ursachen für das erneute Ansteigen der Temperaturen in der Mitte des Versuchszeitraumes können nicht genau eingegrenzt werden, da zu diesem Zeitpunkt zwei Maßnahmen zur erneuten Steigerung der Temperaturen unternommen wurden. Zum einen wurde der Modell-Biomeiler mittels perforierten PE-Rohren zusätzlich belüftet. Bei der nachträglichen Analyse der Temperaturverläufe konnte jedoch keine unmittelbare Verbesserung festgestellt werden. Es besteht die Möglichkeit, dass durch das Erreichen eines bestimmten niedrigen Temperaturniveaus (angenommen werden 38°C) der Rotteprozess auch durch eine nachträgliche Sauerstoff Zufuhr nicht wieder in Gang gebracht werden kann. Als zweite Maßnahme wurde Glucose in Form von Zuckerlösung zugegeben. Da Glucose von den Mikroorganismen leicht abgebaut werden kann, sollte so die Mikroorganismen-tätigkeit wieder angeregt werden. Es wird

vermutet, dass die Zugabe von Glucose vor allem das Wachstum von mesophilen Pilzen fördert. Dafür spricht, dass wieder eine Temperatur zwischen 40 und 50 °C erreicht werden konnte und vermehrtes Pilzwachstum (wie beispielsweise Tintlingen) sichtbar wurde. Dies ist erfreulich, da weiterhin Wärme entnommen werden konnte, auch wenn die anfänglichen Spitzentemperaturen von 60 °C nicht mehr erreicht wurden. Es ist jedoch zu bedenken, dass Glucose schnell abgebaut wird, so dass die hohen Temperaturen voraussichtlich nicht lange vorhalten werden. Dies konnte im Versuchszeitraum nicht mehr untersucht werden.

Zuletzt soll darauf hingewiesen werden, dass die Nährstoffanalyse des Substrats ergab, dass es im Verlauf des Versuchszeitraums zu Stickstoffverlusten und damit einer Ausweitung des C/N-Verhältnisses von 60:1 auf 80:1 in der Mitte und von 60:1 auf 70:1 am Rand gekommen ist. Stickstoffverluste können zum Beispiel, begünstigt durch einen pH-Wert >7 in Form von Ammoniak (NH_3) auftreten. Die Ergebnisse der pH-Wert Messung sprechen dafür es konnte jedoch kein Ammoniak typischer Geruch festgestellt werden. Die Auswirkung dieser Stickstoffverluste, auf die Wärmeentwicklung konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht geklärt werden.

6. Fazit und Ausblick

Abschließend kann festgestellt werden, dass der Biomeiler dem Anspruch der im Eingangszitat des Geschäftsführers der Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe (FNR) Andreas Schütte genannten „verstärkte[n] Nutzung von Biomassen aus der Landschaftspflege“ und „energetische[n] Nutzung von Reststoffen“⁵² gerecht wird. Der Aufbau des Modell-Biomeilers zeigt, dass dies eine einfache Methode zur Wärmegewinnung aus den regional verfügbaren Materialien (Baum- und Strauchschnitt aus dem Landschaftslehrpark der FH Erfurt, Pferdemit vom örtlichen Pferdehof u.a.) darstellt.

Der Beginn der Versuchsphase verlief vielversprechend mit einer Spitzentemperatur von 62 °C. Der weitere Verlauf wies dann jedoch Unregelmäßigkeiten auf, so dass die gewonnenen Daten für eine wissenschaftliche Aus- und Verwertung nicht geeignet sind. Zum einen ist die erzeugte Wärmemenge unerwartet niedrig und zum anderen führte der Temperaturabfall in der Mitte des Versuchszeitraumes zum Abweichen vom Versuchsplan. Somit ist das Ziel der Arbeit nicht erreicht.

