

Neophytische Baumarten und ihre Eignung zur Herstellung von Pilzkompositen auf Basis von drei Weißfäulepilzen

Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des Grades

B.Sc. in Forstwissenschaft und Ressourcenmanagement

an der TUM School of Life Sciences der Technischen Universität München.

Eingereicht am: 05.03.2023

Eingereicht von: Moritz Mitterer (Matrikel-Nr. 03722956)

Erstprüfer: Prof. Dr. J. Philipp Benz

Zweitprüfer: Prof. Dr. Klaus Richter

Betreuet von: Dr. Tanja Karl

Professur für Pilz-Biotechnologie in der Holzwissenschaft

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die von mir eingereichte Abschlussarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Freising, 05.03.2023 Moritz Mitterer

Ort, Datum, Unterschrift

Danksagung

Zuerst möchte ich mich herzlich bei Prof. Dr. J. Philipp Benz für die Möglichkeit, diese Bachelorarbeit zu schreiben, bedanken. Insbesondere die Freiheit, die mir bei der Themenwahl gelassen wurde, weiß ich sehr zu schätzen. Ein großes Dankeschön geht auch an Dr. Tanja Karl für die Einweisung in die Labortätigkeiten, sowie die großartige Betreuung während des gesamten Forschungsprozesses. Auch beim Rest des Teams der Professur für Pilzbiotechnologie in der Holzwissenschaft, das mir stets bei offenen Fragen geholfen hat, bedanke ich mich sehr. Ein weiteres Dankeschön möchte ich an Roland Braun und Frank Moosmann richten, die mir eine große Hilfestellung bei der Zerkleinerung des Holzes geleistet haben. Nicht zuletzt danke ich Magdalena Bock für die ausführliche Einweisung in die Bedienung der Universalprüfmaschine und in die damit verbundenen Tests der Komposite.

Abstract

Pilzkomposite stellen einen vielversprechenden Werkstoff zur Substitution von expandiertem Polystyrol (EPS) dar und könnten in Zukunft eine wichtige Rolle in einer biobasierten Kreislaufwirtschaft einnehmen. Zahlreiche Kombinationsmöglichkeiten für Substrat- und Pilzarten mit ihren Vorzügen wurden bereits in diesem Forschungsfeld beschrieben. Dennoch wurde bisher kaum untersucht, ob und wie es sich auf die Materialeigenschaften eines Komposites auswirkt, wenn Pilzart und Substrat in der Natur ursprünglich nicht gemeinsam vorkommen. In dieser Arbeit wurde deshalb der Forschungsfrage nachgegangen, inwiefern sich neophytische Baumarten zur Herstellung von Pilzkompositen in Kombination mit einheimischen Weißfäulepilzen eignen. Als Baumarten wurden Roteiche und Robinie ausgewählt und als Pilzarten *Trametes versicolor* und *Fomes fomentarius*. Als Referenz wurden in diesem Zusammenhang auch die Buche als heimische Baumart, sowie der gängige Laborpilz *Ganoderma sessile* untersucht. Somit ergaben sich neun Kombinationsmöglichkeiten aus Pilz- und Holzart. Das Wuchsverhalten der Pilze wurde zunächst auf kleinen Holzproben (Wafeln) bestimmt. Im Anschluss daran wurden Komposite aus den Pilzen und Sägespänen der Baumarten hergestellt und auf ihre Hygroskopizität sowie Druckfestigkeit untersucht. Auf den Wafeln der Neophyten zeigten *T. versicolor* und *F. fomentarius* eine signifikant geringere Wuchsgeschwindigkeit, als auf unserer heimischen Buche. Dieses Ergebnis lässt sich aber nicht auf die Materialeigenschaften der Komposite übertragen. Die Hygroskopizität war für Komposite aus einheimischen Weißfäulepilzen und neophytischen Baumarten gleich stark ausgeprägt, wie für die restlichen Komposite. Auch im Kompressionsversuch zeigten sie, wie die restlichen Komposite, bei höherer Spannung eine größere Druckfestigkeit als die zusätzlich geprüften EPS-Proben. Komposite mit *T. versicolor* zeigten nach einer Belastung mit 2000N zum Teil ein vollständig elastisches Verhalten. Die Ergebnisse dieser Studie sprechen für die Eignung von neophytischen Baumarten zur Herstellung von Pilzkompositen mit einheimischen Weißfäulepilzen. Somit ergeben sich keine erkennbaren Einschränkungen für Kombinationen aus verschiedenen Weißfäulepilzen und Holzarten.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	VII
Tabellenverzeichnis.....	X
Symbole und Abkürzungen	XI
1. Einleitung	1
2. Theoretischer Rahmen	3
2.1. Begriffserklärungen	3
2.1.1. Neophyten.....	3
2.1.2. Weißfäulepilze.....	3
2.1.3. Pilzkomposite	3
2.2. Die Bedeutung von Pilzen für die Menschheit	4
2.3. Eigenschaften von Pilzkompositen	5
2.4. Anwendungsbereiche von Pilzkompositen	6
2.5. Branchenführer	6
2.6. Verwendete Holz- und Pilzarten für die nachfolgenden Versuche	7
2.7. Ableitung der Hypothesen	9
3. Methodik	10
3.1. Vorbereitungen.....	10
3.1.1. Steriles Arbeiten.....	10
3.1.2. Ansetzen von Nährmedium	10
3.1.3. Vervielfältigung des Pilzmyzels	11
3.2. Wachstumsversuche auf Holzwafern	11
3.3. Herstellung der Komposite	12
3.3.1. Körnerbrut	12
3.3.2. Gewinnung der Sägespäne	12
3.3.3. Herstellung von Substrat	13
3.3.4. Animpfen des Substrates	13
3.3.5. Herstellung der Kompositformen	14
3.3.6. Befüllen der Kompositformen	14

3.3.7.	Drehen der Komposite	15
3.3.8.	Wiegen und Trocknung der Komposite.....	15
3.4.	Bestimmung der Hygroskopizität.....	15
3.5.	Bestimmung der Druckfestigkeit.....	15
3.6.	Verwendete Software und statistische Auswertung	16
4.	Ergebnisse	17
4.1.	Wachstumsversuche der Holzwafer	17
4.1.1.	Wuchsgeschwindigkeit.....	17
4.1.2.	Hyphendurchmesser	19
4.2.	Kompositversuche.....	21
4.2.1.	Hygroskopizität der Komposite.....	22
4.2.2.	Mechanische Eigenschaften der Komposite.....	23
4.2.3.	Spannungs-Dehnungs-Diagramm	23
4.2.4.	Reduktion der Probenhöhen.....	28
5.	Diskussion.....	31
6.	Fazit	38
	Literaturverzeichnis	40
	Anhang.....	45

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Es werden mögliche Anwendungen für pilzmyzelbasierte Kompositmaterialien als Leder (a), Akustik-Modul (b) und Verpackung (c) dargestellt.	7
Abbildung 2:	Die durchschnittlichen Wuchsgeschwindigkeiten der verschiedenen Kombinationen aus Pilz- und Holzart werden in $\mu\text{m/h}$ dargestellt. Die Pilzarten <i>G. sessile</i> (rosa), <i>T. versicolor</i> (gelb) und <i>F. fomentarius</i> (grün) werden farblich voneinander abgegrenzt. Der Mittelwert jeder Gruppe sowie der Standardfehler innerhalb der Gruppe wird auf Grundlage aller Messwerte innerhalb einer Gruppe dargestellt. Signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen werden mittels verschiedener Buchstaben dargestellt. (Tukey, $p < 0.05$, $n = 8$ pro Gruppe).	18
Abbildung 3:	Es wird das ausgebildete Pilzmyzel auf den Wafern mit <i>G. sessile</i> (a), <i>T. versicolor</i> (b) und <i>F. fomentarius</i> (c) nach Beendigung der Wachstumsversuche dargestellt. Die Markierungen auf den Holzwafern weisen einen Abstand von 5mm zueinander auf. Von links nach rechts sind jeweils die Holzarten in der Reihenfolge Robinie, Buche und Roteiche aufgereiht.	19
Abbildung 4:	Die durchschnittlichen Hyphendurchmesser der verschiedenen Kombinationen aus Pilz- und Holzart werden in μm dargestellt. Die Pilzarten <i>G. sessile</i> (rosa), <i>T. versicolor</i> (gelb) und <i>F. fomentarius</i> (grün) werden farblich voneinander abgegrenzt. Der Mittelwert jeder Gruppe sowie der Standardfehler innerhalb der Gruppe wird auf Grundlage aller Messwerte innerhalb einer Gruppe dargestellt. Signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen werden mittels verschiedener Buchstaben dargestellt. (Tukey, $p < 0.05$, $n = 8$ pro Gruppe).	20
Abbildung 5:	Die Hyphenfront von <i>G. sessile</i> auf Robinie (a) und <i>T. versicolor</i> auf Robinie (b) wird unter achtfacher Vergrößerung dargestellt.	20
Abbildung 6:	Es wird die durchschnittliche prozentuale Gewichtszunahme der verschiedenen Pilzkomposite nach 72h bei 25°C und RH 70% dargestellt. Die Pilzarten <i>G. sessile</i> (rosa), <i>T. versicolor</i> (gelb) und <i>F. fomentarius</i> (grün) werden farblich voneinander abgegrenzt. Der Mittelwert jeder Gruppe sowie der Standardfehler innerhalb der Gruppe wird auf Grundlage aller Messwerte innerhalb einer Gruppe dargestellt. Es kann kein signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen festgestellt werden. ($p > 0.05$, $n = 5$ pro Gruppe).	22
Abbildung 7:	Darstellung der Pilzhaut, die sich während der Wachstumsphase an der Oberfläche der Pilzkomposite von <i>G. sessile</i> und Robinie (a), <i>T. versicolor</i> und Robinie (b) sowie <i>F. fomentarius</i> und Robinie (c) ausgebildet hat.	23
Abbildung 8:	Im Spannungs-Dehnungs-Diagramm werden die Spannungs-Dehnungs-Kurven für jeweils eine repräsentative Probe aus einer Gruppe mit drei Proben dargestellt.	24
Abbildung 9:	Im Spannungs-Dehnungs-Diagramm wird jeweils die Spannungs-Dehnungs-Kurve einer repräsentativen Probe aus einer Gruppe mit drei Proben dargestellt. Die Gruppen werden nach der Kombination von <i>F. fomentarius</i> mit Roteiche und Robinie unterschieden.	25

Abbildung 10:	Im Spannungs-Dehnungs-Diagramm wird jeweils die Spannungs-Dehnungs-Kurve einer repräsentativen Probe aus einer Gruppe mit drei Proben dargestellt. Die Gruppen werden nach der Kombination von <i>G. sessile</i> mit Roteiche, Robinie und Buche unterschieden.	26
Abbildung 11:	Im Spannungs-Dehnungs-Diagramm wird jeweils die Spannungs-Dehnungs-Kurve einer repräsentativen Probe aus einer Gruppe mit drei Proben dargestellt. Die Gruppen werden nach der Kombination von <i>T. versicolor</i> mit Roteiche, Robinie und Buche unterschieden.	27
Abbildung 12:	Der Grad der Krümmung vor der Durchführung des Kompressionsversuches wird für die Komposite von <i>F. fomentarius</i> und Roteiche (a), <i>G. sessile</i> und Buche (c) sowie <i>T. versicolor</i> und Roteiche (e) dargestellt. Nach Durchführung des Kompressionsversuches gibt es für <i>F. fomentarius</i> und Roteiche keinen sichtbaren Bruch (b), für <i>G. sessile</i> und Buche einen sichtbaren Bruch (d) sowie für <i>T. versicolor</i> und Roteiche multiple sichtbare Brüche (f).	28
Abbildung 13:	Es wird die durchschnittliche prozentuale Reduktion der Probenhöhen der verschiedenen Gruppen sowie für EPS nach einer Belastung mit einer Standardkraft von 2000N dargestellt. Die Pilzarten <i>G. sessile</i> (rosa), <i>T. versicolor</i> (gelb) und <i>F. fomentarius</i> (grün) werden farblich voneinander abgegrenzt. Die durchschnittliche Reduktion der Probenhöhe ist bei EPS in grau gekennzeichnet. Der Mittelwert jeder Gruppe sowie der Standardfehler innerhalb der Gruppe wird auf Grundlage aller Messwerte innerhalb einer Gruppe dargestellt. Es kann ein signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen festgestellt werden. (Tukey, $p < 0.05$, $n = 3$ pro Gruppe).	29
Abbildung 14:	Es wird die Ausgangshöhe der EPS-Probe vor Durchführung des Kompressionsversuches (a) sowie die Reduktion in der Höhe durch plastische Verformung nach Durchführung des Kompressionsversuches dargestellt (b).	30
Abbildung 15:	Es werden die Spannungs-Dehnungs-Kurven für drei Proben aus der Kombination von <i>F. fomentarius</i> und Roteiche im Spannungs-Dehnungs-Diagramm dargestellt. Die drei Proben sind in Blau, Orange und Grau dargestellt.	45
Abbildung 16:	Es werden die Spannungs-Dehnungs-Kurven für drei Proben aus der Kombination von <i>F. fomentarius</i> und Robinie im Spannungs-Dehnungs-Diagramm dargestellt. Die drei Proben sind in Blau, Orange und Grau dargestellt.	46
Abbildung 17:	Es werden die Spannungs-Dehnungs-Kurven für drei Proben aus der Kombination von <i>G. sessile</i> und Roteiche im Spannungs-Dehnungs-Diagramm dargestellt. Die drei Proben sind in Blau, Orange und Grau dargestellt.	47
Abbildung 18:	Es werden die Spannungs-Dehnungs-Kurven für drei Proben aus der Kombination von <i>G. sessile</i> und Robinie im Spannungs-Dehnungs-Diagramm dargestellt. Die drei Proben sind in Blau, Orange und Grau dargestellt.	48
Abbildung 19:	Es werden die Spannungs-Dehnungs-Kurven für drei Proben aus der Kombination von <i>G. sessile</i> und Buche im Spannungs-Dehnungs-Diagramm dargestellt. Die drei Proben sind in Blau, Orange und Grau dargestellt.	49

Abbildung 20:	Es werden die Spannungs-Dehnungs-Kurven für drei Proben aus der Kombination von <i>T. versicolor</i> und Roteiche im Spannungs-Dehnungs-Diagramm dargestellt. Die drei Proben sind in Blau, Orange und Grau dargestellt.	50
Abbildung 21:	Es werden die Spannungs-Dehnungs-Kurven für drei Proben aus der Kombination von <i>T. versicolor</i> und Robinie im Spannungs-Dehnungs-Diagramm dargestellt. Die drei Proben sind in Blau, Orange und Grau dargestellt.	51
Abbildung 22:	Es werden die Spannungs-Dehnungs-Kurven für drei Proben aus der Kombination von <i>T. versicolor</i> und Buche im Spannungs-Dehnungs-Diagramm dargestellt. Die drei Proben sind in Blau, Orange und Grau dargestellt.	52
Abbildung 23:	Es werden die Spannungs-Dehnungs-Kurven für drei EPS-Proben im Spannungs-Dehnungs-Diagramm dargestellt. Die drei Proben sind in Blau, Orange und Grau dargestellt.	53
Abbildung 24:	Es wird ein Komposit von <i>T. versicolor</i> und Buche vor Durchführung des Kompressionsversuches mit keiner sichtbaren Krümmung dargestellt.	54

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Ausgangsmengen an Sägespänen.	13
Tabelle 2:	Anzahl der erzeugten Komposite für jede Kombinationsmöglichkeit.....	14
Tabelle 3:	Verwendete Abkürzungen für die Kombination aus Pilz- und Holzart.	17
Tabelle 4:	Die Wachstumsstage für die Körnerbruten, Substrate und Komposite werden dargestellt. Zudem wird die Anzahl der Tage angegeben, nach denen die Komposite gewendet wurden. Außerdem wird die relative Luftfeuchte und Temperatur während der Inkubation, sowie der Trockenzeitraum und die Trockentemperatur für die unterschiedlichen Komposite angegeben. Die Kombinationen aus Pilz- und Holzart werden mittels Buchstabenkürzel dargestellt.....	21

Symbole und Abkürzungen

Symbole	Parameter	Einheit
A	Fläche	(mm ²)
F	Kraft	(N)
ΔL	Längenänderung	(mm)
L_0	Anfangslänge	(mm)
ε	Dehnung	(%)
σ	Spannung	(MPa)

Abkürzungen

EPS	Expandiertes Polystyrol
ERH	Enemy Release Hypothesis
FB	Kombination aus <i>F. fomentarius</i> und Buche
FR	Kombination aus <i>F. fomentarius</i> und Robinie
FRE	Kombination aus <i>F. fomentarius</i> und Roteiche
GB	Kombination aus <i>G. sessile</i> und Buche
GR	Kombination aus <i>G. sessile</i> und Robinie
GRE	Kombination aus <i>G. sessile</i> und Roteiche
MBS	Myzel-basierte Schäume
MDF	Mitteldichte Faserplatte
OSB	Oriented Strand Board (Grobspanplatte)
PDA	Kartoffel Dextrose Agar
RH	Relative Luftfeuchte
TB	Kombination aus <i>T. versicolor</i> und Buche
TR	Kombination aus <i>T. versicolor</i> und Robinie
TRE	Kombination aus <i>T. versicolor</i> und Roteiche
VE-Wasser	vollentsalztes Wasser (doppelt destilliert)

1. Einleitung

Der Klimawandel stellt eine reale Gefahr für die Existenz der gesamten Menschheit dar. Bereits im Jahr 2007 bezeichnet der amerikanische Politiker und Umweltaktivist Al Gore, im Zuge seiner Rede beim Friedensnobelpreis, den Klimawandel mit alarmierenden Worten als ein Fieber, das weiter ansteigt (Al Gore, 2007). 15 Jahre später steigt die weltweite jährlich emittierte CO₂-Menge weiter an, auch wenn die Kurve sich in den letzten Jahren zunehmend abzuflachen beginnt (Statista, 2022). Von 1960 bis 2021 ist die weltweit jährlich emittierte CO₂-Menge von 9,4 auf 37,1 Milliarden Tonnen angestiegen (Statista, 2022). In Zeiten der Energiekrise und des Klimawandels wird der Umstieg von fossilen Energieträgern auf erneuerbare Energien und die nationale Selbstversorgung immer wichtiger. Die deutsche Bundesregierung hat in ihrer nationalen Bioökonomiestrategie festgelegt bis 2030 die Ressourcenbasis der Wirtschaft nachhaltiger zu gestalten und Deutschland zu einem Vorreiter in der Bioökonomie zu machen (Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2020). Kompositwerkstoffe auf Pilzmyzelbasis bieten die Möglichkeit, ein wichtiger Baustein dieser Strategie zu werden. Sie können einen Teil der erdölbasierten Produkte wie Plastik ersetzen und somit einen wichtigen Beitrag für unsere Gesellschaft leisten (Appels et al., 2019). Im Bereich der Kunststoffe macht Polystyrol einen Anteil von 10% an der Gesamtproduktion aus und ist somit die viertgrößte Gruppe innerhalb der Kunststoffe (Abts, 2020). Expandiertes Polystyrol (EPS), besser bekannt unter dem Handelsnamen Styropor, wird vornehmlich zur Schall- oder Wärmedämmung und als Verpackungsmaterial verwendet (Abts, 2020). Diese Produkte können gut durch Komposite auf Pilzmyzelbasis substituiert werden (Girometta et al., 2019). Pilzkomposite bieten den Vorteil, dass man für ihre Herstellung landwirtschaftliche, forstwirtschaftliche und industrielle Abfallprodukte verwenden kann, dass die entstandenen Produkte kompostierbar sind, sie geringere Treibhausgasemissionen verursachen und dass sie somit den Umstieg von einer erdölbasierten Wirtschaft zu einer biobasierten Kreislaufwirtschaft begünstigen (Girometta et al., 2019; Meyer et al., 2020). Für die Herstellung von Pilzkompositen werden hauptsächlich Weißfäulepilze verwendet, da sie im Gegensatz zu anderen Pilzen in der Lage sind, Lignin abzubauen (Sydor et al., 2022). Als Substrate, die den Pilzen das Wachstum ermöglichen, werden oft einjährige Pflanzen, Hart- oder Weichholz verwendet (Sydor et al., 2022). Diejenige Holzart, die in zahlreichen Studien am häufigsten verwendet wird, ist Kiefernholz, jedoch wird in vielen Studien die verwendete Holzart nicht weiter definiert (Sydor et al., 2022). In etwa 100 Studien wurden 70 verschiedene Pilzarten zur Herstellung von Pilzkompositen untersucht, wobei *Pleurotus ostreatus* und *Ganoderma lucidum* die am häufigsten erforschten Pilze in diesem Zusammenhang darstellen (Sydor et al., 2022). Da die Materialeigenschaften eines Pilzkomposites maßgeblich durch die Kombination aus Pilzart und Art des Substrates beeinflusst werden, besteht weiterer

Forschungsbedarf, um neue Kombinationen zu finden und bestehende zu verbessern (Sydor et al., 2022). Im Zuge des Klimawandels stellen fremdländische Baumarten eine Möglichkeit dar, das Baumartenportfolio zu erweitern und mit einheimischen Baumarten resilientere Wälder gegenüber zunehmenden Schadereignissen zu formen. In einer Studie von Menzel et al. (2018) wurde bereits die unterschiedliche arbuskuläre Mykorrhizierung von einheimischen Pflanzen und Neophyten nachgewiesen. Studien, die die Wechselwirkung von einheimischen holzzersetzenden Pilzen mit neophytischen Baumarten beschreiben, sind bisher allerdings nicht bekannt. Im Zuge dieser Arbeit soll deshalb der Forschungsfrage nachgegangen werden, inwiefern sich neophytische Baumarten zur Herstellung von Pilzkompositen mit einheimischen Weißfäulepilzen eignen. Dafür werden als fremdländische Baumarten Robinie (*Robinia pseudoacacia*) und Roteiche (*Quercus rubra*) verwendet und mit unserer einheimischen (Rot)buche (*Fagus sylvatica*) verglichen. Neben den zwei einheimischen Weißfäulepilzen *Trametes versicolor* und *Fomes fomentarius* wird mit *Ganoderma sessile* ein gängiger Laborpilz als Referenz verwendet, um die Eigenschaften der entstandenen Komposite besser beurteilen zu können. Im Verlauf dieser Arbeit werden verschiedene Experimente durchgeführt, um die Forschungsfrage zu beantworten. Zunächst wird die Wuchsgeschwindigkeit und Hyphenbreite der Pilze auf kleinen Holzstücken der verschiedenen Holzarten ermittelt. Anschließend werden Pilzkomposite aus Sägespänen der drei Holzarten und den drei Weißfäulepilzen hergestellt. Die entstandenen Komposite werden daraufhin in ihrer Hygroskopizität und Druckfestigkeit miteinander verglichen. Für die Druckfestigkeit wird zudem Styropor als Referenzwert betrachtet.

