



Wien, 23.09.2025

Studie

Pilze: Rohstoff für vielseitige Anwendungen in einer regionalen und biobasierten Kreislaufwirtschaft

Im Auftrag des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft,
Klima- und Umweltschutz, Regionen und Wasserwirtschaft

Erstellt von

Dr. Valeria Ellena, MyPilz GmbH

Dr. Wolfgang Hinterdobler, MyPilz GmbH

Mit Unterstützung bei der Datenerhebung durch die BioBASE GmbH

MyPilz GmbH – Pilzforschung auf Augenhöhe
Wienerbergstraße 55/13–15, 1120 Wien
www.mypilz.eu, office@mypilz.eu

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
Zusammenfassung	4
1 Motivation der Studie	5
2 Potenzial der modernen Pilzbiotechnologie	6
2.1 Pharmaindustrie	7
2.2 Landwirtschaft	8
2.3 Lebensmittelindustrie	9
2.4 Chemie und Biotechnologie	10
2.5 Neue Materialien	11
2.6 Abfallbehandlung	11
3 Ziel der Studie	11
4 Methodik	12
4.1 Literaturrecherche	12
4.2 Explorative Online-Umfrage	12
4.3 Experteninterviews	12
5 Lebensmittelproduktion	13
5.1 Technologische Entwicklung	13
5.2 Standort Österreich	14
5.3 Verwendete Kultursubstrate	15
5.4 Nutzung von Reststoffen	15
5.5 Beitrag der Pilzzucht zur Erreichung gesellschaftlicher, industrieller und ökologischer Zielsetzungen	17
5.6 Herausforderungen und empfohlene Maßnahmen	18
5.6.1 Verbraucherakzeptanz und Bewusstseinsbildung	20
5.6.2 Wissenstransfer und Vernetzung zwischen Forschung und Praxis	21
5.6.3 Finanzierungsinstrumente und Förderungen	21
5.6.4 Substratversorgung und Regionalität	22
5.6.5 Fazit und Ausblick	22
6 Materialproduktion	23
6.1 Technologische Entwicklung	23
6.2 Verwendete Substrate	24
6.3 Auswahl geeigneter Pilzarten	25
6.4 Internationale Unternehmen und Standort Österreich	25

6.5	Beitrag von Myzelmaterialien zur Erreichung gesellschaftlicher, industrieller und ökologischer Zielsetzungen	27
6.6	Herausforderungen und empfohlene Maßnahmen	28
6.6.1	Standardisierung und regulatorische Rahmenbedingungen	30
6.6.2	Wissenschaftskommunikation und Wissenstransfer	31
6.6.3	Aufbau von Netzwerken und Kreislaufwirtschaft	31
6.6.4	Ökonomische Anreize und Produzentenverantwortung	32
6.6.5	Fazit und Ausblick	32
7	Abfallbehandlung mit Pilzen	33
7.1	Technologische Entwicklungen	33
7.2	Anwendungsfelder in der Abfallbehandlung	34
7.3	Zentrale Institutionen und Unternehmen	35
7.4	Mykoremediation	36
7.4.1	Biologische Grundlagen	36
7.4.2	Methoden der Mykoremediation	37
7.4.3	Vorteile und Limitationen	37
7.5	Beitrag der Abfallbehandlung mit Pilzen zur Erreichung gesellschaftlicher, industrieller und ökologischer Zielsetzungen	38
7.6	Herausforderungen und empfohlene Maßnahmen	39
7.6.1	Förderungen und Finanzierungen für Forschung und Pilotprojekte	40
7.6.2	Anpassung regulatorischer Rahmenbedingungen	40
7.6.3	Aufbau von Infrastruktur	40
7.6.4	Marktbewusstsein	41
7.6.5	Fazit und Ausblick	41
8	Synergien zwischen Lebensmittel-, Material- und Abfallprozessen	41
9	Fazit und Resümee	43
10	Handlungsempfehlungen und Beitrag zur Bioökonomiestrategie	45
	Bibliografie	48
	Glossar	53
	Anhang I: Online-Umfrage	55
	Anhang II: Interview-Leitfaden	60

Zusammenfassung

Die vorliegende Studie untersucht das Potenzial pilzbasierter Technologien für die österreichische Kreislaufwirtschaft im Kontext des europäischen Ziels einer klimaneutralen Wirtschaft bis 2050. Pilze können unterschiedlichste organische Materialien abbauen und in neue Produkte umwandeln, was sie ideal für Kreislaufwirtschaftsanwendungen macht.

Die Studie basiert auf einer systematischen Literaturrecherche, einer Online-Umfrage und Experteninterviews. Der thematische Fokus liegt auf den drei Hauptbereichen Lebensmittelproduktion, Materialproduktion und Abfallbehandlung mit Pilzen.

Im Bereich Lebensmittelproduktion wurden über 30 österreichische Unternehmen identifiziert, und 13 davon haben an einer Online-Umfrage teilgenommen. Österreichische Betriebe verwenden für die Produktion von Speisepilzen überwiegend regionale Reststoffe aus Land- und Forstwirtschaft. Bei der Produktion von einem Kilogramm Frischpilzen entstehen bis zu fünf Kilogramm abgeerntetes Substrat mit großem Verwertungspotenzial.

Bei der Materialproduktion zeigt sich eine große Marktlücke mit nur zwei identifizierten Akteuren. International werden myzelbasierte Materialien bereits für Verpackungen, Dämmstoffe, schallabsorbierende Paneele und lederähnliche Materialien eingesetzt und bieten eine nachhaltige Alternative zu petrochemischen Produkten.

Im Bereich Abfallbehandlung werden die enzymatischen Fähigkeiten von Pilzen genutzt, komplexe organische Verbindungen abzubauen. Sie werden bei der Kompostierung, Mykoremediation kontaminierter Böden und der Behandlung verschiedener Schadstoffe eingesetzt. Elf Unternehmen zeigten Interesse an diesem Sektor, jedoch sind bislang nur wenige spezialisierte Akteure aktiv.

Zentrale Herausforderungen umfassen schwache Branchenvernetzung, unklare gesetzliche Rahmenbedingungen, mangelnde Verbraucherakzeptanz, fehlende spezifische Förderungen sowie eine große Lücke zwischen Forschung und Anwendung.

Die entwickelten Handlungsempfehlungen adressieren acht Felder: Verstärkte Forschungsk Kooperationen, Stärkung der Regionalität, zielgerichtete Förderinstrumente, verbesserter Wissenstransfer, Bewusstseinsbildung, klare regulatorische Rahmen-

bedingungen, Infrastrukturaufbau und die systematische Nutzung von Reststoffen.

Die Umsetzung kann einen wesentlichen Beitrag zu neun UN-Nachhaltigkeitszielen leisten und unterstützt alle drei Grundprinzipien der österreichischen Bioökonomiestrategie. Die Studie zeigt, dass die österreichische Pilzwirtschaft über erhebliches ungenutztes Potenzial verfügt und bei gezielter Förderung einen bedeutenden Beitrag zur klimafreundlichen Kreislaufwirtschaft leisten kann.

1 Motivation der Studie

Der „Circular Economy Action Plan“ der Europäischen Union fordert bis 2050 den Übergang von einer linearen „Take-Make-Throw“-Wirtschaft zu einer echten Kreislaufwirtschaft (European Commission, 2020; Europäisches Parlament, 2024). Diese beruht auf der Verlängerung der Lebenszyklen von Produkten, Materialien und Ressourcen. Eine funktionierende Kreislaufwirtschaft ist dabei entscheidend, um Klimaneutralität zu erreichen, den Verbrauch von Primärrohstoffen nachhaltig zu senken und gleichzeitig Innovation sowie Wirtschaftswachstum zu fördern (Europäisches Parlament, 2023).

Ein bislang kaum beachteter, jedoch vielversprechender Bereich zum Erreichen dieser Zielsetzungen ist die Pilzwirtschaft. Erste Forschungsprojekte und innovative Produkte, auch von österreichischen Unternehmen, verdeutlichen bereits das enorme Potenzial dieses stetig wachsenden Wirtschaftszweiges. Bisher konnten nur wenige in der Forschung entstandene Lösungsansätze erfolgreich in die Praxis überführt und einer breiten Nutzung zugänglich gemacht werden.

Die derzeit in Österreich und darüber hinaus existierenden Akteure, Technologien und Projekte sind zwar präsent, jedoch nur punktuell miteinander vernetzt und in der breiten Öffentlichkeit weitestgehend unbekannt. Dieses fehlende Gesamtbild auf der einen Seite und das enorme, bisher noch unerschlossene Potenzial auf der anderen erschweren die strategische Einbindung pilzbasierter Lösungen in bestehende wirtschaftliche und politische Strukturen sowie in nationale und europäische Aktionspläne.

Ein erster Schritt in Richtung mehr Sichtbarkeit und Bewusstseinsbildung wurde erst kürzlich unternommen: Der Begriff „Funga“, als Pendant zu „Flora“ für Pflanzen und „Fauna“ für Tiere, wurde erstmals in das Regierungsprogramm der Stadt Wien

aufgenommen. Damit wird die oft verborgene biologische Vielfalt von Pilzen offiziell anerkannt und Politik und Wirtschaft erhalten einen neuen Begriff, der künftig auch die Grundlage für das Mitdenken von Pilzen im Naturschutz und in wirtschaftlichen und politischen Strategien bilden kann.

Der Arten- und Naturschutz ist dabei nicht nur ein Selbstzweck, sondern schafft auch die Voraussetzung, um das Potenzial von Pilzen in Forschung und Anwendung bestmöglich auszuschöpfen. Damit leistet er einen direkten Beitrag zu europäischen und nationalen Nachhaltigkeitszielen, etwa zur Ressourcenschonung und Klimaneutralität bis 2050, und ist zugleich eine Maßnahme im Österreichischen Bioökonomie-Aktionsplan (BMK, 2022; BMLUK, 2025; Vereinte Nationen, 2015).

Um dieses Potenzial rasch und wirksam zu erschließen, ist eine systematische Erhebung der bestehenden Forschungsprojekte und wirtschaftlichen Initiativen notwendig. Die vorliegende Studie hat das Ziel, bestehende Lücken zwischen Forschung, Wirtschaft und Politik zu schließen und eine faktenbasierte Grundlage für Maßnahmen zu schaffen, die eine gezielte Integration pilzbasierter Lösungen in die Kreislaufwirtschaft unterstützen.

2 Potenzial der modernen Pilzbiotechnologie

Pilze sind in der Lage, unterschiedlichste organische Materialien abzubauen und daraus zahlreiche Stoffwechselprodukte zu bilden. Aufgrund dieser Vielseitigkeit eignen sie sich ideal für typische Anforderungen der Kreislaufwirtschaft: Reststoffe können im System verbleiben und in neue Produkte umgewandelt werden. Der globale monetäre Wert aller pilzbezogenen Produkte und Dienstleistungen wurde auf rund 54,57 Billionen USD geschätzt, was ihr enormes wirtschaftliches Potenzial unterstreicht (Niego *et al.*, 2023). Die verschiedenen Anwendungen und Umsetzungsbereiche sowie das Potenzial von Pilzen und der Pilztechnologie wurden in den Studien von Hyde *et al.*, 2019 sowie Meyer *et al.*, 2020 ausführlich zusammengefasst.

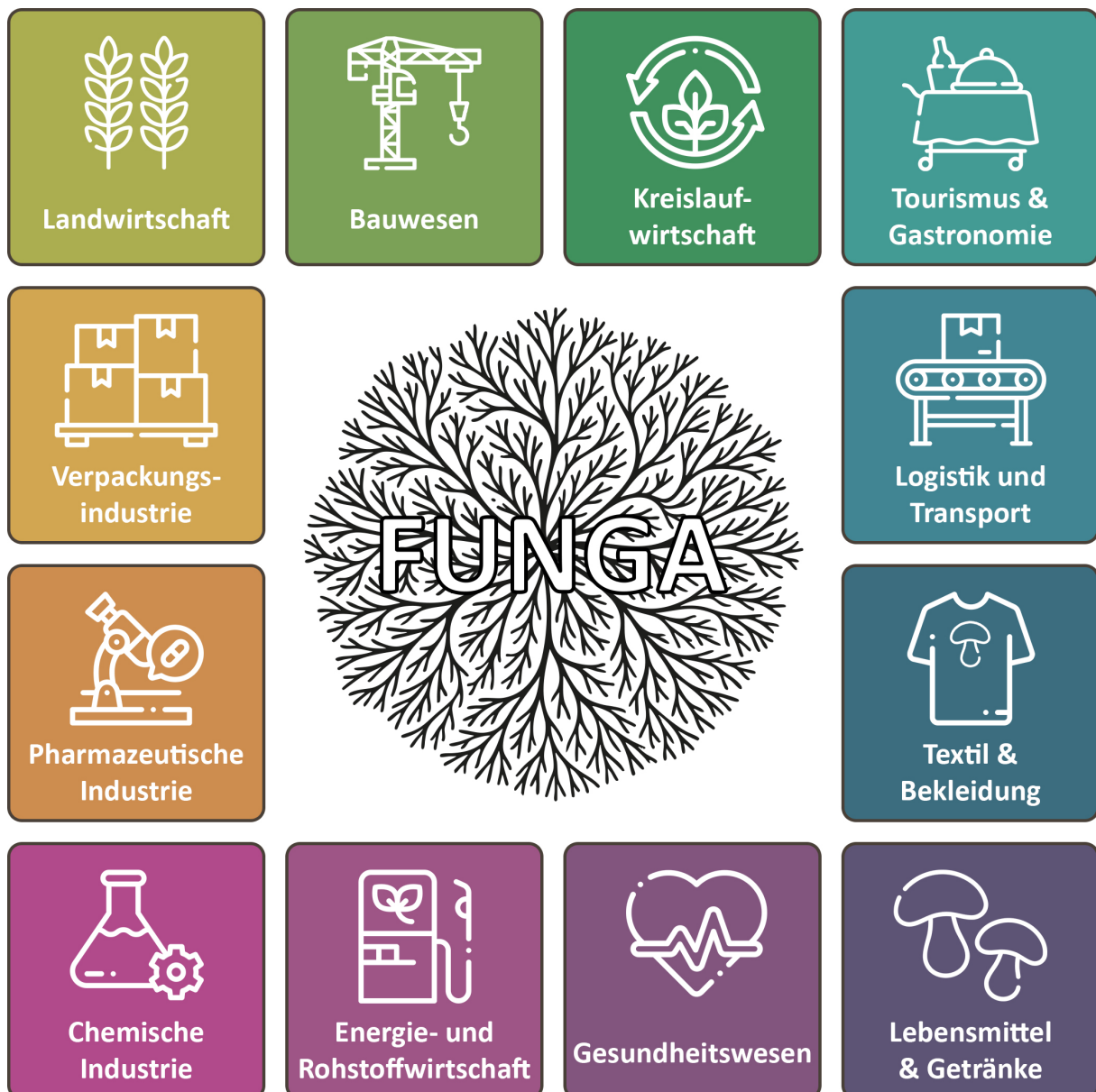


Abbildung 1. Österreichische Wirtschaftssektoren, die direkt oder indirekt von den in dieser Studie beschriebenen Nutzungsmöglichkeiten von Pilzen und deren Produkten profitieren können. Illustration inspiriert von Meyer *et al.*, 2020. *Growing a circular economy with fungal biotechnology: A white paper.*

Ein Auszug der derzeit wichtigsten Anwendungsbereiche von Pilzen werden im Folgenden mit Beispielen dargestellt.

2.1 Pharmaindustrie

Das bekannteste Medikament auf der Basis von Pilzen ist das Penicillin. Es wurde 1928 entdeckt und gilt seitdem als eine der wichtigsten Substanzklassen gegen bakterielle Infektionen. Viele Schimmelpilz-Arten sind in der Lage, antibiotische (antibakterielle) Substanzen zu produzieren, die potenziell auch gegen bakterielle Infektionen bei Menschen und Tieren eingesetzt werden könnten. Dies hängt damit zusammen, dass

Pilze ihren Lebensraum mit einer Vielzahl von Bakterien teilen und daher in ständiger Konkurrenz zu diesen stehen.

Angesichts der weltweit zunehmenden Antibiotikaresistenzen, also der Verbreitung von krankheitserregenden Bakterien, die gegen verfügbare Antibiotika unempfindlich geworden sind, ist die Entdeckung neuer antibakterieller Wirkstoffe aus Pilzen von besonderer Bedeutung. Darüber hinaus produzieren Pilze pharmakologisch bedeutsame Stoffe wie Statine (z.B. Lovastatin), die den Cholesterinspiegel senken und das Risiko für Herz-Kreislauf-Erkrankungen reduzieren. Auch Immunsuppressiva wie Cyclosporin, die in der modernen Transplantationsmedizin unverzichtbar sind, werden aus Pilzkulturen gewonnen.

2.2 Landwirtschaft

In der Landwirtschaft können Pilze als biologische Helfer gegen Pflanzenkrankheiten eingesetzt werden, sowohl gegen Schadpilze als auch gegen Insekten und Nematoden. Besonders verbreitet ist der Einsatz von Pilzen der Gattung *Trichoderma* (Woo *et al.*, 2023). Diese Bodenpilze wirken gleichzeitig auf mehreren Ebenen: Sie greifen Krankheitserreger direkt an, verdrängen Schadpilze durch Konkurrenz um Nährstoffe und Lebensraum und setzen flüchtige Stoffe frei, die natürliche Feinde von Schadinsekten anlocken. Zudem stärken sie indirekt die Pflanzengesundheit, indem sie Abwehrmechanismen aktivieren (systemische Resistenz). Als Symbiosepartner im Wurzelraum fördern sie durch Nährstoffaustausch das Pflanzenwachstum sowie die Widerstandsfähigkeit gegenüber Krankheiten, Trockenstress und Salzbelastung.

