

Schlussbericht

zum Vorhaben

Thema:

Prototypenbau zur Produktion von Pilzmyzelmaten auf Forst- und Agrarreststoffen als nachhaltige Leder- und Kunstlederergänzungen

Zuwendungsempfänger:

**Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung
e.V. Hansastraße 27c, 80686 München**

Förderkennzeichen:

2222NR087X

Laufzeit:

01.08.2023 bis 31.07.2024

Monat der Erstellung:

Juli/2025

Erstellung erfolgt durch:

Dr. Hannes Hinneburg

Gefördert durch:



**Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft**

**aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages**

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorenschaft.

Inhaltsverzeichnis

I. Kurzbericht	1
1. Aufgabenstellung	1
2. Planung und Ablauf des Vorhabens	1
3. Resümee der wesentlichen Ergebnisse.....	2
a) Arbeitspakete und Meilensteine	2
b) Zusammenfassung	4
II. Ausführliche Darstellung der Ergebnisse	6
1. Erzielte Ergebnisse	6
Arbeitspaket 1: Anlagenkonzeptionierung/-Bau	6
Arbeitspaket 2: Aufbereitung von Pilzsubstraten und Vorkultivierung zur Anlangen Anwendung ..	6
Arbeitspaket 3: Teilautomatisierte Myzelmattenproduktion/Demonstrator Betrieb	8
Arbeitspaket 4: Materialnachbehandlung und Qualitätskontrolle für die Endproduktherstellung	10
2. Verwertung.....	11
a) Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen.....	11
b) Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende.....	11
c) Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende.....	12
d) Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit	12
3. Erkenntnisse von Dritten	12
4. Veröffentlichungen	12
ANHANG	13
Teilvorhaben 1: Anlagenkonzeptionierung/-Bau	13
1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens	13
2. Bearbeitete Arbeitspakete.....	13
Arbeitspaket 1: Anlagenkonzeptionierung/-Bau.....	13
3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens	13
Teilvorhaben 2: Aufbereitung von Pilzsubstraten und Vorkultivierung zur Anlangen Anwendung	14
1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens	14
2. Bearbeitete Arbeitspakete.....	14
Arbeitspaket 2: Aufbereitung von Pilzsubstraten und Vorkultivierung zur	14
Anlangen Anwendung	14
3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens	14
Teilvorhaben 3: Teilautomatisierte Myzelmattenproduktion/Demonstrator Betrieb	15
1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens	15
2. Bearbeitete Arbeitspakete.....	15
Arbeitspaket 3: Teilautomatisierte Myzelmattenproduktion/Demonstrator Betrieb.....	15
3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens	15
Teilvorhaben 4: Materialnachbehandlung und Qualitätskontrolle für die Endproduktherstellung	16
1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens	16

5.	Bearbeitete Arbeitspakete.....	16
	Arbeitspaket 4: Materialnachbehandlung und Qualitätskontrolle für die Endproduktherstellung.....	16
6.	Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens.....	16

I. Kurzbericht

1. Aufgabenstellung

Das Ziel dieses 1-jährigen industriellen Forschungsvorhaben war die teilautomatisierte Herstellung einer umweltfreundlichen, innovativen Lederalternative im Labormaßstab, basierend auf Pilz-(Verbund-) Materialien. Unter Verwendung biogener Reststoffe als Substrat (Nahrungsquelle der Pilze) sollten im Ausmaß von ca. 0,25 - 0,5 m² Probematerial produziert werden, um fossil basierte Materialien bestmöglich substituieren zu können.

Im Zuge des Projektes sollten die kultivierungsrelevanten Parameter der gängigen Boxkultivierung in Hinblick auf Wachstum, Feuchtigkeit, Temperatur, Prozessführung, Substratkompatibilität etc. in Konzepte für einen automatisierten, kontinuierlichen und skalierungsfähigen Betrieb zur Gewährleistung der Homogenität und Qualität des Materials übertragen und mit Schutzrechten abgesichert werden. In bisherigen Arbeiten am Fraunhofer IAP wurden die Pilzmyzelmatte manuell und diskontinuierlich in Boxen, mittels weiterentwickelter Methoden ausgehend vom Stand der Wissenschaft, gezüchtet. Im Projekt sollte eine umfassende Gesamtvision des industriellen Produktionsprozesses aufgezeigt werden. Die technische Umsetzung (Entwicklung) des bisherigen Wachstums fokussierte sich auf die Kernphase des Pilzwachstums und bediente sich sonst laborbedingter Gegebenheiten bzw. Standardlösungen.

Die eingesetzten, saprophytische (holzersetzen) Pilze, wurden dabei vor allem auf alternativen Substraten der Forst- und Landwirtschaft gezüchtet, um eine möglichst kostengünstige Produktion zu ermöglichen. Dabei wurden Substratformulierungen und deren Vorbereitung (Zerkleinerung, Sterilisation, Beimpfung etc.) bzw. Regeneration auf eine Anwendung für einen kontinuierlichen, resilienten und teilautomatisierten Betrieb hin optimiert.

Am Ende des Projekts sollte ein Demonstrator zum Abbilden des Kernprozesses kontinuierlich betrieben und Handmuster hergestellt werden können.

Die softwarebasierten Prozessbedingungen wurden produktspezifisch eingestellt und kontrolliert, sodass möglichst eine geringe menschliche Interaktion nötig ist. Durch Nutzung von physikochemischen Behandlungen (Pigmenteintrag, Dehnungen, Passivierungen, Lichtbehandlung, Weichmacher- und Feuchtgradeinstellungen etc.) entlang der Produktionsstraße (z.B. Förderbandsystem) wurden dem finalen Material ggf. bereits während des Wachstums gewünschte Eigenschaften verliehen, so dass möglichst nach der Ernte nur noch geringe Nachbehandlungen nötig sind.

In Zusammenarbeit mit der TFL Ledertechnik AG sollte eine industriegerechte Nachbehandlung (Quervernetzung, Weichmachen, Färbung) etabliert, so dass aus dem behandelten Rohmaterial höherwertige, marktfähige Lederalternativen entstehen. Das so entstandene Pilzmaterial sollte neben dem Rohmaterial zu finalen Produkten für den Endverbraucher verarbeitet werden.

2. Planung und Ablauf des Vorhabens

In diesen anwendungsnahen Forschungsvorhaben war eine Laufzeit von 12 Monaten vorgesehen. Ziel war zu Projektende die Übertragung des Batch-/Boxherstellungsprozess für Pilzmyzelmatte auf eine kompakte, teilautomatisierte Anlage abgeschlossen zu haben. Dazu wurden relevante Parameter identifiziert, Konzepte für eine technische Umsetzung erarbeitet und anschließend praktisch in Vorexperimenten validiert, um letztlich ein Konzept baulich zu realisieren. Parallel wurden Erkenntnisse über geeignete Substrate und deren Auswahl vom gesammelt und für den Planungsprozess bereitgestellt.