2. Theoretischer Rahmen

Die Forschungsfrage lautet, inwieweit sich neophytische Baumarten in Kombination mit einheimischen Weißfäulepilzen für die Herstellung von Pilzkompositen eignen. Zunächst werden die wichtigsten Begrifflichkeiten erläutert. Im weiteren Verlauf dieses Kapitels wird der aktuelle Forschungsstand zusammengefasst und der theoretische Hintergrund für diese Arbeit näher erläutert.

2.1. Begriffserklärungen

2.1.1. Neophyten

Als Neophyten werden gebietsfremde Pflanzen bezeichnet, die gewollt oder ungewollt nach 1492 (der „Entdeckung“ Amerikas durch Christoph Kolumbus) in Gebiete eingeführt wurden in denen sie ursprünglich nicht vorkamen (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2021). Neophyten können zum Teil einen invasiven Charakter aufweisen, das heißt, sie können heimische Pflanzen aus ihrem Verbreitungsgebiet verdrängen (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2021).

2.1.2. Weißfäulepilze

Grundlegend setzen sich die Zellwände aller Gefäßpflanzen neben anderen Bestandteilen aus Zellulosen, Hemizellulosen und Lignin zusammen (Kubicek, 2013). Weißfäulepilze haben die Fähigkeit diese Lignozellulosen abzubauen. Im Gegensatz zu den Braunfäulepilzen ist ihnen auch der Abbau von Lignin möglich (Kubicek, 2013). Das bei der Zersetzung durch die Braunfäule zurückbleibende Lignin ist namensgebend für diese Pilze (Kothe & Kothe, 1996). Bei der Weißfäule wird zwischen simultaner und selektiver Weißfäule unterschieden (Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), 2023a). Simultane Weißfäule zeichnet sich durch den simultanen Abbau in etwa gleichen Anteilen von Lignin, Hemizellulose und Zellulose aus. Bei der selektiven Weißfäule werden zunächst Lignin und Hemizellulosen abgebaut, so dass Zellulose zurückbleibt (WSL, 2023b). Die hellen Zellulosereste sind für die Namensgebung der Weißfäulepilze verantwortlich. Pilze spielen somit eine wichtige Rolle im Stoffkreislauf bei der Zersetzung pflanzlicher Biomasse (Kothe & Kothe, 1996).

2.1.3. Pilzkomposite

Unter Pilzkompositen versteht man einen Verbundwerkstoff aus Pilzmyzel in Kombination mit agrarforstwirtschaftlichen Abfallprodukten oder Industrieabfällen (Appels et al., 2019; Meyer & Rapp, 2020; Sydor et al., 2022). Beispiele für verwendete Abfallprodukte sind Stroh, Sägemehl, recyceltes Papier, Samenschalen oder Holzchips (Sydor et al., 2022). Aber auch Hanf und Flachs können verwendet werden (Elsacker et al., 2019). Generell lässt sich sagen,

dass ein Wachstumsmedium als geeignet angesehen werden kann, wenn es ausreichende Mengen an Stickstoff und Lignozellulosen enthält, um ein zügiges Wachstum des Pilzmyzels zu ermöglichen (Sydor et al., 2022). Das gewählte Substrat wird durch ein dreidimensionales Geflecht der Pilzhyphen zu einer festen Masse verbunden, dies beruht auf der natürlichen Eigenschaft der Pilze, Lignozellulosen abzubauen (Elsacker et al., 2019; Girometta et al., 2019). Ein Vorteil des mit Pilzmyzel angeimpften Substrates ist, dass es in jede beliebige Form wachsen kann (Material-Archiv, 2015). Um die Eigenschaften des Verbundwerkstoffes dauerhaft zu erhalten, wird dieser nach Beendigung des Wachstumsprozesses erhitzt, um das Pilzmyzel abzutöten (Elsacker et al., 2019).

2.2. Die Bedeutung von Pilzen für die Menschheit

Pilze werden schon seit tausenden von Jahren durch den Menschen als Nahrungsmittel und Droge verwendet (APA, 2019). Der Fliegenpilz gilt als das älteste Rauschmittel der Menschheit (APA, 2019). Auch die Heilwirkung von Pilzen ist in der Volksheilkunde schon seit langem bekannt, in der traditionellen chinesischen Medizin findet z.B. der Glänzende Lackporling (*Ganoderma lucidum*) seit ca. 3500 Jahren Anwendung gegen Schlaflosigkeit, Asthma und Magengeschwüre (Lelley, 2018). Die eigentliche Erforschung der Pilze startete aber erst vor wenigen hundert Jahren. Von geschätzten 6 Millionen Arten weltweit sind bis heute nur etwa 2% beschrieben (Taylor et al., 2014). Der italienische Naturforscher Peter Anton Micheli wird als Begründer der wissenschaftlichen Pilzkunde (Mykologie) angesehen, da ihm 1710 der Nachweis gelang, dass sich Pilze durch Sporen fortpflanzen (Lelley, 2018). Zu den größten Errungenschaften der Mykologie gehört sicherlich die Entdeckung von Antibiotika in Form von Penicillin durch Alexander Fleming im Jahr 1928 (Kück et al., 2009). Pilze haben aber nicht nur positive Aspekte für den Menschen, Giftpilze wie der Knollenblätterpilz können beim Verzehr tödlich sein, zudem vernichten Pilze noch heute 15 bis 20% der Welternte sowie der gelagerten Nahrungsmittel (Lelley, 2018; Suerbaum et al., 2020). In der Biotechnologie haben Pilze heutzutage eine breite Verwendung und helfen unter anderem bei der Herstellung von Säuren, Antibiotika, Enzymen und Vitaminen (Suerbaum et al., 2020). Ein Pilz, der schon seit sehr langer Zeit durch den Menschen gebraucht wird und auch noch heute eine wichtige Rolle in der Pilzbiotechnologie spielt, ist der Zunderschwamm (*Fomes fomenarius*). Er wurde schon von prähistorischen Menschen wie „Ötzi“ geschätzt, wegen seiner guten Entzündbarkeit und der Fähigkeit in ihm Glut zu transportieren (Meyer & Rapp, 2020). Aus dem Fruchtkörper wurden früher zudem Mützen und Kleider hergestellt und in der Volksmedizin wurde er wegen seiner blutstillenden Fähigkeit verwendet (Lelley, 2018; WSL, 2023a). Heute findet der Zunderschwamm in der Pilzbiotechnologie Anwendung bei der Herstellung von Pilzkompositen. Die Pilzbiotechnologie befasst sich als noch sehr junges Forschungsfeld unter

anderem mit der Erforschung von pilzmyzelbasierten Kompositwerkstoffen und ihrem Nutzen für die Gesellschaft (Pohl et al., 2022).

2.3. Eigenschaften von Pilzkompositen

In einer Studie von Yang et al. (2017) zeigte sich, dass die Materialeigenschaften von Pilzkompositen von verschiedenen Faktoren wie der Wahl der Wachstumsbedingungen, des Substrates, der Additive, der Pilzart und der Verarbeitung abhängen. Wenn Komposite im Zuge ihrer Verarbeitung gepresst werden, ist ein deutlicher Anstieg der Dichte festzustellen (Appels et al., 2019). So kann sich die Dichte bei Kaltpressung verdoppeln und bei Heißpressung mehr als verdreifachen (Appels et al., 2019). Dies führt wiederum dazu, dass von nicht gepressten zu kalt gepressten zu heiß gepressten Kompositen ein signifikanter Anstieg des E-Moduls und der Zugfestigkeit zu messen ist (Appels et al., 2019). In einer Studie zeigten Pelletier et al. (2017), dass heiß gepresste Pilzkomposite gleichwertige Eigenschaften wie MDF- und OSB-Platten aufweisen. Die Wahl der Pilzart hat zudem einen Einfluss darauf, wie homogen das Substrat durchwachsen wird und wie dick sich die Pilzmyzelhaut an der Oberfläche des Komposites ausbildet (Appels et al., 2019). In der Forschung zu Pilzkompositen werden Weißfäulepilze deutlich häufiger als Braunfäulepilze verwendet (Sydor et al., 2022). Zu den am meisten in Studien erwähnten Weißfäulepilzen zählen *Pleurotus ostreatus*, *Ganoderma lucidum* und *Trametes versicolor* (Sydor et al., 2022). Die Pilzmyzelhaut hat einen maßgeblichen Einfluss auf das mechanische Verhalten des Komposites sowie seine Absorptionsrate für Wasser (Hygroskopizität) (Appels et al., 2019). Pilzmyzel zeichnet sich durch seine hydrophobe Eigenschaft aus und beeinflusst daher die Hygroskopizität des Werkstoffes (Appels et al., 2019; Elsacker et al., 2019). Die Absorptionsrate von Wasser durch das Pilzkomposit ist wichtig, um die Langlebigkeit des Materials einzuschätzen, wenn es beispielsweise in Innenräumen als Dämmstoff verwendet werden soll (Elsacker et al., 2019). Verschiedene Substrate beeinflussen auch die Eigenschaften eines Komposites, so verleiht beispielsweise Stroh einem Komposit eine höhere Steifigkeit als Baumwolle, ist dafür aber weniger feuchtigkeitsbeständig (Appels et al., 2019). Komposite, die aus Sägemehl hergestellt werden, weisen im Vergleich mit stroh- und baumwollbasierten Kompositen ein dichteres Erscheinungsbild auf (Appels et al., 2019). In einer Studie von Vasatko et al. (2022) wurden Stroh, Sägemehl von Buche, Weizenkleie und gebleichter Zellstoff miteinander verglichen. Am vielversprechendsten zur weiteren Erforschung zeigten sich Zellstoff und Buchensägemehl mit einem zufriedenstellenden Gesamteindruck bei ausreichender Steifigkeit und Wachstumsdichte (Vašatko et al., 2022). Einen weiteren Vorteil von Buchensägemehl stellten die regionale Verfügbarkeit und die damit verbundenen geringen Transportkosten dar (Vašatko et al., 2022). Die Auswirkungen der Wahl

der Pilzart und des Substrates werden im weiteren Verlauf dieser Arbeit mit verschiedenen Experimenten untersucht.

2.4. Anwendungsbereiche von Pilzkompositen

Die Anwendungsbereiche von Pilzkompositen sind vielseitig und umfassen unter anderem Verpackung, Produktdesign und Architektur (Material-Archiv, 2015). Da im Verpackungsbereich keine hervorragenden mechanischen Eigenschaften nötig sind, können sie gut herkömmliche erdölbasierte Plastik-Verpackungen wie z.B. Styropor ersetzen (Ziegler et al., 2016). In einer Studie von Pohl et al. (2022) wurde gezeigt, dass Pilzkomposite aus Hanfschäben und Rapsstroh in der Lage sind mehr Kompressionskräfte aufzunehmen als Styropor, bevor eine Verformung eintritt. Styropor hat nach Aluminium die negativsten Auswirkungen auf die Umwelt was den Energiebedarf zur Herstellung und die freigesetzte CO₂-Menge betrifft (Abhijith et al., 2018). Pilzkomposite können somit den ökologischen Fußabdruck verbessern, da sie aus regionalen Abfallprodukten hergestellt werden können und vollständig biologisch abbaubar sind (Abhijith et al., 2018). Außerdem können sie Kohlenstoff binden und der Atmosphäre somit aktiv CO₂ entziehen (Sydor et al., 2022). Eine andere Möglichkeit ist der Einsatz des Werkstoffes zur Wärme- und Schalldämmung (Girometta et al., 2019). Myzel-basierte Schäume (MBS) weisen eine gute Wärmedämmung auf, im Vergleich mit anderen handelsüblichen Materialien ist die generelle Wärmeleitfähigkeit jedoch höher (Girometta et al., 2019). Die für Bauanwendungen wichtige Wasserabsorptionsrate der MBS nimmt ab, je dichter sich die Myzelschicht an der Oberfläche der Komposite ausbildet (Elsacker et al., 2019). Verglichen mit anderen Ausgangssubstraten wie Flachs oder Holz zeigt sich Hanf besonders vielversprechend für den Einsatz in MBS mit der geringsten Wasserabsorption und Wärmeleitfähigkeit (Elsacker et al., 2019). Pelletier et al. (2013) testeten in einer Studie verschiedene Materialien zur Herstellung von MBS-Platten und ihre Eignung zur Schallabsorption bei einer Spitzenfrequenz von 1000 Hz, die der kritischen Frequenz für die Absorption von Straßenlärm entspricht. Der Großteil der MBS-Platten schnitt besser ab als herkömmliche Schalldämmplatten aus Sperrholz oder Polyurethan (Pelletier et al., 2013). Selbst die schlechtesten MBS-Platten konnten noch 70-75% der Spitzenfrequenz absorbieren (Pelletier et al., 2013). Somit stellen MBS-Platten eine vielversprechende Alternative zu herkömmlichen Schalldämmplatten dar (Pelletier et al., 2013). Pilzkomposite können aber auch für Designzwecke verwendet werden wie z.B. zur Herstellung von Wandpaneelen und Lampenschirmen (Attias et al., 2019). Weitere Anwendungsmöglichkeiten gibt es in der Automobilindustrie, der Kunst oder als Ersatzstoff in der Textilindustrie (Sydor et al., 2022).

2.5. Branchenführer

Aktuell gibt es vor allem drei Firmen auf dem Markt, die Produkte auf Pilzmyzelbasis vertreiben, dazu zählen Mogu, Mycoworks und Ecovative LLC (Attias et al., 2019). Die

Herstellung von pilzmyzelbasierten Werkstoffen ist noch ein sehr junger Forschungs- und Wirtschaftszweig und die Firma Ecovative LLC ist Pionier in dieser Branche seit ihrer Gründung im Jahr 2007 (Ecovative LLC, 2023; Girometta et al., 2019). Die drei genannten Firmen bedienen unterschiedliche Märkte und so bietet Mycoworks beispielsweise ein Pilzleder an (siehe **Abb. 1a**), das vergleichbare Eigenschaften zu echtem Tierleder hat (MycoWorks, 2023). Mogu stellt ästhetische und funktionale Fliesen und Wandpaneele her, sowie Akustik-Module (siehe **Abb. 1b**) zur Schalldämmung (Mogu, 2022b). Ecovative LLC vertreibt über verschiedene Partnerunternehmen Verpackungsmaterial (siehe **Abb. 1c**), Leder und Lebensmittel auf Pilzmyzelbasis (Ecovative LLC, 2023).

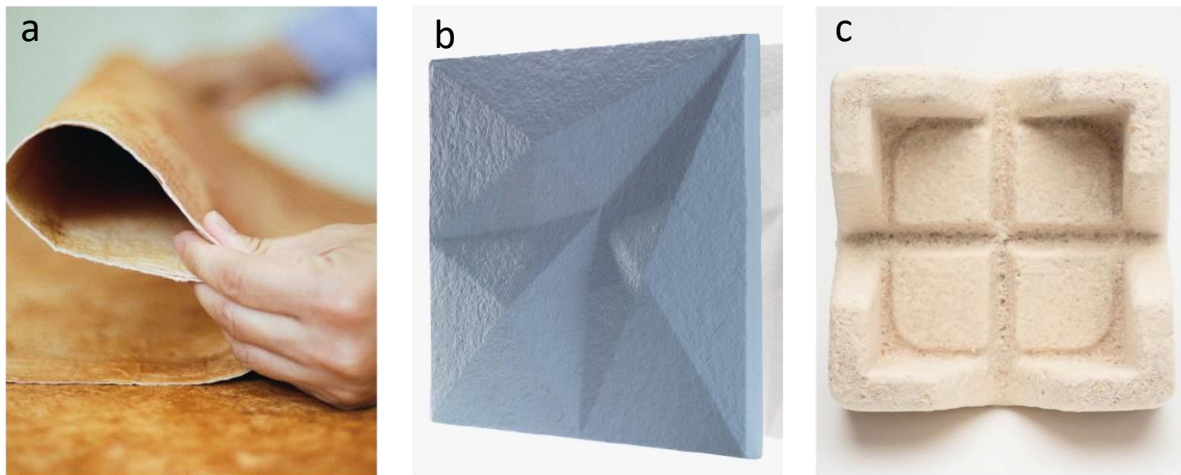


Abbildung 1: Es werden mögliche Anwendungen für pilzmyzelbasierte Kompositmaterialien als Leder (a) (MycoWorks, 2021), Akustik-Modul (b) (Mogu, 2022a) und Verpackung (c) (Ecovative LLC, 2019) dargestellt.

2.6. Verwendete Holz- und Pilzarten für die nachfolgenden Versuche

Um die Forschungsfrage zu beantworten, wurden die Baumarten Roteiche, Robinie und Buche als Substrate ausgewählt. Im Gegensatz zur Buche werden Robinie und Roteiche in Deutschland als fremdländische Baumarten bezeichnet, da ihr ursprüngliches Verbreitungsgebiet in Nordamerika liegt (Skowronek, 2020; Vor et al., 2015). Neben der Robinie, die in Deutschland als invasiver Neophyt betrachtet wird, ist die Invasivität der Roteiche aufgrund ihres überschaubaren Ausbreitungspotenzials als gering einzustufen (Skowronek, 2020; Vor et al., 2015). Die Roteiche gilt in der Forstwirtschaft als anbauwürdige Art, die die einheimische Baumartenpalette erweitern kann (Vor et al., 2015). Sie hat ein breites Standortspektrum und übertrifft die Wachstumsleistung der einheimischen Eichenarten deutlich (Vor et al., 2015). Für den erwarteten Klimawandel ergibt sich für den Anbau der Roteiche in Bayern eine positive Prognose (Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), 2020). Das Holz der Roteiche unterscheidet sich jedoch vom Holz unserer anderen heimischen Eichenarten durch eine geringere Dauerhaftigkeit (LWF, 2020). Auch für die

Robinie ist die Prognose im Klimawandel positiv (LWF, 2020). Aufgrund ihrer Invasivität vor allem auf sehr lichten Standorten und ihren bodenverändernden Eigenschaften durch Stickstofffixierung muss die Wahl des richtigen Standortes mit Bedacht erfolgen (LWF, 2020). Das Holz der Robinie ist sehr hart und witterungsbeständig und mit dem Holz unserer einheimischen Eichenarten zu vergleichen (LWF, 2020). Die Buche ist weit verbreitet und ist die vorherrschende Baumart in den natürlichen Waldgesellschaften Mitteleuropas (LWF, 2023). In Bayern ist kein anderer Laubbaum häufiger zu finden und auch für den Umbau der Wälder in klimatolerante, resiliente Mischwälder hat die Buche eine wichtige Bedeutung (LWF, 2023). Außerdem ist die Buche in Mitteleuropauropa der Laubbaum, der mit den meisten Pilzarten vergesellschaftet ist (LWF, 2023). Zu den vergesellschafteten Pilzen gehören unter anderem auch der Zunderschwamm (*Fomes fomentarius*) und die Schmetterlingstramete (*Trametes versicolor*) (Dörfelt, 2007). Für die Herstellung der Pilzkomposite in dieser Arbeit wurden drei Weißfäulepilze verwendet. Neben den eben erwähnten heimischen Weißfäulepilzen *F. fomentarius* und *T. versicolor* wurde auch *Ganoderma sessile* ausgewählt. *G. sessile* kommt ausschließlich in Nordamerika vor und wächst vornehmlich auf Harthölzern (Kuo, 2019). Er ernährt sich saprotroph und gelegentlich auch parasitär (Kuo, 2019). In China und Japan wird die Spezies *Ganoderma* seit tausenden von Jahren als Heilpilz verwendet und dort als Lingzhi bzw. Reishi bezeichnet (Lloyd et al., 2018). In der Forschung ist *G. sessile* ein häufig verwendeter Laborpilz und wird unter anderem auch von der Firma Ecovative LLC zur Herstellung von Pilzkompositen verwendet. In den folgenden Experimenten soll er als Referenzpilz zu den beiden einheimischen Weißfäulepilzen betrachtet werden. Der Zunderschwamm ist ein Vertreter der Porlinge, der konsolenförmige Fruchtkörper ausbildet und in Mitteleuropa vorzugsweise an Buchen auftritt, er ist ein Wundparasit und befällt geschwächte Bäume, kann aber auch einige Zeit auf Totholz überleben (WSL, 2023a). Seine Verbreitung reicht über Europa hinaus bis nach Nordamerika und Nordasien (WSL, 2023a). Seine kulturhistorische Verwendung wurde bereits erwähnt (vgl. Kap. 2.2). Die Schmetterlingstramete ist weltweit verbreitet, besiedelt vornehmlich Buchen und bildet dünnfleischige konsolenförmige Fruchtkörper an ihren Wirtsbäumen aus (Sattler, 2021). In asiatischen Ländern findet sie vor allem als Vitalpilz Verwendung (Sattler, 2021). Zur Herstellung von Pilzkompositen ist sie eine der häufiger verwendeten Arten (Sydor et al., 2022). Bei ihr konnte sowohl eine saprotrophe als auch parasitäre Lebensweise nachgewiesen werden (Bari et al., 2019).

