



Hochschule Magdeburg-Stendal
Fachbereich Wasser, Umwelt, Bau und Sicherheit

Bachelorarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades „Bachelor of Engineering“
im Studiengang Recycling und Entsorgungsmanagement

Thema: Versuche zur Nachrotte von Bioabfällen unter der Nutzung des
Pilzes *Trichoderma atroviride*

Eingereicht von: Pia Loeffke

Matrikel: 2016 2045

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Carsten Cuhls

Zweitprüferin: Dr. Uta Langheinrich

Aufgabestellung: siehe Anlage

Bearbeitungszeit: 16.01.2020 bis 19.03.2020



Diese Bachelorarbeit entstand in Zusammenarbeit der Hochschule Magdeburg-Stendal mit der Senzyme GmbH.

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Stellen sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

Ort, Datum

Unterschrift der Verfasserin

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	5
1 Einleitung	6
2 Wissenschaftlicher Hintergrund	8
2.1 Grundlagen der Kompostierung.....	8
2.1.1 Situation in Deutschland.....	8
2.1.2 Definition der Kompostierung.....	8
2.1.3 Mikrobiologie der Kompostierung	9
2.1.4 Pilzflora in der gewerblichen Kompostierung.....	12
2.1.5 Kompostqualität	12
2.2 Der Pilz <i>Trichoderma atroviride</i>	14
2.2.1 Einordnung, Vorkommen und Charakteristik	14
2.2.2 Enzymatische Aktivität.....	15
2.2.3 Technische Nutzung	16
3 Methodik	17
3.1 Planung und Methodik der Rotteuntersuchungen mit <i>T. atroviride</i>	17
3.1.1 Untersuchungen in Versuchsreaktoren	18
3.1.2 Untersuchungen in Bioabbaubarkeitsmesszellen	21
3.2 Analysemethodik	24
3.2.1 Sporulationsbedingungen von <i>T. atroviride</i>	24
3.2.2 Einfluss von <i>T. atroviride</i> auf den pH-Wert seiner Umgebung	25
3.2.3 <i>In Vitro</i> Wirkung von <i>T. atroviride</i> auf das Wurzelwachstum von Kresse.....	26
3.2.4 Untersuchung des Fertigkomposts mit Hilfe des Keimpflanzentests.....	28
3.2.5 Analyse der Kompostqualität	30
4 Ergebnisse	32
4.1 Ergebnisse der Rotteuntersuchungen mit <i>T. atroviride</i>	32
4.1.1 Untersuchungen in Versuchsreaktoren.....	32

4.1.2	Untersuchungen in Bioabbaubarkeitsmesszellen	35
4.2	Ergebnisse der Analysen.....	38
4.2.1	Sporulationsbedingungen von <i>T. atroviride</i>	38
4.2.2	Einfluss von <i>T. atroviride</i> auf den pH-Wert seiner Umgebung	42
4.2.3	<i>In Vitro</i> Wirkung von <i>T. atroviride</i> auf das Wurzelwachstum von Kresse.....	43
4.2.4	Untersuchung des Fertigkomposts mit Kresse-Keimpflanzentests	46
4.2.5	Analyse der Kompostqualität	49
5	Diskussion der Ergebnisse	51
5.1	Diskussion der Rotteuntersuchungen mit <i>T. atroviride</i>	51
5.1.1	Untersuchung in Versuchsreaktoren.....	51
5.1.2	Untersuchung in Bioabbaubarkeitszellen	53
5.2	Diskussion der Analyse	55
5.2.1	Sporulationsbedingungen von <i>T. atroviride</i>	55
5.2.2	Einfluss von <i>T. atroviride</i> auf den pH-Wert seiner Umgebung	56
5.2.3	Wirkung von <i>T. atroviride</i> auf das Wurzelwachstum von Kresse <i>in vitro</i>	57
5.2.4	Untersuchung des Fertigkomposts mit Hilfe des Keimpflanzentests.....	58
5.2.5	Analyse der Kompostqualität	60
6	Zusammenfassung.....	63
7	Weiterführende Untersuchungen.....	65
	Abbildungsverzeichnis	67
	Tabellenverzeichnis	69
	Literaturverzeichnis	70
	Anhang	73

Abkürzungsverzeichnis

BGK e.V.	Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V.
BioAbfV	Bioabfallverordnung
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
d	Tag(e)
DN	Nennweite bzw. innerer Durchmesser eines Rohres
DüMV	Düngemittelverordnung
et al.	Latein für „und andere“
KG-Rohr	Kanalgrundrohr
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
LAGA	Länderarbeitsgemeinschaft Abfall
LKZ	Lebendkeimzahl
Mg	Megagramm
mg	Milligramm
mM	Millimolar
MOPS	3-(N-Morpholino)propansulfonsäure
NDIR	Nichtdispersive Infrarottechnologie
OS	Organische Substanz
PGPF	Plant-Growth-Promoting Fungi
ppm	Parts per million
PTFE	Polytetrafluorethylen
RD	Rohdichte
SA_vol	Salzgehalt
sp.	Species (eine bestimmte Art einer Gattung)
spp.	Species pluralis (mehrere nicht bestimmte Arten einer Gattung)
TA Luft	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft
TS	Trocken Substanz
<i>T.</i>	Pilzspezies der Gattung <i>Trichoderma</i>
VDLUFA	Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten
VOC	Volatile organic compounds

1 Einleitung

Jedes Jahr werden in Deutschland 4,4 Mio. Mg Kompost hergestellt, die vor allem in der Landwirtschaft und im Gartenbau Verwendung finden (BMU, 2019). Die gewerbliche Herstellung von Kompost erfolgt in unterschiedlichen Verfahren, wobei in offene und geschlossene Systeme, sowie dynamische und quasidynamische Verfahren unterschieden wird. Ziel dieser Verfahren mit ihren unterschiedlichen Vor- und Nachteilen ist es jeweils die Rottedauer zu verkürzen, um die Produktionskosten so gering wie möglich zu halten. Von besonderer Bedeutung ist neben den Herstellungsverfahren auch die Kompostqualität, die durch bestimmte Qualitätsparameter wie unter anderem dem Gehalt an Organischer Substanz, den Pflanzennährstoffen und dem Volumengewicht gekennzeichnet wird. (Thomé-Kozmiensky, 1995, S. 230–236)

In der Kompostierung werden Abfälle aus der kommunalen Biotonne zusammen mit Garten- und Parkabfällen behandelt. Es handelt sich also zum Teil um pflanzliche Abfälle, die vorwiegend aus schwer abbaubarer Lignocellulose bestehen (Kämpfer & Weißenfels, 2001, S. 17). Der Abbau dieses Materials erfolgt vor allem durch Pilze über enzymatische Prozesse. Breitenbach beschreibt die 15 dominierenden Pilzarten auf Kompostierungsanalgen. Neben der Art *Botryotrichum piluliferum* wird als häufigste Pilzart auch *Trichoderma atroviride* mit einer Häufigkeit von 18% aufgeführt (Breitenbach, 1998, S. 41). *Trichoderma* spp. befallen cellulolisches Material und finden sich häufig auf toten Pflanzenteilen wieder, welche sie durch die Ausscheidung bestimmter Enzyme zersetzen. Auch die Rhizosphäre des Bodens, also jener Teil, der von Pflanzenwurzeln durchdrungen wird, bildet den natürlichen Lebensraum des Pilzes (Schuster & Schmoll, 2010, S. 788). *Trichoderma* spp. ist bekannt für die Produktion verschiedener Sekundärmetaboliten und flüchtiger organischer Verbindungen (VOCs), die das Pflanzenwachstum fördern (González-Pérez et al., 2018, S. 1). Außerdem schützt *Trichoderma* spp. Pflanzen vor den Angriffen phytopathogener Pilze, indem sie diese durch ihr spezielles Enzymsystem zerstören (Hakeem et al., 2016, S. 80–81). Aufgrund dieser Eigenschaften wird *Trichoderma* spp. häufig in der Landwirtschaft als biologisches Pflanzenschutzmittel und als Bodenverbesserer eingesetzt (López-Bucio et al., 2015, S. 109).

Da in der Kompostierung pflanzliches Material zersetzt und das Endprodukt als Substrat für Böden in der Landwirtschaft verwendet werden soll, liegt der Gedanke nahe, *Trichoderma* spp. auch hier gezielt einzusetzen. Über seine Eignung als Kompostierungshilfe und Produktveredler ist bisher allerdings wenig bekannt.

Ziel dieser Bachelorarbeit ist es eine Aussage darüber zu treffen, ob der Einsatz des *Trichoderma atroviride* den Prozess der gewerblichen Kompostierung durch seine Cellulose-

zersetzenden Eigenschaften fördert und die Qualität und Pflanzenverträglichkeit des Fertigungskomposts verbessert, sodass auf der einen Seite Produktionskosten eingespart werden und auf der anderen Seite ein hochwertigeres Produkt entsteht.

Dazu soll in Kompostierungsversuchen eine kontrollierte Nachrotte von inokulierten Bio-, Park- und Gartenabfällen durchgeführt werden. Durch die Aufzeichnung des Prozessparameters der Temperatur soll eine mögliche Beeinflussung durch den Pilz ermittelt werden. Der hergestellte Fertigungskompost soll dann auf die Qualitätsparameter Rottegrad, Feuchtegehalt, Anteil der Organischen Substanz, C/N-Verhältnis, pH-Wert und Salzgehalt untersucht werden, um herauszustellen, welchen Einfluss der Pilz auf die Güte des Produkts hat. Ein Keimpflanzentest soll eine Aussage über die eventuell durch den Pilz hervorgerufene Verstärkung des Pflanzenwachstums ermöglichen. Diese Aussage soll durch Voruntersuchungen im Labor, in welchen der Pilz isoliert von anderen Mikroorganismen Einfluss auf das Pflanzenwachstum von Kresse nimmt, gestützt werden. Weiterhin soll untersucht werden, ob der pH-Wert als relevanter Parameter für das Pflanzenwachstum durch den Pilz verändert wird. Dazu wird ein Indikatorrest mit einem beimpften Nährmedium dienen.

Der Abbauparameter der Kohlenstoffdioxidkonzentration in der Abluft der Kompostierung soll in sogenannten „Bioabbaubarkeitsmesszellen“ ermittelt werden, sodass festgestellt werden kann, ob *Trichoderma atroviride* die Zersetzung des organischen Materials im Kompostierungsprozess fördert.

Eine große Herausforderung für Kompostierungsanlagen stellen Biokunststofffolien dar, die als „Müllbeutel“ für Bioabfälle in die Biotonne gelangen und schwer abbaubar sind (Kehres, 2014). Durch die Zugabe dieser Folien in die Messzellen soll festgestellt werden, ob *Trichoderma atroviride* den Kunststoff befällt und zu seiner Zersetzung beiträgt.

Für diese Untersuchungen werden in jedem Fall die Sporen des Pilzes benötigt. Um diese zu produzieren, wurden vorab die Sporulationsbedingungen von *Trichoderma atroviride* untersucht.

Ziel ist es außerdem herauszuarbeiten, welche weiteren Untersuchungen zukünftig notwendig sind, um das Ergebnis zu stützen und zu konkretisieren.

Alle in dieser Arbeit verwendeten Begriffe sind durch die VDI-Richtlinie 3459 mit dem Titel „Terminologie in der Energie- und Abfallwirtschaft definiert (Verein Deutscher Ingenieure e.V., 2018).

2 Wissenschaftlicher Hintergrund

2.1 Grundlagen der Kompostierung

2.1.1 Situation in Deutschland

Im Jahr 2017 wurden in Deutschland 15,6 Mio. Mg biologisch abbaubare Abfälle getrennt gesammelt, von denen 4,36 Mio. Mg Biotonnenabfälle der Siedlungen und 4,79 Mio. Mg Park- und Gartenabfälle waren.

Insgesamt 1200 Anlagen wurden diese Abfälle zur Behandlung zugeführt. Davon zählten etwa 1000 zu den Kompostierungsanlagen, in denen 4,4 Mio. Mg Kompost hergestellt wurde. (BMU, 2019)

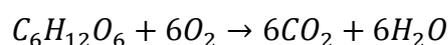
2.1.2 Definition der Kompostierung

Die Literatur bietet unterschiedlich detaillierte Definitionen für die Kompostierung. Hay und Kuchenrither fassen den Begriff in ihrem Artikel "Fundamentals and applications of window composting" folgendermaßen zusammen:

„Kompostierung ist definiert als ein mesophil beginnender, dann aber zunehmend thermophiler biologischer Prozess, der den Abbau von verrottbarem organischem Material in ein relativ stabiles, humusähnliches Endprodukt beinhaltet. Wenn der Prozess gut geführt ist, wird eine Verringerung des Gewichts, des Volumens und des Wassergehalts erreicht, und pathogene Mikroorganismen werden abgetötet.“ (Hay & Kuchenrither, 1990, S. 745)

Eitinger beschreibt die Kompostierung im Fachbuch „Allgemeine Mikrobiologie“ als „aeroben Prozess der Biomasseoxidation, der mit deutlicher Wärmeentwicklung einhergeht und vor allem für die Behandlung fester und halbfester Haushalts- und Grünabfälle genutzt wird.“ (Fuchs, 2017, S. 709)

Die Grundformel des aeroben Abbaus lautet:



(Amlinger et al., 2005, S. 31)

Abhängig vom Fortschritt des Abbaus von organischem Material werden Komposte in sogenannte Rottegrade eingeteilt. Die Rottegrade werden durch die im Selbsterhitzungsversuch (vgl. Kapitel 3.2.5) erreichten Maximaltemperaturen ermittelt. Es erfolgt folgende Einteilung:

Rottegrad I: $t_{\max} = > 60 \text{ °C}$

Rottegrad II: $t_{\max} = 50 - 60 \text{ °C}$

Rottegrad III: $t_{\max} = 40 - 50 \text{ °C}$

Rottegrad IV: $t_{\max} = 30 - 40 \text{ °C}$

Rottegrad V: $t_{\max} = < 30 \text{ °C}$

(Länderarbeitsgemeinschaft, 1995, S. 14)

Je nach Rottegrad wird zwischen Frisch- und Fertigkompost unterschieden. Beide Kompostarten sind soweit stabilisiert, dass sie ohne weitere Behandlung gelagert werden können und bei der Anwendung in der Landwirtschaft und im Gartenbau keine Schädigungen für die Kulturen verursacht werden. Frischkomposte haben einen Rottegrad von II oder III, denn der Abbau ist noch nicht abgeschlossen. Bei der Aufbringung auf landwirtschaftlichen Flächen geht der Stabilisierungsprozess bis zur Aussaat weiter und trägt zur Bodenbelebung bei. Fertigkomposte mit einem Rottegrad von IV oder V sind stabil, die Mineralisierung ist weitgehend abgeschlossen. Diese Substrate werden häufig als Pflanzenerden auf den Markt gebracht. (Kämpfer & Weißenfels, 2001, S. 9)

2.1.3 Mikrobiologie der Kompostierung

In der Kompostierung werden Abfälle aus der kommunalen Biotonne zusammen mit Garten- und Parkabfällen behandelt. Es handelt sich also zum großen Teil um pflanzliche Abfälle. Die pflanzliche Trockensubstanz besteht zu 80% aus Lignocellulose, dem strukturgebenden Material, aus welchem die Zellwände von Pflanzen gebildet werden. Sie ist eine der wichtigsten Kohlenstoff- und Energiequellen der Kompostorganismen (Kämpfer & Weißenfels, 2001, S. 17). Lignocellulose setzt sich aus den drei Hauptkomponenten Cellulose, Hemicellulose und Lignin zusammen (Abbildung 1). Die Anteile dieser Bestandteile sind je nach Pflanzenart unterschiedlich. (Reineke & Schlömann, 2015, S. 83)

Cellulose ist in Mikrofibrillen zusammengefasst, die durch stabile Wasserstoffbrücken zusammengehalten werden und ist deshalb schwer abbaubar. Nur wenige ökologische Gruppen haben die Fähigkeit zum Celluloseabbau, dazu zählen u.a. Schimmelpilze wie *Trichoderma* spp. und bestimmte Bacillus-Arten. In bestimmten Abständen weisen die Fibrillen amorphe Bereiche auf (vgl. Abbildung 1), an denen sie von den extrazellulären Enzymen der Mikroorganismen, den sogenannten Cellulasen, angegriffen werden (vgl. Kapitel 2.2.2). Die Abbauprodukte

können von den Mikroorganismen verstoffwechselt werden. Die meisten Hemicellulosen sind Xylane, zu deren Abbau deutlich mehr Mikroorganismen in der Lage sind, als bei der Cellulose. (Reineke & Schlömann, 2015, S. 86)

Lignin bildet die äußere Schicht der Zellwände. Es sorgt für Stabilität und Schutz vor mikrobiellen Angriffen, da es schwer abbaubar ist. Der Anteil des Lignins ist in Holz besonders hoch. Lignin kann von Pilzen nicht als einzige Energiequelle genutzt werden, sie müssen es jedoch abbauen, um zur Cellulose durchzudringen. Lignin wird vor allem von Weißfäulepilzen abgebaut. (Reineke & Schlömann, 2015, S. 88–91)

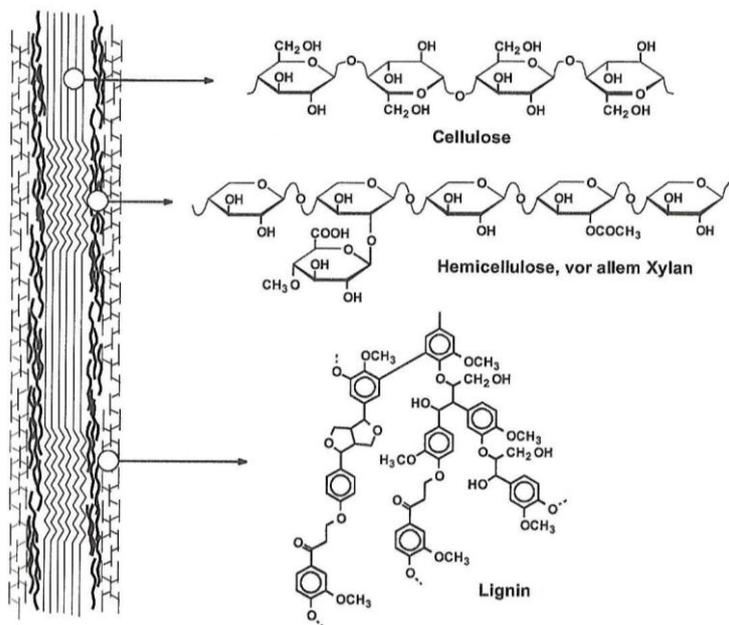


Abbildung 1: Hauptkomponenten der pflanzlichen Zellwand (Reineke & Schlömann, 2015, S. 83)

Während der Kompostierung laufen die mikrobiellen Prozesse der Mineralisierung und der Humifizierung ab. Die Temperatur entwickelt sich dabei parallel zu den stattfindenden Ab-, Um- und Aufbauprozessen (vgl. Abbildung 2), sodass sie sich zur Charakterisierung des Kompostierungsverlaufs eignet. So wird in vier Phasen der Kompostierung unterschieden: die Initial- bzw. Anfangsphase, in der die Mikroflora aufgebaut und angepasst wird; die thermophile Phase, in der die weitgehende Hygienisierung stattfindet; die mesophile Phase, wegen der sich ändernden Mischflora auch „Umbauphase“ genannt und zu guter Letzt die Abkühlungs- oder Reifephase der Kompostierung, in welcher die Umsatzaktivität nur noch gering ist und die Humifizierungsprozesse beginnen.

Eine weitere Charakterisierung erfolgt über die zeitliche Abfolge der Mikroorganismen im Kompost, die als Sukzession bezeichnet wird (Spektrum.de, 2001):

Während der Vorrotte findet zunächst eine starke Vermehrung der Bakterien aus dem Bioabfall statt, leicht abbaubare Komponenten werden assimiliert und mineralisiert und die Organische

Substanz nimmt ab. Die ausreichende Luftzufuhr ist wegen der hohen Stoffwechselaktivitäten in dieser Phase besonders wichtig. Die Temperatur steigt auf bis zu 70°C an und die Kompostierung befindet sich nun in der Hauptrotte. Bei hohen Temperaturen vermehren sich bevorzugt aerobe Bacillus-Arten mit der Fähigkeit extrazelluläre Enzyme zu entwickeln, welche Hemicellulose und Cellulose depolymerisieren. Durch die hohen Temperaturen geht die Gesamtkeimzahl zurück, pathogene Mikroorganismen und ein Großteil der Samen sterben ab. Man spricht von „Hygienisierung“. In der Nachrotte geht die Stoffwechselaktivität und damit die exotherme Erhitzung zurück. Mesophile Mikroorganismen (v.a. Actinomyceten und Pilze) siedeln sich an und bauen durch extrazelluläre Enzyme Lignocellulose ab, wobei sich aromatische Verbindungen bilden, die Ausgangsstoff für die Humifizierung sind.

In der Humifizierung, die während der Nachrotte einsetzt, werden Huminstoffe gebildet, welche dem Kompost und Boden die dunkelbraune Farbe geben und damit für den Wärmehaushalt des Bodens von großer Bedeutung sind. Huminstoffe sind amorphe organische Kolloide mit einer großen spezifischen Oberfläche und der Fähigkeit Wassermoleküle und Ionen anzulagern. Sie spielen eine wichtige Rolle für die Wasserhaltefähigkeit, die Nährsalzadsorption und damit auch für die Fruchtbarkeit von Böden. (Reineke & Schlömann, 2015, S. 435–436)

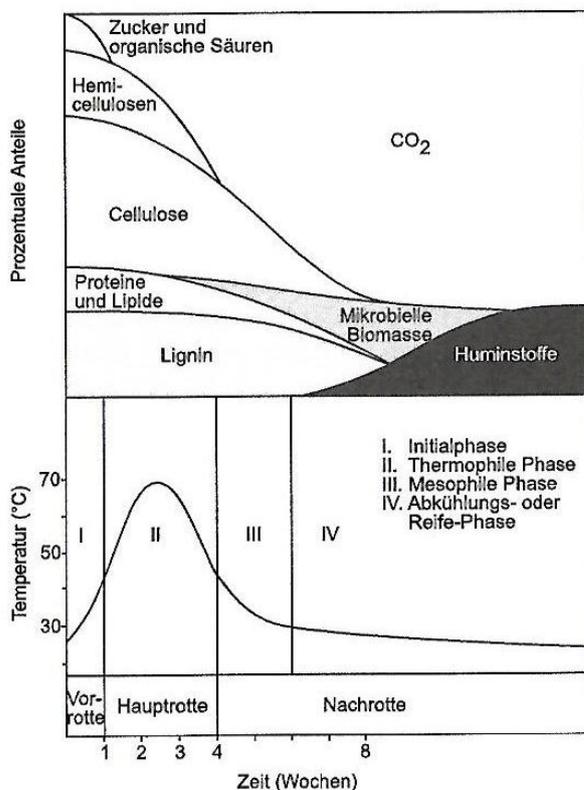


Abbildung 2: Ablauf des Kompostierungsprozesses (Reineke & Schlömann, 2015, S. 436)

2.1.4 Pilzflora in der gewerblichen Kompostierung

Auskunft über die Pilzflora in gewerblichen Kompostierungsanlagen geben die Studien von Dipl. oec. troph. Edda Breitenbach, die 1998 im Rahmen von Untersuchungen der Phytohygiene in der gewerblichen Kompostierung das Pilzspektrum in Kompostierungsanlagen erfasste. Abbildung 3 verdeutlicht, dass 70% der Isolate aus der Studie auf 15 dominierende Arten entfielen. Es zeigt sich, dass der in dieser Arbeit untersuchte Pilz *T. atroviride* schon in der natürlichen Pilzflora der Kompostierung vorkommt und sogar der Pilz mit der höchsten kumulativen Häufigkeit ist.