Die Materialeigenschaften der Pilzmyzelmatte sollten innerhalb des Projektes durch geeignete Nachbehandlung für die verarbeitende Industrie verbessert werden. Die geschah fortlaufend während der gesamten Projektlaufzeit mit manuell erstellten Handmustern.

3. Resümee der wesentlichen Ergebnisse

a) Arbeitspakete und Meilensteine

Arbeitspakete (AP) (lt. Planung im Antrag)	Bearbeitungszeitraum (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
<p>AP 1 Anlagenkonzeptionierung/-Bau</p>	<p>08/2023 bis 01/2024</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Wachstums- und produktionsrelevante Parameter (Temperatur, Luftfeuchte, Belüftung, Substrate, Feuchtegehalte, Arbeitsstämme etc.) und Abläufe wurden in einer Anforderungsliste durch eine Sondermaschinenbaufirma erfasst und gemeinsam verschiedene Konzepte für eine Materialproduktion für Lederalternativen auf Myzelbasis erstellt und eines letztlich ausgewählt. - Ausgewähltes Konzept wurde Ende 2023 zur Patentanmeldung eingereicht. - Das ausgearbeitete Konzept für die Hauptkomponenten wurde planerisch abgeschlossen und das System nach Aufbau bei der Konstruktionsfirma am Fraunhofer IAP aufgebaut und in Betrieb genommen.
<p>AP 2 Aufbereitung von Pilzsubstraten und Vorkultivierung zur Anlagenanwendung</p>	<p>09/2023 bis 02/2024</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Es wurden verschiedene Substrate wie Raps-, Weizen-, Leinen-, Hanfstroh, Sägespäne und Grünschnitt auf ihre Eignung getestet, sowohl allein als auch in Kombination mit verschiedenen Sterilisations- und Pasteurisationsverfahren. - Rapsstroh nach der Pasteurisation keimarm und zum Wachstum geeignet, während feuchtere Substrate wie Grünschnitt häufig Kontaminationen aufwiesen - Pasteurisation effektive Methode zur Keimreduktion - eine „kalte“ Pasteurisierung durch Einweichen des Substrates in stark alkalischer wässriger Lösung erwies sich als kostengünstige und skalierbare Methode für die Kultivierung des Zunderschwamms mittels Körnerbrutinokulierung

Arbeitspakete (AP) (lt. Planung im Antrag)	Bearbeitungszeitraum (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
		<ul style="list-style-type: none"> - Ozonanwendungen zur Keimreduktion eignen sich nicht - Die angewandte Temperatur und Dauer der Behandlung sind entscheidend für die Wirtschaftlichkeit der Anlage, wobei Rapsstroh und Holzpartikel als vielversprechend gelten. - Darüber hinaus wurden verschiedene Pilzstämme aus der Wildnis isoliert und auf Substraten getestet, wobei der Stamm „P13“ als geeignet für die Produktion identifiziert wurde.
<p>AP 3 Teilautomatisierte Myzelmattenproduktion/Demonstrator Betrieb</p>	<p>02/2023 bis 07/2024</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Die Prototypenanlage wies bei der ersten Befüllung eine Kontamination auf, was zur Anpassung des Befüllmechanismus führte. - Anlage konnte über mehrere Wochen mehrmals steril betrieben und Material geerntet werden, jedoch traten Probleme mit Substratsammlungen im Innenraum auf, die die Produktion gleichmäßiger Myzelmatten beeinträchtigten - Durch gezielte Anpassungen der Bandanlage konnte die Qualität der Matten verbessert werden. - Trotz dieser Fortschritte war die Qualität des Myzels noch nicht mit der der in Boxen produzierten Materials vergleichbar, was wahrscheinlich hauptsächlich auf eine zu schnelle Austrocknung der Myzeloberfläche zurückzuführen ist - Um diesem Problem entgegenzuwirken, sind weitere Anpassungen der Bandanlage notwendig, diese laufen, konnten jedoch im Projektzeitraum nicht mehr umgesetzt werden

Arbeitspakete (AP) (lt. Planung im Antrag)	Bearbeitungszeitraum (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
Materialnachbehandlung und Qualitätskontrolle für die Endproduktherstellung	08/2023 bis 07/2024	<ul style="list-style-type: none"> - Zahlreiche, manuell hergestellte Materialstücke wurden an TFL übergeben und chemisch sowie mechanisch bearbeitet, wobei etablierte Verfahren der Lederindustrie zum Einsatz kamen. Es stellte sich heraus, dass eine 1:1-Verwendung der eingesetzten Mittel nicht möglich war - Eine Hauptschwierigkeit bleibt die Reißfestigkeit des Materials, neben der dauerhaft gewünschten Weichheit, wie sie für konventionelles Leder erforderlich ist. Durch den Einsatz natürlicher Fasern wie Hanf und Wolle konnte jedoch die Reißfestigkeit der Materialien verbessert werden. Diese Überlegung wurde bereits bei der Konzeption der Anlage (AP1) berücksichtigt. Eine weitere Verbesserung des Materials durch die Kultivierung im Prototypen konnte bisher nicht erreicht werden und steht noch aus (siehe dazu auch AP3).

b) Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Wachstums- und produktionsrelevante Parameter plangemäß aus der Boxkultivierung erfasst wurden, verschiedene Konzepte für die Materialproduktion auf Myzelbasis in einer kleinen Anlage entwickelt, und eines davon technisch umgesetzt und zur Patentanmeldung eingereicht wurde.

Unterstützt wurde die Konzeptionierung durch das parallele Testen verschiedener Substrate (z.B. Rapsstroh und Grünschnitt), sowie der Eignung verschiedenen Vorbehandlungen zur Keimreduktion. Rapsstroh erwies sich nach der Pasteurisation als geeignet, während feuchtere Substrate häufig kontaminiert waren.

Die Pasteurisation, aber auch die basische Entkeimung stellten sich als effektive Methode zur Keimreduktion heraus, insbesondere wenn mit Pilzkörnerbrut inokuliert wurde, während eine feuchte Ozonbehandlung (wie sie zur Keimreduktion in Schwimmbädern eingesetzt wird) dagegen keinen Erfolg zur Entkeimung aufwies.

Die Anlage wurde erfolgreich aufgebaut und in Betrieb genommen. Bei der ersten Befüllung kam es zu einer Kontamination, was zum kompletten Umbau des Befüll-Mechanismus führte, sowie zu erhöhter manueller Arbeit beim Befüllen, da der Befüllvorgang als Schwachstelle ausgemacht wurde. Die Anlage konnte daraufhin steril betrieben werden.