In der Landwirtschaft werden neben *Trichoderma* auch andere Pilzgattungen genutzt, darunter *Alternaria*, *Cladosporium* und *Chaetomium*, die in der Lage sind, Krankheitserreger zu unterdrücken. Zur biologischen Bekämpfung von Insekten und Nematoden werden spezialisierte Pilze wie *Beauveria bassiana* oder Arten der Gattung *Metarhizium* eingesetzt.

Eine besondere Form der Symbiose zwischen Pflanzen und Pilzen stellen die Mykorrhizapilze dar (Bonfante & Genre, 2010). Zu ihnen gehören die beiden großen Gruppen der Endo- und Ektomykorrhiza. Bei Endomykorrhiza-Symbiosen dringt ein Teil des Pilzes in die äußeren Wurzelzellen der Pflanze ein, um so einen größtmöglichen

Austausch von Nährstoffen und Wasser zwischen den Symbiosepartnern zu ermöglichen. Besonders relevant in dieser Gruppe sind die arbuskulären Mykorrhizapilze (AM). Sie leben in Symbiose mit rund 70 % aller Pflanzenarten, darunter auch viele Kulturpflanzen. AM-Pilze werden zunehmend als „Biodünger“ vermarktet. Die Auswirkungen neu eingebrachter Pilze auf lokale Ökosysteme sind jedoch noch unzureichend erforscht, weshalb ihr Einsatz kritisch abgewogen werden sollte (Hart *et al.*, 2018).

Ektomykorrhizapilze hingegen bilden um junge Pflanzenwurzeln ein dichtes Netzwerk, um den Nährstoffaustausch zwischen Pilz und Pflanze zu ermöglichen. Ektomykorrhizapilze bilden Symbiosen mit etwa zwei Prozent aller Baumarten, darunter für die Forstwirtschaft wichtige Arten wie Buche, Eiche und Kiefer. Sie kommen vor allem in borealen und gemäßigten Wäldern vor. Sie werden gezielt eingesetzt, um das Überleben und Wachstum von Neupflanzungen zu fördern, und spielen somit eine wichtige Rolle bei der Aufforstung und in Renaturierungsprojekten. Auch hier sollte der Fokus auf der Förderung natürlich vorkommender Arten liegen, während auf die Einbringung gebietsfremder Arten verzichtet werden sollte.

2.3 Lebensmittelindustrie

Pilze werden einerseits als Primärlebensmittel in Form von Fruchtkörpern (z.B. Kräuterseitlinge, Austernseitlinge, Shiitake oder Champignons) verzehrt. Andererseits werden Pilze in weiterverarbeiteten Produkten verwendet, die Pilzmyzel oder Pilzbestandteile enthalten, wie beispielsweise Fleischalternativen aus Mykoprotein (z.B. *Quorn*®) oder fermentierte Lebensmittel wie Tempeh oder Miso.

Darüber hinaus dienen Pilze als Produktionsorganismen für Erzeugnisse, bei denen nicht der Pilz selbst, sondern von ihm gebildete Stoffe verzehrt werden, beispielsweise bei der Herstellung von alkoholischen Getränken, Sojasauce oder Zitronensäure. Pilze haben zudem das Potenzial, als Quelle für Farbstoffe und funktionelle Inhaltsstoffe in Nahrungsergänzungsmitteln eingesetzt zu werden. Zu diesen Inhaltsstoffen zählen auch die Beta-Glucane, die eine antioxidative und immunstimulierende Wirkung haben.

Hefepilze zählen zu den am weitesten verbreiteten Produktionsorganismen der Lebensmittelwirtschaft und sind für die Herstellung von Backwaren, Bier, Wein und

Spirituosen unverzichtbar. Da der Fokus dieser Studie jedoch auf filamentösen Pilzen (siehe Glossar) liegt, werden Produkte auf Basis von Hefepilzen lediglich ergänzend erwähnt. Eine detaillierte Betrachtung der Lebensmittelproduktion mit Pilzen erfolgt in Kapitel 5.

2.4 Chemie und Biotechnologie

In großem Maßstab werden Enzyme wie Amylasen, Cellulasen und Laccasen sowie organische Säuren wie Zitronensäure und Gluconsäure aus Pilzen gewonnen. Enzyme sind Proteine, die in lebenden Organismen bestimmte chemische Reaktionen spezifisch beschleunigen. Pilze produzieren sie, um komplexe organische Biomasse in einfachere Moleküle zu zerlegen, die sie für ihr Wachstum benötigen. Diese Enzyme lassen sich auch für vielfältige industrielle Anwendungen nutzen.

Ein wichtiges Beispiel ist die Herstellung von Biokraftstoffen, die die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen verringern können. Bioethanol wird durch die Fermentation von Zucker aus Biomasse mit Hefe produziert. Bei der Produktion von Biokraftstoffen der ersten Generation werden stärke- und zuckerhaltige Nutzpflanzen genutzt. Der Einsatz spezialisierter Enzyme von filamentösen Pilzen ermöglicht hingegen die Verwertung von landwirtschaftlichen Reststoffen und Lebensmittelabfällen für Biokraftstoffe der zweiten Generation. Da die darin enthaltenen Zucker für Hefen nicht unmittelbar verfügbar sind, müssen sie zuvor enzymatisch aufgeschlossen werden. Besonders häufig kommen dabei Cellulasen und Hemicellulasen des Schlauchpilzes (siehe Glossar) *Trichoderma reesei* zum Einsatz. Solche Enzyme finden darüber hinaus auch in der Lebensmittelindustrie, der Papierherstellung und in Waschmitteln breite Anwendung (Ellena & Steiger, 2022).

Unter den von Pilzen produzierten organischen Säuren ist die Zitronensäure die am häufigsten produzierte. Weltweit werden jährlich über drei Millionen Tonnen hergestellt (IMARC Group, 2024a), überwiegend durch Fermentation von kohlenhydrathaltigen Reststoffen der Zuckerindustrie und Landwirtschaft durch den Pilz *Aspergillus niger* (Show et al., 2015). Zitronensäure wird in vielen Industrien eingesetzt: in der Lebensmittelindustrie als Säuerungsmittel und Geschmacksverstärker, in der Pharmaindustrie als Brausemittel sowie in Kosmetika und Waschmitteln. In Österreich wird Zitronensäure unter anderem von der *Junghunzlauer Austria AG* in Wulzeshofen bei

Laa an der Thaya produziert.

2.5 Neue Materialien

Aus Pilzmyzel lassen sich leichte, robuste und biologisch abbaubare Materialien herstellen. Dazu gehören Myzelschäume, kompostierbare Verpackungen, Dämmstoffe und Akustikpaneele. Solche Innovationen stellen eine nachhaltige Alternative zu erdölbasierten Materialien wie Polystyrol dar und gewinnen in Forschung und industrieller Entwicklung zunehmend an Bedeutung. Das Thema der Materialproduktion mit Pilzen wird im Detail in Kapitel 6 behandelt.

2.6 Abfallbehandlung

Als natürliche Recycling-Spezialisten spielen Pilze auch eine zentrale Rolle bei der Kompostierung, da sie organisches Material abbauen und in fruchtbaren Humus umwandeln. Zudem werden sie bei der Mykoremediation eingesetzt. Dabei handelt es sich um eine biotechnologische Methode, bei der Pilze toxische Schadstoffe wie Kohlenwasserstoffe, die unter anderem auch bei der Verbrennung von Biomasse und Holz entstehen, sowie Medikamentenrückstände, Pestizide oder Schwermetalle abbauen oder durch Bindung ihre Bioverfügbarkeit in der Umwelt verringern. Die Abfallbehandlung mit Pilzen wird in Kapitel 7 behandelt.

3 Ziel der Studie

Ziel dieser Studie ist es, einen fundierten Überblick über pilzbasierte Technologien und deren Stakeholder in den Bereichen der Lebensmittelproduktion, der Materialproduktion und der Abfallbehandlung zu geben. Die Studie konzentriert sich dabei auf den Status Quo der österreichischen Pilzwirtschaft und gliedert sich entsprechend dem thematischen Schwerpunkt in die drei Hauptbereiche **Lebensmittelproduktion, Materialproduktion** und **Abfallbehandlung**.

Basierend auf dieser Analyse werden praxisnahe Handlungsempfehlungen entwickelt, um den Ausbau einer nachhaltigen und zukunftsorientierten Kreislaufwirtschaft in Österreich voranzutreiben. Jeder der drei Hauptbereiche wird aufgrund seiner spezifischen technologischen Anforderungen und Rahmenbedingungen in separaten Kapiteln behandelt.

4 Methodik

Die Studie wurde im Zeitraum von Dezember 2024 bis September 2025 durchgeführt. Die Grundlage dafür bildet eine systematische Literaturrecherche, eine explorative Online-Umfrage sowie persönliche Interviews mit Expertinnen und Experten der jeweiligen Branchen.

4.1 Literaturrecherche

Zur Erfassung des aktuellen Forschungs- und Entwicklungsstands wurde eine systematische Literaturrecherche mit unterschiedlichen Datenbanken für wissenschaftliche Literatur (insbesondere Google Scholar) durchgeführt. Dabei wurden relevante Studien mit den Schlagwörtern „mushroom cultivation“, „mycelium-based materials“ und „waste treatment with fungi“ identifiziert. Zusätzlich wurden über die Referenzen der identifizierten Primärquellen weitere relevante Arbeiten in die Analyse miteinbezogen.

4.2 Explorative Online-Umfrage

Für die Umfrage wurde ein modularer Online-Fragebogen entwickelt, der sowohl produzierende Unternehmen, an pilzbasierten Technologien interessierte Unternehmen als auch Forschungseinrichtungen anspricht (Anhang I). Das Ziel war dabei, wertvolle Erkenntnisse über die aktuelle Lage der Pilzwirtschaft und deren Herausforderungen in Österreich und im internationalen Kontext zu gewinnen.

Die Umfrage wurde ab dem 12.05.2025 über unterschiedliche Kanäle beworben, darunter *LinkedIn*, *Instagram*, *Facebook*, diverse Branchen-Newsletter und persönliche E-Mails. Der Erhebungszeitraum erstreckte sich vom 12.05. bis zum 30.06.2025. An der Umfrage nahmen insgesamt 31 Personen von 22 Unternehmen und 9 Forschungseinrichtungen teil.

4.3 Experteninterviews

Um vertiefende Einblicke und differenzierte Perspektiven zu erhalten, wurden Interviews mit zentralen Vertreterinnen und Vertretern der Pilzwirtschaft und Pilzforschung durchgeführt. Für die jeweiligen Themenbereiche wurden separate Interview-Leitfäden

entwickelt (Anhang II). Diese Leitfäden dienten als strukturelle Orientierung, wurden jedoch flexibel eingesetzt, um sich den individuellen Gesprächsverläufen sowie den Expertisen der interviewten Personen anzupassen:

- **Nándor Albert** – Gründer und Geschäftsführer des Unternehmens *Mycorama* und Mitbegründer des Start-up-Projektes *EcoMycel*
- **Michaela Friedl** – Geschäftsführerin von *GutBehütet*
- **Ao. Univ.-Prof. Mag. Dr. Irmgard Krisai-Greilhuber** – Mykologin und Professorin am Department für Botanik und Biodiversitätsforschung der *Universität Wien*
- **Felix Melcher, MSc** – Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Werner Siemens-Lehrstuhl für Synthetische Biotechnologie der *Technische Universität München*
- **Maurizio Montalti MA, MSc** – Mitbegründer des Unternehmens *SQIM S.r.l.*
- **LL.B. Thomas Neuburger, BSc** – Geschäftsführer der *Neuburger Fleischlos GmbH*
- **Jean-Michel Scheuren, MSc** – Mitbegründer und Geschäftsführer des Unternehmens *Novobiom S.P.R.L.*
- **Dr. Bertram Schmidt** – Wissenschaftlicher Mitarbeiter und Pilzforscher im Fachgebiet Angewandte und Molekulare Mikrobiologie an der *Technischen Universität Berlin*

5 Lebensmittelproduktion

5.1 Technologische Entwicklung

Die Kultivierung von Speise- und Heilpilzen hat eine jahrtausendealte Tradition. Bereits vor über eintausend Jahren wurde in China die „Outdoor Log Culture“ (Pilzzucht auf Holzstämmen im Freien) zur Produktion von Shiitake-Pilzen genutzt (Grimm & Wösten, 2018). Was damals als erste skalierbare Pilzzucht begann, demonstriert heute in modernerer Form exemplarisch das Potenzial der Kreislaufwirtschaft: Nachwachsende lignocellulosehaltige (siehe Glossar) Reststoffe wie Sägespäne, Stroh oder Hanfpellets werden zu hochwertigen Lebensmitteln umgewandelt (Okuda, 2022).

Heutzutage erfolgt die Pilzproduktion überwiegend in Innenräumen: Polyolefin-Kultursäcke (Kunststoffe aus Polypropylen oder Polyethylen) werden mit Substrat (siehe

Glossar) befüllt und anschließend mit Pilzbrut (siehe Glossar) beimpft. Das Myzel (siehe Glossar) wächst in den Kultursäcken, bis das Substrat vollständig durchwachsen ist. Danach werden die Beutel geöffnet, um die Bildung der Fruchtkörper (siehe Glossar) einzuleiten. Laut FAOSTAT belief sich die weltweite Pilzproduktion im Jahr 2023 auf über 50 Millionen Tonnen, ein Indikator für das kontinuierliche Wachstum des Sektors (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2025). Entsprechend prognostizieren Marktstudien auch für die kommenden Jahre ein weiteres starkes Wachstum des globalen Pilzmarktes. Parallel zu diesem quantitativen Wachstum erweitern sich die Angebote und Anwendungsbereiche: Neben den typischen Speisepilzen nimmt das Interesse an alternativen Pilz-Produkten stetig zu. Mykoprotein (siehe Glossar) aus Schlauchpilzen (Ascomycota) (siehe Glossar), wie *Fusarium venenatum*, welcher als Basis für Fleischersatzprodukte der Firma Quorn® (UK) verwendet wird, Vitalpilze wie „Reishi“ (*Ganoderma lucidum*) und „Lion's Mane“ (Igel-Stachelbart, *Hericium erinaceus*) sowie diverse Fleischersatzprodukte aus Pilzmyzel oder auf Basis von Edelpilzen eröffnen dabei neue Marktsegmente.

Parallel zur Diversifizierung der Produkte haben sich auch die Anbaumethoden technologisch erheblich weiterentwickelt. Während früher alle Produktionsschritte manuell erfolgten, übernehmen heute automatisierte Systeme viele Bereiche der Produktion: Sie reichen vom Mischen des Substrats und Befüllen der Kulturbeutel über die Inokulation mit Flüssig- oder Körnerbrut (siehe Glossar) bis zur vollautomatischen Steuerung von Temperatur, Luftfeuchtigkeit und CO₂-Gehalt während des Wachstums. Erst durch diese Innovationen in Kombination mit hohen Lebensmittelstandards ist es möglich, Frischpilze über das ganze Jahr hindurch in gleichbleibender Qualität anzubieten.

5.2 Standort Österreich

Im Rahmen der Recherche wurden über 30 österreichische Unternehmen identifiziert, die in der Pilz-Lebensmittelindustrie tätig sind. Mit der durchgeführten Umfrage konnten 16 Betriebe dieser Branche erreicht werden. Von diesen produzieren 13 Unternehmen Pilze, während drei weitere Interesse an der Pilzproduktion bekundet haben. Das Angebot der produzierenden Betriebe reicht von frischen und getrockneten Pilzen über Vitalpilze und Nahrungsergänzungsmittel bis hin zu Zuchtsubstraten und Pilzbrut. Acht dieser

Betriebe beschäftigen zwischen 1 und 10 Mitarbeitende, drei weitere bis zu 50 und ein Unternehmen mehr als 250 Mitarbeitende. Mehr als die Hälfte der produzierenden Unternehmen ist jünger als 10 Jahre und verdeutlicht damit ein wachsendes Interesse an dieser Branche.

In der österreichischen Forschungslandschaft ist das Thema der Lebensmittelproduktion aus Pilzen bislang unterrepräsentiert. Die Forschungseinrichtungen, die an der Online-Umfrage teilgenommen haben, konzentrieren sich primär auf Kultivierungsmethoden und Produktionstechnologien.

5.3 Verwendete Kultursubstrate

Als Kultursubstrate verwenden österreichische Betriebe überwiegend lignocellulosehaltige Reststoffe aus Land- und Forstwirtschaft und der Lebensmittelverarbeitung. Die am häufigsten verwendeten Substrate sind Laubholz, Stroh, Getreide, Agrarabfälle und Nadelholz. Für die Kultivierung von Champignons (*Agaricus bisporus*) wird vorrangig vorvergorener Kompost verwendet (Martín *et al.*, 2023).

Rund zwei Drittel der Unternehmen beziehen ihre Rohstoffe aus einem Umkreis von 50 Kilometern um die Produktionsstätten. Teilweise werden Substrate jedoch auch überregional oder aus dem EU-Ausland importiert. Für die weitverbreitete Champignonzucht werden speziell vorbereitete Substrate aus dem EU-Ausland verwendet, die meist nicht auf regionalen Reststoffen basieren.

5.4 Nutzung von Reststoffen

Bei der Produktion von einem Kilogramm Frischpilzen entstehen bis zu fünf Kilogramm abgeerntetes Pilzsubstrat („Spent Mushroom Substrate“). Zusätzlich entstehen Abfälle bei der Ernte der Pilze sowie Kunststoffabfälle durch die Verwendung von Einweg-Kultursäcken. Ein konsequentes Recycling in Kombination mit der Aufwertung dieser Reststoffe stellt den nächsten notwendigen Schritt in der Weiterentwicklung der modernen Pilzzucht dar.

Laut der Online-Umfrage verwenden sieben Betriebe das abgeerntete Pilzsubstrat derzeit für die Kompostherstellung, als Bodenverbesserer in der Landwirtschaft oder direkt als Tierfutter. Die übrigen Befragten machten hierzu keine Angaben.

