Hochschule Neubrandenburg
Fachbereich Agrarwirtschaft und Lebensmittelwissenschaften
Studiengang Food Chain Environments
WS 2025/26

Masterarbeit

„Identifikation und Evaluation optimaler Substrateigenschaften für die Kultivierung von Pilzen für die Herstellung von Pilzmyzel-basierten Polstermitteln“

URN: **urn : nbn : de : gbv : 519-thesis: 2025-0202-1**.

Verfasser: Tilmann Pannecke
Betreuer: Prof. Dr. Volker Scheuerle
Prof. Dr. Marco Ebert

Abstract

This study investigated the influence of substrate type and particle size on the cultivation of *Pleurotus ostreatus* and *Ganoderma lucidum* for the production of mycelium-based packaging materials. Wheat straw, hemp straw and beech wood shavings were evaluated with the aim auf achieving high mycelial penetration, structural stability and effective cushioning properties. The results show that hemp straw with a medium particle size (4-10 mm) provides the most favorable overall perfomance, enabling homogeneous mycelial growth, balanced porosity and stable material formation. *G. lucidum* produced dense, cohesive and structurally stable materials, particulary on medium sized hemp straw, though with somewhat reduced shock absorption. In contrast, *P. ostreatus* formed more porous structures with better cushioning potential but lower structural stability. Medium particle size yielded the best balance between porosity, aeration, mycelial penetration and mechanical interlocking.

Overall hemp straw of medium particle size represents the most suitable substrate for producing functional mycelium based packaging materials. *G. lucidum* is optimal for structural stability, while *P. ostreatus* offers advantages for cushioning applications.

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr. Volker Scheuerle und Prof. Dr. Marco Ebert für die fachliche Betreuung, ihre Anregungen und die konstruktive Begleitung meiner Arbeit.
Ebenso danke ich allen Mitarbeiter*innen des Haus 3 für die wertvolle Unterstützung während der Projektphase.
Mein Dank gilt zudem meiner Familie und meinen Freunden für ihre Unterstützung im Verlauf des Studiums und der Masterarbeit.

Inhaltsverzeichnis

Abstract II

Danksagung III

KI-Nutzungshinweis VI

Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen VII

1 Einleitung 1

2 Stand der Wissenschaft und Technik 5

2.1 Lineares– und Kreislaufwirtschaftsmodell 5

2.1.1 Lineares Wirtschaftsmodell 5

2.1.2 Kreislauf Wirtschaftsmodell 6

2.1.3 Gegenüberstellung der Systeme 8

2.2 Pilze 9

2.2.1 Pilzmyzel 10

2.2.2 Für Verpackungsmaterial geeignete Pilze 11

2.2.2.1 *Pleurotus ostreatus* 12

2.2.2.2 *Ganoderma lucidum* 13

2.3 Substrate für das Pilzwachstum 14

2.3.1 Buchenholzspäne 15

2.3.2 Weizenstroh 16

2.3.3 Hanfstroh 17

2.4 Substratzusätze 17

2.4.1 Weizenkleie 18

2.4.2 Haferflocken 18

2.5 Myzelbasierte Verpackung 19

2.6 Polsterkennlinie 21

3 Material und Methoden 23

3.1 Verwendete Geräte und Materialien 23

3.2 Methodik 25

3.2.1 Vorbereitung der Pilzkulturen und Kunststoffbehälter 25
3.2.2 Einteilung Partikelgröße 26
3.2.4 Durchführung der Hauptversuche 29
3.2.5 Durchführung Schockwellentest und Ermittlung der Polsterkennlinie 32
3.2.6 Sensorische Prüfverfahren 34
3.2.6.1 Einfach beschreibende Prüfung 34
3.2.6.2 Intensitätsprüfung 35
3.2.7 Varianzanalyse (ANOVA) 35
3.2.8 Post-hoc-Test 36
4 Ergebnisse 38
4.1 Vorversuche 38
4.2 Hauptversuche 39
4.2.1 Inkubationszeit 39
4.2.2 Einfluss Substratart auf Myzeldurchdringung und Myzelstabilität 42
4.2.3 Varianzanalyse 50
4.2.4 Schockwellentest 52
5 Diskussion 56
6 Zusammenfassung 63
7 Literaturverzeichnis 65
8 Tabellen – und Abbildungsverzeichnis 75
9 Anhang 77
Erklärung über die selbstständige Anfertigung der Arbeit 84

KI-Nutzungshinweis

Im Rahmen der Erstellung dieser Arbeit wurde das KI-gestützte Sprachmodell ChatGPT-5.2 unterstützend genutzt. Die Verwendung beschränkt sich auf sprachliche Umformulierungen sowie stilistische Optimierung einzelner Textpassagen.
Die inhaltliche Ausarbeitung, Analyse, Bewertung sowie die Auswahl, Prüfung und Verwendung sämtlicher Quellen erfolgten eigenständig durch den Verfasser. Alle in der Arbeit dargestellten Inhalte wurden kritisch überprüft und verantwortet.

Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen

ANOVA	Analysis of variance
BMUKN	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
BS	Buchenholzspäne
DALY	Disability-Adjusted Life Year
DIN	Deutsches Institut für Normen
HS	Hanfstroh
LCA	Life Cycle Assessment
LSD	Least significant difference
NECS	European Network for Cinema and Media Studies
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
WS	Weizenstroh

1 Einleitung

Der Rat der europäischen Union erläutert 2025, dass die zunehmende Umweltverschmutzung und die globale Erwärmung deutlich zeigen, dass die aktuellen Produktions- und Konsummuster der Menschheit, zusammen mit dem erwarteten Bevölkerungswachstum bis 2050 dazu führen würden, dass der Ressourcenbedarf etwa drei Erden umfassen müsste (Rat der europäischen Union, 2025). Um dieser Entwicklung entgegenzuwirken, wird häufig der Übergang von einer linearen zu einer Kreislaufwirtschaft als wichtige Strategie genannt. Laut einer Studie von Sariatli (2017) basiert die lineare Wirtschaft auf dem Prinzip, Ressourcen zu entnehmen, Produkte herzustellen und diese nach Gebrauch zu entsorgen (zum Beispiel Wasserflaschen aus PET ohne Pfandsystem). Die Kreislaufwirtschaft versucht hingegen Materialien möglichst lange im Umlauf zu halten, etwa durch Recycling oder Wiederverwendung, wie zum Beispiel Recyclingkartons aus Altpapier (Erbslöh, 2025). Auf diese Weise können CO_2-Emissionen und andere Schadstoffe reduziert und gleichzeitig der Verbrauch begrenzter natürlicher Ressourcen verringert werden.

Die lineare Wirtschaft wird oft beschrieben mit dem Modell Take → Make → Dispose. Rohstoffe werden entnommen, Produkte hergestellt, diese genutzt und am Ende entsorgt. Sie treibt die Massenproduktion und den Massenkonsum voran (Rajagopal, 2021). Im Gegensatz zur linearen Wirtschaft definiert Geissdoerfer die Kreislaufwirtschaft als regeneratives Wirtschaftssystem, in dem Rohstoffe, Abfall und Emissionen minimiert werden und Material - sowie Energie-Kreisläufe geschlossen, verlangsamt oder effizienter gestaltet werden (Geissdoerfer et al., 2019).

Die Europäische Union hat sich in diesem Zusammenhang das Ziel gesetzt, bis 2050 eine klimaneutrale Kreislaufwirtschaft zu etablieren und den Einsatz recycelter Materialien zwischen 2020 und 2030 zu verdoppeln (Rat der Europäischen Union, 2025). Deutschland hat darüber hinaus die Verpflichtung übernommen, bis 2045 eine Netto-Klimaneutralität zu erreichen. Die Einführung einer Kreislaufwirtschaft gilt daher als ein wichtiges Mittel, um klima- und umweltpolitische Ziele zu erreichen. Sie macht Lieferketten und Wirtschaftsstrukturen widerstandsfähiger, sorgt für einen sparsameren Umgang mit Ressourcen und unterstützt den Einsatz von recycelten Materialien. Dadurch verringert sich die Abhängigkeit von neuen, noch nicht genutzten Rohstoffen (Federal Ministry for the Environment, Climate Action, Nature Conservation and Nuclear Safety, 2024).

Das deutsche Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUKN) beschäftigt sich mit der Ausarbeitung und Umsetzung einer nationalen Strategie für eine umfassende Kreislaufwirtschaft in Deutschland. Dafür wurden verschieden Studien durchgeführt, so auch die „European Network for Cinema and Media Studies, kurz „NECS"-Studie. Nach Angaben der „NECS"-Studie besitzt die Kreislaufwirtschaft das Potenzial, die Treibhausgasemissionen bis 2050, um etwa 30 % bis 50 % zu senken und gleichzeitig die ökonomische Wertschöpfung zu steigern (Federal Ministry for the Environment, Climate Action, Nature Conservation and Nuclear Safety, 2024).

Ein Bereich, in dem die Bedeutung einer funktionierenden Kreislaufwirtschaft deutlich wird, ist der Einsatz von Kunststoffen in Verpackungen.
Kunststoffe haben sich aufgrund ihres geringen Eigengewichts, niedrige Herstellungskosten, vielseitige Verarbeitbarkeit und ihrer anpassbaren Materialeigenschaften zu einem der am häufigsten verwendeten Verpackungsmaterialien entwickelt. Mit der zunehmenden Verarbeitung von Kunststoffen ist jedoch auch das Aufkommen an Kunststoffverpackungsabfällen stark gestiegen (Schmidt, 2023). In deutschen Privathaushalten hat sich die Menge zwischen 1991 und 2010 verdoppelt und liegt seit 2015 auf einem stabilen Niveau bei etwa 25 kg pro Kopf (Burger et al., 2021). Aufgrund kurzer Lebensdauer, der Abhängigkeit von fossilen Rohstoffen sowie des erheblichen Beitrags zur Meeresverschmutzung gelten Kunststoffverpackungen als Sinnbild der Wegwerfgesellschaft (Xanthos und Walker, 2017). Angesichts der beschriebenen Herausforderungen gewinnt die Entwicklung von Verpackungen aus biologisch abbaubaren Materialien und Sekundärrohstoffen zunehmend an Relevanz, um Umweltbelastungen, Klimawandel und die Fortführung linearer Wirtschaftsmodelle zu reduzieren.

Eine vielversprechende Alternative zu konventionellen Kunststoffverpackungen sind Myzel-basierte Verpackungen. Dabei handelt es sich um Biokomposite, die aus dem Pilzmyzel, dem fadenförmigen Wurzelgeflecht von Pilzen, und organischen Reststoffen wie Holzspänen, Stroh, Hanfschäben oder Papierabfällen hergestellt werden. Diese Materialien zeichnen sich durch ihre ressourcenschonende Produktion, eine schnelle Wachstumsrate sowie vielseitige Einsetzmöglichkeiten aus. Zudem sind Myzel-basierte Verpackungen biologisch abbaubar und stellen damit eine nachhaltige Substitutionsoption dar (Antinori et al., 2020).

Ein viel verwendetes Kunststoff-Polstermaterial ist Styropor. Um einen Teil für die Kreislaufwirtschaft beizusteuern, wird in dieser Arbeit untersucht, wie sich agronomische

Reststoffsubstrate optimieren lassen, um daraus Pilzmyzel basierte Polstermaterialien herzustellen. Auf diese Weise lassen sich sowohl landwirtschaftliche Nebenprodukte verwerten als auch innovative Verpackungslösungen entwickeln, die zur Reduzierung von Kunststoffabfällen beitragen.

Ziel der Arbeit ist es, die optimalen Substrateigenschaften hinsichtlich Art und Partikelgröße von Weizenstroh, Hanfstroh und Buchenholzspänen für die Kultivierung der Pilzarten *Pleurotus ostreatus* und *Ganoderma lucidum* systematisch zu bestimmen. Diese Substrate werden experimentell im Labormaßstab untersucht und im Hinblick auf ihre Eignung zur Herstellung pilzmyzelbasierter Polstermaterialien bewertet. Zusätzlich wird der Einfluss von verschiedenen Substratzusätzen auf das Myzelwachstum und die Materialbildung analysiert. Die Qualität der pilzmyzelbasierten Verpackungsmaterialien wird anhand der optischen Durchdringung des Substrates durch das Myzel bestimmt, welche durch eine einfach beschreibende Prüfung von einem Sensorikpanel beschrieben wird. Zusätzlich wird die mechanische Polstereigenschaft mit Hilfe eines Drop-Tests und der daraus resultierenden Polsterkennlinie bestimmt. Ziel ist es, Substrate zu identifizieren, die besonders geeignete Materialeigenschaften aufweisen, wie beispielweise eine gute Schockabsorption, eine hohe Stabilität sowie eine hohe Myzeldurchdringung, und damit einen Beitrag zur Entwicklung nachhaltiger Verpackungslösungen im Sinne der Kreislaufwirtschaft leisten.

Im Rahmen dieser Arbeit wird auf die Betrachtung chemisch modifizierter oder vorbehandelter Substrate verzichtet, da der Fokus auf naturbelassenen, unbehandelten Rohstoffen liegt. Ebenso wird die Langzeitstabilität, Alterungsbeständigkeit sowie die biologische Abbaubarkeit der hergestellten pilzmyzelbasierten Materialien nicht untersucht, da der Schwerpunkt der Arbeit auf der Materialbildung, der initialen Strukturentwicklung und den mechanischen Polstereigenschaften liegt. Darüber hinaus werden ökonomische Aspekte, industrielle Skalierbarkeit, lebenszyklusanalytische Bewertungen sowie die Marktfähigkeit der entwickelten Materialien nicht betrachtet, da diese Fragestellungen den experimentellen und methodischen Rahmen der Arbeit überschreiten. Die Untersuchung beschränkt sich außerdem auf die Pilzarten *Pleurotus ostreatus* und *Ganoderma lucidum* sowie auf die Substrate Weizenstroh, Hanfstroh und Buchenholzspäne, sodass weitere Pilzarten, Substrattypen und Materialkombinationen nicht Bestandteil der Analyse sind.

Es soll die Fragestellung geklärt werden, welche Kombinationen aus Substratart und Partikelgröße erforderlich sind, um pilzmyzelbasierte Verpackungsmaterialien herzustellen die eine hohe optische Myzeldurchdringung, eine strukturelle Stabilität sowie ausgeprägte mechanische Polstereigenschaften aufweisen. Dabei wird untersucht, inwiefern unterschiedliche Partikelgrößen innerhalb der Substrate Weizenstroh, Hanfstroh und Buchenholzspäne die Homogenität der Myzelbesiedlung und die Materialverdichtung beeinflussen.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

2.1 Lineares– und Kreislaufwirtschaftsmodell

In diesem Kapitel werden die Modelle der linearen Wirtschaft und der Kreislaufwirtschaft beschrieben, da sie die grundlegenden Rahmenbedingungen für Materialentwicklung, Produktgestaltung und Verpackungssysteme definieren. Ihre Darstellung ist insbesondere deshalb relevant, weil in der vorliegenden Arbeit pilzmyzelbasierte Verpackungsmaterialien entwickelt und untersucht werden, die gezielt als Beitrag zur Kreislaufwirtschaft konzipiert sind.
Die Gegenüberstellung der Wirtschaftsmodelle macht unterschiedliche Prinzipien der Ressourcennutzung und Abfallentstehung sichtbar und schafft den theoretischen Rahmen, um pilzmyzelbasierte Verpackungen nicht nur als technische Materialinnovation, sondern als Bestandteil eines nachhaltigen Wirtschaftssystems einzuordnen.

2.1.1 Lineares Wirtschaftsmodell

Das lineare Wirtschaftsmodell, auch als „Nehmen – Herstellen – Entsorgen“ bezeichnet, beschreibt die Wirtschaftsweise, die seit der Industrialisierung das globale Wirtschaftssystem prägt. Dieses Modell basiert auf der Annahme, dass natürliche Ressourcen praktisch unbegrenzt verfügbar und kostengünstig sind. Vor allem in den westlichen Industrieländern führte dies zu einem Überfluss an Energie und Materialien, wodurch die Produktion auf hohen Ressourceneinsatz und niedrigen Arbeitskosten optimiert wurde. Die Folge war ein Wirtschaftssystem, in dem Unternehmen Materialien großzügig verbrauchten, anstatt sie wiederzuverwenden oder zu recyceln. Recycling galt als unwirtschaftlich, weil Rohstoffe billig waren. Zudem unterstützen staatliche Regelungen und Steuermechanismen dieses Verhalten, da externe Umweltkosten (z.B. Umweltverschmutzung) nicht eingepreist wurden. Unternehmen hatten also keinen Anreiz ökologisch zu handeln.
Das lineare Modell lässt sich durch eine einfache Abfolge (Abbildung 1) darstellen:

Abbildung 1: Lineares Wirtschaftsmodell, eigene Darstellung nach Sariatli 2017

Dabei wird ein Produkt hergestellt, genutzt und nach Ende seiner Lebensdauer als Abfall beseitigt. Diese Vorgehensweise führt zu hohen Materialverlusten entlang der Wertschöpfungskette. Durch diese ineffiziente Ressourcennutzung entstehen viele Umweltprobleme und zusätzlich wird durch die Abhängigkeit von endlichen Rohstoffen dieses Modell anfällig für Preisschwankungen und führt zu wachsender Knappheit (Sariatli, 2017). Die Biosphäre ist durch die menschlichen Aktivitäten bereits so stark verändert worden, dass zentrale Ökosysteme gefährdet sind und viele ökologische Belastungsgrenzen (in der Theorie der planetaren Grenzen) bereits überschritten wurden (Röckstrom et al, 2019). Die Erde verbraucht mehr Ressourcen als sie regenerieren kann, was dazu führt, dass laut der World Wide Fund For Nature (2012) aktuell 1,5 Planeten nötig wären, um dieses Ungleichgewicht wieder auszugleichen. Das lineare Wirtschaftsmodell ist nicht nachhaltig und es gibt klare Entwicklungen, die als Beweis für das Scheitern dieses Modells dienen. Ein Beispiel ist die globale Kunststoffwirtschaft, welche durch eine stark linear geprägte Struktur gekennzeichnet ist. Nach dem Bericht des Global Plastics Outlook der OECD wurden im Jahr 2019 weltweit rund 353 Millionen Tonnen Kunststoffabfälle erzeugt, von denen nur etwa 9 % stofflich recycelt wurden. Der überwiegende Anteil wurde entweder deponiert, verbrannt oder unkontrolliert in die Umwelt freigesetzt. Kunststoffe verbleiben damit überwiegend in einem linearen Stoffstrom, der auf kontinuierliche Neuproduktion und anschließende Entsorgung ausgerichtet ist, anstatt auf Wiederverwendung und Kreislaufführung (OECD, 2022).

2.1.2 Kreislauf Wirtschaftsmodell

Die Kreislaufwirtschaft ist ein Wirtschaftsmodell, welches darauf abzielt, Ressourcen möglichst effizient zu nutzen und gleichzeitig die Umwelt zu schonen. Das Grundprinzip besteht darin, Materialien und Produkte so lange wie möglich im Umlauf zu halten, sie also zu verwenden, zu reparieren, wiederaufbereiten und am Ende zu recyceln. Dadurch verlängert sich der Lebenszyklus der Produkte und es entsteht ein geschlossener Materialkreislauf. Jedoch lassen sich einige Kunststoffe, wie zum Beispiel Styropor, nur mit großem Aufwand oder gar nicht vollständig recyceln.

In Deutschland findet das Konzept der Kreislaufwirtschaft große Beachtung. Bereits 1994 wurde das Kreislaufwirtschafts – und Abfallgesetz verabschiedet, das erstmals gesetzlich festlegte, dass Abfälle in erster Linie vermieden und in zweiter Linie stofflich verwertet oder energetisch genutzt werden sollen. 2012 wurde das Gesetz überarbeitet und in das kürzere Kreislaufwirtschaftsgesetz

(KrWG) überführt. Dieses Gesetz wurde aufgrund neuer europäischer Vorgaben überarbeitet. Die nationale Umsetzung der EU-Richtlinie erfolgte durch das sogenannte „Gesetz zur Umsetzung der Abfallrahmenrichtlinie der Europäischen Union“ (AbfRRL-UG), welches am 29.10.2020 in Kraft trat. Das Konzept der Kreislaufwirtschaft gibt entscheidende Impulse für die Weiterentwicklung der Abfallwirtschaft in Deutschland und ist von enormer Bedeutung, um neue kreative und innovative Verpackungen und/oder Produkte zu kreieren, um eine Kreislaufwirtschaft zu unterstützen (Erbslöh, 2025).

Laut einer Studie von der GVM (Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung mbH) und ifeu (Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH) von 2023 könnten die mit Verpackungen verbundenen Treibhausgas-Emissionen in Deutschland bis 2045 um bis zu 84 % sinken. Dieser Rückgang basiert sowohl auf Effekten durch den Verpackungsmarkt und die Kreislaufwirtschaft (z.B. Gewichtsreduzierung, Mehrweg, Rezyklateinsatz, erhöhte Recyclingquoten) als auch auf Klimaschutz- und Energieeffizienzmaßnahmen in Produktion und Transport.

2.1.3 Gegenüberstellung der Systeme

In Tabelle 1 wird das lineare Wirtschaftsmodell mit dem Kreislaufwirtschaftsmodell verglichen.

Tabelle 1: Gegenüberstellung der linearen Wirtschaft und der Kreislaufwirtschaft. Eigene Darstellung

Kategorie	**Lineare Wirtschaft**	**Kreislaufwirtschaft**
Grundprinzip	Rohstoffgewinnung → Produktion → Konsum → Entsorgung	Rohstoffgewinnung → Produktion → Konsum → Recycling
Ressourcennutzung	Primärrohstoffe	Sekundärrohstoffe + Wiederverwendung
Energieverbrauch	Hoch (Primärproduktion)	Gering (Wiederverwendung, Recycling)
CO_2 Emissionen	Hoch durch Rohstoffabbau, Produktion, Entsorgung	Reduziert durch Materialkreisläufe
Umweltbelastung	Hoch (Deponien, Verschmutzung, Emissionen)	Gering (Ressourcenschonung, Abfallvermeidung)
Ökonomische Logik	Wachstum durch Verbrauch	Wertschöpfung durch Nutzung und Zirkulation

Der Energieverbrauch unterscheidet sich deutlich zwischen linearem und kreislauforientiertem Wirtschaften. In linearen Systemen, die auf Primärrohstoffe angewiesen sind, ist die Produktion besonders energieintensiv. So erfordert beispielsweise die Herstellung von Aluminium aus Bauxit etwa 13.000 bis 17.000 kWh pro Tonne, während Aluminium aus Recycling nur 500 bis 700 kWh pro Tonne benötigt (Dosenkarton, 2026).

Das lineare Wirtschaftssystem führt zu hohen Umweltbelastungen, das Materialien überwiegend einmalig genutzt und anschließend entsorgt werden. Global entstehen jährlich rund 353 Millionen Tonnen Kunststoffabfall, von dem etwa 9 % recycelt werden, während ein erheblicher Anteil unkontrolliert in die Umwelt gelangt und damit Böden, Gewässer sowie Ökosysteme belastet (OECD, 2019). Im Gegensatz dazu reduziert die Kreislaufwirtschaft Umweltbelastungen messbar.

Höhere Recyclingquoten verringern Schadstoffeinträge. So sinkt bei einem Anstieg der Recyclingquote um 10% die Feinstaubbelastung um ca. 0,08 µg/m³ (Moghadam et al., 2025).
Im Sinne des Klimaschutzes bieten kreislauforientierte Systeme messbare Vorteile. Eine umfassende Analyse des Klimaschutzeffektes der Kreislaufwirtschaft in der EU zeigt, dass durch die Umsetzung der bestehenden Abfall- und Recyclingziele ca. 150 Millionen Tonnen CO_2-Äquivalente pro Jahr und bei ambitionierten Strategien ca. 296 Millionen Tonnen CO_2-Äquivalente pro Jahr eingespart werden könnten (RIGK, 2022).
Die Gegenüberstellung zeigt deutlich, dass die Kreislaufwirtschaft gegenüber dem linearen Modell sowohl ökologisch als auch energetisch vorteilhaft ist. Durch Wiederverwendung und Recycling sinken der Energieverbrauch und die CO_2-Emissionen erheblich, während gleichzeitig Abfallmengen und Umweltbelastungen reduziert werden. Kreislauforientierte Systeme ermöglichen somit eine nachhaltigere Ressourcennutzung und tragen messbar zum Klimaschutz bei.