Zudem ergaben sich Probleme mit Substratsammlungen im Innenraum aufgrund von Schrumpfungsprozessen des Bandes während des Erhitzungsvorgangs (nicht absehbar), die die Gleichmäßigkeit der Myzelmatte beeinträchtigten. Trotz Verbesserungen am Betriebssystem blieb die Myzelqualität hinter der von in Boxen produziertem Material zurück, hauptsächlich vermutlich aufgrund einer zu schnellen Austrocknung der Myzeloberfläche und Substratsammlungen im Innenraum. Um diesem Problem entgegenzuwirken, wären weitere Anpassungen des Bandanlagensystems notwendig gewesen, diese konnten jedoch im Projektzeitraum nicht mehr umgesetzt werden.

Daraus folgt, dass eine weitere Optimierung der Anlage notwendig ist, die folgende Punkte beinhaltet:

Erstens sollte das Band-System weiter optimiert werden, um die Schüttgutansammlungen im Innenraum zu unterbinden gepaart mit einem geeigneteren Substrat (z.B. Hanfstroh). Diese Verbesserung wird eine gleichmäßigere Entwicklung der Myzelmatten ermöglichen, eine Entfeuchtung des Substrats verringern und somit die Qualität des Endprodukts erhöhen, das dann externen Firmen und Designern zur Verfügung gestellt werden kann.

Zweitens ist die Einführung eines neuen Einwurfportals ratsam, da so das Risiko von Kontaminationen weiter minimiert und die (manuelle) Befüllung erheblich erleichtert werden kann. Diese Maßnahme steigert die Effizienz des gesamten Prozesses und verbessert die Arbeitsbedingungen für die Mitarbeiter, da der Arbeitsaufwand pro Befüllung reduziert wird.

Für die weiteren Anpassungen und den anschließenden Testbetrieb werden weitere 4 Monate (2 Personalmonate) vorgeschlagen.

Projektbegleitend wurden manuell erzeugte Materialstücke an TFL übergeben und chemisch sowie mechanisch bearbeitet. Die Reißfestigkeit des Materials stellte eine Herausforderung dar, konnte jedoch durch den Einsatz natürlicher Fasern wie Hanf und Wolle verbessert werden. Eine weitere Optimierung des Materials durch Kultivierung im Prototypen wurde jedoch bisher noch nicht erreicht, da erst das Bandsystem angepasst werden muss.

II. Ausführliche Darstellung der Ergebnisse

1. Erzielte Ergebnisse

Arbeitspaket 1: Anlagenkonzeptionierung/-Bau

Das Vorhaben des Arbeitspakets (AP) 1 wurde im vorgesehenen Zeitrahmen abgeschlossen. Die Ergebnisse aus AP2 flossen in die Planung des Demonstrators in AP1 ein und führten zu einem konkreten Konzept. Aufgrund der erfolgten Patenteinreichung werden die Ergebnisse hier nicht im Detail behandelt. Im Rahmen der Konzeption wurde ein spezifisches Verfahren sowie ein Aufbau der Anlage festgelegt (Abbildung 1). Für die Realisierung wurde entschieden, die Schüttgutaufbereitung extern und die Sterilisation intern durchzuführen. Dies hatte einen zusätzlichen Kostenaufwand für ein mobiles Sterilisationssystem zur Innenraumsterilisation des Prototyps sowie für ein System zur Keimreduzierung (Pasteurisierung von Schüttgut-Substraten in größeren Mengen) zur Folge, was entsprechend in einer Aufstockung beantragt wurde.



Abbildung 1 Teilansicht der aufgebauten Anlage vor Ort.

Arbeitspaket 2: Aufbereitung von Pilzsubstraten und Vorkultivierung zur Anlagenanwendung

Im AP 2 ging es um Tests von zellulosehaltigen Forstreststoffen bzw. Test von Pasteurisierungs-/Sterilisierungsmethoden.

Substrattests:

Das autoklavierte Substrat wurde für 5 Tage zusammen mit der Pilzkörnerbrut in einem Beutel vorinkubiert. Anschließend wurde eine etwa 20 mm dicke Schicht des Substrats in Weckgläser überführt und für 13 Tage bei einer Temperatur von 25°C inkubiert (Abbildung 2). Nach 7 Tagen wurde der Deckel der Gläser geöffnet, um eine Abtrocknung zu ermöglichen. Die Myzeloberschicht wurde gemessen und es wurden Zugfestigkeitstests an 1 cm breiten Myzelmatte-Stücken durchgeführt. Die Druckbelastbarkeit der Substratschicht wurde auf einer Belastungsfläche von 15 mm getestet.

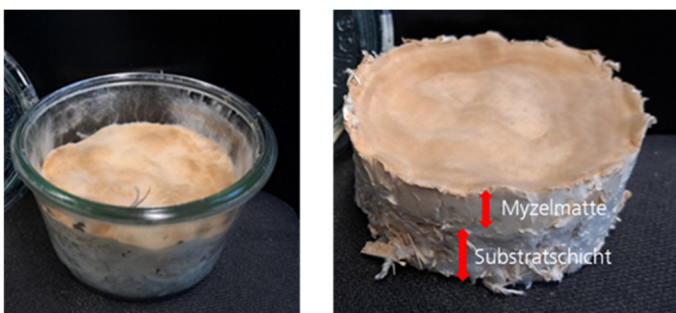


Abbildung 2 Repräsentativer Substrattest mit korrespondierendes Mattenwachstum.

Bei den Ansätzen mit dem Pilz Zunderschwamm konnte festgestellt werden, dass Rapsstroh das beste Substrat für eine homogene Entwicklung von ca. 10 mm dicken Myzelmatte war. Diese Myzelmatte wiesen eine Zugfestigkeit von 10 N auf. Interessanterweise wurde bei der Verwendung von Hackschnitzeln in Kombination mit Rapsstroh die höchste Druckbelastbarkeit der Substratschicht gemessen. Diese betrug 73 N auf einer Fläche von 15 mm. Im Vergleich dazu schnitten die Ansätze mit

einem Reshi-Pilz (*Gandoderma* sp.) nicht so gut ab. Die Pilzmyzelmatte, die durch den Reishii gebildet wurden, waren insgesamt von schlechterer Qualität und unregelmäßiger als diejenigen, die aus Zunderschwamm entstanden sind. Allerdings wurde auf Sägespänen die reißfesteste Matte mit einer Zugfestigkeit von 5,4 N gebildet. Interessanterweise zeigte sich jedoch bei den Reshiansätzen eine deutlich höhere Druckbelastbarkeit der Substratschicht im Vergleich zu Zunderschwamm. Bei Verwendung von Hackschnitzeln oder Grünschnitt in Kombination mit Rapsstroh konnte eine Druckbelastbarkeit des Substratblock von bis zu 150 N erreicht werden, was 214% höher war als bei Zunderschwamm. Für die Myzelmatteherstellung eignet sich Zunderschwamm daher besser.