2.7. Ableitung der Hypothesen

Wie bereits beschrieben, können sich Neophyten invasiv verhalten, wenn sie in ein neues Gebiet eingeführt werden. Der Konkurrenzvorteil von Neophyten gegenüber standortstypischen Pflanzen wird in der Wissenschaft versucht durch die Enemy Release Hypothesis (ERH) zu erklären (Keane & Crawley, 2002). Erstmals wurde diese Hypothese durch Williamson (1996) aufgestellt. Die Hypothese besagt, dass Pflanzen, die in eine neue Region eingeführt werden eine geringere Regulierung durch natürliche Feinde erfahren und sich somit stärker ausbreiten können (Keane & Crawley, 2002). Dies wird damit begründet, dass natürliche Antagonisten regulierend auf Pflanzen wirken, aber besser an einheimische Pflanzen angepasst sind. Somit haben Neophyten einen Vorteil gegenüber einheimischen Pflanzen und können sich leichter ausbreiten (Keane & Crawley, 2002). Wenn eine Pflanze in ein neues Ökosystem eingeführt wird, geht die Hypothese davon aus, dass ihre Feinde nicht mit eingeführt werden (Keane & Crawley, 2002). Außerdem sind die im neuen Ökosystem vorhandenen Antagonisten auf die einheimischen Arten spezialisiert und ein Überwechseln gilt als unwahrscheinlich (Keane & Crawley, 2002). Neben anderen natürlichen Feinden gibt es auch eine Vielzahl von Pilzen, die pathogen auf Pflanzen wirken. Ein prominentes Beispiel im Forst ist der Pilz *Erysiphe alphitoides*, besser bekannt als Eichenmehltau, der vornehmlich die Blätter jüngerer Eichen befällt und ihnen eine weißliche Farbe verleiht (Gross & Brännhage, 2020). Auch der zum Teil parasitäre Charakter von *T. versicolor* und *F. fomentarius* als Schwächeparasiten wurde bereits erwähnt. Für die weiteren Versuche wird auf Grundlage der ERH somit angenommen, dass diese Pilze schlechter auf Robinie und Roteiche als auf Buche wachsen. Somit wird auch für die Pilzkomposite aus den Substraten von Roteiche und Robinie eine geringere Ausbreitung des Pilzmyzels erwartet.

Somit werden hier folgende Hypothesen getestet:

- 1) Die Wuchsgeschwindigkeit von *T. versicolor* und *F. fomentarius* ist auf Roteichen- und Robinienholz geringer als auf Buchenholz.
- 2) Die Hygroskopizität ist bei den Kompositen von *T. versicolor* und *F. fomentarius* in Kombination mit Roteiche und Robinie stärker ausgeprägt als in Kombination mit Buche.
- 3) Komposite von einheimischen Pilzen in Kombination mit neophytischen Baumarten weisen eine höhere Plastizität auf.

3. Methodik

Um der Forschungsfrage nachzugehen, wurden unter Laborbedingungen drei Experimente durchgeführt. Robinie und Roteiche wurden als Neophyten und Buche als einheimische Baumart ausgewählt. Bei den verwendeten Weißfäulepilzen wurde sich für *Trametes versicolor* und *Fomes fomentarius* als einheimische Pilze entschieden. *Ganoderma sessile* wurde als gängiger Laborpilz als Referenz verwendet. Somit gab es für die nachfolgenden Versuche neun unterschiedliche Kombinationsmöglichkeiten von Pilzart und Holzart. Neben der Untersuchung der Wuchsgeschwindigkeiten und Hyphendurchmesser der drei ausgewählten Pilzarten auf festem Holz mit sogenannten Wafern, wurden auch die Materialeigenschaften der auf Basis von Sägespänen erzeugten Pilzkomposite untersucht. Hierbei wurde die Hygroskopizität als auch die Druckfestigkeit der Komposite näher betrachtet. Die Datenerhebung erfolgte quantitativ. Aufgrund der unterschiedlichen Wuchsgeschwindigkeiten der Pilze, wurden zur Fertigstellung der Komposite verschiedene Zeiträume benötigt. Somit konnte der für das Wachstum benötigte Zeitraum nicht als Kriterium zur Beurteilung der Materialeigenschaften herangezogen werden.

3.1. Vorbereitungen

3.1.1. Steriles Arbeiten

Substrate, Medien und Weckgläser wurden vor ihrer Verwendung autoklaviert. Die Handflächen und weitere Gegenstände wurden vor ihrer Verwendung unter der Sterilbank mit 80%-Ethanol desinfiziert. Verwendete Spatel, Löffel und Skalpelle wurden für jeden Arbeitsschritt unter der Sterilbank in 80%-Ethanol getaucht und anschließend abgeflammt. Plastikboxen (SAML A 5l & SAML A 11l, IKEA, Delft, Niederlande) und Kompositformen wurden vor ihrer Verwendung zusätzlich für 15 Minuten mit UV-Licht bestrahlt. Alle Arbeitsschritte, die den Umgang mit Pilzmyzel erforderten, wurden unter der Sterilbank durchgeführt.

3.1.2. Ansetzen von Nährmedium

Das Nährmedium für die Pilze wurde nach den Herstellerangaben mit 39 g pulverförmigen PDA (Carl Roth GmbH + Co. KG, Karlsruhe, Deutschland) und 1000ml VE-Wasser angesetzt und im Flüssigprogramm bei 121°C für 20 min autoklaviert (VX-150, Systec GmbH + CO. KG, Linden, Deutschland). Anschließend wurde das Nährmedium in Petrischalen gefüllt. Mit PDA befüllte Petrischalen (92 x 16 mm) werden nachfolgend als Agarplatten bezeichnet.

3.1.3. Vervielfältigung des Pilzmyzels

Die bereits am Lehrstuhl vorhandenen Pilzstämmen von *G. sessile* und *F. fomentarius* entstammen Harald Kellner und der TU Dresden, der Pilzstamm von *T. versicolor* wurde in Freising an der Isar gefunden. Mit den drei Pilzarten, die auf Agarplatten vorlagen, wurden unter der Sterilbank neue, noch unbewachsene Agarplatten angeimpft. Hierfür wurde ein spatelbreites, bereits mit Pilzmyzel durchwachsendes Agarstück mittig auf einer noch unbewachsenen Agarplatte platziert. Anschließend, wurden die beimpften Agarplatten geschlossen, mit Klebeband fixiert und bei 90% relativer Luftfeuchte (RH) und 26°C inkubiert (Konstantklima-Kammer HPP750eco; Memmert, Schwabach, Deutschland). Für jede Pilzart wurden drei Agarplatten angeimpft. Nach dem vollständigen Durchwachsen der Platten, wurden diese mit Parafilm verschlossen. Bis zu ihrer Verwendung wurden sie bei 4°C aufbewahrt, um den weiteren Wachstumsprozess des Pilzmyzels zu verlangsamen.

3.2. Wachstumsversuche auf Holzwafern

Um die Wuchsgeschwindigkeit von *T. versicolor*, *G. sessile* und *F. fomentarius* auf den Holzproben von Roteiche, Robinie und Buche zu bestimmen, wurden an der Holzforschung München von jeder Baumart 24 kleine Holzklötzchen (50 x 20 x 10 mm) angefertigt, die im Folgenden als Wafer bezeichnet werden. Die Wafer wurden der Länge nach alle 5 mm mit einem Bleistiftstrich markiert, um im weiteren Verlauf die Dokumentation der Wuchsgeschwindigkeit der Pilze zu erleichtern. Anschließend wurden sie für eine Stunde in VE-Wasser eingeweicht und dann im Flüssigprogramm für 20 min bei 121°C autoklaviert. Die Weckgläser (WECK-Sturzglas 580 ml Rundrand 100, WECK, Wehr-Öflingen, Deutschland) wurden vor ihrer Verwendung für 30 min bei 121°C autoklaviert. Zu Beginn des Experiments wurden 24 Weckgläser fingerbreit mit heißem PDA-Medium befüllt. Nachdem sie eine Stunde unter der Sterilbank abgekühlt waren, wurden jeweils 8 Weckgläser mit einer Pilzart angeimpft. Dafür wurde mit einem sterilen Holzstäbchen etwas Pilzmyzel aus einer durchwachsenen Agarplatte in ein Weckglas gegeben. Anschließend wurden die Weckgläser mit Deckel und atmungsaktivem Klebeband (Micropore Fließpflaster 1,25 cm x 9,1 m, 3M GmbH, Saint Paul, USA) verschlossen und bei 90% RH und 26°C inkubiert. Nach einer Woche wurden die Gläser unter der Sterilbank geöffnet und auf das gewachsene Pilzmyzel wurde jeweils ein von Hand zugeschnittenes Netz (Poly-Net Zwischenlagegitter 0238, Norddeutsche Seekabelwerke GmbH, Nordenham, Deutschland) gelegt. Dann wurden mittig in jedes Glas drei Wafer gestellt, einer von jeder Baumart, und gegen die Innenwand des Glases gelehnt. Nach dem erneuten Verschließen der Gläser mit Deckel und atmungsaktivem Klebeband wurden sie bei 90% RH und 26°C weiter inkubiert. Das Wachstum wurde, außer an den Wochenenden an jedem Tag in einem Excel-Sheet dokumentiert. Sobald für eine Pilzart die Hyphenfront eines einzelnen Wafers die 45 mm Linie passiert hatte, wurde der Wachstumsversuch abgebrochen. Das

erreichte Wachstum der Wafer aus jedem Glas wurde fotografisch mit einer Nikon D780 (Nikon AG, Tokyo, Japan) mit dem Objektiv Nikon AF-S Micro-NIKKOR 60 mm 1:2,8 G ED festgehalten. Anschließend wurde die Hyphenfront für jeden Wafer auch unter dem Binokular (S8 APO, Leica Microsystems GmbH, Wetzlar, Deutschland) bei 8-facher Vergrößerung mit der digitalen Mikroskopkamera (MC120 HD, Leica Microsystems GmbH, Wetzlar, Deutschland) fotografiert. Mit dem Programm ImageJ (Version 1.53t, National Institute of Health, Bethesda, USA) wurde aus diesen Bildern für jeden Wafer der durchschnittliche Durchmesser der Hyphen ermittelt. Dafür wurden pro Wafer drei Hyphen vermessen. Zum Schluss wurden die Wafer bei 65°C im Ofen (EB53, Jouan GmbH, Unterhaching, Deutschland) für 48 h getrocknet.

3.3. Herstellung der Komposite

Die drei verschiedenen Substrate auf Sägespanbasis wurden mit den Körnerbruten von *T. versicolor*, *F. fomentarius* und *G. sessile* beimpft. Um Komposite in den gewünschten Maßen zu erhalten, wurden angefertigte Formen und kleine Petrischalen mit den vom Pilzmyzel durchwachsenen Substraten befüllt. Die Komposite aus den Formen wurden im späteren Verlauf zur Bestimmung der Zugfestigkeit verwendet, die Komposite aus den Petrischalen zur Ermittlung der Hygroskopizität.

3.3.1. Körnerbrut

Um genügend Pilzbiomasse zu erzeugen, wurden für jeden Pilz acht Körnerbruten angesetzt. Dazu wurden jeweils 100 g Roggen in einem Plastikbehälter (Mycotainer, MycoGenetics, Everswinkel, Deutschland) für eine Stunde in ausreichend VE-Wasser gequollen, das überschüssige Wasser abgegossen und der gequollene Roggen, mit 2 g Gips vermengt. Der Plastikbehälter wurde anschließend mit dem Deckel verschlossen, wobei der Deckel ein kleines Loch aufwies, das mit atmungsaktivem Klebeband verschlossen wurde. Im nächsten Schritt wurden die 24 Körnerbruten autoklaviert. Nachdem die autoklavierten Behälter abgekühlt waren, wurden pro Pilzart 8 Körnerbruten angeimpft. Zum Animpfen jeder Körnerbrut wurden 12 spatelbreite, mit Pilzmyzel durchwachsene, Agarstücke in die Plastikbehälter gegeben. Anschließend wurden die Behälter wieder verschlossen und gut durchgeschüttelt, um die Pilzbiomasse möglichst gut zu verteilen. Die angeimpften Körnerbruten wurden dann bei 90% RH und 26°C inkubiert. Die Körnerbruten von *G. sessile* und *T. versicolor* wurden für elf Tage, die von *F. fomentarius* für 19 Tage inkubiert.

3.3.2. Gewinnung der Sägespäne

Von den benötigten Holzarten Robinie, Roteiche und Buche lagen zu Beginn jeweils ca. 5 kg als Brenn- und stärkeres Astholz vor. Diese wurden durch den Schreiner der Holzforschung München von Hand zu kleinen Würfeln, mit einer Kantenlänge von ca. 1,5 cm zersägt. Die

Holzwürfel wurden anschließend in einer Schlagkreuzmühle (SK1, Retsch GmbH, Haan, Deutschland) zu feinen Sägespänen zermahlen. Das verwendete Bodensieb, das als Reibeisen fungierte, wies eine Trapezlochung von 0,75 mm auf. Es wurden nach und nach jeweils ca. 5 Holzwürfel mit einer Hand voll pelletiertem Trockeneis in die Maschine gegeben und zermahlen. Das Trockeneis sollte eine Überhitzung der Mühle verhindern. Nach jeder Holzart wurde die Maschine gründlich gereinigt, um eine Vermischung zu vermeiden. Die Sägespäne wurden nach Abschluss der Mahlarbeiten in den Ofen gestellt bei 65°C. Es ergaben sich, wie in **Tabelle 1** zu sehen folgende Mengen an Sägespänen.

Tabelle 1: Ausgangsmengen an Sägespänen.

Robinienspäne	2,48 kg
Buchenspäne	2,75 kg
Roteichenspäne	2,8 kg

3.3.3. Herstellung von Substrat

Pro Holzart wurden 12, für die Pilzzucht entwickelte Tüten (PPD50/REH4+1/V22-49 Autoclave Bags, SacO2, Deinze, Belgien), mit Substrat befüllt. Jede Tüte wurde nach folgendem Mengenverhältnis angemischt: 200 g Sägespäne, 20 g Kartoffel-Glukose-Bouillon (Carl Roth GmbH + Co. KG, Karlsruhe, Deutschland), 20 g Maiskolbenpulver (J. Rettenmaier & Söhne GmbH + Co KG, Rosenberg, Deutschland), 8 g Gips (Modell-Gips Weiß, OBI, Wermelskirchen, Deutschland) und 4 g Calciumcarbonat (Carl Roth GmbH + Co. KG, Karlsruhe, Deutschland). Anschließend wurde zu jeder Tüte 400 ml VE-Wasser gegeben und autoklaviert.

3.3.4. Animpfen des Substrates

Für jede Holzart wurden jeweils 4 der 12 autoklavierten Tüten mit einer Pilzart beimpft und anschließend beschriftet. Somit wurden 8 Körnerbruten eines Pilzes auf 12 Tüten aufgeteilt. Das Pilzmyzel, das sich in den Körnerbruten gebildet hatte, wurde vor Zugabe in die Tüten mit einem sterilen Löffel aufgelockert. Nach Zugabe der Körnerbrut in die Tüten wurden diese drei Mal umgeschlagen und sorgfältig mit Klebeband verschlossen. Anschließend wurden die Tüten von Hand durchgeknetet, um das Pilzmyzel gut im Substrat zu verteilen. Daraufhin wurden die Tüten bei 90% RH und 26°C inkubiert. Von acht Körnerbruten mit *F. fomentarius* konnten lediglich sieben verwendet werden, da eine Körnerbrut mit einem Schimmelpilz kontaminiert und somit unbrauchbar war. Folglich wurden sieben Körnerbruten auf 12 Tüten aufgeteilt.

3.3.5. Herstellung der Kompositformen

Die benötigten Formen wurden mit einem Maß von 5,5 cm x 12 cm x 3 cm aus Pappkarton hergestellt. Die Formen wurden vollständig mit durchsichtigem Klebeband beklebt, um das Einwachsen des Pilzmyzels zu verhindern. Für jede Kombination aus Pilzart und Holzart wurden 3 Formen angefertigt, also insgesamt 27 Stück.

3.3.6. Befüllen der Kompositformen

Für die spätere Aufbewahrung der Komposite im Inkubator wurden große und kleine Plastikboxen verwendet. Die Boxen und Kompositformen wurden vor ihrer Verwendung mit Ethanol besprüht und für 15 min mit UV-Licht unter der Sterilbank sterilisiert. Jede Tüte wurde vor ihrer Verwendung mit Ethanol eingesprüht. Die mit Pilzmyzel vollständig durchwachsenen Tüten, wurden vor ihrer Verwendung händisch durchgeknetet, um das Substrat aufzulockern. Anschließend wurde für jede Kombinationsmöglichkeit aus Pilz- und Holzart das Substrat von Hand in die Formen und Petrischalen (35 x 10 mm) gefüllt. Für jede Kombination war es vorgesehen, drei Formen und fünf Petrischalen mit dem entsprechenden Substrat zu befüllen und es handfest anzudrücken. Aufgrund einer Kontamination mit Schimmelpilzen aller Tüten mit *F. fomentarius* und Buche konnten aus diesem Substrat leider keine Komposite hergestellt werden. In **Tabelle 2** ist die Anzahl der hergestellten Komposite dargestellt. Die befüllten Formen und Petrischalen wurden in die Plastikboxen gelegt, diese wurden anschließend per Deckel verschlossen und bei 90% RH und 26°C in den Inkubator gestellt.

Tabelle 2: Anzahl der erzeugten Komposite für jede Kombinationsmöglichkeit.

Art des Substrates	Anzahl der Komposite
<i>G. sessile</i> + Buche	3 Stk. in Formen, 5 Stk. in Petrischalen
<i>G. sessile</i> + Robinie	3 Stk. in Formen, 5 Stk. in Petrischalen
<i>G. sessile</i> + Roteiche	3 Stk. in Formen, 5 Stk. in Petrischalen
<i>T. versicolor</i> + Buche	3 Stk. in Formen, 5 Stk. in Petrischalen
<i>T. versicolor</i> + Robinie	3 Stk. in Formen, 5 Stk. in Petrischalen
<i>T. versicolor</i> + Roteiche	3 Stk. in Formen, 5 Stk. in Petrischalen
<i>F. fomentarius</i> + Buche	-
<i>F. fomentarius</i> + Robinie	3 Stk. in Formen, 5 Stk. in Petrischalen
<i>F. fomentarius</i> + Roteiche	3 Stk. in Formen, 5 Stk. in Petrischalen

3.3.7. Drehen der Komposite

Abhängig von der Wuchsgeschwindigkeit der Pilzart wurden die Komposite um 180° Grad gedreht, sobald sich ein dichtes Pilzmyzel an der Oberfläche ausgebildet hatte. Der richtige Zeitpunkt zum Drehen wurde zusätzlich durch die Betrachtung der Unterseiten der Petrischalen und des dortigen Wachstums der Pilzhyphen abgeschätzt. Die Pilzkomposite wurden unter der Sterilbank mit Hilfe eines Skalpells gewendet. Das Drehen der Komposite sollte die Sauerstoffzufuhr verbessern und zu einer gleichmäßigeren Ausbildung des Pilzmyzels an der Kompositoberfläche beitragen (Appels et al., 2019; Schritt et al., 2021). Anschließend wurden die Komposite in den Plastikboxen wieder in den Inkubator zurückgestellt bei 90% RH und 26°C. Dort verweilten sie noch für ein paar weitere Tage.

3.3.8. Wiegen und Trocknung der Komposite

Nach Abschluss des Wachstumsprozesses wurden die Komposite aus den Formen und Petrischalen genommen, nummeriert und gewogen. Anschließend wurden die Komposite im Ofen bei 105°C für drei Tage getrocknet und das Trockengewicht bestimmt.

3.4. Bestimmung der Hygroskopizität

Zur Bestimmung der Hygroskopizität wurden die getrockneten Komposite aus den Petrischalen bei 25°C und 70% RH für 72h inkubiert. Von jeder Kombination wurden jeweils alle 5 Stück verwendet. Für die Kombination aus *F. fomentarius* und Buche konnten aus den oben genannten Gründen keine Komposite verwendet werden (vgl. 3.3.6). Anschließend wurde das Gewicht der Komposite bestimmt.