Bei der Freilandanwendung abgeernteter Pilzsubstrate sollten ausschließlich einheimische Speisepilzarten verwendet werden, um potenzielle Risiken für die natürliche Biodiversität zu minimieren. Eine aktuelle Studie aus den USA beschreibt, wie nicht-einheimische Zuchtpilze einheimische Arten verdrängen können. Dies wurde am Beispiel des Zitronengelben Seitlings (*Pleurotus citrinopileatus*) beobachtet, der in den USA nicht heimisch ist (Veerabahu *et al.*, 2025). Ao. Univ.-Prof. Mag. Dr. Irmgard Krisai-Greilhuber, Mykologin und Professorin am Department für Botanik und Biodiversitätsforschung der *Universität Wien*, weist jedoch im Interview darauf hin, dass die Etablierungsfähigkeit stark vom jeweiligen Pilzstamm und den klimatischen Bedingungen abhängt. Tropische Pilze beispielsweise könnten sich unter den hiesigen Klimabedingungen nicht dauerhaft etablieren. Dennoch besteht das Risiko, dass nicht-einheimische Pilzarten die ökologischen Nischen heimischer Arten besetzen und diese auf Dauer verdrängen. Solche Veränderungen können Auswirkungen auf weitere Bereiche haben, insbesondere auf die Holzwirtschaft. In Österreich wurden bereits fünf Zuchtpilzarten in der Natur nachgewiesen: Zuchtchampignon (*Agaricus bisporus*), Shiitake (*Lentinula edodes*), Sattlicher Kahlkopf (*Psilocybe azurescens*), Riesen-Träuschling (*Stropharia rugosoannulata*) und Dunkelstreifiger Scheidling (*Volvariella volvacea*) (Voglmayr *et al.*, 2023).

Die thermische Behandlung abgeernteter Pilzsubstrate könnte das Risiko in den meisten Fällen minimieren, ist jedoch mit erhöhten Kosten und einer geringeren Wirtschaftlichkeit der Pilzproduktion verbunden. Als Alternativen bieten sich die thermische Verwertung, die Produktion von Biogas und Tierfutter oder die biotechnologische Aufwertung der Reststoffe zu neuen Produkten wie Chitosan, Enzymextrakten oder hochwertigen Fasern (Chitin-Cellulose-Nanofaser-Komplexe) an.

Die Verwendung von abgeerntetem Substrat in Tierfutter ist bereits in Nischen etabliert. Weitere Interviews ergaben, dass insbesondere die Verfütterung an Insekten großes Potenzial aufweist. Da die Produktion von Insektenprotein noch ein sehr junges Feld ist, kann derzeit nicht von einer breit etablierten Nutzung gesprochen werden.

Die stofflichen Verwendungen abgeernteter Pilzsubstrate und Synergien mit der Materialproduktion und der Abfallbehandlung werden in Kapitel 8 ausführlich behandelt.

5.5 Beitrag der Pilzzucht zur Erreichung gesellschaftlicher, industrieller und ökologischer Zielsetzungen

Die Speisepilzproduktion ist ein herausragendes Beispiel einer biobasierten Kreislaufwirtschaft. Hochwertige Produkte gedeihen auf nachwachsenden Roh- und Reststoffen, und fast alle bei der Produktion anfallenden Abfallströme können anderen Produktionszweigen zugeführt werden. Die Verwendung abgeernteter Substrate als Bodenverbesserer in der Landwirtschaft verringert beispielsweise den Bedarf an chemischen Düngemitteln und Pestiziden und verbessert zugleich die Bodenfruchtbarkeit (Martín *et al.*, 2023).

Ökonomisch eröffnet die Pilzzucht vielversprechende Perspektiven: Der globale Markt für Pilze als Lebensmittel wurde im Jahr 2024 auf rund 71,81 Mrd. USD geschätzt und dürfte bis 2033 die Marke von 100 Mrd. USD überschreiten (IMARC Group, 2024b). Dadurch entstehen neue Beschäftigungs- und Geschäftsmöglichkeiten in Anbau, Verarbeitung und Handel (Kapahi, 2018). Gleichzeitig erfordert die zunehmende Automatisierung qualifizierte Fachkräfte in den Bereichen Künstliche Intelligenz und Automatisierungstechnik.

Aus ernährungsphysiologischer Sicht sind Pilze gesunde, nährstoffreiche und kalorienarme Lebensmittel. Sie enthalten Proteine, komplexe Kohlenhydrate, Ballaststoffe, Vitamine und Mineralstoffe. Eine gesteigerte Produktion und ein wachsender Konsum leisten einen wichtigen Beitrag zur Ernährungssicherheit und zur individuellen Gesundheit. Studien haben gezeigt, dass der regelmäßige Konsum von Pilzen langfristig zur Vorbeugung diverser Erkrankungen beiträgt (Ba *et al.*, 2021).

Das Potenzial von Speisepilzen ist jedoch noch lange nicht vollständig ausgeschöpft. Während in österreichischen Supermärkten hauptsächlich Champignons, Austernseitlinge, Shiitake und Kräuterseitlinge erhältlich sind, bietet das Reich der Pilze eine weitaus größere Auswahl von Speisepilzen unterschiedlichsten Geschmacks. Zukünftige Entwicklungen werden dazu beitragen, eine größere Vielfalt an Pilzarten in unsere Speisepläne zu integrieren. Parallel dazu entwickelt sich ein Markt für neue Produkte aus Mykoprotein, die als klimafreundliche Alternative zu Fleisch erforscht und vermarktet werden. Sie kombinieren gesundheitliche Vorteile mit einer im Vergleich zur Fleischproduktion geringeren Umweltbelastung und unterstützen dabei den Trend hin zu einer

gesunden und fleischreduzierten Ernährung (Akinsemolu & Onyeaka, 2025). Zukünftige Forschung ist hierbei notwendig, um weitere Pilzarten zu identifizieren, die sich für eine skalierbare Mykoprotein-Produktion eignen und dabei besonders gesundheitsfördernde Inhaltsstoffe enthalten (Jahn *et al.*, 2023).

Darüber hinaus kann eine größere Rolle von Pilzen in unserer Ernährung einen wertvollen Beitrag zur ökologischen Nachhaltigkeit leisten. Die weltweite Lebensmittelproduktion ist derzeit für rund ein Drittel der globalen Treibhausgasemissionen verantwortlich und trägt wesentlich zum Verlust biologischer Vielfalt sowie zur Belastung natürlicher Ökosysteme bei (Crippa *et al.*, 2021). Eine verstärkte Ausrichtung auf eine pilz- und pflanzenbasierte Ernährung eröffnet daher nicht nur gesundheitliche Vorteile, sondern trägt zugleich zum Schutz unserer Ressourcen und unserer Umwelt bei (Springmann *et al.*, 2018).

5.6 Herausforderungen und empfohlene Maßnahmen

Zur vertiefenden Analyse der Herausforderungen in der österreichischen Speisepilzproduktion wurden neben der Online-Umfrage zwei Experteninterviews mit Fachpersonen aus der Praxis geführt: Michaela Friedl, Geschäftsführerin von *GutBehütet – Die steirische Pilzmanufaktur im Vulkanland*, und LL.B. Thomas Neuburger, BSc, Geschäftsführer der *Neuburger Fleischlos GmbH (Hermann.Bio)*. Diese Interviews ergänzen die Umfrageergebnisse, die bereits einen Verbesserungsbedarf in mehreren Bereichen aufzeigten.

Die Experteninterviews verdeutlichten, dass trotz unterschiedlicher Betriebsgrößen und Produktionsweisen vergleichbare Herausforderungen bestehen. Friedl betont, dass Speisepilze und Pilzprodukte nach wie vor eine Nische darstellen und eine kontinuierliche Aufklärung über deren Vorteile notwendig ist. Neuburger weist darauf hin, dass es eine deutliche Lücke zwischen wissenschaftlicher Forschung und der praktischen Umsetzung am Markt gibt – ein Umstand, der die Ausschöpfung des vollen Potenzials der Branche hemmt.



Abbildung 2. (A) Kontrolle des Wachstums von Kräuterseitlingen unter hygienischen Bedingungen in einer Produktionsanlage. (B) Wachstumskammer mit automatisch regulierter Temperatur, Feuchtigkeit und CO₂-Konzentration. (C) Automatisiertes Befüllen von Kultursäcken mit Substrat. Fotos bereitgestellt von der *Neuburger Fleischlos GmbH*.

Ein besonders häufig genanntes Problem ist die schwache Vernetzung innerhalb der Branche, wodurch der Austausch von Informationen und Erfahrungen erschwert wird. Friedl berichtet, dass es gerade am Anfang schwierig war, überhaupt an verlässliche Informationen zu gelangen. Neuburger sieht einen dringenden Bedarf an einer breiteren und verbindlicheren Vernetzungsstruktur, beispielsweise in Form eines Branchenverbands. Parallel dazu besteht bei den Förderungen großer Handlungsbedarf: Weder klassische landwirtschaftliche noch industrielle oder bildungsbezogene Förderungen passen zur Struktur und zu den Zielen vieler Pilzbetriebe. Beide Befragten betonen zudem die Bedeutung von Regionalität, insbesondere beim Substrat, da dadurch kurze Transportwege und die Nutzung lokaler Ressourcen ermöglicht werden.

Weitere zentrale Herausforderungen, die in den Gesprächen identifiziert wurden, umfassen:

- Unklare gesetzliche Rahmenbedingungen, etwa bei der Einstufung von Pilzmyzel als Novel Food (siehe Glossar) sowie bei der Herkunftskennzeichnung von Pilzen: Pilze dürfen als „österreichisch“ verkauft werden, wenn sie in Österreich geerntet wurden, auch wenn Substrat und Brut aus dem Ausland stammen.

- Während einerseits landwirtschaftliche Abfälle und Produktionsnebenströme (z.B. abgeerntete Kultursubstrate) nachhaltig genutzt werden, müssen unverkaufte Pilze entsorgt werden, etwa wenn Supermärkte kurzfristig keine Lieferungen abnehmen.
- Die Wirtschaftlichkeit der Automatisierung in der Pilzzucht hängt stark von der Betriebsgröße ab. Während bei der *Neuburger Fleischlos GmbH* alle Prozesse bis zur Ernte (teil)automatisiert sind, arbeitet *GutBehütet* vollständig handwerklich. Für kleine Betriebe ist Automatisierung wirtschaftlich kaum umsetzbar.

Basierend auf den Interviews und der Umfrage lassen sich folgende zentrale Handlungsfelder für die Weiterentwicklung der Speisepilzproduktion in Österreich identifizieren:

- Stärkung der Verbraucher- und Marktakzeptanz
- Verbesserung des Wissenstransfers zwischen Forschung und Praxis
- Entwicklung spezifischer Finanzierungsmöglichkeiten und Förderungen
- Aufbau von Kooperationsmöglichkeiten und Vernetzungsstrukturen
- Sicherstellung des Zugangs zu regionalen Substraten

Zur gezielten Stärkung der genannten Handlungsfelder und zur Bewältigung der Herausforderungen werden im Folgenden spezifische Maßnahmen vorgeschlagen.

5.6.1 Verbraucherakzeptanz und Bewusstseinsbildung

Obwohl Pilze in Österreich seit jeher verzehrt werden, bestehen in Teilen der Bevölkerung weiterhin Vorbehalte gegenüber weniger bekannten Pilzarten und innovativen Pilzprodukten. Zur Steigerung der Verbraucherakzeptanz bieten sich folgende Maßnahmen an:

- **Entwicklung gezielter Aufklärungskampagnen**, die über die gesundheitlichen Vorteile, die Nachhaltigkeit und die Vielfalt von Speisepilzen und innovativen Pilzprodukten informieren.
- **Systematische Einbindung von Pilzthemen in Lehrpläne und Bildungsprogramme** von Schulen (Ernährungskunde, Biologie, Landwirtschaft, Bioökonomie).

- **Kooperationen mit Kantinen**, Krankenhäusern, Altersheimen und Schulumensen, um Pilzgerichte regelmäßig anzubieten und ihre Präsenz im Alltag zu erhöhen.
- **Förderung lokaler Pilzmärkte und Verkostungen** zur direkten Interaktion zwischen Konsumentinnen und Konsumenten mit produzierenden Betrieben.
- **Organisation von Kochkursen und Kampagnen**, die demonstrieren, wie vielfältige und einfache Gerichte mit unterschiedlichen in Österreich produzierten Pilzarten zubereitet werden können, um Hemmschwellen abzubauen.

5.6.2 Wissenstransfer und Vernetzung zwischen Forschung und Praxis

Technologische Fortschritte wie Automatisierung und KI-gestützte Prozesssteuerung sowie neue Produktentwicklungen entstehen häufig in Forschungseinrichtungen, gelangen jedoch nur langsam in die Praxis. Zur Stärkung des Wissenstransfers und der Branchenvernetzung könnten folgende Initiativen gezielt gefördert werden:

- **Einrichtung von spezialisierten Transferzentren**, in denen Universitäten, Fachhochschulen und Unternehmen gemeinsam Pilotanlagen entwickeln.
- **Regelmäßige Branchenworkshops und Fachkongresse** zum Austausch von Forschungsergebnissen, Best Practices, Praxiserfahrungen und Vermarktungsaktivitäten.
- **Entwicklung eines (digitalen) Knowledge-Hubs** für die Speisepilzproduktion sowie Aufbau einer Branchenvereinigung, die systematische Kooperationen zwischen Betrieben ermöglicht.

5.6.3 Finanzierungsinstrumente und Förderungen

Für viele kleine und mittlere Betriebe sind die Investitions- und Betriebskosten für moderne Anbautechnik, Substrataufbereitung oder Automatisierung oft zu hoch. Spezifische Förderinstrumente für den Pilzsektor könnten den Umstieg erleichtern und Effizienzgewinne mit den Prinzipien der Kreislaufwirtschaft verbinden, ähnlich wie in anderen Bereichen der Agrarwirtschaft:

- **Gezielte Förderungen für Kooperationen** zwischen Pilzbetrieben und Forschungseinrichtungen bei der Entwicklung neuer Verfahren und Produkte.
- **Einführung von gestaffelten Subventionen** für die Automatisierung von Prozessen, um die Skalierbarkeit auch für kleinere Betriebe zu fördern.

- **Fachliche Beratung und finanzielle Unterstützung** für Unternehmen bei der Entwicklung und Markteinführung neuer Pilzprodukte, um die Qualität und Sicherheit innovativer Produkte zu gewährleisten.

5.6.4 Substratversorgung und Regionalität

Eine stabile und möglichst regionale Versorgung mit lignocellulosehaltigen Reststoffen bildet das Fundament einer funktionierenden Kreislaufwirtschaft in der Pilzproduktion. Folgende Maßnahmen können die Regionalität von Pilzprodukten systematisch fördern:

- **Aufbau regionaler Sammel- und Verteilzentren** für Sägespäne, Stroh und Getreidereste im Umkreis von bis zu 50 Kilometern um größere Produktionsstandorte.
- **Optimierung regionaler Transportketten** zur effizienten und kostengünstigen Anlieferung von Substraten an Pilzbetriebe durch koordinierte Logistikkonzepte.
- **Einführung einer „Pilz-Regionalitätsprämie“** nach dem Vorbild landwirtschaftlicher Subventionen zur Förderung regionaler Produktion und kurzer Transportwege.
- **Kooperationen mit energieintensiven Industriezweigen** zur Nutzung von Abwärmepotenzial, um die Produktionskosten zu senken.
- **Einführung einer transparenten Herkunftskennzeichnung**, die eine klare Unterscheidung zwischen vollständig in Österreich produzierten Pilzprodukten und solchen ermöglicht, bei denen Substrat und Pilzbrut aus dem Ausland stammen.

5.6.5 Fazit und Ausblick

Die konsequente Umsetzung dieser Maßnahmen kann die Produktionsbedingungen in der österreichischen Speisepilzbranche nachhaltig verbessern. Durch die kombinierte Stärkung von Verbraucherakzeptanz, Wissenstransfer, Finanzierungsmöglichkeiten und regionalen Strukturen wird nicht nur das Marktwachstum gefördert und die Umweltbilanz verbessert, sondern auch Österreichs Position als Vorreiter in der nachhaltigen Pilzproduktion gestärkt.

6 Materialproduktion

6.1 Technologische Entwicklung

Bei der Produktion von pilzbasierten Materialien wird die Fähigkeit von Pilzen genutzt, lignocellulosehaltige Substrate als Nahrungsquelle zu durchwachsen. Dabei vernetzen sie mit ihrem Myzelnetzwerk die einzelnen Partikel. Eine Mischung aus Pilzmyzel und organischen Substraten wird in vorgefertigte Formen beliebiger Gestalt gefüllt, in denen das Myzel weiterwächst. Abhängig von der Wachstumsdauer, entstehen entweder Kompositmaterialien (Verbundstoffe aus Myzel und Substrat) oder reine Myzelmaterialien, bei denen das Substrat vollständig abgebaut wurde. Anschließend wird das Material getrocknet oder thermisch behandelt, um das Wachstum zu stoppen und das Endprodukt zu stabilisieren.

Das erste Patent, das zu einem Verfahren zur gezielten Modifizierung von Holz mit Pilzen (*Myko-Holz*) geführt hat, wurde 1944 von Walther Luthardt eingereicht (Stange & Wagenführ, 2022). Obwohl der Prozess seit Langem bekannt ist und die Zahl wissenschaftlicher Publikationen und Patente kontinuierlich zunimmt (Wattanavichean *et al.*, 2025) entwickelt sich die kommerzielle Nutzung in Europa nur langsam. Die Gründung von Unternehmen im Bereich pilzbasierter Materialien, auch Mykomaterialien genannt, verläuft bislang zögerlich. Bemerkenswert ist, dass die meisten Weiterentwicklungen in Forschungseinrichtungen stattfinden, während nur wenige Unternehmen in Europa Mykomaterialien kommerziell anbieten. Laut Dr. Bertram Schmidt, Wissenschaftler an der *Technischen Universität Berlin*, der sich seit Jahren mit der Entwicklung myzelbasierter Materialien beschäftigt, mangelt es nicht an Ideen. Studierende der unterschiedlichsten Fachrichtungen, einschließlich Architektur und Kunst, sowie Start-ups lassen sich leicht für Pilze und ihre Anwendungen begeistern und bringen neue Ideen mit. Jedoch klafft eine große Lücke zwischen diesem Potenzial und den tatsächlich am Markt verfügbaren Produkten. Ein möglicher Grund hierfür sind die Patente des amerikanischen Unternehmens *Ecovative LLC*, die die Entwicklung in diesem Bereich hemmten, bis sich das Unternehmen im Jahr 2023 entschied, die Patente in Europa der Allgemeinheit zugänglich zu machen.