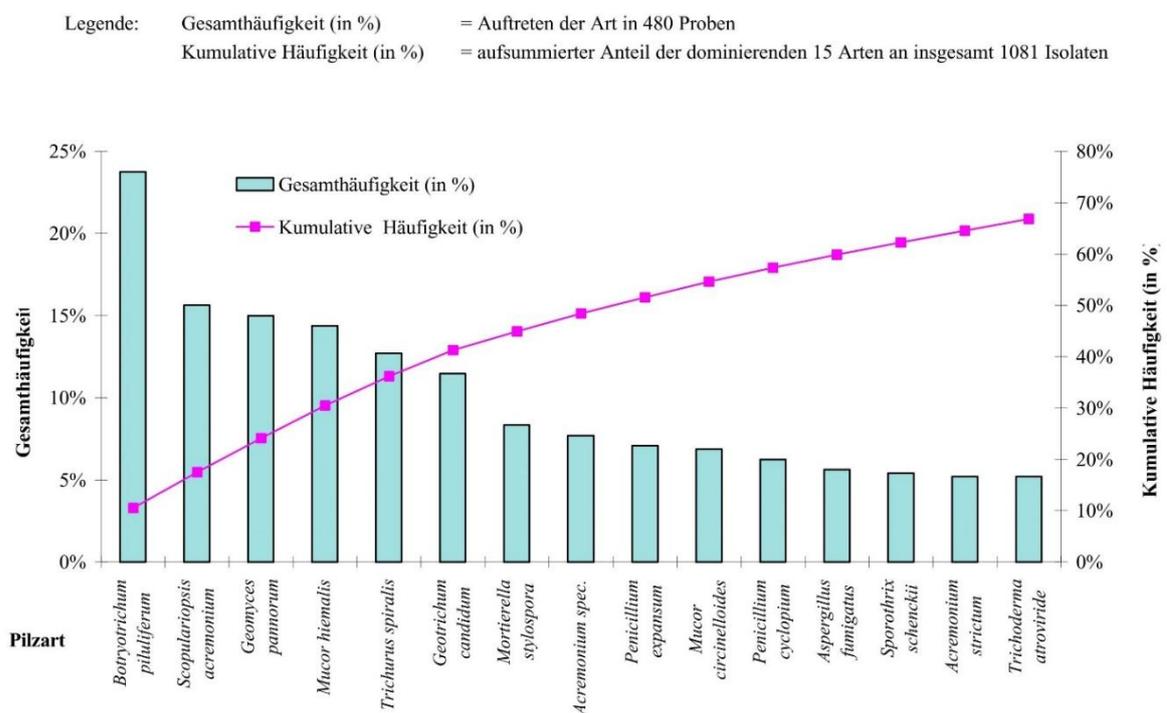


Abbildung 3: Kumulative Häufigkeit der dominanten Pilzarten aus Komposterde (Breitenbach, 1998, S. 43)

2.1.5 Kompostqualität

Der fertige Kompost ist ein pflanzenverträgliches, humusähnliches Bodenverbesserungsmittel (Reineke & Schlömann, 2015, S. 434). Seine Qualität wird durch eine Reihe unterschiedlicher Merkmalseigenschaften, wie dem Anteil an Organischer Substanz und Wasser, dem Volumengewicht, dem Salzgehalt, dem pH-Wert und C/N-Verhältnis sowie weiteren Nährstoffgehalten gekennzeichnet. Diese werden von der LAGA im „Merkblatt M10 über Qualitätskriterien und Anwendungsempfehlungen für Kompost“ näher ausgeführt (relevante Ausschnitte in Anhang 1).

Komposte, die aus gewerblicher Kompostierung verkauft werden, um auf landwirtschaftlichen Flächen oder im Gartenbau aufgebracht zu werden, bedürfen einer Prüfung durch die Bundesgütegemeinschaft Kompost (BGK).

Die Gütesicherung erfolgt nach Analysen durch Prüfzeugnisse, die neben der qualitativen Bewertung des Komposts auch Angaben zur Zweckbestimmung und zur sachgerechten Anwendung enthalten.

2.2 Der Pilz *Trichoderma atroviride*

2.2.1 Einordnung, Vorkommen und Charakteristik

Trichoderma atroviride ist ein Pilz und zählt damit zur Domäne der Eukarya. Er gehört dem Unterreich der Dikarya, der Abteilung der Ascomycota (deutsch: Schlauchpilze) und der Gattung *Trichoderma* an (Fuchs, 2017, S. 75). *Trichoderma* spp. findet sich sowohl in der Rhizosphäre von Böden der Tropen als auch der gemäßigten Zone. Außerdem besiedelt er Totholz und organisches Material. *T. atroviride* wächst in fädigen filamentös aneinander gereihten Pilzzellen, den sogenannten Hyphen. Die Hyphen sind durch Septen in einzelne Kompartimente gegliedert und verflechten sich zu einem weißen Myzel (vgl. Abbildung 4a). Der Pilz ist für sein schnelles Wachstum bekannt. (Hakeem et al., 2016, S. 10–11)

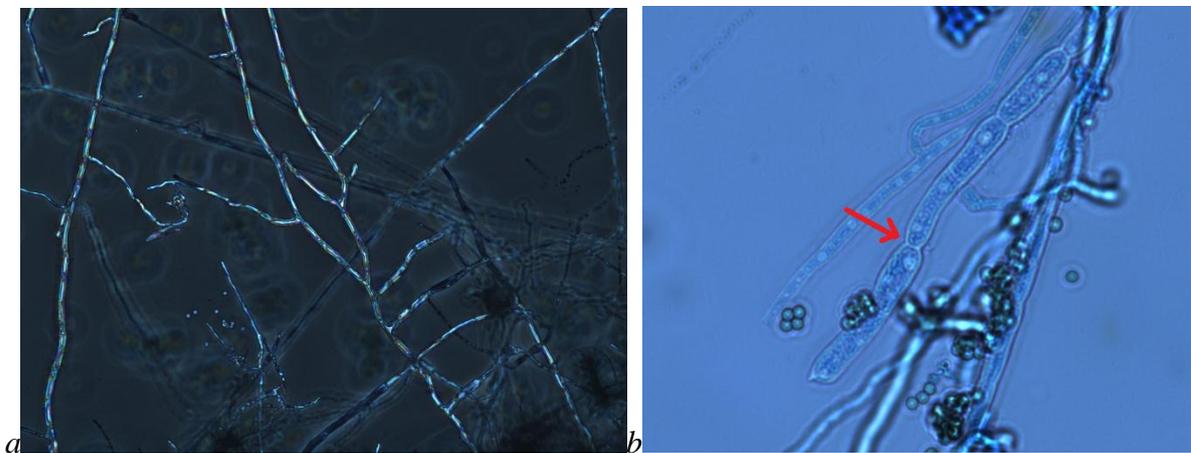


Abbildung 4: Mikroskopische Bilder der Hyphen von *T. atroviride*. a) Verzweigung der Hyphen. b) Gliederung der Hyphen durch Septen. (Eigene Bilder)

T. atroviride vermehrt sich überwiegend über asexuelle Sporen, die sogenannten Konidien, die an den Konidiophoren, den Sporentägern gebildet werden. Diese sind einkernig, abgerundet und relativ resistent gegen Umwelteinflüsse. *T. atroviride* ist nach der Farbe seiner Sporen benannt: „Atroviride“ (lt.) bedeutet „dunkelgrün“ (vgl. Abbildung 5). Über die sexuelle Vermehrung des Pilzes ist bisher wenig bekannt. (Schuster & Schmoll, 2010, S. 788)

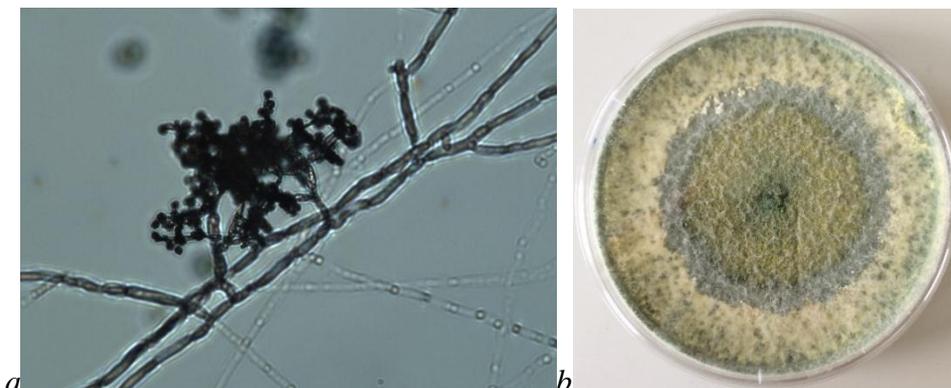


Abbildung 5: Sporen des *T. atroviride*. a) Konidiophoren und Konidien. b) Grünfärbung. (Eigene Bilder)

2.2.2 Enzymatische Aktivität

Lignocellulose dient *T. atroviride* (wie auch anderen Pilzen im Boden) als Nahrung und Energiequelle. Um das schwer abbaubare Material für sich nutzbar zu machen, hat er eine besondere Methode entwickelt: Während er auf dem organischen Material wächst, synthetisiert er extrazelluläre Enzyme, die synergetisch arbeiten und die Cellulose zu Glucose abbauen. Der Überbegriff dieser Enzyme lautet „Cellulasen“. Stark vereinfacht kommt es dabei zu folgendem Ablauf: Endoglucanase hydrolysiert die Cellulose in ihren amorphen Bereichen und löst so die kristallinen Strukturen voneinander, sodass verkürzte Ketten entstehen. Exoglucanasen hydrolysieren die entstanden Kettenenden zu Cellobiose, dem ersten Abbauprodukt. Die Cellobiose wird dann wiederum von der Glucosidase in für den Pilz verstoffwechselbare Glucose gespalten. (Golan, 2011, S. 2–3)

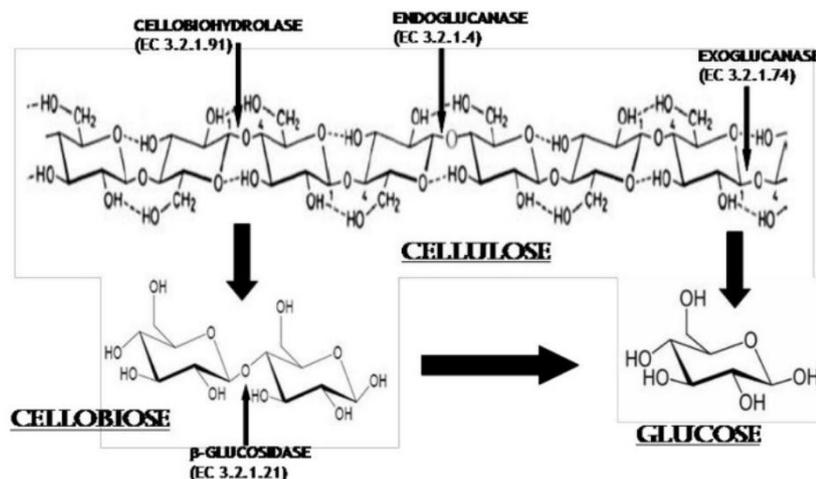


Abbildung 6: Hydrolyse der Cellulose (Golan, 2011, S. 6)

Die zumeist aus Xylan bestehende Hemicellulose wird durch ein System extrazellulärer Xylanasen in Xylobiose hydrolysiert, wobei Acetat abgespalten wird.

Lignin, die äußere Schicht der Zellwände, ist für *T. atroviride* selbst nicht nutzbar, muss aber durchdrungen werden, um an die nährreiche Cellulose zu gelangen, weshalb der Ligninabbau häufig als „enzymatische Verbrennung“ bezeichnet wird. Dafür kommen Enzymsysteme aus Lignin- und Mangan-Peroxidasen zum Einsatz. (Reineke & Schlömann, 2015, S. 91)

Die ökologische Nische von *T. atroviride* besteht in seinem Verteidigungsmechanismus gegen andere Pilze durch enzymatische (und chemische) „Waffen“: Er setzt lytische und proteolytische Enzyme ein, welche die Zellwände anderer Pilze auflösen. Diese bestehen unter anderem aus Chitin, Proteinen und Mannan. *T. atroviride* schüttet entsprechend Chitinasen, Proteasen und Mannanasen aus. (Schuster & Schmoll, 2010, S. 790)

2.2.3 Technische Nutzung

Die Nutzung pflanzlicher Biomasse rückt durch das zunehmende Interesse an erneuerbaren Energien und nachhaltigen Treibstoffen in den Fokus der Biotechnologie. Wegen ihrer Fähigkeit Cellulasen zu produzieren, werden viele *Trichoderma* Stämme biotechnologisch genutzt: So wird z.B. *T. reesei* zur Herstellung von Biotreibstoffen aus organischem Material verwendet (Schuster & Schmoll, 2010, S. 787).

Trichoderma spp. wird häufig im Gartenbau und in der Landwirtschaft eingesetzt. Das hat zwei Gründe: Zum einen hat er die Fähigkeit phytopathogene Pilze zu bekämpfen und zum anderen verstärkt er das Pflanzenwachstum.

Trichoderma spp. befällt andere bodenbürtige Pilze, die Pflanzen schädigen, indem er die Hyphen des Schadpilzes umwächst. Man spricht vom Mycoparasitismus. Er setzt sein Enzymsystem ein, um die Zellwände seines Wirtes zu zerstören (vgl. Kapitel 2.2.2). Der gezielte Einsatz zur Bekämpfung von Pathogenen wird als „Biokontrolle“ bezeichnet.

Trichoderma spp. wird zu den „plant-growth-promoting fungi“ (kurz PGPF) gezählt. Er hydrolysiert die Lignocellulose von toten Pflanzenteilen im Boden durch extrazelluläre Enzyme, sodass die enthaltenen Nährstoffe für die Pflanze zugänglich gemacht werden können. (Hakeem et al., 2016, S. 8)

Wegen der Kommunikation mit dem Wurzel- und Keimungssystem der Pflanzen durch die Ausschüttung von Auxinen, Peptiden und anderen Metaboliten, die das Wurzelwachstum und die Nährstoffaufnahme unterstützen, spricht man außerdem vom Mechanismus der Phytostimulation (López-Bucio et al., 2015, S. 109). Weiterhin wurde *Trichoderma* spp. nachgewiesen, das Immunsystem von Pflanzen zu stärken, sodass diese resistenter auf Pathogene (auch bakterieller Art) reagieren (Hakeem et al., 2016, S. 80–81).

3 Methodik

3.1 Planung und Methodik der Rotteuntersuchungen mit *T. atroviride*

Es galt zu untersuchen, ob der Pilz *T. atroviride* in der gewerblichen Kompostierung als Kompostierungshilfe bzw. als Kompostveredler dienen kann.

In den Rotteversuchen mussten demnach Voraussetzungen geschaffen werden, die den Bedingungen in Kompostierungsanlagen möglichst ähnlich sind.

So wurden zum einen Rotteversuche in DN 400 KG-Rohren durchgeführt, um die Kompostierung größerer Volumina hinsichtlich der Temperaturentwicklung und der Qualität des entstandenen Fertigkomposts beurteilen zu können.

Ein weiterer entscheidender Parameter für die Zersetzung organischen Materials ist die CO₂-Bildung (vgl. Kapitel 2.1.2). Diese wurde in so genannten „Bioabbaubarkeitsmesszellen“, in welchen unter kontrollierten Umgebungsbedingungen kleinere Volumina kompostiert wurden, aufgezeichnet.

3.1.1 Untersuchungen in Versuchsreaktoren

Abbildung 2 in Kapitel 2.1.3 zeigt, dass die Temperaturen in der thermophilen Phase der Kompostierung auf bis zu 70°C ansteigen. Den Bioabfall zu Beginn des Kompostierungsprozesses mit *T. atroviride* zu beimpfen wäre also nicht sinnvoll, da der Pilz die Hygienisierung nicht überleben würde. Vielmehr kommt eine Beimpfung von Frischkompost in Frage. Das Biogene Zentrum der Firma Remondis in Peine, Niedersachsen, stellt in Rottetunneln aus Bioabfällen gezielt Frischkompost als Dünger für die Landwirtschaft her. Das Material setzt sich zu einer Hälfte aus den Abfällen der regionalen Biotonnen, die auf eine Korngröße ≤ 15 mm zerkleinert werden, und zur anderen Hälfte aus Strukturmaterial (Grünschnitt) ≤ 30 mm zusammen. Dieser Frischkompost wurde der Hochschule Magdeburg-Stendal für die Rotteversuche zur Verfügung gestellt.

Die Kompostierung wurde in sechs stehenden 80 cm hohen DN400 KG-Rohren durchgeführt, die unter dem Abzug in der Laborhalle des Fachbereichs WUBS an der Hochschule Magdeburg-Stendal aufgestellt und jeweils mit ca. 60 Litern Frischkompost befüllt wurden.

Wie in der gewerblichen Kompostierung sollte der Kompost belüftet werden, damit die aeroben Prozesse ablaufen konnten. Deshalb wurde auf einer Höhe von 11 cm horizontal ein verzinktes Volierengeflecht mit einer Maschenweite von 12,7 mm x 12,7 mm und einer Drahtstärke von 1,05 mm eingebaut, auf dem das Material lagerte (vgl. Abbildung 7b). Die Luft wurde durch einen Anschluss auf 5 cm Höhe eingblasen, sodass der Kompost von unten nach oben belüftet wurde. Um festzustellen, ob die Belüftung einen nachweisbaren Einfluss auf den Rotteprozess hat, wurden nur vier der sechs Reaktoren belüftet. Ohne Belüftung durch Druckluft blieben die Reaktoren mit der Bezeichnung R5, R6, R11 und R12. Mit Hilfe von Manometer und Regler wurde der Volumenstrom auf 3,6 m³/h eingestellt. Durch T-Stücke wurden Schläuche so verbunden, dass die Druckluft gleichmäßig auf die vier Reaktoren aufgeteilt wurde, jedem Reaktor wurden also 0,9 m³/h Luft zugeführt. Leichte Abweichungen konnten aufgrund der durch die Schlauchführung hervorgerufenen unterschiedlichen Widerstände nicht vermieden werden.

Um die Austrocknung des Komposts zu vermeiden, wurde die Druckluft zunächst durch eine Waschflasche geleitet, sodass sie eine gesteigerte Luftfeuchte hatte.

Als Abdeckung der Rohre diente ein zugeschnittenes und mit einem Spanngurt befestigtes Gore® Cover. Bei dieser speziellen Abdeckung, die in der Industrie häufig für die Mietenkompostierung eingesetzt wird, handelt es sich um ein 3-Lagen Laminat, dessen mittlere Schicht aus einer semipermeablen PTFE Membran besteht. Das Cover minimiert den Austritt von Luftkeimen aus dem System, da es eine geringe Porenweite hat und sich durch die Kondensation von Wasserdampf ein Wasserfilm auf der Innenseite des Textils bildet. Dies ist für die

Rotteversuche mit *T. atroviride*, dessen Sporen über die Luft übertragen werden, von großem Vorteil. Da die Gore® Abdeckung auch von oben Luft an das biogene Material lässt, wird Anaerobie und somit auch eine starke Geruchsbildung verhindert. Die Anfangsfeuchte bleibt zum großen Teil erhalten, weil nur wenig Wasser nach oben aus dem System austreten kann. (Am-linger et al., 2005, S. 270)



Abbildung 7: Aufbau der Rottereaktoren. a) Abdeckung und Belüftung. b) Kompost lagert auf Volieren-gewebe. (Eigene Bilder)

Der Feuchtegehalt des Komposts wurde zunächst auf 40% eingestellt.

Während der Befüllung der Rohre mit dem Frischkompost wurden die in der Vorbereitung der Versuche in „Solid State Fermentation“ (Kurz SSF-Kultivierung, vgl. Kapitel 3.2.1) produzierten Sporen in Schichten auf das Material gegeben. Um den Unterschied, den der Pilz im Rotteprozess und in der Qualität des Fertigkomposts macht, bewerten zu können, wurde einer der Reaktoren nicht mit Sporen beimpft. Dieser soll im Folgenden „Nullprobe“ genannt werden. Das Verhältnis der Menge der Sporen zur Masse des Komposts ist in Tabelle 1 dargestellt.

Die Dauer der Kompostierung in den Reaktoren betrug fünf Wochen.

Während der ersten elf Tage wurde die Temperatur einmal pro Tag mit einem Stabthermometer gemessen, dann wurden Temperatursonden installiert, welche die Temperatur automatisch aufzeichneten.

Nach sieben Tagen wurde der Kompost umgesetzt und jeweils nach sieben und nach 28 Tagen wurde der Feuchtegehalt stichprobenartig getestet und daraufhin erneut erhöht.

Tabelle 1: Verhältnis Kompost-Sporen im ersten Versuchsdurchlauf, Sporen in Lebendkeimzahl (kurz: LKZ). (Berechnung: siehe Anhang 1)

Bezeichnung Reaktoren	R1	R2	R3	R4	R5	R6
Masse Kompost [kg]	21,1	27,3	21,1	27,3	18,2	24,6
Sporen [g]	0	110	110	110	110	110
Anzahl der Sporen [LKZ/Reaktor]	0	3,29E+10	3,51E+10	3,58E+10	4,33E+10	5,40E+10
Anzahl Sporen/ kg Kompost	0	1,20E+09	1,66E+09	1,31E+09	2,38E+09	2,20E+09

Um die Sicherheit der Aussagen über den Einfluss des Pilzes *T. atroviride* auf den Kompostierungsprozess und die Qualität von Fertigungskompost zu erhöhen, wurden zwei Versuchsdurchläufe in den Reaktoren durchgeführt, sodass für die Auswertung mehr Werte zur Verfügung stehen. Im zweiten Versuchsdurchlauf wurden aufgrund der Erfahrungen des ersten Durchlaufs (vgl. Kapitel 4.1.1) einige Anpassungen vorgenommen:

Der Feuchtegehalt wurde zu Beginn auf 54% eingestellt und während des Versuchsverlaufs nicht mehr künstlich erhöht. So konnte in diesem Versuch auch der durch die Nachrotte erzielte Masseverlust durch Wiegen zu Beginn und Ende der Kompostierung ermittelt werden. Nach 22 Tagen wurde der Kompost umgesetzt. Weiterhin erfolgte die Inokulation erst nach einer Woche der Kompostierung und nicht zu Beginn der Kompostierung wie im ersten Versuchsdurchlauf. Außerdem wurden die zum Kompost hinzugefügten Sporen in ihrer Zahl nahezu verdoppelt (vgl. Tabelle 2) und statt einer Auftragung der Sporen in Schichten, wurden sie gründlich mit dem Kompost durchmengt. Im zweiten Versuchsdurchlauf wurden drei Reaktoren beimpft und drei Nullproben erstellt.

Tabelle 2: Verhältnis Kompost-Sporen im 2. Versuch (Berechnung: siehe Anhang 1)

	R7	R8	R9	R10	R11	R12
Masse Kompost [kg]	20,1	18,3	19,8	19,8	18,5	19,4
Sporen [g]	0	250,16	0	231,8	0	184,3
Anzahl der Sporen [LKZ/Reaktor]	0	9,07E+1	0	8,41E+1	0	6,68E+1
Anzahl Sporen/ kg Kompost	0	4,95E+0	0	4,25E+0	0	3,44E+0
		9		9		9

3.1.2 Untersuchungen in Bioabbaubarkeitsmesszellen

Ziel der Untersuchung war es festzustellen, welchen Einfluss der Pilz *T. atroviride* auf den Abbau des organischen Materials im Kompost hat. Dazu wurde der Kohlenstoffaustrag über die Kohlenstoffdioxidkonzentration der Abluft bilanziert.

