

Baustoffe aus Pilzmyzel

Ein baubiologischer Traum?



**Projektarbeit zur eidgenössischen
Berufsprüfung Baubiologie**

Typ der Arbeit: Facharbeit
Experten: Daniel Miesch, André Schär

Verfasserin: Claudia Urbani
Ort und Datum: Basel, 17. November 2023

Inhaltsverzeichnis

1. Persönliche Vorstellung	4
2. Vorwort	4
3. Einleitung	5
3.1 Ausgangslage	5
3.2 Ziel und Methode	5
4. Myzelgebundene Werkstoffe: Eine Einführung	7
4.1 Wozu Pilzmyzel?	7
4.2 Wie genau werden myzelgebundene Werkstoffe hergestellt?	8
4.3 Allgemeine Eigenschaften von myzelgebundenen Werkstoffen	10
5. Myzelgebundene Baumaterialien: Anwendungen, Produkte und Projekte	12
5.1 Myzelgebundene Werkstoffe im Baubereich	12
5.2 Projekte mit myzelgebundenen Werkstoffen	15
5.2.1 HyFi Tower	15
5.2.2 MycoTree	16
5.2.3 The Growing Pavilion	17
5.2.4 El Monolito Micelio	18
5.2.5 «Natur. Und wir?», Stapferhaus Lenzburg	19
6. Myzelgebundene Dämmstoffe: Eine baubiologische Analyse	20
6.1 Die Ausgangslage der Analyse	20
6.2 Baubiologischer Themenbereich «Ökologische Verantwortung»	20
6.2.1 Rohstoffe	21
6.2.2 Kreislauffähigkeit	22
6.2.3 Energieaufwand	23
6.2.4 Transportwege	24
6.2.5 CO ₂ und weitere Emissionen	25
6.2.6 Themenbereich Ökologische Verantwortung: Zusammenfassung und Fazit	26
6.3 Baubiologischer Themenbereich «Individuelles Wohlbefinden»	27
6.3.1 Thermischer Komfort	27
6.3.2 Brandverhalten	28
6.3.4 Luftqualität	29
6.3.5 Themenbereich Individuelles Wohlbefinden: Zusammenfassung und Fazit	30
6.4 Baubiologischer Themenbereiche «Soziale Gerechtigkeit und wirtschaftliche Entwicklung»	31
6.5 Zusammenfassung Analyse	33
7. Fazit und Ausblick	33
8. Fachliches Fazit	34
9. Quellenverzeichnis	35
9. Abbildungsverzeichnis	38
10. Anhang	40
11. Urhebererklärung	46

1. Persönliche Vorstellung

2016 habe ich an der Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW Basel in Zweitausbildung das Studium der Innenarchitektur mit Vertiefung in Szenografie abgeschlossen. Danach arbeitete ich vier Jahre bei der Firma Netwerch AG in Windisch, bei welcher ich während des Studiums bereits ein einjähriges Praktikum absolviert hatte. Netwerch arbeitet in einem breiten Tätigkeitsfeld, das grundlegend die Disziplinen Architektur, Ausstellungsgestaltung und Design umfasst. Ich habe zu gleichen Teilen in den Bereichen Architektur und Ausstellungsgestaltung gearbeitet und war abhängig vom jeweiligen Projekt in verschiedenste Projektabschnitte involviert. Nach der Geburt meines zweiten Kindes Ende 2021 entschied ich mich, dass es an der Zeit für eine Neuorientierung war und kündigte mein bestehendes Arbeitsverhältnis.

In meinem privaten Leben spielt Nachhaltigkeit eine grosse Rolle und für mich wurde es zunehmend unbefriedigend, dies nicht auch in meinem beruflichen Tun als zentrales Thema zu haben. Da ich sehr wenig über Nachhaltigkeit am Bau wusste, entschied ich mich, anstatt einen neuen, hoffentlich nachhaltiger orientierten Arbeitgeber zu suchen, erst die Ausbildung zur Baubiologin zu absolvieren. Mein Ziel ist es, im Frühjahr 2024, nach Vollendung dieses Lehrgangs mit dem neu gewonnenen Wissen wieder in den Arbeitsmarkt einzusteigen.