Aktuelle Studien untersuchen vor allem die mechanischen Eigenschaften pilzbasierter

Materialien, darunter Schall- und Wärmeisolierung, Feuerbeständigkeit, mechanische Festigkeit, Hydrophobie (wasserabweisende Eigenschaften) und Dichte. Je nach Pilzart, Substrat, Wachstumsbedingungen und Nachbehandlung lassen sich unterschiedliche Materialeigenschaften erzielen. Diese reichen von schaumartigen Materialien, die an Polystyrol erinnern, bis hin zu lederartigen Materialien für die Textilindustrie (Appels *et al.*, 2019). Die Technologie wurde bereits zur Herstellung einer großen Bandbreite von Produkten genutzt, beispielsweise für Verpackungen, schallabsorbierende Paneele, Dämmstoffe, Särge, Ledertaschen, Schuhe, Designobjekte, Möbel und sogar für potenzielle Weltraumanwendungen.

6.2 Verwendete Substrate

Myzelmaterialien werden überwiegend aus landwirtschaftlichen Reststoffen, industriellen Abfällen oder Verbraucherabfällen hergestellt (Sydor *et al.*, 2022). In publizierten Forschungsprojekten werden am häufigsten Kiefernholz, Weizenschrot, Stroh sowie Hanf- und Baumwollfasern verwendet. Für eine funktionierende Kreislaufwirtschaft ist es entscheidend, dass die Substrate ganzjährig verfügbar, kostengünstig und ohne lange Transportwege beschaffbar sind (Vandelook *et al.*, 2021). Dies minimiert den CO₂-Fußabdruck des gesamten Produktionsprozesses. Daher gilt es zu klären, welche Reststoffe in Österreich für eine industrielle Produktion von Mykomaterialien geeignet sind. Während mehrere Pilzarten Stroh als Substrat bevorzugen, ist ein schnelles Wachstum auf Nadelholz nur bei darauf spezialisierten (oder durch gezielte Zucht angepasste) Pilzarten möglich. Weitere Anstrengungen aus Forschung und industrieller Entwicklung sind notwendig, um in Österreich verfügbare biogene Reststoffe als Substrate zu etablieren und deren Verwendung voranzutreiben. Neben diesen typischen Ausgangssubstraten stellt die Weiterverwendung von abgeerntetem Substrat aus der Speisepilzproduktion ein ideales Beispiel für die kaskadische Nutzung und Aufwertung nachwachsender Rohstoffe dar (Grimm & Wösten, 2018).



Abbildung 3. (A) Wachstum von Pilzmyzel auf lignocellulosehaltigem Substrat (B) Vollständig durchwachsener Substratblock in vorgefertigter Form (C) Myzelmaterialien bei der Trocknung. Fotos bereitgestellt von SQIM S.r.l.

6.3 Auswahl geeigneter Pilzarten

Die Wahl einer geeigneten Pilzart bestimmt maßgeblich die Eigenschaften des hergestellten Materials. Grundsätzlich sollte darauf geachtet werden, dass keine potenziell pathogenen (Krankheiten bei Menschen, Tieren, Pflanzen oder Pilzen auslösende) Pilzarten verwendet werden (Sierra *et al.*, 2023; van den Brandhof & Wösten, 2022).

Weitere relevante Kriterien sind schnelles Wachstum, Anpassungsfähigkeit an sich verändernde Umweltbedingungen und die Fähigkeit zur Produktion antimikrobieller Inhaltsstoffe (Sydor *et al.*, 2022). Auch die Regionalität spielt bei der Auswahl der Pilzarten eine wichtige Rolle: Heimische Pilzarten sind besser an regionale Substrate und das Klima angepasst und stellen auch bei unsachgemäßer Verarbeitung oder Entsorgung kein Risiko für regionale Ökosysteme dar (van den Brandhof & Wösten, 2022).

6.4 Internationale Unternehmen und Standort Österreich

In Europa sind bislang nur wenige Unternehmen und Start-up-Projekte tätig, die sich auf die Herstellung myzelbasierter Materialien und Werkstoffe spezialisiert haben. Dazu zählen die *Mycrobez AG* (CH), *SQIM S.r.l.* (IT), *SMUSH Materials S.r.l.* (IT), *PottPilz* (Start-

up, DE), *MycoLutions GmbH* (DE) und *Morgenmaterials* (Start-up, DE) sowie *RL Conseils Embelium* (FR). In Österreich konnten drei Projekte identifiziert werden: Das Start-up *EcoMycel* entwickelt Dämmstoffe aus Myzel, das Start-up *troost* entwickelt 3D-gedruckte Myzel-Urnen und die *MRCA Mushroom Research Center Austria GmbH* arbeitet in einem vom Land Tirol geförderten kooperativen Forschungsprojekt an Designobjekten aus Myzelmaterialien.

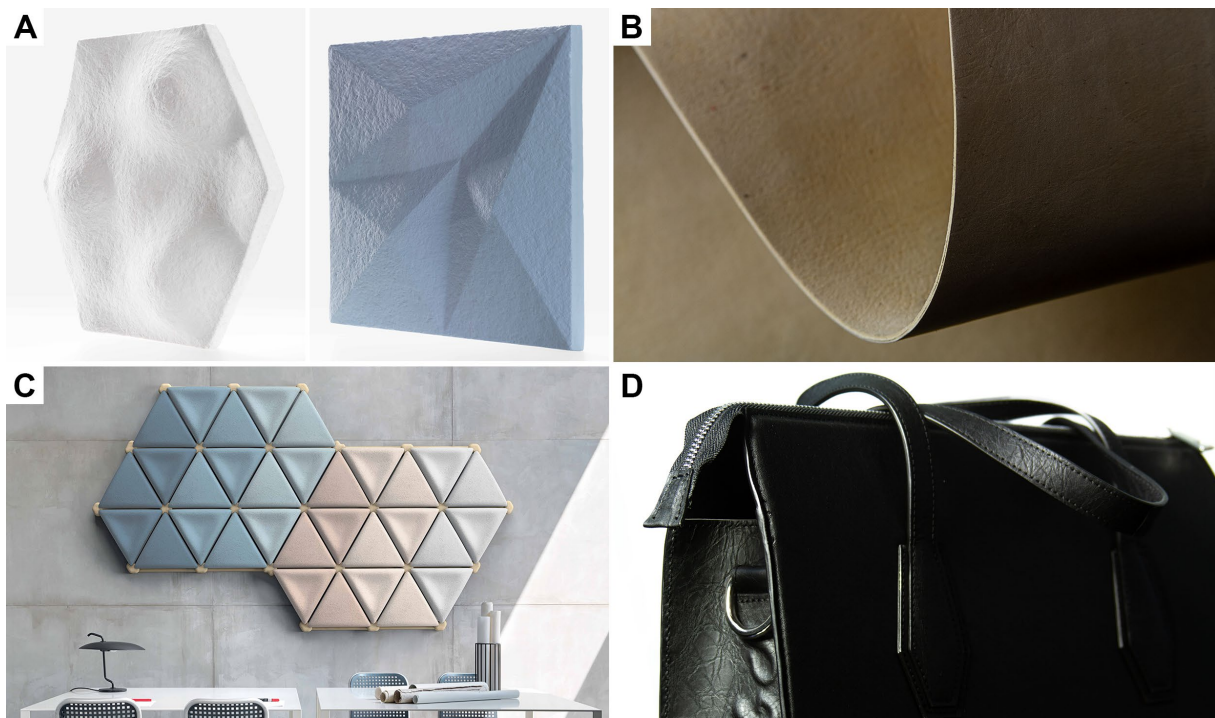


Abbildung 4. (A) Akustikpaneele aus Myzel der Marke *Mogu*. (B) Biologisch hergestelltes lederähnliches Myzelmaterial der Marke *Ephea*®. (C) Modulares Akustikpaneele-System auf Myzelbasis. (D) Aktentasche aus myzelbasiertem lederähnlichem Material. Fotos bereitgestellt von *SQIM S.r.l.*

Ein Drittel der 31 Personen, die an der Online-Umfrage teilnahmen, wählte den Themenbereich „Materialproduktion“. Dabei besteht Interesse an Komposit- und lederähnlichen Materialien, insbesondere bei Betrieben aus der Pilzwirtschaft, die darin ein starkes Wachstumspotenzial erkennen. Auch Unternehmen aus anderen Branchen sehen Myzelmaterialien als Alternative zu herkömmlichen Verpackungen, insbesondere in Märkten, in denen Polystyrol verboten ist.

Zusätzlich zur Umfrage konnten an österreichischen Forschungsinstituten folgende Projekte identifiziert werden:

- Veganes Leder aus Pilzen (*Universität Wien*): Herstellung eines biologisch abbaubaren Lederersatzmaterials aus Pilzen.

- *MycelioTronics (Johannes Kepler Universität Linz)*: Verwendung von Pilzmyzel als Substrat für elektronische Komponenten.
- *MycoSoft (Wood K plus, Kompetenzzentrum Holz GmbH und Johannes Kepler Universität Linz)*: Einsatz von Weichholz zur Herstellung myzelgebundener Verpackungs- und Dämmstoffe sowie geeigneter Isoliermaterialien.
- *MycoInsulation (Wood K plus, Kompetenzzentrum Holz GmbH und Johannes Kepler Universität Linz)*: Verwertungskonzept von pflanzlichen Reststoffen aus dem Speisepilzanbau zur Herstellung biobasierter Dämmstoffe.
- *BIOBUILD (Universität für Bodenkultur Wien)*: Entwicklung innovativer, biobasierter Lösungen für Baumaterialien mit Wärmespeichervermögen.
- *Mycolutions (Technische Universität Wien)*: Diplomarbeit zur Entwicklung eines kreislauffähigen Dämmstoffs auf Basis des Austernpilzes *Pleurotus ostreatus* (Figlmüller, 2024).

6.5 Beitrag von Myzelmaterialien zur Erreichung gesellschaftlicher, industrieller und ökologischer Zielsetzungen

Myzelbasierte Materialien bieten eine ökologische, erneuerbare und biologisch abbaubare Alternative zu den heute vorherrschenden, petrochemisch hergestellten und auf fossilen Rohstoffen basierenden Polymerwerkstoffen. Fachleute betrachten sie als zentralen Baustein zur Erreichung der UN-Nachhaltigkeitsziele (Sustainable Development Goals, SDGs) (Sierra *et al.*, 2023). Indem sie die Abhängigkeit von fossilen Rohstoffen reduzieren, unterstützen Mykomaterialien klimapolitische Ziele und stärken die Rohstoffsouveränität rohstoffarmer Länder wie Österreich. Ihre Herstellung benötigt meist weniger Energie als konventionelle Verfahren und trägt zudem zur längerfristigen Kohlenstoffbindung bei (Hyde *et al.*, 2019). Durch die Verwendung landwirtschaftlicher oder holzbasierter Reststoffe als Substrate werden organische Reststoffströme sinnvoll wiederverwertet und das Abfallmanagement nachhaltig entlastet.

Gleichzeitig entstehen durch lokale Produktionsstätten neue Arbeitsplätze und die Transportkosten sinken bei der Verwendung von regional anfallenden Reststoffen. Auf diese Weise leisten myzelbasierte Materialien einen Beitrag zur Transformation von einer fossilen zu einer erneuerbaren, biobasierten und ressourceneffizienten

Kreislaufwirtschaft. Die nachhaltige Produktion und die damit verbundenen branchenübergreifenden Effekte haben zudem positive Auswirkungen auf die Umwelt und das damit einhergehende gesellschaftliche Wohlbefinden und bieten zugleich die Grundlage für zukunftsweisende politische Entscheidungen (Wattanavichean *et al.*, 2025).

Die Forschung und Entwicklung in diesem Bereich erfolgt transdisziplinär: Expertinnen und Experten aus Biologie und Biotechnologie arbeiten dabei Hand in Hand mit Fachleuten aus Kunst, Design, Materialwissenschaften und Architektur zusammen. Dieser kreative Austausch fördert Innovationen und beschleunigt den Wissenstransfer vom Labor zur marktreifen Umsetzung (Meyer *et al.*, 2020).

Insgesamt können myzelbasierte Materialien einen bedeutenden Beitrag dazu leisten, ökologische, ökonomische und gesellschaftliche Zielsetzungen in Einklang zu bringen.

6.6 Herausforderungen und empfohlene Maßnahmen

Sowohl die Online-Umfrage als auch die aktuelle Forschungs- und Marktlage verdeutlichen eine große Marktlücke im Bereich myzelbasierter Materialien. Um diese Lücke zu schließen, braucht es neue Pionierinnen und Pioniere. Ein Beispiel ist das Start-up-Projekt *EcoMycel*, das derzeit an der Entwicklung von Dämmstoffen aus Myzel arbeitet. Laut dem Co-Gründer Nándor Albert befindet sich das Unternehmen noch in einer frühen Entwicklungsphase. Es sucht derzeit Investoren sowie Mitgründerinnen und Mitgründer, um die notwendige Forschung, Entwicklung und Skalierung der Produktion voranzutreiben. Die Online-Umfrage zeigte außerdem, dass besondere Herausforderungen in der Standardisierung sowie in klar definierten regulatorischen Vorgaben liegen. In der Praxis zeigt sich ein ähnliches Bild: Für Dämmmaterialien sind häufig umfangreiche Prüfverfahren erforderlich, um ihre Langlebigkeit nachzuweisen. Zudem muss der Schutz vor Feuchtigkeit sichergestellt werden, beispielsweise durch geeignete Beschichtungen. Diese Anforderungen binden Zeit und Ressourcen in der Entwicklung und stellen gerade für junge Unternehmen eine erhebliche Markteintrittshürde dar. Da Dämmplatten im fertigen Bauwerk nicht sichtbar sind, plant *EcoMycel* zunächst den Markteinstieg über Akustikpaneele, um mediale Aufmerksamkeit zu erzeugen und die Akzeptanz dieses neuen Werkstoffes zu fördern.

Basierend auf den Interviews besteht darüber hinaus ein erheblicher Bedarf an Investitionen und politischen Maßnahmen, um den Sektor wirtschaftlich wettbewerbsfähig zu machen. Dr. Schmidt sieht die größten Herausforderungen in der großtechnischen Umsetzung und der damit einhergehenden Senkung der Produktionskosten. Dies sei nur mit gezielten Investitionen sowie einer Besteuerung traditioneller Kunststoffprodukte zu erreichen. Albert ergänzt, dass eine Preisparität mit Styropor® (Polystyrol) nur durch eine hochautomatisierte Großserienfertigung erreicht werden kann.

Maurizio Montalti MA, MSc., Mitbegründer des Unternehmens *SQIM S.r.l.* (IT) sowie der Marken *Mogu* (schallabsorbierende Paneele und Bodenbeläge) und *Ephea*® (weiche Myzelmaterialien), nennt weitere Hürden, welche bei jungen Unternehmen die Skalierung myzelbasierter Produktionsprozesse erschweren können. Zwar werden bereits mehrere Projekte an Forschungseinrichtungen durchgeführt, doch das Verständnis der Pilzbiologie ist nach wie vor begrenzt, insbesondere wenn es darum geht, Forschungsergebnisse in industriell umsetzbare Produkte zu überführen. Montalti sieht eine der größten Herausforderungen in der Standardisierung, die nicht nur interdisziplinäres Know-how, sondern auch erhebliche finanzielle Ressourcen erfordert. Ebenso wichtig sei es, ein Umfeld zu schaffen, in dem Menschen mit sehr unterschiedlichen fachlichen Hintergründen effektiv kommunizieren und zusammenarbeiten können.

Auch die Marktakzeptanz stellt eine zentrale Hürde dar. Innovative Materialien stoßen im traditionell geprägten Bausektor häufig auf Skepsis, insbesondere wenn sie bestehende wirtschaftliche und politische Interessen etablierter Akteure infrage stellen. Albert von *EcoMycel* berichtet entsprechend von zurückhaltenden Reaktionen großer Bauunternehmen, die zwar Interesse signalisieren, jedoch kaum konkrete Schritte unternehmen. Montalti betont, dass eine echte Transformation gezielte Fördermaßnahmen für innovationsorientierte Betriebe und Start-ups erfordert. Dazu gehören der Zugang zu finanziellen Ressourcen und Fachkompetenzen, Anreize zur Verwendung myzelbasierter Materialien sowie die Anerkennung dieser Materialien in der offiziellen Nomenklatur, um Rückverfolgbarkeit, Regulierung und Kennzeichnung zu gewährleisten.

In der Fachliteratur werden weitere Herausforderungen genannt: die längere Produktionszeit und der größere Flächenbedarf während der Wachstumsphase im Vergleich zu herkömmlichen Materialien sowie eine notwendige Hygienisierung oder Sterilisation der Ausgangsmaterialien, um Kontaminationen mit anderen Mikroorganismen zu verhindern. Bei den Rohstoffen setzt *EcoMycel* derzeit auf in Österreich reichlich verfügbares Stroh. Der Bezug von Myzel als Inokulum (siehe Glossar) wurde aufgrund hoher Preise von einem österreichischen Anbieter auf eine polnische Quelle umgestellt. Der in der Umfrage ermittelte geringe Bedarf an zusätzlichen Substraten deutet darauf hin, dass die Akteure der Pilzwirtschaft bereits verstärkt in Richtung Kreislaufwirtschaft denken und vorhandene Abfallströme gezielt als Ressourcen nutzen.