2.2 Pilze

Pilze sind eukaryotische Mikroorganismen, vorwiegend farblos, chlorophyllfrei, meist fadenförmig und können sowohl einzellig als auch vielzellig sein. Sie unterscheiden sich von Bakterien vor allem durch die Größe, das Vorhandensein echter Zellkerne und die Vielfalt an Formen und Arten. Es gibt einfach gebaute einzellige Formen (z.B. Hefen und Wasserpilze), welche meist rund oder oval sind und eine Zellgröße von etwa 5-10 µm aufweisen und höhere Pilze, welche meist aus einem fadenartigen Pilzgeflecht (Myzel) bestehen. Die höheren Pilze bilden gewöhnlich an bestimmten Hyphen (unverzweigte oder verzweigte, schlauchartige Zellfäden) Sporen, welche der Vermehrung und Verbreitung dienen. Die Ausbildung von Sporen ist die wichtigste und zugleich häufigste Vermehrungsart zahlreicher Pilz-Spezies. Sie werden vor allem durch Wind – und Wasserströmungen verbreitet und können unter günstigen Umweltbedingungen wieder auskeimen und zu einem Myzel heranwachsen. Da Pilze kein Chlorophyll aufweisen, müssen sie ihre Nährstoffe durch energiereiche organische Substanzen aufnehmen.
Pilze haben, in Bezug auf ihre Ernährung, wenig Ansprüche. Sie können auf zahlreichen Substanzen, wie Holz, Leder, Papier oder Textilien, wachsen. Aufgrund fehlender Assimilationsfarbstoffe wird Kohlendioxid nicht in den Stoffwechsel einbezogen. Aufgrund dessen benötigen sie eine organische Kohlenstoffquelle, zum Beispiel in Form von Zucker, Stärke oder Cellulose. Im Allgemeinen benötigen Pilze sehr viel Sauerstoff und wachsen demnach

bevorzugt auf der Oberfläche von befallenen Substraten. Es gibt aber auch Pilze, welche unter anaeroben Bedingungen wachsen können. Es wird davon ausgegangen, dass die CO_2-Konzentration einen Einfluss auf die Entwicklung von Pilzfruchtkörpern haben kann. Vor allem die Ausbildung des Pilzhutes scheint bei hohen CO_2-Werten gehemmt zu werden. Essbare Pilze benötigen während ihres Wachstums viel Sauerstoff und müssen gleichzeitig das entstehende CO_2 abbauen. Wird im Anzuchtraum zu viel CO_2 angesammelt, kann das das Wachstum der Pilze negativ beeinflussen. Dies zeigt sich zum Beispiel durch frühzeitige Alterung oder optische Veränderungen im Erscheinungsbild der Pilze. Vor allem in der Fruchtkörperphase reagieren die Pilze besonders empfindlich auf CO_2. In dieser Phase steigt auch der Sauerstoffbedarf stark an, da die Atmungsaktivität zunimmt. Es ist deshalb wichtig, auf eine gute Belüftung der Pilze zu achten (Martin, 2017). Die Wachstumsbedingungen von Pilzen variieren von Gattung zu Gattung, jedoch wird allgemein ausgesagt, dass das Temperaturoptimum zwischen 20-25 °C liegt, der pH-Wert in einem neutralen oder leicht sauren Milieu (5-7) und der a_w-Wert in dem Bereich 0,98-0,99 liegen sollte. Im Gegensatz zu Bakterien haben Pilze einen geringeren Feuchtigkeitsanspruch. Dies liegt an ihrer stabilen Chitin-Zellwand. Diese verringern den Wasserverlust und besitzen osmotisch aktive Speicherstoffe wie Glykogen. Zudem können sie mit ihren fadenförmigen Hyphen auch aus trockeneren Substraten Wasser aufnehmen (Weber, 2010).

2.2.1 Pilzmyzel

Das Myzel stellt den vegetativen Hauptkörper eines Pilzes dar und bildet die Grundlage für dessen Wachstum, Stoffwechselaktivitäten und ökologische Funktion. Es besteht aus einem dicht verflochtenen Netzwerk fadenförmiger Zellen, den sogenannten Hyphen, die sich kontinuierlich verzweigen und in das umgebende Substrat hineinwachsen. Durch diese netzartige Struktur vergrößert das Myzel seine Oberfläche erheblich und ermöglicht dadurch eine effiziente Aufnahme von Nährstoffen aus der Umgebung. Die hyphale Spitzenexpansion, das Wachstum an den Hyphenspitzen, ist dabei ein zentraler Mechanismus, durch den Pilze neue Substratbereiche erschließen und gleichzeitig Enzyme freisetzen, die komplexe organische Verbindungen wie Cellulose, Hemicellulose oder Lignin abbauen. Das Myzel erfüllt somit zwei Funktionen. Einerseits dient es der mechanischen Durchdringung und Erschließung des Substrats, andererseits stellt es den biochemischen Apparat bereit, der den Abbau und die Aufnahme von Nährstoffen ermöglicht. Dieser Prozess ist besonders relevant bei lignocellulosereichen Materialien, da viele Basidiomyceten spezialisierte Enzyme produzieren, die selbst hochstabile Biomassebestandtteile

aufschließen können. Die Ausbildung und Struktur des Myzels hängen dabei wesentlich von der Pilzart, den Substrateigenschaften und den Umweltbedingungen wie Temperatur, Feuchtigkeit und Sauerstoffverfügbarkeit ab. Unterschiede in Hyphendichte, Verzweigungsgrad und Wachstumsrate beeinflussen nicht nur die ökologische Leistung eines Pilzes, sondern auch die physikalischen Eigenschaften von myzelbasierten Verbundwerkstoffen (Fricker et al., 2017). Aktuelle Übersichtsarbeiten zeigen, dass Myzel ein hochgradig anpassungsfähiges, bioaktives Netzwerk ist, dessen morphologische und funktionale Eigenschaften stark durch äußere Faktoren gesteuert werden können. Madusanka et al. (2024) betonen, dass die Fähigkeit des Myzels, lignocellulotische Substrate strukturell zu durchdringen und gleichzeitig als natürliches „Bindemittel“ zu wirken, wesentlich zur Entwicklung myzelbasierter Biomaterialien beigetragen hat. Ebenso wird hervorgehoben, dass die Variabilität des Aufbaus des Myzels direkten Einfluss auf die Festigkeit, Dichte und Formbarkeit solcher Materialien hat.

2.2.2 Für Verpackungsmaterial geeignete Pilze

Diese Masterarbeit baut auf den Ergebnissen des Masterprojekts „Upscaling of mushroom packaging“ von Tim Schmidt (2024) auf, in welchen verschiedene Pilzarten hinsichtlich ihrer Eignung zur Herstellung myzelbasierter Verpackungsmaterialien an der Hochschule Neubrandenburg im Sommersemester 2024 untersucht wurden. Dabei wurde festgestellt, dass *Pleurotus ostreatus* die stärkste Myzelbildung zeigte, während *Ganoderma lucidum* die stabilste Myzelstruktur ausbildetet. Diese Ergebnisse bilden die Grundlage für die Auswahl der in der vorliegenden Arbeit verwendeten Pilzarten.

Die Übertragbarkeit der Ergebnisse aus dem vorangegangenen Projekt kann nicht ohne weitere Analyse vorausgesetzt werden, da die experimentellen Bedingungen, insbesondere hinsichtlich Feuchtigkeitsmanagement, Substratzusammensetzung, klimatische Inkubationsbedingungen und methodischer Limitationen, deutliche Einflussfaktoren auf das Myzelwachstum und die Materialeigenschaften darstellen. So wird in der Arbeit von Schmidt (2024) selbst beschrieben, dass suboptimale Feuchtigkeitsverteilung, unzureichende Kontrolle der Luftfeuchtigkeit sowie inkonsistente Wasseraufnahme während des Autoklavierens zu ungleichmäßigen Wachstumsbedingungen führten. Zudem wurde ein erheblicher Teil der beobachteten Materialverfestigung nicht primär durch die Bindung des Myzels verursacht, sondern durch physikochemische Effekte wie Stärkeretrogradation. Somit ist die eindeutige Zuschreibung der Materialstabilität an die biologische Aktivität des Myzels methodisch eingeschränkt.

Vor diesem Hintergrund ist die Auswahl von *P. ostreatus* und *G. lucidum* nicht ausschließlich auf die Ergebnisse des vorhergehenden Masterprojekts zu stützen, sondern zusätzlich durch externe wissenschaftliche Literatur abzusichern und fachlich einzuordnen.
Tacer-Caba et al. (2020) zeigen, dass *Pleurotus ostreatus* als auch *Ganoderma lucidum* auf nachhaltigen Substraten aus agronomischen Reststoffen erfolgreich kultiviert werden können und dabei mechanisch belastbare, formstabile Myzelkomposite ausbilden. Jones et al. (2018) belegen zudem, dass artspezifische Eigenschaften dieser Pilze in Kombination mit lignocellulosischen Substraten die Ausbildung zusammenhängender Myzelstrukturen ermöglichen, die gezielt für Verpackungs- und Dämmmaterialien genutzt werden können. Auch Enarevba und Haapala (2023) belegen, dass die beiden Pilzarten agronomische Reststoffe nicht nur biologisch verwerten, sondern diese aktiv in funktionale Materialstrukturen überführen können, die mechanische Eigenschaften aufweisen, welche mit konventionellen Verpackungsmaterialien wie Polystyrolschaum vergleichbar sind.

2.2.2.1 *Pleurotus ostreatus*

Pleurotus ostreatus, auch Austernpilz oder Austernseitling genannt, ist ein Pilz, der zu der Gattung *Pleurotus* gehört. Sie gilt als die am weltweit zweithäufigsten angebaute und verbreitete Speisepilzart. Die Gattung *Pleurotus* besitzt wertvolle medizinische, biotechnologische und ernährungsphysiologische Eigenschaften und ist sehr anpassungsfähig, da sie eine spezifische Resistenz gegenüber Schädlingen und Krankheiten besitzt (El-Ramady et al., 2022). Aufgrund dieser Resistenz werden die Fruchtkörper selten befallen und der Pilz kann auf einfache und kostengünstige Weise angebaut werden. Ein optimales Wachstum des Pilzes hängt jedoch von verschiedenen Faktoren ab, welche in Wechselwirkung zueinander stehen. Diese werden in biologische (antimikrobielle Wirkstoffe, Wechselwirkung zwischen Mikroorganismen), chemische (chemische Zusammensetzung, Verhältnis von Kohlenstoff und Stickstoff, Mineralien, Tenside) und physikalische (pH-Wert, Feuchtigkeit, Partikelgröße, Wasseraktivität) Faktoren aufgeteilt. Ein Vorteil der Pilzart ist die kürzere Wachstumszeit im Vergleich zu anderen Pilzarten (Bellettini et al., 2019). Biologische Faktoren wie antimikrobielle Wirkstoffe und die Wechselwirkung mit Mikroorganismen schützen das Myzel vor Schädlingen und fördern dessen Entwicklung. Chemische Faktoren, insbesondere das Verhältnis von Kohlenstoff zu Stickstoff, Mineralstoffgehalt und Tenside, steuern die Nährstoffverfügbarkeit und den Stoffwechsel.

Physikalische Faktoren wie pH-Wert, Feuchtigkeit, Wasseraktivität und Partikelgröße schaffen optimale Bedingungen für das Myzelwachstum und Fruchtkörperbildung.
Wachstumsbedingungen spielen für ein optimales Substrat und damit verbunden eine optimale Ausbildung des Myzels, eine wichtige Rolle. In einer Studie von Hu et al. (2023) wurde die optimale Temperatur für das Myzelwachstum untersucht. Die Ergebnisse zeigten, dass bei 22 °C das Myzel am schnellsten gewachsen ist (0,56 cm pro Tag). Yadav und Ramchandra (2014) untersuchten den Einfluss des pH-Wertes auf verschiedene Stämme von *Pleurotus*-Pilzen. In ihren Versuchen zeigte sich deutlich, dass der pH-Wert einen entscheidenden Einfluss auf das Myzelwachstum hat. Es konnte festgestellt werden, dass ein neutraler pH-Wert von etwa 7,0 die besten Wachstumsbedingungen für alle getesteten *Pleurotus*-Stämme bot. Unter diesen Bedingungen entwickelten sich die Myzelien gleichmäßig und wiesen eine höhere Wachstumsrate auf als bei saurem oder alkalischem Milieu.
Die optimale Feuchtigkeit liegt, laut Chang und Miles (2004), zwischen 50 % und 75 %. Bei einer zu hohen Feuchtigkeit wird die Atmung des Myzels erschwert, was zu einer Hemmung der Transpiration führt und dadurch die Entwicklung der Fruchtkörper unmöglich macht (Urben, 2004). Zudem wird davon ausgegangen, dass die Porosität des Substrates verringert und damit verbunden der Sauerstofftransport eingeschränkt wird. Bei einem zu niedrigen Feuchtigkeitsgehalt stirbt der Fruchtkörper des Pilzes ab (Patel et al., 2009). *P. ostreatus* reagiert besonders sensibel gegenüber hohen CO_2-Werten. Typische Reaktionen, die dort auftreten, sind unvollständig entwickelte Hüte und verlängerte spindelförmige Stiele. Zudem beeinflussen erhöhte CO_2-Werte die Synthese von Zellwandbestandteilen wie R-Glucan. Der Pilz braucht eine intensive und kontinuierliche Frischluftzufuhr (Sietsma, 1977). Bei geeigneter Kultivierung zeigt *P. ostreatus* eine erhöhte Enzymaktivität von Cellulase und Xylanase (Isikhuemhen und Mikiashvill, 2009).

2.2.2.2 *Ganoderma lucidum*

Ganoderma lucidum, auch Reishi oder glänzender Lackporling genannt, gehört zu der Familie der Ganodermataceae (Wachtel-Galor et al., 2011). Vor allem in asiatischen Ländern ist *G. lucidum* für seine medizinischen Eigenschaften bekannt. Er wird aufgrund seiner medizinischen Bedeutung traditionell als „lebensförderndes Stärkungsmittel“ und „wichtiges Elixier des Orients“ angesehen (Chang und Buswell, 1999).
Die Fruchtkörper (Sporokarpe) und das Myzel von *Ganoderma lucidum* sind reich an verschiedenen bioaktiven Inhaltsstoffen. Dazu zählen insbesondere Triterpenoide, Polysaccharide,

Proteine, Peptide sowie Steroide und Sterole. Diese Substanzen bilden die Grundlage für die pharmakologischen Effekte des Pilzes und tragen wesentlich zu seinen immunmodulierenden Eigenschaften bei, die das Immunsystem insgesamt unterstützen (Singh et al., 2015).

Das Wachstum von *Ganoderma lucidum* wird maßgeblich durch die Zusammensetzung des verwendeten Substrats beeinflusst. Besonders entscheidend sind dabei organische Materialien mit einem hohen Anteil an Cellulose und Lignin. Nachhaltige und kosteneffiziente Alternativen bieten verschiedene landwirtschaftliche Reststoffe. Hierzu zählen unter anderem Weizenstroh, Baumwollsamenschalen, Maiskolben und andere Agrarabfälle. Untersuchungen zeigen, dass insbesondere Weizenstroh aufgrund des hohen Ertrags und der biologischen Effizienz als besonders geeignetes Basismaterial gilt (Atila, 2020). Neben der chemischen Zusammensetzung spielen auch die physikalischen Eigenschaften des Substrats eine zentrale Rolle. In einer Studie von Ohmayed et al. (2020) konnte gezeigt werden, dass der optimale Feuchtigkeitsgehalt des Substrates bei etwa 67 % liegen sollte. Die optimale Wachstumstemperatur liegt laut Jayasinghe et al. (2008) bei 30 °C. Die Studie zeigte ebenfalls, dass Stämme von *G. lucidum* in einem weiten pH-Wert Bereich wachsen können (pH 5-9). Ohmayed et al. (2020) zeigten, dass ein nahezu neutraler pH-Wert von 6,9 optimal für das Wachstum *G. lucidum* war.

Anders als *Pleurotus ostreatus* wirkt *Ganoderma lucidum* nicht stark sensibel auf eingeschränkte Belüftung. Bereits in vollständig geschlossenen Kultivierungsboxen steigt der CO_2-Gehalt innerhalb einer Stunde auf 0,5 % an, während der Sauerstoffgehalt gleichzeitig abnimmt. Nach zwölf Stunden überschreiten die CO_2-Werte in den geschlossenen Boxen 5 %, was zu einer deutlichen Veränderung der Fruchtkörpermorphologie führt. Normale Kulturbedingungen (CO_2-Werte unter 0,1 % und ausreichende Belüftung) fördern die Bildung typischer regulärer nierenförmiger Fruchtkörper. Eine eingeschränkte Luftzufuhr wirkt somit als starker morphogener Faktor, führt aber nicht zwingend zum Wachstumsstopp, sondern modifiziert primär die Fruchtkörperform (Sudheer et al., 2018). Wie auch der *Pleurotus ostreatus* bildet *Ganoderma lucidum* Cellulase und Xylanase (Isikhuemhen und Mikiashvill, 2009).

2.3 Substrate für das Pilzwachstum

Für das vorliegende Kapitel zur Substratauswahl wird zunächst erklärt, welche Rolle das Substrat im Kontext der myzelbasierten Materialentwicklung einnimmt, bevor die spezifischen Materialien diskutiert werden. Ein Substrat dient in der Myzelkultur sowohl als Nährstoff als auch als strukturbildende Grundlage. Es muss den Pilzen ausreichend Kohlenstoffquellen und organische

Matrix bieten, damit sich das Myzel gut entwickeln kann und anschließend ein mechanisch stabiles, biologisch vernetztes Material entsteht. Dabei sind die chemische Zusammensetzung, insbesondere der Gehalt an Cellulose, Hemicellulose und Lignin, sowie physikalische Eigenschaften wie Porosität, Wasserspeichervermögen und Belüftung entscheidend, da sie das Myzelwachstum und die spätere Materialstabilität direkt beeinflussen.
Für holzabbauende Pilzarten wie *Pleurotus ostreatus* und *Ganoderma lucidum* sind lignocellulosische Substrate besonders geeignet, da diese Arten über spezialisierte Enzymsysteme verfügen, die den Abbau pflanzlicher Zellwandbestandteile ermöglichen. In der vorliegenden Arbeit wurden daher Buchenholzspäne, Weizenstroh und Hanfstroh als Substrat ausgewählt, da sie als lignocellulosische Nebenprodukte regional verfügbar, ökologisch nachhaltig und biologisch gut verwertbar sind. Sie weisen ein ausgewogenes Verhältnis strukturbildender Komponenten auf und bieten gleichzeitig günstige physikalische Eigenschaften für ein homogenes Myzelwachstum.
Neben geeigneten lignocellulosischen Substraten wurden in Studien auch organische Materialien identifiziert, die sich für die Kultivierung von *Ganoderma lucidum* und *Pleurotus ostreatus* als ungeeignet erwiesen hatten. In einer Studie von Atila (2025) sorgte Baumwollsamenmehl aufgrund seines hohen Stickstoff– und Proteingehaltes sowie seines geringen Anteils an struktureller lignocellulosischer Kohlenstoffbasis zu einer verminderten biologischen Effizienz und geringeren Biomassebildung bei *G. lucidum*. Auch für *P. ostreatus* wurden agroindustrielle Reststoffe wie Reisspelzen oder Traubenrückstände als weniger geeignet beschrieben, da sie entweder ungünstige physikalische Eigenschaften, wie geringe Porosität und schlechte Belüftung aufweisen oder durch hohe Mineralstoff– und Reststoffanteile ein ungünstiges Kohlenstoff-Stickstoff-Verhältnis erzeugen. Dies führt zu eingeschränkter Myzelkolonisation und reduzierter enzymatischer Aktivität (Costa et al., 2023).

2.3.1 Buchenholzspäne

Buchenholzspäne werden aus dem Holz der Buche (*Fagus sylvatica*) gewonnen. Sie entstehen als Nebenprodukt bei der Holzverarbeitung durch mechanische Verarbeitungsprozesse, wie zum Beispiel Hobeln, Sägen oder Fräsen. Jährlich fallen etwa 17 Millionen m^3 Sägenebenprodukte in der Holzverarbeitung an, wobei darunter nicht nur Späne, sondern auch Hackschnitzel, Spreißel oder Schwarten zählen (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., 2026).
Die Rotbuche gehört zur Gattung *Fagus* innerhalb der Buchengewächse (*Fagaceae*). Sie sind die in Mitteleuropa am weitesten verbreitete Laubbaumart und bilden dort häufig die potenziell

natürliche Klimavegetation. Das natürliche Verbreitungsgebiet der Buche erstreckt sich von Südengland über weite Teile Mitteleuropas bis nach Süditalien und zum Schwarzen Meer. Die chemische Zusammensatzung von Holz wird maßgeblich durch die Baumart bestimmt, variiert jedoch zusätzlich in Abhängigkeit von einer Vielzahl biotischer (z. B. Gesundheitszustand, Schädlingsbefall und Alter des Baumes) und abiotischer Faktoren (z. B. Bodenart, Wasserverfügbarkeit und Niederschlagsmenge). Für Buchenholz wird in der Literatur eine typische Zusammensetzung beschrieben, die sich aus etwa 45-55 % Cellulose, 19-23 % Hemicellulose und 21-24 % Lignin zusammensetzt (Szczepkowski et al., 2007). Diese Werte verdeutlichen, dass Buche ein ausgewogenes Verhältnis zwischen den strukturbildenden und energetisch nutzbaren Bestandteilen aufweist, um als geeignetes Grundsubstrat für eine pilzmyzelbasierte Verpackung zu dienen. Die hohen Anteile an Cellulose und Hemicellulose bieten eine leicht zugängliche Kohlenstoffquelle, während der Ligningehalt einerseits zur mechanischen Stabilität beiträgt, andererseits aber auch enzymatisch abbaubar bleibt. Diese Kombination macht Buchenholz zu einem besonders geeigneten lignocellulosischen Substrat für die Kultivierung von holzabbauenden Pilzen, wie etwa *Pleurotus ostreatus* oder *Ganoderma lucidum*. Beide Arten verfügen über ein hochentwickeltes Enzymsystem (z.B. Laccasen und Peroxidasen), das den selektiven Abbau von Lignin und die effiziente Nutzung der verbleibenden Polysaccharide ermöglicht (Díaz-Godínez et al., 2017).

2.3.2 Weizenstroh

Weizenstroh ist ein Nebenprodukt bei der Ernte von Weizen (Sainos, 2006), welcher größtenteils in der gemäßigten Klimazone angebaut wird (Schmid-Sandherr, 2017). Beim Dreschen werden die Körner vom Halm getrennt, wobei Stängelreste, also das Stroh, übrigbleiben. Es eignet sich besonders gut für die Kultivierung von *Pleurotus ostreatus* und *Ganoderma lucidum*, da es ein lignocellulosereiches Substrat ist, das die natürlichen Lebensbedingungen vieler saprotropher Pilze sehr gut nachbildet. Weizenstroh weist eine Zusammensetzung auf, die sowohl Lignin (5-24 %) als auch Cellulose (32–47 %) und Hemicellulose (19–35 %) enthält, wodurch es den Pilzen ermöglicht wird, die für ihr Wachstum notwendigen Enzyme wie Laccasen und -1,3-Glucanasen zu induzieren. Diese Enzyme sind entscheiden für den Abbau der pflanzlichen Zellwandbestandteile, was wiederum die Nährstofffreisetzung und das Myzelwachstum fördert. Darüber hinaus besitzen Kulturen, die auf Weizenstroh wachsen, eine hohe Protease Aktivität und einen erhöhten Gehalt an intrazellulären Proteinen, was bedeutet, dass Substrate nicht nur als

strukturelle Wachstumsbasis dienen, sondern auch eine Rolle bei der Akkumulation von Nährstoffreserven spielt (Sainos, 2006).

2.3.3 Hanfstroh

Hanfstroh entsteht bei der Ernte und Verarbeitung von Nutzhanf, wenn die Stängel getrocknet und anschließend mechanisch aufgeschlossen werden. Dabei werden die wertvollen Fasern von den holzigen Bestandteilen getrennt. Die Fasern gelten als Hauptprodukt, während das übrige Hanfstroh als Nebenprodukt anfällt. Es stellt aufgrund seiner chemischen Zusammensetzung und physikalischen Eigenschaften ein besonders geeignetes Substrat für die Kultivierung von Pilzen dar. Die Stängelbestandteile des Hanfs bestehen zu einem hohen Anteil aus Cellulose (40-48 %) und Hemicellulose (18-25 %), die den Pilzen als leicht zugängliche Kohlenstoffquelle dienen. Gleichzeitig liegt der Lignin Gehalt, mit etwa 21-24 %, deutlich unter dem vieler holzartiger Reststoffe, wodurch die enzymatische Zersetzung durch lignocellulolytischer Pilze, wie etwa *Pleurotus ostreatus*, erleichtert wird (Viel et al., 2019). Diese Zusammensetzung begünstigt ein rasches Durchwachsen des Substrats, da Cellulase- und Xylanase-produzierende Pilze den hohen Anteil an pflanzlichen Polysacchariden effizient abbauen können (Hernández-Domínguez et al., 2017).
Neben der chemischen Zusammensetzung spielt auch die physikalische Struktur des Hanfstrohs eine entscheidende Rolle. Das Material weist eine ausgeprägte Faserung und Porosität auf, die sowohl eine gute Belüftung als auch eine gleichmäßige Wasserverteilung im Substrat ermöglicht (Viel et al., 2019).

2.4 Substratzusätze

In der Pilzkultivierung werden Substratzusätze gezielt eingesetzt, um nährstoffarme Basismaterialien wie Stroh oder Holz zu ergänzen, das Kohlenstoff-Stickstoff-Verhältnis zu optimieren und die Verfügbarkeit leicht verwertbarer Nährstoffe für das Myzel zu erhöhen. Im vorliegenden Kapitel werden daher die Substratzusätze Weizenkleie und Haferflocken beschrieben, da beide durch hohe Konzentrationen an Stickstoff, Polysacchariden und Mineralstoffen sowie durch ihre feine Partikelstruktur nachweislich das Myzelwachstum und die Fruchtkörperbildung fördern (Soh et al., 2021). Demgegenüber werden andere potenzielle Zusätze, wie zum Beispiel Leinsamen bewusst nicht berücksichtigt, da Untersuchungen gezeigt haben, dass

Leinsamen aufgrund ihres sehr hohen Fettgehaltes und der damit verbundenen hohen Lipidfraktion im Vergleich zu kohlenhydrat- und proteinreicheren Zusätzen wie Hafer oder Kleie weniger effektiv für die Myzelentwicklung ist (Soh et al., 2021). Ein weiteres Beispiel für einen ungeeigneten Substratzusatz stellt Kaffeesatz dar. Obwohl er organische Nährstoffe und Stickstoffverbindungen enthält, zeigen experimentelle Untersuchungen, dass ein hoher Anteil von Kaffeesatz im Substrat zu einer signifikanten Hemmung des Myzelwachstums sowie zu erhöhten Kontaminationsraten, eine deutlich langsamere Kolonisation, inhomogene Myzelstrukturen und reduzierte Fruchtkörperbildung führen. Ursache hierfür sind unter anderem die hohe mikrobielle Vorbelastung und die dichte, wasserhaltende Struktur des Materials, welche konkurrierende Mikroorganismen begünstigt und die Sauerstoffdiffusion im Substrat einschränkt (Thao et al., 2024).