Zudem wurde beobachtet, dass die Inokulierung mit Weizenkörnerbrut zu einem schnelleren und besseren Durchwachsen des Substrats führte im Vergleich zur Verwendung von Flüssigpilzkulturen.

Die Pasteurisation (1 h, 80°C), sowie die basische Entkeimung stellten sich als wirksame Methode zur Keimreduktion heraus (Abbildung 3).

Bei der basischen Entkeimung von Pilzsubstrat mit Kalkhydrat (CaOH) wurde eine Lösung aus 10 L Wasser und 2 g/L Weißkalk mit pH 12,4 hergestellt. Verschiedene Substrate wurden 24 Stunden eingeweicht, anschließend gut abgetropft und mit 10 g/L CaSO_4 versetzt. Das Substrat wurde dann in einen Pilzbeutel gefüllt und mit etwa 6-8% Körnerbrut des Zunderschwamms versehen. Die Inkubation erfolgte bei 24°C.

Neben dem Pasteurisieren zur Keimreduktion wurde auch die Behandlung mittels Ozons evaluiert (Abbildung 3). Dazu wurde geschreddertes Rapsstroh 30 Minuten eingeweicht. Anschließend wurde eine Probe des Überstands auf Malt Broth Agar (MBA) für die Bestimmung der Colony Forming Units (CFU) ausplattiert. Danach wurde 30 Minuten lang bei ständigem Rühren 500 mg/h Ozon in das Stroh-Wassergemisch eingeleitet. Eine weitere Probe des Überstands wurde erneut auf MBA für CFU ausplattiert.

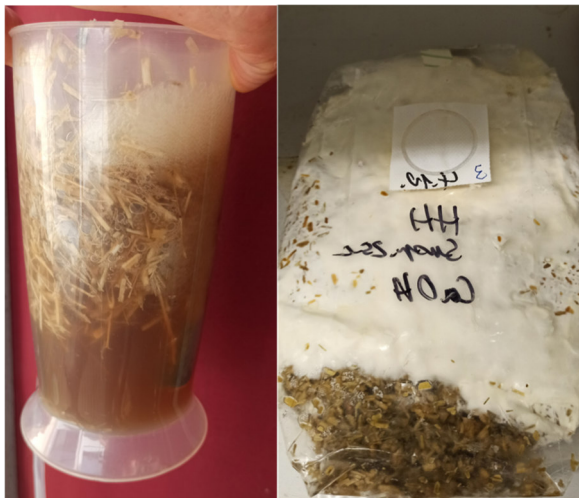


Abbildung 3 Versuchsaufbau zur Ozonbehandlung (links) und Kalkhydratbehandlung (rechts) von Substrat.

Ozon in der verwendeten Konzentration und Behandlungsdauer zeigte keine entkeimende Wirkung auf das Pilzsubstrat. Das Handling war schwierig und erforderte einen angepassten Aufbau. Vermutlich zerfällt das Ozon zu schnell an den zahlreichen Partikeloberflächen des Substrats, was eine effektive Entkeimung erschwert.

Für die neu entwickelte Pilzmatteherstellung sind feiner geschredderte Substrate entscheidend, um Verklebungen im Bandsystem vorzubeugen. Daher wurde besonders auf käuflich erwerbliche Einstreuprodukte wie Häckselmaterial, Rapsstroh, Leinstroh, Hanfeinstreu und Holzhobel mit definierter Zerkleinerung geachtet. Zusätzlich wurde zur Verbesserung des Abziehens der Pilzmyzelmatte vom Substrat eine Einbettung des Substrats in Agar getestet.

In Agar eingebettete Substrate ermöglichen die Kultivierung einer leicht abziehbaren Pilzmyzelmatte, jedoch mit eher schlechter Qualität. Hainbuchenhäcksel und gemahlenes Rapsstroh haben sich als die besten Substrate erwiesen.

Arbeitspaket 3: Teilautomatisierte Myzelmatteproduktion/Demonstrator Betrieb

Die Prototypenanlage zeigte bei der ersten Befüllung (Abbildung 4) eine Kontamination, was wahrscheinlich durch eine zu geringe Bedampfungszeit/Temperatur und/oder den anfälligen Einwurfmechanismus für Substrat verursacht wurde. Daraufhin wurde der Einfüllmechanismus und die Dampfsterilisation entsprechend angepasst.

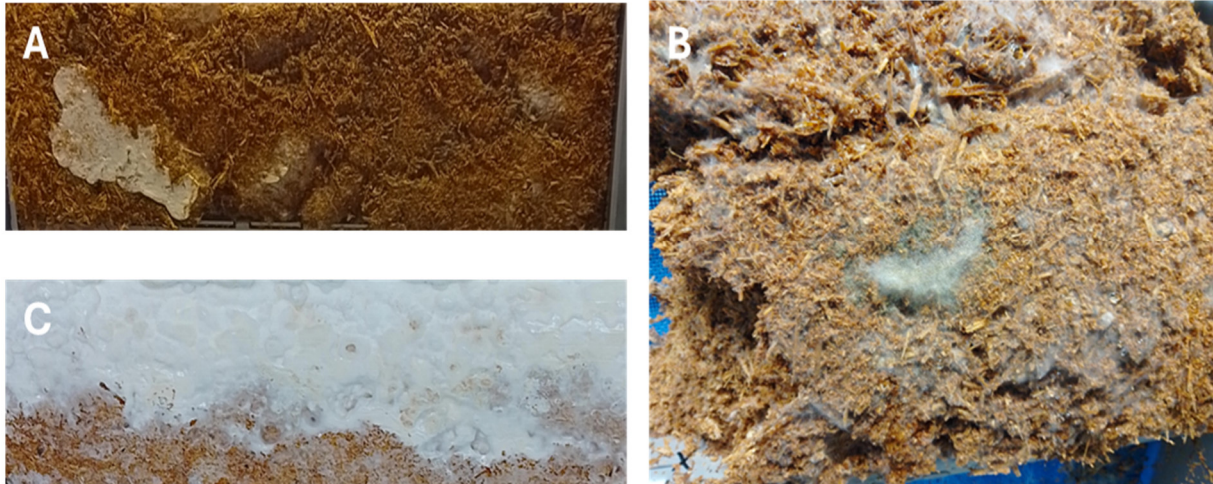


Abbildung 4 Substrat nach Befüllung des Prototypen nach mehrwöchigem Wachstum. A) Durch Kontamination gehemtes Wachstum. B) Schimmel auf Substrat. C) Durch durchwachsendes, nicht kontaminiertes Substrat.

Bei der Sterilisation mittels externen Dampferzeugers wurden nach erstmaligem Betrieb noch einige Schwachstellen (Abbildung 5) im System identifiziert und behoben. Auch konnte eine Bandschrumpfung festgestellt werden.