3.5. Bestimmung der Druckfestigkeit

Von jeder Kombinationsmöglichkeit wurden 3 Komposite (5,5 cm x 12 cm x 3 cm) auf ihre Kompressionsfestigkeit getestet. Zu Vergleichszwecken wurden zudem 3 Styroporproben (EPS 040 WI/DI, Karl Bachl GmbH + Co. KG, Röhrnbach, Deutschland) auf die identischen Maße zugeschnitten und getestet. Der Test erfolgte, indem mittels einer Universalprüfmaschine (BT1-FR2.5TN.140, ZwickRoell GmbH & Co. KG, Ulm, Deutschland) der Druck auf jede Probe kontinuierlich auf eine Spitzenkraft von 2000N erhöht wurde. Dabei wurde jede Probe auf ihre Breitseite (5,5 cm x 12 cm) gelegt und mit einem Metallstempel mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 5 mm/min bis zum Erreichen der Spitzenkraft zusammengedrückt. Mit der Prüfsoftware (testXpert II, ZwickRoell GmbH & Co. KG, Ulm, Deutschland) wurde in jeder zehntel Sekunde die zurückgelegte Strecke und die auflastende Standardkraft festgehalten. Jede Probe wurde vor Beginn des Druckversuches noch einmal in ihrer Höhe vermessen. Aufgrund des unterschiedlichen Pilzwachstums und der Trocknung der Komposite, wich die Höhe teilweise von den ursprünglichen 3 cm ab. Aus den bekannten und

erhobenen Daten wurde anschließend die Spannung σ und Dehnung ε mit den nachfolgenden Formeln für jeden Messpunkt ermittelt.

1)
$$\sigma = \frac{F}{A} \text{ [MPa]}$$

2)
$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \text{ [%]}$$

Die Spannung wurde aus dem Verhältnis der Kraft und der Fläche (5,5 cm x 12 cm) berechnet und die Dehnung aus dem Verhältnis der Längenänderung zu der Anfangslänge der Probe, was sich in diesem Fall auf die Probenhöhe bezieht. Spannung und Dehnung wurden für alle Messpunkte jeder Probe in einem Spannungs-Dehnungs-Diagramm festgehalten. Außerdem wurde aus der Höhendifferenz jeder Probe vor und nach dem Kompressionsversuch die prozentuale Reduktion der Probenhöhe ermittelt.

3.6. Verwendete Software und statistische Auswertung

Die verwendete Software umfasste Excel, ImageJ, OriginPro (Version 2021b, OriginLab Corporation, Northampton, USA) und testXpert II. Alle Daten wurden zunächst tabellarisch in Excel gesammelt. Die in testXpert II ermittelten Daten wurden mit Hilfe von Excel zur Visualisierung von Spannungs-Dehnungs-Diagrammen genutzt. Mittels ImageJ wurde der durchschnittliche Hyphendurchmesser für jede Kombinationsmöglichkeit aus Pilz- und Holzart auf den Wafern ermittelt. Alle Daten aus den Experimenten, die für die statistische Auswertung bestimmt waren, wurden in OriginPro mittels einer einfaktoriellen ANOVA miteinander verglichen, bei einem p-Wert von 0,05. Bei einem signifikanten Unterschied wurde anschließend als Post-hoc-Test der Tukey-Test durchgeführt mit einem p-Wert von 0,05, um die verschiedenen Kombinationen aus Pilz- und Holzart paarweise miteinander zu vergleichen.

4. Ergebnisse

Im Folgenden werden für die Kombinationen aus Holzart und Pilzart die in **Tabelle 3** dargestellten Kürzel verwendet.

Tabelle 3: Verwendete Abkürzungen für die Kombination aus Pilz- und Holzart.

Kombination aus Pilz- und Holzart (=Gruppe)	Abkürzung
<i>G. sessile</i> + Roteiche	GRE
<i>G. sessile</i> + Buche	GB
<i>G. sessile</i> + Robinie	GR
<i>T. versicolor</i> + Roteiche	TRE
<i>T. versicolor</i> + Buche	TB
<i>T. versicolor</i> + Robinie	TR
<i>F. fomentarius</i> + Roteiche	FRE
<i>F. fomentarius</i> + Buche	FB
<i>F. fomentarius</i> + Robinie	FR

4.1. Wachstumsversuche der Holzwafer

Für das Wachstum der Pilze auf den Holzwafern ergaben sich unterschiedliche Zeiträume aufgrund der individuellen Wuchsgeschwindigkeit jeder Pilzart. Wafer mit *G. sessile* wurden für 6 Tage, mit *T. versicolor* für 8 Tage und mit *F. fomentarius* für 11 Tage bei 90% RH und 26°C inkubiert.

4.1.1. Wuchsgeschwindigkeit

Es gab einen signifikanten Unterschied in der Wuchsgeschwindigkeit der Hyphen zwischen den verschiedenen Kombinationen aus Pilz- und Holzart. Allgemein fällt auf, wie in **Abbildung 2** zu sehen, dass die Wuchsgeschwindigkeit aller Weißfäulepilze auf Buche signifikant höher war als auf Robinie und Roteiche. Bei *F. fomentarius* war dieser Effekt am stärksten ausgeprägt mit einem etwa dreifach so schnellen Wachstum auf Buche im Vergleich zu Roteiche und einem etwa doppelt so schnellen Wachstum auf Buche im Vergleich zu Robinie. Die höchste Wuchsgeschwindigkeit wurde mit 264,76 µm/h von *G. sessile* auf Buche erreicht, wobei kein signifikanter Unterschied im Vergleich zur Wuchsgeschwindigkeit von *T. versicolor* auf Buche festgestellt werden konnte. Die Wuchsgeschwindigkeit von *G. sessile* war auf Buche ca. 1,3-mal so hoch wie auf Roteiche und Robinie. Beim Vergleich der Wuchsgeschwindigkeit von *T. versicolor* und *G. sessile* auf derselben Holzart fällt auf, dass ein signifikanter Unterschied nur auf Roteiche festgestellt werden konnte.

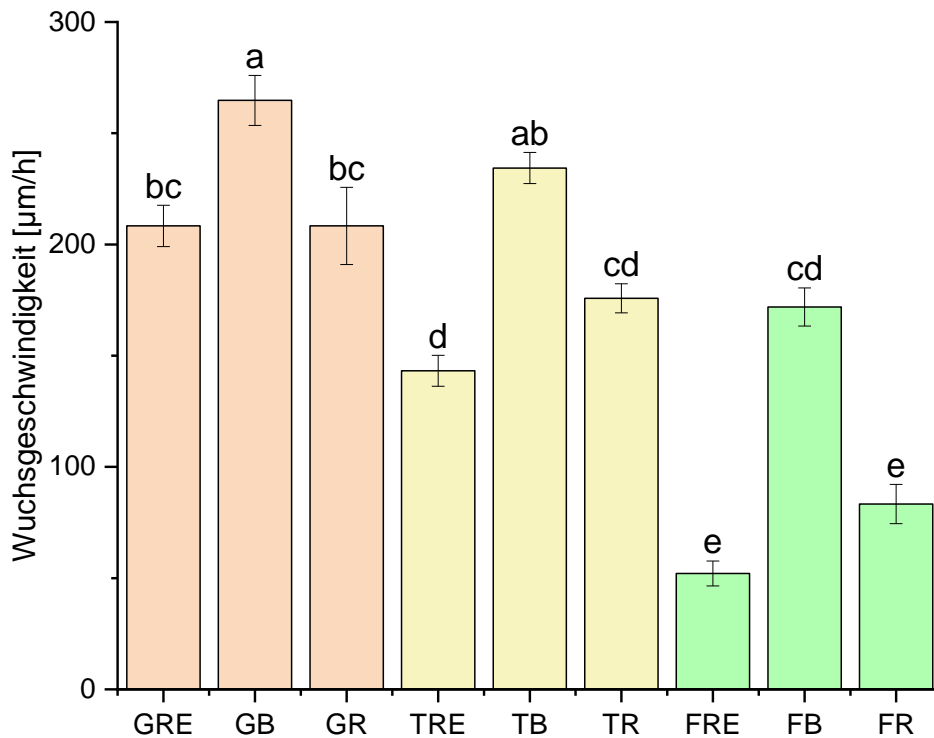


Abbildung 2: Die durchschnittlichen Wuchsgeschwindigkeiten der verschiedenen Kombinationen aus Pilz- und Holzart werden in µm/h dargestellt. Die Pilzarten *G. sessile* (rosa), *T. versicolor* (gelb) und *F. fomentarius* (grün) werden farblich voneinander abgegrenzt. Der Mittelwert jeder Gruppe sowie der Standardfehler innerhalb der Gruppe wird auf Grundlage aller Messwerte innerhalb einer Gruppe dargestellt. Signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen werden mittels verschiedener Buchstaben dargestellt. (Tukey, $p < 0.05$, $n = 8$ pro Gruppe).

Die Ausbildung des Pilzmyzels unterschied sich abhängig von der ausgewählten Pilz- und Holzart deutlich. Bei *G. sessile* (siehe **Abb. 3a**) war auf den verschiedenen Holzwafern eine relativ gleichmäßige Ausbildung des Pilzmyzels zu beobachten. Bei *T. versicolor* hatte sich das Pilzmyzel deutlich dichter um den Buchenwafer ausgebildet (siehe **Abb. 3b**). *F. fomentarius* zeigte den größten Unterschied bei der Ausbildung des Pilzmyzels auf den Holzwafern, wobei die Buche deutlich am stärksten bewachsen wurde (siehe **Abb. 3c**). Auch die bereits in **Abbildung 2** dargestellte deutlich höhere Wuchsgeschwindigkeit von *F. fomentarius* auf Buche im Vergleich zu Robinie und Roteiche ist auf **Abb. 3c** gut zu erkennen.



Abbildung 3: Es wird das ausgebildete Pilzmyzel auf den Wafern mit *G. sessile* (a), *T. versicolor* (b) und *F. fomentarius* (c) nach Beendigung der Wachstumsversuche dargestellt. Die Markierungen auf den Holzwafern weisen einen Abstand von 5 mm zueinander auf. Von links nach rechts sind jeweils die Holzarten in der Reihenfolge Robinie, Buche und Roteiche aufgereiht.

4.1.2. Hyphendurchmesser

Mittels Binokulars wurden die Hyphendurchmesser für jede Kombinationsmöglichkeit bestimmt, im Gegensatz zu den Wuchsgeschwindigkeiten fielen die Unterschiede hier deutlich geringer aus. Innerhalb der Pilzarten war bei *T. versicolor* und *F. fomentarius* kein signifikanter Unterschied des Hyphendurchmessers auf den verschiedenen Holzwafern zu beobachten. Bei *G. sessile* war innerhalb der Pilzart ein signifikant geringeres Wachstum auf Robinie festzustellen. Auffällig war, dass auf Robinie die Hyphenbreite der Pilze am meisten variierte und in Kombination mit *G. sessile* mit 3,21 μm den geringsten und mit 5,54 μm bei *T. versicolor* den größten Hyphendurchmesser darstellte (siehe **Abbildung 4**). Der unterschiedliche Durchmesser der Hyphen von *G. sessile* auf Robinie und *T. versicolor* auf Robinie ist auch gut auf der nachfolgenden **Abbildung 5** zu erkennen.

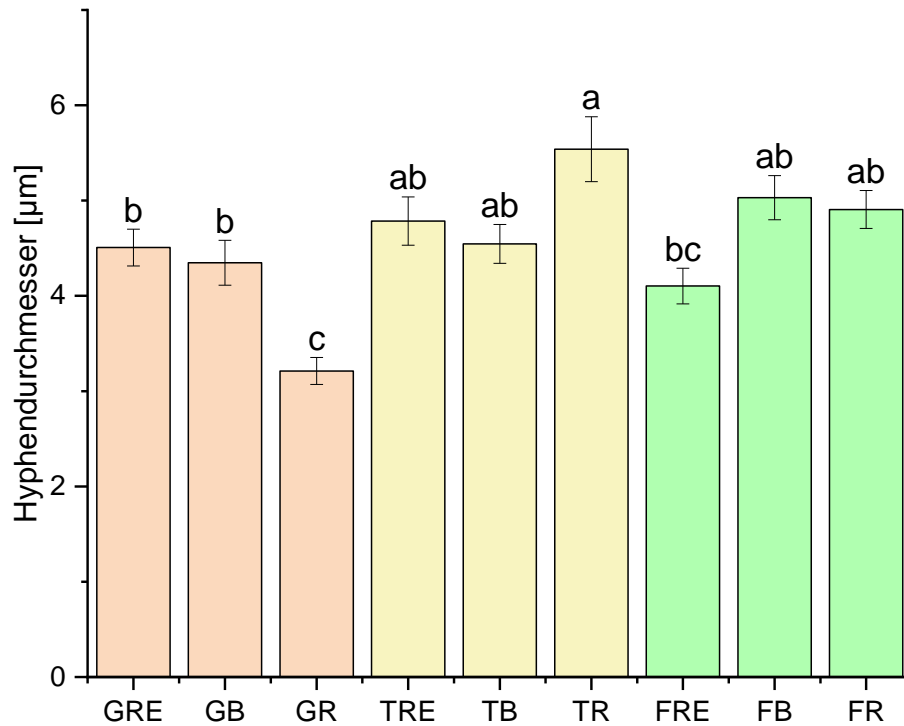


Abbildung 4: Die durchschnittlichen Hyphendurchmesser der verschiedenen Kombinationen aus Pilz- und Holzart werden in µm dargestellt. Die Pilzarten *G. sessile* (rosa), *T. versicolor* (gelb) und *F. fomentarius* (grün) werden farblich voneinander abgegrenzt. Der Mittelwert jeder Gruppe sowie der Standardfehler innerhalb der Gruppe wird auf Grundlage aller Messwerte innerhalb einer Gruppe dargestellt. Signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen werden mittels verschiedener Buchstaben dargestellt. (Tukey, $p < 0.05$, $n = 8$ pro Gruppe).

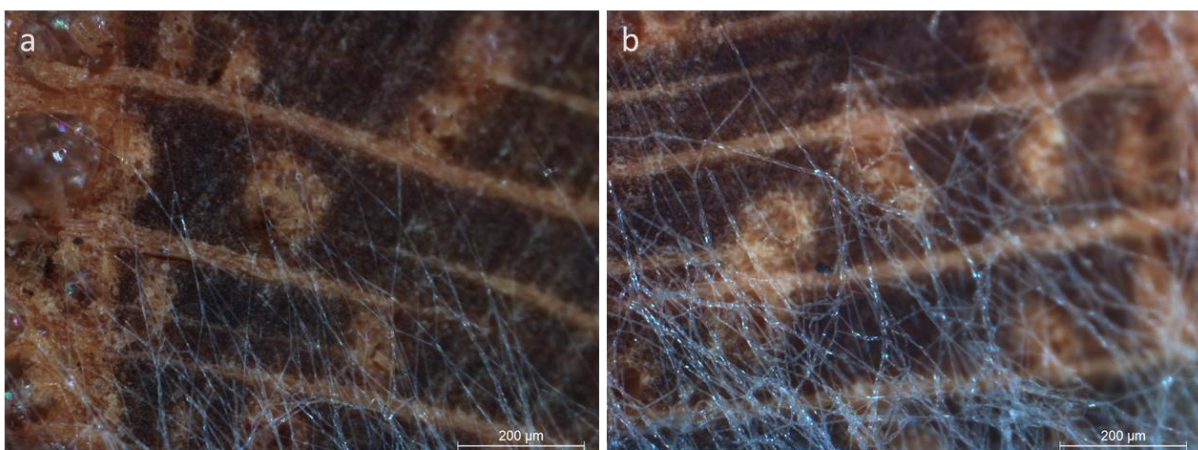


Abbildung 5: Die Hyphenfront von *G. sessile* auf Robinie (a) und *T. versicolor* auf Robinie (b) wird unter achtfacher Vergrößerung dargestellt.

4.2. Kompositversuche

Da die Komposite abhängig von Pilzart und Substrat unterschiedlich schnell durchwachsen wurden, wurden sie für unterschiedliche Zeiträume inkubiert und nach unterschiedlichen Zeiträumen gewendet, wie in **Tabelle 4** zu sehen. Zudem konnte während den Weihnachtsfeiertagen das Labor nicht betreten werden.

Tabelle 4: Die Wachstumsstage für die Körnerbruten, Substrate und Komposite werden dargestellt. Zudem wird die Anzahl der Tage angegeben, nach denen die Komposite gewendet wurden. Außerdem wird die relative Luftfeuchte und Temperatur während der Inkubation, sowie der Trockenzeitraum und die Trockentemperatur für die unterschiedlichen Komposite angegeben. Die Kombinationen aus Pilz- und Holzart werden mittels Buchstabenkürzel dargestellt.

Kombi- nation	Inkubiert bei:	Wachstums- tage der Körner- bruten	Wachstums- tage der Substrate in den Pilztüten	Wachstums- tage der Komposite in den Formen	Einmaliges Wenden nach X Tagen	Trock- nung
GRE	90% RH & 26°C	11	11	25	4	105°C für 72h
GB				17		
GR						
TRE		11	17	22	14	
TB						
TR						
FRE		19	27	17	8	
FB				-	-	
FR				17	8	

4.2.1. Hygroskopizität der Komposite

Für die Hygroskopizität konnte kein signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen festgestellt werden. Nachdem die getrockneten Komposite nach 72h bei 25°C und 70% RH gewogen wurden, lag die prozentuale Gewichtszunahme in den Gruppen zwischen ca. 10,5 und 12% (siehe **Abbildung 6**).

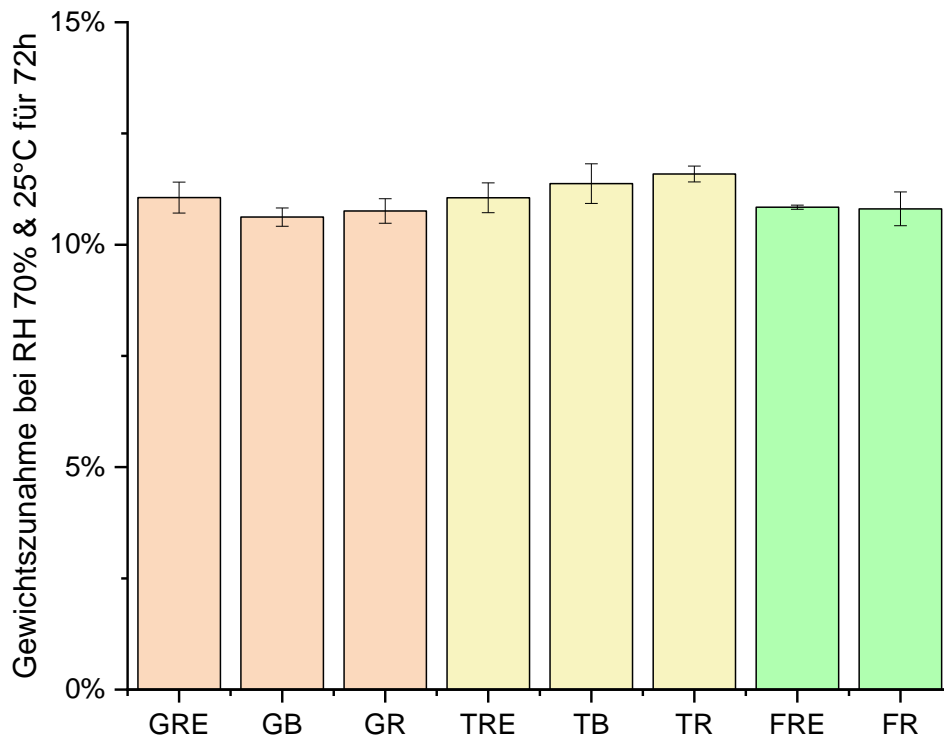


Abbildung 6: Es wird die durchschnittliche prozentuale Gewichtszunahme der verschiedenen Pilzkomposite nach 72h bei 25°C und RH 70% dargestellt. Die Pilzarten *G. sessile* (rosa), *T. versicolor* (gelb) und *F. fomentarius* (grün) werden farblich voneinander abgegrenzt. Der Mittelwert jeder Gruppe sowie der Standardfehler innerhalb der Gruppe wird auf Grundlage aller Messwerte innerhalb einer Gruppe dargestellt. Es kann kein signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen festgestellt werden. ($p > 0.05$, $n = 5$ pro Gruppe).

Obwohl kein signifikanter Unterschied in der Hygroskopizität zwischen den Gruppen festgestellt werden konnte, wiesen die Komposite, wie in **Abbildung 7** zu sehen, dennoch eine unterschiedliche Ausbildung der Pilzhaut an ihrer Oberfläche auf.