Der Versuchsaufbau orientiert sich an der DIN EN ISO 14855-1, die sowohl Vorgaben für die Analyse des Fortschritts eines aeroben Abbaus mittels CO₂-Messung, als auch für die Bedingungen einer kontrollierten Kompostierung liefert (Internationale Organisation für Normung, 2012, S. 1).

Dr.-Ing. Gunter Weißbach entwickelte an der Hochschule Magdeburg-Stendal so genannte Bioabbaubarkeitsmesszellen. Diese zylindrischen Zellen fassen ein Volumen von 2,9 Litern. Die Wände bestehen aus Plexiglas, sodass das Substrat in der Zelle sichtbar ist. Der Druckluftanschluss am Boden lässt eine Belüftung mit einem Durchfluss von 0,25 L/min (0,015m³/h von unten nach oben zu).

Im Deckel der Messzellen sind die SCD30-Sensormodule des schweizerischen Herstellers Sensirion eingebaut. Diese Module enthalten sowohl Temperatur- und Feuchtesonden als auch eine NDIR-Messtechnik zur CO₂-Erkennung in der Abluft (Sensirion, 2018). Für den hier beschriebenen Versuch waren jedoch ausschließlich die CO₂-Konzentrationen von Bedeutung. Die Leistungsgrenze der CO₂-Messtechnik liegt bei 40.000 ppm. Das Modul wurde so programmiert, dass jede Minute ein Messwert aufgezeichnet wurde.

Die Inkubation fand im Wärmeschrank bei 25°C statt.

Für eine Dauer von fünf Wochen wurden nun CO₂-Konzentrationen in der Abluft der Nachrotte von mit *T. atroviride* inokuliertem Bioabfall und einer entsprechenden Nullprobe aufgezeichnet.

Es wurde derselbe Frischkompost wie für den zweiten Versuchsdurchlauf der Rotteversuche in den Reaktoren verwendet. Dieser wurde nach Abschnitt 8.1 der DIN „Preparation of the inoculum“ vorbereitet und untersucht (vgl. Tabelle 3). Auf das durch die Norm vorgeschriebene wöchentliche Umsetzen des Komposts wurde verzichtet, um das zusammenhängende Myzel des *T. atroviride* nicht zu zerstören.

Da Biokunststofffolien in der gewerblichen Kompostierung eine große Herausforderung darstellen, sollte weiterhin untersucht werden, ob der Pilz dieses Material befällt und zersetzt. Dafür wurde in beiden Messzellen in Streifen geschnittene (Oberflächenvergrößerung) Abfallbeutel aus Biokunststoffen unter den Kompost gemischt, die nach fünf Wochen unter dem Stereomikroskop betrachtet werden sollten.



Abbildung 8: Aufbau Versuch Bioabbaubarkeit. a) Messzellen im Wärmeschrank. b) Mit Kompost, Sporen und Biokunststoffolie befüllte Messzelle. (Eigene Bilder)

Tabelle 3: Relevante Parameter der Rotteuntersuchungen mit *T. atroviride* in Bioabbaubarkeitsmesszellen (vgl. Anhang 1)

	inokuliert mit <i>T.a.</i>	Nullprobe
Feuchte [%]	54,1	
Temperatur Wärmeschrank [°C]	25	
Masse Frischkompost [g]	1066	916
Sporenzahl/Messzelle	2,01E+10	0
Sporenzahl/ g Frischkompost	1,88E+07	0

Die Bilanzierung zum Kohlenstoffaustrag in der Abluft unterliegt der folgenden Berechnung:

Voraussetzungen:

- Abkürzungen:
 - TMW: Tagesmittelwert
 - OS: Organische Substanz (Bestimmung mittels Glühverlust)
- 1 ppm CO₂ ≙ 0,00178 mg/L (Gasmeter.com, 2020)
- Molare Masse CO₂ = 44,01 g/mol
 - Molare Masse C = 12,01 g/mol → 27 % der Molaren Masse von CO₂

Rechnungsablauf:

1. Kohlenstoff im Frischkompost:

- $C(ges) [\%] = \frac{OS [\%]}{1,8}$ (Paul & Geesing, 2009)
- $C(ges)[mg] = C(ges)[\%] * Gesamtmasse Kompost [mg]$

2. Umgesetzte Menge an Kohlenstoff im Kompost:

- Luftmenge/Tag:
 - $\frac{Luftmenge}{Tag} = \frac{Luftmenge}{min} * \frac{Anzahl min}{Tag}$
- Masse CO₂/Tag:
 - $CO_2 \left[\frac{mg}{d} \right] = TMW \left[\frac{mg}{L} \right] * Luftmenge \left[\frac{L}{d} \right]$
- Gesamtmasse CO₂ über die Versuchsdauer:
 - $CO_2(ges)[mg] = \sum TMW$
- Anteil C in CO₂ ≙ Umgesetzte Menge an Kohlenstoff im Kompost
 - $C(umgesetzt)[mg] = CO_2(ges)[mg] * 0,27$

3. Anteil des umgesetzten Kohlenstoffs am Gesamtkohlenstoff

- $C(umgesetzt)[\%] = \frac{C(umgesetzt)[mg]}{C(ges)[mg]} * 100$

3.2 Analysemethodik

3.2.1 Sporulationsbedingungen von *T. atroviride*

Um die Wirkung des *T. atroviride* auf den Rotteprozess zu untersuchen, wurde der Kompost mit den Sporen des Pilzes beimpft.

In der Vorbereitung der Rotteversuche galt es möglichst viele Sporen zu produzieren.

Dazu wurde im Vorpraktikum zur Bachelorarbeit bei der Firma Senzyme GmbH untersucht, unter welchen Umgebungsbedingungen der Pilz *T. atroviride* am besten sporuliert.

Es wurde eine Solid-State-Fermentation (kurz: SSF Kultivierung) in Erlenmeyerkolben (Volumen: 1 Liter) durchgeführt. Bei dieser Methode findet mikrobielles Wachstum auf der Oberfläche von festem Substrat in Abwesenheit von „freiem Wasser“ statt. Die Feuchtigkeit wird von dem festen Substrat absorbiert (Golan, 2011, S. 2).

Wie im Praktikumsbericht näher erläutert, wurden die Parameter Feuchtegehalt, Temperatur und Wachstumsdauer während der Kultivierung miteinander kombiniert und anhand der ermittelten Lebendkeimzahlen Rückschlüsse auf die optimalen Sporulationsbedingungen gezogen (Loeffke, 2019, S. 11).

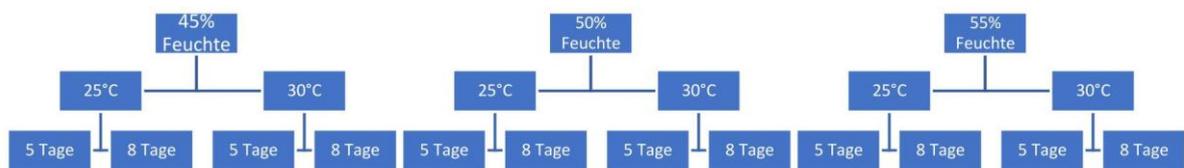


Abbildung 9: Kombination der Parameter zur Ermittlung der idealen Sporulationsbedingungen von *T. atroviride* (Loeffke, 2019)

Nach der Untersuchung dieser zwölf Kulturen, wurden weitere Versuche mit den Parametern Licht, Sauerstoffversorgung und Substratmenge durchgeführt:

Einzelne Versuchskolben, in denen die SSF-Kultivierung stattfand, wurden anstelle des Wärmeschrankes auf eine Fensterbank gestellt, um zu prüfen, ob das Licht einen Einfluss auf die Sporenbildung hat.

Als Verschluss der Kolben wurden zum einen mit Parafilm verschlossene Zellulosestopfen (geringe Luftdurchlässigkeit) und zum anderen mit Gummiband befestigtes Haushaltspapier (hohe Luftdurchlässigkeit) verwendet.

Um die Oberfläche zu vergrößern, wurde die Substratmenge in den Kolben um die Hälfte reduziert.

3.2.2 Einfluss von *T. atroviride* auf den pH-Wert seiner Umgebung

Der Einfluss des Pilzes auf den pH-Wert seiner näheren Umgebung sollte in diesem Versuch sichtbar gemacht werden.

Dazu wurden zwei Medien hergestellt: Beide bestanden aus 1% Agar und 0,006% Bromphenolbau, einem blaugelben Indikator, der sich ab einem pH-Wert von $\leq 3,4$ grün-gelblich färbt (chemie.de). Eines der Medien wurde zusätzlich mit dem pH-Puffer 3-(N-Morpholino)propan-sulfonsäure (kurz: MOPS) versetzt, der sich zur Pufferung im neutralen Bereich eignet (Good et al., 1966). Die Konzentration des Puffers betrug 100 mM. Die Medien wurden mit NaOH auf einen pH-Wert von sieben eingestellt. Die Medien wurden autoklaviert, in Petrischalen gegossen, ausgehärtet, mittig mit den Sporen des *T. atroviride* beimpft und für sieben Tage bei 25°C inkubiert.

3.2.3 *In Vitro* Wirkung von *T. atroviride* auf das Wurzelwachstum von Kresse

Ziel dieses Versuches ist es zu untersuchen, welchen Effekt der Pilz *T. atroviride* in einer von anderen Mikroorganismen isolierten Umgebung auf das Wurzelwachstum von Kresse (*Lepidium sativum*) hat.

Als Grundlage der Versuche dienen die Methoden von Pelagio-Flores et al., die 2017 durch das Paper „Trichoderma-Induced Acidification Is an Early Trigger for Changes in Arabidopsis Root Growth and Determines Fungal Phytostimulation“ in der Fachzeitschrift „Frontiers in Plant Science“ veröffentlicht wurden.

Die Kressesamen wurden zunächst unter dem Stereomikroskop betrachtet und ungesund aussehende Samen aussortiert (vgl. Abbildung 10). Zur Desinfektion wurden die ausgewählten Samen für 15 Minuten in 95%-iges Ethanol eingelegt.

Das Nährmedium bestand aus 20% Murashige and Skoog (einer Mischung aus verschiedenen Basalsalzen, gelöst in destilliertem Wasser (Sigma-Aldrich, 2019)), 0,6% Saccharose und 1% Agar. Der Hälfte der Lösung wurde in einem separaten Gefäß der pH-Puffer MOPS mit einer Konzentration von 100 mM hinzugefügt. Mit NaOH wurde der pH-Wert des Mediums auf sieben eingestellt. Die Lösungen wurden zur Vermeidung von Kontaminationen autoklaviert und dann in eckige Petrischalen gegossen. (Pelagio-Flores et al., 2017, S. 6)

Nach dem Aushärten wurden im oberen Viertel der Platten die ausgewählten und desinfizierten Kressesamen in Reihe gesät. Das untere Viertel wurde mit dem Pilz beimpft. Aus Medien mit und ohne MOPS wurden jeweils Kontrollen ohne Pilzsporen erstellt. Die Platten wurden stehend im Licht gelagert, sodass die Wurzel der Kressekeimlinge in Richtung des Pilzes wachsen konnten (vgl. Abbildung 11). Die Längen der Wurzeln wurden nach sechs und nach acht Tagen gemessen.

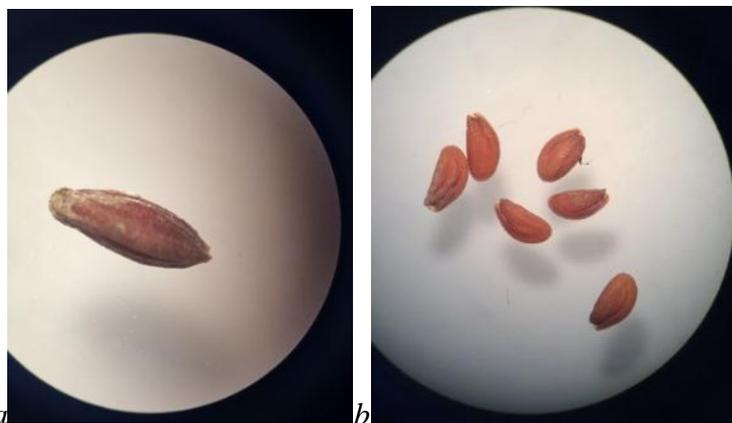


Abbildung 10: Auswahl gesunder Kressesamen unter dem Stereomikroskop. a) Krank aussehender Same. b) Gesunde Samen. (Eigene Bilder)

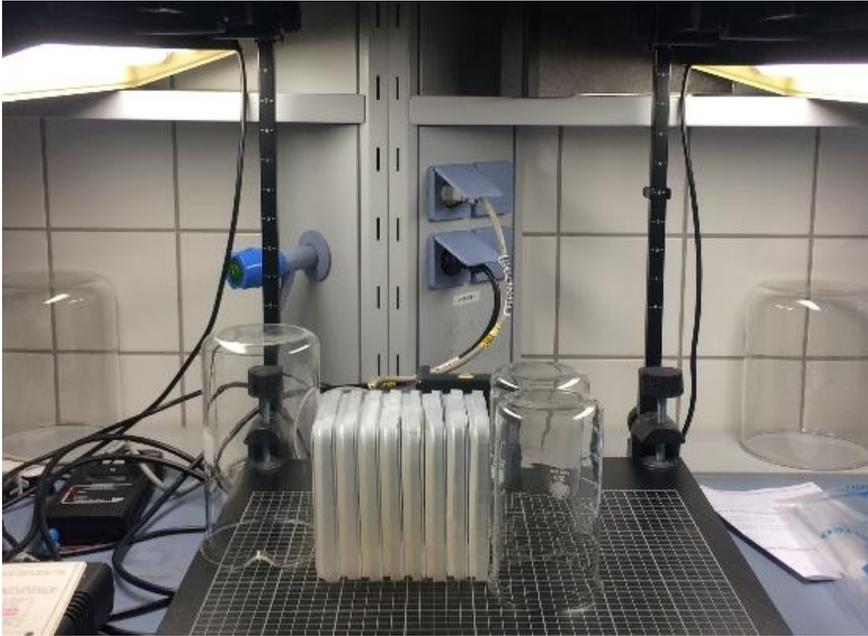


Abbildung 11: In vitro Keimungsversuche: Stehende Inkubation unter Lichteinfluss. (Eigenes Bild)

3.2.4 Untersuchung des Fertigkomposts mit Hilfe des Keimpflanzentests

In Kapitel 3.2.3 wurde die *in vitro* Wirkung von *T. atroviride* auf die Keimung und das Wachstum von Kresse untersucht. Im Folgenden soll nun die *in vivo* Wirkung, also die Auswirkung des Pilzes auf Kresse in Wechselwirkung mit anderen im Kompost enthaltenen Mikroorganismen, analysiert werden. Würde in dem Substrat, das durch die Kompostierung von Bioabfällen unter Einsatz von *T. atroviride* hergestellt wurde, ein verstärktes Wachstum bei Keimpflanzen hervorgerufen, so wäre dies ein Qualitätsmerkmal für den Fertigkompost.

In der Durchführung richtet sich der Versuch nach Abschnitt A 10.2.1 des VDLUFA Methodenbuchs, der Keimpflanzentests zum Nachweis von pflanzenschädigenden Stoffen in Kultursubstraten und Substratausgangsstoffen beschreibt (Bassler et al., 1991, A 10.2.1).

Die Keimung von Kresse wurde auf drei unterschiedlichen Substraten verglichen:

1. in den Versuchen (Kapitel 3.1.1) hergestellte Nullprobe
2. mit *T. atroviride* gereifter Kompost
3. mit *T. atroviride* gereifter Kompost, zusätzlich mit Sporen des *T. atroviride* beimpft

Die drei Substrate wurden je in ein Anzuchtgewächshaus mit den Maßen 28 x 24 cm gefüllt. Pro Gewächshaus wurden zehn Felder abgesteckt, in die jeweils zehn zuvor mit dem Stereomikroskop auf äußerliche Fehler untersuchte Kressesamen gesetzt wurden (vgl. Abbildung 10). Unter ständigem Lichteinfluss keimte die Kresse für 14 Tage. Ursprünglich war eine Keimung von sieben Tagen vorgesehen. Da die Samen aber in den ersten fünf Tagen wegen zu niedrigem Feuchtegehalt des Substrats nicht auskeimten, wurde die Dauer verlängert und ab Tag fünf wurde das Substrat täglich befeuchtet.

Zur Auswertung wurden die Keimlinge pro abgestecktem Feld gezählt, die einzelnen Pflanzen mitsamt der Wurzel vorsichtig aus dem Substrat gehoben und die Gesamtlänge sowie die Länge des Hypokotyls und der Wurzel gemessen (vgl. Abbildung 13). Die Daten wurden statistisch ausgewertet.



Abbildung 12: Pro Substrat wurden zehn Felder abgesteckt, in die je zehn Kressesamen gesät wurden. (Eigenes Bild)



Abbildung 13: Ausmessen der Pflanzen. (Eigenes Bild)

3.2.5 Analyse der Kompostqualität

Nach dem Ablauf der Kompostierungsprozesse, wie in Kapitel 3.1.1 beschrieben, wurde der Kompost auf Grundlage des durch die LAGA herausgegebenen *Merkbblattes M10 über die Qualitätskriterien und Anwendungsempfehlungen für Kompost* untersucht. Als Prüfbestimmungen der einzelnen Parameter gibt die LAGA zumeist die Durchführungsbestimmungen aus dem Methodenbuch des VDLUFA an (LAGA, 1995, S. 55). Die in der Tabelle 4 genannten Qualitätsparameter wurden nach den im Methodenbuch genau beschriebenen Anweisungen zur Versuchsdurchführung untersucht.

Zur Probenahme wurden die Reaktoren jeweils entleert und der Kompost homogenisiert, um dann über das Mischungskreuz eine definierte Probe zu entnehmen.

Tabelle 4: Methoden zur Untersuchung der Kompostqualität

Qualitätsparameter	Methodenprinzip	Literatur
Rohdichte bzw. Volumengewicht [g/L]	Material in loser Schüttung in Messzylinder einwiegen und in bestimmter Fallvorrichtung zehn Mal aus zehn Zentimetern Höhe auf die Messvorrichtung fallen lassen. Eingerütteltes Volumen ablesen.	VDLUFA-Methode A 13.2.1 (Bassler et al., 1991)
Wassergehalt, Trockensubstanzgehalt [Massen-%]	Nach Gewicht entnommene Probe wird im Trockenschrank bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz (mind. 15 h) getrocknet, im Exsikkator auf Raumtemperatur abgekühlt und gegen gewogen. Trocknungsverlust wird als im Material vorhandener Wasseranteil angesehen. Trockensubstanzgehalt ist entsprechend das nach der Trocknung zurückbleibende Gewicht.	VDLUFA-Methode A 2.1.1 (Bassler et al., 1991)
Glühverlust, organische Substanz [% TS]	Getrocknete Probe wird in Porzellantiegel eingewogen und im Muffelofen bei 550°C verglüht. Tiegel wird mit verbliebener Asche im Exsikkator abgekühlt und erneut gewogen. Verlorenes Gewicht gilt als Anteil an organischer Substanz.	VDLUFA-Methode A 15.2 (Bassler et al., 1991)

Rottegrad	Selbsterhitzungsversuch: Wassergehalt des zu untersuchenden Komposts wird auf 40-60% eingestellt. Kompost wird in loser Schüttung in ein Dewargefäß (dient zur thermischen Isolierung) gefüllt. Temperatur wird mit Sensor für 72h aufgezeichnet. Temperaturmaximum bestimmt den Rottegrad (vgl. Kapitel 2.1.2). ¹	Merkblatt M10 der LAGA, Abschnitt B 2.1 Qualitätsmerkmale und Anforderungen (LAGA, 1995, S. 14)
pH-Wert	Die Probe wird mit einer Salzlösung (0,01 molare CaCl ₂) im Verhältnis 1+2,5 (m+V) eingewogen und für 1h durch einen Schüttler extrahiert. Dann erfolgt die elektrometrische Messung der H ⁺ -Ionen-Aktivität (ausgedrückt als negativer dekadischer Logarithmus) der Suspension.	VDLUFA-Methode A 5.1.1 (Bassler et al., 1991)
Salzgehalt [g KCl/l FS]	Die Probe wird mit gesättigter Gipslösung (Ca*2H ₂ O in dest. Wasser) im Verhältnis 1+10 (m+V) eingewogen und für 1h durch einen Schüttler extrahiert. Messung der Leitfähigkeit der Extraktionslösung und des Extrakts. Berechnung des Salzgehaltes als Kaliumchlorid aus der Differenz der beiden Werte.	VDLUFA-Methode A 13.4.2 (Bassler et al., 1991)

¹ Da für die Analyse nur drei Dewar-Gefäße zur Verfügung standen, wurde je Versuchsdurchlauf nur die Hälfte der Fertigungskomposte auf den Rottegrad getestet. Es wurde jeweils eine Nullprobe, ein mit *T. atroviride* beimpfter Kompost und ein ohne Druckluft gereifter Kompost untersucht, sodass die Ergebnisse als repräsentativ für alle Komposte angesehen werden können.