2. Vorwort

Es war ein guter Freund, der mir das erste Mal von Baumaterialien aus Pilzmyzel erzählte. Er kultiviert Speisepilze in seinem Garten und stiess in einem Buch über Pilze auf das Thema. Ich hatte damals schon die Ausbildung zur Baubiologin begonnen und war sofort fasziniert. Was er mir kurz gefasst bei einem Kaffee darüber erzählte, wozu Pilze fähig sind und zu welchen Problemlösungen man sie einsetzen könnte, klang für mich wie ein Traum.

Einerseits war es dieses unglaubliche Nachhaltigkeitsversprechen von einem selbstwachsenden Baumaterial, welches mein Interesse weckte. Andererseits war aber auch sofort meine Neugierde aus Designsicht geweckt: In der Szenografie wie auch in der Architektur oder Innenarchitektur ist man stets auf der Suche nach neuen Materialien und alternativen Materialkombinationen. Vor allem im Innenausbau und bei Ausstellungen gilt es dabei meist nicht nur technische Eigenschaften eines Materials zu berücksichtigen, sondern auch Ästhetik, narratives Potenzial und wie kreativ mit dem Material umgegangen werden kann. Hinsichtlich des Ziels, nachhaltiger zu entwerfen und zu planen, ist es dabei von höchster Dringlichkeit, sich als Gestalter ein neues, nachhaltigeres Materialrepertoire zu erarbeiten. Dazu gehört auch, immer Mal wieder einen Blick in die Zukunft zu werfen und im Hinterkopf zu behalten, was sich in der Materialforschung und -entwicklung gerade tut. Wer weiss, wann sich eine Gelegenheit für eine Kollaboration oder ein Pilotprojekt ergibt.

3. Einleitung

3.1 Ausgangslage

Der erste myzelgebundene Werkstoff wurde 2007 als Erfindung beim Amerikanischen Patentamt angemeldet^{4,21}. Seither gingen laut einer 2021 erstellten Studie⁴ weltweit über 150 weitere Patentanträge ein. Davon wurden für 67 verschiedene myzelbezogene Technologien und Produkte Patente vergeben. Die grössten Anteile an myzelbezogenen Patentdokumenten haben die USA, Deutschland, Belgien, Italien, Österreich, Holland, Australien und China. Auch die wissenschaftliche Forschung setzt sich intensiv mit dem Thema auseinander. Dieselbe Studie erfasste 92 publizierte Forschungsberichte zu myzelgebundenen Werkstoffen, wobei die meisten davon aus den Forschungsbereichen Materialwissenschaft und Ingenieurwesen kommen.

Um die möglichen Anwendungsbereiche des Materials zu erweitern, liegt der mehrheitliche Fokus der Forschung auf der Frage, wie die konstruktiven Eigenschaften des Materials bewusst gestaltet bzw. verbessert werden können^{4,14}. Die bisherigen Anwendungsbereiche umfassen neben dem in dieser Arbeit behandelten Baubereich auch den Verpackungsbereich (Ersatz von Styropor), den Lebensmittelbereich (vegane Ersatzprodukte), den Textilbereich (veganes Leder) sowie den Bereich Kunst und Design.

Die Eigenschaften eines myzelgebundenen Werkstoffes werden anhand vier Parameter bestimmt: 1) Pilzspezies, 2) Substratart oder Substratmischung, 3) Beeinflussung des Myzelwachstums, 4) Beimischen von Zuschlagstoffen.^{13,14,22,19} Daraus ergibt sich eine immense Anzahl an Kombinationsmöglichkeiten und ein dementsprechend grosses Forschungsfeld. Obwohl bereits Myzel-Produkte auf dem Markt sind, handelt es sich bei einem grossen Teil der Forschung in diesem Bereich immer noch um Grundlagenforschung³⁰. Während myzelgebundene Werkstoffe beispielsweise in der Verpackungsindustrie schon zum Einsatz kommen²⁶, finden sie im Baubereich bisher noch kaum Anwendung. In Europa bieten erst zwei Unternehmen myzelgebundene Baumaterialien zum Verkauf an: Grown.Bio in Holland und Mogu in Italien. Auf Grund fehlender Zertifikate sind die Produkte von Grown.Bio allerdings nicht für den professionellen Markt zugelassen.