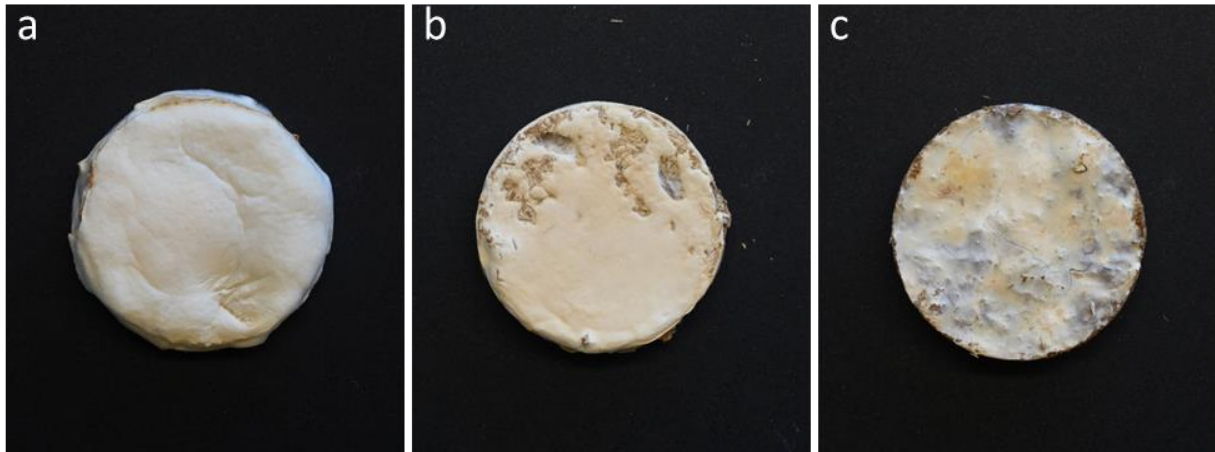


Abbildung 7: Darstellung der Pilzhaut, die sich während der Wachstumsphase an der Oberfläche der Pilzkomposite von *G. sessile* und Robinie (a), *T. versicolor* und Robinie (b) sowie *F. fomentarius* und Robinie (c) ausgebildet hat.

4.2.2. Mechanische Eigenschaften der Komposite

Zur Beurteilung der mechanischen Eigenschaften wurden die Komposite einem Kompressionsversuch unterzogen. Neben der Darstellung des Materialverhaltens der verschiedenen Komposite in Spannungs-Dehnungs-Diagrammen, wird nachfolgend auch die Reduktion der Probenhöhen der Komposite nach Fertigstellung des Versuches aufgezeigt.

4.2.3. Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Aufgrund der unterschiedlichen Probenhöhen sowie der Krümmung mancher Komposite variierte die Anzahl der Messpunkte der Komposite innerhalb einer Gruppe z.T. sehr stark. Deswegen war es nicht möglich, aus den jeweils drei Proben pro Gruppe die erfassten Messwerte zu mitteln und anschließend in einem Spannungs-Dehnungs-Diagramm darzustellen. Aus diesem Grund, und zum Zweck der Übersichtlichkeit, wurde in diesem Kapitel bei der Darstellung von Spannungs-Dehnungs-Diagrammen jeweils die Probe gewählt, die ihre Gruppe am besten repräsentierte. Im Anhang wird zur besseren Nachvollziehbarkeit für jede Gruppe mit ihren drei Proben ein Spannungs-Dehnungs-Diagramm dargestellt. Wie in **Abbildung 8** zu sehen, weist Styropor einen Kurvenverlauf auf, der sich deutlich von den Kurven der Pilzkomposite unterscheidet. Zu Beginn steigt die Spannung relativ rasch an, ohne eine starke Dehnung des Materials zu verursachen. Anschließend flacht die Kurve für einen längeren Zeitraum ab, das Material beginnt sich zunehmend zu dehnen mit einem verringerten Anstieg der Spannung. Zum Schluss steigt die Kurve wieder zunehmend an bis auf eine

Spannung von 0,3 MPa und eine Dehnung von etwa 80%. Für die verschiedenen Komposite verlaufen zu Beginn die Kurven für längere Zeit flach, die Dehnung nimmt rasch zu bei geringer Zunahme der Spannung. Anschließend beginnen die Kurven langsam anzusteigen, bis ein kontinuierlicher, nahezu linearer Anstieg auf eine Spitzenspannung von 0,3 MPa erreicht wird. In dieser Phase des nahezu linearen Anstieges nimmt die Spannung rapide zu, die Dehnung deutlich langsamer. Die verschiedenen Komposite variieren bei einer Spannung von 0,3 MPa in ihrer Dehnung zwischen 20% und 54% und liegen somit deutlich unter der Dehnung des Styropors.

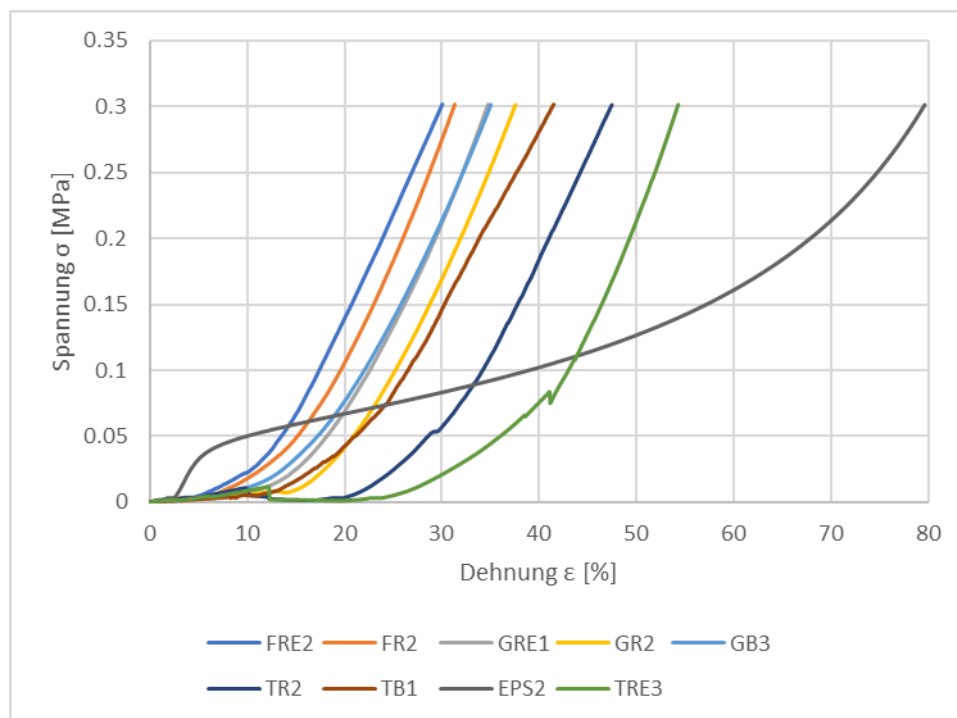


Abbildung 8: Im Spannungs-Dehnungs-Diagramm werden die Spannungs-Dehnungs-Kurven für jeweils eine repräsentative Probe aus einer Gruppe mit drei Proben dargestellt.

Die Kurven für die Komposite mit *F. fomentarius* zeigen, wie in **Abbildung 9** zu sehen den steilsten Anstieg und fallen nahe zusammen, was sich auch in den Spannungs-Dehnungs-Diagrammen für jede einzelne Gruppe samt ihrer drei Proben zeigt (siehe **Abbildung 15 und Abbildung 16** im Anhang). Bei einer Spannung von 0.3 MPa wurden sie um etwa 30% gedehnt.

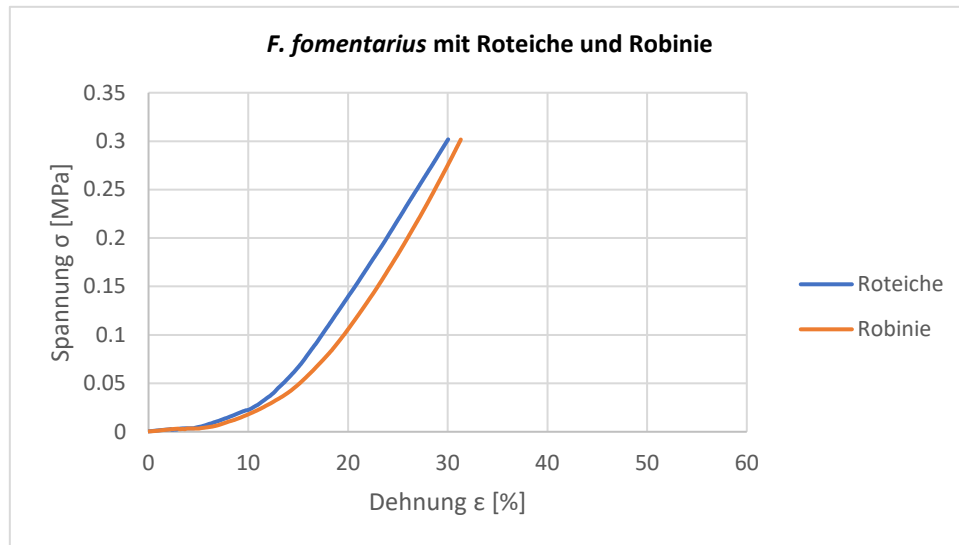


Abbildung 9: Im Spannungs-Dehnungs-Diagramm wird jeweils die Spannungs-Dehnungs-Kurve einer repräsentativen Probe aus einer Gruppe mit drei Proben dargestellt. Die Gruppen werden nach der Kombination von *F. fomentarius* mit Roteiche und Robinie unterschieden.

Für die Komposite von *G. sessile* mit Roteiche, Robinie und Buche liegen die repräsentativen Kurven, wie in **Abbildung 10** zu sehen, ebenfalls relativ nahe beieinander, jedoch war die anfängliche Dehnungsphase mit geringem Anstieg der Spannung etwas länger ausgeprägt, als bei den Kompositen mit *F. fomentarius* (siehe **Abbildung 8**). Sie erreichten bei 0.3 MPa eine Dehnung zwischen 30 und 40%. Auffällig war, dass innerhalb der Gruppe von *G. sessile* und Robinie die Kurven der drei Proben fast deckungsgleich verlaufen (siehe **Abbildung 18** im Anhang).

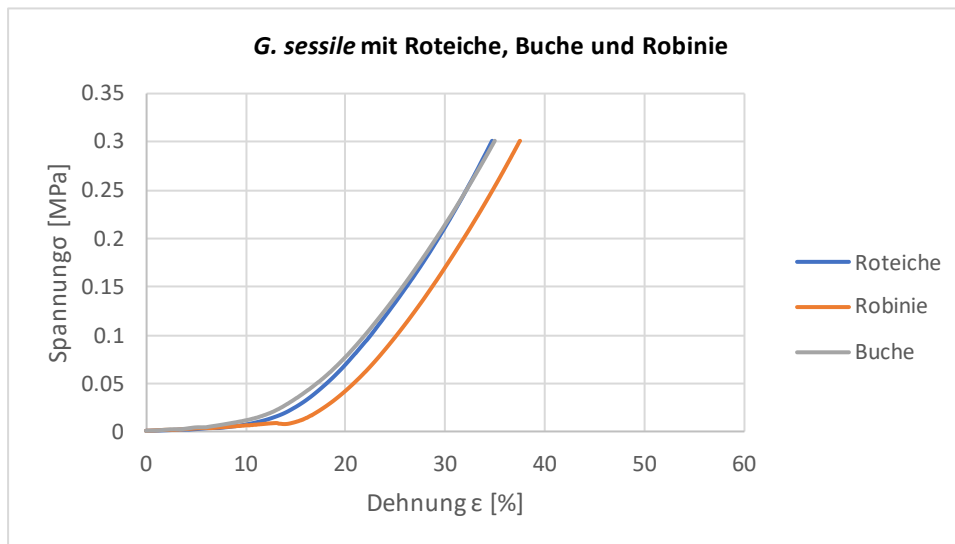


Abbildung 10: Im Spannungs-Dehnungs-Diagramm wird jeweils die Spannungs-Dehnungs-Kurve einer repräsentativen Probe aus einer Gruppe mit drei Proben dargestellt. Die Gruppen werden nach der Kombination von *G. sessile* mit Roteiche, Robinie und Buche unterschieden.

Für *T. versicolor* verlaufen die repräsentativen Kurven in Abhängigkeit vom Substrat am weitesten auseinander (siehe **Abbildung 11**) und erreichten bei einer Spannung von 0,3 MPa Dehnungsraten von 41 bis 54%. Die Kurven verlaufen zu Beginn sehr flach, mit einer damit verbundenen starken Dehnung des Materials bei geringem Anstieg der Spannung. Somit unterscheiden sich die Komposite mit *T. versicolor* in ihrem Verhalten am Anfang des Kompressionsversuches deutlich von den Kompositen mit den anderen Pilzarten (siehe **Abbildung 8**). Auffällig sind zudem die kurzen Spannungsabfälle, die auf Brüche im Material hindeuten, besonders gut zu erkennen bei TRE3. Die Kombination von *T. versicolor* und Buche zeigte bei einer Spannung von 0,3 MPa mit 41% die geringste Dehnung. Das weite Auseinanderfallen der Kurven, ist auch im Einzelnen für die Proben jeder Gruppe gut zu beobachten (siehe **Abbildung 20**, **Abbildung 21** und **Abbildung 22** im Anhang). Besonders für die Proben der Kombination aus *T. versicolor* und Roteiche waren deutlich Spannungsabfälle während des Kompressionsversuches zu erkennen (siehe **Abbildung 20** im Anhang). In der abschließenden Betrachtung der Kurven in **Abbildung 8** lässt sich festhalten, dass bei einer Spannung von 0,3 MPa die Komposite mit *F. fomentarius* die geringste Dehnung aufweisen. Für Komposite mit *G. sessile* liegt bei gleicher Kraft die Dehnung etwas höher und Komposite mit *T. versicolor* weisen bei gleicher Kraft eine nochmals deutlich höhere Dehnung auf. Zudem liegen die Kurven bei Kompositen mit *T. versicolor* deutlich weiter auseinander in Abhängigkeit vom verwendeten Substrat.

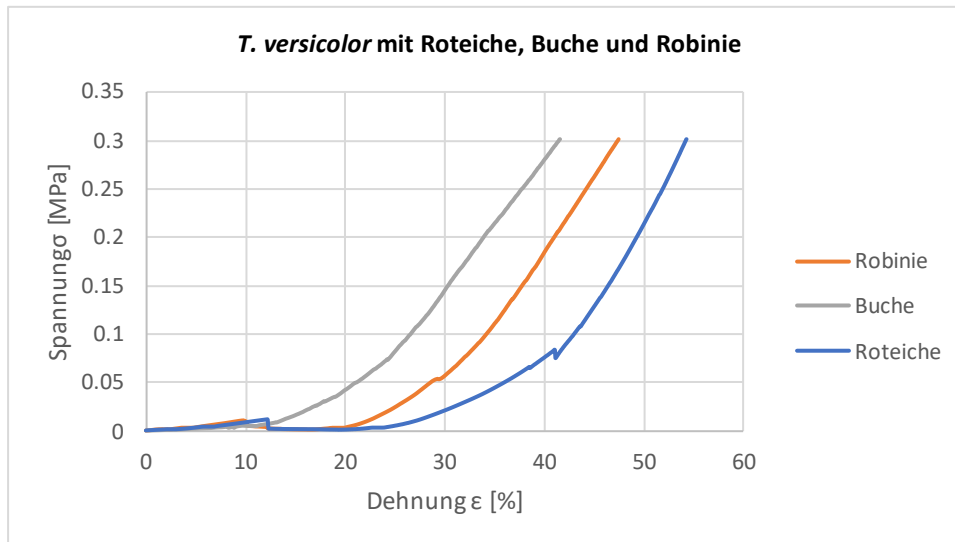


Abbildung 11: Im Spannungs-Dehnungs-Diagramm wird jeweils die Spannungs-Dehnungs-Kurve einer repräsentativen Probe aus einer Gruppe mit drei Proben dargestellt. Die Gruppen werden nach der Kombination von *T. versicolor* mit Roteiche, Robinie und Buche unterschieden.

Die bereits beschriebene Krümmung mancher Komposite führte zum Teil zu deutlich sichtbaren Brüchen nach Beendigung des Kompressionsversuches, wobei schwächer gebogene Komposite auch weniger, bis keine sichtbaren Brüchen nach dem Ende des Kompressionsversuches aufzeigten. Komposite mit *F. fomentarius* zeigten keine optisch wahrnehmbare Krümmung, bei Kompositen mit *G. sessile* war dagegen manchmal eine leichte Krümmung sichtbar. Die stärkste Krümmung wiesen Komposite mit *T. versicolor* auf, mit Ausnahme der Kombination von *T. versicolor* und Buche, die keine Krümmung aufwies (siehe **Abbildung 24** im Anhang). In der folgenden **Abbildung 12** wird für jede Pilzart beispielhaft ein Komposit dargestellt, um den Zusammenhang zwischen Krümmung und sichtbaren Brüchen zu veranschaulichen. Außerdem ist auf **Abb. 12b** gut zu erkennen, dass Komposite mit *F. fomentarius* nach dem Kompressionsversuch eher dazu neigten zu zerbröseln.



Abbildung 12: Der Grad der Krümmung vor der Durchführung des Kompressionsversuches wird für die Komposite von *F. fomentarius* und Roteiche (a), *G. sessile* und Buche (c) sowie *T. versicolor* und Roteiche (e) dargestellt. Nach Durchführung des Kompressionsversuches gibt es für *F. fomentarius* und Roteiche keinen sichtbaren Bruch (b), für *G. sessile* und Buche einen sichtbaren Bruch (d) sowie für *T. versicolor* und Roteiche multiple sichtbare Brüche (f).

4.2.4.Reduktion der Probenhöhen

Nach Beendigung des Kompressionsversuches mit einer Spitzenbelastung von 2000N, zeigten die verschiedenen Komposite sowie die EPS-Proben eine unterschiedliche Reduktion in ihrer Probenhöhe wie in **Abbildung 13** zu sehen. Die größte plastische Verformung zeigten die EPS-Proben mit einer Reduktion der Probenhöhe von mehr als 35%. Damit war ein signifikanter Unterschied im Vergleich zur prozentualen Deformation aller anderen Pilzkomposite festzustellen. Die plastische Verformung der EPS-Proben ließ sich bereits bei der optischen Betrachtung der Proben nach der Durchführung des Kompressionsversuches feststellen (siehe **Abbildung 14**). Für die verschiedenen Pilzkomposite variierte die Reduktion der Probenhöhe zwischen 0% und 10,6%. Die Reduktion in der Höhe der EPS-Proben lag im

Verhältnis somit mehr als drei Mal so hoch wie für die Pilzkompositproben, die die stärkste Reduktion der Höhe aufwiesen. Die geringste Reduktion wurde bei Kompositen mit *T. versicolor* festgestellt. So konnte für die Kombinationen von *T. versicolor* und Roteiche sowie *T. versicolor* und Buche keine plastische Deformation festgestellt werden. Der Wert für die Kombination aus *T. versicolor* und Robinie fiel mit 2.0% auch vergleichsweise niedrig aus. Für die verschiedenen Kombinationen von *T. versicolor* mit den Holzarten konnten keine signifikanten Unterschiede in der Reduktion der Probenhöhe festgestellt werden.

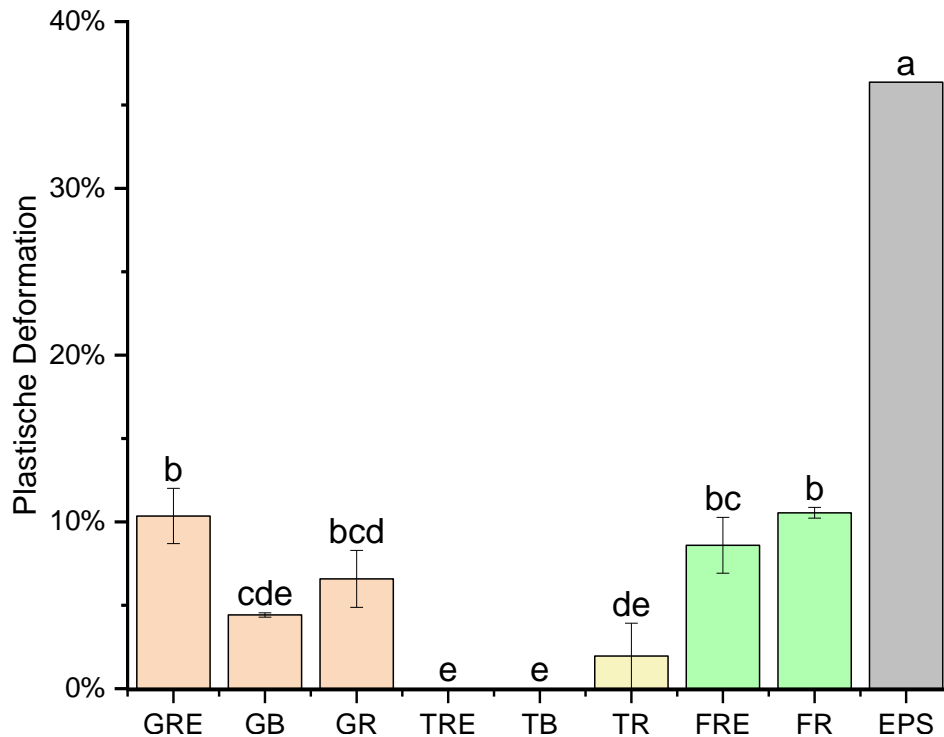


Abbildung 13: Es wird die durchschnittliche prozentuale Reduktion der Probenhöhen der verschiedenen Gruppen sowie für EPS nach einer Belastung mit einer Standardkraft von 2000N dargestellt. Die Pilzarten *G. sessile* (rosa), *T. versicolor* (gelb) und *F. fomentarius* (grün) werden farblich voneinander abgegrenzt. Die durchschnittliche Reduktion der Probenhöhe ist bei EPS in grau gekennzeichnet. Der Mittelwert jeder Gruppe sowie der Standardfehler innerhalb der Gruppe wird auf Grundlage aller Messwerte innerhalb einer Gruppe dargestellt. Es kann ein signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen festgestellt werden. (Tukey, $p < 0.05$, $n = 3$ pro Gruppe).