4 Ergebnisse

4.1 Ergebnisse der Rotteuntersuchungen mit *T. atroviride*

4.1.1 Untersuchungen in Versuchsreaktoren

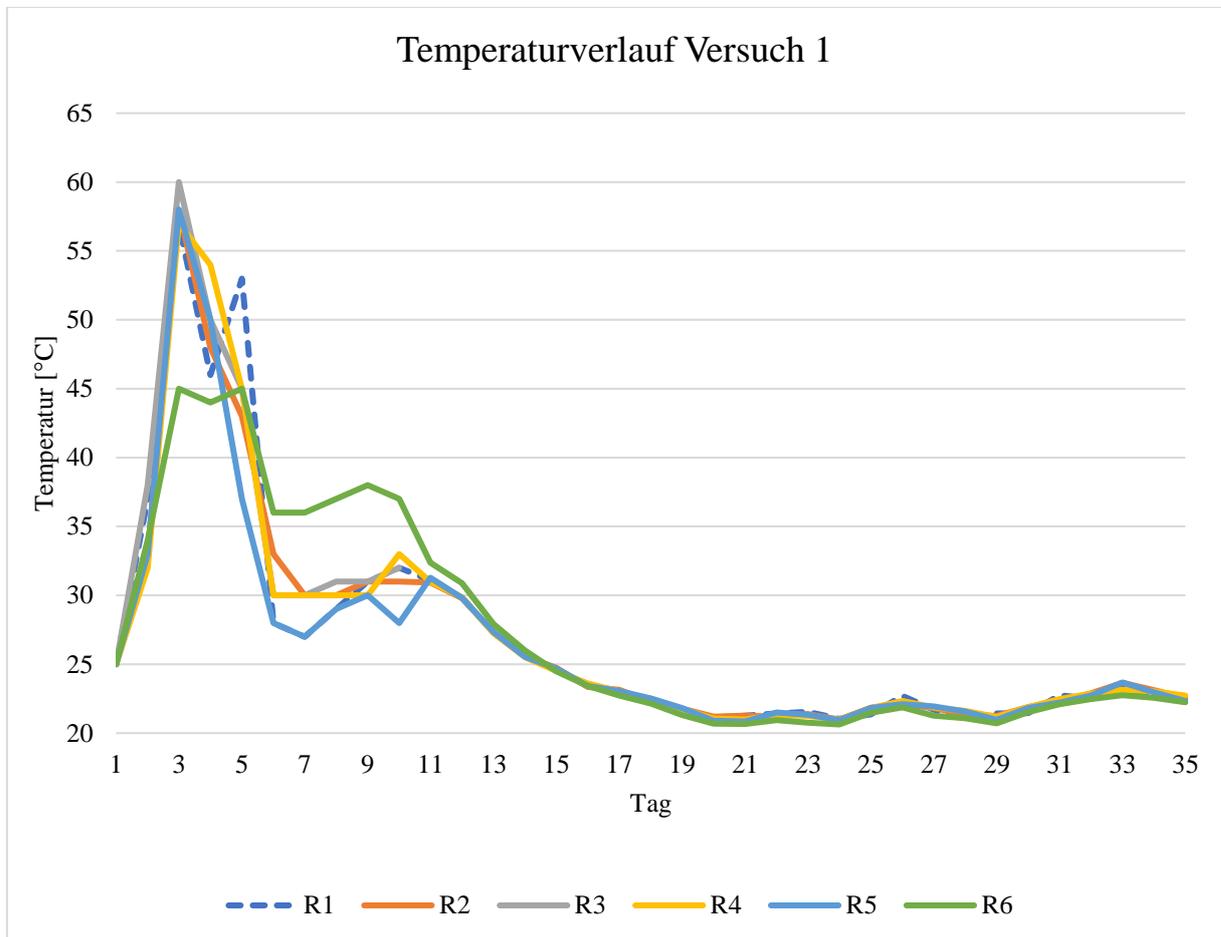


Abbildung 14: Temperaturverlauf des ersten Versuchsdurchlaufs. (Gestrichelt: Nullprobe)

Im ersten Versuchsdurchlauf stieg die Temperatur in den Reaktoren R1-R5 nach drei Tagen auf bis zu 60°C an und sank dann bis zum sechsten Tag wieder auf rund 30°C. Nach dem Umsetzen und der Erhöhung des Wassergehalts am siebten Tag stieg die Temperatur für weitere sechs Tage um einige Grade an, um dann bis zum 20. Tag auf rund 22°C zu sinken. Bei dieser „Zimmertemperatur“ blieb die Temperatur bis zum Ablauf des Versuchs. Die Rotte in R6 (ohne Druckluft) zeigte als einzige leichte Abweichungen des Temperaturverlaufs in den ersten elf Tagen. Die Temperatur der Nullprobe R1 entwickelte sich, außer eines Einbruchs am fünften Tag, der durch einen Messfehler begründet werden kann, ähnlich wie die der beimpften Komposte.

Beim Umsetzen nach sieben Tagen war festzustellen, dass sich in allen sechs Reaktoren ein weiß-verpilzter, trockener Kern gebildet hatte (vgl. Abbildung 15). Die Erhöhung des Wassergehaltes wirkte dem entgegen.



Abbildung 15: Trockener, verpilzter Kern im Reaktorinneren

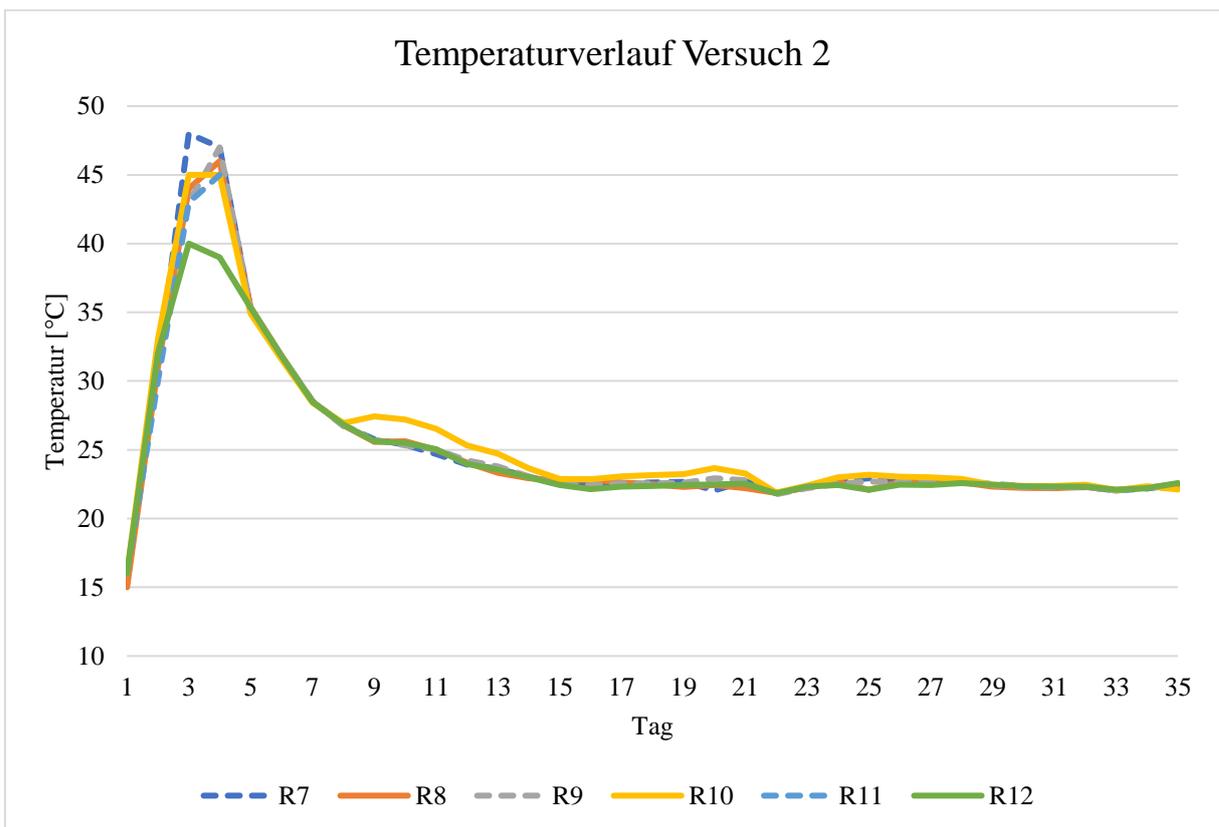


Abbildung 16: Temperaturverlauf des zweiten Versuchsdurchlaufs. (Gestrichelt: Nullproben)

Im zweiten Versuchsdurchlauf stieg die Temperatur der Kompostierungsansätze R7 bis R11 während der ersten drei Tagen auf rund 45°C. R12 (ohne Druckluftbelüftung) erreichte dagegen nur 40°C. Ab Tag fünf war der Temperaturverlauf von R7 bis R12 nahezu identisch: Er sank bis zum 15. Tag auf 22°C und war ab dann gleichbleibend. Zwischen den Nullproben und mit *T. atroviride* beimpften Komposte konnte bezüglich der Temperaturentwicklung kein Unterschied festgestellt werden.

Die Gewichtsreduktion durch die Nachrotte war in allen Reaktoren (Nullproben und beimpfte Substrate) sehr ähnlich und betrug durchschnittlich 12,9% (vgl. Tabelle 5). Im Fertigkompost aus dem zweiten Versuchsdurchlauf war mit bloßem Auge kein Pilzmyzel zu erkennen (vgl. Abbildung 17a). Auf einzelnen toten Gehölzen des Strukturmaterials war ein deutlicher Befall durch *T. atroviride* erkennbar (vgl. Abbildung 17b).

Tabelle 5: Durch die Kompostierung erzielter Gewichtsverlust.

Reaktor	Füllgewicht Frischkompost[kg]	Füllgewicht Fertigkompost [kg]	Differenz [kg]	Gewichtsverlust [%]
R7	20,1	17,58	2,52	12,5
R8	18,34	15,87	2,47	13,5
R9	17,54	15,26	2,28	13,0
R10	19,76	17,18	2,58	13,1
R11	18,5	16,14	2,36	12,8
R12	19,44	17,04	2,4	12,3
Mittel				12,9



Abbildung 17: Im 2. Versuch hergestellter Fertigkompost. a) mit dem bloßen Auge ist kein Pilzmyzel zu erkennen. b) Besiedelung des Strukturmaterials durch *T. atroviride*. (Eigene Bilder)

4.1.2 Untersuchungen in Bioabbaubarkeitsmesszellen

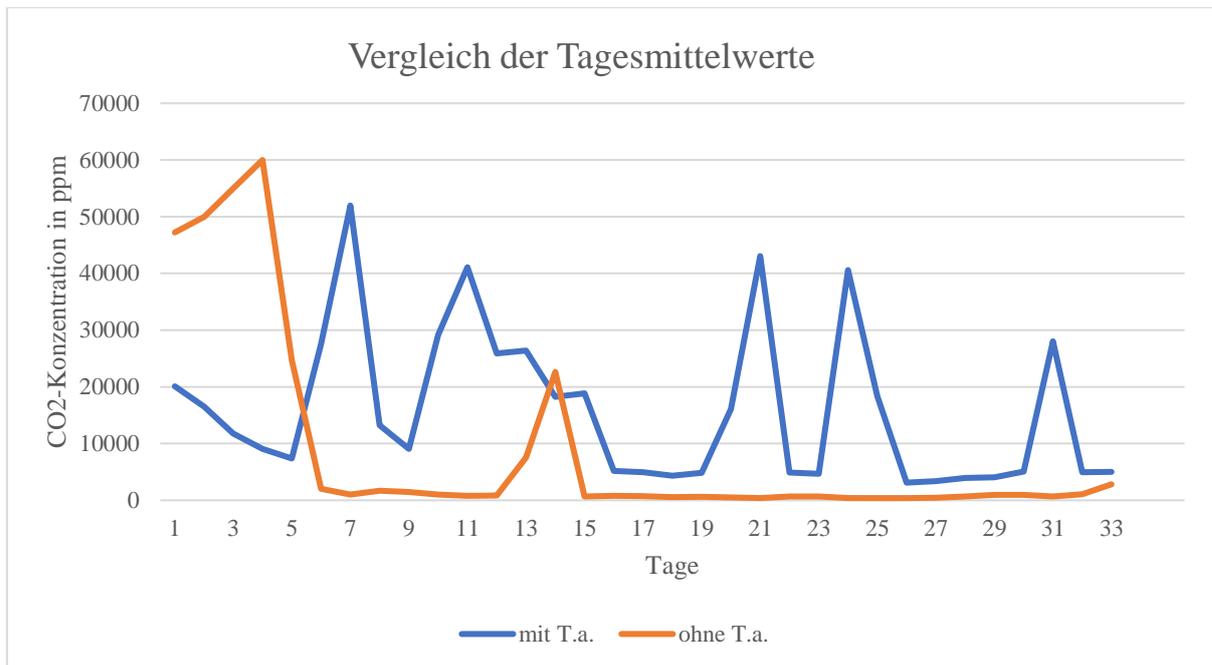


Abbildung 18: Tagesmittelwerte der CO₂-Messwerte in Bioabbaubarkeitsmesszellen.

Über fünf Wochen wurde die Kohlenstoffdioxidbildung eines mit *T. atroviride* inokulierten Komposts und der entsprechenden Kontrolle aufgezeichnet. Dabei entstanden jeweils über 50.000 Werte pro Messzelle, welche in der angehängten Exceldatei (Anhang 1) eingesehen werden können. In beiden Zellen entstanden zeitweise CO₂-Konzentrationen, die die Kapazität der Sensoren von 40.000 ppm überschritten. In der Kontrolle geschah dies zu Beginn und zum Ende der Messung sowie zwischen dem 12. und 15. Tag. Der beimpfte Kompost entwickelte während der Messung immer wieder Peaks, die 40.000 ppm überschritten.

Um trotzdem eine Aussage über die durch die Abluft ausgetragenen Kohlenstoffwerte treffen zu können, wurden für die fehlenden Messwerte möglichst plausible Annahmen getroffen, mit denen die Verläufe der Kurven ergänzt wurden. Die maximale Konzentration wurde auf 60.000 ppm festgelegt.

Am 32. Tag der Messung wurden die Sensoren für eine Plausibilitätsprüfung getauscht. Danach kam es in beiden Kurven zu starken Anstiegen der CO₂-Konzentrationen, weshalb diese Messwerte von der Auswertung ausgeschlossen wurden. Abbildung 18 stellt den Kurvenverlauf der angepassten Tagesmittelwerte dar. Die unbearbeiteten Werte sowie die CO₂-Entwicklung der einzelnen Stunden können im Anhang 1 eingesehen werden.

Aus dem Glühverlust (53,4%) wurde der Kohlenstoffanteil im Frischkompost berechnet: Dieser betrug 29,7%. Die Proben wurden täglich mit 360 Litern belüftet. Tabelle 6 stellt die Berechnungsergebnisse des Kohlenstoffaustrages in der Abluft dar.

Tabelle 6: Ergebnisse der Kohlenstoffbilanz aus den Bioabbaubarkeitsmesszellen (vgl. Berechnung im Anhang 1)

	mit <i>T. atroviride</i>	ohne <i>T. atroviride</i>
C (ges) [g]	316,2	271,9
CO₂ (ges) [g]	340,3	186,2
C (umgesetzt) [g]	91,9	50,3
C (umgesetzt) [%]	29	18

Durch die Plexiglaswandung der Messzelle konnte beobachtet werden, dass sich nach drei Wochen ein weißes Myzel im beimpften Kompost entwickelte. Zum Ende des Versuches entwickelte sich außerdem der Fruchtkörper eines Pilzes (vgl. Abbildung 19).

Die Biokunststoffe in beiden Zellen zeigten nach fünf Wochen keine Spuren von Zersetzung. Auch durch das Stereomikroskop ließ sich keine Besiedelung des Biokunststoffes durch *T. atroviride* feststellen. Im Vergleich zu den Biokunststoffen aus der Kontrolle ließ sich jedoch eine Abschwächung der Farbintensität des Kunststoffes beobachten (vgl. Abbildung 20).



Abbildung 19: Sichtbarer Pilz im Kompost. a) Pilzmyzel b) Fruchtkörper. (Eigene Bilder)

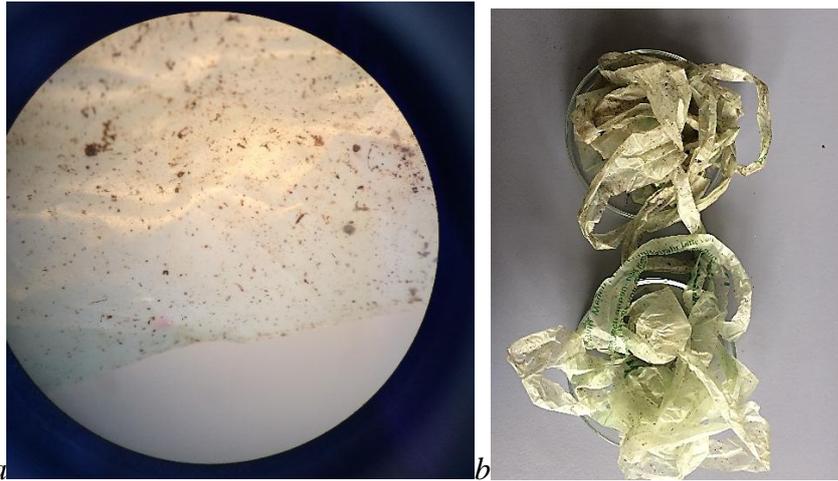


Abbildung 20: Biokunststoffe nach fünf Wochen der Kompostierung. a) Betrachtung unter dem Stereomikroskop. b) oben: aus mit *T. atroviride* beimpftem Kompost, unten: aus Kontrollkompost. (Eigene Bilder)

4.2 Ergebnisse der Analysen

4.2.1 Sporulationsbedingungen von *T. atroviride*

Zunächst wurden die in Abbildung 9 zusammengefassten Kulturen untersucht:

Wie in Kapitel 2.2 erläutert, lassen sich die Sporen des *T. atroviride* an ihrer Grünfärbung erkennen, während das Pilzmyzel einen „weißen Flaum“ bildet.

Ließen sich bei Betrachtung der Kolbeninhalte Sporen erkennen, so wurden die einzelnen Kulturen getrocknet und die Lebendkeimzahl, wie im Praktikumsbericht beschrieben, ermittelt. Kulturen, bei denen optisch keine oder nur sehr wenig Sporen zu sehen waren, konnten direkt ausgeschlossen werden und mussten nicht weiter untersucht werden (vgl. Abbildung 21).

Tabelle 7 zeigt die Ergebnisse des Versuchs mit der Parameterkombination nach Abbildung 9.

Tabelle 7: Ergebnisse der SSF-Kultivierung zur Sporenproduktion von T. atroviride unter den kombinierten Parametern der Feuchte, Temperatur und Dauer

Kultur (Feuchte, Temperatur, Dauer)	Beobachtung	LKZ/ g Substrat
45%, 25°C, 5d	Wachstum hauptsächlich am Kolbenboden, hier auch grüne Sporen. Kaum Wachstum im oberen Teil des Kolbens.	-
45%, 25°C, 8d	Substrat komplett bewachsen mit weißen Hyphen und grünen Sporen, stand vorne im Wärmeschrank.	2,10E+08
45%, 30°C, 5d	Einzelne weiß ausstrahlende Kolonien, mehr am Kolbenboden, insgesamt wenig. Entsorgt.	-
45%, 30°C, 8d	Substrat nur teilweise bewachsen, einzelne grüne Sporen. Entsorgt.	-
50%, 25°C, 5d	Gesamtes Substrat bewachsen, überwiegend weißes Myzel, vereinzelt grüne Sporen.	6,82E+05
50%, 25°C, 8d	Nur Teile des Substrats bewachsen, (v.a. am Kolbenboden). Nur weiße Hyphen zu erkennen, keine grünen Sporen. Wahrscheinlich nicht ausreichend gemischt. Entsorgt.	-
50%, 30°C, 5d	Einzelne ausstrahlende Kolonien, mehr am Kolbenboden, ein wenig mehr als bei 45% Feuchte. Entsorgt.	-
50%, 30°C, 8d	Substrat bewachsen mit weißen Hyphen und grünen Sporen.	1,81E+08
55%, 25°C, 5d	Substrat überwiegend bewachsen, weiß, auch grüne Sporen.	1,02E+08
55%, 25°C, 8d	Substrat komplett bewachsen mit weißem Myzel und grünen Sporen.	1,69E+08
55%, 30°C, 5d	Viel weißes Myzel, kaum grüne Sporen, nach der Trocknung starke Kontamination. Entsorgt.	-
55%, 30°C, 8d	Substrat bewachsen mit weißen Hyphen und grünen Sporen.	1,55E+08



Abbildung 21: In dunkler, sauerstoffarmer Umgebung bei 45% Feuchte bildet *T. atroviride* Myzel. (Eigene Bilder)

Bei einer Feuchte von 45% konnte kaum Sporenproduktion festgestellt werden. Mit zunehmender Feuchte nahm auch die Sporenzahl zu.

Die Sporenproduktion gelang viermal bei 25°C und zweimal bei 30°C, wobei bei der Höhe der Sporenanzahl kein wesentlicher Unterschied aufgezeichnet werden konnte.

Nach acht Tagen Kultivierungsdauer konnte eine leichte Erhöhung der Keimzahlen im Vergleich zu fünf Tagen nachgewiesen werden.

Es wurde festgestellt, dass die Kulturen im vorderen Teil des Wärmeschrankes, auf den beim Öffnen der Tür stets Licht fiel, mehr Sporen aufwiesen, als die im hinteren, dunkleren Teil des Schrankes.

Bei weiteren Versuchsansätzen wurden daher zwei Kolben außerhalb des Wärmeschrankes aufgestellt, sodass Licht auf die Kultur fallen konnte. Die Sporulationsdauer wurde auf elf Tage erhöht und die Hälfte der Kulturen wurde bei einem Feuchtegehalt von 60% inkubiert.

Tabelle 8: Erhöhte LKZ durch angepasste Umgebungsbedingungen.

Bedingungen (Feuchte, Temperatur, Dauer)	LKZ / g Substrat
60%, 25°C, 11d	3,19E+08
60%, Zimmertemperatur (ca. 22°C), 11d, Licht	3,93E+08
60%, 25°C, 11d	2,99E+08
55%, 25°C, 11d	3,25E+08
55%, 25°C, 11d	3,49E+08
55%, Zimmertemperatur (ca. 22°C), 11d, Licht	4,91E+08

Durch diese Anpassung der Umgebungsbedingungen gelang eine deutliche Steigerung der Sporenzahlen. Die Kulturen mit Lichteinwirkungen verzeichneten die höchsten Sporenzahlen. Die im Vergleich zum Wärmeschrank geringere Zimmertemperatur hatte keine sichtbaren Auswirkungen auf die Sporulation.

Es war weder eine Verbesserung noch eine Verschlechterung durch die Erhöhung des Wassergehalts von 55% auf 60% nachzuweisen.

Deutlich zu sehen war außerdem, dass die Sporen sich stets auf der Oberfläche des Substrats bildeten, während im Inneren hauptsächlich das Myzel des Pilzes wuchs. Für die Versuche zur Nachzucht von Bioabfällen unter Nutzung des Pilzes *T. atroviride* wurden Sporen in der Reinkultur benötigt. So wurden nach den erlangten Erkenntnissen weitere Kulturen angesetzt. Einige weitere Anpassungen wurden vorgenommen: Die Kolben wurden nun luftdurchlässig statt luftdicht verschlossen und zur Vergrößerung der Oberfläche wurden statt wie vorher 160g nur noch 80g Substrat verwendet.

Die Erhöhung der Luftversorgung, die Verringerung des Substrats zur Oberflächenvergrößerung und die Lichteinwirkung bewirkten eine deutlich verstärkte Sporulation. Unter diesen optimalen Bedingungen waren die Sporen schon nach fünf Tagen reif zur Ernte.

Aus Zeitgründen konnten keine weiteren Lebendkeimzahlen bestimmt werden, der Erfolg dieser Maßnahmen wurde jedoch durch die starke Grünfärbung des Substrats deutlich (siehe Abbildung 22c).

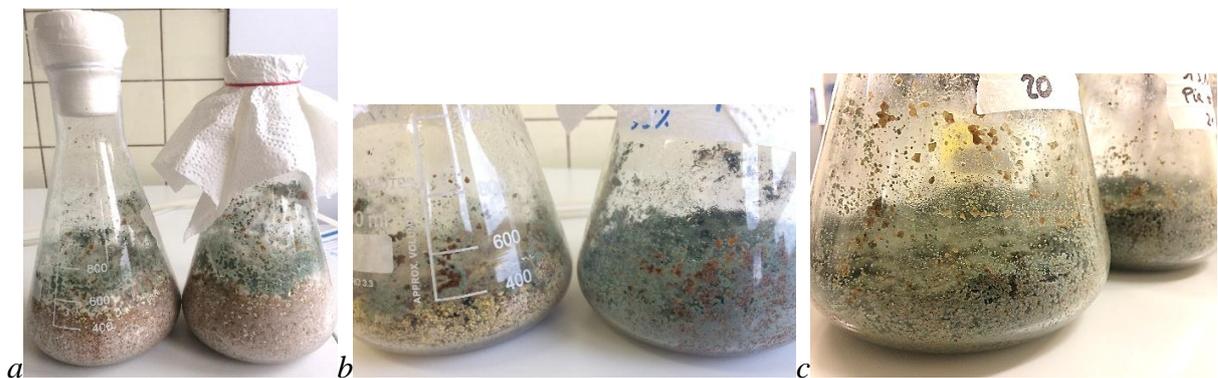


Abbildung 22: Anpassungen der Umgebungsbedingungen: a) links eingeschränkte Luftzufuhr, rechts gute Luftzufuhr; b) Unterschied dunkle (links) und helle (rechts) Umgebung; c) starke Sporulation unter optimalen Bedingungen. (Eigene Bilder)

Die Ergebnisse aller Untersuchungen bezüglich der Sporulation des Pilzes *T. atroviride* sind in Tabelle 9 zusammengefasst.