Im Folgenden werden Maßnahmen vorgestellt, die dazu beitragen können, die genannten Herausforderungen zu überwinden und die Entwicklung sowie Markteinführung myzelbasierter Materialien gezielt zu fördern.

6.6.1 Standardisierung und regulatorische Rahmenbedingungen

Wie alle biologischen Prozesse unterliegt auch die Produktion myzelbasierter Materialien einer gewissen Variabilität. Derzeit fehlen spezifische standardisierte Prüf- und Produktionsverfahren, was eine breite Markteinführung erschwert (Aiduang *et al.*, 2024; Hebel & Heisel, 2017). Zur Sicherstellung von Qualität, Sicherheit und Marktakzeptanz sind folgende Maßnahmen notwendig:

- **Entwicklung von Prüfverfahren**, die nicht nur mechanische Eigenschaften wie Druck- und Zugfestigkeit, sondern auch die biologische Sicherheit in Bezug auf Pathogenität, mögliche Mykotoxine (siehe Glossar) und wirksame Abtötung des Pilzes erfassen.
- **Lebenszyklusanalysen** (Life-Cycle-Assessments) zur Bewertung der ökologischen Vorteile gegenüber konventionellen Materialien.
- **Einführung offizieller Zertifizierungen** für myzelbasierte Produkte zur Schaffung regulatorischer Klarheit und Marktvertrauen.

6.6.2 Wissenschaftskommunikation und Wissenstransfer

Parallel zu standardisierten Prüfungen sollte die gezielte Kommunikation von wissenschaftlichen Fortschritten deutlich ausgebaut werden. Ziel ist es, das Verständnis für das Reich der Pilze in der Gesellschaft zu verankern und die Skepsis gegenüber neuartigen Biomaterialien abzubauen (Delvendahl *et al.*, 2023). Konkrete Maßnahmen können sein:

- **Förderung wissenschaftlicher Initiativen**, beispielsweise Workshops oder Online-Seminare, welche die Vorteile myzelbasierter Materialien und Produkte aufzeigen.
- **Citizen-Science-Initiativen**, um die breite Öffentlichkeit in aktuelle Entwicklungsprozesse zu involvieren.

Ebenso wichtig ist der Wissenstransfer von Forschungseinrichtungen in die Wirtschaft. Zwar existieren bereits zahlreiche Studien und Proof-of-Concept-Versuche an Universitäten, doch werden diese Erkenntnisse nur selten in marktfähige Produkte überführt. Gefördert werden sollte daher:

- **Die Einrichtung von Transferzentren**, die den Austausch zwischen Forschung und Industrie ermöglichen.
- **Innovationsprogramme**, in denen Unternehmen in Kooperation mit Forschungseinrichtungen staatliche Förderungen für Pilotanlagen erhalten.
- **Spezialisierte finanzielle und fachliche Unterstützung** für Start-ups und Spin-offs im Bereich Myzelmaterialien.

6.6.3 Aufbau von Netzwerken und Kreislaufwirtschaft

Myzelmaterialien können aus einer Vielzahl von biogenen Reststoffen hergestellt werden. Um eine erfolgreiche Kreislaufwirtschaft zu etablieren, in welcher der CO₂-Fußabdruck niedrig bleibt, sollten Lieferketten möglichst kurz gehalten werden (Vandelook *et al.*, 2021). Dies kann durch den gezielten Aufbau von Vertriebsnetzwerken erreicht werden, die Betriebe, bei denen Reststoffe anfallen, mit Produzenten direkt vernetzen. Gleichzeitig erhalten landwirtschaftliche Betriebe neue Einnahmequellen, da sie ihre Reststoffe zu marktüblichen Preisen abgeben können. Konkrete Unterstützungsmaßnahmen könnten sein:

- **Nationale Erhebung** potenzieller und bisher ungenutzter Reststoffströme.
- **Förderung von regionalen Sammel- und Sortierstellen** für Pilzsubstrate.
- **Förderung von Lieferketten** und Aufbereitung von Reststoffen.

6.6.4 Ökonomische Anreize und Produzentenverantwortung

Der rein ästhetische oder ökologische Anspruch reicht nicht aus, damit Unternehmen vollständig auf nachhaltige Materialien umsteigen können. Vielmehr müssen ökonomische Anreize geschaffen werden, damit sich Myzel als leistungsfähiges Performance-Material etablieren kann. Folgende Instrumente bieten sich dafür an:

- **Ein wirksamer und realistischer CO₂-Preis**, der den tatsächlichen Beitrag von Produkten zum CO₂-Ausstoß sichtbar macht.
- **Erweiterte Herstellerverantwortung** (Producer Responsibility): Unternehmen müssten sicherstellen, dass für das Lebensende von Produkten und Verpackungen tragfähige Lösungen bestehen. Für nicht biologisch abbaubare Verpackungen könnten höhere Abgaben vorgesehen werden, während vollständig kompostierbare (myzelbasierte) Verpackungen steuerliche Vorteile erhalten.
- **Forschungs- und Innovationsprämien**: Zuschüsse für Unternehmen, die Pilzmaterialien in der Serienproduktion einsetzen. Solche Förderungen könnten gezielt an Nachhaltigkeitsziele wie CO₂-Reduktion oder Ressourceneffizienz geknüpft werden.

6.6.5 Fazit und Ausblick

Durch die beschriebenen Anreize lässt sich die Nachfrage myzelbasierter Materialien ausreichend steigern, um diese langfristig wettbewerbsfähig zu machen. Die Umsetzung der empfohlenen Maßnahmen kann den Sektor myzelbasierter Materialien in Österreich etablieren und als neuer Treiber einer bereits starken Kreislaufwirtschaft wirken.

7 Abfallbehandlung mit Pilzen

7.1 Technologische Entwicklungen

Feste Abfälle aus kommunalen, industriellen und landwirtschaftlichen Quellen gehören in Bezug auf ihre Entsorgung weltweit zu den größten ökologischen Herausforderungen (Jain *et al.*, 2017). Pilze bieten hierfür ein vielversprechendes Lösungspotenzial, da sie mit den von ihnen produzierten Enzymen, wie Laccasen, Peroxidasen und Cellulasen, in der Lage sind, komplexe organische Verbindungen wie Lignin, Cellulose und eine Vielzahl von Schadstoffen abzubauen. Während Schwermetalle nicht weiter abgebaut werden können, können sie durch spezielle Mechanismen von Pilzen „gebunden“ und so in weniger bioverfügbare Formen überführt werden. Die Fähigkeit von Pilzen, Schadstoffe zu zersetzen oder zu binden, wird gezielt in der biologischen Bodensanierung eingesetzt, im sogenannten Remediationsverfahren. Bei der Bodensanierung mithilfe von Pilzen spricht man von Mykoremediation.

Forschungsprojekte beschäftigen sich auch mit der Entwicklung von Biofiltern auf Basis von Pilzen zur Adsorption flüchtiger organischer Verbindungen (VOCs) und anderer Schadstoffe aus Luft und Wasser (Marycz *et al.*, 2022). Bei Freilandanwendungen ist der Einsatz regional vorkommender Pilzarten besonders relevant, um Risiken für das lokale Ökosystem durch Einbringung gebietsfremder Arten zu minimieren. Im Interview erläuterte Jean-Michel Scheuren, MSc, Co-Gründer und Geschäftsführer des Unternehmens *Novobiom S.P.R.L.*, dass bei Bodensanierungsmaßnahmen zunächst versucht wird, die im Boden bereits vorhandene mikrobielle Gemeinschaft durch Zugabe von Nährstoffen und gezielter Belüftung zu aktivieren, bevor ausgewählte Pilz- und Bakterienstämme aus der firmeneigenen Sammlung zum Einsatz kommen. Darüber hinaus arbeitet *Novobiom* mit Digital-Twin-Plattformen, Künstlicher Intelligenz und maschinellem Lernen, um von der genetischen Ebene bis hin zur metabolischen Funktion vorzudringen und biologische Verfahren zur Bodensanierung und Abfallbehandlung gezielt zu optimieren. Ergänzend dazu wird mithilfe moderner „Omics“-Technologien erforscht, wie verschiedene Pilzarten Schadstoffe abbauen, um diese Verfahren weiterzuentwickeln (Hyde *et al.*, 2024).

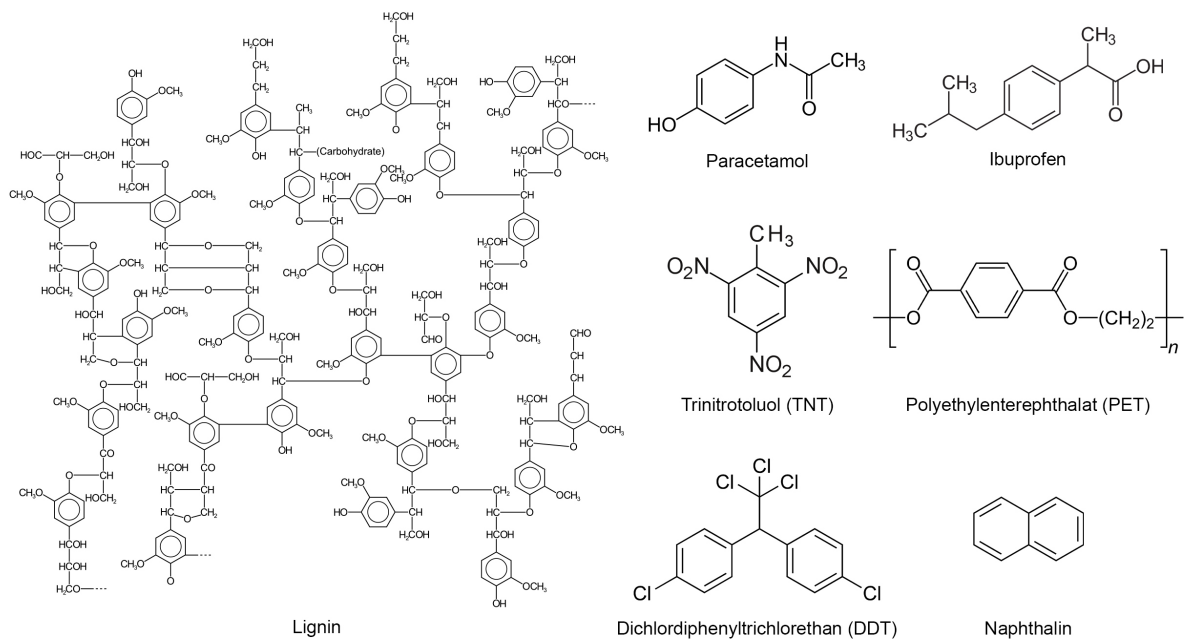


Abbildung 5. Struktur von Lignin: Aufgrund der Vielzahl aromatischer Ringe und funktioneller Gruppen gilt Lignin als schwer abbaubares Polymer. Pilze, die Lignin enzymatisch zersetzen können, sind oft auch in der Lage, strukturell verwandte Moleküle, unter anderem auch Umweltschadstoffe, abzubauen. Dazu zählen die weit verbreiteten Arzneistoffe Paracetamol und Ibuprofen, der Explosivstoff TNT, thermoplastische Kunststoffe wie PET, das Insektizid DDT und polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe wie Naphthalin. Grafik Lignin: Karol Gtąb, *Wikimedia*.

Das Potenzial der Abfallbehandlung mit Pilzen kann sowohl durch den Einsatz kompletter Pilzorganismen als auch durch isolierte Enzyme genutzt werden. Trotz dieser vielversprechenden Ansätze besteht weiterer Forschungsbedarf, insbesondere zur Optimierung der Verfahren und bei ihrer Umsetzung in großtechnischen Anwendungen. Die von den Pilzen produzierten Enzyme können zudem gezielt modifiziert werden, um ihre Stabilität zu erhöhen und ihre Spezifität für den Abbauprozess zu verbessern (Ayala *et al.*, 2008; Rodgers *et al.*, 2010). Von besonderer Bedeutung ist außerdem die Identifizierung neuer, natürlicher Pilzarten, die an schwierige Bedingungen, wie stark kontaminierte Böden, angepasst sind.

7.2 Anwendungsfelder in der Abfallbehandlung

Landwirtschaftliche Abfälle können energetisch genutzt oder kompostiert werden. Die Kompostierung ist die am weitesten verbreitete Methode, bei der vorhandene Mikroorganismen organische Reste zersetzen. Studien zeigen, dass die gezielte Zugabe von Pilzen den Rotteprozess beschleunigt und die Qualität des Endprodukts verbessert (Voběrková *et al.*, 2017). Das Ergebnis ist ein nährstoffreicher Kompost, der in

Landwirtschaft und Gartenbau eingesetzt wird. Befragungen von zwei Betreibern industrieller Kompostieranlagen in Österreich ergaben, dass die Inokulation mit ausgewählten Pilzen zwar interessant ist, derzeit jedoch nicht durchgeführt wird. Für die Behandlung spezieller Verunreinigungen, wie PFAS-Verbindungen (siehe Glossar), könnten Pilze jedoch zukünftig an Bedeutung gewinnen.

Neben landwirtschaftlichen Reststoffen werden Pilze zunehmend zur Behandlung industrieller Abfälle und anthropogener Schadstoffe eingesetzt. Dazu zählen polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAKs), Textilfarbstoffe und Textilabfälle, Arzneimittelrückstände, Herbizide, Pestizide und Schwermetalle. Besonders aktuell sind die Themen Kunststoffabbau und Mikroplastik. Seit den 1950er-Jahren nimmt die weltweite Verbreitung von Kunststoffen in allen Ökosystemen stetig zu, weshalb hier dringend nachhaltige Lösungen erforderlich sind (Geyer *et al.*, 2017). Bereits über 100 Pilzarten wurden identifiziert, die unterschiedliche Kunststoffarten abbauen können (Ekanayaka *et al.*, 2022). Weitere interessante Anwendungsbereiche sind die Sanierung von militärischen Übungsplätzen und ehemaligen Kriegsgebieten, in denen Pilze toxische Sprengstoffreste im Boden abbauen können (Geris *et al.*, 2024). Auch im Bereich des Elektronikschrotts werden Pilze zunehmend erforscht. Hier besteht das Potenzial, seltene Metalle in einem sogenannten *Mycomining*-Prozess zurückzugewinnen (Trivedi *et al.*, 2022). Weiteres Potenzial besteht für die Behandlung von industriellem Abwasser und Klärschlamm. Aufgrund der enormen biologischen Vielfalt von Pilzen, von der bisher nur ein sehr kleiner Teil wissenschaftlich beschrieben wurde, besteht das große Potenzial, für nahezu jede Abfallart geeignete Pilzarten zu identifizieren und gezielt einzusetzen (Hyde *et al.*, 2019; Jain *et al.*, 2017).

7.3 Zentrale Institutionen und Unternehmen

Die Umfrage zeigte, dass 11 Unternehmen an der Abfallbehandlung mit Pilzen interessiert sind. Fünf davon bieten entsprechende Dienstleistungen wie Kompostierung, Abwasserreinigung, Mykoremediation und die Herstellung von Filtermaterialien an. Im Bereich der Mykoremediation und Abfallbehandlung mit Pilzen sind es hauptsächlich Forschungsinstitutionen, Umweltorganisationen und hochspezialisierte Biotech-Unternehmen.

Auf EU-Ebene konnten nur wenige Firmen identifiziert werden, die Abfallbehandlung mit

Pilzen anbieten. Beispiele dafür sind *Novobiom S.P.R.L.* in Belgien und *Edaphos Engineering SA* in der Schweiz, die Lösungen für die Bodensanierung und Abfallbehandlung anbieten. Forschungszentren wie das Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung in Leipzig, Arbeitsgruppe Umweltmykologie, arbeiten ebenfalls an Projekten zur Abfallbehandlung mit Pilzen.

Zudem konnten folgende Projekte auf EU-Ebene identifiziert werden:

- *LIFE MySOIL project*: Entwicklung von Technologien zur Mykoremediation erdölhaltiger Schadstoffe in kontaminierten Böden.
- *VALUABLE*: Gewinnung von Chitosan, Chitin und Hefeölen aus Biomasserückständen aus der Zitronensäureindustrie.
- *MYCOCIRCLE*: Upcycling von Pilzabfällen zur Substitution tierischer Derivate wie Kollagen oder Squalen.

7.4 Mykoremediation

7.4.1 Biologische Grundlagen

Pilze produzieren verschiedene Enzyme, die komplexe organische Moleküle zerlegen können. In der Mykoremediation werden diese für den Abbau von Schadstoffen wie PAKs, Pestiziden, Farbstoffen und Medikamentenrückständen eingesetzt.

Weißfäulepilze eignen sich besonders gut für den Abbau von PAKs, da ihre ligninabbauenden Enzyme auch chemisch verwandte Substanzen zersetzen können. Häufig eingesetzte Arten sind unter anderem *Pleurotus ostreatus* (Austern-Seitling), *Pleurotus pulmonarius* (Lungen-Seitling), *Bjerkandera adusta* (Angebrannter Rauchporling), *Trametes versicolor* (Schmetterlings-Tramete) und *Peniophora incarnata* (Fleischroter Zystidenrindenpilz) (Abo-State et al., 2021).

Schwermetalle können im Gegensatz zu organischen Schadstoffen nicht weiter abgebaut werden, jedoch durch verschiedene Mechanismen immobilisiert werden: Präzipitation (Umwandlung in unlösliche Formen), Biosorption (Bindung an Zellwände), Komplexierung (Bildung stabiler Komplexe) und Bioakkumulation (Aufnahme und Speicherung) (Vaksmaa et al., 2023).

7.4.2 Methoden der Mykoremediation

Bei der Behandlung kontaminierter Böden wird zwischen *Ex-situ*- und *In-situ*-Verfahren unterschieden.

Ex-situ-Verfahren behandeln den kontaminierten Boden außerhalb des Standorts. Bei der *Kompostierung* wird der Boden mit organischem Material vermischt, regelmäßig belüftet und mit Nährstoffen versorgt. Das *Biopiling* funktioniert ähnlich, ergänzt jedoch das Verfahren durch gezielte Zugabe spezialisierter Pilzarten. Die technisch anspruchsvollste Variante stellt die Behandlung der Kontaminationen in Bioreaktoren dar. Trotz höherer Kosten bieten diese die höchste Flexibilität und Kontrolle.