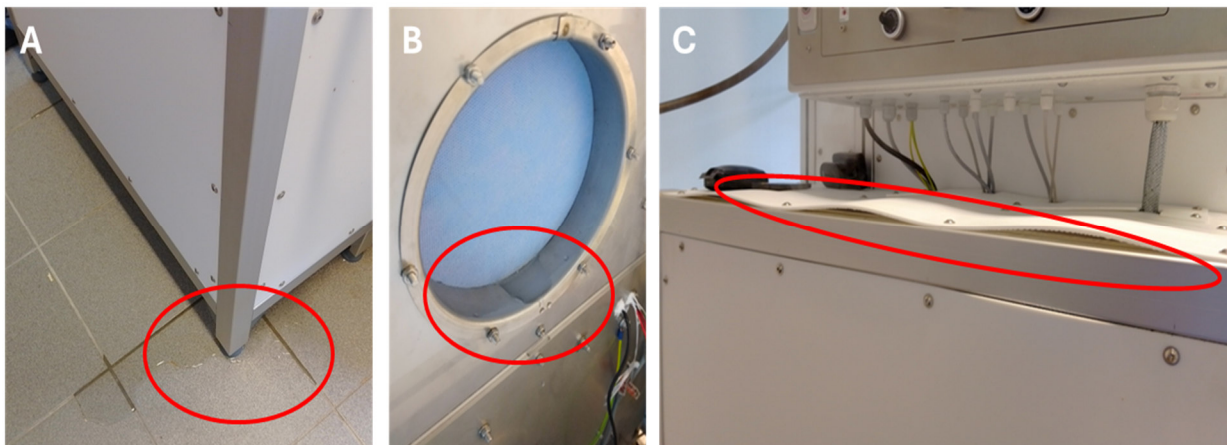


Abbildung 5 Identifizierte Dampfleckagen am Prototypen nach Erstbetrieb. A) Unteres Gehäuse. B) Luftauslässe. C) Oberes Gehäuse.

Der Prototyp konnte im Laufe des Projektes mehrmals kontaminationsfrei betrieben werden. Als problematisch stellte sich die Schrumpfung des Förderbandmaterials heraus, was zum vermehrten Ansammeln von Substrat im Innenraum der Anlage führte (Abbildung 6) und damit zu verminderter Myzelmattequalität. Daraufhin wurde ein neues Band für die Anlage konzipiert, welches im Projektzeitraum aber nicht mehr ausreichend getestet werden konnte.

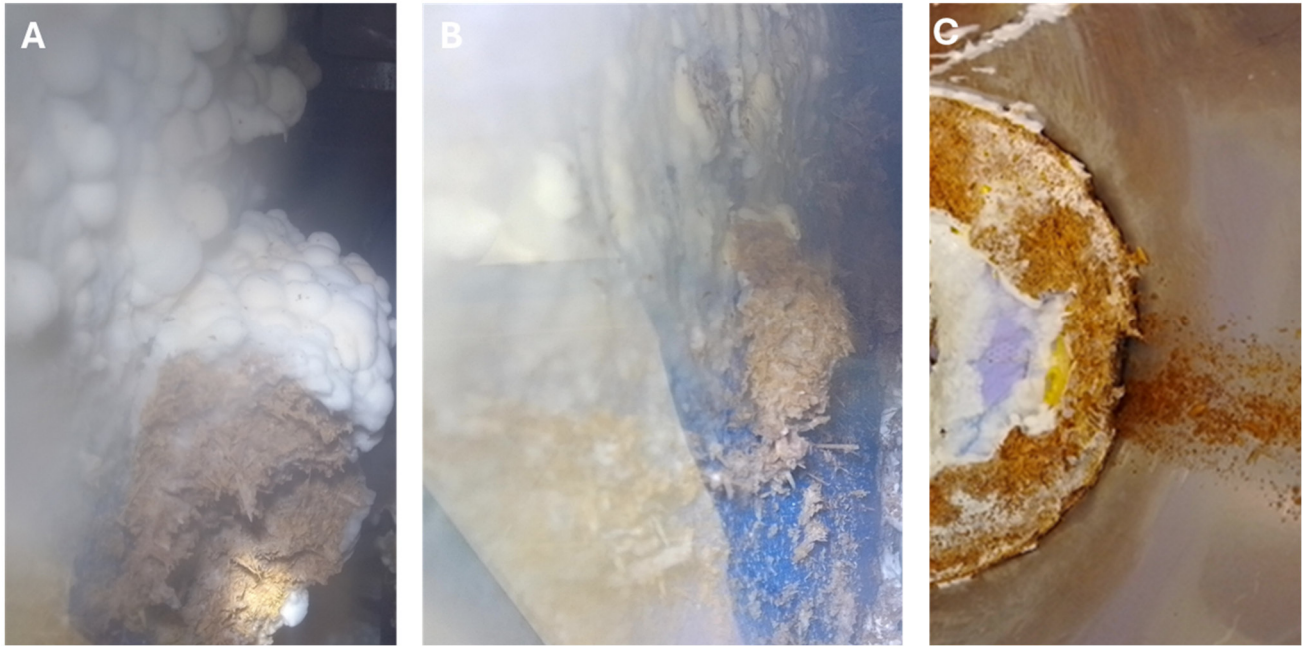


Abbildung 6 Unterschiedliche Materialansammlungen im Innenraum der Anlage (A, B, C).

Es lässt sich weiterhin festhalten, dass nach anfänglichen Herausforderungen ein kontaminationsfreier und kontinuierlicher Betrieb der Anlage wie angedacht stattgefunden hat. Es konnten im Rahmen des Projektes größere Myzelmatte (Abbildung 7) als in den bisherigen Boxansätzen hergestellt werden, auch wenn diese durch Substratverunreinigungen eine geringere Qualität hatten und sich nicht für anschließende Nachbearbeitungs Schritte durch eine Ledergerberei (Testlabor) eigneten.



Abbildung 7 Teile einer auf der Anlage produzierten Myzelmatte (mit ca. 1 m x 0,60m).

Die anfänglichen Probleme mit der Prototypenanlage, insbesondere die Kontamination während der ersten Befüllung, haben wertvolle Einsichten zur Verbesserung des Betriebs geliefert. Die

vorgenommenen Änderungen am Einfüllmechanismus sowie die Anpassungen in der Dampfsterilisation haben zu einer stabileren und effizienteren Funktion geführt.

Die wiederholte erfolgreiche Durchführung kontaminationsfreier Abläufe belegt, dass die Modifikationen Wirkung zeigen und die Zuverlässigkeit der Anlage gestiegen ist. Zudem wurden bei der ersten Betriebsphase Schwachstellen wie Dampfleckagen erkannt und behoben, was die Gesamtleistung des Systems verbessert.