Tabelle 9: Optimale Sporulationsbedingungen von *T. atroviride*

Untersuchte Parameter SSF	Untersucht, optimal
Temperatur	22°C, 25°C, 30°C
Reifedauer	5 Tage, 8 Tage, 11 Tage (abh. von den anderen Parametern)
Feuchte	45%, 50%, 55%, 60%
Sauerstoff	Geringe, höhere O ₂ -Versorgung
Lichteinwirkung	Dunkel, Tageslicht
Substratmenge	160g, 80g

4.2.2 Einfluss von *T. atroviride* auf den pH-Wert seiner Umgebung

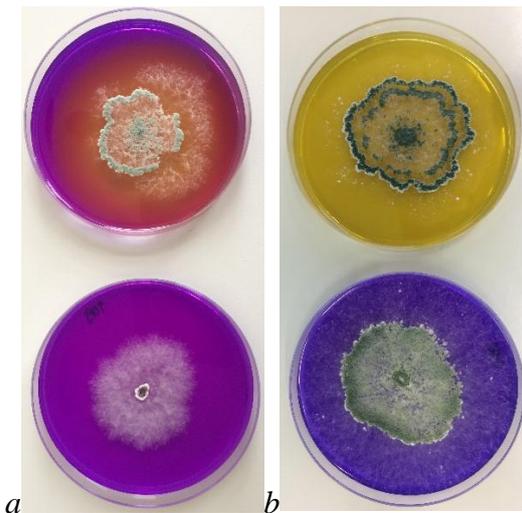


Abbildung 23: Einfluss von *T. atroviride* auf den pH-Wert des Mediums. Oben: Versauerung des Mediums durch *T. atroviride*, angezeigt durch pH-Indikator Bromphenolblau. Unten: MOPS puffert pH-Wert ab. a) nach vier Tagen: b) nach sieben Tagen. (Eigene Bilder)

Der Farbumschlag in Abbildung 23a ins grün-gelbe zeigt deutlich, dass *T. atroviride* seine Umgebung auf einen pH-Wert $\leq 3,4$ versauert. Wirkt der Puffer der Versauerung entgegen, ist das Wachstum des Pilzes wie auch seine Sporulation gehemmt (vgl. Abbildung 23b). Mit fortschreitender Zeit wächst das Myzel und der von der Versauerung betroffene Bereich des Mediums.

4.2.3 *In Vitro* Wirkung von *T. atroviride* auf das Wurzelwachstum von Kresse



Abbildung 24: Keimung der Kresse nach drei Tagen, unten: beimpft mit *T. atroviride*; oben: Kontrolle a) in mit pH-Puffer versetztem Medium; b) in Medium ohne Puffer. (Eigene Bilder)

Es zeigte sich, dass der Puffer MOPS, der eigentlich zur Pufferung der pH-Wertänderung durch *T. atroviride* eingesetzt wurde, eine deutlich hemmende Wirkung auf das Wachstum der Kresse hat: Sowohl die Wurzel wie auch das Hypokotyl waren deutlich kleiner als bei den Keimlingen, die im Puffer-freiem Medium wuchsen (vgl. Abbildung 24). Der Puffer bewirkte eine Hemmung von insgesamt 84 % (vgl. Anhang 1).

Um die Wechselwirkungen zwischen *T. atroviride* und der Wurzelentwicklung im späteren Wachstumsstudium der Kresse zu beobachten, wurden weitere Versuche ohne den Puffer MOPS angesetzt:

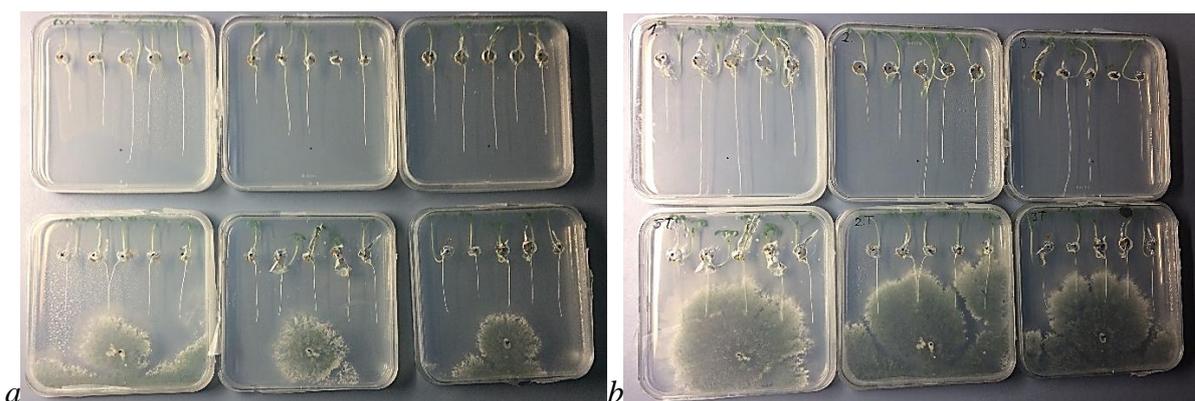


Abbildung 25: Auswirkungen des *T. atroviride* auf das Wurzelwachstum von Kresse. a) nach 6 Tagen b) nach 8 Tagen. (Eigene Bilder)

Tabelle 10: Ergebnisse der Untersuchung des Wurzelwachstums von Kresse unter Einsatz von *T. atroviride* und Kontrolle.

	mit <i>T.a.</i> nach 6 Tagen	Kontrolle nach 6 Tagen	mit <i>T.a.</i> nach 8 Tagen	Kontrolle nach 8 Tagen
Mittelwert [mm]	36,5	55	37,4	70,3
Median [mm]	37,5	56	38,0	60,0
Standardabw. [mm]	5,5	20	5,9	35,7
Variationskoef. [%]	15,2	36,3	15,9	50,9

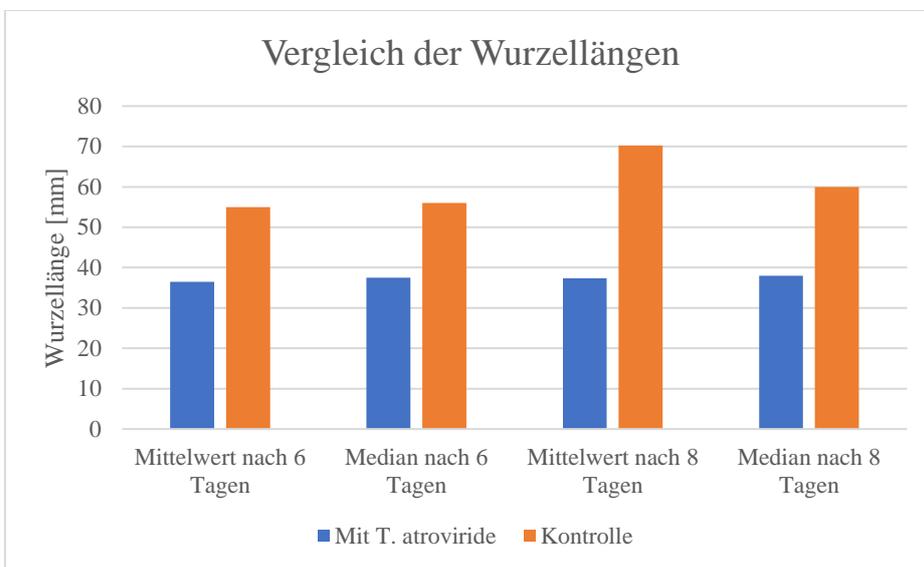


Abbildung 26: Diagramm zur Verdeutlichung des Effekts von *T. atroviride* auf das Wurzelwachstum von Kresse in vitro

Tabelle 11: Durch *T. atroviride* hervorgerufene Hemmung des Wurzelwachstums der Kresse

	nach 6 Tagen	nach 8 Tagen
Hemmung [%]	33	36,7

In Tabelle 10 sind die Ergebnisse der statistischen Auswertung der Kresseversuche dargestellt. Die Maße der einzelnen Keimlinge können in der angehängten Exceldatei (Anhang 1) nachvollzogen werden. Abbildung 26 zeigt deutlich, dass die Kressepflanzen der Kontrolle deutlich längere Wurzeln ausgebildet haben, als die in mit *T. atroviride* beimpften Medien. Durch den Vergleich des Wachstums nach sechs und nach acht Tagen wird deutlich, dass die Wurzel ab einer bestimmten Länge (hier ca. 37 mm) im mit dem Pilz inokulierten Medium nicht mehr

weiter wächst, während die Wurzeln der Kontrolle bis zu 120 mm lang werden. Die Hemmung durch *T. atroviride* nimmt damit im Versuchsverlauf zu (vgl. Tabelle 11).



Abbildung 27: Kresse stirbt nach 14 Tagen durch Wirkung des *T. atroviride*. (Eigenes Bild)

Nach 14 Tagen färbten sich die Kressepflanzen, die der Wirkung von *T. atroviride* ausgesetzt waren gelb und starben ab, während die Pflanzen in der Kontrolle weiterwuchsen und sogar Verästelungen bildeten (vgl. Abbildung 27).

4.2.4 Untersuchung des Fertigkomposts mit Kresse-Keimpflanzentests

Die Berechnung der in Tabelle 12 dargestellten Ergebnisse der Kresse-Keimpflanzentests kann in Anhang 1 nachvollzogen werden. Abbildung 28b verdeutlicht die in der Tabelle dargestellten Ergebnisse.

Tabelle 12: Ergebnisse der statistischen Auswertung der Kresse-Keimpflanzentests

	Nullprobe	Mit <i>T. atroviride</i> gereifter Kompost	Mit <i>T. atroviride</i> gereifter Kompost + Sporen
Keimungsrate [%]	68	29	45
Gesamtlänge [mm]			
Mittelwert	46	35	47
Median	47	37	49
Standardabw.	17	16	18
Variationskoef. [%]	37	45	39
Hypokotyllänge [mm]			
Mittelwert	31	27	32
Median	33	28	33
Standardabw.	10	11	11
Variationskoef. [%]	33	43	34
Wurzellänge [mm]			
Mittelwert	16	8	15
Median	15	6	15
Standardabw.	11	7	10
Variationskoef. [%]	69	82	69
pH-Wert am Ende des Wachstumszeitraum			
pH-Wert	7,9	8,1	8

Tabelle 13: Durch *T. atroviride* hervorgerufene Wachstumshemmung

Hemmung [%]		
	Mit <i>T. atroviride</i> gereifter Kompost	Mit <i>T. atroviride</i> gereifter Kompost+ Sporen
Gesamt	21,3	-3,2
Hypokotyl	13,8	0,0
Wurzel	63,3	0,0



a



b

Abbildung 28: Kresse-Keimpflanzentests in der Reihenfolge Nullprobe, mit *T. atroviride* gereifter Kompost, mit *T. atroviride* gereifter Kompost + Sporen. a) Pflanzen im Substrat b) Pflanzen ohne Substrat. (Eigene Bilder)

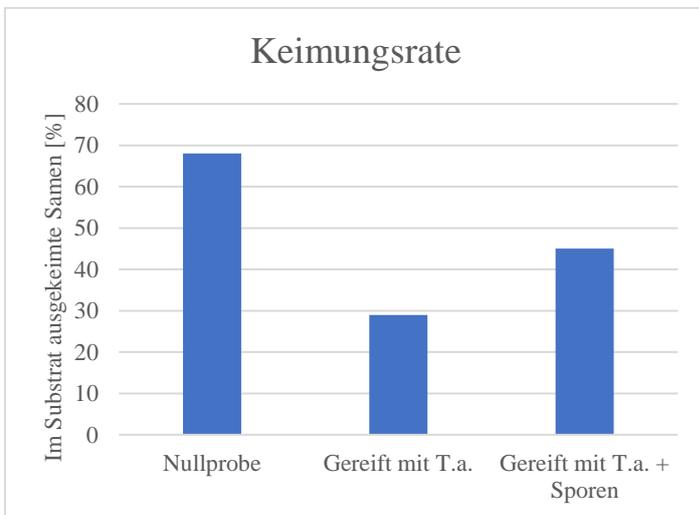


Abbildung 29: Vergleich der Keimungsraten

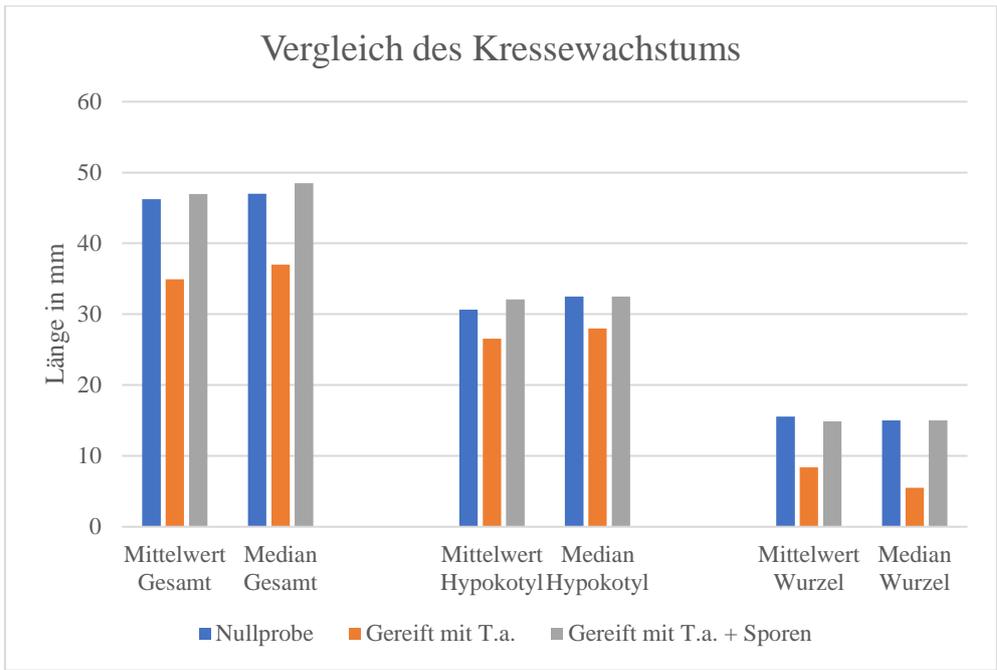


Abbildung 30: Vergleich des Kressewachstums

4.2.5 Analyse der Kompostqualität

Tabelle 14: Analyseergebnisse der Rotteuntersuchungen in Versuchsreaktoren. (grau hinterlegt: Frischkompost, grün: beimpft mit *T. atroviride*, weiß: Kontrolle)

	RD [g/L]	TS [%]	WG [%]	OS [%]	SAvol [gKCl /IFS]	pH	C [%]	N [%]	C/N
Fr. 1	490	65	35	49,3	11,8	7,8	20	1,6	12,8
R1	612	55	45	40,1	12,5	7,9	17,3	1,6	10,9
R2	622	54	46	41,5	13,6	7,7	17,5	1,7	10,4
R3	617	56	44	41,0	12,9	7,7	20,2	1,7	11,7
R4	600	59	41	35,5	12,7	7,7	20,6	1,9	11,2
R5	633	55	45	40,6	12,2	7,8	17,5	1,6	11,2
R6	628	56	44	37,3	12,3	7,7	19,4	1,9	10,3
Fr. 2	565	46	54	53,4	5,49	7,5	23,7	1,6	15,3
R7	552	47	53	36,9	5,42	8,2	21,9	1,8	12,0
R9	540	49	51	39,0	5,36	8,2	22,1	1,8	12,6
R11	532	49	51	34,8	6,52	8,3	22,7	1,23	18,4
R8	519	50	50	37,4	4,02	8,2	21,9	1,6	13,6
R10	548	49	51	38,0	6,26	8,2	20,6	1,5	13,4
R12	611	47	53	38,8	6,36	8,2	22,6	1,6	14,0

Tabelle 15: Wirkung des *T. atroviride* bzgl. der Qualitätsparameter des Fertigkomposts. Unterschied in %: positive Werte: scheinbare Verstärkung durch *T.a.*, negative Werte: scheinbare Verringerung durch *T.a.*.

	RD [g/L]	TS [%]	WG [%]	GV [%]	SA [g/ L FS]	pH	C [%]	N [%]	C/N
Erster Versuchsdurchlauf									
ohne <i>T.a.</i>	612	55	45	40	12	7,9	17,3	1,6	10,9
Mittelwert mit <i>T.a.</i>	620	56	44	39	13	7,7	19,0	1,7	11
Unterschied in %	1,3	0,9	-1,1	-2,3	2,0	-2,1	9,1	8,3	1,0
Zweiter Versuchsdurchlauf									
Mittelwert ohne <i>T.a.</i>	542	48	52	37	6	8,2	22,2	1,6	14,2
Mittelwert mit <i>T.a.</i>	560	49	51	38	6	8,2	21,7	1,6	13,6
Unterschied in %	3,2	0,4	-0,4	3,1	-3,9	-0,5	-2,5	-0,8	-5,1

Tabelle 16: Rottegrade der Frisch- und Fertigkomposte

	T_{\max} [°C]	Rottegrad
Frischk. 1	55	II
R1	21	V
R4	20	V
R6	21	V
Frischk. 2	51	II
R10	23	V
R12	23	V
R7	22	V

Tabelle 14 und Tabelle 16 fassen die Analyseergebnisse der Komposte aus den Rottereaktoren zusammen. Im Anhang 1 können die einzelnen Werte aller Dreifachproben, deren Mittelwerte hier aufgelistet wurden, sowie die Temperaturkurven für die Bestimmung der Rottegrade eingesehen werden. Die Analyseergebnisse der Fertigkomposte sind in Relation zu dem Frischkompost, aus dem sie hergestellt wurden, zu betrachten: Die Fertigkomposte R1-R6 entstanden aus dem Frischkompost 1 und R7-R12 aus Frischkompost 2.

Tabelle 15 zeigt, dass sich die Unterschiede zwischen den mit *T. atroviride* beimpften Komposten und den Nullproben unter vier Prozentpunkten bewegen.

5 Diskussion der Ergebnisse

5.1 Diskussion der Rotteuntersuchungen mit *T. atroviride*

5.1.1 Untersuchung in Versuchsreaktoren

In sechs zylindrischen Rottreaktoren wurde in zwei Versuchsdurchläufen unter kontrollierten Bedingungen eine Nachrotte von Bioabfällen und Strukturmaterial durchgeführt. Das Substrat wurde mit Sporen des *T. atroviride* beimpft, um zu untersuchen ob der Pilz ein Myzel bildet und durch seine enzymatische Aktivität den Rotteprozess beschleunigt. Durch Kontrollen ohne den filamentösen Pilz sollte der Unterschied messbar gemacht werden.

Die Temperaturentwicklung (vgl. Abbildung 14 und Abbildung 17), die Rottegrade der Kategorie V zum Ende der Versuche (vgl. Tabelle 16) und die erzielten Gewichtsverluste (vgl. Tabelle 5) zeigen, dass der verwendete Versuchsaufbau für die Kompostierung gut geeignet ist. Der Verlauf der Temperaturkurve dieser Versuche gleicht dem Verlauf aus dem Lehrbuch (vgl. Abbildung 2).

In beiden Versuchsdurchgängen zeigte jeweils einer der beiden ohne Druckluft behandelten Komposte (R6 und R12) einen leicht abweichenden, niedrigeren Temperaturverlauf im Vergleich zu den belüfteten Komposten. Wie angenommen ist die zusätzliche Belüftung also förderlich für den Prozess und wird für weitere Versuche empfohlen.

Der aus der Intensivrotte in Peine bezogene Frischkompost wies Wassergehalte von 35% auf. Im ersten Versuchsdurchlauf wurde der Wassergehalt zu Beginn der Untersuchung nicht erhöht. Trotzdem entwickelten sich Temperaturen von bis zu 60°C. Diese trockenen, heißen Bedingungen schienen optimal für einen weißen Pilz zu sein, der sich in allen Reaktoren stark ausbreitete (vgl. Abbildung 15). Zwar entwickelt auch *T. atroviride* ein weißes Myzel, die Tatsache, dass der Pilz auch in der Nullprobe wuchs, lässt jedoch vermuten, dass es sich nicht um den inokulierten Pilz handelte, sondern um einen Pilz, der schon in der Flora des Komposts enthalten war (vgl. Kapitel 2.1.4). Nachdem der Wassergehalt auf ca. 45% erhöht wurde und der Kompost erneut homogenisiert wurde, ging das weiße trockene Myzel zurück. Im zweiten Versuchsdurchlauf wurde die Feuchte von Beginn an auf 54% eingestellt, sodass sich kein trockener Kern entwickeln konnte.

Im Fertigkompost konnte mit bloßem Auge kein Myzel des *T. atroviride* identifiziert werden. Da die einzelnen Hyphen des Pilzes mikroskopisch klein sind, ist es dennoch möglich, dass sich ein für das menschliche Auge unsichtbares Geflecht entwickelt hat.

Poosapati et al. ermittelten, dass die Überlebenstemperatur der meisten *Trichoderma* Stämme bei 50°C liegt (Poosapati et al., 2014, S. 2). Da die Temperaturen im ersten Versuchsdurchlauf

für drei Tage höher als 50°C waren, ist davon auszugehen, dass ein Großteil des Pilzes abgetötet wurde. Wenn der Pilz schon zu Beginn der Nachrotte zerstört wurde, sind in der Analyse der Kompostqualität geringe Unterschiede im Vergleich zu der Nullprobe zu erwarten.

Um den Temperaturschock zu umgehen, wurde der Kompost im zweiten Versuch erst eine Woche nach Beginn der Nachrotte beimpft. Der Kompost hatte zu diesem Zeitpunkt eine Temperatur von 27°C, die in den Folgetagen auf ca. 22°C sank und sich dann kaum noch veränderte. Temperaturen in diesem Bereich sind optimal für das Wachstum von *Trichoderma* spp. (Domingues et al., 2016, S. 223). Auch in den Fertigkomposten des zweiten Versuchs ließ sich optisch kein Myzel erkennen, auf einzelnen Teilen des Strukturmaterials konnte jedoch ein Pilzbefall durch *T. atroviride* festgestellt werden (vgl. Abbildung 17b).

Sollte der Pilz in der gewerblichen Kompostierung eingesetzt werden, empfiehlt sich die Inokulation folglich erst nach fortgeschrittener Nachrotte, also bei Rottegrad IV. Die erhoffte Prozessverschnellerung durch den Einsatz von *T. atroviride* ist diesem späten Stadium nicht mehr zu erwarten. Zu Beginn der Reifephase ist die Cellulose zum großen Teil abgebaut, der Kompost enthält jedoch noch Lignin in Form von Totholz (vgl. Abbildung 2), welches im zweiten Versuch durch den Pilz befallen wurde. Der Einsatz von *T. atroviride* ist dann sinnvoll, wenn die Umsetzung dieser Stoffe gefördert werden soll.

5.1.2 Untersuchung in Bioabbaubarkeitszellen

Durch die Fähigkeit des *T. atroviride* mit seinem extrazellulären Enzymsystem Cellulose abzubauen, erhoffte man sich in den Versuchen mit Bioabbaubarkeitsmesszellen eine durch den Pilz hervorgerufene erhöhte Kohlenstoffdioxidproduktion, also eine messbare Abbauleistung, nachzuweisen.