2.4.1 Weizenkleie

Weizenkleie ist ein Nebenprodukt der Mehlherstellung und entsteht beim Mahlen von Weizenkörnern. Sie wird oft als Substratzusatz für die Kultivierung von Pilzen benutzt. Dies liegt an dem hohen Gehalt an Stickstoff und anderen leicht verfügbaren Nährstoffen. Diese Nährstoffe fördern das Myzelwachstum und die Bildung hochwertiger Fruchtkörper. Zusätzlich zeigte sich, dass Pilze auf weizenkleiehaltigen Substraten höhere Konzentrationen essenzieller Mineralstoffe aufweisen. Pilze profitieren besonders von Supplementen mit hoher Nährstoffdichte, feiner Partikelgröße und hohem Anteil an Proteinen und Polysacchariden, da diese schneller enzymatisch abgebaut und vom Myzel aufgenommen werden. Daraus resultiert ein dichteres, gesundes Myzel, das Substrate schneller kolonisiert. Genau diese Eigenschaften treffen auf Weizenkleie zu. Außerdem verbessert Kleie das Kohlenstoff-Stickstoff-Verhältnis lignocellulosereicher Substrate wie Holz oder Stroh, die von Natur aus stickstoffarm sind. Dies sorgt für ein beschleunigtes Wachstum und höhere Erträge (Soh et al., 2021).

2.4.2 Haferflocken

Haferflocken entstehen, indem gereinigte und entspelzte Haferkerne schonend gedämpft, anschließend zu Flocken gewalzt und getrocknet werden. Haferflocken haben eine hohe Polysaccharidkonzentration und im Vergleich zu anderen Substratzusätzen wie z.B. Weizenkleie, Gerste oder Leinsamen den höchsten Anteil an leicht zugänglichen Polysacchariden. Diese sind

für Pilze eine zentrale Energiequelle und werden enzymatisch sehr schnell abgebaut. Dadurch steht dem Myzel ein konstanter Strom leicht verfügbarer Kohlenstoffverbindungen zur Verfügung, was die Kolonisationsgeschwindigkeit erhöht und ein gleichmäßiges Myzelgeflecht begünstigt. Haferflocken haben, ähnlich wie Weizenkleie, ein angereichertes Mineralstoffprofil, welches die Enzymaktivität, das Zellwachstum und die Membranstabilität unterstützt. Dies kann zur Bildung von robusten und gut strukturierten Hyphen beitragen. Auch die feine Partikelgröße und die strukturelle Stabilität von Haferflocken kann zur gleichmäßigen Verteilung und Vernetzung des Myzels führen (Soh et al., 2021).

2.5 Myzelbasierte Verpackung

Einwegkunststoffe, insbesondere Produkte aus Styropor, wurden lange Zeit weitgehend unhinterfragt eingesetzt, da ihre Praktikabilität und niedrigen Kosten im Vordergrund standen. Mit der zunehmenden Umweltbelastung durch Plastikabfälle rückte jedoch die Regulierung dieser Produkte stärker in den Fokus. So hat das Bundeskabinett am 24. Juni 2020 die Einwegkunststoffverbotsverordnung beschlossen, welche am 3. Juli 2021 in Kraft trat. Die Verordnung setzt die EU-Richtlinie (EU) 2019/904 zur Verringerung der Auswirkungen bestimmter Kunststoffprodukte auf die Umwelt um und verbietet unter anderem das Inverkehrbringen von Besteck, Tellern, Trinkhalmen und To-Go-Behältern aus expandiertem Polystyrol (Styropor). Ziel der Regelung ist es, den Verbrauch von Einwegkunststoffen zu reduzieren, die Umweltverschmutzung zu begrenzen und eine nachhaltigere Ressourcennutzung zu fördern (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, 2021). Myzelbasierte Materialien gewinnen daher zunehmend an Aufmerksamkeit, da sie eine umweltfreundliche Alternative zu fossilen Rohstoffen bieten. Sie entstehen, indem das Myzel ein organisches Material wie Stroh, Sägespäne oder andere landwirtschaftliche Reststoffe durchwächst und zu einem festen Verbundmaterial vernetzt. Nachdem das Pilzgewebe das Substrat vollständig kolonisiert hat, wird es durch Hitze inaktiviert und getrocknet, wodurch ein leichter, stabiler und vollständig biologisch abbaubarer Verbundstoff entsteht (Alaneme et al., 2023).

In einer Studie von Volk et al. (2024) wurde eine Lebenszyklusanalyse (LCA) mit myzelbasierten Verbundstoffen durchgeführt. Sie beschreibt im Allgemeinen, dass im Vergleich zu konventionellen Kunststoffen eine deutlich geringere Umweltbelastung vorliegt. Ein zentraler Vorteil ergibt sich bereits in der Rohstoffphase, da Myzelmaterialien meist auf lokal verfügbaren

Restbiomassen basieren und deshalb kaum zusätzliche Emissionen oder energieintensive Vorprodukte benötigen. Auch der Energiebedarf über den gesamten Lebenszyklus hinweg ist bei Myzelkompositen niedriger, weil ihre Produktion nur wenige energieintensive Schritte umfasst. Zudem entstehen während der Herstellung kaum toxische Emissionen, was die Ökobilanz weiter verbessert. In einer genauen LCA (Life-Cycle-Assesment) von Myzelverpackungen und EPS-Verpackungen von Enarevbaa und Haapala (2023) wurden über 20 verschieden Umweltwirkungskategorien untersucht. Die Ergebnisse zeigen eindeutig, dass pilzmyzelbasierte Verpackungen deutlich schonender und gesünder für den Menschen sind. Zum Beispiel wurden für verschiedene Umweltkategorien der DALY-Wert (Disability-Adjusted Life Year) berechnet. Dieser ist eine Maßeinheit, um die Auswirkung von Produkten oder Prozessen auf die menschliche Gesundheit einzuschätzen. Ein DALY von 1 entspricht dem Verlust eines Jahres in voller Gesundheit, also entweder durch verkürzte Lebensdauer oder durch Jahre mit eingeschränkter Lebensqualität. Bei Myzelverpackungen liegt der Wert, für die Kategorie Global Warming – Human health, bei 1,21E.01 DALY und bei EPS bei 2,86E-01 DALY. Für die Kategorie Feinstaubbelastung liegt der Wert bei Myzel bei 2,04E-01 DALY und bei EPS bei 3,55E-01 DALY. Der CED-Wert (Cumulative Energy Demand) gibt die gesamte Energiemenge an, die für die Herstellung, Nutzung und Entsorgung eines Produktes über seinen gesamten Lebenszyklus benötigt wird. Dieser Wert liegt bei Myzelverpackungen bei 2,86 TJ und bei EPS bei 6,08 TJ. Die Treibhausgasemissionen bei Myzelverpackungen, in einem Betrachtungszeitraum von 100 Jahren, liegen bei etwa $1{,}28 * 10^5$ kg CO_2-eq und bei EPS-Verpackungen bei etwa $2{,}99 * 10^5$ kg CO_2-ep. Diese Studien zeigen eindeutig, dass Myzelverpackungen umweltschonender sind als konventionelle Kunststoffverpackungen. Sie sind zudem sehr leicht, besitzen eine gute thermische Isolationsfähigkeit und haben in vielen Fällen eine gute akustische Dämpfungseigenschaft und lassen sich in nahezu jede Form „züchten“. Die Materialien sind komplett biologisch abbaubar und haben damit einen klaren Vorteil zu synthetischen Verpackungsschäumen wie Styropor. Es gibt jedoch auch Herausforderungen, da die mechanischen Eigenschaften vieler Myzelverbundstoffe noch unter denen von konventionellen Kunststoffen liegen, zudem zeigen sie eine teils hohe Wasseraufnahme, was die Einsatzbereiche einschränken kann. Außerdem fehlen derzeit standardisierte Herstellungsprozesse, wodurch die Qualität noch stark von Substrat, Pilzart und Prozessbedingungen abhängt. Für nicht tragende Anwendungen wie Verpackungen, Dämmung oder Polstermaterialien gelten diese Einschränkungen aber als weniger problematisch (Alaneme et al., 2023).

2.6 Polsterkennlinie

Die Polsterkennlinie dient zur Beschreibung des mechanischen Verhaltens von Polstermaterialien unter Belastung. Sie stellt den funktionalen Zusammenhang zwischen einer auf ein Polster wirkenden Kraft beziehungsweise Spannung und der daraus resultierenden Verformung dar. In der Regel wird dieser Zusammenhang grafisch als Kraft-Weg- oder Spannungs-Dehnungs-Diagramm dargestellt. Polsterkennlinien werden insbesondere bei der Auslegung und Bewertung von geschäumten Kunststoffen bzw. Schaumstoffen in Bereichen wie der Möbel- und Matratzenindustrie, dem Fahrzeugsitzbau, der Medizintechnik sowie im Verpackungs- und Transportschutz eingesetzt. Charakteristisch für Polstermaterialien ist ein überwiegend nichtlineares Verformungsverhalten. Während bei ideal elastischen Materialen eine proportionale Beziehung zwischen Kraft und Verformung besteht, zeigen Polstermaterialien, insbesondere polymerbasierte Schäume, einen deutlich komplexeren Verlauf. Die Polsterkennlinie lässt sich in drei Bereiche unterteilen: eine initiale, flache Zone mit geringer Steifigkeit, einen mittleren Bereich mit zunehmendem Widerstand sowie eine stark ansteigende Zone bei hoher Verformung. Diese Form der Kennlinie ermöglicht einerseits einen hohen Komfort bei geringen Belastungen und andererseits eine ausreichende Stützwirkung bei höheren Kräften (Gibson und Ashby, 2014). Die Abbildung 2 zeigt eine typische Polsterkennlinie von Kunststoffschäume, wie sie nach Miltz und Ramon (1990) beschrieben wird.

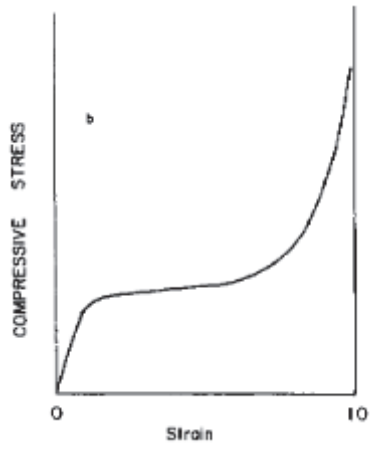

Abbildung 2: Schematische Spannungs-Dehnungs-Kurven von Kunststoffschäumen nach Miltz und Ramon (1990)

In der Praxis dient die Polsterkennlinie als zentrales Auslegungskriterium für den Einsatz eines Polstermaterials. So können anhand der Kennlinie Aussagen über die Druckverteilung sowie die Fähigkeit zur Stoß- und Energieabsorption getroffen werden. Insbesondere in der Verpackungstechnik werden Polsterkennlinien, dort häufig als Cushioning Curves bezeichnet, genutzt, um das optimale Polstermaterial für den Schutz empfindlicher Güter gegen Stoßbelastungen auszuwählen (Zhong und Saito, 2012).

Diese Kennlinien beschreiben den Zusammenhang zwischen der statischen Belastung eines Polstermaterials und der maximalen Stoßbeschleunigung, die bei einer definierten Stoßbeanspruchung auf das geschützte Produkt übertragen wird. Die statische Belastung ergibt sich aus dem Verhältnis von Produktgewicht zur wirksamen Polsterfläche, während die Stoßbeschleunigung im Rahmen standardisierter Fallversuche gemessen wird. Nach der DIN EN ISO 4651/A1:2008 wird zur Ermittlung einer Cushioning Curve ein Prüfkörper mit definierter Masse aus einer festgelegten Fallhöhe auf ein Polstermaterial bekannter Dicke fallen gelassen. Durch Variation der statischen Belastung und Erfassung der jeweils auftretenden Maximalbeschleunigung lässt sich der charakteristische Verlauf der Kennlinie bestimmen. Typischerweise weist diese ein Minimum auf, dass den optimalen Belastungsbereich des Polstermaterials kennzeichnet. In diesem Bereich wird die Stoßenergie am effizientesten absorbiert, sodass die auf das Produkt wirkende Beschleunigung minimal ist. Die Auslegung von Verpackungslösungen erfolgt daher gezielt so, dass die resultierende statische Belastung des Polsters möglichst im Bereich dieses Minimums liegt. Auf diese Weise kann das Risiko von Transportschäden durch Stoßbeanspruchungen signifikant reduziert werden, ohne übermäßig große oder steife Polstermaterialien einsetzen zu müssen (Gibson und Ashby, 2014).

3 Material und Methoden

Dieses Kapitel beschreibt die im Rahmen der experimentellen Arbeiten eingesetzten Geräte, Materialien, Chemikalien und Rohstoffe. Ziel ist es, die verwendeten Ressourcen systematisch zu dokumentieren, um die Nachvollziehbarkeit, Reproduzierbarkeit und wissenschaftliche Vergleichbarkeit der Versuche zu gewährleisten.

3.1 Verwendete Geräte und Materialien

Die verwendeten Geräte, Chemikalien und Rohstoffe sind in den Tabellen 2 und 3 dargestellt.

Tabelle 2: Verwendete Rohstoffe und Chemikalien

Rohstoffe & Chemikalien	**Hersteller**	**Anschrift**
Destilliertes Wasser	-	-
50 ml Pilzlösung *P. ostreatus*	Urban Fungi OÜ	Lutsu tn 6-2 Viljandi 71003, Niederlande
50 ml Pilzlösung *G. lucidum*	Urban Fungi OÜ	Lutsu tn 6-2 Viljandi 71003, Niederlande
Kartoffel-Glucose-Bouillon (Chargennummer: 426250434)	Carl Roth GmbH & Co. KG	Schoemperlenstr. 3-5, 76185 Karlsruhe, Deutschland
Malzextrakt-Agar (Chargennummer: 496252913)	Carl Roth GmbH & Co. KG	Schoemperlenstr. 3-5, 76185 Karlsruhe, Deutschland
Terrabest Buchenholzgranulat Einstreu (fein 1-3 mm)	Feeders & more GmbH	Zechwaldstr. 1, 88131 Lindau (Bodensee), Deutschland
Terrabest Buchenholzgranulat Einstreu (grob 4-10 mm)	Feeders & more GmbH	Zechwaldstr. 1, 88131 Lindau (Bodensee), Deutschland
Buchenholzspäne grob	Futtermittel & Naturkost Mühle Gladen	Bahnhofstraße 42, 46286 Dorsten, Deutschland

Haferflocken Feinblatt	Dirk Rossmann GmbH	Isernhägener Str. 16, 30938 Burgwedel, Deutschland
Weizenkleie	dm-drogerie markt GmbH & Co. KG	Am dm-Platz 1, 76227 Karlsruhe, Deutschland
Quality Clean Hanfstreu, 30L	Zoomalia	40230 Saint Geours de Maremne, FRANKREICH
PREMIUM WEIZEN-STROH	MARTINS HEU- & STROHSHOP24	Deipenweg 10 33104 Paderborn, Deutschland

Tabelle 3: Verwendete Geräte

Geräte	Hersteller	Anschrift
Erlenmeyerkolben (250 ml)	Schott AG	Hattenbergstrasse 10 55122 Mainz, Deutschland
Spatel	Drifton A/S	Industriholmen 51 2650 Hvidovre, Dänemark
Becherglas (250 ml)	GT Good(s)Trade GmbH	Kirburger Weg 59 50767 Köln, Deutschland
Becherglas (1 l)	GT Good(s)Trade GmbH	Kirburger Weg 59 50767 Köln, Deutschland
Messzylinder (1 l)	VitLab GmbH	Linus-Pauling-Straße 1, 63762 Großostheim, Deutschland
OmniLab TH 30	Edmund Bühler GmbH	Schindäckerstraße 8, 72411 Bodelshausen, Deutschland
Thermomix	Vorwerk Deutschland Stiftung & Co. KG	Rauental 38 42289 Wuppertal, Deutschland
Entris II Analysenwaage	Sartorius AG	Otto-Brenner-Str. 20 37079 Göttingen, Deutschland

Autoklav	SHP Steriltechnik AG	Schloss Detzel 1 39345 Schloss Detzel, Deutschland
Thermostatschrank	Altmann Analytik GmbH & Co. KG	Rupert-Mayer-Str. 46 81379 München, Deutschland
Thermostatschrank	Heraeus instruments	Heraeusstraße 12-14 63450 Hanau, Deutschland
Trockenschrank	Heraeus instruments	Heraeusstraße 12-14 63450 Hanau, Deutschland
Lötkolben Analog 80	Putty + Gausmann GmbH	Halterner Str. 12 48612 Horstmar, Deutschland

3.2 Methodik

Dieses Kapitel beschreibt die experimentelle Methodik der Arbeit und dient der transparenten Darstellung aller wesentlichen Arbeitsschritte, von der Kultivierung der Pilze bis zur materialtechnischen und sensorischen Bewertung der myzelbasierten Proben. Ziel ist es, eine reproduzierbare Versuchsstruktur zu schaffen, die sowohl biologische Wachstumsprozesse als auch materialtechnische Eigenschaften systematisch erfasst.

3.2.1 Vorbereitung der Pilzkulturen und Kunststoffbehälter

Für die Versuche wurden zunächst Subkulturen der bestellten Pilzlösungen hergestellt, um die Pilze zu „Revitalisieren“ und um eine größere Menge an Pilzkulturlösung herzustellen.
Für die Subkultivierung wurden die Pilze in Kartoffel-Dextrose-Bouillons inkubiert, da sie in diesen Medien, laut Hersteller-Angaben, am besten wachsen können. Zur Absicherung der Integrität der Ergebnisse werden pro Pilz drei Subkulturen hergestellt. Dafür wurden zunächst 15,9 g des Kartoffel-Glucose-Mediums in ein Becherglas abgewogen und in 600 ml destilliertem Wasser aufgekocht und umgerührt, bis sich das Nährmedium vollständig aufgelöst hat. Anschließend wurden die 600 ml Nährlösung auf sechs 100 ml Erlenmeyerkolben aufgeteilt,

welche danach für 2 Stunden bei 121 °C autoklaviert wurden. Die autoklavierten Lösungen werden dann mit je 16,7 ml Pilzlösung versetzt und werden separat in zwei Omnilab-Rüttler bei 25 °C (*P. ostreatus*) und 30 °C (*G. lucidum*) bei einer Schüttelfrequenz von 70 rpm (revolutions per minute) für 48 Stunden inkubiert. Nach Abschluss der Vorversuche wurden die Subkulturen bis zur Weiterverarbeitung unter gekühlten Bedingungen bei 4 ± 2 °C gelagert. Für die Hauptversuche wurden die Kulturen zunächst in frisches Nährmedium überführt, welches in gleicher Zusammensetzung wie das vorherige hergestellt wurde (15,9 g Kartoffel-Glucose-Medium in 600 ml destilliertem Wasser), wobei jeweils 20 ml des alten Mediums in das neue Medium überimpft wurden. Da jedoch trotz dieser Überführung optisch kein Wachstum der Pilze festgestellt werden konnte und somit davon auszugehen war, dass sich die Kulturen bereits in der Absterbephase befanden, wurden für die Hauptversuche schließlich neue Nährmedien angesetzt und neue Pilzkulturen etabliert. Zusätzlich wurden für die Hauptversuche eine größere Menge an Nährmedium benötigt, weshalb pro Erlenmeyerkolben 150 ml Nährlösung vorbereitet wurden. Insgesamt kamen erneut sechs Kolben zum Einsatz (je drei pro Pilzstamm). Hierfür wurden 24 g des Nährmediums in 900 ml destilliertem Wasser aufgekocht, bis alle Partikel vollständig gelöst waren. Anschließend erfolgte die Sterilisation der Medien durch Autoklavieren über zwei Stunden bei 121 °C. Nach dem Abkühlen wurden die neuen Medien jeweils mit 16,7 ml der Pilzlösung inokuliert. Die frisch angesetzten Pilzkulturen wurden abschließend mithilfe eines Omni-Lab-Rüttlers bei einer Schüttelfrequenz von 70 rpm inkubiert, wobei für *P. ostreatus* eine Temperatur von 25 °C und für *G. lucidum* eine Temperatur von 30 °C eingestellt wurde. Die Substrate, Substratzusätze und Pilze werden in jedem Versuch in 500 ml Kunststoffbehältern inkubiert. Um den Luftzyklus zu gewährleisten, wurden in die Kunststoffbehälter Löcher mit einem Durchmesser von 4 mm mittels Lötkolben präpariert, sodass die Pilze, je nach Art, genügend Sauerstoff bekommen und der Kohlenstoffdioxid abgeführt werden kann (vgl. Kapitel 2.2.2.1 und 2.2.2.2). Dies entspricht 4 Löchern bei den Kunststoffbehältern für die Substrate, welche mit *Pleurotus ostreatus* beimpft werden und 2 Löchern bei den Kunststoffbehältern für *Ganoderma lucidum*.

3.2.2 Einteilung Partikelgröße

Die Substrate wurden hinsichtlich ihrer Partikelgröße in drei Kategorien eingeteilt: fein (1-3 mm), mittel (4-10 mm) und grob (16-32 mm). Die Variation der Partikelgröße sowie der Substratarten erfolgt erst in den Hauptversuchen, in denen deren Effekt gezielt analysiert werden.

3.2.3 Durchführung Vorversuche

Um die optimale Mischung aus Substratzusatz zu bestimmen sowie die allgemeine Versuchsdurchführung zu erproben, wurden Vorversuche durchgeführt. Der Fokus dieser Vorversuche lag ausschließlich auf der Bestimmung der optimalen Zusammensetzung des Substratzusatzes, als Grundlage für die nachfolgenden Hauptversuche. Als zentrale Hauptfaktoren für die Gesamtfragestellung der Arbeit wurden die Substratart, die Partikelgröße des Substrats, die Zusammensetzung des Substratzusatzes sowie die Pilzart definiert. Um den Versuchsraum für die Vorversuche gezielt zu reduzieren, wurden Substratart und die Partikelgröße bewusst konstant gehalten. Die Substratart wurde auf Buchenholzspäne festgelegt und die Partikelgröße auf die mittlere Fraktion begrenzt. Dadurch wurden zwei Hauptfaktoren vollständig aus der Variabilität entfernt und kontrolliert fixiert. In den Vorversuchen wurde somit ausschließlich die Substratzusatz-Zusammensetzung als variable Größe untersucht. Diese gezielte Faktorreduktion führte zu einer deutlichen Verringerung der Versuchsanzahl und ermöglichte eine isolierte Betrachtung des Einflusses der Substratzusätze auf das Myzelwachstum.

Die Bestimmung der einzelnen Substratzusatz-Zusammensetzungen erfolgte auf Grundlage eines Design-of-Experiments-Ansatzes in Form eines teilfaktoriellen Mischungsdesigns. Ein vollfaktorielles Versuchsdesign wurde bewusst nicht gewählt, da es sich bei den Mischungsverhältnissen um kontinuierliche Variablen handelte und ein vollfaktorieller Ansatz theoretisch zu einer sehr großen, praktisch nicht realisierbaren Anzahl an Kombinationen geführt hätte. Ziel der Vorversuche war nicht die vollständige mathematische Modellierung aller Interaktionen, sondern die strukturierte und systematische Identifikation eines geeigneten Mischungsbereichs für die Hauptversuche.

Die Gesamtmenge des Substratzusatzes wurde konstant auf 20 % der Substratmasse festgelegt. Diese Gesamtmenge orientierte sich an Literaturwerten (Miśkiewicz et al., 2025) und wurde in allen Versuchen beibehalten, sodass ausschließlich das Verhältnis der einzelnen Komponenten variierte wurde. Als Ober- und Untergrenzen wurden für beide Komponenten Werte von 0 % bis 100 % definiert, wodurch der vollständige Mischungsraum zwischen Haferflocken und Weizenkleie abgedeckt wurde. Die Variation der Mischungsverhältnisse erfolgte in abgestuften Intervallen, um sowohl Extrempunkte als auch Übergangsbereiche systematisch zu erfassen (0 %, 25 %, 33 %, 50 %, 67 %, 75 %. 100 %) und ist in Tabelle 4 dargestellt. Diese Stufung ermöglicht die Identifikation nichtlinearer Effekte, potenzieller Mischungsoptima sowie synergistischer Effekte zwischen den Komponenten. Um die Varianz der Streuung der Ergebnisse herauszufinden,

wurden für jede Variante 2 Wiederholungen durchgeführt.