Allerdings konnten wertvolle Erkenntnisse für nachfolgende Versuche gewonnen werden. So sollte der Modell-Biomeiler eine Größe 10 m³ haben, um den mittleren Bereich mit hohen Temperaturen durch den Wärmeübertrager besser zu nutzen. Dieser kann dann durch den Biomeilerkern verlaufen. Hierbei darf die gegenseitige Abhängigkeit des aeroben Randbereichs und der nahezu anaeroben Mitte nicht außer Acht gelassen werden, was zu einer natürlichen Isolierung des Biomeilers führt. Hier rückt auch das mikrobielle Gefüge des Biomeilers in den Blickpunkt. Dafür wird eine mikrobiologische Begleitung (beispielsweise Pilzsporenmessung) weiterer Versuche als sinnvoll angesehen. Die Erfahrungen in diesem Erstversuch zeigen, dass es sich lohnt, nachfolgende Versuche anzustreben. Das Gewinnen wissenschaftlich fundierter Daten und eine effektive Nutzung des Biomeilers können diese Methode zu einem verlässlichen Instrument ressourcenschonender Energiegewinnung werden lassen.

⁵² Siehe Einleitung

Danksagung

Zunächst einmal möchte ich mich bei meinen Gutachtern Herrn Prof. Dr. Frank Setzer und Herrn Prof. Dr. Henning Bredenbeck für die Vergabe und die Betreuung der Masterarbeit sowie für die freundliche und engagierte Betreuung bedanken.

Mein weiterer Dank gilt der Thüringer Bioenergie-Region RAG Saale-Holzland e. V. die mich bei der Themenfindung unterstützte und mich auf das Thema Biomeiler aufmerksam machte.

Ebenfalls bedanke ich mich bei Herrn Jörg Pfoth für die tatkräftige Unterstützung beim Aufbau und der messtechnischen Betreuung des Modell-Biomeilers.

Für die Korrektur der Masterarbeit sowie für die vielen nützlichen Hinweise möchte ich mich besonders bei meiner Frau bedanken.

Literaturverzeichnis

Krogmann, U. (1994). Vergärung oder Kompostierung. Zitiert nach Kayser, G. (2003). Betriebliches Stoffstrom- und Abfallmanagement. In: Kramer/Strebel/Kayser (Hrsg.), Internationales Umweltmanagement. Bd. 3: Operatives Umweltmanagement im internationalen und interdisziplinären Kontext, S. 232-291.

Fuchs, G. (2007). Abbau organischer Verbindungen. In: Fuchs, G. (Hrsg.), Allgemeine Mikrobiologie. Stuttgart: Thieme, S. 283-320.

Rippel-Baldes, A. (1955). Grundriß der Mikrobiologie (3. Aufl.). Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer-Verlag.

Internetquellen

Baldauf, S. & Bergmeister, S. (2006). Abbauverhalten von ausgewählten organischen Schadstoffen in Klarschlammkomposten bei veränderten Rotteparametern.

Diplomarbeit HTL Dornbirn. Abgerufen am 23.8.2014 von URL:

http://www.vorarlberg.at/publikationen/umwelt_und_lebensmittel/ual/WV/Kompost-Rotteverh.pdf

Guggenberger, G. (2008). Einfluss des Ausgangsmaterials auf die Humifizierung bei der Kompostierung. Diplomarbeit Universität für Bodenkultur Wien. Abgerufen am 22.8.2014 von URL: <http://permalink.obvsg.at/bok/AC06795815>

Gutjahr, A. & Rau, C. (2013). Bioenergienutzung von Campingplatzgrünschnitt.

Abgerufen am 25.8.2014 von URL: http://www.izu.bayern.de/download/pdf/ecocamping_kurzinformation_bioenergienutzung_aus_gruenschnitt.pdf

Korthöber, H. (2013). Hannover. Energiegewinnung aus Biomeilern. Flur und Furche 2/2013, S. 5. Abgerufen am 22.8.2014 von URL: http://www.fischer-landmaschinen.de/fileadmin/downloads/public/Kataloge/Flur_und_Furche_Sommer_2013.pdf