In-situ-Verfahren werden häufig bevorzugt, da sie keinen Transport erfordern und die Schadstoffe direkt am kontaminierten Standort behandeln. Beim *Landfarming* werden bereits im Boden vorhandene Mikroorganismen genutzt. Zur Erhöhung der mikrobiellen Aktivität wird der Boden regelmäßig belüftet und mit Nährstoffen und Wasser versorgt. Diese Methode zeigt besondere Wirksamkeit bei flüchtigen Schadstoffen über dem Grundwasserspiegel. Bei der *Bioaugmentation* werden enzymatisch besonders aktive Pilzarten auf dem kontaminierten Standort ausgebracht, wobei lokal vorkommende Arten bevorzugt werden, um Risiken für das lokale Ökosystem zu minimieren.

Beschreibung der Methoden frei nach Abo-State et al., 2021, Irfan et al., 2022 und Vaksmaa et al., 2023.

7.4.3 Vorteile und Limitationen

Ein großer Vorteil der Mykoremediation ist ihre Umweltfreundlichkeit. Im Gegensatz zu chemischen und thermischen Methoden nutzt die Mykoremediation natürliche Prozesse, um eine Vielzahl von Schadstoffen gleichzeitig abzubauen. Die Kosten werden meist als niedriger als für traditionelle Sanierungsmethoden beziffert. Für die Vermehrung der Pilze können kostengünstige Substrate, wie Holzspäne oder landwirtschaftliche Abfälle verwendet werden. Darüber hinaus sind die laufenden Kosten für Pflege und Monitoring vergleichsweise gering.

Gleichzeitig bestehen zahlreiche Limitierungen: Die Effizienz hängt stark von Umweltbedingungen wie Temperatur, Feuchtigkeit und dem pH-Wert des Bodens ab. So limitiert eine starke Verdichtung des Bodens und die damit einhergehende geringe Sauerstoffversorgung das Wachstum der Pilze. Zudem kann die vollständige Sanierung

kontaminierter Böden lange Zeit in Anspruch nehmen.

Derzeit gibt es keine universell einsetzbaren Standardverfahren, die für alle Bodentypen und Verschmutzungsgrade gleichermaßen anwendbar sind. Um das volle Potenzial der Mykoremediation auszuschöpfen, ist eine präzise Planung und die Anpassung der Methodik an die spezifischen Anforderungen des Sanierungsprojekts erforderlich. Zudem soll der mögliche Einfluss solch großflächiger Eingriffe auf das umliegende Ökosystem bei der Projektplanung miteinbezogen und entsprechend geringgehalten werden.

7.5 Beitrag der Abfallbehandlung mit Pilzen zur Erreichung gesellschaftlicher, industrieller und ökologischer Zielsetzungen

Auch im Bereich der Abfallbehandlung kann die Pilzwirtschaft einen bedeutenden Beitrag leisten. Pilzbasierte Verfahren bieten eine nachhaltige Alternative zu herkömmlichen Methoden wie der thermischen Behandlung (z.B. Abfallverbrennung) oder der Deponierung kontaminierter Böden. Dadurch ermöglichen sie ein ressourcenschonenderes Abfallmanagement, das langfristig positive Auswirkungen auf die Gesundheit unserer Umwelt und unser Wohlbefinden hat.

Ein zusätzlicher Vorteil liegt in der Möglichkeit, mithilfe von Pilzen oder ihren Enzymen wertvolle Stoffe aus Abfallströmen zurückzugewinnen. Besonders bei der Behandlung von Elektronikschrott könnten seltene Metalle vor der Deponierung bewahrt und für neue Anwendungen nutzbar gemacht werden. Bei der Bodensanierung (Mykoremediation) leisten Pilze einen weiteren entscheidenden Beitrag: Sie unterstützen die natürliche Regeneration geschädigter Böden und fördern dadurch die lokale Biodiversität, angefangen beim Bodenleben bis hin zu Pflanzen und größeren Tieren. Dies schafft neue Nutzungsmöglichkeiten für zuvor unbrauchbare Flächen, ein Aspekt von wachsender Bedeutung angesichts des globalen Bevölkerungswachstums und des steigenden Flächenbedarfs für Nahrungsmittelproduktion und Siedlungsentwicklung.

Darüber hinaus eröffnet die Entwicklung neuer Anwendungen im Bereich der Abfallbehandlung wirtschaftliche Chancen. Sie schafft Arbeitsplätze, stärkt regionale Wertschöpfungsketten und Österreichs Position als Innovationstreiber der modernen Bioökonomie. Investitionen in diesen Sektor sind daher nicht nur ein Beitrag zu mehr Nachhaltigkeit und Gesundheit, sondern auch eine Chance, Österreich zu einem

führenden Akteur in der europäischen Pilzwirtschaft zu etablieren.

7.6 Herausforderungen und empfohlene Maßnahmen

Ähnlich wie bei der Materialproduktion zeigt sich auch bei der Abfallbehandlung mit Pilzen eine deutliche Marktlücke. Elf Teilnehmende der Umfrage sehen in der Abfallverwertung und Umweltsanierung durch Pilze ein erhebliches Wachstumspotenzial.

Im Interview verdeutlicht Scheuren die Hürden in diesem Sektor. Das Unternehmen *Novobiom* verwendet bei der Sanierung kontaminierter Böden ein Verfahren, welches gezielt die Interaktionen zwischen Bakterien und Pilzen nutzt. Dabei fokussiert sich *Novobiom* auch auf die Behandlung verschiedener Abfälle, vor allem Textilien, aber auch Holz- und Kosmetikabfälle. Scheuren zufolge gibt es in diesem Sektor großes Potenzial, und die Trends zur Nachhaltigkeit sowie gesetzliche Entwicklungen, etwa die EU-Verordnung zu Textilabfällen, weisen ebenso in diese Richtung. Gleichzeitig lassen sich jedoch auch Herausforderungen identifizieren. Biologische Prozesse sind komplex und nicht immer linear. Zudem ist das Reich der Pilze immer noch unzureichend erforscht, was den Zugang zu belastbaren Informationen oftmals erschwert. Hinsichtlich der Bodensanierung betont Scheuren, dass dieser Bereich stark vom Immobiliensektor beeinflusst wird, der sich in der Regel weniger für die beste biologische Lösung interessiert, sondern vorrangig nach der schnellsten und etabliertesten Methode sucht. Auch gesetzliche Rahmenbedingungen und Kosten stellen zusätzliche Hürden dar. Insbesondere die Einführung spezifischer Regelungen zum Umgang mit Abfällen oder deren Kennzeichnung erschwert die Nutzung von Abfällen für andere Zwecke. Hier sind in Bezug auf die Mykoremediation gewisse Änderungen notwendig.

Schon 2012 wurde in der europäischen Bioökonomiestrategie die Rolle der Bioremediation in der Sanierung und Prävention von Umweltverschmutzung genannt (European Commission, 2012). In der aktualisierten Version von 2018 wurde erstmals die Rolle der Pilze in der Aufbereitung von belasteten Böden thematisiert. Dabei wurde hervorgehoben, wie drängend das Thema der Reinigung kontaminierter Böden, insbesondere aus Städten ist und welche Chancen durch den gezielten Einsatz von Organismen (Bakterien, Pilze und Pflanzen) bestehen. Ziel der Strategie ist es, finanzielle Mittel für Projekte bereitzustellen und Informationen für und über nationale Strategien zu

verbreiten (European Commission, 2018). Derzeit wird die Bioökonomiestrategie der EU aktualisiert. Ein Bericht über die Wirkung der gesetzten Maßnahmen konnte in der derzeit gültigen Bioökonomiestrategie nicht gefunden werden.

Grundlagenforschung und erste Anwendungen zur pilzbasierten Abfallbehandlung sind vorhanden, doch fehlt es bislang an gezielten Maßnahmen, um diese Technologien weiterzuentwickeln und in die Praxis zu überführen. Die folgenden Empfehlungen adressieren diesen Handlungsbedarf.

7.6.1 Förderungen und Finanzierungen für Forschung und Pilotprojekte

Der technologische Reifegrad einzelner Anwendungen variiert stark. Während einfache Anwendungen wie die Kompostierung etabliert sind, erfordern komplexere Verfahren wie die gezielte Mykoremediation kontaminierter Böden oder die Rückgewinnung seltener Metalle aus Elektronikschrott noch weitere Forschung und Pilotprojekte. Um hier Fortschritte zu erzielen, bedarf es:

- **Förderprogramme**, welche die Entwicklung, Optimierung und Validierung neuer Technologien unterstützen.
- **Finanzierung von Pilotprojekten**, in denen Mykoremediationsverfahren unter realen Bedingungen erprobt werden.

7.6.2 Anpassung regulatorischer Rahmenbedingungen

Ein zentrales Hemmnis für die Anwendung pilzbasierter Technologien ist die Unsicherheit in Bezug auf rechtliche Vorgaben und Zulassungsverfahren. Derzeit fehlen in Österreich klare regulatorische Rahmenbedingungen für die Nutzung von Pilzen zur Behandlung von Abfällen oder Schadstoffen. Notwendig ist die **Einführung klar definierter Zulassungsverfahren**, die auf Risikoabschätzung und ökologischer Unbedenklichkeit basieren.

7.6.3 Aufbau von Infrastruktur

Damit pilzbasierte Verfahren wirtschaftlich sinnvoll umgesetzt werden können, ist der Aufbau geeigneter Infrastrukturen entscheidend. Dazu gehören:

- **Regionale Substratnetzwerke**, die landwirtschaftliche, forstwirtschaftliche und industrielle Reststoffe systematisch erfassen und für pilzbasierte Anwendungen verfügbar machen.

- **Modulare Behandlungsanlagen**, in denen unterschiedliche Materialströme verarbeitet werden können, basierend auf interdisziplinärem Fachwissen aus Biotechnologie, Verfahrenstechnik und Umwelttechnik.
- **Frei zugängliche Datenbanken**, die Informationen zu geeigneten Pilzarten, Anwendungsprozessen und regulatorischen Anforderungen bündeln.

7.6.4 Marktbewusstsein

Pilze als Instrument der Umwelttechnik sind in der breiten Öffentlichkeit noch weitgehend unbekannt. Die geringe Sichtbarkeit führt dazu, dass pilzbasierte Verfahren bei Planungsprozessen kaum berücksichtigt werden. Um das zu ändern, braucht es:

- **Förderung von Citizen-Science-Initiativen**, bei denen die Zivilgesellschaft bei der Boden- oder Wasseranalyse mitwirkt. Ein gutes Beispiel hierfür ist das Schweizer Projekt „Beweisstück Unterhose“ von *Agroscope* und der *Universität Zürich*, in das zahlreiche Citizen Scientists involviert waren, um die Bodenqualität in der Schweiz zu analysieren.
- **Einbindung der Zivilgesellschaft und Bildungseinrichtungen**, um das öffentliche Verständnis für die Rolle der Pilze im Umwelt- und Ressourcenschutz zu stärken.

7.6.5 Fazit und Ausblick

Durch die Verbindung von technischer Weiterentwicklung, regionaler Infrastruktur, klaren rechtlichen Rahmenbedingungen und aktiver Beteiligung der Zivilgesellschaft wird das Abfallmanagement nachhaltiger gestaltet und die Umweltbelastung verringert. Dadurch steigen sowohl die Lebensqualität in Österreich als auch die Ressourceneffizienz, und zugleich wird die Position des Landes in der Kreislaufwirtschaft gestärkt.

8 Synergien zwischen Lebensmittel-, Material- und Abfallprozessen

In dieser Studie wurden die drei Themenbereiche zwar getrennt dargestellt, in einer funktionierenden Kreislaufwirtschaft sind sie jedoch eng miteinander verbunden. Dieses Kapitel bietet einen prägnanten Überblick über die Synergien zwischen den Bereichen.

Wie in Kapitel 5.4 beschrieben, fällt bei der Pilzproduktion abgeerntetes Substrat an. Dieses wird heute meist kompostiert oder als Bodenverbesserer verwendet. Die Fachliteratur weist jedoch auf ein deutlich breiteres Nutzungspotenzial hin: Es kann zur Gewinnung von Enzymen und bioaktiven Inhaltsstoffen genutzt werden, energetisch verwertet werden oder zu biobasierten Materialien weiterverarbeitet werden (Grimm & Wösten, 2018).

Die Ergebnisse der durchgeführten Online-Umfrage belegen ebenfalls das starke Interesse an der Verwertung von abgeernteten Substraten. Besonders häufig genannt wurden dabei:

- Herstellung von Baumaterialien (4 Nennungen)
- Isolierung bioaktiver Inhaltsstoffe (4 Nennungen)
- Extraktion von Chitin/Chitosan (3 Nennungen)
- Gewinnung von Enzymen (3 Nennungen)
- Produktion pharmazeutischer Grundstoffe (3 Nennungen)

Das Potenzial des Myzels als ganzheitlicher Rohstoff in der Kreislaufwirtschaft ist beträchtlich. Abgeerntetes Substrat kann als Substrat für die Herstellung neuer, biologisch abbaubarer Materialien dienen oder zur Enzymgewinnung genutzt werden. Diese Enzyme könnten wiederum in der Abfallbehandlung eingesetzt werden. Bereits heute existieren Projekte, die sich mit diesem Thema befassen. Die entsprechenden Technologien wurden bereits entwickelt und in Proof-of-Principle-Experimenten erprobt.

Beispiele für solche Forschungsinitiativen sind die bereits genannten Projekte *VALUABLE* der *Technischen Universität München* und das Projekt *MycoInsulation* von *Wood K plus, Kompetenzzentrum Holz GmbH* und der *Johannes Kepler Universität Linz*. Dennoch findet bei solchen Ansätzen der Transfer in die Industrie kaum statt und es fehlt eine ausreichende Skalierung.

Felix Melcher, MSc, Wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Gruppe von Prof. Thomas Brück und direkt in den Projekten *VALUABLE* und *MYCOCIRCLE* involviert, vertritt die Ansicht, dass biobasierte Alternativen attraktiver gemacht werden müssen. Die erforderlichen Maßnahmen reichen von staatlichen Förderprogrammen, die den Unternehmen das finanzielle Risiko abnehmen und Investitionen ermöglichen, bis hin zu einer Verteuerung

petrochemischer Produkte. Neben den regionalen Gegebenheiten müssen diese Faktoren berücksichtigt werden, um die Integration von abgeernteten Substraten in bestehende Produktions- und Wertschöpfungsketten zu ermöglichen.

Darüber hinaus bietet die Nutzung von Pilzen zur Abfallbehandlung weiteres Potenzial für die Kreislaufwirtschaft, da Pilze selbst wiederum als Ressource dienen können, etwa für die Herstellung von Baustoffen, Verpackungen, Textilalternativen oder zur Energiegewinnung in Biogasanlagen. Expertinnen und Experten bestätigten in den durchgeführten Interviews die grundsätzliche technische Machbarkeit. Eine kombinierte Anwendung von Pilzen zur Abfallbehandlung und Wertstofferzeugung erfordert jedoch eine sorgfältige Prozessplanung und den Einsatz von Rohstoffen gleichbleibender Qualität. Nur unter diesen Voraussetzungen lässt sich eine hochwertige Abfallbehandlung mit der Gewinnung qualitativ anspruchsvoller Produkte kombinieren.

9 Fazit und Resümee

Die Akteurinnen und Akteure der Pilzwirtschaft in Österreich zeigen ein konkretes Interesse daran, Pilzprodukte und -dienstleistungen weiterzuentwickeln. Dieses Interesse ist nicht nur auf Neugier zurückzuführen, sondern dient auch der Diversifizierung des Portfolios und der Erschließung neuer Märkte. Unternehmen, die bereits in anderen Branchen tätig sind, sehen in Pilzprodukten eine mögliche Alternative oder einen Ersatz für bestehende Angebote. Zudem stärken sie das Unternehmensimage und bieten Vorteile für das Marketing.

Laut Umfrage wird die Marktentwicklung der Pilzwirtschaft in den nächsten fünf Jahren deutlich optimistischer eingeschätzt als die des Gesamtmarktes. Im Durchschnitt sehen die Befragten hier ein 1,5-mal höheres Potenzial. Gleichzeitig besteht großes Interesse an den nachhaltigen Eigenschaften möglicher Produkte, die sich ebenfalls positiv auf das Unternehmensprofil als auch auf die Umwelt auswirken. Besonders relevant ist, dass 22 der Befragten die größten Innovationspotenziale in der Entwicklung kreislaufwirtschaftlicher Konzepte sehen.

Die österreichische Kreislaufwirtschaftsstrategie benennt sieben zentrale Transformationsschwerpunkte: Bauwirtschaft und bauliche Infrastruktur, Mobilität, Kunststoffe und Verpackungen, Textilwirtschaft, Elektro- und Elektronikgeräte,

Informations- & Kommunikationstechnologien, Biomasse, Abfälle und Sekundärressourcen (BMK, 2022). Der Aktionsplan der EU-Kommission ergänzt diese um die Bereiche Lebensmittel, Wasser und Nährstoffe (European Commission, 2020). In all diesen Bereichen lassen sich Anwendungen für pilzbasierte Lösungen identifizieren.