Tabelle 4: Zusammensetzungen der Substratzusätze

Substratgewicht = 20 g	**Anteil Haferflocken [%]**	**Anteil Weizenkleie [%]**	**Anteil Haferflocken [g]**	**Anteil Weizenkleie [g]**
Versuch 1	0	100	0	4
Versuch 2	25	75	1	3
Versuch 3	33	67	1,32	2,68
Versuch 4	50	50	2	2
Versuch 5	67	33	2,68	1,32
Versuch 6	75	25	3	1
Versuch 7	100	0	4	0

Das Substratgewicht wurde auf 20 g festgelegt. Die entsprechende Menge an Buchenholzspänen wurde zunächst abgewogen und in 500 ml Kunststoffbehälter überführt. In der Abbildung 15 im Anhang sind präparierte Behälter dargestellt. Da der Anteil des Substratzusatzes auf 20 % der Gesamtmasse vom Substrat festgelegt wurde, entsprach dies in den Vorversuchen einer absoluten Masse von 4 g Substratzusatz pro Ansatz. Aufgrund dessen, dass die Buchenholzspäne bereits in der geeigneten Partikelgröße vorlagen und die Weizenkleie in sehr feiner Partikelgröße gekauft wurden, mussten lediglich die Haferflocken zerkleinert werden. Diese erfolgte mithilfe eines Thermomix bei Stufe 5 für eine Dauer von 10 Sekunden. Die Behälter wurden nach dem Auffüllen der Substrate und Substratzusätze mit 10 ml destilliertem Wasser versetzt, um eine ausreichende Grundfeuchte von 50 % bis 75 % des Substrates sicherzustellen. Diese Richtwerte werden unter anderem in einer Studie von Bellettini et al., (2019) genannt. Danach erfolgte die Sterilisation der Behälter in den Autoklaven für 2 Stunden bei 121 °C. Anschließend wurden die sterilisierten Ansätze mit jeweils 2 ml der Pilzlösung inokuliert, was einer Inokulationsrate von 10 % entspricht. Diese Werte wurden aufgrund der Studie von Khorshed und Ahmed (2023) verwendet. Die Proben wurden anschließend bei 25 °C (für *Pleurotus ostreatus*) bzw. 30 °C (für *Ganoderma lucidum*) in einem Thermostatschrank inkubiert.

Zur Aufrechterhaltung einer konstanten Luftfeuchtigkeit zwischen 50 % und 70 % wurden zusätzlich Petrischalen mit destilliertem Wasser in den Klimaschrank gestellt. Die relative

Luftfeuchtigkeit wurde während der Inkubationszeit täglich mittels Hygrometer überprüft. Sollte die Feuchtigkeit unter 50 % sinken, so wurden weitere Petrischalen mit Wasser in den Klimaschrank gelegt, bis die Feuchte wieder zwischen 50 % und 70 % liegt. Die Proben wurden so lange in dem Brutschrank gelassen, bis eine gute optische Durchdringung vorhanden war und anschließend für 24 Stunden bei 85 °C in einem Trockenschrank wärmebehandelt. *Pleurotus ostreatus* benötigte eine längere Inkubationszeit und wurde erst nach 14 Tagen aus dem Brutschrank entnommen und ebenfalls wie *G. lucidum* für 24 Stunden bei 85 °C wärmebehandelt. Im Anschluss wurden die Proben aufgeschnitten, um die Durchdringung des Myzels optisch zu beurteilen. Auf Grundlage dieser Ergebnisse wurde die optimale Substrat-Zusammensetzung festgelegt und für die Hauptversuche verwendet.

3.2.4 Durchführung der Hauptversuche

Die Hauptversuche wurden als multifaktorielles Versuchsdesign mit diskreten Faktorstufen konzipiert, um den Einfluss zentraler Material- und Prozessparameter auf das Myzelwachstum, die Materialstruktur sowie die stoßdämpfenden Eigenschaften systematisch zu untersuchen. Hierzu wurde ein vollständig kombinierter faktorieller Versuchsplan gewählt, der die gleichzeitige Analyse mehrerer Einflussfaktoren und deren potenzieller Wechselwirkung ermöglicht. Ein Taguchi-Versuchsdesign wurde nicht angewendet, da der Fokus der Untersuchung nicht auf der Robustheitsoptimierung gegenüber Störgrößen, sondern auf der gezielten Analyse realer biologischer und materialphysikalischer Parameter lag.

Als wesentliche Einflussfaktoren wurden die Substratart (Buchenholzspäne, Hanfstroh und Weizenstroh), die Partikelgröße (fein, mittel und grob) sowie die Pilzart (*Ganoderma lucidum* und *Pleurotus ostreatus*) definiert. Die Zusammensetzung der Substratzusätze wurde als konstanter Parameter fixiert, da das Optimum bereits in den Vorversuchen bestimmt wurde. Aus der Kombination der Faktorstufen ergaben sich insgesamt 18 unterschiedliche Versuchsbedingungen, die jeweils in dreifacher Wiederholung durchgeführt wurden, sodass sich eine Gesamtzahl von 54 Proben ergab. Tabelle 5 fasst die zentralen Versuchsparameter und deren einzelnen Stufen übersichtlich zusammen.

Die Faktoren wurden in diskreten, kategorialen Stufen variiert, sodass ein klassisches faktorielles Versuchsdesign vorlag und keine kontinuierliche Parameteroptimierung im Sinne eines Response-Surface-Design erfolgte. Die statistische Auswertung der Ergebnisse erfolgte deskriptiv anhand von Mittelwerten und Standardabweichungen. Es wurde eine Intensitätsprüfung durchgeführt,

welche statistisch mit einer Varianzanalyse ausgewertet wurde (einfaktorielle ANOVA). Bei signifikanten Unterschieden zwischen den Mittelwerten wurde ein Post-hoc-Test nach Fisher L.S.D. (Least Significant Difference) durchgeführt (vgl. Kapitel 3.2.6 bis 3.2.8).

Tabelle 5: Faktordesign der Hauptversuche

Faktor	Stufe
Substratart	Buchenholzspäne, Weizenstroh, Hanfstroh
Partikelgröße	fein, mittel, grob
Pilzart	*Ganoderma lucidum, Pleurotus ostreatus*
Substratzusammensetzung	Konstant (optimale Mischung)
3 (Substrate) X 3 (Partikelgrößen) X 2 (Pilzarten) = 18 Faktorstufenkombinationen Jede Kombination wurde dreifach repliziert → **54 Versuchsansätze**	

Der Versuchsplan und die Zusammensetzung der einzelnen Proben in den Hauptversuchen sind in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6: Versuchsplan für die Hauptversuche

Partikelgröße	Substrat	Verwendeter Pilz
Fein	Buchenholzspäne	*p. ostreatus*
Fein	Buchenholzspäne	*g. lucidum*
Fein	Hanfstroh	*p. ostreatus*
Fein	Hanfstroh	*g. lucidum*
Fein	Weizenstroh	*p. ostreatus*
Fein	Weizenstroh	*g. lucidum*
Mittel	Buchenholzspäne	*p. ostreatus*
Mittel	Buchenholzspäne	*g. lucidum*
Mittel	Hanfstroh	*p. ostreatus*
Mittel	Hanfstroh	*g. lucidum*
Mittel	Weizenstroh	*p. ostreatus*
Mittel	Weizenstroh	*g. lucidum*
Grob	Buchenholzspäne	*p. ostreatus*

Grob	Buchenholzspäne	*g. lucidum*
Grob	Hanfstroh	*p. ostreatus*
Grob	Hanfstroh	*g. lucidum*
Grob	Weizenstroh	*p. ostreatus*
Grob	Weizenstroh	*g. lucidum*

Die Kultivierung der einzelnen Pilze erfolgte dabei analog zu den in den Vorversuchen angewendeten Methoden. Das grobe Stroh wurde mit Hilfe eines Thermomix auf Stufe 10 für 20 Sekunden auf die jeweiligen Feinheitsgrade geschreddert. Die Haferflocken wurden ebenfalls mit Hilfe des Thermomix zerkleinert, jedoch wurde hier nur Stufe 5 für 10 Sekunden benötigt. Anschließend wurden die Probenbehälter so aufgefüllt, dass etwa 70 % des Kunststoffbehälters befüllt waren, da davon auszugehen war, dass das entwickelte Myzel ebenfalls Platz braucht. Bei den Proben mit Weizenstroh und Hanfstroh wurden die Behälter nur zu 50 % befüllt, da davon ausgegangen wurde, dass das Stroh mit dem später zugesetzten Wasser aufquellen könnte. Die daraus resultierenden Gewichte sind in Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7: Substratgewicht

Art des Substrates	**Masse in g**	**Haferflocken in g**	**Weizenkleie in g**
BS fein	70	9,4	4,6
BS mittel	70	9,4	4,6
BS grob	72	9,6	4,8
HS fein	15	2	1
HS mittel	10	1,3	0,7
HS grob	8	1,1	0,5
WS fein	15	2	1
WS mittel	10	1,3	0,7
WS grob	8	1,1	0,5

Nachdem die Behälter mit den Substraten und Substratzusätzen befüllt waren, wurde zu jedem Behälter 30 ml destilliertes Wasser hinzugegeben, um, wie in den Vorversuchen, eine Feuchte zwischen 50 % und 75 % für die Pilze zu gewährleisten. Danach wurde alles mit einem Spatel gut

durchgemischt und für 2 Stunden bei 121 °C autoklaviert. Die sterilisierten Behälter mit Buchenholzspänen wurden anschließend mit 3,5 ml Pilzsuspension beimpft, was einer Inokulationsrate von 5 % entspricht. Die sterilisierten Behälter mit Hanfstroh und Weizenstroh wurden alle mit 1 ml beimpft, was Inokulationsraten von 6 % bis 13 % entspricht. Diese Werte wurden aufgrund der Studie von Khorshed und Ahmed (2023) ausgewählt, welche mit ähnlichen Inokulationsraten gearbeitet haben. Anschließend wurden die Proben in die jeweiligen Brutschränke gestellt. Einige Behälter wurden vorher mit Legosteinen präpariert, damit dort später die Sensoren des Drop-Testes für die Untersuchung der Polstereigenschaft eingesetzt werden können. Ein Beispiel-Bild ist im Anhang in der Abbildung 16 dargestellt. Die Legosteine wurden separat autoklaviert und bei dem Beimpfen der Pilzsuspension in den Behälter ebenfalls mit angebracht. Nach der Inkubationszeit wurden die Proben in einem Trockenschrank bei 85 °C für 24 Stunden Wärme behandelt, bis optische eine gute Durchdringung zu sehen war.

3.2.5 Durchführung Schockwellentest und Ermittlung der Polsterkennlinie

Zur Untersuchung der Stoßbelastung wurde ein Schockwellensensortest mithilfe eines Droptesters durchgeführt. Der verwendete Droptester wurde im Rahmen einer zuvor angefertigten Bachelorarbeit eigenständig konstruiert und gefertigt.

Das Prüfverfahren wurde gemäß dem Overboxing-Verfahren des ISTA-6-Amazon-Standards (ISTA = International Safe Transit Association) durchgeführt. Hierbei wurde die mechanische Belastbarkeit eines Produkts in der kleinstmöglichen Versandkonfiguration untersucht (beispielsweise für Flaschen, Kosmetika oder Kleingeräte). Ziel dieser Vorgehensweise war es, ein Worst-Case-Szenario abzubilden, da bei kleinen Versandverpackungen aufgrund des geringeren Deformationsraums und der reduzierten Energieabsorption höhere mechanische Belastungen auf das Produkt wirken (ISTA, 2018).

Die Vorbereitung der Testkonfiguration erfolgte standardisiert. Zunächst wurde das Testprodukt in die definierte Referenzecke der Overbox positioniert, wobei die empfindlichste Produktstelle gezielt in Richtung Referenzecke ausgerichtet wurde. Anschließend wurde das Produkt mit Klebeband fixiert. Ziel war es, eine bewegungsfreie Lagerung zu gewährleisten, sodass keine direkte Kraftübertragung durch Presspassung oder Materialvorspannung entsteht, sondern eine stoßentkoppelnde Lagerung im Karton realisiert wird. Der Versandkarton wurde anschließend normgerecht mit einem einzelnen Steifen Klebeband auf der Oberseite verschlossen. Die

Positionierung des Produktes sowie die Verschließung des Paketes ist in der Abbildung 17 im Anhang dargestellt.

Die Drop-Test-Durchführung erfolgte gemäß der standardisierten Fallsequenz des Overboxing Verfahrens. Dabei wurden insgesamt 8 definierte Fallereignisse durchgeführt, 7 bei einer Fallhöhe von 60 cm und 1 bei einer Fallhöhe von 1 m. Gemäß den Vorgaben sind für kleine Pakete Fallhöhen von 40 cm vorgesehen. Aufgrund der konstruktiven Auslegung des eingesetzten Droptesters ist jedoch eine minimale Fallhöhe von 60 cm gegeben. Aus diesem Grund wurde die Fallhöhe von 40 cm im Versuch nicht direkt umgesetzt. Es wird jedoch angenommen, dass ein Paket, welches einen Fall aus 60 cm Höhe unbeschädigt übersteht, auch bei einer geringeren Fallhöhe von 40 cm keine Schäden aufweisen würde.

Die Auswertung der Stoßereignisse erfolgte mithilfe eines ASPION G-Log Beschleunigungssensors, welcher innerhalb des Kunststoffbehälters, an dem vorher mit Lego präparierten Platzes positioniert wird. Der Sensor ist in der Lage, kurzzeitige Stoßbelastungen während des Aufpralls zu erfassen und aufzuzeichnen. Zur Detektion relevanter Stoßereignisse wurden im Vorfeld definierte Messparameter festgelegt. Hierzu zählen Schockschwellwerte von ± 2 g, eine Datenrate von 400 Hz sowie eine maximale Schockdauer von 40 ms. Diese Einstellungen gewährleisten eine ausreichend hohe zeitliche Auflösung zur Erfassung der beim Aufprall auftretenden kurzzeitigen Beschleunigungsspritzen. Die Durchführung der Droptests erfolgte entsprechend des Standards in mehreren Wiederholungen, um reproduzierbare Ergebnisse zu erzielen. Dabei wurde das Paket zunächst siebenmal aus einer Fallhöhe von 60 cm fallen gelassen. Anschließend erfolgte ein weiterer Drop aus einer Höhe von 1 m. Zum Abschluss wurde erneut ein Drop aus 60 cm Höhe durchgeführt. Durch diese Abfolge sollte überprüft werden, ob sich mögliche Vorschädigungen der Verpackung oder des Polstermaterials auf die gemessenen Stoßereignisse auswirken. Um die einzelnen Schockabsorptionen der einzelnen Substratvarianten vergleichen zu können, wurden von allen Schocks die Mittelwerte und die aus den einzelnen Werten resultierenden Standardabweichungen bestimmt.

Die im Schockwellentest gemessenen Beschleunigungsspitzen (g-Werte) stellen ein quantitatives Maß für die maximale Stoßintensität dar, die während eines Aufprallereignisses auf das Prüfsystem wirkt. Sie beschreiben, wie stark das Material das aufprallende Objekt innerhalb kürzester Zeit abbremst und in welchem Umfang die kinetische Energie des Stoßes entweder absorbiert oder direkt weitergeleitet wird. Niedrige g-Werte weisen dabei auf eine effektive Stoßdämpfung hin, die durch elastisch und viskoelastische Verformungsmechanismen, innere

Reibung sowie strukturelle Energieverteilung im Material ermöglicht wird, während hohe g-Werte eine geringe Energieabsorption und eine direkte Stoßübertragung anzeigen.
Die Messung erfolgt entlang dreier orthogonaler Raumachsen, wodurch das richtungsabhängige Dämpfungsverhalten der Materialien erfasst wird. Die X-Achse beschreibt die horizontale Beschleunigung in Längsrichtung des Sensors und erfasst Stoßbelastungen in einer seitlichen Raumrichtung. Die Y-Achse repräsentiert die horizontale Beschleunigung in Querrichtung und bildet Stoßkräfte aus der zweiten horizontalen Raumrichtung ab. Die Z-Achse misst die vertikale Beschleunigung und entspricht der Hauptstoßrichtung bei Fall- und Drop-Tests, da der Aufprall primär durch die Schwerkraft verursacht wird.
Durch die getrennte Erfassung der Beschleunigungen in X-, Y- und Z-Richtung wird eine dreidimensionale Analyse der Stoßübertragung ermöglicht, wodurch nicht nur die absolute Dämpfungsleistung, sondern auch die richtungsabhängige Energieabsorption der pilzmyzelbasierten Polstermaterialien quantitativ bewertet werden kann.

3.2.6 Sensorische Prüfverfahren

Es wurde ein sensorisches Profil speziell für die Durchdringung und Stabilität der einzelnen Proben nach DIN EN ISO 13299:2016-09 Absatz 3.2 erstellt. Dafür wurde zunächst eine einfach beschreibende Prüfung und anschließend eine Intensitätsprüfung durchgeführt, um genauere Unterschiede zwischen den einzelnen Proben herauszufinden.

3.2.6.1 Einfach beschreibende Prüfung

Zur gezielten Erfassung sensorischer Unterschiede zwischen den hergestellten myzelbasierten Dämmmaterialien wurde die einfach beschreibende Prüfung gemäß DIN 10964:2014-11 angewendet. Der Fokus der Untersuchung lag dabei auf den Merkmalen Aussehen und Textur. Nach jeder Variation der Partikelgröße sowie des eingesetzten Substrats wird für jede Pilzart eine einfach beschreibende Prüfung durchgeführt, um potenzielle optische und textuelle Veränderungen unter vergleichbaren Bedingungen systematisch zu dokumentieren. Das Prüfpanel soll aus fünf bis sechs Personen bestehen. Bei den Prüfpersonen handelt es sich um Studierende der Lebensmitteltechnologie, die aufgrund ihres Fachhintergrundes über entsprechende sensorische Erfahrung verfügen. Die Proben werden in Kunststoffbehältern präsentiert und mit zufällig generierten dreistelligen Codes versehen, um eine Beeinflussung durch bekannte

Produktinformationen auszuschließen. Die Prüfung erfolgte ausschließlich mündlich. Dabei beschreibt jede Person die Eigenschaften der Proben frei und in beliebiger Reihenfolge. Sämtliche genannten Beschreibungen werden vollständig protokolliert. Für die Auswertung werden alle erfassten Beschreibungen pro Produkt zusammengeführt. Begriffe mit identischer oder sehr ähnlicher Bedeutung werden zusammengefasst, sodass eine übersichtliche Charakterisierung der jeweiligen Varianten entsteht und Unterschiede zwischen den Produkten deutlich hervortreten.

3.2.6.2 Intensitätsprüfung

Alle Produkte wurden hinsichtlich ihrer Durchdringung und Myzelbildung auf einer 10-Punkte-Skala bewertet, wobei spezifische Endpunkte für die jeweilige Eigenschaft festgelegt wurden. Für die Durchdringung steht eine 10 für vollständige Durchdringung des Substrats durch das Myzel und eine 0 beschreibt keinerlei Durchdringung. Die Stabilität des Myzels wurde ebenfalls auf einer Skala von 0 (sehr geringe Stabilität) bis 10 (sehr hohe Stabilität) erfasst.
Die Ergebnisse der einzelnen Merkmalseigenschaften entstehen durch die Mittelwertsbildung der einzelnen Bewertungen der Prüfpersonen. Die verwendeten Prüfbogen sind im Anhang (Abbildung 13 und 14) zu finden.
Die Ergebnisse der einfach beschreibenden Prüfung und der Intensitätsprüfung wurden statistisch mittels Varianzanalyse ausgewertet.

3.2.7 Varianzanalyse (ANOVA)

Die Varianzanalyse (ANOVA: Analysis of Variance) stellt ein statistisches Verfahren dar, das zur Prüfung eingesetzt wird, ob sich die Mittelwerte von mehr als zwei Gruppen signifikant voneinander unterscheiden. Ziel der ANOVA ist es, festzustellen, ob beobachtete Unterschiede zwischen Gruppen systematisch auf einen untersuchten Einflussfaktor zurückzuführen sind oder lediglich zufallsbedingt auftreten.
Grundlage der Varianzanalyse ist die Zerlegung der Gesamtvarianz aller erhobenen Messwerte in zwei Komponenten: die systematische Varianz (auch Effektvarianz genannt), welche durch den Einfluss des untersuchten Faktors erklärt wird, sowie die unsystematische Varianz (Residual- bzw. Fehlervarianz), die auf zufällige Störeinflüsse zurückzuführen ist. Der Vergleich dieser beiden Varianzanteile erfolgt mithilfe des sogenannten F-Wertes, der als Quotient aus der Varianz

zwischen den Gruppen und der Varianz innerhalb der Gruppen berechnet wird.
Ein F-Wert nahe 1 deutet darauf hin, dass die Unterschiede zwischen den Gruppen nicht größer sind als die zufälligen Schwankungen innerhalb der Gruppen. Demgegenüber spricht ein hoher F-Wert für einen ausgeprägten Effekt des untersuchten Faktors (Rasch et a., 2021).
Die Beurteilung der statistischen Signifikanz erfolgt entweder durch den Vergleich des empirisch ermittelten F-Wertes mit einem theoretischen kritischen Tabellenwert oder alternativ über den zugehörigen p-Wert. Beide Vorgehensweisen führen zur gleichen Entscheidungsgrundlage. Liegt der p-Wert unter dem festgelegten Signifikanzniveau oder überschreitet der empirische F-Wert den theoretischen Grenzwert, wird die Nullhypothese verworfen (Rasch et al, 2021; Backhaus et al., 2018). Der p-Wert basiert dabei auf der F-Verteilung und gibt die Wahrscheinlichkeit an, unter Gültigkeit der Nullhypothese einen gleich großen oder größeren F-Wert zu beobachten. Je kleiner der p-Wert ausfällt, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit, dass die festgestellten Gruppenunterschiede zufällig entstanden sind (Backhaus et al., 2018).
Ein signifikantes ANOVA-Ergebnis liefert jedoch keine Information darüber, zwischen welchen konkreten Gruppen die Unterschiede bestehen. Zur Identifikation dieser Unterschiede werden sogenannte Post-hoc-Tests eingesetzt, wie beispielsweise der Tukey-HSD-Test oder der Fisher-LSD-Test (Rasch et al., 2021). Die statistische Auswertung im Rahmen dieser Arbeit wurde mit der Software XLSTAT durchgeführt.

3.2.8 Post-hoc-Test

Ergibt die Varianzanalyse (ANOVA) ein signifikantes Ergebnis, kann zunächst lediglich festgestellt werde, dass sich mindestens zwei Gruppenmittelwerte voneinander unterscheiden. Welche Gruppen konkret signifikante Unterschiede aufweise, lässt sich darauf jedoch noch nicht ableiten. Zur Identifikation dieser Unterschiede werden sogenannte Post-hoc-Verfahren eingesetzt. Diese berücksichtigen, dass die Alternativhypothese mehrere mögliche Gruppenunterschiede umfasst, und ermöglichen gezielte paarweise Vergleiche zwischen den einzelnen Gruppen (Rasch et al, 2021).
Ein häufig verwendetes Post-hoc-Verfahren ist das Fisher-Verfahren der geringsten signifikanten Differenz (Least Significant Difference, LSD). Dieses Verfahren erfolgt zweistufig und dient dem paarweisen Vergleich der Mittelwerte mehrerer Gruppen. Zunächst wird ein globaler Gesamttest durchgeführt, mit dem überprüft wird, ob die Mittelwerte aller untersuchten Gruppen gleich sind.

Wird diese Nullhypothese auf dem festgelegten Signifikanzniveau verworfen, folgt im zweiten Schritt der paarweise Vergleich aller Gruppenmittelwerte auf demselben Signifikanzniveau. Auf diese Weise kann bestimmt werden, zwischen welchen Gruppen statistisch signifikante Unterschiede bestehen (Meier, 2006).

4 Ergebnisse

4.1 Vorversuche

In den Vorversuchen wurde getestet, welche Substratzusatz-Mischung die beste Auswirkung auf das Myzelwachstum der Pilze hat. Dabei wurde deutlich, dass beide Pilzarten ähnliche Ergebnisse aufwiesen. Die durchgeführten Untersuchungen zeigten deutliche Unterschiede zwischen den Proben ohne Substratzusatz und den Proben, denen Substratzusätze beigemischt wurden (siehe Abbildung 3). Während die Nullprobe kaum Anzeichen einer Myzelbildung aufwies, konnte bei den Proben mit zugesetzten Substraten eine klare Myzelentwicklung beobachtet werden. Grundsätzlich ließ sich feststellen, dass mit steigendem Anteil an Haferflocken das Endprodukt nach der Trocknung zunehmend fester wurde. Allerdings zeigte sich bei einem Anteil von 100 % Haferflocken, dass das Myzel das Substrat nicht vollständig durchwachsen konnte.
Im Gegensatz dazu führte ein höherer Anteil an Weizenkleie zu einer verbesserten Durchwachsung des Substrats, allerdings zeigte sich auch, dass die Proben mit steigendem Weizenkleieanteil zunehmend brüchiger wurden. Bei einem Anteil von 100 % Weizenkleie war das Myzel zwar stark durchwachsen, jedoch so porös, dass die strukturelle Festigkeit deutlich abnahm.

Abbildung 3: Vergleich Nullprobe [links] und Probe mit Substratzusatz (67 % Haferflocken und 33 % Weizenkleie) [rechts]

Die beste Kombination aus Myzeldurchwachsung und mechanischer Festigkeit konnte bei einem Mischverhältnis von 67 % Haferflocken und 33 % Weizenkleie beobachtet werden. Das Substrat war gut durchwachsen und fest genug, um eine stabile Substratstruktur zu bieten.
Es zeigten sich jedoch Unterschiede in der Dauer der Durchwachsung des Myzels durch das Substrat. *Ganoderma lucidum* benötigte fünf Tage, um das Substrat vollständig zu durchwachsen. Im Vergleich dazu zeigte *Pleurotus ostreatus* ein deutlich langsameres Wachstum (14 Tage). Zudem war die Myzelstruktur von *P. ostreatus* weniger dicht ausgeprägt als jene von *G. lucidum* (siehe Abbildung 4).