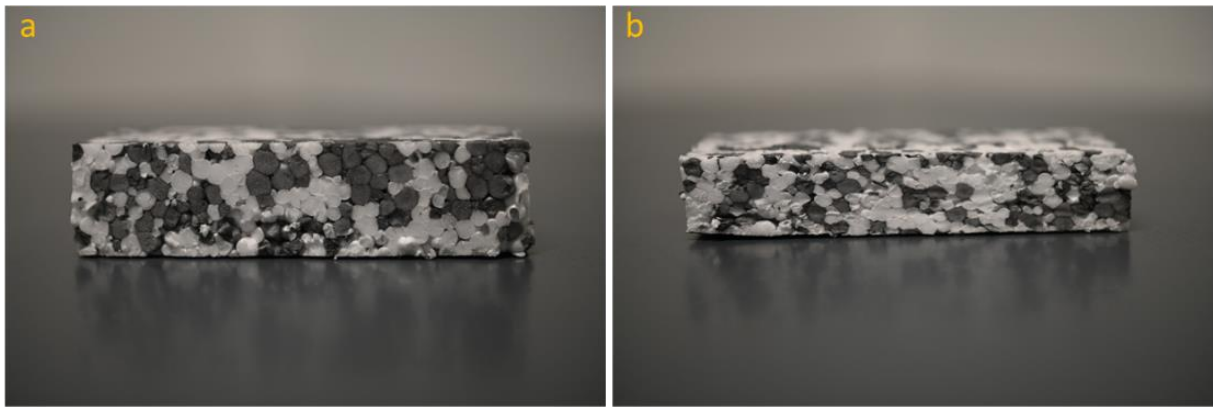


Abbildung 14: Es wird die Ausgangshöhe der EPS-Probe vor Durchführung des Kompressionsversuches (a) sowie die Reduktion in der Höhe durch plastische Verformung nach Durchführung des Kompressionsversuches dargestellt (b).

5. Diskussion

Bei den Wafer-Wachstumsversuchen wurde ersichtlich, dass Buche die Baumart war, auf der die drei Pilzarten *G. sessile*, *T. versicolor* und *F. fomentarius* am schnellsten wuchsen. Der größte Unterschied in der Wachstumsgeschwindigkeit einer Pilzart abhängig von der Holzart ergab sich bei *F. fomentarius*. Hier war die Wuchsgeschwindigkeit im Vergleich zur Buche auf Roteiche zwei Drittel geringer und auf Robinie um die Hälfte reduziert. Der Hyphendurchmesser der verschiedenen Pilzarten unterschied sich in Abhängigkeit vom Substrat im Großteil nicht voneinander, die Ausnahme bildete hier die Robinie. Auf ihr erreichte *G. sessile* den geringsten und *T. versicolor* den größten Hyphendurchmesser aller Gruppen. Bei der Überprüfung der Hygroskopizität der unterschiedlichen Pilzkomposite konnte kein signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen festgestellt werden, die prozentuale Gewichtszunahme variierte zwischen 10,5 und 12%. Im Kompressionsversuch zeigte sich, dass alle Pilzkomposite bei einer Spannung von 0.3 MPa eine geringere Dehnung aufwiesen als die EPS-Proben. Die Reduktion der Probenhöhe nach Ende des Kompressionsversuches lag für EPS-Proben im Verhältnis mehr als drei Mal so hoch wie für diejenigen Pilzkompositproben mit der stärksten Reduktion der Höhe. Pilzkomposite mit *T. versicolor* zeigten keine, bis sehr geringe Reduktionen in der Probenhöhe.

Die Hypothese, dass die Wuchsgeschwindigkeit von *T. versicolor* und *F. fomentarius* auf Roteichen- und Robinienholz geringer als auf Buchenholz ist, wird durch den Versuch zum Waferwachstum bestätigt. *T. versicolor* und *F. fomentarius* scheinen besser auf unsere einheimische Buche angepasst zu sein als auf Neophyten wie Roteiche und Robinie. Interessant ist, dass *G. sessile* als nordamerikanische Pilzart und gängiger Laborpilz auch auf Buche die höchste Wuchsgeschwindigkeit erreicht hat. Somit könnte man auch annehmen, dass Buchenholz allgemein ein gutes Substrat für Weißfäulepilze darstellt, und dass daher die Buche auch der Laubbaum in Europa ist, der mit den meisten Pilzen vergesellschaftet ist (LWF, 2023). *G. sessile* zeigte sich bei den Wachstumsversuchen eher als „Allrounder“, was seine Anforderungen an das Substrat betrifft mit den geringsten Unterschieden der Wuchsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Holzart. Dies könnte nicht zuletzt dadurch bedingt sein, dass in Nordamerika in klimatisch ähnlichen Bereichen wesentlich mehr Laubbaumgattungen mit zahlreicheren Arten vorkommen als in Deutschland, und dass dortige Weißfäulepilze somit mit mehr Baumarten und -gattungen vergesellschaftet sein könnten (Wittig & Niekisch, 2014). Aufgrund des Verlaufes der Alpen von Osten nach Westen bildeten sie in der letzten Eiszeit eine nicht überquerbare Barriere in Europa, die vielen Pflanzen eine Rückzugsmöglichkeit in wärmere südlichere Gebiete verwehrt (Wittig & Niekisch, 2014).

Somit lässt sich die geringere Artenvielfalt in Deutschland durch das Aussterben zahlreicher Pflanzenarten und -gattungen in der letzten Eiszeit erklären (Wittig & Niekisch, 2014). Die deutlich erhöhte Wuchsgeschwindigkeit von *F. fomentarius* auf Buche im Vergleich zu Robinie und Roteiche bestätigt die besondere Spezialisierung des Zunderschwamms auf die Rotbuche, die in Mitteleuropa mit Abstand sein häufigster Wirtsbaum ist (WSL, 2023a). *T. versicolor* zeigte sich als einheimischer Weißfäulepilz als vielversprechende Alternative zu *G. sessile*, lediglich auf Roteiche wurde eine signifikant geringere Wachstumsgeschwindigkeit festgestellt. Somit verwundert es nicht, dass auch *T. versicolor* zu den Pilzarten zählt, die am häufigsten in wissenschaftlichen Veröffentlichungen zu Pilzkompositen erwähnt werden (Sydor et al., 2022). Im Gegensatz zur Wuchsgeschwindigkeit, variiert der Hyphendurchmesser der Pilzarten in Abhängigkeit vom Substrat offenbar weniger. Auch die Hyphendurchmesser der drei Pilzarten unterschieden sich kaum voneinander. Lediglich bei *G. sessile* konnte auf Robinie ein signifikant geringerer Hyphendurchmesser festgestellt werden als auf den Wafern von Buche und Roteiche. In einer Studie von Osma et al. (2011) wurde für *T. versicolor* ein mittlerer Hyphendurchmesser von 2.2 µm auf Weizenkleie festgestellt. Dieser unterscheidet sich deutlich von den Werten, die für *T. versicolor* im Zuge des Versuches zum Waferwachstum festgestellt wurden, hier lagen die Werte für die Holzarten in etwa zwischen 4,5 und 5,5 µm. Aus dieser Differenz lässt sich mutmaßen, dass neben der Substratart auch die verwendete Partikelgröße einen Einfluss auf den Hyphendurchmesser einer Pilzart haben könnte und dass die Unterschiede zwischen den verschiedenen Holzarten geringer ausfallen, als wenn man sie mit feineren Substraten vergleicht. Neben der Partikelgröße könnte aber auch der Nährstoffgehalt eines Substrates einen Einfluss auf den Hyphendurchmesser einer Pilzart haben. In einer Studie von Ward et al. (2000) wird gezeigt, dass der Stickstoffgehalt von Weizenstroh um mehr als das 16-fache höher liegt als für Kiefernholzspäne. Somit könnte der größere Hyphendurchmesser auf den Holzwafern im Vergleich zur Weizenkleie auch dadurch bedingt sein, dass Pilze bei schlechterer Nährstoffverfügbarkeit dazu tendieren, die Hyphen stärker auszubilden. Obwohl man nach der Betrachtung der Wuchsgeschwindigkeiten der Pilzarten auf den unterschiedlichen Holzwafern annehmen könnte, dass sich auch signifikante Unterschiede bei der Hygroskopizität der Pilzkomposite zeigen würden, konnten für die Hygroskopizität der Pilzkomposite keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Somit muss die Hypothese, dass die Hygroskopizität für Komposite aus *T. versicolor* und *F. fomentarius* in Kombination mit Robinie und Roteiche stärker ausfällt, aufgrund der Ergebnisse verworfen werden. Dass es keine signifikanten Unterschiede für die Hygroskopizität der Komposite aus den verschiedenen Holzarten gibt, überrascht, da, wie in **Abbildung 7** zu sehen, z.T. doch eine recht unterschiedliche Ausbildung der Pilzhaut an der Oberfläche der Komposite vorhanden war. Zudem konnten in einer Studie von Appels et al. (2019) Unterschiede für die Wasserabsorption verschiedener Pilzkomposite aufgezeigt werden. In

genannter Studie wurden als Pilzarten *Trametes multicolor* und *Pleurotus ostreatus* verwendet, als Substrate Rapsstroh, Buchensägemehl und Baumwolle. Zwischen den Substraten Rapsstroh und Baumwolle konnte ein deutlicher Unterschied in ihrer Hygroskopizität festgestellt werden. So war für Komposite mit Baumwolle die Hygroskopizität deutlich geringer ausgeprägt, als für Komposite mit Rapsstroh. Die Hygroskopizität der Komposite mit Buchensägemehl war bei 80% RH in etwa mit der Hygroskopizität der Komposite aus Rapsstroh zu vergleichen. In der Studie wurde die Wasserabsorption der Komposite bei einer Temperatur von 40°C und einer relativen Luftfeuchte von 60% als auch 80% bestimmt. Auffällig war, dass die Pilzkomposite bei 60% RH in ihrer Wasserabsorption mehr voneinander abwichen als bei 80% RH. Es scheint, dass die Unterschiede in der Hygroskopizität zwischen Kompositen aus verschiedenen Substraten und Pilzarten mit zunehmender relativer Luftfeuchte geringer ausfallen. Somit könnte die nicht signifikant variierende Hygroskopizität der Komposite in dieser Arbeit (siehe **Abbildung 6**) auch dadurch bedingt sein, dass mit höherer relativer Luftfeuchte die Unterschiede sowieso geringer ausfallen. In den Versuchen von Appels et al. (2019) zeigten die Komposite, die einer höheren Luftfeuchte ausgesetzt waren, eine stärkere Gewichtszunahme als ihre identischen Komposite bei geringerer Luftfeuchte. Für die Kombination aus *T. multicolor* und Buchensägemehl ergab sich bei 60% RH eine Gewichtszunahme um 5,71% und bei 80% RH eine Gewichtszunahme um 11,63%. Vergleicht man diesen Wert von 11,63% mit den Werten der Komposite in **Abbildung 6**, fällt auf, dass sich die Gewichtszunahme im gleichen Bereich bewegt. Dies lässt sich so interpretieren, dass es einen sprunghaften Anstieg der Wasserabsorption gibt, wenn die Luftfeuchte von 60% auf 70% erhöht wird, eine weitere Erhöhung der Luftfeuchte um 10% aber keinen signifikanten Einfluss auf die Wasserabsorption der Komposite hat. Für den Versuch zur Hygroskopizität wurde in dieser Arbeit (vgl. Kapitel 4.2.1) mit 25°C eine deutlich niedrigere Temperatur gewählt als in dem Versuch von Appels et al. bei 40°C. Deshalb sollte in einer weiteren Studie überprüft werden, inwieweit sich diese Beobachtung für Luftfeuchten von 60%, 70% und 80% bestätigen lässt. Am besten mit vielen verschiedenen Substraten, um zu beurteilen, inwieweit sich diese Beobachtung auch auf andere Substrate übertragen lässt. Neben der Ermittlung der Hygroskopizität wurde mit weiteren Pilzkompositen ein Kompressionsversuch durchgeführt, bei dem zudem auch EPS-Proben auf ihre Druckfestigkeit getestet wurden. Bei diesem Versuch zeigte sich, dass die Pilzkomposite bei einer Spannung von 0,3 MPa weniger gedehnt werden als EPS. Der Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Kurven der Pilzkomposite und der EPS-Proben, stimmt grundlegend mit den Erkenntnissen von Pohl et al. (2022) überein. Auch dort wurde berichtet, dass die Kurven der Pilzkomposite zunächst einen flachen Verlauf aufweisen, ehe sie beginnen kontinuierlich zu steigen. Auch für die EPS-Proben sind die Erkenntnisse vergleichbar mit einem zu Beginn schnellen Anstieg der Spannungs-Dehnungs-Kurve, die dann relativ schnell beginnt abzuflachen, bevor sie zum

Ende hin wieder ansteigt. Aus diesem Verlauf der Kurven kann man ableiten, dass Styropor gegenüber geringeren Belastungen widerstandsfähiger abschneidet als Pilzkomposite, bei höheren Belastungen übertreffen jedoch die Komposite die Widerstandsfähigkeit des Styropors gegenüber Verformungen. Somit sind für Anwendungen, in denen eine höhere Widerstandskraft gefordert ist, Pilzkomposite besser geeignet. In der Studie von Pohl et al. (2022) wurden Komposite aus den Substraten Hanfschäben und Rapsstroh in Kombination mit *F. fomentarius* hergestellt. Außerdem lag jedes Substrat in drei verschiedenen Partikelgrößen vor, um den Einfluss der Partikelgröße auf die Materialeigenschaften der Komposite zu untersuchen. Die kleinste Partikelgröße (0,63 – 2 mm) von Hanfschäben und Rapsstroh führte zur höchsten Druckfestigkeit der Pilzkomposite. Die für diese Arbeit verwendeten Sägespäne von Roteiche, Buche und Robinie wiesen eine Partikelgröße von 0,75 mm auf und werden deshalb mit den Kompositen der kleinsten Partikelgröße aus der Studie von Pohl et al. (2022) verglichen. Bei einer Spannung von 0,3 MPa weisen bei Pohl et al. (2022) die Komposite mit Rapsstroh eine Dehnung von etwas über 40% auf und die Komposite mit Hanfschäben eine Dehnung von knapp 50% auf. Damit zeigen im eigenen Kompressionsversuch bei gleicher Spannung sowohl die Komposite von *F. fomentarius* mit 30% als auch die Komposite mit *G. sessile* mit 30 – 40% etwas geringere Werte in der Dehnung. Die Komposite mit *T. versicolor* liegen mit einer Dehnung von etwa 41 – 54% auch in einem ähnlichen Bereich wie die Komposite aus Hanfschäben und Rapsstroh. Somit lässt sich festhalten, dass mit den Substraten Buche, Roteiche und Robinie Komposite hergestellt werden können, deren Druckfestigkeit ähnlich, z.T. auch etwas höher, als bei vergleichbaren Kompositen aus Hanfschäben und Rapsstroh ist. In der Studie von Pohl et al. (2022) wird zudem die Problematik beschrieben, dass bei Belastung die Materialeigenschaften von Pilzkompositen stärker variieren als von Styropor und es daher schwieriger ist, mit Pilzkompositen einen homogenen Werkstoff herzustellen. Dieser Trend konnte auch in dieser Arbeit festgestellt werden. Am stärksten variierten die Materialeigenschaften für die Komposite mit *T. versicolor* (siehe **Abbildung 11**), diese Pilzart scheint daher schlechter dafür geeignet zu sein pilzmyzelbasierte Werkstoffe mit möglichst homogenen Eigenschaften zu erzeugen. Allerdings zeigte sich die Kombination aus *G. sessile* und Robinie in dieser Arbeit besonders vielversprechend, die Proben dieser Gruppe zeigten im Kompressionstest nahezu identische Materialeigenschaften mit sehr ähnlichem Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Kurven (siehe **Abbildung 18**). Unter industriellen Bedingungen könnte die Variation in der Materialeigenschaften durch genormte Prozesse sicher deutlich herabgesetzt werden und die Komposite somit eine echte Alternative zu Styropor darstellen. Eine weitere Erforschung dieser Pilz-Substrat-Kombination wäre also sinnvoll. Dass bestimmte Proben der Pilzkomposite vor Durchführung des Kompressionsversuches eine Krümmung aufwiesen, wurde bereits im Verlauf dieser Arbeit erwähnt. Betrachtet man beispielsweise die Spannungs-

Dehnungs-Kurven für Komposite mit *F. fomentarius*, liegen diese eng beieinander, diese Proben zeigten aber auch keine sichtbare Krümmung. Die Spannungs-Dehnungs-Kurven der Komposite mit *G. sessile* liegen etwas weniger eng zusammen, die Komposite wiesen teilweise eine leichte Krümmung auf. Für Komposite mit *T. versicolor* war eine deutliche Krümmung für die Proben mit Roteiche und Robinie zu erkennen und die Spannungs-Dehnungs-Kurven innerhalb einer Gruppe fallen weiter auseinander. Dies legt den Verdacht nahe, dass durch die Krümmung die Auswertung der eigentlichen Materialeigenschaften der Komposite erschwert worden sein könnte. Betrachtet man die Spannungs-Dehnungs-Kurven für *T. versicolor* und Roteiche (siehe **Abbildung 20** im Anhang) sind aufgrund der Brüche der Komposite während des Kompressionsversuches deutliche Spannungsabfälle zu beobachten, wodurch eine Erhöhung der Dehnung begünstigt wird. Somit ist die Vergleichbarkeit für das Verhalten von Pilzkompositen aus verschiedenen Kombinationen aus Pilz- und Holzart gegenüber Belastungen einschränkt. Als dem grundsätzlichen Trend lässt sich erkennen (siehe **Abbildung 8**), dass Komposite mit *F. fomentarius* bei Belastung zu einer etwas geringeren Dehnung neigen als Komposite mit *G. sessile*. Für Komposite mit *T. versicolor* ist nochmal eine deutlich höhere Dehnung festzustellen. Aufgrund der bereits angesprochenen unterschiedlichen Krümmungen der Komposite kann aber keine sichere Schlussfolgerung gezogen werden, dass Komposite mit *F. fomentarius* widerstandsfähiger sind als Komposite mit den anderen beiden Pilzarten. Das Substrat scheint keinen großen Einfluss auf das Materialverhalten der Pilzkomposite aus *F. fomentarius* und *G. sessile* zu haben, die Spannungs-Dehnungs-Kurven fallen wie bereits erwähnt nahe zusammen. Für Komposite mit *T. versicolor* fallen die Kurven in Abhängigkeit vom Substrat zwar relativ weit auseinander (siehe **Abbildung 11**), jedoch wiesen die Komposite aus der Kombination mit Buche keine Krümmung auf, weshalb es nicht überrascht, dass diese Komposite die geringste Dehnung aufweisen verglichen mit den anderen Kompositen von *T. versicolor*. Da sowohl die Proben von *T. versicolor* und Robinie als auch von *T. versicolor* und Roteiche eine sehr ähnliche Krümmung aufwiesen, kann man davon ausgehen, dass die Unterschiede, die im Spannungs-Dehnungs-Diagramm zu sehen sind (siehe **Abbildung 11**) auf das verwendete Substrat zurückzuführen sind. Demnach bildet *T. versicolor* mit Robinie Komposite mit einer höheren Druckfestigkeit als mit Roteiche. Neben der plastischen Verformung der Komposite, die während der Belastung auftrat und in den Spannungs-Dehnungs-Diagrammen dargestellt ist, wurde auch die plastische Deformation in Form der Reduktion der Probenhöhen nach Beendigung des Versuches ermittelt. Es zeigt sich, dass sich die Pilzkomposite deutlich elastischer gegenüber einer Belastung von 2000N verhalten als die EPS-Proben. Besonders auffällig ist, dass die Kombinationen aus *T. versicolor* mit Roteiche und Buche ein komplett elastisches Verhalten zeigten, mit keiner zurückbleibenden Deformation, während die EPS-Proben nach einmaliger Belastung bereits eine Reduktion in der Probenhöhe von über 35%

aufwiesen. Somit könnten, die Komposite von *T. versicolor* mit Buche und Roteiche dafür geeignet sein, auch mehrfache Belastungen unbeschadet zu überstehen. In weiteren Studien sollte dieser Befund überprüft werden. Sollte dies der Fall sein, könnten im besten Fall daraus Produkte entwickelt werden, die eine höhere Lebensdauer gegenüber mehrfachen Belastungen aufweisen als EPS und somit zu einer nachhaltigeren Wirtschaft beitragen. Interessant ist, dass die Komposite mit *T. versicolor* wie bereits beschrieben während des Kompressionsversuchs die größte Streuung in ihrer Druckfestigkeit aufwiesen sowohl zwischen den Substraten als auch innerhalb einer Gruppe, dies aber scheinbar keinen Einfluss auf die Reduktion der Probenhöhen hatte. Die Hypothese, dass Komposite aus einheimischen Pilzen mit neophytischen Baumarten eine höhere Plastizität aufweisen, kann nicht belegt werden. Für die Reduktion der Probenhöhen von Kompositen aus *T. versicolor* mit den verschiedenen Substraten konnte kein signifikanter Unterschied festgestellt werden. Die höhere Materialfestigkeit der Probe aus *T. versicolor* und Buche während des Kompressionsversuches kann aufgrund der nicht vorhandenen Krümmung im Gegensatz zu den Kombinationen mit den anderen zwei Substraten nicht sicher nachgewiesen werden. Das Fehlen der Kombination von *F. fomentarius* und Buche erschwert zudem eine Aussage für die Hypothese, da somit für *F. fomentarius* die heimische Baumart zu Vergleichszwecken wegfällt. Nach der abschließenden Betrachtung aller Kompositversuche, kann man trotzdem davon ausgehen, dass es möglich ist, sowohl mit einheimischen als auch ausländischen Baumarten und einheimischen Weißfäulepilzen Komposite herzustellen, die ähnliche bis gleichwertige Materialeigenschaften aufweisen.