Diese Studie zeigt eindeutig, dass die Anwendung von Pilzen in den drei untersuchten Bereichen der Lebensmittelproduktion, Materialproduktion und Abfallbehandlung einen wesentlichen Beitrag zu neun der 17 Sustainable Development Goals (SDGs) der Vereinten Nationen leisten kann:



Kein Hunger

Ernährungssicherheit, nachhaltige Proteinquellen und landwirtschaftliche Produktivität



Gesundheit und Wohlergehen

Gesunde Ernährung, Umweltgesundheit und menschliches Wohlbefinden



Menschenwürdige Arbeit und Wirtschaftswachstum

Beschäftigungsmöglichkeiten und regionale Wertschöpfungsketten



Industrie, Innovation und Infrastruktur

Automatisierung und Entwicklung neuer Produkte und Verfahren



Nachhaltige Städte und Gemeinden

Nachhaltige Baumaterialien, Abfallmanagement und neue Nutzungsmöglichkeiten für Flächen



Nachhaltige/r Konsum und Produktion

Ressourceneffiziente Produktion, Reststoffverwertung und Kreislaufwirtschaft



Maßnahmen zum Klimaschutz

Klimafreundliche Ernährung, Reduktion fossiler Rohstoffe, erneuerbare und biologisch abbaubare Materialien und Alternativen zur Abfallverbrennung



Leben an Land

Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit, nachhaltige Landnutzung, Sanierung kontaminierter Böden und Förderung der Biodiversität



Partnerschaften zur Erreichung der Ziele

Transdisziplinäre Zusammenarbeit und Politik- und Praxisintegration

Mit diesen Beiträgen sind positive Effekte für die globale Gesundheit, die Ressourcenschonung und die Schaffung zukunftsfähiger Arbeitsplätze verbunden. Um diese Effekte zu erzielen, sind klare politische Rahmenbedingungen und die Entwicklung langfristiger Strategien zur Unterstützung der Pilzwirtschaft erforderlich. Dazu gehören staatliche Förderungen, eine intensivere Zusammenarbeit mit Forschungseinrichtungen sowie klare regulatorische Rahmenbedingungen und Rechtssicherheit. Die daraus abgeleiteten Handlungsempfehlungen werden im folgenden Kapitel präsentiert.

10 Handlungsempfehlungen und Beitrag zur Bioökonomiestrategie

Die nachfolgenden Empfehlungen basieren auf den Ergebnissen dieser Studie und richten sich an Politik, Forschung und Wirtschaft. Ihr Ziel ist die wirksame Umsetzung der Bioökonomiestrategie Österreichs.

Handlungsfeld	Empfohlene Maßnahmen	Ziele der Bioökonomiestrategie
Forschung, Technologieentwicklung und Innovation	Förderung von Kooperationen mit Forschungseinrichtungen; Aufbau von Transferzentren; Subventionen für produzierende Betriebe	Förderung wirtschaftlicher Entwicklung; Innovation fördern; Arbeitsplätze sichern und schaffen
Regionalität	Nutzung regionaler Reststoffe und Pilzarten; Einrichtung von Sammelstellen; kurze Transportwege; höherer Absatz	Abhängigkeit von nicht erneuerbaren Rohstoffen reduzieren; Arbeitsplätze sichern und schaffen
Finanzierung und Förderung	Zielgerichtete Förderinstrumente für Infrastruktur, Produktionsumstellung und Innovation	Förderung wirtschaftlicher Entwicklung; Arbeitsplätze sichern und schaffen
Wissenstransfer und Vernetzungen	Aufbau von Transferzentren; Fachkongresse; Förderung von Citizen-Science-Initiativen; Aufbau und Erhalt von Datenbanken	Nachhaltige gesellschaftliche Transformation; Innovation fördern
Bewusstseinsbildung und Akzeptanz	Bildungsmaßnahmen; Informationskampagnen; Integration in Lehrpläne	Nachhaltige gesellschaftliche Transformation; Erreichung der Klimaziele
Rechtliche und regulatorische Rahmenbedingungen	Etablierung von Normen; Anerkennung biologischer Verfahren; Rechtssicherheit; Beratung für Unternehmen	Förderung wirtschaftlicher Entwicklung; Innovation fördern; Nachhaltige gesellschaftliche Transformation
Infrastruktur	Entwicklung von Pilotanlagen; Aufbau regionaler Substratnetzwerken; digitale Plattformen für Reststoffe; Behandlungsanlagen	Förderung wirtschaftlicher Entwicklung; Klimaziele erreichen; Arbeitsplätze sichern und schaffen
Stoffliche Nutzung	Weiterverwertung von abgeerntetem Substrat; Gewinnung von Enzymen und Wertstoffen	Abhängigkeit von nicht erneuerbaren Rohstoffen reduzieren; Erreichung der Klimaziele

Die vorgeschlagenen Maßnahmen entsprechen den drei Grundprinzipien der Bioökonomiestrategie (BMK, 2025):

- **Effizienz:** Die Verwertung von Reststoffen und Kaskadennutzung von abgeernteten Substraten ermöglichen die effektive Nutzung der verfügbaren Biomasse.
- **Konsistenz:** Pilzbasierte Prozesse basieren auf biologischen Kreisläufen und optimieren die Kreislaufführung verfügbarer Rohstoffe.

- **Suffizienz:** Durch ressourcenschonende Produktionsverfahren und den Einsatz nachhaltig verfügbarer Rohstoffe wird ein bewusster und nachhaltiger Konsum gefördert.

Insgesamt unterstützen die vorgeschlagenen Handlungsempfehlungen und Maßnahmen die Transformation hin zu einer klimafreundlichen, ressourcenschonenden und zukunftsfähigen Wirtschaft im Sinne der nationalen Bioökonomiestrategie.

Bibliografie

- Abo-State, M.A.M., Osman, M.E., Khattab, O.H., El-Kelani, T.A., Abdel-Rahman, Z.M. 2021. Degradative pathways of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) by *Phanerochaete chrysosporium* under optimum conditions. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 14(1).
- Aiduang, W., Jinanukul, P., Thamjaree, W., Kiatsiriroat, T., Waroonkun, T., Lumyong, S. 2024. A comprehensive review on studying and developing guidelines to standardize the inspection of properties and production methods for mycelium-bound composites in bio-based building material applications. *Biomimetics*, 9(9), 549.
- Akinsemolu, A.A., Onyeaka, H.N. 2025. Mycoproteins as sustainable food sources: current applications and future prospects. *Discover Applied Sciences*, 7(3), 191.
- Appels, F.V.W., Camere, S., Montalti, M., Karana, E., Jansen, K.M.B., Dijksterhuis, J. et al. 2019. Fabrication factors influencing mechanical, moisture- and water-related properties of mycelium-based composites. *Materials & Design*, 161, 64-71.
- Ayala, M., Pickard, M.A., Vazquez-Duhalt, R. 2008. Fungal enzymes for environmental purposes, a molecular biology challenge. *Journal of Molecular Microbiology and Biotechnology*, 15(2-3), 172-180.
- Ba, D.M., Gao, X., Muscat, J., Al-Shaar, L., Chinchilli, V., Zhang, X. et al. 2021. Association of mushroom consumption with all-cause and cause-specific mortality among American adults: prospective cohort study findings from NHANES III. *Nutrition Journal*, 20(1), 38.
- Ba, D.M., Ssentongo, P., Beelman, R.B., Muscat, J., Gao, X., Richie, J.P. 2021. Higher mushroom consumption is associated with lower risk of cancer: a systematic review and meta-analysis of observational studies. *Advances in Nutrition*, 12(5), 1691-1704.
- Bonfante, P., Genre, A. 2010. Mechanisms underlying beneficial plant–fungus interactions in mycorrhizal symbiosis. *Nature Communications*, 1(1), 48.
- BMK - Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie. 2022. Österreich auf dem Weg zu einer nachhaltigen und zirkulären Gesellschaft - Die österreichische Kreislaufwirtschaftsstrategie.

BMK - Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie. 2025. Fact Sheet Bioökonomie.

BMLUK - Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Klima- und Umweltschutz, Regionen und Wasserwirtschaft. 2025. Aktionsplan für Bioökonomie.

Crippa, M., Solazzo, E., Guizzardi, D., Monforti-Ferrario, F., Tubiello, F.N., Leip, A. 2021. Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions. *Nature Food*, 2(3), 198-209.

Delvendahl, N., Dienel, H.L., Meyer, V., Langen, N., Zimmermann, J., Schlecht, M. 2023. Narratives of fungal-based materials for a new bioeconomy era. *Innovation: The European Journal of Social Science Research*, 36(1), 96-106.

European Commission: Directorate-General for Research and Innovation. 2012. Innovating for sustainable growth: a bioeconomy for Europe. *Publications Office of the European Union*.

European Commission: Directorate-General for Research and Innovation. 2018. A sustainable bioeconomy for Europe: strengthening the connection between economy, society and the environment: updated bioeconomy strategy. *Publications Office of the European Union*.

European Commission: Directorate-General for Communication, Circular economy action plan – For a cleaner and more competitive Europe. 2020. *Publications Office of the European Union*.

Ekanayaka, A.H., Tibpromma, S., Dai, D., Xu, R., Suwannarach, N., Stephenson, S. L. et al. 2022. A review of the fungi that degrade plastic. *Journal of fungi*, 8(8), 772.

Ellena, V., Steiger, M. 2022. The good fungus - about the potential of fungi for our future. *Good Microbes in Medicine, Food Production, Biotechnology, Bioremediation, and Agriculture*, 287-293.

Europäisches Parlament. 2023. Kreislaufwirtschaft: Definition und Vorteile.

Europäisches Parlament. 2024. Wie will die EU bis 2050 eine Kreislaufwirtschaft erreichen?

Figlmüller, T. 2024. Mycolution, Mycelium, Insulation, Solution: Entwicklung eines

kreislauffähigen Dämmstoffs auf Basis des Austernpilzes *Pleurotus ostreatus*. *Doctoral dissertation, Technische Universität Wien*.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. *FAOSTAT Statistical Database*.
Abrufdatum: 12.06.2025.

Geris, R., Malta, M., Soares, L.A., de Souza Neta, L.C., Pereira, N.S., Soares *et al.* 2024. A review about the mycoremediation of soil impacted by war-like activities: Challenges and gaps. *Journal of Fungi*, 10(2), 94.

Geyer, R., Jambeck, J.R., Law, K.L. 2017. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), e1700782.

Grimm, D., Wösten, H.A.B. 2018. Mushroom cultivation in the circular economy. *Applied microbiology and biotechnology*, 102(18), 7795-7803.

Hart, M.M., Antunes, P.M., Chaudhary, V.B., Abbott, L.K. 2018. Fungal inoculants in the field: Is the reward greater than the risk? *Functional Ecology*, 32(1), 126-135.

Hebel, D.E., Heisel, F. 2017. Cultivated building materials: industrialized natural resources for architecture and construction. *Birkhäuser*.

Hyde, K.D., Baldrian, P., Chen, Y., Thilini Chethana, K.W., De Hoog, S., Doilom, M. *et al.* 2024. Current trends, limitations and future research in the fungi? *Fungal Diversity*, 125(1), 1-71.

Hyde, K.D., Xu, J., Rapior, S., Jeewon, R., Lumyong, S., Niego, A.G.T., Abeywickrama *et al.* 2019. The amazing potential of fungi: 50 ways we can exploit fungi industrially. *Fungal Diversity*, 97(1), 1-136.

IMARC Group. 2024a. Citric acid market size, trends and forecast 2023–2028.

IMARC Group. 2024b. Mushroom market size, share, trends and forecast by mushroom type, form, distribution channel, end-use, and region, 2025-2033.

Irfan, S., Ranjha, M.M.A.N., Shafique, B., Ullah, M.I., Siddiqui, A.R., Wang, L. 2022. Bioremediation of Soil: An Overview. In: Malik, J.A. (Ed.), *Advances in Bioremediation and Phytoremediation for Sustainable Soil Management*. Springer, Cham.

Jahn, L.J., Rekdal, V.M., Sommer, M.O.A. 2023. Microbial foods for improving human and planetary health. *Cell*, 186(3), 469-478.

- Jain, A., Yadav, S., Nigam, V.K., Sharma, S.R. 2017. Fungal-mediated solid waste management: a review. *Mycoremediation and Environmental Sustainability*, Vol. 1, 153.
- Kapahi, M. 2018. Recent advances in cultivation of edible mushrooms. *Biology of Macrofungi*, 275-286.
- Martín, C., Zervakis, G.I., Xiong, S., Koutrotsios, G., Strætkvern, K.O. 2023. Spent substrate from mushroom cultivation: exploitation potential toward various applications and value-added products. *Bioengineered*, 14(1), 2252138.
- Marycz, M., Brillowska-Dąbrowska, A., Muñoz, R., Gębicki, J. 2022. A state of the art review on the use of fungi in biofiltration to remove volatile hydrophobic pollutants. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 21(1), 225-246.
- Meyer, V., Basenko, E.Y., Benz, J.P., Braus, G.H., Caddick, M.X., Csukai, M., *et al.* 2020. Growing a circular economy with fungal biotechnology: A white paper. *Fungal biology and biotechnology*, 7(1), 5.
- Niego, A.G.T., Lambert, C., Mortimer, P., Thongklang, N., Rapior, S., Grosse, M. *et al.* 2023. The contribution of fungi to the global economy. *Fungal Diversity*, 121(1), 95-137.
- Okuda, Y. 2022. Sustainability perspectives for future continuity of mushroom production: The bright and dark sides. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6, 1026508.
- Rodgers, C.J., Blanford, C.F., Giddens, S.R., Skamnioti, P., Armstrong, F.A., Gurr, S.J. 2010. Designer laccases: a vogue for high-potential fungal enzymes? *Trends in biotechnology*, 28(2), 63-72.
- Show, P.L., Oladele, K.O., Siew, Q.Y., Aziz Zakry, F.A., Lan, J.C. W., Ling, T.C. 2015. Overview of citric acid production from *Aspergillus niger*. *Frontiers in life science*, 8(3), 271-283.
- Sierra, L.A.B., Mendes-Pereira, T., Yupanqui García, G.J., Werkhaizer, C.Q., De Rezende, J.B., Augusto, T. *et al.* 2023. Current situation and future perspectives for the use of fungi in the biomaterial industry and proposal for a new classification of fungal-derived materials. *PeerJ Materials Science*, 5, e31.
- Stange, S., Wagenführ, A. 2022. 70 years of wood modification with fungi. *Fungal Biology and Biotechnology*, 9(1), 7.

- Sydor, M., Cofta, G., Doczekalska, B., Bonenberg, A. 2022. Fungi in mycelium-based composites: usage and recommendations. *Materials*, 15(18), 6283.
- Trivedi, A., Vishwakarma, A., Saawarn, B., Mahanty, B., Hait, S. 2022. Fungal biotechnology for urban mining of metals from waste printed circuit boards: A review. *Journal of Environmental Management*, 323, 116133.
- Vaksmas, A., Guerrero-Cruz, S., Ghosh, P., Zeghal, E., Hernando-Morales, V., Niemann, H. 2023. Role of fungi in bioremediation of emerging pollutants. *Front Mar Sci*.
- van den Brandhof, J.G., Wösten, H.A.B. 2022. Risk assessment of fungal materials. *Fungal biology and biotechnology*, 9(1), 3.
- Vandelook, S., Elsacker, E., Van Wylick, A., De Laet, L., Peeters, E. 2021. Current state and future prospects of pure mycelium materials. *Fungal biology and biotechnology*, 8(1), 20.
- Veerabahu, A., Banik, M.T., Lindner, D.L., Pringle, A., Jusino, M.A. 2025. Invasive golden oyster mushrooms are disrupting native fungal communities as they spread throughout North America. *Current Biology*.
- Vereinte Nationen. 2015. Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development.
- Voběrková, S., Vavěrková, M.D., Burešová, A., Adamcová, D., Vršanská, M., Kynický, J. et al. 2017. Effect of inoculation with white-rot fungi and fungal consortium on the composting efficiency of municipal solid waste. *Waste Management*, 61, 157-164.
- Voglmayr, H., Schertler, A., Essl, F., Krisai-Greilhuber, I. 2023. Alien and cryptogenic fungi and oomycetes in Austria: an annotated checklist. *Biological Invasions*, 25(1), 27-38.
- Wattanavichean, N., Phanthuwongpakdee, J., Koedrith, P., Laoratanakul, P., Thaithatgoon, B., Somrithipol, S. et al. 2025. Mycelium-based breakthroughs: exploring commercialization, research, and next-gen possibilities. *Circular Economy and Sustainability*, 1-43.
- Woo, S.L., Hermosa, R., Lorito, M., Monte, E. 2023. *Trichoderma*: a multipurpose, plant-beneficial microorganism for eco-sustainable agriculture. *Nature Reviews Microbiology*, 21(5), 312-326.

Glossar

Ascomycota: Eine artenreiche Gruppe von Pilzen, die ihre Sporen in schlauchförmigen Zellen, den sogenannten Asci, bilden. Zu ihnen gehören auch die typischen „Schimmelpilze“.

Filamentöse Pilze: Pilze, die aus fadenförmigen Zellstrukturen (Hyphen) aufgebaut sind und dadurch ein weit verzweigtes Myzel bilden.

Flüssigbrut: Eine Kultur von Pilzmyzel in Flüssignährmedium. Sie dient zur schnellen Vermehrung und erleichtert die Inokulation von Kultursubstraten.

Fruchtkörper: Der oft sichtbare Teil eines Pilzes, in dem die sexuellen Sporen gebildet und verbreitet werden. Bei den Ständerpilzen (Basidiomycota) ist der Fruchtkörper häufig aus „Hut“ und „Stiel“ zusammengesetzt.

Inokulum: Sporen oder Myzel, das genutzt wird, um das Wachstum von Pilzen auf einem neuen Substrat zu starten.

Körnerbrut: Mit Pilzmyzel durchwachsene Getreidekörner, die als Inokulum für den Anbau von Speisepilzen auf größeren Substratmengen dienen.

Lignocellulosehaltig: Beschreibt pflanzliches Material, das aus Lignin, Cellulose und Hemicellulose besteht. Diese Bestandteile verleihen Pflanzen Struktur und Stabilität.

Mykoprotein: Protein, das aus Pilzmyzel gewonnen wird. Es gilt als nachhaltige Proteinquelle für die menschliche Ernährung.

Mykotoxine: Giftige Stoffwechselprodukte bestimmter Pilzarten, die in Lebens- und Futtermitteln vorkommen und gesundheitsschädlich wirken können.

Myzel: Netzwerk feiner Pilzfäden (Hyphen), das das eigentliche Wachstumsstadium des Pilzes darstellt. Es durchdringt das Substrat zur Nährstoffaufnahme.