Abbildung 4: Vergleich der Durchwachsung des Myzels durch das Substrat (links = *G. lucidum*; rechts = *P. ostreatus*)

4.2 Hauptversuche

4.2.1 Inkubationszeit

Im Rahmen der Untersuchung zeigten die beiden untersuchten Pilzarten deutliche Unterschiede in ihrem Wachstumsverhalten und ihrer Myzelentwicklung.
Bei *Ganoderma lucidum* war bereits nach vier Tagen eine ausgeprägte, optisch deutlich erkennbare Myzelentwicklung zu beobachten. Nach insgesamt elf Tagen war das Substrat nahezu vollständig durchwachsen.
Im Gegensatz dazu verlief die Myzelentwicklung bei *Pleurotus ostreatus* deutlich langsamer und

uneinheitlicher. Nach vier Tagen war bei einigen Proben lediglich eine schwache Myzelbildung erkennbar. Nach elf Tagen zeigte sich eine geringe Steigerung des Wachstums, ohne dass es zu einer signifikanten Durchdringung der Substrate kam. Der Versuch mit *Pleurotus ostreatus* wurde nach 18 Tagen abgebrochen, da ab diesem Zeitpunkt kein weiteres Wachstum mehr festzustellen war. Insgesamt zeigten die Proben mit *Pleurotus ostreatus* eine hohe Variabilität. Während einige Substrate gut mit Myzel bedeckt waren, wiesen andere nur eine sehr geringe Besiedlung auf oder zeigten keinerlei sichtbares Wachstum.

Die im Folgenden dargestellten Abbildungen (5, 6, 7 und 8) diesen als exemplarische Beispiele für die beobachteten Ergebnisse. Für *Ganoderma lucidum* werden Proben auf Buchenholzspänen mittlerer Partikelgröße sowie auf Hanfstroh grober Partikelgröße gezeigt. Für *Pleurotus ostreatus* sind beispielhaft Proben auf Buchenholzspänen mittlerer Partikelgröße und auf Hanfstroh mittlerer Partikelgröße dargestellt.

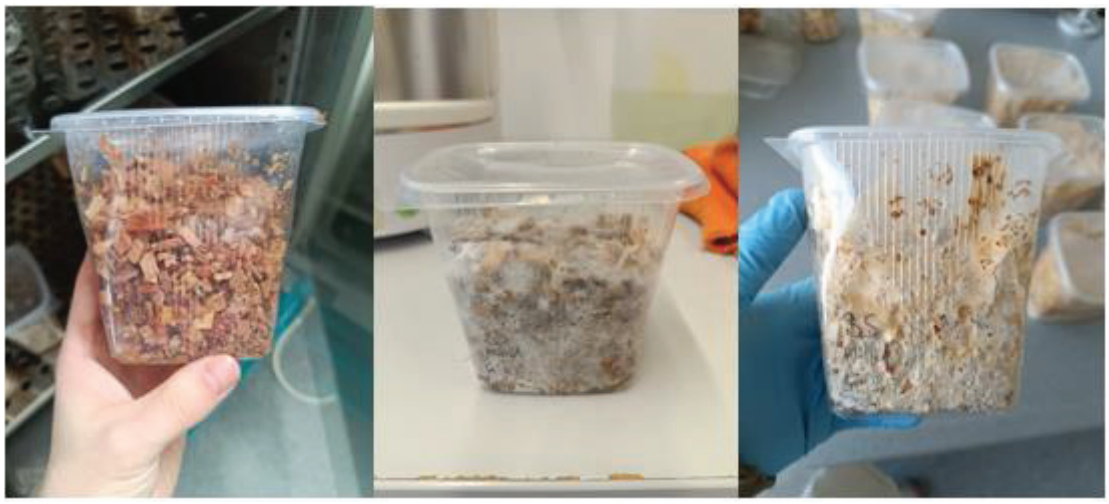

Abbildung 5: Entwicklung des Myzels bei Buchenholzspäne mittlerer Partikelgröße mit *Ganoderma lucidum*. v.l.: Tag 0, Tag 4, Tag 11

Abbildung 6: Entwicklung des Myzels bei Buchenholzspäne mittlerer Partikelgröße mit *Pleurotus ostreatus*. v.l.: Tag 0, Tag 4, Tag 18

Abbildung 7: Entwicklung des Myzels bei Hanfstroh grober Partikelgröße mit *Ganoderma lucidum*. v.l.: Tag 0, Tag 4, Tag 11

Abbildung 8: Entwicklung des Myzels bei Hanfstroh mittlerer Partikelgröße mit *Pleurotus ostreatus*. v.l.: Tag 0, Tag 4, Tag 18

4.2.2 Einfluss Substratart auf Myzeldurchdringung und Myzelstabilität

In der Tabelle 8 sind die Ergebnisse der einfach beschreibenden Prüfung sowie der Intensitätsprüfung der Substrate, welche mit *P. ostreatus* und *G. lucidum* beimpft wurden, dargestellt.

Tabelle 8: Ergebnisse einfach beschreibende Prüfung und Intensitätsprüfung von Myzel basierten Verpackungen. BS = Buchenholzspäne; HS = Hanfstroh; WS = Weizenstroh

Pilzart	**Partikelgröße**	**Beschreibung der Durchdringung**	**Intensität-punkte (Stabilität/Durchdringung)**
P. ostreatus	BS grob	lose Buchenholzspäne, an einigen Stellen Myzelbildung aber keine stabile Myzelbildung	0; 1
	BS mittel	keine Myzelbildung, dadurch keine Stabilität	0; 0
	BS fein	grobe Durchdringung des Substrates; keine Stabilität	0; 3
	HS grob	mittlere Durchdringung des Myzels; geringe Stabilität aufgrund einzelner Strohhalme	2; 5

	HS mittel	gute Durchdringung und bessere Stabilität als grob, jedoch fehlende „Zähigkeit“; vor allem an den Rändern gute Stabilität	4; 7
	HS fein	fast Komplette Durchdringung und gute Stabilität; gute Zähigkeit; die einzelnen Strohhalme werden gut zusammengehalten; einzeln nur obere Durchdringung, dennoch mit gleicher Stabilität	8; 8
	WS grob	Minimale Durchdringung, lose einzelne Strohhalme welche nicht zusammengehalten werden; 2 Proben mit mehr Durchdringung jedoch ebenfalls keine Stabilität	0; 2
	WS mittel	grobe Myzeldurchdringung; Großteil der Strohhalme werden zusammengehalten, jedoch geringe bis keine Stabilität; sehr zerbrechliches Myzel	2; 7
	WS fein	geringfügige Durchdringung des Myzels; geringe Stabilität; feine Strohhalme werden zusammengehalten aber bei geringster mechanischer Einwirkung sofortiges auseinanderbrechen	1; 4
G. lucidum	BS grob	gute Durchdringung der Buchenholzspäne, jedoch teilweise noch einzelne Späne die nicht durchwachsen wurden; stabiles Myzel welches wie eine „Haut“ zwischen den Spänen ist; festes Polstermaterial (eventuell etwas zu hart)	4; 8
	BS mittel	viele einzelne Späne die rausfallen; obere Hälfte gute Durchdringung und gutes Myzelgeflecht; festes Polstermaterial	2; 6

	BS fein	grobe Durchdringung, jedoch viele lose einzelne Späne; eher weiches Polstermaterial, oftmals nur äußeres Myzel; keine Stabilität	0; 2
	HS grob	gute Durchdringung; stabiles und einheitliches Myzelgeflecht; Zwischending zwischen weich und fest	8; 9
	HS mittel	stabiles Gesamtgeflecht; weiches Polstermaterial mit guter Durchwachsung; keine einzelnen Halme; „zähes“ Produkt beim auseinander reißen → guter „Zusammenhalt“ zwischen den Halmen	9; 10
	HS fein	ähnlich wie „mittel“, jedoch nicht so „zäh“; nicht komplette Durchdringung jedoch trotzdem sehr „stabil“	8: 10
	WS grob	komplett lose Strohhalme; keine Myzeldurchdringung nur an einzelnen Stellen ein kleines Myzelgeflecht; einzelne Proben mit mehr Myzelbildung jedoch gleiches outcome	1; 5
	WS mittel	keine Myzelbildung; loses Stroh	0: 0
	WS fein	geringe Myzeldurchdringung; weiches Polstermaterial; grobe Stabilität mit einzelnen losen Strohhalmen; leicht „zäh“; loses Stroh mit geringer Myzeldurchdringung; keine Zähigkeit beim auseinander reißen → keine Eignung als Polstermaterial	4; 6

Bei der Verwendung von Buchenholzspänen zeigte *P. ostreatus* insgesamt eine geringe Eignung. Grobe Buchenholzspäne wiesen lediglich punktuelle Myzelbildung auf, ohne dass ein zusammenhängendes oder stabiles Myzelgeflecht entstehen konnte. Auch bei der mittleren Partikelgröße wurde keine Myzelbildung beobachtet, sodass ebenfalls keine stabilen Proben

festgestellt werden konnten. Feine Buchenholzspäne zeigten zwar eine grobe Durchdringung des Substrates, jedoch ohne Ausbildung einer tragfähigen Struktur, sodass keine ausreichende Stabilität erreicht wurde. Deutlich besser Ergebnisse wurden bei Hanfstroh erzielt. Grobes Hanfstroh zeigte eine mittlere Myzeldurchdringung, wobei die Stabilität durch einzelne nicht eingebundene Strohhalme eingeschränkt blieb. Bei mittlerer Partikelgröße konnte eine gute Durchwachsung sowie eine verbesserte Stabilität festgestellt werden, insbesondere in den Randbereichen der Proben, auch wenn die charakteristische Zähigkeit des Materials fehlte. Die besten Resultate wurden mit feinem Hanfstroh erzielt. Hier kam es zu einer nahezu vollständigen Myzeldurchdringung und einer guten strukturellen Stabilität. Das Myzel hielt die einzelnen Strohhalme zusammen und zeigte eine ausgeprägte Zähigkeit.
Weizenstroh erwies sich hingegen als wenig geeignetes Substrat für *P. ostreatus*. Grobes Weizenstroh zeigte nur eine minimale Myzeldurchdringung, wobei die Strohhalme weitgehend lose blieben und keine Stabilität ausgebildet wurde. Bei mittlerer Partikelgröße war zwar eine grobe Durchdringung erkennbar und ein Teil der Halme wurde zusammengehalten, das Myzel erwies sich jedoch als sehr spröde und mechanisch instabil. Feines Weizenstroh zeigte lediglich eine geringfügige Myzelbildung mit entsprechend niedriger Stabilität. Bereits geringe mechanische Belastungen führten zum sofortigen Auseinanderbrechen des Materials.

Die Ergebnisse mit den Substraten, welche mit *G. lucidum* beimpft wurden, zeigten deutliche Unterschiede in Abhängigkeit vom eingesetzten Ausgangsmaterial und der Partikelgröße. Buchenholzspäne erwiesen sich insgesamt als gut geeignetes Substrat. Insbesondere bei mittlerer Partikelgröße wurde eine starke und gleichmäßige Myzeldurchdringung beobachtet, die zu einem stabilen, festen Polstermaterial führte. Grobe Buchenholzspäne zeigten ebenfalls eine gute Durchwachsung, wiesen jedoch teilweise noch nicht vollständig besiedelte Einzelspäne auf. Feine Späne hingegen führten zu einer unzureichenden inneren Durchdringung, wobei das Myzel überwiegend nur oberflächlich ausgebildet war und das Material insgesamt weniger stabil erschien.
Hanfstroh zeigte insgesamt sehr vielversprechende Ergebnisse. Vor allem die mittlere Partikelgröße führte zu einem homogenen und stabilen Myzelgeflecht mit guter Durchwachsung und hoher Kohäsion zwischen den Halmen. Das entstandene Polstermaterial war weich, zugleich jedoch zäh und zeigte einen guten inneren Zusammenhalt. Auch grobes Hanfstroh wies eine überwiegend gute Durchdringung auf, wobei vereinzelt nicht durchwachsene Halme beobachtet wurden. Feines Hanfstroh zeigte ebenfalls gute Ergebnisse, allerdings mit etwas geringerer

Zähigkeit und teilweise unvollständiger Durchdringung.

Im Gegensatz dazu erwies sich Weizenstroh als wenig geeignetes Substrat für *G. lucidum*. Unabhängig von der Partikelgröße war die Myzeldurchdringung gering bis nicht vorhanden. Grobes und mittleres Weizenstroh blieb größtenteils lose und zeigte kaum strukturbildendes Myzelwachstum. Auch bei feiner Partikelgröße konnte nur eine geringe Durchdringung erreicht werden, wodurch das Material nur eine geringe Stabilität aufwies und sich insgesamt als ungeeignet für die Herstellung von Polstermaterial erwies.

Abbildung 9 veranschaulicht den Grad der Durchdringung der einzelnen Substrate, welche mit *G. lucidum* kultiviert wurden, durch das Myzel (Y-Achse) sowie die mechanische Stabilität der Proben bei mechanischer Beanspruchung durch Auseinanderziehen (X-Achse).

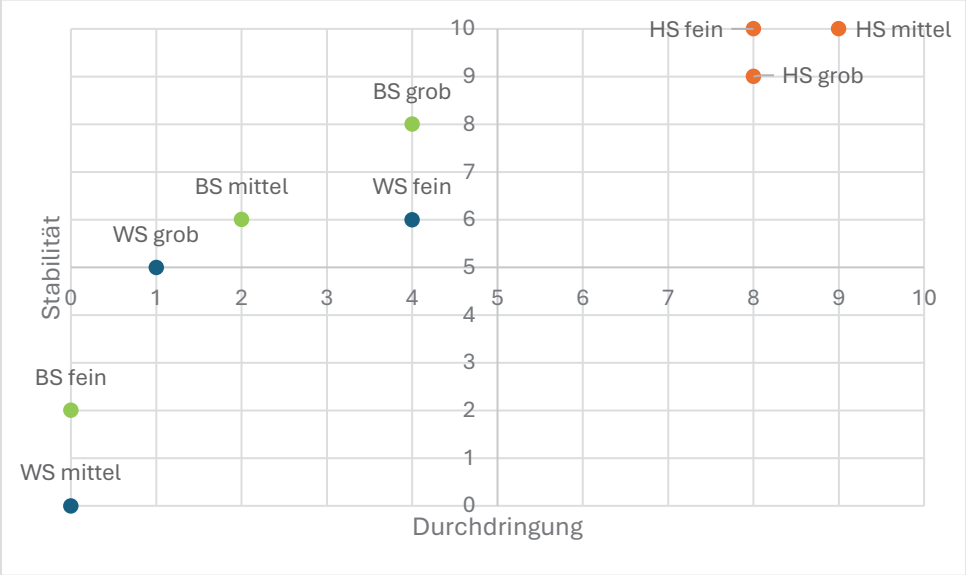

Abbildung 9: Durchdringung und Stabilität der Substrate, welche mit *G. lucidum* kultiviert wurden (BS = Buchenholzspäne; HS = Hanfstroh; WS = Weizenstroh)

Der Durchdringungsgrad wurde von 6 Teilnehmenden, auf einer Skala von 0 bis 10 bewertet, wobei 10 eine vollständige Durchdringung des Substrats und 0 keinerlei Durchdringung beschreibt. Die Stabilität des Myzels wurde ebenfalls auf einer Skala von 0 (sehr geringe Stabilität) bis 10 (sehr hohe Stabilität) erfasst. Die Rohdaten der einzelnen Prüfpersonen sind im Anhang in Tabelle 17 dargestellt.

Aus der Abbildung geht hervor, dass Weizenstroh mit mittlerer Partikelgröße sowie Buchenholzspäne mit feiner Partikelgröße die geringste Myzeldurchdringung aufweisen (0 bzw. 2 Punkte). Grobes Weizenstroh erreicht einen Wert von 5 Punkten, was einer mittleren

Durchdringung entspricht. Sowohl Buchenholzspäne mittlerer Partikelgröße als auch Weizenstroh mit feiner Partikelgröße zeigen mit jeweils 6 Punkten eine leicht erhöhte Durchdringung. Eine deutlich bessere Myzelentwicklung ist bei groben Buchenholzspäne (8 Punkte) sowie grobem Hanfstroh (9 Punkte) zu beobachten. Die höchste Myzeldurchdringung weisen Hanfstrohproben der feinen und mittleren Partikelgröße auf, die jeweils mit 10 Punkten bewerten wurden.

Weizenstroh mittlerer Partikelgröße sowie Buchenholzspäne mit feiner Partikelgröße weisen mit jeweils 0 Punkten die geringste bzw. gar keine mechanische Stabilität auf. Eine leicht erhöhte Stabilität zeigen grobes Weizenstroh (1 Punkt) und Buchenholzspäne mittlerer Partikelgröße (2 Punkte). Eine mittlere Stabilität, die mit einer leichten „Zähigkeit“ der Proben einhergeht, ist bei fein zerkleinertem Weizenstroh sowie bei groben Buchenholzspänen zu beobachte. Beide Substrate erreichen hierbei einen Wert von 4 Punkten. Eine sehr hohe Stabilität weisen grobes und feines Hanfstroh mit jeweils 8 Punkten auf. Die höchste mechanische Stabilität zeigt Hanfstroh mittlerer Partikelgröße, welches den maximalen Punktwert erreicht.

Die Standardabweichungen der mit *Ganoderma lucidum* kultivierten Proben zeigen insgesamt eine überwiegend geringe Streuung der Bewertungen. Bei den Hanfstroh-Substraten liegen die Standardabweichungen sowohl für die mechanische Stabilität als auch für die Myzeldurchdringung überwiegend im niedrigen Bereich. Besonders auffällig ist hierbei, dass bei der Myzeldurchdringung von Hanfstroh mittlerer und feiner Partikelgröße keine Streuung vorliegt (Standardabweichung = 0,00). Auch bei der mechanischen Stabilität dieser Substrate zeigen sich nur geringe Abweichungen zwischen den Bewertungen der Prüfpersonen.

Bei den Buchenholzspänen treten ebenfalls überwiegend niedrige Standardabweichungen auf. Feine Buchenholzspäne weisen sowohl bei der Stabilität als auch bei der Durchdringung keine Streuung auf. Bei groben und mittleren Buchenholzspänen sind geringe bis mittlere Standardabweichungen erkennbar, wodurch leichte Unterschiede in den Einzelbewertungen sichtbar werden.

Im Bereich der Weizenstrohproben zeigen sich höhere Standardabweichungen. Insbesondere bei grober und feiner Partikelgröße treten erhöhte Streuungswerte auf, während bei mittlerer Partikelgröße keine Streuung vorliegt. Insgesamt weisen die Weizenstrohproben eine größere Variabilität der Bewertungen im Vergleich zu Hanfstroh- und Buchenholzspänen auf.

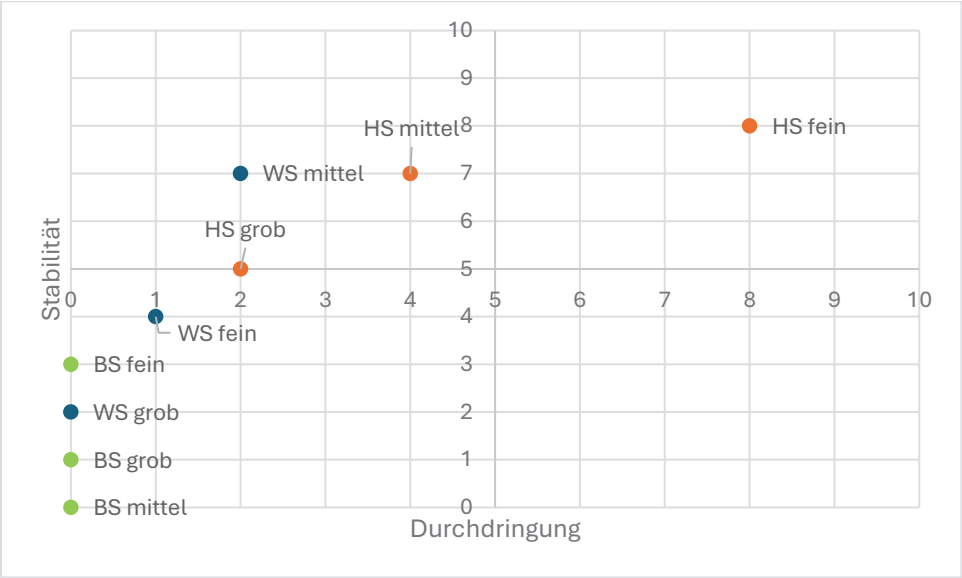

Abbildung 10: Durchdringung und Stabilität der Substrate, welche mit *P. ostreatus* kultiviert wurden (BS = Buchenholzspäne; HS = Hanfstroh; WS = Weizenstroh)

Abbildung 10 veranschaulicht den Grad der Durchdringung der einzelnen Substrate, welche mit *P. ostreatus* kultiviert wurden, durch das Myzel (Y-Achse) sowie die mechanische Stabilität der Proben bei mechanischer Beanspruch durch Auseinanderziehen (X-Achse). Die Rohdaten der einzelnen Prüfpersonen sind im Anhang in der Tabelle 16 dargestellt.

Die mechanische Stabilität der mit *Pleurotus ostreatus* beimpften Proben unterscheidet sich deutlich in Abhängigkeit vom verwendeten Substrat und dessen Partikelgröße. Die Buchenholzspäne weisen insgesamt eine sehr geringe strukturelle Festigkeit auf. Sowohl grobe, mittlere als auch feine Buchenholzspäne erreichen jeweils 0 Punkte und zeigen damit keine nennenswerte Stabilität bei mechanischer Beanspruchung. Dies deutet auf eine nur schwach ausgeprägte verbindende Myzelstruktur innerhalb dieses Substrats hin.

Auch bei den Weizenstrohproben ist überwiegend eine geringe mechanische Stabilität zu beobachten. Grobes Weizenstroh erreicht ebenfalls 0 Punkte, während fein zerkleinertes Weizenstroh mit 1 Punkt lediglich eine geringfügig erhöhte Stabilität aufweist. Eine etwas höhere mechanische Festigkeit zeigt Weizenstroh mittlerer Partikelgröße, welches mit 2 Punkten bewertet wurde. Insgesamt bleibt die Stabilität der Weizenstrohproben jedoch auf einem niedrigen Niveau.

Im Vergleich dazu zeigen die Hanfstrohproben deutlich höhere Stabilitätswerte. Grobes Hanfstroh erreicht 2 Punkte und weist damit eine leichte strukturelle Festigkeit auf. Hanfstroh mit mittlerer Partikelgröße zeigt mit 4 Punkten eine durchschnittliche mechanische Stabilität. Die höchste

Stabilität wird bei fein zerkleinertem Hanfstroh beobachtet, das mit 8 Punkten bewertet wurde und eine ausgeprägte, zähe Struktur aufweist.

Auch hinsichtlich der Myzeldurchdringung zeigen die mit *Pleurotus ostreatus* beimpften Proben deutlich Unterschiede zwischen den Substraten. Die Buchenholzspäne weisen insgesamt eine geringe Durchdringung durch das Myzel auf. Grobe Buchenholzspäne erreichen lediglich 1 Punkt, während mittlere Buchenholzspäne mit 0 Punkten keinerlei Durchdringung zeigen. Feine Buchenholzspäne weise mit 3 Punkten eine leicht verbesserte, jedoch weiterhin geringe Myzeldurchdringung auf.

Die Weizenstrohproben zeigen insgesamt höhere Durchdringungswerte. Grobes Weizenstroh erreicht 2 Punkte und weist damit eine geringe Myzelentwicklung auf. Eine deutlich bessere Durchdringung zeigt Weizenstroh mittlerer Partikelgröße mit 7 Punkten, während fein zerkleinertes Weizenstroh mit 4 Punkten eine mittlere Myzeldurchdringung aufweist.

Die höchsten Durchdringungswerte werden erneut bei den Hanfstrohproben erreicht. Grobes Hanfstroh erreicht 5 Punkten und zeigt eine gute Myzelentwicklung. Hanfstroh mittlerer Partikelgröße weist mit 7 Punkten eine sehr gute Durchdringung auf. Die stärkste Myzeldurchdringung wird bei fein zerkleinertem Hanfstroh beobachtet, welches mit 8 Punkten bewertet wurde.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass Proben mit *P. ostreatus* keine oder nur geringe Stabilitäten entwickelt haben. Bei beiden Ergebnissen lieferte Hanfstroh mittlerer Partikelgröße zufriedenstellende Ergebnisse ab.

Die Standardabweichungen der mit *Pleurotus ostreatus* kultivierten Proben zeigen insgesamt eine größere Heterogenität der Streuungswerte. Bei den Buchenholzspänen liegt bei der mechanischen Stabilität über alle Partikelgrößen hinweg keine Streuung vor (Standardabweichung = 0,00). Auch bei der Myzeldurchdringung treten teilweise sehr geringe Standardabweichungen auf, insbesondere bei mittlerer Partikelgröße.

Die Hanfstrohproben weisen überwiegend niedrige bis moderate Standardabweichungen sowohl bei der Stabilität als auch bei der Durchdringung auf. Die Streuungswerte liegen hier im Bereich geringer Abweichungen, mit einzelnen Abweichungen bei grober und feiner Partikelgröße.