Während aus den Pilzarten *T. versicolor* und *G. sessile* problemlos Pilzkomposite hergestellt wurden konnten, ohne jegliche Kontaminationen in der Wachstumsphase, gestaltete sich die Verwendung von *F. fomentarius* zur Herstellung von Pilzkompositen sehr schwierig. Während der Wachstumsphase des Pilzes auf den verschiedenen Substraten mussten mehrere mit Substrat befüllte Pilztüten aufgrund von Kontamination durch andere Pilze entsorgt werden. Aus diesem Grund konnten leider auch keine Komposite aus der Kombination von *F. fomentarius* und Buche hergestellt werden. Zudem lag die Inkubationszeit für Komposite mit *F. fomentarius* höher (siehe **Tabelle 4**), was auch einen ökonomischen Nachteil für eine industrielle Massenproduktion darstellen würde. Auch die Tendenz der Komposite mit *F. fomentarius*, nach Ende des Kompressionsversuches eher zum Zerbröseln zu neigen, lässt an der Dauerhaftigkeit der Komposite gegenüber mehrfach auftretenden Belastungen zweifeln. Jedoch ist das Wachstumsverhalten einer Pilzart oft stammabhängig, so dass es sich in dieser Arbeit auch um einen Stamm gehandelt haben könnte, der schlechter geeignet ist (Pohl et al., 2022). So wird für einen anderen Stamm von *F. fomentarius* durchaus die Eignung

zur Herstellung von Kompositwerkstoffen aus landwirtschaftlichen Rohstoffen beschrieben (Pohl et al., 2022). Um sicherzustellen, ob die Pilzart *F. fomentarius* tatsächlich weniger geeignet ist für die Herstellung von Kompositen aus Sägespänen von Buche, Roteiche und Robinie, empfiehlt es sich, weitere Stämme dieser Pilzart zu untersuchen.

Die Auswertung der Forschungsergebnisse wurde z.T. durch bestimmte Limitationen im Forschungsprozess erschwert. Wie bereits beschrieben, stellt der Wegfall der Kombination aus *F. fomentarius* und Buche zu Vergleichszwecken einen Verlust dar, und verringert somit die Aussagekraft für die Materialeigenschaften der anderen Pilzkomposite mit *F. fomentarius*. Für die Herstellung der Pilzkomposite wurde das von Pilzmyzel durchwachsene Substrat in Negativformen gefüllt. Da die Formen aus Karton hergestellt wurden und das Substrat anschließend handfest angedrückt wurde, ist eine geringe Variation in Form und Dichte der verschiedenen Komposite nicht auszuschließen. Für zukünftige Versuche wäre es gut, ein Verfahren zu entwickeln, um diese Unterschiede nach Möglichkeit noch weiter zu verringern. Es könnten z.B. Negativformen mit Hilfe von 3D-Druckern hergestellt werden und das Substrat durch ein festes Gewicht angedrückt werden. Durch die Trocknung der Komposite bei 105°C kam es teilweise zu Längskrümmungen, es ist daher zu empfehlen, für zukünftige Versuche die Pilzkomposite bei ihrer Trocknung etwas zu beschweren oder die Trockentemperatur dementsprechend anzupassen. Für weiterführende Forschungen wäre es sinnvoll, noch weitere Materialeigenschaften von Pilzkompositen auf Sägespanbasis zu untersuchen wie z.B. die Wärmedämmung, Schalldämmung oder auch die Zugfestigkeit. Außerdem sollten in einer größer angelegten Studie mit mehreren Baumarten und Pilzarten verschiedene Kombinationen aus neophytischen Baumarten und einheimischen Weißfäulepilzen noch eingehender untersucht werden, die Durchführung einer so groß angelegten Studie hätte jedoch den Arbeitsaufwand für diese Bachelorarbeit überstiegen. Die Ergebnisse dieser Arbeit legen zudem nahe, die Kombination aus *G. sessile* und Robinie weiter zu erforschen, aufgrund der sich zeigenden sehr homogenen Materialeigenschaften der verschiedenen Proben im Kompressionsversuch. Auch für Komposite aus Sägespänen mit *T. versicolor* wäre eine weitere Erforschung sinnvoll aufgrund der zum Teil vollständigen Elastizität der Proben trotz einer Belastung von 2000N.

6. Fazit

Pilzkomposite zeigen sich als vielversprechende Werkstoffe, um erdölbasierte Produkte wie z.B. Styropor zu ersetzen (Ziegler et al., 2016). Sie können somit einen wichtigen Beitrag für einen Wandel hin zu einer biobasierten Kreislaufwirtschaft leisten (Meyer et al., 2020). Als Substrate für Pilzkomposite werden in der Forschung oft einjährige Pflanzen sowie Hart- oder Weichhölzer verwendet, zu den verwendeten Holzarten werden jedoch oftmals keine genauen Angaben gemacht (Sydor et al., 2022). Neophytische Baumarten können vom Klimawandel profitieren und in Zukunft eine wichtigere Rolle in der Forstwirtschaft einnehmen, über ihre Beziehung zu einheimischen Weißfäulepilzen ist bisher aber kaum etwas bekannt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde daher der Forschungsfrage nachgegangen, inwiefern sich neophytische Baumarten zur Herstellung von Pilzkompositen mit einheimischen Weißfäulepilzen eignen. Als Neophyten wurden Robinie und Roteiche ausgewählt und als einheimische Weißfäulepilze *Trametes versicolor* und *Fomes fomentarius*. Zudem wurden für die Versuche zusätzlich auch Buche als einheimische Baumart und der Laborpilz *Ganoderma sessile* zu Vergleichszwecken untersucht. Somit ergaben sich 9 verschiedene Kombinationen aus Holz- und Pilzart. Aufgrund der ERH wurde davon ausgegangen, dass die einheimischen Weißfäulepilze schlechter auf den Neophyten wachsen, und daher auch die Pilzkomposite schlechtere Materialeigenschaften aufweisen. In einem ersten Versuch wurden, die Wuchsgeschwindigkeit der Pilzarten sowie die Hyphendurchmesser der Pilze bestimmt. Dies erfolgte aufgrund der besseren Möglichkeit zur Auswertung mit Wafern anstatt mit Pilzkompositen. Für die weiteren Versuche wurden Komposite aus den Pilzarten und Sägespänen der beschriebenen Holzarten hergestellt. Untersucht wurde neben der Hygroskopizität der Komposite auch deren Verhalten im Kompressionsversuch und ihre anschließende Reduktion in der Probenhöhe. Aufgrund von Kontaminationen in der Wachstumsphase konnten für die Kombination von *F. fomentarius* und *Buche* keine Komposite hergestellt werden. Zudem ist durch die trocknungsbedingte Krümmung mancher Komposite die Aussagekraft für die Kompressionsversuche differenziert zu betrachten. Bei der abschließenden Betrachtung der Ergebnisse aus den Experimenten fällt auf, dass sich aus der verminderten Wuchsgeschwindigkeit von *F. fomentarius* und *T. versicolor* auf den Wafern der Neophyten keine Rückschlüsse auf die Materialeigenschaften der Komposite ziehen lassen. Für Komposite aus neophytischen Baumarten und einheimischen Weißfäulepilzen konnten keine schlechteren Materialeigenschaften als für die restlichen Komposite festgestellt werden. Die am Anfang aufgestellte Forschungsfrage lässt sich somit insofern beantworten, dass es durchaus möglich ist, aus der Kombination von einheimischen Weißfäulepilzen und neophytischen Baumarten Pilzkomposite herzustellen. Die erforderlichen Materialeigenschaften müssen für ihre spezifische Anwendung jedoch noch genauer

betrachtet werden. In Bezug auf die Hygroskopizität kann festgehalten werden, dass es keine signifikanten Unterschiede für die verschiedenen Kombinationen aus Pilz- und Holzart gab. Für die Druckfestigkeit wurden vergleichbare Werte wie für Pilzkomposite aus anderen Substraten wie Hanfschäben oder Rapsstroh festgestellt, im Vergleich zu EPS lag die Druckfestigkeit deutlich höher. Um noch genauere Aussagen machen zu können, welche Kombination aus Pilz- und Holzart am widerstandsfähigsten gegenüber Druck reagiert, sollte der Versuch mit Kompositen wiederholt werden, die keine Variation in ihrer Krümmung aufweisen. Die Ergebnisse aus den Kompositversuchen deuten aber daraufhin, dass durch die Verwendung von neophytischen Baumarten als Substrat in Kombination mit einheimischen Weißfäulepilzen Komposite, mit ähnlichen bis gleichwertigen Materialeigenschaften wie Komposite aus einheimischen Baumarten in Kombination mit einheimischen Weißfäulepilzen erzeugt werden können. Dies bietet der Wissenschaft und infolge der Industrie interessante Perspektiven, da es dafür spricht, dass sich bei der Herstellung von Pilzkompositen keine Einschränkungen durch die Herkunft von Pilz- und Holzarten ergeben. Durch die Verwendung der Holzarten Robinie, Roteiche und Buche erweitert diese Arbeit den wissenschaftlichen Kenntnisstand über die Nutzung von spezifischen Holzarten als Substrat zur Herstellung von Pilzkompositen, indem die Holzarten genau definiert werden und nicht, wie z. T. in anderen Studien, undefiniert bleiben (Sydor et al., 2022). Die regionale Verfügbarkeit von agrarforstwirtschaftlichen Abfallprodukten stellt aufgrund der geringeren Transportkosten einen Vorteil bei der Erzeugung von Pilzkompositen dar (Vašatko et al., 2022). Diese Studie spricht dafür, dass auch in Zukunft, mit wachsender Bedeutung neophytischer Baumarten in der Forstwirtschaft, regionale forstwirtschaftliche Abfallprodukte weiterhin genutzt werden können, unabhängig von der Baumart. Die Ergebnisse dieser Studie sprechen auch dafür, dass mit Sägespänen Komposite hergestellt werden können, die in ihrer Druckfestigkeit mit anderen Substraten wie Hanfschäben oder Rapsstroh vergleichbar sind (Pohl et al., 2022). Bei einem geschätzten weltweiten Vorkommen von 6 Millionen Pilzarten, von denen bisher nur etwa 2% beschrieben sind, gibt es noch reichlich Potenzial, vielversprechende Kombinationsmöglichkeiten aus Substrat- und Pilzart zu entdecken (Taylor et al., 2014).

Literaturverzeichnis

- Abhijith, R., Ashok, A. & Rejeesh, C. R. (2018). Sustainable packaging applications from mycelium to substitute polystyrene: a review. *Materials Today: Proceedings*, 5(1), 2139–2145. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.09.211>
- Abts, G. (2020). *Kunststoff-Wissen für Einsteiger: Grundlagen, Eigenschaften und Recycling polymerer Werkstoffe* (4., aktualisierte und erweiterte Auflage). Hanser. <https://doi.org/10.3139/9783446465251>
- Al Gore (2007). *Nobel Lecture*. <https://www.nobelprize.org/prizes/peace/2007/gore/lecture/> (zuletzt geprüft: 07.02.2023)
- APA. (2019). *Das Phänomen Pilz und unsere Geschichte*. <https://science.apa.at/power-search/246231464302886953> (zuletzt geprüft: 28.01.2023)
- Appels, F.V.W., Camere, S., Montalti, M., Karana, E., Jansen, K.M.B., Dijksterhuis, J., Krijgsheld, P. & Wösten, H.A.B. (2019). Fabrication factors influencing mechanical, moisture- and water-related properties of mycelium-based composites. *Materials & Design*, 161, 64–71. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.11.027>
- Attias, N., Danai, O., Tarazi, E., Pereman, I. & Grobman, Y. J. (2019). Implementing bio-design tools to develop mycelium-based products. *The Design Journal*, 22(sup1), 1647–1657. <https://doi.org/10.1080/14606925.2019.1594997>
- Bari, E., Daryaei, Daryaei, Mehrdad Ghodskhah, Karim, M., Bahmani, M., Schmidt, O., Woodward, S., Tajick Ghanbary, M. A. & Sistani, A. (2019). Decay of *Carpinus betulus* wood by *Trametes versicolor* - An anatomical and chemical study. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 137, 68–77. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2018.11.011>
- Bayerisches Landesamt für Umwelt. (2021). *Neophyten - gebietsfremde Pflanzen*. <https://www.lfu.bayern.de/natur/neobiota/neophyten/index.htm> (zuletzt geprüft: 21.01.2023)
- Bundesministerium für Bildung und Forschung. (2020). *Nationale Bioökonomiestrategie*. https://www.bmbf.de/SharedDocs/Publikationen/de/bmbf/7/31576_Nationale_Bioekonomiestrategie_Langfassung.pdf?__blob=publicationFile&v=6
- Dörfelt, H. (2007). Pilze der Buchenwälder. *Natur und Landschaft*, 82(9/10), 407–409.
- Ecovative LLC. (2019). *Mushroompackaging*. https://www.instagram.com/p/Bu_wYc1nqif/ (zuletzt geprüft: 07.02.2023)
- Ecovative LLC. (2023). *The Mycelium Technology Company*. <https://www.ecovative.com/> (zuletzt geprüft: 28.01.2023)
- Elsacker, E., Vandelook, S., Brancart, J., Peeters, E. & Laet, L. de (2019). Mechanical, physical and chemical characterisation of mycelium-based composites with different types of

- lignocellulosic substrates. *PLOS ONE*, 14(7).
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0213954>
- Girometta, C., Picco, A. M., Baiguera, R. M., Dondi, D., Babbini, S., Cartabia, M., Pellegrini, M. & Savino, E. (2019). Physico-Mechanical and Thermodynamic Properties of Mycelium-Based Biocomposites: A Review. *Sustainability*, 11(1), 281.
<https://doi.org/10.3390/su11010281>
- Gross, A. & Brännhage, J. (2020). *Merkblatt Eichenmehltau*.
<https://www.waldwissen.net/de/lebensraum-wald/pilze-und-flechten/merkblatt-eichenmehltau> (zuletzt geprüft: 31.01.2023)
- Keane, R. M. & Crawley, J. (2002). Exotic plant invasions and the enemy release hypothesis. *TRENDS in Ecology & Evolution*, 17(4), 164–170. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(02\)02499-0](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(02)02499-0)
- Kothe, H. & Kothe, E. (1996). *Pilzgeschichten: Wissenswertes aus der Mykologie*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-09361-0>
- Kubicek, C. P. (2013). *Fungi and lignocellulosic biomass*. Wiley-Blackwell.
- Kück, U., Nowrousian, M., Hoff, B. & Engh, I. (2009). *Schimmelpilze: Lebensweise, Nutzen, Schaden, Bekämpfung* (3. Aufl.). Springer Berlin Heidelberg.
<https://doi.org/10.1007/978-3-540-88717-1>
- Kuo, M. (2019). *Ganoderma sessile*.
https://www.mushroomexpert.com/ganoderma_sessile.html (zuletzt geprüft: 24.01.2023)
- Lelley, J. I. (2018). *No fungi no future: Wie Pilze die Welt retten können*. Springer.
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-56507-0>
- Loyd, A. L., Richter, B. S., Jusino, M. A., Truong, C., Smith, M. E., Blanchette, R. A. & Smith, J. A. (2018). Identifying the "Mushroom of Immortality": Assessing the Ganoderma Species Composition in Commercial Reishi Products. *Frontiers in microbiology*, 9, Artikel 1557, 1–14. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01557>
- LWF (Hrsg.). (2020). *Praxishilfe Klima-Boden-Baumartenwahl* (Bd. 2).
- LWF. (2023). *Die Buche - Baum des Jahres 2022*. <https://www.lwf.bayern.de/waldbau-bergwald/waldbau/087051/index.php> (zuletzt geprüft: 01.02.2023)
- Material-Archiv. (2015). *Pilzwerkstoff, aus Myzel*.
https://materialarchiv.ch/de/ma:material_1741/?q=pilz (zuletzt geprüft: 01.03.2023)
- Menzel, A., Hempel, S., Davison, J., Moora, M., Pyšek, P., Rillig, M. C., Zobel, M. & Kühn, I. (2018). Widely distributed native and alien plant species differ in arbuscular mycorrhizal associations and related functional trait interactions. *Ecography*, 41(9), 1583–1593.
<https://doi.org/10.1111/ecog.03367>

- Meyer, V., Basenko, E. Y., Benz, J. P., Braus, G. H., Caddick, M. X., Csukai, M., Vries, R. P. de, Endy, D., Frisvad, J. C., Gunde-Cimerman, N., Haarmann, T., Hadar, Y., Hansen, K., Johnson, R. I., Keller, N. P., Kraševac, N., Mortensen, U. H., Perez, R., Ram, A. F. J., . . . Wösten, H. A. B. (2020). Growing a circular economy with fungal biotechnology: a white paper. *Fungal biology and biotechnology*, 7(5), 1–23. <https://doi.org/10.1186/s40694-020-00095-z>
- Meyer, V. & Rapp, R. (Hrsg.). (2020). *Mind the Fungi*. Universitätsverlag TU Berlin. <https://doi.org/10.14279/depositonce-10350>
- Mogu. (2022a). *Acoustic Mycelum Panels*. <https://mogu.bio/press/> (zuletzt geprüft: 07.02.2023)
- Mogu. (2022b). *Radical by Nature*. <https://mogu.bio/> (zuletzt geprüft: 28.01.2023)
- MycoWorks. (2021). *Fine Mycelium*. <https://www.instagram.com/p/CMzjjKUIZ3f/> (zuletzt geprüft: 07.02.2023)
- MycoWorks. (2023). *Our Products - MycoWorks*. <https://www.mycoworks.com/our-products> (zuletzt geprüft: 27.01.2023)
- Osma, J. F., Moilanen, U., Toca-Herrera, J. L. & Rodríguez-Couto, S. (2011). Morphology and laccase production of white-rot fungi grown on wheat bran flakes under semi-solid-state fermentation conditions. *FEMS microbiology letters*, 318(1), 27–34. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.2011.02234.x>
- Pelletier, M. G., Holt, G. A., Wanjura, J. D., Bayer, E. & McIntyre, G. (2013). An evaluation study of mycelium based acoustic absorbers grown on agricultural by-product substrates. *Industrial Crops and Products*, 51, 480–485. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.09.008>
- Pelletier, M. G., Holt, G. A., Wanjura, J. D., Lara, A. J., Tapia-Carillo, A., McIntyre, G. & Bayer, E. (2017). An evaluation study of pressure-compressed acoustic absorbers grown on agricultural by-products. *Industrial Crops and Products*, 95, 342–347. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.10.042>
- Pohl, C., Schmidt, B., Nunez Guitar, T., Klemm, S., Gusovius, H.-J., Platzk, S., Kruggel-Emden, H., Klunker, A., Völlmecke, C., Fleck, C. & Meyer, V. (2022). Establishment of the basidiomycete *Fomes fomentarius* for the production of composite materials. *Fungal biology and biotechnology*, 9(4), 1–13. <https://doi.org/10.1186/s40694-022-00133-y>
- Sattler, H. (2021). *Schmetterlings-Tramete – Trametes versicolor*. <https://fungiversum.de/trametes-versicolor/> (zuletzt geprüft: 24.01.2023)
- Schritt, H., Vidi, S. & Pleissner, D. (2021). Spent mushroom substrate and sawdust to produce mycelium-based thermal insulation composites. *Journal of Cleaner Production*, 313, 127910. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127910>