Trotz der Herausforderungen durch die Schrumpfung des Förderbandmaterials, die zu einer Substratansammlung führte, konnten größere Myzelmaten produziert werden. Dies stellt einen bedeutenden Fortschritt im Vergleich zu herkömmlichen Verfahren dar, auch wenn die Qualität aufgrund von Substratverunreinigungen noch optimierungsbedürftig ist.

Abschließend lässt sich sagen, dass die Konzeptionierung, der Bau und der anschließende Betrieb des Prototyps zur Herstellung von Myzelmaten funktioniert hat, aber eine Fortsetzung des Projekts von mind. 4 Monaten (2 Personalmonate) als sinnvoll erachtet wird, um die identifizierten Probleme nachhaltig zu adressieren und die Qualität der Myzelprodukte signifikant zu steigern. Dabei wären folgende Maßnahmen zur Fortführung zu bearbeiten:

- Weiterentwicklung und Testlauf min. eines verbesserten Bands (keine Substratansammlungen)
- Erweiterte Tests des neuen Bandes (Gewährleistung einer hohen Myzelmatenqualität, Bestimmung optimaler Prozessparameter, Verbesserte Ernteprozedur und Reinigung)
- Weitere Verbesserung des Einfüllmechanismus

Durch die Optimierung des Bandsystems zur Verringerung der Schüttgutansammlung im Innenraum wird eine gleichmäßigere Entwicklung der Myzelmaten erreicht. Dies führt zu einer höheren Qualität des Endprodukts, das externen Firmen und Designern zur Verfügung gestellt werden kann.

Ein neuer Einwurfschacht reduziert das Risiko von Kontaminationen und erleichtert die manuelle Befüllung erheblich. Dies steigert die Effizienz des gesamten Prozesses und verbessert die Arbeitsbedingungen für die Mitarbeiter. Es reduziert den Arbeitsaufwand pro Befüllung.

Arbeitspaket 4: Materialnachbehandlung und Qualitätskontrolle für die Endproduktherstellung

Nach der ersten Anwendung erster manuell erstellter Proben wurden folgende Ergebnisse festgestellt: Das Material, das auf Myzel basiert, ist inert und reagiert nicht auf die üblichen Rückfettungsmittel, Farbstoffe und Weichmacher aus dem TFL-Sortiment. Es trocknet spröde und bleibt auch nach herkömmlichen Behandlungen unflexibel. Eine Gerbung und Vernetzung des Materials sind nicht möglich. Zudem ist die Oberflächenstruktur der Proben nicht einheitlich. Die physikalischen Eigenschaften wie die Reißfestigkeit bleiben sehr gering. Darüber hinaus weist das Material einen teilweise unangenehmen Geruch auf.

Während des Entwicklungsprozesses wurden verschiedene Anpassungen und Modifikationen vorgenommen, um das Material zu verbessern. Dazu gehörte die Verwendung von nassen weißen Spänen, um die physikalischen Eigenschaften zu optimieren. Zusätzlich wurden verschiedene Fasern wie Wolle und Baumwolle hinzugefügt, um sowohl die physikalischen Eigenschaften als auch die Oberflächenstruktur zu verbessern. Um die Weichheit und Flexibilität des Materials nach dem Trocknen zu erhöhen, wurden Öle, Wachse und Glycerin angewendet. Schließlich wurde das Material mit spezifischen Säurefarbstoffen gefärbt, um die gewünschte Farbgebung zu erreichen (Abbildung 8).



Abbildung 8 Anfängliche Pilzmaterialmuster vor (A), während (B) und nach der Behandlung (C) mit Additiven zur Materialverbesserung.

Im Laufe des Projekts konnten durch verschiedene Anpassungen und Modifikationen am Material Verbesserungen erzielt werden. Der erste Schritt der Behandlung besteht darin, die Muster mit Glycerin oder Silikonöl zu behandeln, um eine optimale Aufnahme der Produkte zu ermöglichen. Je länger dieser Schritt dauert, desto bessere Ergebnisse werden erzielt. Es findet praktisch keine Gerbung statt. Die Reißfestigkeit der Muster ist zwar ohne zusätzliche Fasern schlecht, jedoch zeigen Muster mit feinen Fasern eine deutlich verbesserte Robustheit im Vergleich zu denen ohne Fasern oder mit groben Fasern wie Hanf. Das beste Ergebnis wird erzielt, wenn Wollfasern verwendet werden. Eine Nachbehandlung mit hochwertigen Zurichtprodukten wie Roda Wax oder Roda Öl erhöht die Elastizität der Muster und verhindert, dass sie zu trocken und spröde werden. Die Muster können erfolgreich gefärbt werden, jedoch besteht hier noch Verbesserungspotential bei der Fixierung der Farbe. Trotz der erreichten Verbesserungen bleiben jedoch einige Herausforderungen bestehen, insbesondere in Bezug auf die Reißfestigkeit. Eine Erhöhung der Flexibilität und eine erfolgreiche Einfärbung des Materials konnten leichter erreicht werden. Es wurde jedoch festgestellt, dass eine Bearbeitung mittels vorgegebener, etablierter Industrieprozesse nur bedingt zielführend ist.

Zahlreiche manuell hergestellte Materialstücke wurden an TFL übergeben und chemisch sowie mechanisch bearbeitet, wobei Verfahren der Lederindustrie zum Einsatz kamen. Die 1:1-Verwendung der eingesetzten Mittel erwies sich als nicht möglich. Eine Hauptschwierigkeit bleibt die Reißfestigkeit des Materials, während die gewünschte Weichheit für konventionelles Leder erhalten bleiben muss. Der Einsatz natürlicher Fasern wie Hanf und Wolle konnte die Reißfestigkeit jedoch verbessern. Zudem sollte weiteres Material aus Prototypenproduktion getestet und evaluiert werden.