Bei den Weizenstrohproben zeigen sich im Vergleich dazu höhere Standardabweichungen, insbesondere im Bereich der Myzeldurchdringung. Auch bei mechanischer Stabilität treten moderate Streuungen auf, während gleichzeitig einzelne Substrate geringe oder keine Varianz aufweisen.

4.2.3 Varianzanalyse

Zur statistischen Absicherung der Unterschiede zwischen den Proben wurde eine einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) eingesetzt. Dabei wurde untersucht, ob sich die Mittelwerte der sensorischen Merkmale signifikant voneinander unterscheiden. Die Ergebnisse sind in den Tabellen 9 und 10 dargestellt.

Tabelle 9: Ergebnisse der einfaktoriellen ANOVA zum Einfluss des Feinheitsgrades auf die Stabilität

Pilz	Substrat	p-Wert	Signifikanzniveau
G. lucidum	Weizenstroh	<0,0001	***
	Buchenholzspäne	<0,0001	***
	Hanfstroh	0,080	.
P. ostreatus	Weizenstroh	0,000	***
	Buchenholzspäne	Nicht auswertbar	
	Hanfstroh	<0,0001	***

Tabelle 10: Ergebnisse der einfaktoriellen ANOVA zum Einfluss des Feinheitsgrades auf die Durchdringung

Pilz	Substrat	p-Wert	Signifikanzniveau
G. lucidum	Weizenstroh	<0,0001	***
	Buchenholzspäne	<0,0001	***
	Hanfstroh	0,022	*
P. ostreatus	Weizenstroh	<0,0001	***
	Buchenholzspäne	0,000	***
	Hanfstroh	0,001	***

Die einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) zeigt überwiegend signifikante Unterschiede zwischen den Feinheitsgraden der Substrate in Bezug auf die Attribute Stabilität und Durchdringung. In den meisten Kombinationen aus Pilzart und Substrat treten hochsignifikante Effekte ($p < 0,001$) auf, insbesondere bei Weizenstroh und Buchenholzspänen. Der Einfluss des Feinheitsgrades ist dabei sowohl bei *G. lucidum* als auch bei *P. ostreatus* deutlich erkennbar.

Auffällig ist, dass Hanfstroh im Vergleich zu den anderen Substraten teilweise geringere oder keine Signifikanzniveaus aufweist, insbesondere beim Attribut Stabilität, während beim Attribut Durchdringung auch hier signifikante Unterschiede festgestellt werden konnten. Das Attribut „Stabilität“ von *Pleurotus ostreatus* auf Buchenholzspäne wurde durchgehend mit 0 bewertet, sodass aufgrund der fehlenden Varianz keine ANOVA durchgeführt werden konnte.

Um die in der Varianzanalyse festgestellten Unterschiede präzise zuzuordnen, wurde anschließend ein Post-hoc-Test nach Fisher durchgeführt. Die Ergebnisse dieses Post-hoc Testes sind in dem Tabellen 11 und 12 dargestellt.

Tabelle 11: Mittelwerte und Gruppeneinteilung aus dem Post-hoc-Tests nach Fisher für signifikant unterschiedliche Proben bei dem Attribut Stabilität

Pilzart	**Substratart**	**Fein (Gruppe)**	**Mittel (Gruppe)**	**Grob (Gruppe)**
G. lucidum	Weizenstroh	4,0 (A)	0,0 (B)	1,0 (B)
	Buchenholzspäne	0,0 (C)	2,0 (B)	4,0 (A)
	Hanfstroh	-	-	-
P. ostreatus	Weizenstroh	1,0 (B)	2,0 (A)	0,0 (C)
	Buchenholzspäne	Nicht auswertbar		
	Hanfstroh	8,0 (A)	4,0 (B)	2,0 (C)

Tabelle 12: Mittelwerte und Gruppeneinteilung aus dem Post-hoc-Tests nach Fisher für signifikant unterschiedliche Proben bei dem Attribut Durchdringung

Pilzart	**Substratart**	**Fein (Gruppe)**	**Mittel (Gruppe)**	**Grob (Gruppe)**
G. lucidum	Weizenstroh	6,0 (A)	0,0 (B)	5,0 (A)
	Buchenholzspäne	2,0 (C)	6,0 (B)	8,0 (A)
	Hanfstroh	10,0 (A)	10,0 (A)	9,0 (B)
P. ostreatus	Weizenstroh	4,0 (B)	7,0 (A)	2,0 (C)
	Buchenholzspäne	3,0 (A)	0,0 (B)	1,0 (B)
	Hanfstroh	8,0 (A)	7,0 (A)	5,0 (B)

Der anschließende Post-hoc-Test nach Fisher zeigt eine klare Gruppierung der Mittelwerte in verschiedene Signifikanzgruppen (A, B, C). In vielen Fällen unterscheiden sich die Feinheitsgrade

signifikant voneinander, was sich in einer deutlichen Trennung der Gruppen widerspiegelt. Teilweise entstehen drei getrennte Gruppen, teilweise bestehen Überschneidungen zwischen einzelnen Feinheitsgraden. Die Mittelwerte und Gruppenzuordnungen variieren je nach Pilzart, Substrat und untersuchtem Attribut. Auffällig ist zudem, dass die Reihenfolge der Gruppen nicht einheitlich ist, sondern sich zwischen den verschiedenen Substraten und Pilzarten unterscheidet.

4.2.4 Schockwellentest

Die Rohdaten des Schockwellentests sind im Anhang in der Tabelle 15 dargestellt. Aus diesen Daten wurden die Mittelwerte bestimmt und deren Standardabweichungen.

Ganoderma lucidum

In Tabelle 13 und Abbildung 11 sind die Ergebnisse des Drop-Testers dargestellt mit den Substraten, welche mit *Ganoderma lucidum* beimpft wurden.

Tabelle 13: Mittelwerte und deren Standardabweichung der Ergebnisse des Schock Tests von den Substraten, welche mit *Ganoderma lucidum* beimpft wurden (BS = Buchenholzspäne; HS = Hanfstroh; WS = Weizenstroh)

Substrate	**X-Achse**	**Y-Achse**	**Z-Achse**
WS grob	7,10 (± 0) g	9,79 (± 0) g	15,94 (± 0) g
WS mittel	15,94 (± 0) g	15,94 (± 0) g	5,57 (± 0,45) g
WS fein	12,17 (± 4,69) g	14,43 (± 2,46) g	13,95 (± 5,27) g
HS grob	11,33 (± 1,96) g	11,2 (± 6,70) g	15,94 (± 0) g
HS mittel	11,87 (± 4,87) g	14,07 (± 3,24) g	15,94 (± 0) g
HS fein	13,17 (± 4,23) g	11,49 (± 6,25) g	15,83 (± 0,27) g
BS grob	9,49 (± 5,22) g	13,11 (± 4,82) g	13,63 (± 3,91) g
BS mittel	11,03 (± 4,97) g	15,94 (± 0) g	15,83 (± 0,27) g
BS fein	13,08 (± 3,45) g	11,49 (± 6,25) g	15,83 (± 0,27) g

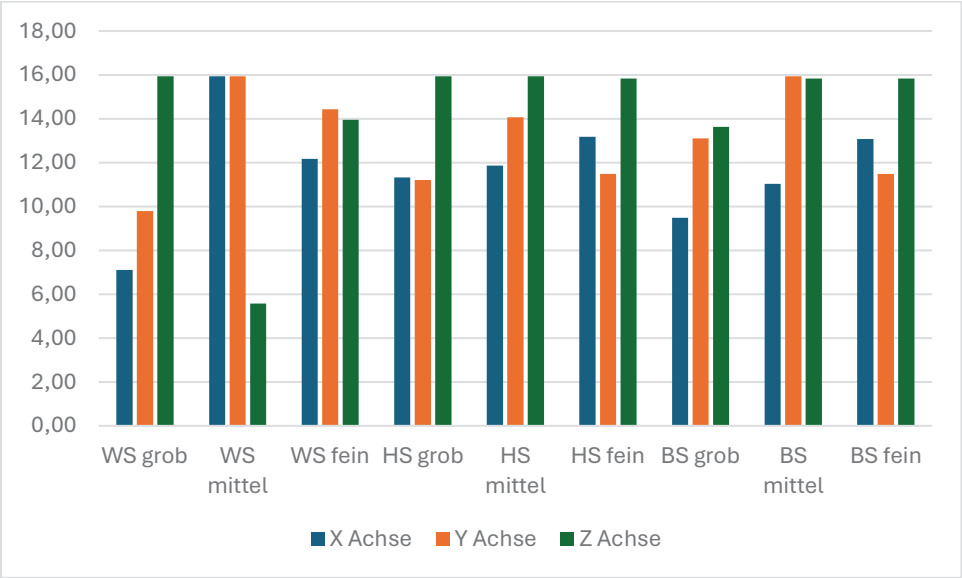

Abbildung 11: Ergebnisse des Schock Tests von den Substraten, welche mit *Ganoderma lucidum* beimpft wurden, BS = Buchenholzspäne; HS = Hanfstroh; WS = Weizenstroh

Bei den mit *Ganoderma lucidum* beimpften Substraten ist in mehreren Proben eine Dominanz der vertikalen Raumrichtung (Z-Achse) erkennbar. So erreichen beispielsweise grobes Weizenstroh und grobes Hanfstroh jeweils 15,94 g in der Z-Achse, während gleichzeitig deutlich niedrigere Werte in der X- und Y-Achse gemessen werden. Ein ähnliches Muster zeigt sich bei mittlerem Hanfstroh mit 15,94 g in der Z-Achse gegenüber 11,87 g (X-Achse) und 14,07 g (Y-Achse).
Demgegenüber treten auch Substratkombinationen auf, bei denen hohe Belastungen nicht ausschließlich in vertikaler Richtung gemessen werden. So zeigen beispielsweise Weizenstrohproben mittlerer Partikelgröße hohe Werte in der X- und Y-Achse (jeweils 15,94 g), während gleichzeitig in der Z-Achse ein deutlich niedrigerer Wert von 5,57 g vorliegt. Auch bei Buchenholzspänen mittlerer Partikelgröße werden hohe Belastungen in Y- und Z-Richtung gemessen, während der X-Wert geringer ausfällt.
Die Ergebnisse der mit *Ganoderma lucidum* beimpften Substrate zeigen insgesamt eine stark variierende Streuung der Messwerte in Abhängigkeit von Substrattyp, Partikelgröße und Raumrichtung. Auffällig ist zunächst, dass in mehreren Messreihen Standardabweichungen von ± 0 g auftreten, insbesondere in der Z-Achse bei verschiedenen Substraten und Partikelgrößen (z.B. Weizenstroh grob, Hanfstroh grob und mittel, sowie in mehreren Buchenholzspänen Proben). Demgegenüber zeigen insbesondere die feinen und mittleren Partikelgrößen deutlich erhöhte

Standardabweichungen in der X- und Y-Achse, beispielsweise bei Weizenstroh fein (± 4,69 g bzw. ± 2,46 g), Hanfstroh mittel (± 4,87 g bzw. ± 3,24 g) sowie Buchenholzspäne grob (± 5,22 g bzw. ± 4,82 g).

Pleurotus ostreatus

In Tabelle 14 und Abbildung 12 sind die Ergebnisse des Drop-Testers dargestellt mit den Substraten, welche mit *Pleurotus ostreatus* beimpft wurden.

Tabelle 14: Mittelwerte und deren Standardabweichung der Ergebnisse des Schock Tests von den Substraten, welche mit *Pleurotus ostreatus* beimpft wurden (BS = Buchenholzspäne; HS = Hanfstroh; WS = Weizenstroh)

Substrate	**X-Achse**	**Y-Achse**	**Z-Achse**
WS grob	4,74 (± 0,91) g	13,76 (± 3,08) g	15,94 (± 0) g
WS mittel	2,43 (± 1,75) g	15,94 (± 0) g	15,94 (± 0) g
WS fein	9,17 (± 5,35) g	6,48 (± 3,04) g	15,94 (± 0) g
HS grob	8,93 (± 4,86) g	15,94 (± 0) g	15,94 (± 0) g
HS mittel	9,86 (± 4,49) g	13,8 (± 4,80) g	15,94 (± 0) g
HS fein	7,18 (± 2,69) g	15,32 (± 1,23) g	15,94 (± 0) g
BS grob	13,29 (± 3,37) g	12,18 (± 5,88) g	15,94 (± 0) g
BS mittel	5,95 (± 1,72) g	13,59 (± 3,96) g	15,94 (± 0) g
BS fein	10,88 (± 4,51) g	12,61 (± 0,33) g	15,94 (± 0) g

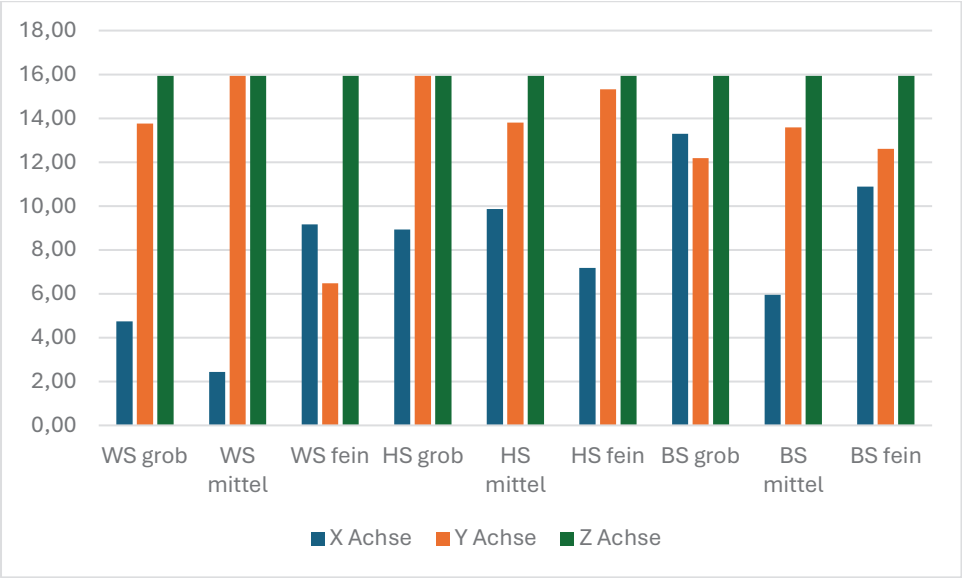

Abbildung 12: Ergebnisse des Schock Tests von den Substraten, welche mit *Pleurotus ostreatus* beimpft wurden, BS = Buchenholzspäne; HS = Hanfstroh; WS = Weizenstroh

Auch bei den mit *Pleurotus ostreatus* beimpften Proben zeigt sich eine ausgeprägte Richtungsabhängigkeit der Stoßbelastungen. In allen Substraten werden sehr hohe Werte in der Z-Achse gemessen (durchgehend 15,94 g), während die X- und Y-Achse eine deutlich größere Spannweite aufweisen. So erreicht beispielsweise Weizenstroh mittlerer Partikelgröße lediglich 2,43 g in der X-Achse, gleichzeitig jedoch 15,94 g in der Y- und Z-Achse. Ein ähnliches Muster zeigt sich bei Hanfstroh grober Partikelgröße.

Gleichzeitig treten auch Proben mit vergleichsweise niedrigen horizontalen Belastungen auf, etwa bei feinem Weizenstroh (9,17 g in X-Richtung und 6,48 g in Y-Richtung) oder bei Buchenholzspänen mittlerer Partikelgröße (5,95 g in X-Richtung und 13,59 g in Y-Richtung).

Die mit *Pleurotus ostreatus* beimpften Substraten weisen im Vergleich zu *Ganoderma lucidum* insgesamt eine differenzierte, jedoch ebenfalls richtungsabhängige Streuung der Messwerte auf. In der Z-Achse zeigen sämtliche Proben eine Standardabweichung von ± 0 g. Demgegenüber treten in der X- und Y-Achse teilweise ausgeprägte Standardabweichungen auf, bei feinen Partikelgrößen treten vor allem in den X-Achsen große Standardabweichungen auf (Weizenstroh fein = ± 5,35 g; Hanfstroh fein = ± 2,69 g; Buchenholzspäne fein = ± 4,51). Gleichzeitig zeigen einzelne Proben sehr geringe Standardabweichungen auf, beispielsweise bei Weizenstroh grob in X-Richtung (± 0,91 g) oder bei Buchenholzspäne fein in Y-Richtung (± 0,33 g).

5 Diskussion

Vorversuche

Die Vorversuche bestätigten, dass die Zusammensetzung des Substrats einen entscheidenden Einfluss auf das Myzelwachstum und die mechanischen Eigenschaften des myzelbasierten Materials hat. Ohne Zusätze zeigte das Substrat keine nennenswerte Myzelbildung, während durch die Zugabe organischer Zusatzstoffe eine deutliche Kolonisation erreicht wurde. Dies stimmt mit der Forschungslage überein, wonach die Substratzusatz-Zusammensetzung das Myzelwachstum maßgeblich fördert, da zusätzliche organische Nahrungskomponenten die Menge und die Dichte des Myzels erhöhen können, da sie mehr verwertbare Nährstoffe bieten als reine Basissubstrate (Soh et al., 2021).

Die Variation zwischen den Anteilen von Haferflocken und Weizenkleie zeigt, dass nicht nur die Nährstoffverfügbarkeit, sondern auch physikalische Eigenschaften des Substratzusatzes wichtig sind. Hohe Haferflockenanteile führten zwar zu festerem Endmaterial, aber zu unvollständiger Durchwachsung. Dies kann damit erklärt werden, dass weichere oder feinere Substratstrukturen das eindringende Myzel weniger unterstützen. Frühere Untersuchungen zeigen, dass Myzel auf steifen/strukturierterem Substrat schneller und großflächiger wächst, während auf weicheren Substraten das Wachstum in die Tiefe verlagert wird und die Kolonisationsrate langsamer ist (Yang et al., 2024).

Ein hoher Weizenkleieanteil verbesserte zwar die Durchwachsung, führte jedoch zu brüchigeren Materialien. Dies lässt sich durch die Beschaffenheit und Durchlässigkeit des Substrates erklären. Substrate mit höherem Anteil leichter verdaulicher Bestandteile fördern zwar schnelleres Wachstum im Inneren, erzeugen aber oft ein poröseres, weniger dichtes myzeliales Netzwerk. Diese Strukturen können zwar vollständig durchwachsen sein, besitzen aber eine geringere strukturelle Integrität (Biby et al., 2025).

Die identifizierte optimale Mischung (67 % Haferflocken und 33 % Weizenkleie) liefert einen funktionalen Kompromiss. Ausreichende Nährstoffe zur Förderung des Wachstums kombiniert mit einer Struktur, die das Myzel mechanisch unterstützt, sodass sowohl Durchwachsung als auch Stabilität und Festigkeit verbessert werden.

Inkubationszeit

Die Ergebnisse der Untersuchung verdeutlichen ausgeprägte artspezifische Unterschiede im Wachstumsverhalten und in der Myzelentwicklung von *Ganoderma lucidum* und *Pleurotus ostreatus*. Das schnelle und gleichmäßige Wachstum von *G. lucidum* mit nahezu vollständiger Substratdurchdringung nach elf Tagen weist auf ein hohes Kolonisationsvermögen und eine gute Anpassung an die verwendeten Substrate hin. Dieses Verhalten entspricht der in der Literatur beschriebenen Fähigkeit von *G. lucidum*, lignocellulosereiche Substrate effizient zu erschließen und ein dichtes Myzelnetzwerk auszubilden (Yang et al., 2024).
Demgegenüber zeigte *P. ostreatus* ein deutlich langsameres, uneinheitliches und stark variierendes Wachstum. Die hohe Streuung zwischen den einzelnen Proben sowie das teilweise vollständige Ausbleiben von Myzelentwicklung deuten darauf hin, dass diese Art bzw. der eingesetzte Stamm empfindlicher auf Substratbedingungen und Umweltfaktoren reagiert (Melanouri et al., 2022). Neben der Substratzusammensetzung und Struktur kann auch die stammspezifische Vitalität eine entscheidende Rolle gespielt haben. Es ist davon auszugehen, dass der verwendete Pleurotus-Stamm eine geringere Letalität bzw. Viabilität besaß als der eingesetzte *Ganoderma lucidum*-Stamm, was die schwächere und konsistente Myzelentwicklung zusätzlich erklären könnte.
Für zukünftige Untersuchungen wäre es daher sinnvoll, die Wachstumsdynamik der einzelnen Pilzarten bzw. Stämme quantitativ vor dem Beimpfen auf die Substrate zu erfassen, beispielsweise durch die Bestimmung der aktuellen Wachstumsrate (z.B. radiale Myzelausbreitung oder Biomassezunahme pro Zeiteinheit). Dies würde eine objektivere Vergleichbarkeit ermöglichen und dazu beitragen, stammspezifische Effekte klarer von Substrat- und umweltbedingten Einflüssen trennen.

Optische Einschätzung / Dichtebestimmung

Die Ergebnisse der optischen Einschätzung und Dichtebestimmung zeigen deutlich, dass die Ausbildung mechanisch stabiler myzelbasierter Materialien nicht allein von der Myzeldurchdringung abhängt, sondern maßgeblich durch das Zusammenspiel von Pilzart, Substrattyp und Partikelgröße bestimmt wird. Dieses Ergebnis steht im Einklang mit dem grundlegenden Verständnis myzelbasierter Verbundwerkstoffe, bei denen das Myzel die Funktion einer biologischen Matrix übernimmt, während das pflanzliche Substrat als Faser- bzw. Partikelverstärkung fungiert (Jones et al., 2018).
Zwischen *Pleurotus ostreatus* und *Ganoderma lucidum* zeigen sich ausgeprägte artspezifische Unterschiede in der strukturbildenden Wirkung des Myzels. Während *P. ostreatus* in mehreren

Substraten eine teilweise gute Myzeldurchdringung aufweist, führt diese nicht zur Ausbildung mechanisch tragfähiger Strukturen. Insbesondere bei Buchenholzspänen und Weizenstroh bleibt die Stabilität sehr gering, was darauf hinweist, dass das Myzel zwar in der Lage ist, das Substrat biologisch zu kolonisieren, jedoch kein ausreichend dichtes und vernetztes Hyphengeflecht ausbildet, um eine funktionale mechanische Kopplung der Partikel zu erreichen. Dieses Phänomen wurde auch in anderen Studien beschrieben, in dem *P. ostreatus* eher als schneller Kolonisator, jedoch nicht als besonders strukturstabilisierender Organismus charakterisiert wird (Haneef et al., 2017).

Im Gegensatz dazu zeigt *G. lucidum* eine deutlich höhere strukturbildende Kapazität. Die Ergebnisse belegen eine starke Kohäsion, ausgeprägte Zähigkeit und eine stabile Myzelmatrix, insbesondere bei Hanfstroh und Buchenholzspäne mittlerer Partikelgröße. Diese Eigenschaften lassen sich biologisch durch die dichtere Hyphenarchitektur und stärkere Vernetzung der Zellwände erklären, welche typisch für diese Art ist und mit einer hohen mechanischen Eigenstabilität des Myzels einhergeht (Appels et al., 2019). *G. lucidum* fungiert damit als biologische Binder, der Substratpartikel nicht nur durchwächst, sondern mechanisch effektiv miteinander verbindet.

Auch das eingesetzte Substrat erweist sich als entscheidender Faktor für die Materialqualität. Hanfstroh zeigt für beide Pilzarten die besten Ergebnisse, insbesondere bei mittlerer und feiner Partikelgröße. Die faserige Struktur, hohe spezifische Oberfläche und gute Porosität begünstigen sowohl die Myzeldurchdringung als auch die mechanische Verzahnung zwischen Hyphen und Pflanzenfasern. Diese Kombination führt zu einer hohen Kohäsion und strukturellen Stabilität des Materials, was mit bestehenden Arbeiten übereinstimmt, die faserreiche Substrate als besonders geeignet für myzelbasierte Verbundwerkstoffe beschreiben (Jones et al., 2018).

Buchenholzspäne zeigen eine starke Abhängigkeit von der Pilzart. Während *G. lucidum* eine gute strukturelle Integration des Materials erreicht, bleibt *P. ostreatus* weitgehend wirkungslos in Bezug auf die mechanische Stabilisierung. Dies verdeutlicht, dass nicht allein der lignocellulosereiche Charakter eines Substrats entscheidend ist, sondern dessen Kombination mit der physiologischen Leistungsfähigkeit der jeweiligen Pilzart.

Weizenstroh erweist sich hingegen unabhängig von Pilzart und Partikelgröße als ungeeignet. Trotz teilweise vorhandener Myzeldurchdringung wird keine ausreichende mechanische Stabilität erreicht. Dies deutet darauf hin, dass glatte Faseroberflächen, ungünstige Faser Geometrien und eine geringe mechanische Verzahnung eine effektive strukturelle Kopplung zwischen Myzel und Substrat verhindern. Dies deckt sich mit der Literatur, in der dieses Problem auch genannt wird

(Haneef et al., 2017).

Die Partikelgröße beeinflusst die Materialbildung in nicht linearer Weise. Sehr grobe Partikel führen zu inhomogener Durchdringung und strukturellen Schwachstellen, während sehr feine Partikel zwar eine hohe Oberfläche bieten, jedoch die Porosität und Sauerstoffversorgung reduzieren können, was eine vollständige Durchwachsung limitiert. Die besten Ergebnisse werden überwiegend bei mittlerer bis feiner Partikelgröße erzielt, was ein optimales Verhältnis zwischen Porosität, Kontaktfläche, Durchlüftung und mechanischer Verzahnung widerspiegelt. Diese Beobachtung deckt sich mit materialwissenschaftlichen Modellen myzelbasierter Werkstoffe, in denen Porosität und Fasergeometrie als zentrale Parameter für die Auswertung stabiler Verbundstrukturen beschrieben werden (Appels et al., 2019).