Am 33. Tag der Untersuchung wurden für eine Plausibilitätsprüfung die Sensoren der Messzellen ausgetauscht. Ab diesem Tag gibt es in den Aufzeichnungen beider Messzellen starke Schwankungen zwischen niedrigen und extrem hohen Werten. Es ist daher von Messfehlern auszugehen, die die Plausibilitätsprüfung und die Messergebnisse ab diesem Tag ungültig machen.

Die Kurven der CO₂-Konzentrationen in der Abluft der beiden Proben verlaufen sehr unterschiedlich (vgl. Abbildung 18). Indem die CO₂-Produktion der Kontrolle in der ersten Woche sehr hoch ist und im weiteren Verlauf stark sinkt, ähnelt sie der Kurve von Rotte-CO₂-Aufzeichnungen in der Literatur (Wang et al., 2019, S. 8). Zu Beginn der Nachrotte werden leicht abbaubare Stoffe umgewandelt, sodass viel CO₂ als Abbauprodukt entsteht. Am 14. Tag stieg die CO₂-Produktion noch einmal für nur einen Tag auf Konzentrationen von über 40.000ppm an. Solch plötzliche Anstiege können durch Aktivitäten sukzessiver Mikroorganismen entstehen (vgl. Kapitel 2.1.3).

Die Aktivität von Mikroorganismen ist im Verlauf der CO₂-Konzentrationen in der mit *T. atroviride* beimpften Zelle deutlich zu erkennen: Anders als in der Kontrolle belaufen sich die Konzentrationen zu Beginn der Messung bei nur 20.000 ppm. Im weiteren Verlauf kommt es dann zu sechs Spitzen, in denen die CO₂-Konzentrationen für mindestens 24 Stunden auf über 40.000 ppm steigen und es scheint als durchlaufe der Kompost durch Mikroorganismen gesteuerte Abbauzyklen. Bisher ist wenig über den Einfluss von Pilzen auf CO₂-Konzentrationen in der Abluft der Kompostierung bekannt.

Es ist davon auszugehen, dass es sich bei den Mikroorganismen auch um *T. atroviride* handelt, da im beimpften Kompost deutlich ein weißes Myzel zu erkennen war. Das Wachstum eines Fruchtkörpers zeigt jedoch, dass auch andere Pilze aktiv waren.

Tabelle 6 zeigt die Ergebnisse zur Berechnung der Kohlenstoffbilanz: Während in der Kontrolle nur 18% des enthaltenen Kohlenstoffes umgesetzt wurden, wurden in dem mit *T. atroviride* beimpften Kompost 29% des Kohlenstoffes verstoffwechselt. Die durch den Pilz verursachten Umsetzungszyklen schienen effektiver als die hohen Umsetzungsraten zu Beginn der Nachrotte in der Kontrolle. Diese Ergebnisse zeigen, dass die Abbauleistung des Kohlenstoffes durch *T. atroviride* gesteigert wird. Es ist jedoch die eingeschränkte Zuverlässigkeit der Werte durch die

getroffenen Annahmen zu beachten. Weitere Analysen, wie die Kohlenstoffbestimmung im Fertigkompost durch eine Elementaranalyse, könnten zukünftige Untersuchungen zur Bioabbaubarkeit stützen. Außerdem empfiehlt es sich, die Kompostmasse der Proben in den Zellen deutlich zu reduzieren, sodass die entstehenden CO₂-Konzentrationen die Leistungsgrenze der Sensoren nicht überschreiten.

Der Biokunststoff aus beiden Messzellen zeigte keine Spuren von Zersetzung oder Pilzbefall. Die grünliche Farbe des Materials ist jedoch im inokulierten Kompost verblasst, was als ein erstes Zeichen des Abbaus durch das extrazelluläre Enzymsystem des *T. atroviride* gedeutet werden kann. Aufgrund der langsamen Abbaubarkeit der Biokunststoffe sollten Abbaubarkeitsversuche mit *T. atroviride* zukünftig über einen längeren Zeitraum stattfinden.

5.2 Diskussion der Analyse

5.2.1 Sporulationsbedingungen von *T. atroviride*

Der Lebensraum des Pilzes *Trichoderma* spp. ist die Rhizosphäre des Bodens. Dort wächst er als Myzel. Er vermehrt sich über Sporen, die durch die Luft übertragen werden (vgl. Kapitel 2.2.1). Nimmt der Pilz eine dunkle, luftarme und somit dem Bodeninneren ähnelnde Umgebung wahr, so bildet er ein Myzel, nicht aber seine Sexualorgane. Sauerstoff und Licht sind für den Pilz Anzeiger für die Bodenoberfläche, wo eine Vermehrung durch Sporen möglich ist: Er bildet Konidien aus. (Friedl et al., 2008, S. 154)

In der Kultivierung zur Sporenproduktion von *Trichoderma* spp. ist also stets die Umgebung einer Bodenoberfläche nachzuahmen.

Die Versuche zeigen, dass Feuchtegehalte von unter 50% für die Sporulation zu gering sind. Bei 55 und 60% Feuchte sporulierte der Pilz stark. Um den Trocknungsaufwand im Produktionsablauf zu reduzieren, empfiehlt sich jedoch eine Feuchte von 55%.

Die Kultivierung auf der Fensterbank bei Zimmertemperatur war ähnlich erfolgreich, wie die Kultivierung im Wärmeschrank bei 25°C. Temperaturen von 30°C zeigten weniger Erfolg. Um *T. atroviride* kommerziell herzustellen, sollte möglichst energiesparend gearbeitet werden, damit nicht nur der eventuelle Einsatz als Kompostierungshilfe als „umweltschonend“ deklariert werden kann, sondern auch die Produktion des Pilzes selbst. Eine Kultivierung zur Sporenproduktion bei Temperaturen zwischen 21 und 25°C ist daher empfehlenswert.

5.2.2 Einfluss von *T. atroviride* auf den pH-Wert seiner Umgebung

Die Ergebnisse aus Kapitel 4.2.2 zeigen deutlich, dass *T. atroviride* seine Umgebung *in vitro*, also das Nährmedium, versauert. Dies deckt sich mit den Ergebnissen von Pelagio-Flores (Pelagio-Flores et al., 2017, S. 6). In der Anwendung des Pilzes *ad planta*, also in den Rotteversuchen, fand jedoch keine Versauerung des Komposts statt: Sowohl die mit *T. atroviride* beimpften Substrate als auch die Nullproben zeigten vor und nach der Rotte pH-Werte im leicht alkalischen Bereich (vgl. Kapitel 4.2.5). Das kann zum einen bedeuten, dass der Pilz nicht ausreichend gewachsen ist, um eine pH-Wertänderung zu bewirken, zum anderen kann es ein Hinweis darauf sein, dass die Versauerung nur *in vitro* stattfindet und *ad planta* durch den Kompost gepuffert wird.

Weiterhin wurde sichtbar, dass der Pilz im gepufferten, neutralen Medium weniger Myzel ausbildet, als in der sauren Umgebung (vgl. Abbildung 23 a). Die leicht alkalische Umgebung könnte neben der zu hohen Temperatur ein Grund für das gehemmte Myzelwachstum des Pilzes in den Reaktoren sein.

5.2.3 Wirkung von *T. atroviride* auf das Wurzelwachstum von Kresse *in vitro*

Versuche zur Wirkung von *T. atroviride* auf das Wurzelwachstum von Kresse *in vitro* zeigten eindeutig eine durch den Pilz hervorgerufene Hemmung, die nach zwei Wochen zum Tod der Pflanzen führte. In Kapitel 4.2.3 wurde nachgewiesen, dass *T. atroviride* seine Umgebung *in vitro* versauert. Adus berichtete schon früh über die pH-Empfindlichkeit von Kressepflanzen, die ab pH-Werten von $< 6,5$ erheblich im Wurzelwachstum beeinträchtigt werden (Audus, 1948, S. 102). Die mit der Zeit zunehmende Hemmung des Wurzelwachstums (vgl. Tabelle 11), kann durch die mit der Zeit fortschreitende Ausbreitung des sauren Bereichs in der Schale begründet werden (vgl. Abbildung 23).

Die Versauerung als Ursache der Hemmung auszuschließen und somit andere Effekte des Pilzes auf das Wurzelwachstum zu untersuchen gelang nicht, da die Kresse empfindlich auf den eingesetzten Puffer reagierte.

5.2.4 Untersuchung des Fertigkomposts mit Hilfe des Keimpflanzentests

Der Einfluss von *T. atroviride* im Kompostsubstrat auf die Keimung und das Wachstum von Kressepflanzen soll im Folgenden diskutiert werden.

Die drei untersuchten Substrate zeigten deutliche Unterschiede im Wachstum der Kresse: Beide Substrate mit *T. atroviride* verzeichneten sehr geringe Keimungsraten von weniger als 50%, das mit *T. atroviride* gereifte Substrat sogar unter 30%, während die Nullprobe mit einer Keimungsrate von knapp 70% deutlich besser abschnitt. Die Längen der Kressepflanzen in der Nullprobe und in dem mit *T. atroviride* gereiften und zusätzlich mit Sporen versetztem Kompost waren sehr ähnlich, während die Längen des mit *T. atroviride* gereiften Komposts deutlich kürzer waren. Bei allen drei Proben war die Wurzellänge der Pflanzen im Vergleich zu den *in vitro* gekeimten Pflanzen ungewöhnlich klein (vgl. Kapitel 4.2.3).

Darum muss geschlussfolgert werden, dass die durch den Pilz hervorgerufene Veränderung des Komposts die Auskeimung der Kresse und auch das Pflanzenwachstum in diesem Falle hemmt (vgl. Tabelle 13). Die erneute Beimpfung des mit *T. atroviride* gereiften Komposts scheint die Hemmung des Pflanzenwachstums und einen Teil der Hemmung der Keimung aufzuheben, erzielt jedoch insgesamt keine Verbesserung im Vergleich zur Nullprobe.

Ousley et al. berichten, dass die Keimungsrate von Versuchspflanzen abhängig davon ist, mit welcher *Trichoderma* Spezies das Substrat beimpft wurde. Manche Spezies würden das Pflanzengift Viridiol produzieren, welches eine verspätete Keimung hervorrufe (Ousley et al., 1993, S. 283). Über die Spezies *T. atroviride* ist dieser Effekt bisher jedoch nicht bekannt. In Kapitel 4.2.2 wurde nachgewiesen, dass die Spezies *T. atroviride* seine Umgebung versauert. Bei Versuchen mit der Modelnpflanze *Arabidopsis* stellten Pelagio-Flores et al. fest, dass diese Versauerung das Pflanzenwachstum *in vitro* hemmt. Wurde der Versauerung jedoch durch einen Puffer entgegengewirkt, so bewirkte der Pilz eine Verstärkung des Wurzelwachstums (Pelagio-Flores et al., 2017, S. 6). *Ad planta* konnte im Versuch 3.2.4 eine solche Versauerung durch den Pilz jedoch nicht festgestellt werden, alle drei Substrate waren leicht alkalisch (vgl. Tabelle 12). Die Hemmung muss also andere Gründe haben. Der Widerspruch zwischen den Ergebnissen der Pelagio-Flores et al. und den hier durchgeführten Versuchen könnte beispielsweise auf die Aktivität anderer Mikroorganismen zurückzuführen sein. Oursley et al. verglichen den Einfluss von *Trichoderma*-Stämmen auf sterilem Kompost mit nicht-sterilem Kompost und stellten fest, dass der Pilz ohne den Einfluss anderer Mikroorganismen eine Förderung und in der nicht-sterilen Umgebung eine Hemmung des Wachstums von Salat bewirkt (Ousley et al., 1993, S. 283).

Die Kompostierung lebt von der Aktivität unterschiedlichster Mikroorganismen. Außerdem ist Kompost ein sehr heterogenes Gemisch. Die Versuche und Literatur zeigen, dass die Balance zwischen Wachstumsförderung und -hemmung durch *Trichoderma* spp. abhängig von verschiedenen Faktoren ist. Dass die gewerbliche Kompostierung Bedingungen schaffen kann, in denen der Pilz wachstumsfördernde Stoffe produziert, ist unwahrscheinlich. Aus Perspektive dieses Versuches ist von einer gewerblichen Kompostierung unter Einsatz von *T. atroviride* abzuraten.

5.2.5 Analyse der Kompostqualität

Die in Tabelle 14 und Tabelle 15 dargestellten Qualitätsparameter sollen im Folgenden bezüglich der Wirkung des *T. atroviride* und der „Qualitätsanforderungen für Fertigungskompost“ der BGK (vgl. Anhang 3) diskutiert werden.

Trockensubstanz und Wassergehalt

Im ersten Versuch ist der Wassergehalt des Frischkomposts geringer als der des Fertigungskomposts, weil während des Prozesses bewässert wurde. Im zweiten Versuch wurde der Wassergehalt zu Beginn auf 54% eingestellt und dann nicht weiter erhöht. Wegen des Gore® Covers konnte kaum Wasser aus dem System entweichen, weshalb die Komposte höchstens 3% des Wassergehaltes verloren. *T. atroviride* zeigt keinen Einfluss auf den Wassergehalt und den Anteil der Trockensubstanz.

Für das marktfertige Produkt des Fertigungskomposts sind die Wassergehalte aller Proben jedoch zu hoch: Anzustreben sind < 45% für lose Ware und < 35% für Sackware, da ansonsten Fäulnisprozesse in der Lagerung hervorgerufen, die Streufähigkeit vermindert und Transport- und Aufbringungskosten erhöht werden (Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V., 2017).

Rohdichte bzw. Volumengewicht

Das Volumengewicht des Komposts sollte mit dem Rotteverlauf zunehmen, weil die mineralische im Gegensatz zur organischen Substanz zunimmt (LAGA, 1995, S. 15). Im ersten Versuch nimmt die Rohdichte durch den künstlich erhöhten Wassergehalt zu. Im zweiten Versuch ist mit Ausnahme der Probe R12 eine leichte Abnahme der Rohdichte zu verzeichnen. Dies könnte auf die mit der Homogenisierung für die Probenahme einhergehende Auslockerung des Materials zurück zu führen sein. Auch hier ist der Unterschied zwischen den beimpften Komposten und der Kontrolle so gering, dass er eher auf die Heterogenität des Materials als auf den Einfluss des Pilzes zurückzuführen ist.

Salzgehalt

Der Gehalt an im Kompost enthaltenen wasserlöslichen Salzen ist bei der Anwendung zu beachten: Während Kompost als Komponente in Blumenerden Salzgehalte von ca. 5 g/L haben sollte, stellt der Salzgehalt in Komposten, die als Dünger in der Landwirtschaft oder als Bodenverbesserungsmittel eingesetzt werden, keinen limitierenden Faktor dar (LAGA, 1995, S. 16). Die Komposte aus dem ersten Versuch können also eher als Blumenerde und die Komposte aus dem zweiten Versuch als Dünger eingesetzt werden.

Hohe Salzgehalte kommen durch gesalzene Lebensmittel im Bioabfall zustande und werden weder durch den Rotteverlauf noch durch *T. atroviride* wesentlich verändert.

pH-Wert

In vitro versauert *T. atroviride* seine Umgebung (vgl. Kapitel 3.2.2). *In vivo*, also im Kompost, scheint der Pilz eine solche Wirkung nicht zu entfalten, der Kompost scheint die Versauerung abzupuffern. Shahid et al. stellten fest, dass einige *Trichoderma* Arten in alkalischer Umgebung ab einem pH-Wert von 8 in ihrem Wachstum gehemmt werden (Shahid et al., 2011, S. 149). Sollte diese Empfindlichkeit auch für *T. atroviride* zutreffen, spräche dies gegen einen Einsatz in der Kompostierung, da die pH-Werte für gewöhnlich leicht alkalisch sind. Die LAGA gibt an, dass $\frac{3}{4}$ aller Proben in einem Intervall zwischen 7,0 und 8,3 liegen (LAGA, 1995, S. 13).

Glühverlust

Der Gehalt an Organischer Substanz, der als Glühverlust ermittelt wird, ist für Komposte, die als Bodenverbesserungsmittel eingesetzt werden, besonders relevant. Er nimmt im Rotteverlauf ab, da die Organische Substanz während des Prozesses mineralisiert wird. Dies trifft auch deutlich für beide Versuchsverläufe zu.

Von der Beimpfung mit *T. atroviride* erhoffte man sich durch seine enzymatische Aktivität eine erhöhte Umwandlung der Organischen Substanz, die durch einen niedrigeren Glühverlust deutlich würde. Diese Erwartung wurde nicht erfüllt: Während die Glühverluste der beimpften Komposte im ersten Versuch um 2,3% niedriger als die Kontrollen waren, verzeichneten sie im zweiten Versuch um 3,1% höhere Werte. Diese Ergebnisse heben sich gegenseitig auf, sodass festgehalten werden muss, dass der Pilz keinen Unterschied im Abbau der Organischen Substanz bewirkte.

Kohlenstoff und Stickstoff

Im Verlauf der Kompostierung nimmt das Verhältnis von C/N ab, da der Kohlenstoff abgebaut wird und CO₂ freigesetzt wird. Dies lässt sich in den meisten Proben erkennen. Einzelne Werte für Kohlenstoff, die im Fertigkompost höher sind als im Frischkompost, lassen sich auf die Heterogenität des Komposts zurückführen. Im ersten Versuch wurde in den mit *T. atroviride* beimpften Komposten weniger Kohlenstoff abgebaut, als in der Kontrolle. Es ist jedoch gut möglich, dass dieser Unterschied von immerhin 9,1 % ebenfalls auf die Heterogenität der Proben zurückzuführen ist, da der Pilz in diesem Versuch durch die hohen Temperaturen in seinem Wachstum gehemmt war. Im zweiten Versuch waren die Kohlenstoffwerte in den beimpften

Proben um 2,5 % niedriger als die Werte der Kontrollen. Dieser recht kleine Unterschied kann durch den Abbau des Pilzes erzielt worden sein. Er ist jedoch zu gering, als dass von eindeutig verstärktem Abbau gesprochen werden könnte.

Insgesamt ergaben die Analyseergebnisse, dass der in den Versuchen hergestellte Fertigkompost zwar von guter Qualität ist, der Pilz *T. atroviride* jedoch keinen nennenswerten Einfluss auf die Güte des Produkts hatte.

6 Zusammenfassung

In dieser Bachelorarbeit wurde untersucht, ob der Einsatz des Pilzes *Trichoderma atroviride* den Prozess der gewerblichen Kompostierung durch sein Cellulose-zersetzendes Enzymsystem fördert und die Qualität und Pflanzenverträglichkeit des Fertigkomposts durch seine Eigenschaft als „plant-growth-promoting fungi“ verbessert und so als Inokulum auf den rund 1000 Kompostierungsanlagen in Deutschland eingesetzt werden könnte.

Die Ergebnisse der durchgeführten Versuche in den Rottereaktoren zeigen, dass die Anwendung des Pilzes keinen bedeutenden Unterschied des Prozessparameters der Temperatur bewirkt. Vielmehr beeinflusst die Temperatur den Pilz: Anders als zu Beginn der Versuche vermutet, ist ein Rottegrad II für den Pilz zu niedrig: Die hier entstehenden Temperaturen führen zum Teil zur Abtötung der Sporen. Die Beimpfung ist erst ab einem Rottegrad IV, also bei Temperaturen $<30^{\circ}\text{C}$, sinnvoll, sodass ausgeschlossen werden kann, dass der Pilz zur Verschnellerung des Kompostierungsprozesses beiträgt. Die erfolgreiche Beimpfung des Komposts im bei 27°C im zweiten Versuchsdurchlauf zeigte sich am Befall des Strukturmaterials durch *T. atroviride*. Eine Zugabe während dieser Reifephase könnte höchstens zur Pflanzenverträglichkeit beitragen, so zunächst die Hoffnung. Doch der Keimpflanzentest zeigte hier eine überraschende Wirkung des Pilzes: Er hemmte sowohl die Keimung als auch das Wachstum der Kressepflanzen. Dieses Ergebnis wurde von *in vitro* Versuchen mit Kresse und *T. atroviride* gestützt. Als Ursache vermutete man die durch den Pilz hervorgerufene Versauerung des Mediums, die vorher *in vitro* nachgewiesen wurde. Die pH-Werte der Substrate für den Keimpflanzentest bewegten sich jedoch im leicht alkalischen Bereich, sodass angenommen werden muss, dass der Pilz bestimmte Metabolite produziert, die den Pflanzen schädigen. Dieses Ergebnis steht im Widerspruch zu den meisten Aussagen über *Trichoderma* spp. in der Literatur, die diesem Pilz zumeist eine wachstumsfördernde Wirkung zusprechen. Es wird jedoch auch von der negativen Beeinträchtigung berichtet, wie z.B. in dem Paper „Effect of *Trichoderma* on plant growth: A balance between inhibition and growth promotion“ von Ousley et al.. Um das in dieser Bachelorarbeit erzielte Ergebnis zur Wachstumshemmung durch *T. atroviride* im Kompost zu stützen, sollten zukünftig mehrere Keimpflanzentests durchgeführt werden.

Keines der untersuchten Qualitätsmerkmale des Komposts (Wassergehalt, Volumengewicht, Salzgehalt, pH-Wert, Glühverlust und C/N-Verhältnis) zeigte eine durch den Pilz verursachte Veränderung. Nach diesem Ergebnis der Pilz keinen Einfluss auf die Güte des Fertigkomposts. Auch die Qualitätsparameter beeinflussen das Wachstum von *T. atroviride* eher, als dass es andersherum wäre.

Ein positiver Effekt des Pilzes ließ jedoch durch die Untersuchungen in Bioabbaubarkeitsmesszellen nachweisen: Die Bilanzierung des im Frischkompost enthaltenen Kohlenstoffs mit den Kohlenstoffdioxidkonzentrationen der Abluft zeigte, dass der Abbau wie erwartet durch den Pilz gesteigert wurde. Das Ergebnis beruht jedoch auf mehrfachen Annahmen, die notwendig waren, um die Konzentrationen, welche die Leistungsgrenzen der genutzten Messtechnik überschritten, zu ergänzen. Um die Sicherheit des Ergebnisses zu erhöhen, sollten zukünftig weitere Versuche mit geringeren Probenmengen durchgeführt werden, sodass eine genauere Berechnung des abgebauten Kohlenstoffs möglich ist.

Die in den Messzellen eingemischten Biokunststofffolien zeigten zwar keinen Befall durch *T. atroviride*, die Farbintensität des Kunststoffes wurde jedoch im Vergleich zur Kontrolle geschwächt. Dies lässt sich auf die enzymatische Aktivität des Pilzes zurückführen.

Die Ermittlung der Sporulationsbedingungen von *T. atroviride* in der SSF-Kultivierung ergaben, dass die Sporenproduktion ohne großen Energie- und Kostenaufwand möglich ist: Der Pilz sporuliert am besten bei einer Substratfeuchte von 55%, Temperaturen zwischen 21 und 25°C und unter Lichteinfluss. Unter diesen Bedingungen können innerhalb von fünf Tagen große Sporenmengen produziert werden.

Da bisher wenig über den Einsatz von *Trichoderma* spp. in der gewerblichen Kompostierung bekannt ist, bietet diese Bachelorarbeit mit ihren vielschichtigen Untersuchungen zu den relevanten Prozess- und Qualitätsparametern eine erste Beurteilungsgrundlage zur Eignung des Pilzes: Die Gesamtheit der Ergebnisse führt zu der Schlussfolgerung, dass sich der Pilz nicht zur Prozessverschnellerung oder als Kompostveredler eignet.

Während des Rotteablaufes ergibt sich eine natürliche Sukzession von Mikroorganismen, die an die jeweils vorherrschende Umgebung (pH-Wert, Temperatur, Mikroflora) angepasst ist. In dieser Abfolge kommt *T. atroviride* natürlicherweise vor. Wird der Pilz an einem „unnatürlichen“ Zeitpunkt im Ablauf in den Kompost gegeben, um seinen Effekt auf andere Phasen des Prozesses auszuweiten, so unterliegt er dort den durch andere Mikroorganismen hervorgerufenen Bedingungen.