2. Verwertung

a) Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen

- Einreichung eines Schutzrechtsantrags auf ein Verfahren zur Produktion von Myzel-Materialien

b) Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten nach Projektende sind durch die erfolgreiche Prototypenentwicklung und Inbetriebnahme vielversprechend. Die steigende Nachfrage nach hochwertigen, nachhaltigen Myzelmatte n z.B. in der Mode- und Textilbranche lassen die Fähigkeit, größere Myzelmatte n mit dem neuen System zu produzieren als aussichtsreiches Konzept erkennen. Damit sollten die Kosten pro Einheit senken und die Wettbewerbsfähigkeit steigern werden. Optimierte

Prozesse und die Lösung von Kontaminationsproblemen werden die Betriebskosten reduzieren und die Gewinnmargen erhöhen. Zudem kann durch völlig neue Einflussnahme während des Herstellungsprozesses eine verbesserte Produktqualität die Kundenzufriedenheit steigern und langfristige Kundenbindungen fördern. Insgesamt sind die Aussichten positiv, vorausgesetzt, die identifizierten Herausforderungen werden erfolgreich adressiert.

c) Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende

Die zum Patent eingereichte Anlage selbst, sowie die Anpassungen der Prototypenanlage, insbesondere der optimierte Einfüllmechanismus und die verbesserte Dampfsterilisation, stellen bereits jetzt technologische Fortschritte dar. Durch weitere Verbesserungen im Bereich der Sterilisation, aber auch der Steuerung/Sensorik, Wiederverwendung von Substraten, insitu-manipulation (Aufbringen von Funktionalitäten während des Wachstums etc.) und Vereinfachung des Ernteprozesses können die Betriebskosten weiter gesenkt und die Effizienz erhöht werden. Die gewonnenen Erkenntnisse über Kontaminationsquellen und Materialverhalten erweitern das wissenschaftliche Verständnis in diesem Bereich. Zudem zeigt die Produktion größerer Myzelmaten mit dem einhergehenden Sammeln von Betriebsdaten das Potenzial für qualitativ hochwertige Ergebnisse zur Modellentwicklung zur weiteren Automatisierung und eröffnet neue Anwendungsmöglichkeiten in der Industrie. Insgesamt legen die Entwicklungen die Basis für zukünftige Innovationen und Forschungsprojekte.

d) Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Die wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit nach Projektende ist hoch und konnte durch die Anmeldung eines Patentes verfestigt werden. Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse über Kontaminationsquellen und die Optimierung der Dampfsterilisation, sowie des Banddesigns des neuen Anbaukonzeptes bieten eine solide Grundlage für zukünftige Forschungsprojekte, die auch in Bereichen wie Speisepilzproduktion, Schaumstoffherstellung und in der Entwicklung von Konstruktionsmaterialien, wie beispielsweise Isolierungen Anwendung finden können. Die effiziente Produktion qualitativ hochwertiger Myzelmaten positioniert das Projekt gut im Markt und wird bei stringenter Weiterführung zu Kooperationen mit Unternehmen in diesen Branchen führen. Insgesamt eröffnet das Projekt vielfältige Möglichkeiten für weitere wissenschaftliche und wirtschaftliche Entwicklungen mittels öffentlich und privat geförderter Weiterentwicklung durch den einzigartigen Herstellungsprozess.

3. Erkenntnisse von Dritten

- keine projektrelevanten weiterführenden Erkenntnisse Dritter

4. Veröffentlichungen

Es wurde ein Patent zur neuartigen Pilzmattenproduktion eingereicht.

ANHANG

Teilvorhaben 1: Anlagenkonzeptionierung/-Bau

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Für eine sich anschließende Konzeptionierung eines Demonstrators basierend auf einem vorhandenen OribiLoop®-System ist eine Beschreibung der produktionsrelevanten Parameter und ihrer Wechselwirkungen nötig. Darauf aufbauend erfolgt eine methodenbasierte Ermittlung eines Anlagenkonzeptes.

2. Bearbeitete Arbeitspakete

Arbeitspaket 1: Anlagenkonzeptionierung/-Bau

3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

- Erstelltes Konzept, sowie dessen physische Realisierung in einer kleinen Anlage und dem Einreichen einer schutzrechtlichen Absicherung

Teilvorhaben 2: Aufbereitung von Pilzsubstraten und Vorkultivierung zur Anlagenanwendung

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Um später einen kontinuierlichen Betrieb zu gewährleisten, werden Aufarbeitungs- und Sterilisationstechniken für lose Substrate (Schüttgut) etabliert. Dies soll ein Betrieb der Anlage mit möglichst vielen Reststoffen ermöglichen und gleichzeitig die Rentabilität erhöhen

2. Bearbeitete Arbeitspakete

Arbeitspaket 2: Aufbereitung von Pilzsubstraten und Vorkultivierung zur Anlagenanwendung

3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Substrattests:

- Autoklaviertes Substrat wurde mit Pilzkörnerbrut inkubiert, gefolgt von einer 13-tägigen Inkubation bei 25°C.
- Rapsstroh erwies sich als das beste Substrat für homogene Myzelmatte (ca. 10 mm dick) mit einer Zugfestigkeit von 10 N.
- Kombination von Hackschnitzeln mit Rapsstroh zeigte die höchste Druckbelastbarkeit (73 N auf 15 mm Fläche).
- Reishi-Myzelmatte waren qualitativ schlechter, jedoch wiesen sie eine höhere Druckbelastbarkeit auf (bis zu 150 N) als Zunderschwamm.

Substratauswahl:

- Feiner geschredderte Substrate sind entscheidend, um Verklümmungen im Anlagenbetrieb zu vermeiden.
- Hainbuchenhäcksel und gemahlenes Rapsstroh haben sich als die besten Substrate für die Myzelmatteherstellung herausgestellt.

Pasteurisation:

- Pasteurisation erwies sich als effektive Methode zur Keimreduktion.
- Inokulierung mit Weizenkörnerbrut führte zu besserem und schnellerem Substratwachstum im Vergleich zu Flüssigpilzkulturen.

Basische Entkeimung:

- Kaltpasteurisiertes Hanfstroh erzielte nach 12 Tagen eine nahezu vollständige kontaminationsfreie Pilzmyzeldurchwachsung während Raps- und Leinenstroh nur punktuell (5-10%) Zunderschwammwachstum zeigten
- Die basische Entkeimung von Hanfstroh ermöglicht eine sehr kostengünstige (ca 0,20€ /100L Substrat) Entkeimung zur kontaminationsfreien Zunderschwamm-Pilzmatteproduktion

Ozonbehandlung:

- Ozon zeigte in der getesteten Konzentration keine entkeimende Wirkung auf das Pilzsubstrat.
- Schwierigkeiten im Handling und schneller Zerfall des Ozons an Partikeloberflächen erschwerten eine effektive Entkeimung.

Teilvorhaben 3: Teilautomatisierte Myzelmattenproduktion/Demonstrator Betrieb

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Der sich aus AP1 und AP2 ergebende Demonstrator bzw. dessen Betrieb wurde in **AP3** evaluiert und optimiert, um eine kontinuierliche Produktion von Pilzmatten in einem teilautomatisierten Betrieb zu gewährleisten.