In funktionaler Hinsicht zeigen die Ergebnisse, dass insbesondere die Kombination aus *G. lucidum* und Hanfstroh mittlere Partikelgröße ein Material mit hoher Durchdringung, ausgeprägter Zähigkeit und hoher mechanischer Stabilität erzeugt. Diese Eigenschaften sind für den Einsatz als biologisch abbaubares Polstermaterial von zentraler Bedeutung, da sie Formstabilität ermöglichen. *P. ostreatus* zeigt dagegen nur in Kombination mit Hanfstroh eine leichte strukturelle Stabilisierung, was auf ein eingeschränktes materialtechnisches Potenzial für strukturelle Anwendungen hinweist.

Die statistische Auswertung der Daten zeigt insgesamt deutlich, dass der Feinheitsgrad der Substrate einen messbaren Einfluss auf die Eigenschaften Stabilität und Durchdringung besitzt. Dieser Einfluss ist nicht bei allen Substratkombinationen gleich stark ausgeprägt. Besonders deutlich wird dies bei den Hanfstrohproben in Kombination mit *Ganoderma lucidum* im Hinblick auf die mechanische Stabilität. Hier konnte kein signifikanter Unterschied zwischen den Feinheitsgraden festgestellt werden ($p = 0{,}080$). Dies bedeutet, dass sich die Stabilität der Proben statistisch nicht zwischen fein, mittel und grob unterscheidet und der Feinheitsgrad in diesem Fall nur eine untergeordnete Rolle spielt. Praktisch lässt sich daraus ableiten, dass bei dieser Kombination der Partikelgröße keine entscheidende Bedeutung zukommt und die Materialeigenschaften weitgehend unabhängig vom Zerkleinerungsgrad des Substrates entstehen. Auch bei der Durchdringung von Hanfstroh mit *Ganoderma lucidum* zeigt sich lediglich ein schwach signifikanter Effekt ($p = 0{,}022$). Im Vergleich zu anderen Substraten, bei denen hochsignifikante Unterschiede auftreten, ist der Einfluss der Partikelgröße hier deutlich geringer ausgeprägt. Dies weist darauf hin, dass die Substratart in diesem Fall einen stärkeren Einfluss auf das Myzelwachstum besitzt als der Feinheitsgrad selbst.

Ein Sonderfall stellt die Kombination *Pleurotus ostreatus* und Buchenholzspänen dar. Hier konnte

keine Varianzanalyse durchgeführt werden, da keine Varianz in den Daten vorlag. Dies liegt daran, dass bei diesen Proben nahezu keine Myzelbildung auf den Buchenholzspänen entstand und somit keine strukturbildende Vernetzung des Substrates entstehen konnte. Infolgedessen wurde die mechanische Stabilität von allen Prüfpersonen durchgehend mit 0 bewertet. Der Feinheitsgrad hatte in diesem Fall praktisch keinen Einfluss, da das Substrat grundsätzlich nicht für das Wachstum von *P. ostreatus* geeignet war.
Im Gegensatz dazu zeigen andere Substrate, insbesondere Weizenstroh und Buchenholzspäne in Kombination mit *Ganoderma lucidum*, überwiegend hochsignifikante Unterschiede zwischen den Feinheitsgraden. In diesen Fällen ist die Wahl der Partikelgröße klar relevant, da unterschiedliche Zerkleinerungsgrade zu statistisch gesicherten Unterschieden in Stabilität und Durchdringung führen. Hier wirkt der Feinheitsgrad als steuerbarer Parameter zur gezielten Beeinflussung der Materialeigenschaften.
Die Aussagekraft der Ergebnisse werden durch die sechs geschulten Prüfpersonen gestützt, dadurch ist eine fundierte und methodisch abgesicherte Datengrundlage gegeben.

Schockwellentest

Die Ergebnisse des Schockwellentests (Drop-Test) zeigen deutlich, dass die stoßdämpfenden Eigenschaften myzelbasierter Polstermaterialien stark von der Kombination aus Pilzart, Substrattyp und Partikelgröße abhängen. Die Messwerte der Beschleunigungsspitzen (g-Werte) in den drei Raumachsen (X, Y und Z) verdeutlichen, dass die Materialien ein ausgeprägt richtungsabhängiges Dämpfungsverhalten aufweisen. Dieses Verhalten ist typisch für faserbasierte Verbundmaterialien, bei denen Struktur, Porosität und Faserorientierung die Energieabsorption maßgeblich beeinflussen (Jones et al., 2018).
Zwischen den mit *Ganoderma lucidum* und *Pleurotus ostreatus* beimpften Materialien zeigen sich klare Unterschiede in der stoßdämpfenden Leistungsfähigkeit. Die mit *G. lucidum* kultivierten Proben weisen insgesamt höhere g-Werte auf, insbesondere in Z-Richtung, was auf eine geringe vertikale Energieabsorption hindeutet. Dies kann daran zurückgeführt werden, dass *G. lucidum* sehr dichte, kompakte Myzelmatrizen ausbildet, die zwar mechanisch stabil und kohäsiv sind, jedoch eine geringere elastische Verformbarkeit besitzen. Solche Strukturen neigen dazu, Stoßenergie weniger durch Verformung zu dissipieren, sondern stärker direkt weiterzuleiten (Appels et al., 2019).
Im Gegensatz dazu zeigen die mit *P. ostreatus* beimpften Materialien, insbesondere bei Hanfstroh

und Weizenstroh, in einzelnen Raumrichtungen deutlich geringere g-Werte, was auf eine bessere Stoßdämpfung hindeutet. Dies spricht für eine offenere, porösere Myzelstruktur mit höherer Kompressibilität, die eine effektivere Energieabsorption durch elastische und viskoelastische Verformung ermöglicht. Solche Strukturen sind typisch für weniger stark verdichtete Myzelverbunde und werden in der Literatur als vorteilhaft für stoßdämpfende Anwendungen beschrieben (Islam et al., 2017).

Der Einfluss des Substrats ist ebenfalls deutlich erkennbar. Hanfstroh zeigt im Vergleich zu Buchenholzspänen und Weizenstroh tendenziell günstigere stoßdämpfende Eigenschaften, insbesondere bei mittlerer und feiner Partikelgröße. Die faserige Morphologie, hohe Porosität und gute mechanische Verzahnung zwischen Myzel und Pflanzenfasern begünstigen die Stoßenergieabsorption (Voutetaki und Mpalaskas, 2024).

Buchenholzspäne zeigen überwiegend hohe g-Werte in mehreren Raumrichtungen, was auf eine geringe stoßdämpfende Wirkung hinweist. Die festen, weniger flexiblen Halme führen zu einer höheren strukturellen Steifigkeit des Verbundes und reduzieren die Fähigkeit zur elastischen Verformung (Rigobello und Ayres, 2023). Dadurch wird Stoßenergie stärker übertragen als absorbiert.

Weizenstroh zeigt ein uneinheitliches Verhalten mit teilweise niedrigen g-Werten in einzelnen Achsen, jedoch gleichzeitig sehr hohen Werten in anderen Raumrichtungen. Diese Ergebnisse deuten auf eine inhomogene Materialstruktur hin, bei der lokale Verdichtungen und ungleichmäßige Myzelverteilungen aufgetreten sind. Solche Strukturen eignen sich nicht als Verpackungsmaterial, da eine gleichmäßige Stoßdämpfung in allen Raumrichtungen nicht gewährleistet werden kann.

Die Partikelgröße beeinflusst die Stoßdämpfung signifikant. Grobe Partikel führen zu strukturellen Hohlräumen und Inhomogenitäten, die eine gerichtete Stoßübertragung begünstigen. Sehr feine Partikel erzeugen hingegen dichtere Strukturen mit geringerer Porosität, was die elastische Verformbarkeit reduziert. Die besten stoßdämpfenden Eigenschaften werden überwiegend bei mittlerer Partikelgröße beobachtet, da hier ein optimales Verhältnis zwischen Porosität, struktureller Kohäsion und Verformbarkeit vorliegt. Auch in der Literatur werden vorrangig Partikelgrößen verwendet welche zwischen 4-10 mm groß sind, da Porosität und Mikrostruktur als zentrale Parameter für die Energieabsorption beschrieben werden (Appels et al., 2019; Jones et al., 2018).

Insgesamt zeigen die Ergebnisse des Schockwellentests, dass die Eignung myzelbasierter Materialien als Polstermaterial nicht primär durch hohe mechanische Festigkeit, sondern durch

kontrollierte Elastizität und strukturelle Nachgiebigkeit bestimmt wird. Besonders vorteilhaft erscheinen Kombinationen mit faserreichen Substraten wie Hanfstroh in Verbindung mit poröser Myzelstruktur, wie sie insbesondere bei *P. ostreatus* beobachtet wird. Demgegenüber zeigen die sehr kompakten Strukturen von *G. lucidum* zwar hohe Stabilitäten, jedoch eine geringere Fähigkeit zur Stoßenergieabsorption.

Im Rahmen der Untersuchung sind potenzielle systematische und zufällige Fehlerquellen zu berücksichtigen, welche die Messergebnisse beeinflusst haben könnten. Eine kritische Analyse dieser Einflussfaktoren ist notwendig, um die Aussagekraft der erhobenen Daten angemessen bewerten zu können.

Eine wesentliche potenzielle Fehlerquelle stellt die verwendete, im Rahmen einer vorherigen Bachelorarbeit konstruierte Versuchsanlage dar. Da es sich um eine selbstgebaute Konstruktion handelte, konnten konstruktionsbedingte Ungenauigkeiten oder mechanische Instabilität nicht vollständig ausgeschlossen werden. Ein spezifisches Problem betraf die Fallrampe, von der das Prüfpaket herabfiel. In einzelnen Versuchen war diese aufgrund einer Verschiebung eines Bolzens nicht vollständig gerade ausgerichtet. Eine solche Fehljustierung kann dazu führen, dass das Paket nicht exakt vertikal fällt, sondern mit einer leichten Rotation oder seitlichen Komponente auftritt. Insbesondere extrem hohe Z-Werte könnten dadurch entstanden sein, wenn es zu einem partiellen Kanten- oder Eckaufprall kam, bei dem sich die Impulsübertragung lokal konzentriert. Die Versuche mit den Substraten, welche mit *Pleurotus ostreatus* beimpft wurden, waren die letzten. Dadurch war bei diesen Versuchen die Rampe teilweise nicht komplett gerade und das könnte ein Grund sein, warum die Z-Werte bei allen Versuchen dort extrem hoch waren.

Ein weiterer Unsicherheitsfaktor betrifft die Fixierung der myzelbasierten Verpackung innerhalb des Prüfpakets. Das Polstermaterial wurde in wenigen einzelnen Versuchen nicht vollständig formschlüssig oder kraftschlüssig eingebracht wodurch sich dieses während des Falls minimal verschoben oder gelöst hatte. Eine solche Verschiebung kann zusätzliche Beschleunigungsspitzen verursachen oder die tatsächliche Dämpfungsleistung verfälschen.

Auch der verwendete Datenlogger stellt eine potenzielle Fehlerquelle dar. Beim Einsetzen des Datenloggers in das Verpackungsmaterials hätten unbeabsichtigte mechanische Vorbelastungen auftreten können. Ein zu starkes Eindrücken des Loggers in die Struktur hätte kurzfristige Beschleunigungsspitzen verursachen können, die vom Sensor als Schockereignis aufgezeichnet wurden.

6 Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war es, optimale Kombinationen aus Substratart und Partikelgröße von Weizenstroh, Hanfstroh und Buchenholzspänen für die Kultivierung von *Pleurotus ostreatus* und *Ganoderma lucidum* zu identifizieren, um myzelbasierte Verpackungsmaterialien mit hoher Myzeldurchdringung, struktureller Stabilität und guten mechanischen Polstereigenschaften herzustellen.

Die Ergebnisse zeigen eindeutig, dass die Kombination aus Substrattyp und Partikelgröße einen entscheidenden Einfluss auf Materialbildung und Polstereigenschaften hat. Hanfstroh erwies sich insgesamt als das geeignetste Substrat. Insbesondere bei mittlerer Partikelgröße wurde eine hohe optische Myzeldurchdringung, gute Homogenität sowie eine stabile Materialstruktur erreicht.

Hinsichtlich der Pilzarten zeigte *G. lucidum* eine sehr gute strukturbildende Wirkung mit hoher Kohäsion und Stabilität, vor allem in Kombination mit Hanfstroh mittlerer Partikelgröße. Diese Kombination erfüllte die Kriterien einer hohen Myzeldurchdringung und strukturellen Festigkeit am besten. Allerdings führten die dichten Strukturen teilweise zu geringerer Stoßabsorption. *P. ostreatus* bildetet hingegen tendenziell porösere Strukturen, die in einzelnen Fällen bessere Polstereigenschaften zeigten, jedoch insgesamt eine geringere strukturelle Stabilität aufweisen.

Die Partikelgröße beeinflusste die Materialeigenschaften signifikant: Sehr grobe Partikel führten zu inhomogenen Strukturen, sehr feine Partikel reduzierten die Porosität. Die besten Gesamtergebnisse wurden bei mittlerer Partikelgröße erzielt, da hier ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Porosität, Durchlüftung, Myzeldurchdringung und mechanischer Verzahnung vorlag.

Die Forschungsfrage kann somit dahingehend beantwortet werden, dass für die Herstellung pilzmyzelbasierter Verpackungsmaterialien mit hoher Myzeldurchdringung, struktureller Stabilität und guten Polstereigenschaften insbesondere Hanfstroh mittlerer Partikelgröße geeignet ist. In Kombination mit *G. lucidum* wird die höchste strukturelle Stabilität erzielt, *während P. ostreatus* potenziell bessere stoßdämpfende Eigenschaften ermöglicht, jedoch mit geringerer Materialkonsistenz.

Für zukünftige Projekte empfiehlt es sich, die Herstellung myzelbasierter Materialien in größere Maßstäbe zu überführen, beispielsweise durch den Einsatz größerer Kultivierungsbehälter, um die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf praxisnahe Produktionsbedingungen zu prüfen. Dabei sollten sowohl *Ganoderma lucidum* als auch *Pleurotus ostreatus*, auf Hanfstroh mittlerer Partikelgröße (4-10 mm), verwendet werden. Zudem sollte der Schockwellentest mit einem standardisierten Drop-Tester aus einem Industrieunternehmen wiederholt werden, um reproduzierbare und

normgerechte Vergleichsdaten zu erhalten, insbesondere für Proben mit *Ganoderma lucidum*. Darüber hinaus wäre es sinnvoll, vor den Versuchen die Wachstumsrate der eingesetzten Pilzstämme quantitativ zu bestimmen und anschließend Vergleichsversuche mit gleicher Vitalität, insbesondere auf Hanfstroh, durchzuführen, um stammspezifische Effekte klarer von substratbedingten Einflüssen zu trennen.

7 Literaturverzeichnis

Alaneme, K. K.; Anaele, J. U.; Oke, T. M.; Kareem. S. A.; Adediran, M.; Ajibuwa, O. A.; Anabaranze, Y. O.: Mycelium based composites: A review of their bio-fabrication procedures, material properties and potential for green building and construction applications. Alexandria Engineering Journal 83 (2023) Nr. 15, S. 234-250. Verfügbar unter: https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.10.012 [Letzter Zugriff 25.11.2025]

Antinori, M. E.; Ceseracciu, L.; Mancini, G.; Heredia-Guerrero, J. A.; Athanassiou, A.: Fine-Tuning of Physicochemical Properties and Growth Dynamics of Mycelium-Based Materials. ACS Applied Bio Materials Nr. 3 (2020), S. 1044–1051. verfügbar unter: 10.1021/acsabm.9b01031 [letzter Zugriff 27.10.2025]

Atila, F.: Comparative study on the mycelial growth and yield of *Ganoderma lucidum* (Curt.: Fr.) Karst. on different lignocellulosic wastes, Acta Ecologica Sinica 40 (2020) Nr. 2, S. 153-157, verfügbar unter: https://doi.org/10.1016/J.CHNAES.2018.11.007 [Letzter Zugriff 10.10.2025]

Appels, F. V. W.; Camere, S.; Montalti, M.; Karana, E.; Jansen, K. M. B.; Dijksterhuis, J.; Krijgsheld, P.; Wösten, H. A. B.: Fabrication factors influencing mechanical, moisture- and water-related properties of mycelium-based composites. Materials & Design 161 (2019), S 64–71. Verfügbar unter: https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.11.027 [Letzter Zugriff 15.02.2026]

Backhaus, K.; Erichson, B.; Plinke, W.; Weiber, R.: Multivariate Analysemethoden. 15.Auflage. Berlin: Springer, 2018

Bellettini, M. B.; Fiorda, F. A.; Maieves, H. A.; Teixeira, G. L.; Ávila, S.; Hornung, P. S.; Júnior, A. M.; Ribani, R. H.: Factors affecting mushroom *Pleurotus* spp.. Saudi Journal of Biological Sciences 26 (2019), Nr. 4, S. 633-646, verfügbar unter: https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2016.12.005 [Letzter Zugriff 29.09.2025]

Biby, S. R.; Surendran, V.; Kundanati, L.: Mycelium biocomposites from agricultural and paper waste: Sustainable alternative to plastic foam based secondary packaging. Bioresource

Technology Reports 31 (2025). Verfügbar unter: https://doi.org/10.1016/j.biteb.2025.102177 [Letzter Zugriff: 17.02.2026]

Burger, A.; Caye, N.; Jaegermann, C.; Schüler, K.: Aufkommen und Verwertung von Verpackungsabfällen in Detuschland im Jahr 2019. Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung mbH, 2019

Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit: Verordnung über das Verbot des Inverkehrbringens von bestimmten Einwegkunststoffprodukten und von Produkten aus oxo-abbaubarem Kunststoff. 2017

Chang, S.; Buswell, T.: J A *Ganoderma lucidum* (Curt.: Fr.) P. Karst. (Aphyllophoromycetideae) – a mushrooming medicinal mushroom. International Journal of Medicinal Mushrooms 1 (1999), Nr. 2, S. 139-146 verfügbar unter: https://doi.org/10.1615/ IntJMedMushrooms.v1.i2.30 [Letzter Zugriff 08.10.2025]

Costa, A. F. P.; Steffen, G. P. K.; Steffen, R. B.; Portela, V. O.; Santana, N. A.; Richards, N. S. P. S.; Jacques, R. J. S.: The use of rice husk in the substrate composition increases *Pleurotus ostreatus* mushroom production and quality. Scientia Horticulturae 321 (2023), Nr. 1, Verfügbar unter: https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112372 [Letzter Zugriff: 10.02.2026]

Deutsches Institut für Normung e.V.: ISO 4651:1988/AMD 1:2006, Deutsche Fassung EN ISO 4651:1995/A1:2008, Schaumstoffe aus Kautschuk und Kunststoffen - Bestimmung der Stoßabsorption. Berlin: Beuth Verlag, 2008

Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 10964:2014-11, Sensorische Prüfverfahren - Einfach beschreibende Prüfung. Berlin: Beuth Verlag, 2014

Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN ISO 13299:2016, Sensorische Analyse - Prüfverfahren - Allgemeiner Leitfaden zur Erstellung eines sensorischen Profils. Berlin: Beuth Verlag, 2016

Díaz-Godínez, G.; Téllez-Téllez, M.; Sánchez, C.; Díaz, R.: Characterization of the Solid-State and Liquid Fermentation for the Production of Laccases of *Pleurotus ostreatus*. Fermentation Processes (2017) Verfügbar unter: DOI: 10.5772/64239 [Letzter Zugriff: 15.02.2026]

Dosenkarton: Alu-Recycling, 2026 [Letzter Zugriff: 14.02.2026] Verfügbar unter: https://www.dosenkarton.com/alu-recycling?utm_source

El-Ramady, H.; Abdalla, N.; Fawzy, Z.; Badgar, K.; Llanaj, X.; Töros, G.; Hajdu, P.; Eid, Y.; Prokisch, J.: Green Biotechnology of Oyster Mushroom (*Pleurotus ostreatus* L.): A Sustainable Strategy for Myco-Remediation and Bio-Fermentation. Sustainability 14 (2022), Nr. 6, verfügbar unter: https://doi.org/10.3390/su14063667 [Letzter Zugriff: 29.09.2025]

Enarevbaa, D. R.; Haapala, K. R.: A Comparative Life Cycle Assessment of Expanded Polystyrene and Mycelium Packaging Box Inserts. Procedia CIRP 116 (2023), S. 654–659

Erbslöh, F. D.: Wege zum Ende der Verschwendung, Tübingen: Narr Francke Attempto Verlag GmbH, 2025. verfügbar unter: 10.36198/9783838565606 [Letzter Zugriff 04.11.2025]

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.: Sägewerk: Aus rund wird eckig, 2026 Verfügbar unter: https://holz.fnr.de/kreislaufwirtschaft/stufe-2-saegewerk?utm_source [Letzter Zugriff: 17.02.2026]

Federal Ministry for the Environment, Climate Action, Nature Conservation and Nuclear Safety, 2024; The National Circular Economy Strategy – Summary; 2024

Fricker, M. D.; Heaton, L. L. M.; Jones, N. S.; Boddy, L.: The Mycelium as a Network. Microbiology Spectrum 5 (2017), Nr. 3. Verfügbar unter: https://doi.org/10.1128/microbiolspec.funk-0033-2017 [Letzter Zugriff: 11.12.2025]

Geissdoerfer, M.; Savaget, P.; Bocken, N.M.P.; Hultink, E. J.:The Circular Economy – A new sustainability paradigm?. Journal of Cleaner Production 143 (2017), S. 757-768, verfügbar unter: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048 [letzter Zugriff 27.10.2025]

Gibson, L. J.; Ashby M. F.: Cellular Solids: Structure and Properties. Cambridge University Press, 1997

GVM Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung mbH; Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg: Der Beitrag kreislauffähiger Verpackungen zum Klimaneutralitätsziel 2045. 2023 Verfügbar unter: https://www.verpackung.org/media/pages/aktuelles/news/neue-studie-zur-klimarelevanz-von-verpackungen-94-weniger-co2-bis-2045-moeglich/628b51ec98-1700051483/bericht-studie-der-beitrag-kreislauffaehiger-verpackungen-zum-klimaneutralitaetsziel-2045.pdf [Letzter Zugriff: 23.02.2026]

Haneef, M.; Ceseracciu, L.; Canale, C.; Bayer, I. S.; Heredia-Guerrero, J. A.; Athanassiou, A.: Advanced Materials From Fungal Mycelium: Fabrication and Tuning of Physical Properties. Scientific Reports, 7 (2017). Verfügbar unter: 10.1038/srep41292 [Letzter Zugriff: 15.02.2026]

Hernández-Domínguez, E. M.; Sánchez, C.; Díaz-Godínez, G.: Production of laccases, cellulases and xylanases of *Pleurotus ostreatus* grown in liquid-state fermentation. Mexican Journal of Biotechnology 2 (2017) Nr. 2 Verfügbar unter: https://doi.org/10.29267/mxjb.2017.2.2.169 [Letzter Zugriff: 15.02.2026]

Hu, Y.; Xue, F.; Chen, Y.; Qi, Y.; Zhu, W.; Wang, F.; Wen, Q.; Shen, J.: Effects and Mechanism of the Mycelial Culture Temperature on the Growth and Development of *Pleurotus ostreatus* (Jacq.) P. Kumm. Horticulturae 9 (2023), Nr. 95, verfügbar unter: https://doi.org/10.3390/horticulturae9010095 [Letzter Zugriff 06.10.2025]

International Safe Transit Association (ISTA): Project 6-AMAZON:COM-Over Boxing: e-Commerce Fulfillment for Parcel Delivery Shipment. 2018

Isikhuemhen, O. S.; Mikiashvilli, N. A.: Lignocellulolytic enzyme activity, substrate utilization, and mushroom yield by *Pleurotus ostreatus* cultivated on substrate containing anaerobic digester solids. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology* 36 (2009) Nr. 11, S. 1353–1362. Verfügbar unter: https://doi.org/10.1007/s10295-009-0620-1 [Letzter Zugriff: 08.12.2025]

Islam, M. R.; Tudryn, G.; Bucinell, R.; Schadler, L.; Picu, R. C.: Morphology and mechanics of fungal mycelium. Scientific Reports 7 (2017). Verfügbar unter: 10.1038/s41598-017-13295-2 [Letzter Zugriff: 15.02.2026]

Jayasinghe, C.; Imtiaj, A.; Hur, H.; Lee, G. W.; Lee, T. S.; Lee, U Y.: Favorable Culture Conditions for Mycelial Growth of Korean Wild Strains in *Ganoderma lucidum*, 2008. Verfügbar unter: PMID: 23997604 [Letzter Zugriff 10.10.2025]

Jones, M.; Bhat, T.; Kandare, E.; Thomas, A.; Joseph, P.; Dekiwadia, C.; Yuen, R.; Wang, C. H.; John, S.: Thermal Degradation and Fire Properties of Fungal Mycelium and Mycelium - Biomass Composite Materials. Scientific Reports 8 (2018) Verfügbar unter: 10.1038/s41598-018-36032-9 [Letzter Zugriff: 15.02.2026]

Khorshed, A. N.; Ahmed, A.: cultivation of reishi mushroom (*ganoderma lucidum*) on different local substates in kurdistan region, iraq. Anbar Journal of Agricultural Sciences 21 (2023) Nr. 1, S. 158-173. Verfügbar unter: 10.32649/ajas.2023.179727 [Letzter Zugriff: 19.02.2026]

Martin, R.; Pohlers, S.; Mühlschlegel, F.A.; Kurzai, O.: CO_2 sensing in fungi: At the heart of metabolic signaling. Curr. Genet. Nr. 63 (2017), S. 965–972. Verfügbar unter: https://doi.org/10.1007/s00294-017-0700-0 [Letzter Zugriff 20.10.2025]

Madusanka, C.; Udayanga, D.; Nilmini, R.; Rajapaksha, S.; Hewawasam, C.; Manamgoda, D.; Vasco-Correa, J.: A review of recent advances in fungal mycelium based composites. Discover Materials 4 (2024), Nr. 13. [Letzter Zugriff: 11.12.2025]

Meier, U.: A note on the power of Fisher's least significant difference procedure. Pharmaceutical Statistics (2006), Nr. 4, S. 247-314

Melanouri, E. M.; Dedousi, M.; Diamantopoulou, P.: Cultivating *Pleurotus ostreatus* and *Pleurotus eryngii* mushroom strains on agro-industrial residues in solid-state fermentation. Part I: Screening for growth, endoglucanase, laccase and biomass production in the colonization phase. Carbon Resources Conversion 5 (2022), Nr. 1, S. 61-70**.** Verfügbar unter: https://doi.org/10.1016/j.crcon.2021.12.004 [Letzter Zugriff: 15.02.2026]

Miltz, J.; Ramon, O.: Energy absorption characteristics of polymeric foams used as cushioning materials. Polymer engineering and science 30 (1990), Nr. 2, S. 129-133 Verfügbar unter: https://doi.org/10.1002/pen.760300210 [Letzter Zugriff: 18.02.2026]

Miśkiewicz, K.; Gendaszewska, D.; Sieczyńska, K.; Gutarowska, B.: Agri-food wastes as substrates for oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*) cultivation and their agricultural potential. Scientific Reports 15 (2025). Verfügbar unter: https://doi.org/10.1038/s41598-025-26843-y [Letzter Zugriff: 18.02.2026]

Moghadam, H. E.; Karami, A.; Ebrahimabad, A. R. M.; Radulescu, M.: The impact of circular economy initiatives on urban air quality in the United States. Scientific Reports 15 (2025). Verfügbar unter: https://doi.org/10.1038/s41598-025-08554-6 [Letzter Zugriff 13.02.2026]

OECD: Global Plastics Outlook: Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options. (2022) Verfügbar unter: https://doi.org/10.1787/de747aef-en [Letzter Zugriff: 13.02.2026]

Ohmayed, K.H.; Sharqi, M.M.; Rashid, H.M.: Comparison of the physical and chemical changes in local organic waste after cultivation of the *Ganoderma lucidum* mushroom and composting by common methods, Journal of Life Science and Applied Research 1 (2020) Nr. 1, S. 1-12 verfügbar unter: https://doi.org/10.59807/jlsar.v1i1.10 [Letzter Zugriff 10.10.2025]

Patel, H.; Gupte, A.; Gupte, S.: Effect of different culture conditions and inducers on production of laccase by a basid-iomyoete fungal isolate *Pleurots ostreatus* HP-1 under solid-state fermentation. BioResources 4 (2009), S. 268-284.