Novel Food: Lebensmittel, die vor 1997 in der EU nicht in nennenswertem Umfang verzehrt wurden. Sie benötigen eine Sicherheitsprüfung und Zulassung.

PFAS: Per- und polyfluorierte Alkylverbindungen sind synthetische Chemikalien, die wegen ihrer Stabilität schwer abzubauen sind. Sie sind in vielen Produkten vorhanden und stellen ein erhebliches Umwelt- und Gesundheitsrisiko dar.

Pilzbrut: Jede Form von mit Myzel besiedeltem Material, das zur Inokulation neuer Substrate verwendet wird. Sie stellt den „Startpunkt“ der Pilzkultivierung dar.

Schlauchpilze: siehe Ascomycota

Substrat: Nährboden, auf dem Pilze wachsen. Er besteht oft aus organischen Reststoffen wie Stroh, Holz oder anderen pflanzlichen Materialien, die das Myzel zersetzen kann.

Anhang I: Online-Umfrage

Die Online-Umfrage wurde modular aufgebaut. Abhängig von den ersten Antworten wurden nur die jeweilig relevanten Folgefragen angezeigt. Mehrfachantworten waren möglich, sofern nicht anders angegeben.

1. Grundlegende Teilnahmedaten

1.1 Ich nehme an dieser Umfrage teil als: *Unternehmen* oder *Forschungseinrichtung*

1.2 Website

1.3 Land (Dropdown mit europäischen Ländern + "*Außerhalb Europas*")

1.4 Name des Unternehmens (bei Unternehmen)

1.5 Name der Forschungseinrichtung (bei Forschungseinrichtung)

1.6 Name der Arbeitsgruppe (bei Forschungseinrichtung)

1.7 Unternehmensgröße (nur bei Unternehmen): *1 bis 10, 11 bis 50, 51 bis 250, >250*

1.8 Bundesland (nur bei Österreich; Liste an Bundesländern)

2. Thematische Eingrenzung

2.1 Beteiligung an der Pilzwirtschaft (bei Unternehmen): *Wir bieten Pilze oder Produkte und/oder Services auf Basis von Pilzen an, Wir sind an Produkten und Services auf Basis von Pilzen interessiert*

2.2 Themenbereich (bei Unternehmen): *Lebensmittelproduktion, Materialproduktion, Abfallbehandlung*

3. Geschäftsfelder (bei anbietenden Unternehmen)

In welchen Geschäftsfeldern der Pilzwirtschaft ist Ihr Unternehmen tätig?: *Primärproduktion, Weiterverarbeitung, Vertrieb, Anlagenbau, Beratung und Consulting, Forschung und Entwicklung*

4. Informationen zum Unternehmen

4.1 Wie lange gibt es Ihr Unternehmen bereits?: *Weniger als 1 Jahr, 1–3 Jahre, 3–10 Jahre, Mehr als 10 Jahre*

4.2 Wie lange ist Ihr Unternehmen in der Pilzwirtschaft tätig?: *Weniger als 1 Jahr, 1–3 Jahre, 3–10 Jahre, Mehr als 10 Jahre*

4.3 Wie schätzen Sie das Fachwissen in Ihrem Unternehmen ein?: *Einsteiger (grundlegende Kenntnisse und erste Erfahrungen), Fortgeschritten (umfassende Kenntnisse und mehrjährige Erfahrung), Experte / Branchenführer (tiefgehendes Spezialwissen und anerkannte Expertise)*

4.4 Wie organisieren Sie Forschung & Entwicklung in Ihrem Unternehmen?: *Intern (eigene F&E-Abteilung/Mitarbeiter), Kooperation mit Universitäten/Forschungseinrichtungen, Externe Beratung / Consulting, Keine spezifischen F&E-Aktivitäten*

5. Lebensmittelproduktion

5.1 Welche Produkte oder Services bietet ihr Unternehmen an?: *Frischpilze, Mykoprotein, Fleischersatzprodukte, Zuchtsubstrate, Pilzbrut, Getrocknete Pilze, Tiefkühlprodukte, Fermentierte Pilzprodukte, Nahrungsergänzungsmittel, Vitalpilze, Getränke, Andere (Freitext)*

5.2 An welchen Produkten oder Services ist ihr Unternehmen interessiert? (bei interessierten Unternehmen): *Frischpilze, Mykoprotein, Fleischersatzprodukte, Zuchtsubstrate, Pilzbrut, Getrocknete Pilze, Tiefkühlprodukte, Fermentierte Pilzprodukte, Nahrungsergänzungsmittel, Vitalpilze, Getränke, Andere (Freitext)*

6. Substrate für die Primärproduktion

6.1 Welche Substrate nutzen Sie?: *Stroh, Kaffeesatz, Laubholz, Nadelholz, Getreide, Agrarabfälle, Lebensmittelreste, Andere (Freitext)*

6.2 Welche Substrate nutzen Sie? (Mykoprotein/Vitalpilzproduktion): *Agar-basierte Festmedien, Flüssigkulturmedien, Vollmedien, Synthetische Medien, Industrielle Nebenprodukte (z.B. Molke)*

6.3 Wie erfolgt Ihre Aufbereitung oder Beschaffung?: *Pasteurisierung, Dampfsterilisation, Bezug von inokuliertem Substrat, Bezug von durchwachsenem Substrat, Andere (Freitext)*

6.4 Wo beziehen Sie ihre Substrate?: *Regional (< 50 km), Überregional, International (EU), International (außerhalb EU)*

7. Abgeerntete Substrate

7.1 Wie werden Ihre abgeernteten Substrate weiterverwendet?: *Kompostierung, Bodenverbesserung, Tierfutter, Biogasproduktion, Stoffliche Verwendung, Andere (Freitext)*

7.2 Wo sehen Sie Potenzial für die Verwendung von abgeernteten Substraten in der Kreislaufwirtschaft?: *Chitin/Chitosan, Enzyme, Inhaltsstoffe, Pharmazeutische Grundstoffe, Cellulosefasern, Bio-Kunststoffe, Biokraftstoffe, Nahrungsergänzungsmittel, Proteinextrakte, Filtermaterialien, Baumaterialien, Andere (Freitext)*

8. Materialproduktion

8.1 Welche Produkte oder Services bietet ihr Unternehmen an?: *Kompositmaterialien, Pilzleder, Biokunststoffe, Beschichtungen, Klebstoffe, Designobjekte, Fasern, Andere (Freitext)*

8.2 Welche Produkte oder Services bietet ihr Unternehmen an? (Kompositmaterialien): *Verpackungsmaterial, Isolierungsmaterial/Dämmstoffe, Akustikpaneele, Urnen/Särge, Formteile*

9. Abfallbehandlung

9.1 Welche Produkte oder Services bietet ihr Unternehmen an?: *Abfallbehandlung, Kompostierung, Mykoremediation, Abwasserreinigung, Filtermaterialien, Enzyme, Biosorption, Recycling von abgeernteten Pilzsubstraten, Beratung/Consulting, Andere (Freitext)*

10. Interesse (bei interessierten Unternehmen)

10.1 Welche Stellung sollen Pilz-Produkten/Services in Ihren Unternehmen einnehmen?: *Ersatz eines bestehenden Angebots, Erweiterung des Portfolios, Exploratives Interesse, Andere (Freitext)*

10.2 Was erhoffen Sie sich von Pilz-Produkten/Services?: *Nachhaltigkeit verbessern, Neue Märkte erschließen, Image stärken/Marketing, Regulatorische Notwendigkeit, Produktperformance verbessern, Preis senken, Andere (Freitext)*

10.3 Warum gehen Sie davon aus, dass pilzbasierte Lösungen die richtige Wahl sind?: *Ähnliche Produkte sind etabliert, Mehrere Lösungswege werden evaluiert,*

Rahmenbedingungen sind günstig, Es ist ein Trendthema, Reaktion auf konkrete Marktnachfrage, Einzigartige Eigenschaften, Andere (Freitext)

11. Produktpositionierung und Märkte

11.1 Wie würden Sie Ihre Produkt-/Servicepositionierung am Markt beschreiben?: *Nischenprodukt, Massenmarkt, Innovation, Geschütztes Know-How, Design/Kunst, Handwerk*

11.2 Ihre Zielmärkte: *Lokal/Regional, National, EU-Raum, International*

11.3 Welche Vertriebswege nutzen Sie?: *Direktvermarktung, Online-Marktplätze, Einzelhandel, Gastronomie, Großhandel, B2B / Industriekunden*

12. Forschung & Entwicklung

12.1 In welchen Bereichen der Pilzforschung sind Sie tätig?: *Grundlagenforschung, Angewandte Forschung*

12.2 Grundlagenforschung: *Genetik und Biotechnologie, Biodiversität und Systematik, Ökologie, Biochemie, Pharmazie / Medizin, Andere (Freitext)*

12.3 Angewandte Forschung: *Kultivierungsmethoden, Produktionstechnologie, Substratoptimierung, Inhaltsstoffe, Mykotoxine, Kompositmaterialien, Mykoremediation, Mykoproteine, Pharmazeutische Anwendungen, Optimierte Enzyme, Andere (Freitext)*

12.4 An welchen Projekten/Themenfeldern arbeiten Sie derzeit? (Freitext)

12.5 Mit welchen Partnern kooperieren Sie in Forschungsprojekten?: *Universitäten, Außeruniversitäre Forschungseinrichtungen, Industrieunternehmen, Start-ups, Landwirtschaftliche Betriebe, Öffentliche Einrichtungen, Internationale Forschungspartner, Andere (Freitext)*

12.6 Wie finanzieren Sie Ihre Forschungsprojekte?: *Eigenmittel, Nationale Forschungsförderung, EU-Förderungen, Industriepartnerschaften/Auftragsforschung, Andere (Freitext)*

12.7 Welche Hindernisse sehen Sie bei der praktischen Umsetzung Ihrer Forschungsergebnisse?: *Finanzierungslücke zwischen Forschung und Marktreife, Rechtliche und regulatorische Hürden, Fehlende Industriepartner, Technologische Skalierungsprobleme, Marktakzeptanz, Patent- und Lizenzierungsfragen,*

Wissenstransferbarrieren, Andere (Freitext)

12.8 Was könnte die Forschung und Entwicklung in diesem Bereich am besten fördern?:
Spezifische Förderprogramme, Intensivere Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft und Wirtschaft, Bessere Vernetzung innerhalb der Pilzbranche, Interdisziplinäre Forschungscluster, Internationale Kooperationen, Spezialisierte Studienfächer, Andere (Freitext)

13. Verbesserungsbedarf im Umfeld der Pilzwirtschaft

Schieberegler: Kein Verbesserungsbedarf ↔ Sehr starker Verbesserungsbedarf

Kooperationsmöglichkeiten und Vernetzung, Finanzierungsmöglichkeiten/Förderungen, Regulatorischer und rechtlicher Rahmen, Standardisierung/Zertifizierung, Verbraucherakzeptanz/Marktbewusstsein, Wissenstransfer zwischen Forschung und Praxis, Zugang zu regionalen Substraten, Wertschöpfung mit abgeernteten Substraten

14. Marktentwicklung und Innovationspotenzial

14.1 Welche Faktoren beeinflussen Ihre Geschäftsentwicklung am stärksten?:
Konsumverhalten, Wirtschaftslage, Regulatorisches, Zugang zu Technologien, Rohstoffverfügbarkeit, Fachkräftemangel, Andere (Freitext)

14.2 Welche Unterstützungen würden Ihrem Unternehmen am meisten helfen?:
Staatliche Förderungen, Beratungsangebote, Netzwerkveranstaltungen, Forschungs Kooperationen, Weiterbildungen, Andere (Freitext)

14.3 Welche Bereiche haben Ihrer Meinung nach das größte Wachstumspotenzial?:
Speisepilze, Mykoprotein, Nahrungsergänzungsmittel, Komposite und Leder, Abfallbehandlung, Umweltsanierung, Andere (Freitext)

14.4 In welchen Bereichen sehen Sie die größten Innovationspotenziale?: *Produktionsverfahren, Neue Produkte, Materialeigenschaften, Vertriebswege, Kreislaufwirtschaftliche Konzepte, Andere (Freitext)*

14.5 Marktentwicklung

Schieberegler: Sehr pessimistisch ↔ Sehr optimistisch

Wie sehen Sie die Marktentwicklung der Pilzwirtschaft in den nächsten 5 Jahren?, Wie sehen Sie die generelle Marktentwicklung in den nächsten 5 Jahren?

15. Zu Ihrer Person

15.1 Persönliche Daten

Ihr Name, Ihre E-Mail-Adresse, Ihre Position (Unternehmen/Forschungseinrichtung), Ihre Telefonnummer

15.2 Kontakt und Teilnahme

Ich stehe für ein vertiefendes Interview (telefonisch oder online) zur Verfügung, Ich möchte zur Studie auf dem Laufenden gehalten werden, Ich möchte mehr Informationen zur Wirtschaftsmesse im Oktober erhalten, Ich habe Interesse an einer stärkeren Vernetzung innerhalb der Pilzwirtschaft

15.3 Weitere Anmerkungen

Gibt es weitere Anmerkungen oder Themen, die Sie für relevant halten und im Fragebogen nicht ausreichend berücksichtigt wurden? (Freitext)

Anhang II: Interview-Leitfäden

Lebensmittelproduktion

- Wie schätzen Sie das aktuelle Marktpotenzial für Speisepilze und Pilzprodukte in Österreich ein? Sehen Sie ein steigendes Interesse von Verbrauchenden oder ist die Verbraucherakzeptanz, insbesondere im Hinblick auf Novel Food, eher eine Herausforderung?
- Welche Faktoren erschweren Ihrer Meinung nach eine stärkere Integration der Pilzproduktion in eine funktionierende Kreislaufwirtschaft (z.B. lange Transportwege, Import-Substrate, Kunststoffsäcke, abgeerntete Substrate)? Wo sehen Sie konkrete Verbesserungsmöglichkeiten?
- Was geschieht derzeit mit den bei der Produktion entstehenden Reststoffen, insbesondere mit den abgeernteten Substraten? Wo sehen Sie Potenziale für die Weiterverwertung von abgeernteten Substraten?
- Produzieren Sie regionale Pilzarten und achten dabei darauf, dass auch Ihre Substrate aus der Region stammen? Wie wichtig ist Ihnen Regionalität in der Produktion?
- Setzen Sie in Ihrem Betrieb bereits auf automatisierte Prozesse? Welche

Herausforderungen gibt es bei der Umsetzung von Automatisierung?

- Ist der Wissenstransfer zwischen Forschung und Praxis aus Ihrer Sicht ausreichend? Wenn nein, was könnte getan werden, um diesen zu verbessern?
- Was sind aus Ihrer Sicht die größten Hürden für das Wachstum der Pilzbranche in Österreich?
- Welche politischen oder wirtschaftlichen Rahmenbedingungen würden Sie sich wünschen, um die Branche zu stärken?
- Möchten Sie noch etwas ergänzen?

Spezifische Zusatzfragen:

- In der aktuellen Studie von Veerabahu *et al.* wird gezeigt, dass *Pleurotus citrinopileatus* (Zitronengelber Seitlings) in Nordamerika die Biodiversität einheimischer Pilzgemeinschaften erheblich verändert. Sind ähnliche Prozesse oder ökologische Risiken auch in Europa bzw. Österreich bereits sichtbar – oder zumindest denkbar?
- Wie beurteilen Sie das ökologische Risiko, das von der Ausbringung von SMS mit nicht-einheimischen Pilzarten als Bodendünger ausgeht?
- Welche Maßnahmen würden Sie empfehlen, um eine unbeabsichtigte Ausbreitung invasiver Pilze durch SMS zu verhindern?

Materialproduktion

- Was sind aus Ihrer Sicht die wichtigsten Vorteile myzelbasierter Materialien und welches Potenzial haben sie?
- In Europa gibt es nur wenige Unternehmen, die solche Materialien herstellen. Woran liegt das Ihrer Meinung nach? Welche Herausforderungen oder Hürden bestehen, um den Sektor zu etablieren?
- Zwischen Forschung und Markt besteht eine Lücke. Woran liegt das und was könnte diese Situation verbessern?
- Gibt es seitens der Unternehmen Interesse, Projekte zu finanzieren oder umzusetzen?

- Glauben Sie, dass myzelbasierte Materialien ein Nischenprodukt bleiben werden, oder könnten sie auch im Massenmarkt eine Rolle spielen?
- Wie wichtig ist es Ihrer Meinung nach, bei der Produktion myzelbasierter Materialien regionale bzw. lokale Substrate und Pilzarten zu verwenden?
- Was benötigt ein Stakeholder wie Sie von Staat und Institutionen, um diesen Sektor zu stärken, und welche Maßnahmen würden Sie sich wünschen?
- Möchten Sie noch etwas ergänzen?

Abfallbehandlung

- Könnten Sie Ihre Arbeit kurz vorstellen – was motiviert Sie, in diesem Bereich zu arbeiten, was tun Sie konkret und was sind die Hauptziele und Schwerpunktbereiche des Projektes/Unternehmens?
- Arbeiten Sie mit regionalen oder lokal angepassten Pilzstämmen?
- Wie schätzen Sie das aktuelle Potenzial der pilzbasierten Abfallbehandlung in Europa ein?
- Sehen Sie eine Lücke zwischen Forschung und Praxis in diesem Bereich?
- Was sind die größten Herausforderungen bei der Etablierung dieses Sektors? Warum dauert der Fortschritt so lange, obwohl es bereits seit vielen Jahren Forschungsergebnisse gibt?
- Gibt es Interesse seitens Unternehmen, Institutionen und der Öffentlichkeit an diesen Dienstleistungen, oder stoßen Sie eher auf Skepsis?
- Welche Unterstützung bräuchten Stakeholder der Pilzwirtschaft von Institutionen, um diese Herausforderungen zu überwinden und den Sektor erfolgreich zu etablieren?
- Möchten Sie noch etwas ergänzen?