7 Weiterführende Untersuchungen

Diese Bachelorarbeit sieht aufgrund der erzielten Ergebnisse von der Empfehlung des *Trichoderma atroviride* zur Prozessverschnellerung und als Kompostveredler ab. Da der Fokus der Arbeit auf der Abdeckung aller für die Kompostierung relevanter Bereiche liegt, fehlt in einigen Versuchen die Sicherheit durch eine niedrige Messwertanzahl. So empfiehlt sich eine Wiederholung der Keimpflanzentests mit allen aus den Reaktoren gewonnenen Fertigkomposten. Die Sicherheit dieses Ergebnis ist deshalb besonders wichtig, weil es der häufig in der Literatur benannten Wachstumsförderung durch *Trichoderma* spp. widerspricht.

Die Untersuchung der Ursachen für die Hemmung durch den Pilz wäre ein nächster Schritt, um den Pilz und seine Wirkung im Kompost besser verstehen zu können. Dazu können die in dieser Bachelorarbeit beschriebenen *in vitro* Untersuchungen zur Keimung von Kressepflanzen unter Einfluss des Pilzes um einen für die Pflanzenart geeigneten pH-Puffer ergänzt werden. So könnte die Versauerung des Mediums durch den Pilz als Ursache zur Wachstumshemmung im Medium ausgeschlossen werden und andere Faktoren begutachtet werden. Eine weitere Möglichkeit zur Ursachenerforschung besteht in Keimpflanzentests in sterilem Fertigkompost. Hier könnte der Einfluss anderer Mikroorganismen ausgeschlossen werden und die Wechselwirkung zwischen Nährstoffgehalt und Pilz analysiert werden.

In den Versuchen der sogenannten Rottereaktoren dieser Bachelorarbeit konnte rein optisch kein Myzel des Pilzes *T. atroviride* erkannt werden. In weiteren Versuchen empfiehlt es sich zu untersuchen, inwieweit sich der Pilz ausgebreitet hat. Dies könnte beispielsweise durch Proben aus unterschiedlichen Bereichen des Komposts (Kern, äußerer Bereich, Außenwandung), geschehen, die zunächst in Saline gelöst und dann in geringer Konzentration auf Nährmedien aufgetragen würden.

Die an der Hochschule Magdeburg-Stendal entwickelten Bioabbaubarkeitsmesszellen wurden für diese Bachelorarbeit zum ersten Mal verwendet. Aufgrund der Erfahrungen dieses ersten Versuches sollten zukünftig Kompostmengen, die ein Gewicht von 500g nicht überschreiten, untersucht werden. Des Weiteren ist eine Elementaranalyse des Frisch- und Fertigkomposts sinnvoll, um die Ergebnisse der CO₂-Konzentration mit dem in der Elementaranalyse ermittelten Kohlenstoff abzugleichen.

Biokunststoffe werden langsamer abgebaut als andere pflanzliche Abfälle. Der Untersuchungszeitraum der Wirkung von Pilzen auf die Zersetzung dieser Materialien sollte daher auf sechs Monate ausgeweitet werden. Um die Wissenschaftlichkeit des Versuchs zu garantieren sollte bei der Untersuchung nach dem Leitfaden der ISO 14855-1 vorgegangen werden. Wie in

Kapitel 3.1.2 beschrieben, eignen sich die Bioabbaubarkeitsmesszellen für die Untersuchung nach der genannten Norm. (ISO 14855-1, 2012)

Ergänzend zu Untersuchungen, die die Ergebnisse dieser Bachelorarbeit stützen, empfiehlt sich die Betrachtung anderer *Trichoderma* Spezies für die Eignung als Kompostierungshilfe. So gilt beispielsweise *Trichoderma reesei* weltweit als wichtigster Cellulase Produzent und wird bisweilen vielfach in industriellen Anwendungen eingesetzt (Schuster & Schmoll, 2010, S. 792).

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Hauptkomponenten der pflanzlichen Zellwand (Reineke & Schlömann, 2015, S. 83)....	10
Abbildung 2: Ablauf des Kompostierungsprozesses (Reineke & Schlömann, 2015, S. 436)	11
Abbildung 3: Kumulative Häufigkeit der dominanten Pilzarten aus Komposterde (Breitenbach, 1998, S. 43)	12
Abbildung 4: Mikroskopische Bilder der Hyphen von <i>T. atroviride</i> . a) Verzweigung der Hyphen. b) Gliederung der Hyphen durch Septen. (Eigene Bilder)	14
Abbildung 5: Sporen des <i>T. atroviride</i> . a) Konidiophoren und Konidien. b) Grünfärbung. (Eigene Bilder)	14
Abbildung 6: Hydrolyse der Cellulose (Golan, 2011, S. 6).....	15
Abbildung 7: Aufbau der Rotterektoren. a) Abdeckung und Belüftung. b) Kompost lagert auf Volierengeflecht. (Eigene Bilder).....	19
Abbildung 8: Aufbau Versuch Bioabbaubarkeit. a) Messzellen im Wärmeschrank. b) Mit Kompost, Sporen und Biokunststoffolie befüllte Messzelle. (Eigene Bilder)	22
Abbildung 9: Kombination der Parameter zur Ermittlung der idealen Sporulationsbedingungen von <i>T. atroviride</i> (Loeffke, 2019)	24
Abbildung 10: Auswahl gesunder Kressesamen unter dem Stereomikroskop. a) Krank aussehender Same. b) Gesunde Samen. (Eigene Bilder).....	26
Abbildung 11: In vitro Keimungsversuche: Stehende Inkubation unter Lichteinfluss. (Eigenes Bild) .	27
Abbildung 12: Pro Substrat wurden zehn Felder abgesteckt, in die je zehn Kressesamen gesät wurden. (Eigenes Bild).....	29
Abbildung 13: Ausmessen der Pflanzen. (Eigenes Bild)	29
Abbildung 14: Temperaturverlauf des ersten Versuchsdurchlaufs. (Gestrichelt: Nullprobe)	32
Abbildung 15: Trockener, verpilzter Kern im Reaktorinneren	33
Abbildung 16: Temperaturverlauf des zweiten Versuchsdurchlaufs. (Gestrichelt: Nullproben).....	33
Abbildung 17: Im 2. Versuch hergestellter Fertigkompost. a) mit dem bloßen Auge ist kein Pilzmyzel zu erkennen. b) Besiedelung des Strukturmaterials durch <i>T. atroviride</i> . (Eigene Bilder)	34
Abbildung 18: Tagesmittelwerte der CO ₂ -Messwerte in Bioabbaubarkeitsmesszellen.	35
Abbildung 19: Sichtbarer Pilz im Kompost. a) Pilzmyzel b) Fruchtkörper. (Eigene Bilder).....	36
Abbildung 20: Biokunststoffe nach fünf Wochen der Kompostierung. a) Betrachtung unter dem Stereomikroskop. b) oben: aus mit <i>T. atroviride</i> beimpftem Kompost, unten: aus Kontrollkompost. (Eigene Bilder)	37
Abbildung 21: In dunkler, sauerstoffarmer Umgebung bei 45% Feuchte bildet <i>T. atroviride</i> Myzel. (Eigene Bilder).....	39

Abbildung 22: Anpassungen der Umgebungsbedingungen: a) links eingeschränkte Luftzufuhr, rechts gute Luftzufuhr; b) Unterschied dunkle (links) und helle (rechts) Umgebung; c)starke Sporulation unter optimalen Bedingungen. (Eigene Bilder).....	40
Abbildung 23: Einfluss von <i>T. atroviride</i> auf den pH-Wert des Mediums. Oben: Versauerung des Mediums durch <i>T. atroviride</i> , angezeigt durch pH-Indikator Bromphenolblau. Unten: MOPS puffert pH-Wert ab. a) nach vier Tagen; b): nach sieben Tagen. (Eigene Bilder).....	42
Abbildung 24: Keimung der Kresse nach drei Tagen, unten: beimpft mit <i>T. atroviride</i> ; oben: Kontrolle a) in mit pH-Puffer versetztem Medium; b) in Medium ohne Puffer. (Eigene Bilder).....	43
Abbildung 25: Auswirkungen des <i>T. atroviride</i> auf das Wurzelwachstum von Kresse. a) nach 6 Tagen b) nach 8 Tagen. (Eigene Bilder).....	43
Abbildung 26: Diagramm zur Verdeutlichung des Effekts von <i>T. atroviride</i> auf das Wurzelwachstum von Kresse <i>in vitro</i>	44
Abbildung 27: Kresse stirbt nach 14 Tagen durch Wirkung des <i>T. atroviride</i> . (Eigenes Bild)	45
Abbildung 28: Kresse-Keimpflanzentests in der Reihenfolge Nullprobe, mit <i>T. atroviride</i> gereifter Kompost, mit <i>T. atroviride</i> gereifter Kompost + Sporen. a) Pflanzen im Substrat b) Pflanzen ohne Substrat. (Eigene Bilder).....	47
Abbildung 29: Vergleich der Keimungsraten.....	47
Abbildung 30: Vergleich des Kressewachstums.....	48

Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1: Verhältnis Kompost-Sporen im ersten Versuchsdurchlauf, Sporen in Lebendkeimzahl (kurz: LKZ). (Berechnung: siehe Anhang 1)</i>	<i>20</i>
<i>Tabelle 2: Verhältnis Kompost-Sporen im 2. Versuch (Berechnung: siehe Anhang 1)</i>	<i>20</i>
<i>Tabelle 3: Relevante Parameter der Rotteuntersuchungen mit T. atroviride in Bioabbaubarkeitsmesszellen (vgl. Anhang 1)</i>	<i>22</i>
<i>Tabelle 4: Methoden zur Untersuchung der Kompostqualität</i>	<i>30</i>
<i>Tabelle 5: Durch die Kompostierung erzielter Gewichtsverlust</i>	<i>34</i>
<i>Tabelle 6: Ergebnisse der Kohlenstoffbilanz aus den Bioabbaubarkeitsmesszellen (vgl. Berechnung im Anhang 1)</i>	<i>36</i>
<i>Tabelle 7: Ergebnisse der SSF-Kultivierung zur Sporenproduktion von T. atroviride unter den kombinierten Parametern der Feuchte, Temperatur und Dauer</i>	<i>38</i>
<i>Tabelle 8: Erhöhte LKZ durch angepasste Umgebungsbedingungen</i>	<i>39</i>
<i>Tabelle 9: Optimale Sporulationsbedingungen von T. atroviride</i>	<i>41</i>
<i>Tabelle 10: Ergebnisse der Untersuchung des Wurzelwachstums von Kresse unter Einsatz von T. atroviride und Kontrolle</i>	<i>44</i>
<i>Tabelle 11: Durch T. atroviride hervorgerufene Hemmung des Wurzelwachstums der Kresse</i>	<i>44</i>
<i>Tabelle 12: Ergebnisse der statistischen Auswertung der Kresse-Keimpflanzentests</i>	<i>46</i>
<i>Tabelle 13: Durch T. atroviride hervorgerufene Wachstumshemmung</i>	<i>47</i>
<i>Tabelle 14: Analyseergebnisse der Rotteuntersuchungen in Versuchsreaktoren. (grau hinterlegt: Frischkompost, grün: beimpft mit T. atroviride, weiß: Kontrolle)</i>	<i>49</i>
<i>Tabelle 15: Wirkung des T. atroviride bzgl. der Qualitätsparameter des Fertigkomposts. Unterschied in %: positive Werte: scheinbare Verstärkung durch T.a., negative Werte: scheinbare Verringerung durch T.a.</i>	<i>49</i>
<i>Tabelle 16: Rottegrade der Frisch- und Fertigkomposte</i>	<i>50</i>

Literaturverzeichnis

- Amlinger, F., Peyr, S., Hildebrand, U., Müsken, J. & Cuhls, C. (September 2005). *Stand der Technik Kompostierung: Grundlagenstudie*. Wien.
- Audus, L. J. (Januar 1948). *Studies on the pH-relationships of root growth and its inhibition by 2:4-dichlorophenoxyacetic acid and coumarin*. Cardiff, UK. Agricultural Research Council, Unit of Soil Metabolism.
- Bassler, R., Schmitt, L. & Siegel, O. (1991). *Methodenbuch / Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten* (4. Aufl.). VDLUFA-Verl.
- BMU (Hg.). (2019). *Bioabfälle*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/bioabfaelle>
- Breitenbach, E. (1998). *Phytosanitäre Qualitätsbeurteilung von gewerblich hergestellten Komposten anhand ihres Pilzspektrums* [Dissertation]. Humboldt-Universität zu Berlin, Berlin.
- Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. (Januar 2017). *Qualitätsanforderungen für Fertigungskompost*. Köln. https://www.kompost.de/fileadmin/user_upload/Dateien/Themen_Positionen/5.4.1_Position-BAW_2014_final.pdf
- Chemie.de. *Bromphenolblau*. <https://www.chemie.de/lexikon/Bromphenolblau.html>
- Domingues, M.V.P.F., Moura, K. E., Salomão, D., Elias, L. M. & Patricio, F.R.A. (2016). Effect of temperature on mycelial growth of *Trichoderma*, *Sclerotinia minor* and *S. sclerotiorum*, as well as on mycoparasitism. *Summa Phytopathologica*, 222–227. <https://doi.org/10.1590/0100-5405/2146>
- Friedl, M. A., Schmoll, M., Kubicek, C. P. & Druzhinina, I. S. (2008). Photostimulation of *Hypocrea atroviridis* growth occurs due to a cross-talk of carbon metabolism, blue light receptors and response to oxidative stress. *Microbiology (Reading, England)*, 1229–1241. <https://doi.org/10.1099/mic.0.2007/014175-0>
- Fuchs, G. (Hg.). (2017). *Allgemeine Mikrobiologie* (10., unveränderte Auflage). Georg Thieme Verlag.
- Gasmet.com. (2. März 2020). *Konzentrationsrechner (ppm in mg/m³)*. <https://www.gasmet.com/de/products/tools/free-offline-toolkit/>
- Golan, A. E. (2011). *Cellulase: Types and action, mechanism, and uses*. Nova Science Publishers.
- González-Pérez, E., Ortega-Amaro, M. A., Salazar-Badillo, F. B., Bautista, E., Douterlungne, D. & Jiménez-Bremont, J. F. (2018). The *Arabidopsis*-*Trichoderma* interaction reveals that

- the fungal growth medium is an important factor in plant growth induction. *Scientific reports*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-34500-w>
- Good, N. E., Winget, G. D., Winter, W., Connolly, T. N., Izawa, S. & Singh, R. M. (1966). Hydrogen ion buffers for biological research. *Biochemistry*, 467–477. <https://doi.org/10.1021/bi00866a011>
- Hakeem, K. R., Akhtar, M. S. & Abdullah, S. N. A. (2016). *Plant, Soil and Microbes*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-27455-3>
- Hay & Kuchenrither (1990). Fundamentals and applications of window composting. *Journal of Environmental Engineering*.
- Internationale Organisation für Normung (2012). *Determination of ultimate aerobic biodegradability of plastic materials under controlled composting conditions*. (ISO, 14855). Düsseldorf. Beuth Verlag GmbH.
- Determination of ultimate aerobic biodegradability of plastic materials under controlled composting conditions - Method by analysis of evolved carbon dioxide (2012).
- Kämpfer, P. & Weißenfels, W. D. (2001). *Biologische Behandlung organischer Abfälle*. Springer.
- Kehres, B. (21. März 2014). *Kompostierung von Biokunststoffen ist ein Irrweg*.
- Länderarbeitsgemeinschaft (Hg.). (1995). Merkblatt M 10 über Qualitätskriterien und Anwendungsempfehlungen für Kompost [Sonderheft]. Berlin. E. Schmidt.
- Loeffke, P. (2019). Bericht Praktikum bei der senzyme GmbH.
- López-Bucio, J., Pelagio-Flores, R. & Herrera-Estrella, A. (2015). Trichoderma as biostimulant: exploiting the multilevel properties of a plant beneficial fungus. *Scientia Horticulturae*, 109–123. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.08.043>
- Ousley, M. A., Lynch, J. M. & Whipps, J. M. (1993). Effect of Trichoderma on plant growth: A balance between inhibition and growth promotion. *Microbial ecology*, 277–285. <https://doi.org/10.1007/BF00176959>
- Paul, J. & Geesing, D. (2009). *Compost Facility Operator Manuel: A compost facility operator training course reference and guide*.
- Pelagio-Flores, R., Esparza-Reynoso, S., Garnica-Vergara, A., López-Bucio, J. & Herrera-Estrella, A. (2017). Trichoderma-Induced Acidification Is an Early Trigger for Changes in Arabidopsis Root Growth and Determines Fungal Phytostimulation. *Frontiers in plant science*, 822. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00822>
- Poosapati, S., Ravulapalli, P. D., Tippirishetty, N., Vishwanathaswamy, D. K. & Chunduri, S. (2014). Selection of high temperature and salinity tolerant Trichoderma isolates with

- antagonistic activity against *Sclerotium rolfsii*. *SpringerPlus*, 641.
<https://doi.org/10.1186/2193-1801-3-641>
- Reineke, W. & Schlömann, M. (2015). *Umweltmikrobiologie* (2. Aufl.). *Lehrbuch*. Springer.
- Schuster, A. & Schmoll, M. (2010). Biology and biotechnology of Trichoderma. *Applied microbiology and biotechnology*, 787–799. <https://doi.org/10.1007/s00253-010-2632-1>
- Sensirion (Hg.). (2018). *CO₂- und RH/T-Sensormodul: SCD30 - Sensormodul für Anwendungen im Bereich HLK und Luftqualität*. <https://www.sensirion.com/de/umweltsensoren/kohlendioxidsensor/kohlendioxidsensoren-co2/>
- Shahid, M., Singh, A. & Srivastava, M. (2011). Effect of temperature, pH and media for growth and sporulation of *Trichoderma longibrachiatum* and self life study in carrier based formulations. *Indian Journals*.
- Sigma-Aldrich (Hg.). (2019). *Murashige and Skoog Basal Salt Mixture (MS) M5524*.
<https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/SIGMA/M5524?lang=de®ion=DE>
- Spektrum.de (Hg.). (2001). *Kompaktlexikon der Biologie*. Spektrum Akademischer Verlag.
<https://www.spektrum.de/lexikon/biologie-kompakt/sukzession/11458>
- Thomé-Kozmiensky, K. J. (1995). *Biologische Abfallbehandlung. Enzyklopädie der Kreislaufwirtschaft*. EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik.
- Verein Deutscher Ingenieure e.V. (Juni 2018). *Terminologie in der Energie- und Abfallwirtschaft*. (VDI-Richtlinie, 3459, Blatt 4). Düsseldorf. Beuth Verlag GmbH.
- Wang, Y., Liu, S., Xue, W., Guo, H., Li, X., Zou, G., Zhao, T. & Dong, H. (2019). The Characteristics of Carbon, Nitrogen and Sulfur Transformation During Cattle Manure Composting-Based on Different Aeration Strategies. *International journal of environmental research and public health*. Advance online publication.
<https://doi.org/10.3390/ijerph16203930>

Anhang

Anhang 1: Exceldokument aller Messwerte und Versuchsdokumentationen (siehe Datenträger)

Anhang 2: Länderarbeitsgemeinschaft (Hg.). (1995). Merkblatt M 10 über Qualitätskriterien und Anwendungsempfehlungen für Kompost [Sonderheft] (21), Teil B: Qualitätssicherung. Berlin. E. Schmidt.

Anhang 3: „Qualitätsanforderungen für Fertigkompost“ der BGK

Anhang 4: Aufgabenstellung der Bachelorarbeit

Anhang 2

Vorrotte

Auf einige Tage beschränkte Anfangsphase der Rotte mit ausgeprägter Temperaturentwicklung

Teil B: Qualitätssicherung

Das Ziel, einen verwertbaren Kompost zu erzeugen, setzt eine sorgfältige Auswahl geeigneter Kompostrohstoffe, deren fachgerechte Behandlung sowie die Prüfung und Kennzeichnung der Produkte voraus.

B 1 Kompostrohstoffe

B 1.1 Grundsätzliches

Die Kompostrohstoffe sind entscheidend für die Qualität der Erzeugnisse. Die sorgfältige Auswahl unter dem Gesichtspunkt der weitgehenden Freiheit von potentiellen Schadstoffen und Verunreinigungen muß daher am Anfang jedes Kompostierungsverfahrens stehen.

Auch technische Anforderungen an die Rotte werden durch Art, Menge und Zusammensetzung des Inputmaterials bestimmt.

Generelle Anforderungen an Kompostrohstoffe sind:

- Sortenreine Erfassung (Annahmekontrolle gem. Ziff. 6.2.2 der TA Siedlungsabfall)
- Schad- und Fremdstoffarmut
- Eignung im Hinblick auf Aufbereitung, Abbaubarkeit, Kompostierbarkeit und notwendige Rottezeit
- Eignung im Hinblick auf die angestrebte Qualität der Erzeugnisse

Kompostrohstoffe sind grundsätzlich so zu behandeln, daß die in Abschnitt B 2 genannten Anforderungen erfüllt werden.

B 1.2 Eignung von Kompostrohstoffen

Die nachfolgende **Tabelle** (Seite 11) dient als grobe Orientierung zur Beurteilung von Kompostrohstoffen auf ihre Eignung.

Geeignete Stoffe

Bioabfälle sind die in Haushalten anfallenden organischen Küchen- und Gartenabfälle. Ihre getrennte Erfassung erfordert eindeutige Sortiervorgaben. Für die Kompostierung geeignete Bioabfälle sind: Obst- und Gemüsereste (auch Schalen von Zitrusfrüchten), Kaffee- und Teesatz (auch mit Filter), alte bzw. verdorbene Nahrungsmittel, Speisereste (auch gekocht), Eierschalen, Schmutz- und Knüllpapier, Pflanzen und alte Blumenerde.

Garten- und Parkabfälle sind pflanzliche Abfälle, die auf gärtnerisch genutzten Grundstücken, in öffentlichen Parkanlagen und auf Friedhöfen sowie als Straßenbegleitgrün anfallen. Sie werden i. d. R. nicht mittels Biotonne erfaßt, sondern der Kompostierungsanlage separat angeliefert.

Anhang 2

Tabelle 1: Eignung von Kompostrohstoffen für die Kompostierung

geeignet	abhängig vom Eignungsnachweis*	ungeeignet
Bioabfälle (Biogene Haushaltsabfälle)	Biogene Gewerbeabfälle	generell alle Stoffe, die aufgrund von Fremd- und Schadstoffgehalten die Kompostqualität wesentlich beeinträchtigen oder die Akzeptanz für die Verwertung negativ beeinflussen
Garten- und Parkabfälle	Straßenbegleitgrün	
Biogene Rückstände aus Maßnahmen der Landschaftspflege	Produkte aus vollständig biologisch abbaubaren Werkstoffen Papier, Pappe, Karton	Produkte mit Anteilen an nicht biologisch abbaubaren Werkstoffen

* von der zuständigen Behörde auf der Grundlage eines vorzulegenden Eignungsnachweises im Einzelfall zu entscheiden

Biogene Rückstände aus der Landschaftspflege bestehen in der Regel aus Schnittgut von Gras, Sträuchern und Bäumen. Bei begründetem Verdacht auf erhöhte Schad- und Fremdstoffe ist der Nachweis der Eignung zu erbringen.