2. Bearbeitete Arbeitspakete

Arbeitspaket 3: Teilautomatisierte Myzelmattenproduktion/Demonstrator Betrieb

Im AP3 erfolgt ein Betrieb der Demonstrator-Anlage und deren Evaluierung. Es gilt die bisherige flächige Produktion der Myzelmatten in Boxen ohne Qualitätsverlust auf die kompakte Anlage zu übertragen. Es werden dabei erprobte saprophytische Baumpilzarten wie etwa *Gandoderma*, *Fomes* oder *Trametes* verwendet und deren Wachstum „out of the box“ beurteilt. Als Nahrungsquelle kommen verschiedene holzige oder holzartige aufgearbeitete Substrate in Betracht (siehe AP2). Dazu werden unterschiedliche Baumpilzarten im etablierten Box-Prozess und in der Anlage kultiviert und nach Beurteilung der Pilzmattenqualität für die nächsten Schritte ausgewählt. Anforderungen sind hierbei u.a. ausreichende Nährstoffversorgung für den ausgewählten Pilzstamm, Eignung für die Anwendung/Halt auf ein teilweise vertikales Fördersystem, einfache Verfügbarkeit, Kontaminationsfreies Betreiben und die Beimpfbarkeit mit verschiedend dargebotenen Starterkulturen.

Ziel ist es, unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus AP2, eine praktikable Methode zum Anfahren und Betrieb der Wachstumseinrichtung zu etablieren, um keimfreie/-arme Bedingungen zu gewährleisten und letztlich die Produktion zu optimieren. Der Prozess setzt sich zusammen aus dem Eintrag bewachsener Substrate, der Kultivierung unter geeigneten Wachstumsbedingungen und dem Ernten des Pilzmyzelmaterials zur weiteren Verarbeitung zu Lederalternativen.

Hierzu müssen die Parameter ein optimales, gleichmäßiges Dickenwachstum des Myzels in gewünschter Stabilität ermöglichen, ohne die Qualität des Myzels z.B. durch Wasseransammlungen, Kontaminationen mit konkurrierenden Schimmelpilzen etc. herabzusetzen.

3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

- Als geeignete Substrat hat sich ein Rapsstroh-Sägespäne-mix erwiesen.
- Die besten Myzelmatten wurden mittels der Pilzkultur *Fomes Fomentarius* (Zunderschwamm) erzielt.
- Eine Anlage zur halbautomatischen Produktion wurde konzeptioniert, gebaut und erfolgreich
 - betrieben; es sind jedoch noch Verbesserungen an der Anlage (namentlich am Befüllungssystem und am Bandsystem) nötig um eine hohe Qualität der Myzelmatten zu gewährleisten.
- Myzelmatten konnten auf der Anlage produziert werden, wenn auch durch Substartansammlungen in niedrigerer Qualität.
- Ein weiterer Betrieb der Anlage zur Verbesserung der Produktion um 4 Monate (2 Personalmonate) erscheint sehr sinnvoll.

Teilvorhaben 4: Materialnachbehandlung und Qualitätskontrolle für die Endproduktherstellung

4. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Nachbehandlung (Vernetzung) und Qualitätskontrolle der Pilzmyzelmatte.

5. Bearbeitete Arbeitspakete

Arbeitspaket 4: Materialnachbehandlung und Qualitätskontrolle für die Endproduktherstellung

Der Projektpartner „TFL Ledertechnik AG“ hat als Zulieferer für die Gerberindustrie Erfahrung in der Aufwertung von Naturmaterialien. Pilzmyzel ist, wie Tierhäute, ein Naturprodukt und unterliegt gewissen Schwankungen und besitzt Eigenschaften, die es zu verstärken bzw. abzuschwächen gilt.

In diesem Arbeitspaket erfolgt die Entwicklung einer Strategie zur „chemischen“ bzw. technischen Nachbearbeitung der Pilzmaterialien, um unterschiedliche Produktprototypen in geforderter Qualität, unter Berücksichtigung des Nachhaltigkeitsaspektes, kostengünstig herstellen zu können. Zudem soll eine Erweiterung der Materialfunktionalitäten und Qualität durch gezielte molekulare Modifikationen und technische Arbeitsschritte erreicht werden. Anforderungen sind hierbei eine Vielfalt von Spezifikationen, die als Gebrauchskriterien für eine erfolgreiche Vermarktung essentiell sind: die mikrobielle Beständigkeit, mechanisch/technische Funktionen wie die Flexibilität/Weichheit, die Erhöhung der Reiß- und Knickfestigkeit, Stichfestigkeit und Wasserbeständigkeit, das Einstellen gewünschter Haptik, Gerüche, Farbeindrücke und natürlich einer robusten Oberflächenbeschaffung (Kratzfestigkeit, Antischmutzverhalten, Reinigbarkeit, Flexibilität, etc.) wie sie für mind. Wildleder zu erwarten wären.

Zudem wird über den Erkenntnisgewinn in diesem AP die Weiterentwicklung der Materialqualität durch chemische Modifikation und Integration von Nachbehandlungs-Prozessen (Vernetzungsschritten) der Lederindustrie in den Herstellungs-/Wachstumsprozess angestrebt, um eine Nachbehandlung des Materials nach der Ernte möglichst zu minimieren. Die Charakterisierung der neuen Pilzmaterialien erfolgt hier nach gängigen industriellen Tests zur Ermittlung der Vergleichbarkeit mit verfügbaren Materialien; hierzu zählen folgende Tests: Veslik Perspiration, Martindale (Antischmutz), Taber, Gakushin und Wyzenbeek (Kratzfestigkeit), Maeser Cycles und Bally Penetrometer (Trocken und Feucht-Knickungen), Wasserdampfdurchlässigkeit, Elastizität und Reißfestigkeit nach entsprechenden DIN-Vorschriften.

Qualitätsbeurteilungen durch die weiterverarbeitenden Firmen werden auf die Produktion der Pilzmatte rückgekoppelt und durch Anpassung des Kultivierungsprozesses entsprechend modifiziert.

6. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Verbesserungen am Material

- Anpassungen und Modifikationen führten zu Verbesserungen im Projekt.
- Erste Behandlung mit Glycerin oder Silikonöl für optimale Produktaufnahme; längere Behandlungsdauer verbessert Ergebnisse.

Reißfestigkeit

- Reißfestigkeit ohne zusätzliche Fasern schlecht; feine Fasern zeigen verbesserte Robustheit.
- Beste Ergebnisse mit Wolffasern erzielt.
- Natürliche Fasern wie Hanf und Wolle verbessern Reißfestigkeit.

Elastizität und Färbung

- Nachbehandlung mit Roda Wax oder Roda Öl erhöht Elastizität und verhindert Trockenheit.
- Erfolgreiche Färbung der Muster, jedoch Verbesserungspotential bei Farbfixierung.
- Erhöhung von Flexibilität und erfolgreicher Einfärbung leichter erreichbar.

Herausforderungen

- Hauptschwierigkeit bleibt die Reißfestigkeit des Materials.
- Weichheit für konventionelles Leder muss erhalten bleiben.
- Etablierte Industrieprozesse erweisen sich als nur bedingt zielführend.

Weitere Tests

- 1:1-Verwendung der eingesetzten Mittel nicht möglich.
- Weiteres Material von der Anlage sollte getestet und evaluiert werden.