- Skowronek, S. (2020). Die Robinie als invasive Problemart im Naturschutz. *LWF-Wissen*(84), 51–55.
- Statista. (2022). *CO2-Emissionen weltweit in den Jahren 1960 bis 2021*. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/37187/umfrage/der-weltweite-co2-ausstoss-seit-1751/> (zuletzt geprüft: 04.02.2023)
- Suerbaum, S., Burchard, G.-D., Kaufmann, S. H. E. & Schulz, T. F. (Hrsg.). (2020). *Medizinische Mikrobiologie und Infektiologie* (9. Aufl.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-61385-6>
- Sydor, M., Cofta, G., Doczekalska, B. & Bonenberg, A. (2022). Fungi in Mycelium-Based Composites: Usage and Recommendations. *Materials*, 15(18), 6283. <https://doi.org/10.3390/ma15186283>
- Taylor, D. L., Hollingsworth, T. N., McFarland, J. W., Lennon, N. J., Nusbaum, C. & Ruess, R. W. (2014). A first comprehensive census of fungi in soil reveals both hyperdiversity and fine-scale niche partitioning. *Ecological Monographs*, 84(1), 3–20. <https://doi.org/10.1890/12-1693.1>
- Vašatko, H., Gosch, L., Jauk, J. & Stavric, M. (2022). Basic Research of Material Properties of Mycelium-Based Composites. *Biomimetics*, 7(51). <https://doi.org/10.3390/biomimetics7020051>
- Vor, Torsten, Spellmann, Hermann, Bolte, Andreas, Ammer & Christian (Hrsg.). (2015). *Göttinger Forstwissenschaften: Bd. 7. Potenziale und Risiken eingeführter Baumarten: Baumartenportraits mit naturschutzfachlicher Bewertung*. Universitätsverlag Göttingen.
- Ward, P. L., Wohlt, J. E., Zajac, P. K. & Cooper, K. R. (2000). Chemical and Physical Properties of Processed Newspaper Compared to Wheat Straw and Wood Shavings as Animal Bedding. *Journal of Dairy Science*, 83(2), 359–367.
- Williamson, M. (1996). *Biological Invasions*. Chapman and Hall.
- Wittig, R. & Niekisch, M. (2014). *Biodiversität: Grundlagen, Gefährdung, Schutz*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-54694-5>
- WSL. (2023a). *Der Echte Zunderschwamm (Fomes fomentarius)*. <https://totholz.wsl.ch/de/artenportraits/echter-zunderschwamm.html> (zuletzt geprüft: 24.01.2023)
- WSL. (2023b). *Holzfäulen: Braunfäule, Weissfäule und Moderfäule*. <https://totholz.wsl.ch/de/totholz/abbau-von-holz/holzfaeulen.html> (zuletzt geprüft: 10.02.2023)
- Yang, Z., Zhang, F., Still, B., White, M. & Amstislavski, P. (2017). Physical and Mechanical Properties of Fungal Mycelium-Based Biofoam. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(7), Artikel 04017030. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001866](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001866)

Ziegler, A. R., Bajwa, S. G., Holt G. A., McIntyre G. & Bajwa, D. S. (2016). Evaluation of Physico-Mechanical Properties of Mycelium Reinforced Green Biocomposites Made from Cellulosic Fibers. *Applied Engineering in Agriculture*, 32(6), 931–938. <https://doi.org/10.13031/aea.32.11830>

Anhang

A.1 Spannungs-Dehnungs-Diagramme

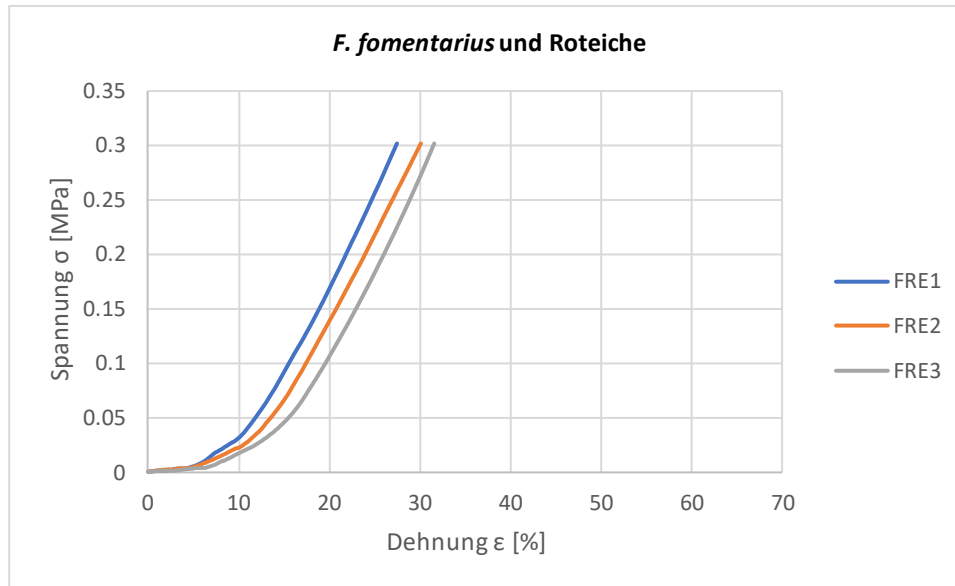


Abbildung 15: Es werden die Spannungs-Dehnungs-Kurven für drei Proben aus der Kombination von *F. fomentarius* und Roteiche im Spannungs-Dehnungs-Diagramm dargestellt. Die drei Proben sind in Blau, Orange und Grau dargestellt.

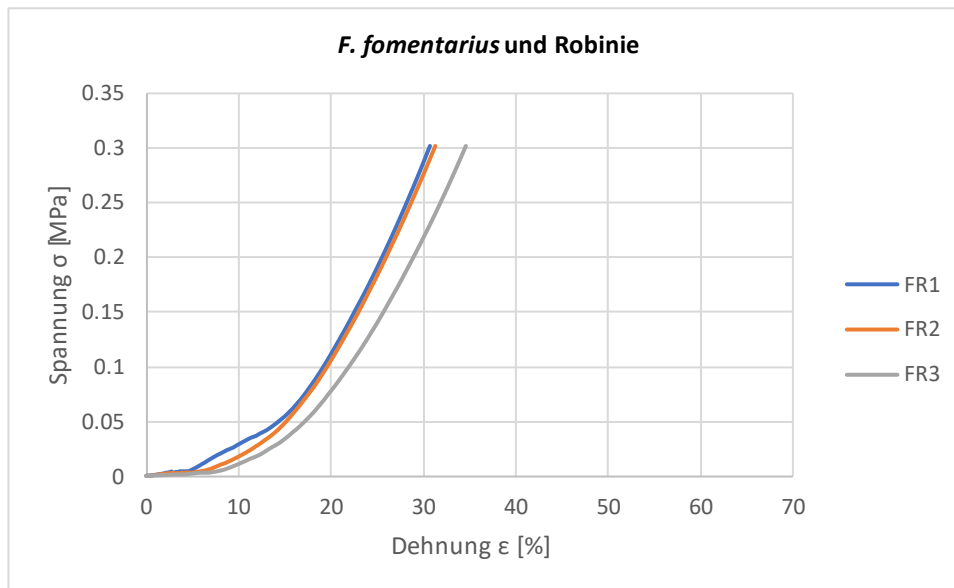


Abbildung 16: Es werden die Spannungs-Dehnungs-Kurven für drei Proben aus der Kombination von *F. fomentarius* und Robinie im Spannungs-Dehnungs-Diagramm dargestellt. Die drei Proben sind in Blau, Orange und Grau dargestellt.

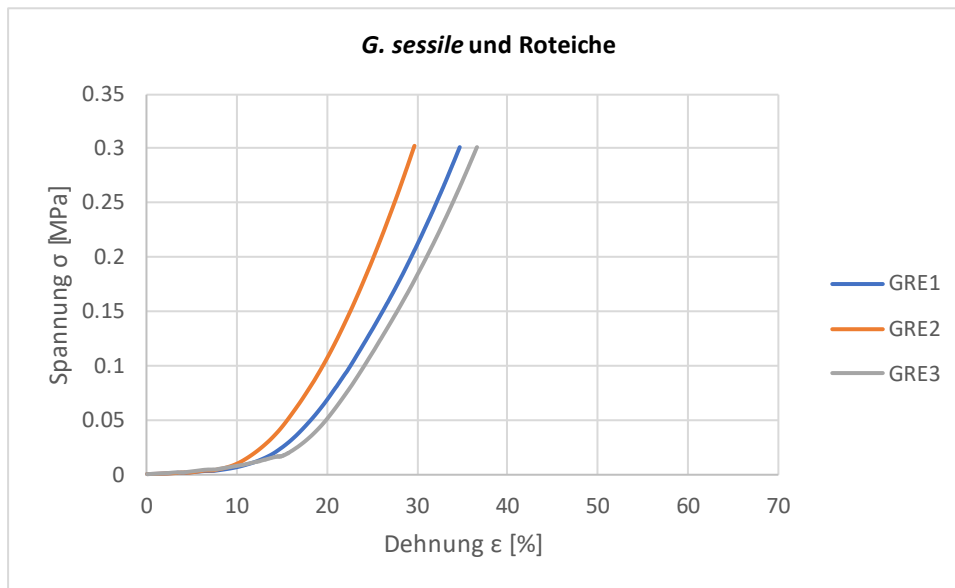


Abbildung 17: Es werden die Spannungs-Dehnungs-Kurven für drei Proben aus der Kombination von *G. sessile* und Roteiche im Spannungs-Dehnungs-Diagramm dargestellt. Die drei Proben sind in Blau, Orange und Grau dargestellt.

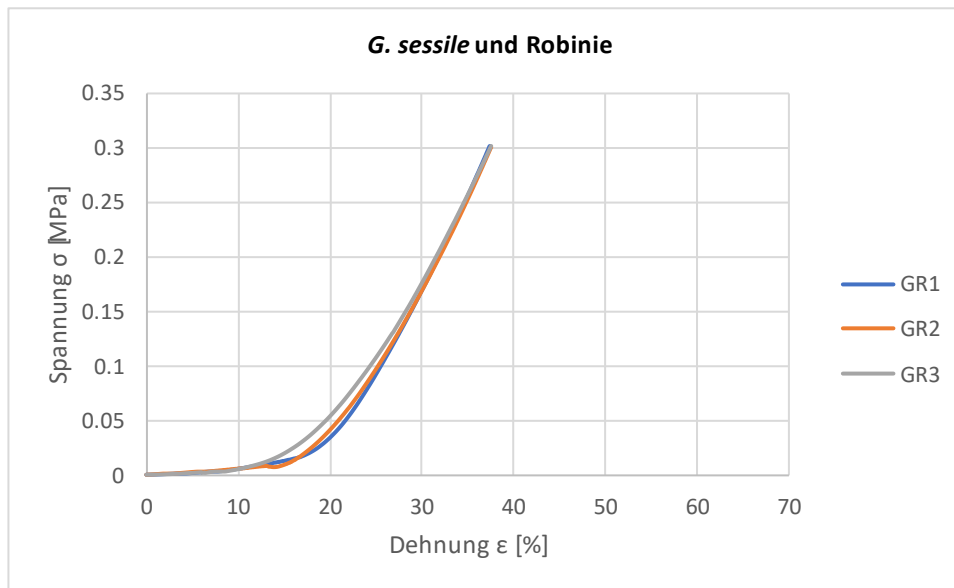


Abbildung 18: Es werden die Spannungs-Dehnungs-Kurven für drei Proben aus der Kombination von *G. sessile* und Robinie im Spannungs-Dehnungs-Diagramm dargestellt. Die drei Proben sind in Blau, Orange und Grau dargestellt.

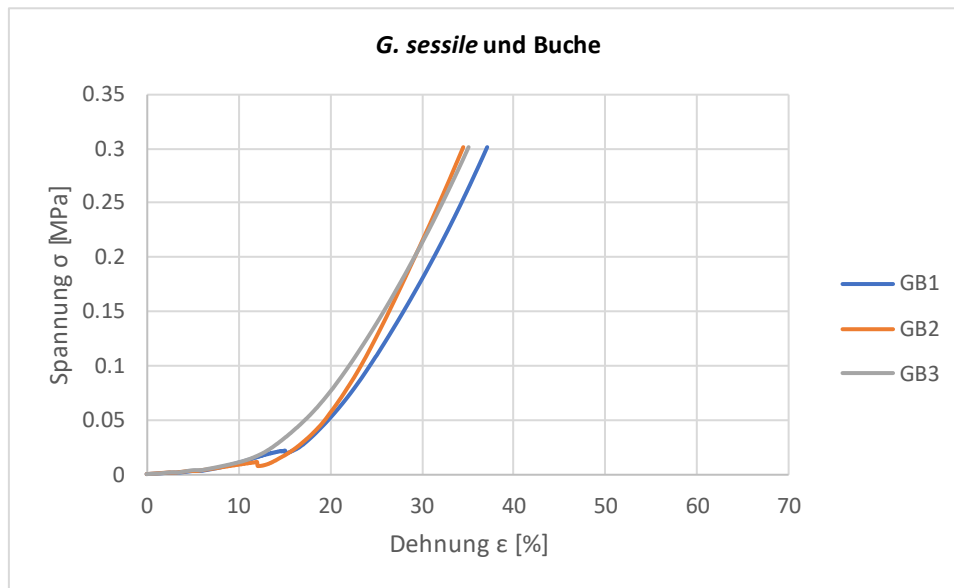


Abbildung 19: Es werden die Spannungs-Dehnungs-Kurven für drei Proben aus der Kombination von *G. sessile* und Buche im Spannungs-Dehnungs-Diagramm dargestellt. Die drei Proben sind in Blau, Orange und Grau dargestellt.

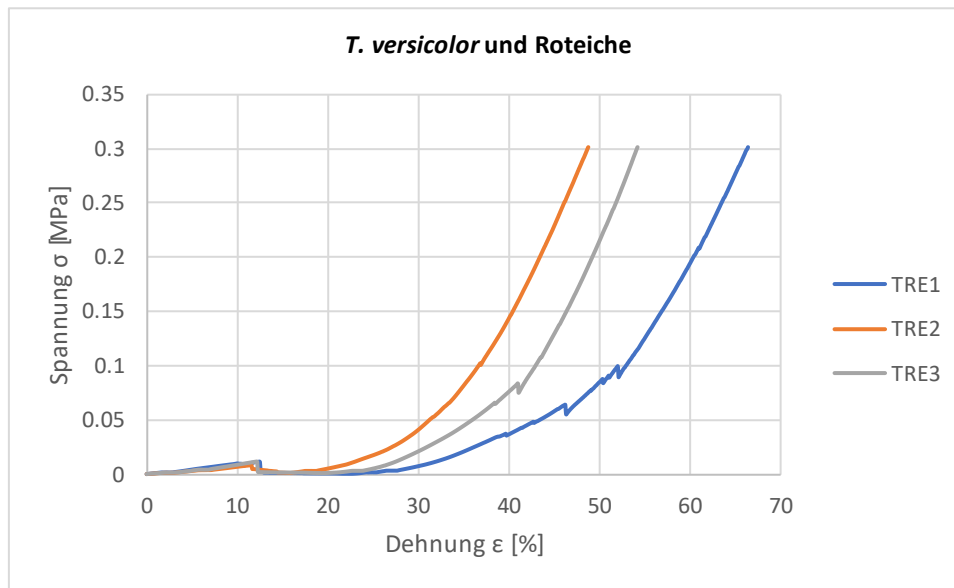


Abbildung 20: Es werden die Spannungs-Dehnungs-Kurven für drei Proben aus der Kombination von *T. versicolor* und Roteiche im Spannungs-Dehnungs-Diagramm dargestellt. Die drei Proben sind in Blau, Orange und Grau dargestellt.

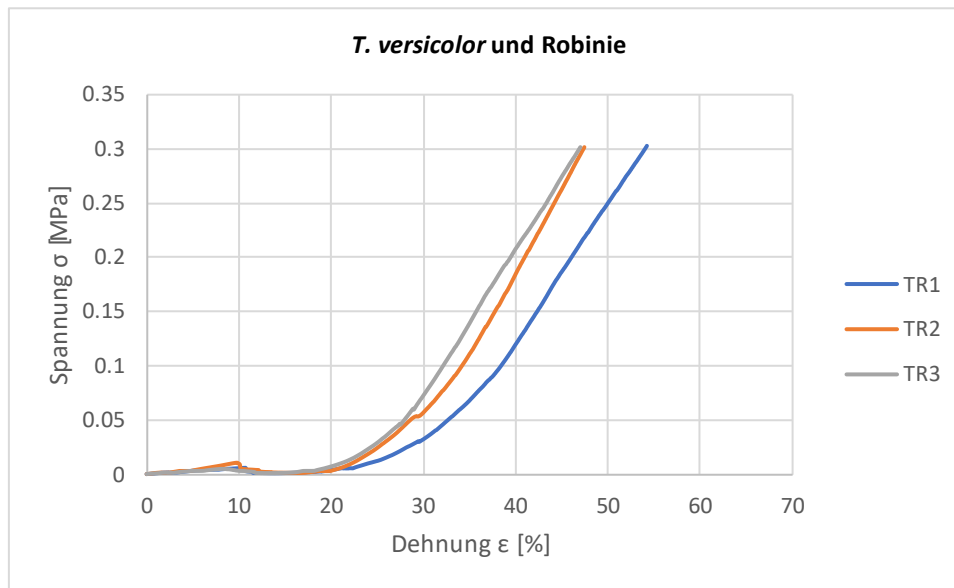


Abbildung 21: Es werden die Spannungs-Dehnungs-Kurven für drei Proben aus der Kombination von *T. versicolor* und Robinie im Spannungs-Dehnungs-Diagramm dargestellt. Die drei Proben sind in Blau, Orange und Grau dargestellt.

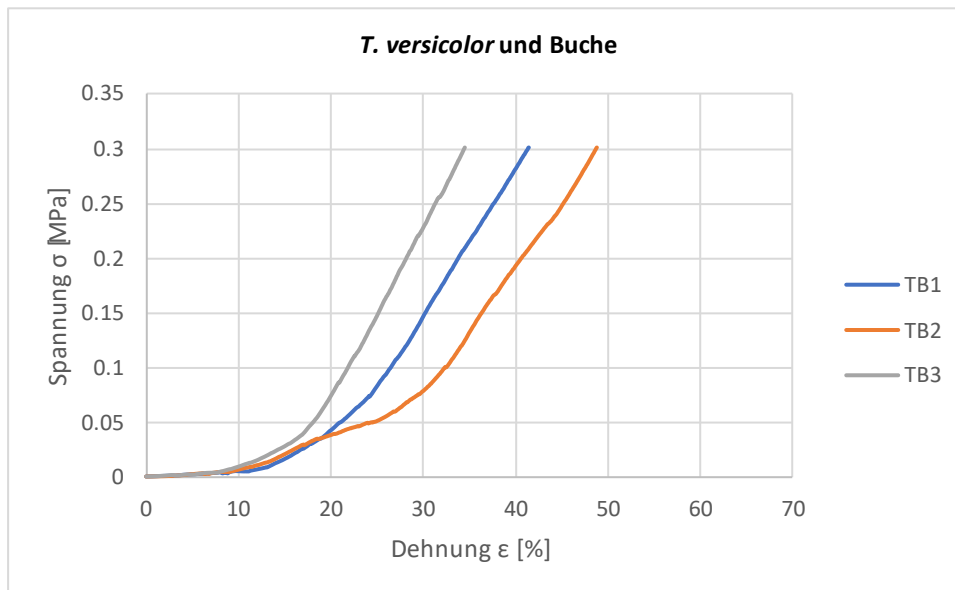


Abbildung 22: Es werden die Spannungs-Dehnungs-Kurven für drei Proben aus der Kombination von *T. versicolor* und Buche im Spannungs-Dehnungs-Diagramm dargestellt. Die drei Proben sind in Blau, Orange und Grau dargestellt.

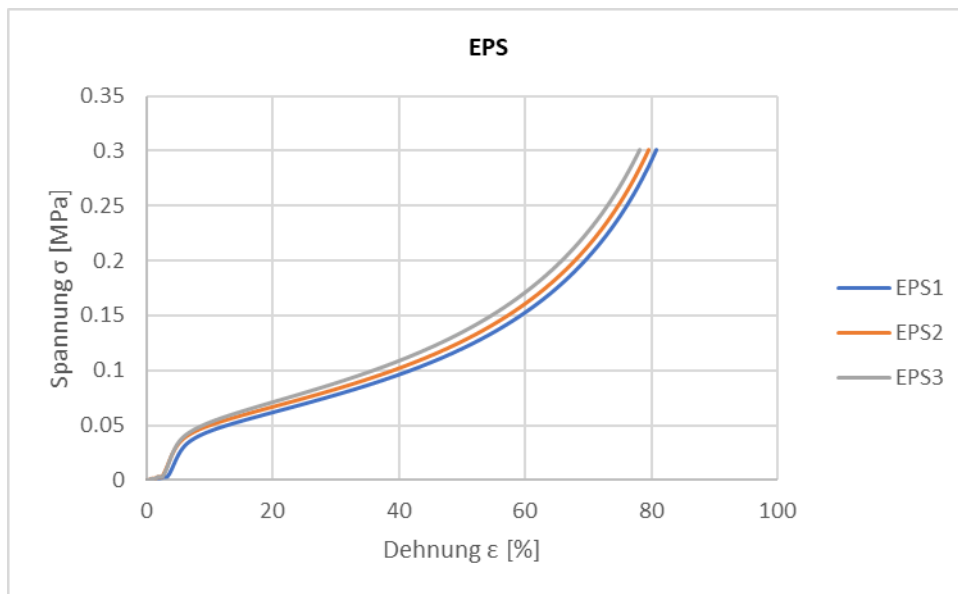


Abbildung 23: Es werden die Spannungs-Dehnungs-Kurven für drei EPS-Proben im Spannungs-Dehnungs-Diagramm dargestellt. Die drei Proben sind in Blau, Orange und Grau dargestellt.

A.2 Bilder



Abbildung 24: Es wird ein Komposit von *T. versicolor* und Buche vor Durchführung des Kompressionsversuches mit keiner sichtbaren Krümmung dargestellt.