Biogene Gewerbeabfälle sind getrennt erfaßte biogene Abfälle aus Gewerbe und Industrie einschließlich biogener Rückstände aus landwirtschaftlichen Gewerbebetrieben. Aufgrund der Vielfältigkeit der möglichen Stoffe ist ihre Eignung zur Kompostierung im Einzelfall zu prüfen.

Bei der Verwertung von Materialien, die tierische Produkte enthalten – insbesondere Fleisch, Milch, Eier, Wurst und Knochen – ist das Gesetz über die Beseitigung von Tierkörpern, Tierkörperteilen und tierischen Erzeugnissen vom 2. September 1975 (Tierkörperbeseitigungsgesetz – TierKBG) zu beachten.

Produkte aus biologisch abbaubaren Werkstoffen (BAW) sind

- aus natürlich vorkommenden biogenen Stoffen hergestellte Produkte, insbesondere Verpackungen aus nachwachsenden Rohstoffen (z. B. Stroh, Faserlein u. a.)
- Produkte aus Stoffen, die im Bereich der Herstellung, Verarbeitung und Anwendung Kunststoffeigenschaften aufweisen und vollständig mikrobiell abbaubar sind (z. B. Materialien aus Stärke).

Papier, Pappe, Karton sind in Abhängigkeit von Qualität und Menge grundsätzlich kompostierbar, sollten aber vorzugsweise den entsprechenden Sammelssystemen (Papiertonne, Duales System etc.) zugeführt werden.

Ungeeignete Stoffe

Die nachfolgend aufgeführten ungeeigneten Kompostrohstoffe werden beispielhaft genannt. Aus Akzeptanzgründen nicht geeignete Bioabfälle aus der kommunalen Sammlung sind Windeln sowie tierische und menschliche Exkremamente.

Stoffe, die aufgrund von Fremd- und Schadstoffen die Kompostqualität wesentlich beeinträchtigen können, sind z. B. Staubsaugerbeutel, Asche, Kunststoffe und Verbunde mit Kunststoffen, Textilien, Leder, behandeltes Holz, Düngemittelreste sowie Reste von Pflanzenschutzmitteln.

Diese sind entsprechend zu entsorgen.

Zum Eignungsnachweis

Im Nachweis der Eignung zur Kompostierung sind verschiedene Kriterien zu berücksichtigen. Im wesentlichen sind diese:

1. Konsistenz (z. B. Gehalt an organischer Substanz, Wassergehalt)
2. Gehalt an potentiellen Schadstoffen und Fremdstoffen
3. Einfluß auf die Dynamik des biologischen Ab- und Umbaus der Stoffe während der Rotte (Berücksichtigung üblicher Rottezeiten)
4. Nicht biologisch abbaubare organische Inhaltsstoffe

Darüber hinaus können zusätzliche Parameter festgelegt werden.

Die Forderungen in Punkt 1 werden in Verbindung mit den Anforderungen an das Rottegemisch gestellt. Die Punkte 2 bis 4 stellen Ausschlußkriterien dar.

Die Methoden zur Prüfung oben genannter Kriterien sind dem Abschnitt E zu entnehmen.

B 1.3 Anforderungen an das Rottegemisch

Die mikrobiellen Abbau- und Umbauvorgänge der Rotte erfordern gleichmäßig günstige Rottebedingungen. Die einzelnen Kompostrohstoffe sind daher mit geeigneten technischen Maßnahmen zu einem homogenen Gemisch aufzubereiten. Die Bedingungen der Rotte sind günstig, wenn folgende Anforderungen erfüllt sind (Orientierungswerte):

- Gehalt an organischer Substanz (40–60 % TS)
- Verhältnis von Kohlenstoff zu Stickstoff (C/N 20–40:1)
- Wassergehalt (40–65 %)
- ausreichende Gerüststruktur des Rottekörpers im Hinblick auf das erforderliche Luftporenvolumen (Vermeidung von Anaerobien)
- Kompostierbarkeit in üblichen Rottezeiträumen

B 2 Anforderungen an das Produkt

Die nachfolgende Tabelle stellt beispielhaft wertgebende Inhaltsstoffe in Komposten dar.

Anhang 2

Tabelle 2: Wertgebende Eigenschaften und Inhaltsstoffe von Kompost

Parameter	Dimension	Mittelwert- bereich	Intervall für ³ / ₄ aller Proben*
Glühverlust (org. Subst.)	% TS	35	25–45
Glührückstand	% TS	65	55–75
Wassergehalt	%	36	35–50
Volumengewicht	g/l	680	550–850
löslicher Salzgehalt	g/l	4	2–8
pH-Wert		7,6	7,0–8,3
Stickstoff (N-gesamt)	% TS	1,1	0,8–1,5
Stickstoff (N-min.)	mg/l FM	150	100–400
Phosphor (P ₂ O ₅ -gesamt)	% TS	0,7	0,4–1,0
Phosphor (P ₂ O ₅ -löslich)	mg/l FM	1200	500–2000
Kalium (K ₂ O-gesamt)	% TS	1,2	0,6–1,5
Kalium (K ₂ O-löslich)	mg/l FM	2500	1000–5000
Magnesium (MgO-gesamt)	% TS	0,4	0,2–0,7
Magnesium (MgO-löslich)	mg/l FM	250	150–500
Calcium (CaO-gesamt)	% TS	3	2–6

* ca. 75 % der Proben liegen in diesem Bereich

n = mehrere hundert Proben

TS = Trockensubstanz

FM = Frischmasse

Die Qualität von Kompost wird durch eine Reihe unterschiedlicher Merkmalseigenschaften gekennzeichnet (**Tabelle 2**). Die Ausprägung der Merkmalseigenschaften ist abhängig von den Kompostrohstoffen sowie der angewandten Verfahrenstechnik (Kompostierungsverfahren).

Da die angelieferten Kompostausgangsprodukte im Jahresverlauf nach Art, Menge und Zusammensetzung Unterschiede aufweisen, variieren auch die Merkmalseigenschaften der daraus erzeugten Komposte in einem bestimmbareren Bereich. Durch geeignete, verfahrenstechnische Maßnahmen kann der Schwankungsbereich einzelner Merkmalseigenschaften eingengt werden. Auf diese Weise können trotz der Vielfalt verwendeter Kompostrohstoffe Komposte mit weitgehend definierten Eigenschaften erzeugt werden.

Grundsätzlich sollen die für die verschiedenen Anwendungszwecke relevanten Eigenschaften und Inhaltsstoffe von Kompost deklariert werden. Eine Begrenzung unerwünschter Inhaltsstoffe erfolgt durch Richtwerte. Anwendungsempfehlungen dienen dem zweckentsprechenden Einsatz des Produktes und verhindern Schäden durch falsche Anwendung (s. Abschnitt C).

B 2.1 Qualitätsmerkmale und Anforderungen

B 2.1.1 Seuchenhygienische Unbedenklichkeit

Die Forderung nach seuchenhygienischer Unbedenklichkeit (Human-, Veterinär- und Phytohygiene) des Endproduktes Kompost ist unbedingte Voraussetzung für die Kompostverwertung. Dies ist erreicht, wenn Krankheitserreger für Mensch, Tier und Pflanze mit Sicherheit unschädlich gemacht worden sind. Die Gewährleistung phytohygienischer Unbedenklichkeit der Komposte ist von zentraler Bedeutung für eine gesicherte Kompostverwertung, da diese fast vollständig im Pflanzenbau stattfindet und im Hinblick auf mögliche Kulturschäden eine Verschleppung phytopathogener Erreger vermieden werden muß.

Aus human- und veterinärhygienischer Sicht muß die seuchenhygienische Unbedenklichkeit der Komposte zum Schutz der Kompostanwender und der Verbraucher von kompostgedüngten Lebensmitteln gewährleistet sein. Dies schließt die Verhinderung von Kontaktinfektionen bei Haus- und freilebenden Tieren sowie Keimverschleppungen durch diese ein. Voraussetzung für eine weitgehende bzw. vollständige Abtötung von widerstandsfähigen Krankheitserregern und weitgehende Abtötung von Pflanzensamen ist die Errichtung von Kompostierungsanlagen nach dem Stand der Technik sowie eine sorgfältige Rottesteuerung. Mit Hilfe der Produkt- und Prozeßprüfung wird die seuchenhygienische Unbedenklichkeit überprüft.

Die Modalitäten zur Prüfung der hygienisierenden Wirkung sind in Abschnitt B 3 festgelegt.

B 2.1.2 Rottegrad

Der Rottegrad von Kompost gibt darüber Auskunft, inwieweit die biologisch leichter abbaubare, organische Substanz umgesetzt wurde. Er kennzeichnet den aktuellen Stand des Abbaugeschehens und stellt eine Stufe auf einer allgemein gültigen Skala von Kennwerten dar, die den Rottefortschritt vergleichbar charakterisieren (**Tabelle 3**). Für den Rottegrad eines Kompostes ist die im Selbsterhitzungsversuch erreichte Maximaltemperaturkurve kennzeichnend. Diese kann mit dem Steigungsmaximum der Temperaturkurve sowie mit der Fläche unter der Temperaturkurve (nach 72 Stunden) in Beziehung gebracht werden.

Tabelle 3: Einteilung der Rottegrade entsprechend den Maximaltemperaturen im Selbsterhitzungsversuch

Rottegrad	T max ° C	Produktbezeichnung
I	> 60	Kompostrohstoff
II	50–60	Frischkompost
III	40–50	Frischkompost
IV	30–40	Fertigkompost
V	< 30	Fertigkompost

Anhang 2

B 2.1.3 Pflanzenverträglichkeit

Die Pflanzenverträglichkeit von Kompost ist ein komplexes Qualitätskriterium, da sie von vielfältigen Einflußfaktoren bestimmt wird. Fachgerecht hergestellte Komposte sind pflanzenverträglich und wirken sich fördernd auf die Bodenfruchtbarkeit und das Pflanzenwachstum aus.

An Komposte werden folgende Anforderungen gestellt:

- pflanzenverträglich im vorgesehenen Anwendungsbereich
- frei von phytotoxischen Stoffen
- bei der Anwendung keine nennenswerte Stickstofffixierung

B 2.1.4 Organische Substanz

Der Wert von Kompost als Bodenverbesserungsmittel liegt insbesondere im Gehalt an organischer Substanz. Der Gehalt an organischer Substanz beträgt im allgemeinen 35 % i. d. TS. Er wird als Glühverlust ermittelt.

Der Gehalt an organischer Substanz ist anzugeben.

B 2.1.5 Wassergehalt

Hohe Wassergehalte sind unerwünscht. Sie erhöhen das Volumengewicht von Kompost, begünstigen bei der Lagerung Fäulnisprozesse (Geruchsprobleme), vermindern die Streufähigkeit und erhöhen Transport- und Aufbringungskosten. Trockener Kompost ist hydrophob (wasserabweisend) und verursacht Staubemissionen. Kompost soll daher weder naß noch trocken, sondern wenig feucht sein.

Anzustreben sind Wassergehalte $< 45\%$ der Frischmasse für lose Ware und $< 35\%$ der Frischmasse für Sackware.

Der Wassergehalt ist anzugeben.

B 2.1.6 Volumengewicht

Das Volumengewicht von Kompost ist abhängig von der Korngrößenzusammensetzung, dem Verhältnis von organischen zu mineralischen Bestandteilen sowie vom Wassergehalt. Mit zunehmender Rottedauer erhöht sich das Volumengewicht von Kompost, da die mineralische Substanz im Verhältnis zur organischen Substanz zunimmt. Auch die feinkörnige Fraktion nimmt aufgrund von Behandlungsmaßnahmen und biologischen Abbauvorgängen im Verlauf der Rotte relativ zu.

Das Volumengewicht ist anzugeben.

B 2.1.7 Maximalkörnung

Zur Charakterisierung von Komposten sollten folgende Körnungen unterschieden werden:

feinkörnig	I	$< 5 \text{ mm}$
	II	$< 12 \text{ mm}$
mittelkörnig		$< 25 \text{ mm}$
grobkörnig		$< 40 \text{ mm}$

Die Körnung ist anzugeben.

Anhang 2

B 2.1.8 Salzgehalt

Kompost enthält wasserlösliche Salze, meist Chloride und Sulfate der Alkali- und Erdalkalimetalle. Nährstoffreiche Komposte weisen in der Regel höhere, nährstoffarme Komposte dagegen niedrigere Salzgehalte auf. Höhere Salzgehalte können Wurzelfunktionen und damit das Wachstum von Pflanzen beeinträchtigen. Als reines Pflanzsubstrat eignet sich Kompost aufgrund seines Salzgehaltes in der Regel nicht.

Verschiedene Pflanzenarten sind gegen Salz unterschiedlich empfindlich. Daher ist der Salzgehalt bei der Anwendung von Kompost zu beachten. Wird Kompost als Mischkomponente für Pflanz- und Blumenerden verwendet, sind Komposte mit einem Gehalt von weniger als 5 g/l löslichen Salzen zu empfehlen. Wird Kompost als Bodenverbesserungsmittel und Dünger eingesetzt, ist der Salzgehalt bei den empfohlenen Aufwandmengen i. d. R. kein begrenzender Parameter.

Der Gehalt an wasserlöslichen Salzen ist anzugeben.

B 2.1.9 pH-Wert

Der pH-Wert ist anzugeben.

B 2.1.10 Pflanzennährstoffe

Komposte enthalten alle für die Pflanzenernährung notwendigen Haupt- und Spurennährstoffe. Als Hauptnährstoffe gelten Stickstoff, Phosphor, Kalium, Magnesium und Kalzium. Als Spurennährstoffe gelten Eisen, Mangan, Zink, Kupfer, Bor und Molybdän.

Hinsichtlich der Düngung sind die in Kompost enthaltenen Gehalte an Pflanzennährstoffen zu unterscheiden in:

Gesamtgehalte	d. h. analytischer Gesamtgehalt
lösliche Gehalte	d. h. analytisch ermittelte lösliche Gehalte
düngewirksame Gehalte	d. h. für die Düngung anrechenbare Gehalte

Die einzelnen Pflanzennährstoffe sind unterschiedlich pflanzenverfügbar. Bei der Düngplanung können daher nicht nur die Gesamtgehalte zugrunde gelegt werden (s. Abschnitt C 3.1).

Die Gehalte an Pflanzennährstoffen (Hauptnährstoffe) sind anzugeben.

B 2.2 Unerwünschte Inhaltsstoffe

B 2.2.1 Fremdstoffe

Fremdstoffe sind unerwünschte Inhaltsstoffe, da sie das produkttypische Erscheinungsbild und damit die Verwertung und Vermarktung von Kompost beeinträchtigen. Als Fremdstoffe anzusprechen sind insbesondere Glas, Kunststoffe, Verbundstoffe, Metalle und andere für die Kompostierung ungeeignete Stoffe. Die Auffälligkeit gegebener Gehalte an Fremdstoffen hängt entscheidend von der Art der Fremdstoffe ab. Fremdstoffe mit niedrigem spezifischem Gewicht (z. B. Kunststoffe) sind auffälliger als solche mit hohem spezifischem Gewicht (z. B. Glas, Metall).

Anhang 2

In der Regel korrespondieren höhere Fremdstoffgehalte mit erhöhten Gehalten an Schadstoffen. Nicht nur im Hinblick auf das optische Erscheinungsbild, sondern auch auf die Begrenzung von potentiellen Schadstoffen sind daher Fremdstoffgehalte $< 0,5$ bzw. < 1 Gew.-% i. d. TS (s. Abschnitt C 2) anzustreben.

B 2.2.2 Schwermetalle

Während eine Vielzahl von Schwermetallen als Spurenelement für die Ernährung von Pflanze, Tier und Mensch notwendig ist (z. B. Cu, Zn), sind andere ausschließlich als Schadstoffe anzusprechen (z. B. Pb, Cd). In höheren Konzentrationen können Schwermetalle schädlich wirken.

Im Gegensatz zur organischen Substanz in Kompost unterliegen Schwermetalle keinem biologischen Abbau. Sie reichern sich daher im Verlauf der Rotte relativ an. Fertigungskomposte weisen i. d. R. höhere Schwermetallgehalte auf als Frischkomposte. Ein Vergleich von Schwermetallgehalten in Fertigungskompost und Frischkompost ist aus diesem Grunde nur bei einem einheitlichen Bezug der Gehalte auf einen normierten organischen Trockensubstanzanteil möglich.

Zur einheitlichen Bewertung von Schwermetallgehalten in Komposten unterschiedlicher Rottegrade und anderer organischer Bodenverbesserungs- und Düngemittel werden die jeweils ermittelten Schwermetallgehalte, auf Basis eines Standardkompostes mit 70 % mineralischem Anteil und 30 % organischer Trockensubstanz, umgerechnet:

$$SM_{30\%} = SM_p \cdot 70 / (100 - GV_p)$$

$SM_{30\%}$ = Schwermetallgehalt in [mg/kg TS] normiert auf 30 % Glühverlust

SM_p = Schwermetallgehalt in [mg/kg TS] der Probe

GV_p = Glühverlust in [% TS] der Probe

Richtwerte zur Begrenzung von Schwermetallen in Komposten haben den Zweck, stofflich verwertbare Produkte von nicht verwertbaren Produkten zu unterscheiden (Kategorie II) bzw. Produkte, die für den Bereich der Nahrungspflanzenerzeugung geeignet sind, zu charakterisieren (Kategorie I). Das Aufbringen von Kompost sollte generell unterbleiben, wenn die in Tabelle 4, Kat. II genannten Richtwerte überschritten werden. Die dem Merkblatt zugrundeliegende Regelung für Schwermetallrichtwerte folgt nachfolgenden Vorgaben:

1. Schadstofffracht nach AbfKlärV (s. Tab. 10)

2. Zwei Kategorien von Schwermetallkonzentrationen

für die in Teil C aufgeführten Hauptanwendungsbereiche (s. Tab. 4)

Kategorie I (Kat. I):

Landwirtschaft (Ackerbau, incl. Futterbau)

Landwirtschaft (Grünlandwirtschaft)

Produktionsgartenbau

Gemüsebau

Spargelbau

Obstbau/Bodenobst

Qualitätsanforderungen für Fertigkompost

Fertigkompost ist hygienisierter, biologisch stabilisierter und fraktionierter Kompost zur Bodenverbesserung und Düngung.

Qualitätsmerkmal	Qualitätsanforderung
Hygiene	<ul style="list-style-type: none"> - Nachweis der Behandlung zur Hygienisierung: Thermophile Kompostierung mit Nachweis der seuchen- und phytohygienischen Wirksamkeit des Behandlungsverfahrens (Prozessprüfung oder Konformitätsprüfung gemäß Hygiene-Baumusterprüfsystem nach Abschnitt 1.2 der mitgeltenden Unterlagen der BGK oder anderer vom Bundesgüteausschuss im Einzelfall bestimmte Verfahren) - Nachweis der Einhaltung der für die Hygienisierung der Produkte erforderlichen Temperaturen und Temperatur-Einwirkungszeiten gemäß den mitgeltenden Rechtsbestimmungen (Prozessüberwachung) - maximal 2 keimfähige Samen und austriebfähige Pflanzenteile je Liter - Salmonellen nicht nachweisbar (in 50 g Kompost-Frischmasse)
Fremdstoffe	<ul style="list-style-type: none"> - Grenzwerte entsprechend den mitgeltenden Rechtsbestimmungen nach Abschnitt 1.1 - Flächensumme der ausgelesenen Fremdstoffe über 2 mm maximal 25 cm²/l FS, ab 01.07.2018 15 cm²/l FS
Pflanzenverträglichkeit	<ul style="list-style-type: none"> - Pflanzenverträglichkeit im vorgesehenen Anwendungsbereich - frei von phytotoxischen Stoffen, nicht Stickstoff fixierend (Keimpflanzenversuch)
Rottegrad	<ul style="list-style-type: none"> - Rottegrad IV oder V
Wassergehalt	<ul style="list-style-type: none"> - lose Ware maximal 45 Gew.-%, Sackware maximal 35 Gew.-%. Für Kompost mit mehr als 40 % Glühverlust gelten maximale Wassergehalte gemäß Anlage 2 der Güte- und Prüfbestimmungen bzw. Anlage 4 des QMH Kompost
Organische Substanz	<ul style="list-style-type: none"> - mindestens 15 Gew.-% i. d. TS, gemessen als Glühverlust
Schadstoffgehalte	<ul style="list-style-type: none"> - Grenzwerte entsprechend den mitgeltenden Rechtsbestimmungen nach Abschnitt 1.1 (Anlage 6 des QMH Kompost)

TS = Trockenmasse, FS = Frischmasse



BGK RAL-Gütesicherung

Seite
1 von 2

Dok. 251-006-2
Stand 01.01.2017

Anhang 3

Angaben zur Deklaration	Kennzeichnung nach den geltenden Rechtsbestimmungen. Zusätzliche Angaben nach Beschluss des Bundesgüteausschusses, mindestens: <ul style="list-style-type: none">- Fertigkompost (Körnung),- Hersteller,- Rohdichte (Volumengewicht),- pH-Wert,- Salzgehalt,- Pflanzennährstoffe gesamt (N, P₂O₅, K₂O, MgO),- Pflanzennährstoffe löslich (N, P₂O₅, K₂O),- Mikronährstoffe (gemäß den düngemittelrechtlichen Bestimmungen),- basisch wirksame Stoffe (als CaO),- organische Substanz,- Nettogewicht oder Volumen,- Hinweise zur sachgerechten Anwendung.
-------------------------	--



Aufgabenstellung

Trichoderma spp. werden bereits als Bodenaktivatoren bzw. als biologische Pflanzenschutzmittel eingesetzt. Ziel der Bachelorarbeit ist es, den Stamm *Trichoderma atroviride* bezüglich seiner Eignung als Kompostierungshilfe zu untersuchen.

Hierzu soll zunächst der Stand des Wissens zum Einsatz von *Trichoderma* spp. in der Kompostierung recherchiert werden.

In einem Vorpraktikum sollen die optimalen Sporulationsbedingungen des *Trichoderma* sp. bestimmt werden und daraufhin möglichst hohe Sporenzahlen kultiviert werden, mit welchen der Kompost dann in den Versuchen beimpft wird.

In dem auf einem mit *Trichoderma atroviride* beimpften Nährmedium in der Petrischale Kressepflanzen gezogen werden, soll gezeigt werden, wie das Wurzelwachstum durch den Pilz beeinflusst wird.

Aufgabe ist nun die Planung, Durchführung und Auswertung von Kompostierungsversuchen mit beimpftem organischem Material innerhalb des für die Bachelorarbeit vorgesehenen Zeitraumes mit den in der Hochschule Magdeburg-Stendal verfügbaren analytischen Geräten. Dabei gilt es die wichtigsten Abbaubarkeitsparameter Temperaturentwicklung, Kohlenstoffdioxidproduktion, Kohlenstoff-Stickstoff-Verhältnis und Organische Substanz, sowie den für das Pilzwachstum charakteristischen pH-Wert zu bestimmen. Dem Kompost sollen außerdem Bio-kunststoffe hinzugefügt werden, um festzustellen, ob der Pilz diesen verstoffwechselt. Als weiteres Qualitätsmerkmal des Komposts sollen mit dem Kompost-Endprodukt Keimungsversuche durchgeführt werden.

Die Ergebnisse der Versuche sollen so ausgewertet werden, dass sich eine Aussage darüber treffen lässt, ob der Einsatz von *Trichoderma Atroviride* in der industriellen Kompostierung sinnvoll ist und wenn ja, welche Auswirkungen er auf die Kompostierungsdauer und die Qualität des Komposts hat. Weiterhin soll formuliert werden, welche weiteren Untersuchungen zukünftig notwendig sind, um das Ergebnis zu stützen und zu konkretisieren.