Mollay, M., Kirsch, K., Witte, W. & Zwick, W. (2011). Der Biomeiler. Bau, Optimierung und Erfahrungen. Abgerufen am 22.8.2014 von URL: <http://www.permakulturforschungsinstitut.net/wp-content/uploads/2011/08/0-Ein-anderer-Garten-Broschüre-überarbeitete-Einleitung-Heiner2.pdf>

Müller-Kopp, A. (2003). Die Rotte. In: Kompostforum Schweiz (Hrsg.), Ratgeber rund um die Grüngutverwertung in Städten und Gemeinden, S. 67-72. Abgerufen am 22.8.2014 von URL: http://www.kompost.ch/magazin/xmedia/rotte_ratg.pdf

Pain, I. & J. (1980). Die Methoden Jean Pain oder „Ein anderer Garten“ (8. Aufl.). Abgerufen am 22.8.2014 von URL: http://www.biomeiler.at/explorer/Downloads/Ein_Anderer_Garten.pdf

Redaktion Pflanzenforscher.de (Hrsg.) (2012). Pilzgenome enthüllen die Evolution des Ligninabbaus. Abgerufen am 22.8.2014 von URL: <http://www.pflanzenforschung.de/de/journal/journalbeitrage/pilzgenome-enthuellen-die-evolution-des-ligninabbaus-1817>

Scholz, V. & Idler, Ch. (2005): Energieverlust und Schimmelpilzentwicklung bei der Lagerung von Feldholz-Hackgut. Bornimer Agrartechnische Berichte, H. 39, Potsdam-Bornim. Abgerufen am 23.8.2014 von URL: http://opus.kobv.de/slbp/volltexte/2014/5464/pdf/BAB_Heft_39.pdf

Schuchardt, F. (1984). Wärmeentzug bei der Kompostierung von Schnittholz. Landbauforschung Völkenrode, Jg. 34 H. 4, S. 189-195. Abgerufen am 23.8.2014 von URL: http://literatur.vti.bund.de/digbib_extern/dk016224.pdf

Schütte, A. (2014). Vorwort. Themenbrief Bioenergieregionen 01/2014. Abgerufen am 22.8.2014 von URL: http://mediathek.fnr.de/media/downloadable/files/samples/t/h/themenbrief_bioenergieregionen.pdf

Seyfart, U., Bunzel, K. & Thrän, D. (2011). Biomassepotenziale in Deutschland 2008 bis 2020. DBFZ(Deutsches BiomasseForschungsZentrum) Report Nr. 8 Kompakt. Abgerufen am 22.8.2014 von URL: https://www.dbfz.de/web/fileadmin/user_upload/

DBFZ_Reports/dbfz_report_kompakt_web.pdf

Stang, M. (2013). Der Biomeiler. Kompost zum Humusaufbau und Energie aus Restholz. Abgerufen am 25.8.2014 von URL: <http://www.linaria-ev.de/wp-content/uploads/2013/12/Biomeiler-1.0.pdf>

Ulbricht, H. (2002). Untersuchungen zur gesteuerten Rotte von mit polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) kontaminiertem Altholz. Dissertation Technische Universität Dresden. Abgerufen am 22.8.2014 von URL: https://www.ufz.de/export/data/1/29255_ufzbericht17_02.pdf

Wasserhaushaltsgesetz vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585) i. d. Fassung vom 7. August 2013 (BGBl. I S. 3154). Abgerufen am 23.8.2014 von URL: http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/whg_2009/gesamt.pdf

Gespräch M. Stang am 6. Juni 2014 in Tempelhof/Kreßberg

Anhangverzeichnis

Anhang A - CD

Anhang A1: Masterarbeit digital

Anhang A2: Kompletter Temperaturverlauf

Selbständigkeitserklärung

Ich erkläre, dass ich die vorliegende Masterarbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe.

Mit der Verwertung der Ergebnisse der Arbeit bin ich (Nichtzutreffendes bitte streichen)

- einverstanden*
- nicht einverstanden*
- mit folgenden Einschränkungen einverstanden*

.....
.....
.....
.....

.....

.....

Unterschrift

Ort, Datum