Rasch, B.; Friese, M.; Hofmann, W.; Naumann, E.: Quantitative Methoden 2. 5.Auflage. Berlin: Springer, 2021

Rat der europäischen Union: Die Kreislaufwirtschaft im Detail, 2025. verfügbar unter: https://www.consilium.europa.eu/de/policies/the-circular-economy-explained/?utm_source [Letzter Zugriff 27.10.2025]

Rayagopal: Sustainable Businesses in Developing Economies Socio-Economic and Governance Perspectives, EGADE Business School, Mexico City, Mexico 2021

RIGK GmbH: Durch Stärkung der Kreislaufwirtschaft mögliche CO2-Einsparung von 150 Mio. t. CO2eq bis 2035, 2022 [Letzter Zugriff: 14.02.2026] Verfügbar unter: https://www.rigk.de/wissenswert/news/durch-staerkung-der-kreislaufwirtschaft-moegliche-co2-einsparung-von-150-mio-t-co2eq-bis-2035?utm_source

Rockström, J.; Steffen, W.; Noone, K.; Persson, Å.; Chapin, F. S. III; Lambin, E. F.; Lenton, T.; Scheffer, M.; Folke, C.; Schellnhuber, H. J.; Nykvist, B.; de Wit, C. A.; Hughes, T.; van der Leeuw, S.; Rodhe, H.; Sörlin, S.; Snyder, P. K.; Costanza, R.; Svedin, U.; Falkenmark, M.; Karlberg, L.; Corell, R. W.; Fabry, V. J.; Hansen, J.; Walker, B.; Liverman, D.; Richardson, K.; Crutzen, P.; Foley, J. A.: A safe operating space for humanity. In Nature 461 (2009) Nr. 24, S. 472–475.

Rigobello, A.; Ayres, P.: Fungi and Fungal Products in Human Welfare and Biotechnology. 2023. S. 605–635

Sainos, E.; Díaz-Godínez, G.; Loera, O.; Montiel-González, A. M.; Sánchez, C.: Growth of *Pleurotus ostreatus* on wheat straw and wheat-grain-based media: biochemical aspects and preparation of mushroom inoculum. Appl Microbiol Biotechnol 72 (2006), S. 812–815, verfügbar unter: DOI 10.1007/s00253-006-0363-0 [Letzter Zugriff 10.11.2025]

Sariatli, F.: Linear Economy Versus Circular Economy: A Comparative and Analyzer Study for Optimization of Economy for Sustainability, Visegrad Journal on Bioeconomy and Sustainable Development 6 (2017), Nr. 1, S. 31-34. Verfügbar unter: https://doi.org/10.1515/vjbsd-2017-0005 [Letzter Zugriff 04.11.2025]

Schmid-Sandherr, R.: Bilder zum Rohstoff Weizen. SwissEduc, 2017 [Letzter Zugriff: 15.02.2026] Verfügbar unter: https://www.swisseduc.ch/geographie/materialien/rohstoffe_welt/weizen/?utm_source

Schmidt, T.: Master project: upscaling of mushroom packaging. Hochschule Neubrandenburg. (2024)

Sietsma, J.H.; Rast, D.; Wessels, J.G.H.: The effect of carbon dioxide on fruiting and on the degradation of a cell-wall glucan in Schizophyhm commune. J. Gen. Microbiol. Nr. 102 (1977), S. 385–389. verfügbar unter: https://doi.org/10.1099/00221287-102-2-385 [Letzter Zugriff: 20.10.2025]

Singh, J.; Singh, S.; Kumar., A.: Cultivation of *Ganoderma lucidum* (Leyss. Ex Fr. Karst) using different agro-residues. Res Crops 16 (2015), Nr. 3, S. 598–603

Soh, E.; Ferrand, I.D.; Saeidi, N.; Javadian, A; Hebel, D.E.; Le, H.: Effect of commonfoodsassupplements for the mycelium growthof *Ganoderma lucidum* and *Pleurotus ostreatus* on solid substrates. PLoS ONE 16 (2021), Nr. 11. verfügbar unter: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0260170 [Letzter Zugriff 19.11.2025]

Sudheer, S.; Taha, Z.; Manickam, S.; Ali, A.; Cheng, G. P.: Development of antler-type fruiting bodies of *Ganoderma lucidum* and determination of its biochemical properties. Fungal Biology 122 (2018), S. 293-303 [Letzter Zugriff 08.12.2025]

Szczepkowski, A.; Nicewicz, D.; Koczoń, P.: the relationship between tree health and chemical composition of beech (fagus sylvatica l.) and oak (quercus robur l.) wood of polish provenances. Silv. Colendar. Rat. Ind. Lignar. 6 Nr. 3 (2007), S. 77-88

Tacer-Caba, Z.; Varis, J. J.; Mikkonen, K. S.: Comparison of novel fungal mycelia strains and sustainable growth substrates to produce humidity-resistant biocomposites. Materials & Design 192 (2020). Verfügbar unter: https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108728 [Letzter Zugriff: 18.02.2026]

Thao, N. T. T.; Ngoc, N. T.; Tien, N. H.; Thien, P. L. M.; Thu, P. A.; Vinh, N. H.: research on utilizing coffee grounds as a substrate for cultivating grey oyster mushrooms (pleurotus sajor-caju) in urban areas. Thu Dau Mot University Journal of Science 6 (2024), Nr. 2, S. 220-228. Verfügbar unter: 10.37550/tdmu.EJS/2024.02.549 [Letzter Zugriff: 09.02.2026]

Urben, A. F.: Produção de cogumelos por meio de tecnologia chinesa modificada: biotecnologia e aplicações na agricultura e na saúde, 2017

Viel, M.; Collet, F.; Prétot, S.; Lanos, C.: Hemp-Straw Composites: Gluing Study and Multi-Physical Characterizations. Materials 12 (2019), Nr. 8. Verfügbar unter: 10.3390/ma12081199 [Letzter Zugriff 11.11.2025]

Volk, R.; Hebel, D. E.; Schroter, M.; Saeidi, N.; Schultmann, F.; Steffl, S.; Alireza, J: Life cycle assessment of mycelium-based composite materials. Resources, Conservation & Recycling 205 (2024).

Voutetaki, M. E.; Mpalaskas, A. C.: Natural Fiber-Reinforced Mycelium Composite for Innovative and Sustainable Construction Materials. Fibers 12 (2024), Nr. 7 Verfügbar unter: https://doi.org/10.3390/fib12070057 [Letzter Zugriff: 02.03.2026]

Wachtel-Galor, S.; Yuen, J.; Buswell, J.A.: Benzie IFF Herbal Medicine: Biomolecular and Clinical Aspects. 2nd Edition, CRC Press, Florida, 2011

Weber, H.: Mikrobiologie der Lebensmittel Grundlagen. Hamburg: Behr´s, 2010

Xanthos, D.; Walker, T. R.: International policies to reduce plastic marine pollution from single-use plastics (plastic bags and microbeads): A review. Marine Pollution Bulletin Nr. 118 (2017), S. 17-26. Verfügbar unter: https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.02.048 [letzter Zugriff 27.10.2025]

Yadav, M. K.; Ramchandra, R.: Evaluation of culture media, pH and temperature for mycelial growth of different strains of *Pleurotus spp*, Agric. Sci. Digest 34 (2014), S. 299–302. verfügbar unter: 10.5958/0976-0547.2014.01025.8 [Letzter Zugriff 06.10.2025]

Yang, L.; Hu, X.; Zhao Qin, Z.: Stiff substrate increases mycelium growth rate on surface. MRS Bulletin Impact Section 49 (2024), S. 1205–1216

Zhong, C.; Saito, K.: Simplified Performance Evaluation Methods for Cushioning Materials. Applied Mechanics and Materials 200 (2012), S. 136-142. Verfügbar unter: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.200.136 [Letzter Zugriff 05.01.2026]

WWF: Living planet report 2012 – Biodiversity, biocapacity and better choices, 2012 [Letzter Zugriff: 14.02.2026] Verfügbar unter: https://www.worldwildlife.org/publications/living-planet-report-2012-biodiversity-biocapacity-and-better-choices/

8 Tabellen – und Abbildungsverzeichnis

Tabelle 1: Gegenüberstellung der linearen Wirtschaft und der Kreislaufwirtschaft. Eigene Darstellung 8
Tabelle 2: Verwendete Rohstoffe und Chemikalien 23
Tabelle 3: Verwendete Geräte 24
Tabelle 4: Zusammensetzungen der Substratzusätze 28
Tabelle 5: Faktordesign der Hauptversuche 30
Tabelle 6: Versuchsplan für die Hauptversuche 30
Tabelle 7: Substratgewicht 31
Tabelle 8: Ergebnisse einfach beschreibende Prüfung und Intensitätsprüfung von Myzel basierten Verpackungen. BS = Buchenholzspäne; HS = Hanfstroh; WS = Weizenstroh 42
Tabelle 9: Ergebnisse der einfaktoriellen ANOVA zum Einfluss des Feinheitsgrades auf die Stabilität 50
Tabelle 10: Ergebnisse der einfaktoriellen ANOVA zum Einfluss des Feinheitsgrades auf die Durchdringung 50
Tabelle 11: Mittelwerte und Gruppeneinteilung aus dem Post-hoc-Tests nach Fisher für signifikant unterschiedliche Proben bei dem Attribut Stabilität 51
Tabelle 12: Mittelwerte und Gruppeneinteilung aus dem Post-hoc-Tests nach Fisher für signifikant unterschiedliche Proben bei dem Attribut Durchdringung 51
Tabelle 13: Mittelwerte und deren Standardabweichung der Ergebnisse des Schock Tests von den Substraten, welche mit Ganoderma lucidum beimpft wurden (BS = Buchenholzspäne; HS = Hanfstroh; WS = Weizenstroh) 52
Tabelle 14: Mittelwerte und deren Standardabweichung der Ergebnisse des Schock Tests von den Substraten, welche mit Pleurotus ostreatus beimpft wurden (BS = Buchenholzspäne; HS = Hanfstroh; WS = Weizenstroh) 54
Tabelle 15: Rohdaten des Schockwellentests 80
Tabelle 16: Rohdaten Intensitätsprüfung P. ostreatus 82
Tabelle 17: Rohdaten Intensitätsprüfung G. lucidum 83

Abbildung 1: Lineares Wirtschaftsmodell, eigene Darstellung nach Sariatli 2017 5
Abbildung 2: Schematische Spannungs-Dehnungs-Kurven von Kunststoffschäumen nach Miltz und Ramon (1990) 21
Abbildung 3: Vergleich Nullprobe [links] und Probe mit Substratzusatz (67 % Haferflocken und 33 % Weizenkleie) [rechts] 38
Abbildung 4: Vergleich der Durchwachsung des Myzels durch das Substrat (links = G. lucidum; rechts = P. ostreatus) 39
Abbildung 5: Entwicklung des Myzels bei Buchenholzspäne mittlerer Partikelgröße mit Ganoderma lucidum. v.l.: Tag 0, Tag 4, Tag 11 40
Abbildung 6: Entwicklung des Myzels bei Buchenholzspäne mittlerer Partikelgröße mit Pleurotus ostreatus. v.l.: Tag 0, Tag 4, Tag 18 41
Abbildung 7: Entwicklung des Myzels bei Hanfstroh grober Partikelgröße mit Ganoderma lucidum. v.l.: Tag 0, Tag 4, Tag 11 41
Abbildung 8: Entwicklung des Myzels bei Hanfstroh mittlerer Partikelgröße mit Pleurotus ostreatus. v.l.: Tag 0, Tag 4, Tag 18 42
Abbildung 9: Durchdringung und Stabilität der Substrate, welche mit G. lucidum kultiviert wurden (BS = Buchenholzspäne; HS = Hanfstroh; WS = Weizenstroh) 46
Abbildung 10: Durchdringung und Stabilität der Substrate, welche mit P. ostreatus kultiviert wurden (BS = Buchenholzspäne; HS = Hanfstroh; WS = Weizenstroh) 48
Abbildung 11: Ergebnisse des Schock Tests von den Substraten, welche mit Ganoderma lucidum beimpft wurden, BS = Buchenholzspäne; HS = Hanfstroh; WS = Weizenstroh 53
Abbildung 12: Ergebnisse des Schock Tests von den Substraten, welche mit Pleurotus ostreatus beimpft wurden, BS = Buchenholzspäne; HS = Hanfstroh; WS = Weizenstroh 55
Abbildung 13: Vorlage Prüfbogen Myzelbildung 77
Abbildung 14: Vorlage Prüfbogen Stabilität 78
Abbildung 15: Präperierte Behälter (links = Ganoderma lucidum; mitte = Pleurotus ostreatus; rechts = seitliche Ansicht der Behälter 79
Abbildung 16: Kunststoffbehälter mit Legobaustein-Platzhalter 79
Abbildung 17: Anbringung der Produkte an der Testbox 82

9 Anhang

Hochschule Neubrandenburg
University of Applied Sciences

Pilzmyzelbasiertes Polstermaterial

Seite: 1 /3
Datum:
Name:

Bitte beurteilen Sie den visuell erkennbaren Durchdringungsgrad zum Zeitpunkt der Beobachtung des jeweiligen Materials auf einer Skala von 0 bis 10. Vergleichen Sie die Substrate nicht miteinander, sondern bewerten Sie jedes Substrat für sich.

0 = keine sichtbare Myzelbildung im Substrat

5 = sichtbare Myzelbildung in mehreren Bereichen des Substrats, jedoch mit klar erkennbaren, nicht durchwachsenen Zonen

10 = vollständige, gleichmäßige sichtbare Myzelbildung im gesamten Substrat

Proben-Nummer/Substrat	Durchdringung
387	☐ 0 ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐ 10
296	☐ 0 ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐ 10
356	☐ 0 ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐ 10
097	☐ 0 ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐ 10
238	☐ 0 ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐ 10
917	☐ 0 ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐ 10
863	☐ 0 ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐ 10

Abbildung 13: Vorlage Prüfbogen Myzelbildung

Hochschule Neubrandenburg
University of Applied Sciences

Pilzmyzelbasiertes Polstermaterial

Datum:

Name:

Ziehen Sie das Ihnen vorliegende pilzmyzelbasierte Polstermaterial mit den Händen auseinander. Beurteilen Sie den Kraftaufwand beim Auseinanderreißen des jeweiligen Materials auf einer Skala von 0 bis 10. Vergleichen Sie die Substrate nicht miteinander, sondern bewerten Sie jedes Substrat für sich.

0 = Das Material lässt sich mit sehr geringer Kraft auseinanderziehen

5 = Das Material lässt sich mit mittlerem Kraftaufwand auseinanderziehen

10 = Das Material lässt sich nur mit sehr starker Kraft auseinanderziehen

Proben-Nummer/Substrat	Kraftaufwand
387	☐ 0 ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐ 10
296	☐ 0 ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐ 10
356	☐ 0 ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐ 10
097	☐ 0 ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐ 10
238	☐ 0 ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐ 10
917	☐ 0 ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐ 10
863	☐ 0 ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐ 10

Abbildung 14: Vorlage Prüfbogen Stabilität

Abbildung 15: Präperierte Behälter (links = *Ganoderma lucidum*; mitte = *Pleurotus ostreatus*; rechts = seitliche Ansicht der Behälter

Abbildung 16: Kunststoffbehälter mit Legobaustein-Platzhalter

Tabelle 15: Rohdaten des Schockwellentests

	G. lucidum				*P. ostreatus*		
	X-Achse	**Y-Achse**	**Z-Achse**		**X-Achse**	**Y-Achse**	**Z-Achse**
	15,94	15,94	15,94		12,67	5,57	15,94
	15,36	15,94	15,94		2,69	10,37	15,94
	8,64	15,94	15,94		5,38	7,87	15,94
	5,18	15,94	15,94	**WS fein**	15,94	2,11	15,94
	4,99	15,94	15,94		0	15,94	15,94
	15,36	12,1	15,94	**WS**	4,03	15,94	15,94
	15,94	14,78	15,94	**mittel**	3,26	15,94	15,94
WS fein	15,94	8,83	0		5,38	15,94	15,94
	15,94	15,94	5,95		3,46	15,94	15,94
	15,94	15,94	5,76	**WS grob**	5,38	9,41	15,94
	15,94	15,94	4,8		8,64	12,86	15,94
WS mittel	15,94	15,94	5,76		7,3	15,94	15,94
WS grob	7,1	9,79	15,94		7,87	15,94	15,94
	3,26	15,94	15,94		9,98	15,94	15,94
	15,94	13,25	15,94	**HS fein**	2,11	15,94	15,94
	14,02	2,11	15,94		11,52	3,07	15,94
	14,78	15,94	15,94		9,6	15,94	15,94
	15,94	1,34	15,94		13,25	15,94	15,94
	12,29	15,94	15,17		2,11	15,94	15,94
HS fein	15,94	15,94	15,94		6,72	15,94	15,94
	15,94	8,45	15,94	**HS mittel**	15,94	15,94	15,94
	4,03	15,94	15,94		15,94	15,94	15,94
	11,52	15,94	15,94		5,76	15,94	15,94
HS mittel	15,94	15,94	15,94		10,75	15,94	15,94
	12,1	15,94	15,94	**HS grob**	3,26	15,94	15,94
	13,25	15,94	15,94		7,87	15,94	15,94
HS grob	8,64	1,73	15,94		10,75	12,29	15,94
	2,5	15,94	15,94		15,94	15,94	15,94
	11,33	15,94	15,94		15,94	0,77	15,94
	15,94	2,69	4,42	**BS grob**	15,94	15,94	15,94
BS grob	5,57	15,94	15,36	**BS mittel**	3,26	15,74	15,94

	3,46	15,94	12,67		6,34	6,72	15,94
	11,9	15,94	15,17		8,06	15,94	15,94
	15,74	9,41	15,94		6,14	15,94	15,94
	9,98	15,94	15,94		4,99	13,06	15,94
	14,78	15,94	15,94		15,94	12,29	15,94
	14,59	15,94	15,94	**BS fein**	11,71	12,48	15,94
	8,26	15,94	15,94		12,67	5,57	15,94
	13,06	15,94	15,94		2,69	10,37	15,94
	0,58	15,94	15,17		5,38	7,87	15,94
BS mittel	15,94	15,94	15,94	**WS fein**	15,94	2,11	15,94
	11,71	15,94	15,94		0	15,94	15,94
	15,94	13,25	15,94	**WS**	4,03	15,94	15,94
	14,78	2,11	15,94	**mittel**	3,26	15,94	15,94
	5,95	15,94	15,94		5,38	15,94	15,94
	15,94	1,34	15,94		3,46	15,94	15,94
	15,94	15,94	15,17				
BS fein	11,33	15,94	15,94	**WS grob**			

Abbildung 17: Anbringung der Produkte an der Testbox

Tabelle 16: Rohdaten Intensitätsprüfung *P. ostreatus*

P. ostreatus									
Stabilität	HS grob	HS mittel	HS fein	BS grob	BS mittel	BS fein	WS grob	WS mittel	WS fein
Prüfperson 1	2	6	9	0	0	0	0	3	1
Prüfperson 2	1	3	8	0	0	0	0	1	0
Prüfperson 3	3	4	7	0	0	0	0	2	0
Prüfperson 4	3	4	7	0	0	0	0	2	2
Prüfperson 5	2	3	8	0	0	0	0	2	2
Prüfperson 6	1	4	9	0	0	0	0	2	1
Mittelwert	**2**	**4**	**8**	**0**	**0**	**0**	**0**	**2**	**1**
Standardabweichung	**0,82**	**1,00**	**0,82**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,58**	**0,82**
Durchdringung									
Prüfperson 1	7	7	8	1	0	3	1	7	5

Prüfperson 2	4	8	10	0	0	4	3	8	2
Prüfperson 3	4	7	8	2	0	4	4	7	4
Prüfperson 4	5	8	7	2	0	2	1	7	4
Prüfperson 5	5	6	8	0	0	1	2	7	4
Prüfperson 6	5	6	7	1	0	4	1	6	5
Mittelwert	**5**	**7**	**8**	**1**	**0**	**3**	**2**	**7**	**4**
Standardabweichung	**1,00**	**0,82**	**1,00**	**0,82**	**0,00**	**1,15**	**1,15**	**0,58**	**1,00**

Tabelle 17: Rohdaten Intensitätsprüfung *G. lucidum*

G. lucidum									
Stabilität	HS grob	HS mittel	HS fein	BS grob	BS mittel	BS fein	WS grob	WS mittel	WS fein
Prüfperson 1	9	9	8	3	2	0	1	0	4
Prüfperson 2	9	10	8	5	3	0	0	0	4
Prüfperson 3	8	9	7	4	1	0	2	0	6
Prüfperson 4	7	9	9	4	2	0	3	0	2
Prüfperson 5	7	8	7	4	1	0	0	0	4
Prüfperson 6	8	9	9	4	3	0	0	0	4
Mittelwert	**8**	**9**	**8**	**4**	**2**	**0**	**1**	**0**	**4**
Standardabweichung	**0,82**	**0,58**	**0,82**	**0,58**	**0,82**	**0,00**	**1,15**	**0,00**	**1,15**
Durchdringung									
Prüfperson 1	10	10	10	6	7	2	7	0	6
Prüfperson 2	8	10	10	9	6	3	5	0	7
Prüfperson 3	8	10	10	9	6	4	5	0	6
Prüfperson 4	10	10	10	8	4	1	3	0	6
Prüfperson 5	10	10	10	8	7	1	5	0	5
Prüfperson 6	8	10	10	8	6	1	5	0	6
Mittelwert	**9**	**10**	**10**	**8**	**6**	**2**	**5**	**0**	**6**
Standardabweichung	**1,00**	**0,00**	**0,00**	**1,00**	**1,00**	**1,15**	**1,15**	**0,00**	**0,58**

Erklärung über die selbstständige Anfertigung der Arbeit

Hiermit versichere ich, dass die vorliegende Arbeit von mir selbstständig und ohne unerlaubte Hilfe angefertigt worden ist und ich keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Textstellen, die wörtlich oder annähernd wörtlich aus Veröffentlichungen entnommen wurden, sind durch Zitate als solche gekennzeichnet.
Ich erkläre weiterhin, dass die abgegebene digitale Version mit der eingereichten schriftlichen Arbeit übereinstimmt.

Neubrandenburg, 03.03.2026

Ort, Datum

Unterschrift