3.2 Ziel und Methode

Als potenzielle Baumaterialien werden myzelgebundene Werkstoffe hauptsächlich aus vier Gründen erforscht: 1) Sie haben von Natur aus gute Dämmeigenschaften, 2) zu ihrer Herstellung können Reststoffe aus der Agrar-, Holz-, oder Textilindustrie verwendet werden, 3) sie sind biologisch abbaubar, 4) ihre Eigenschaften sind variabel. In einer Branche, welche zwei Drittel des gesamten CO₂-Ausstosses⁷ sowie grosse Mengen an Abfall verursacht, ist es von grösster Wichtigkeit, auf ökologischere Materialien umzusteigen. Während ein Teil davon durch altbewährte, wieder entdeckte Materialien wie Holz, Lehm, Stroh etc. abgedeckt werden kann, braucht es auch neue Materialien um dem steigenden Bedarf gerecht zu werden. In vielen Medienberichten werden Materialien aus Pilzmyzel als die Baustoffe der Zukunft angepriesen und auch die meisten Forschungsberichte sind sich einig darüber, dass in Myzel-Materialien ein grosses Potenzial steckt. Diese Einschätzungen basieren auf den variablen Materialeigenschaften sowie ihrem verhältnismässig einfachen und energiearmen Herstellungsprozess, in welchem Reststoffe verwertet und somit CO₂ und weitere Umweltbelastungen eingespart werden können. Die ökologischen Aspekte werden dabei mehrheitlich sehr allgemein formuliert, ohne Angaben von Zahlen, und umfassen oft nur einen oder zwei Aspekte, welche zur Umweltbelastung beitragen bzw. diese reduzieren können.

Ziel dieser Arbeit ist es, mehr als nur allgemeine Einschätzungen zu der Frage «Wie ökologisch sind Materialien aus Pilzmyzel?» zu bieten. Darüber hinaus wird der Betrachtungswinkel von ökologisch auf baubiologisch erweitert. Denn für eine globale Entwicklung hin zu mehr Nachhaltigkeit – egal in welchem Bereich – müssen wir mehr als nur die ökologische Verantwortung übernehmen. Die Baubiologie mit ihren vier Themenbereichen 1) Ökologische Verantwortung, 2) Soziale Gerechtigkeit, 3) Wirtschaftliche Entwicklung und 4) Individuelles Wohlbefinden liefert dafür ein geeignetes Analyse-, Betrachtungs- und Denkmodell. In dieser Arbeit wird deshalb für alle diese Bereiche untersucht, welche Qualitäten oder Anforderungen myzelgebundene Werkstoffe erfüllen können. Ziel davon ist es, ein möglichst umfassendes und möglichst detailliertes baubiologisches Bild dieses neuartigen Materials zu erstellen.

Methodisch liegt dieser Arbeit eine Literaturrecherche zu Grunde. Als Quellen für Informationen über Myzel-Materialien dienen hauptsächlich frei zugängliche wissenschaftliche Artikel aus verschiedenen Datenbanken, vereinzelt werden auch Artikel aus verschiedenen Online-Medien als Quellen benutzt. Für Angaben zu spezifischen Myzel-Produkten dient die Webseite des jeweiligen Herstellers als Grundlage. Zusätzliche Informationen für Vergleiche mit anderen Produkten stammen grösstenteils aus dem Internet. Der ursprüngliche Plan, die Literaturrecherche mit mindestens einem Interview zu ergänzen, konnte trotz mehreren, zum Teil wiederholten Anfragen an verschiedene Unternehmen, nicht umgesetzt werden. Gründe für die Absagen waren unter anderem knappe zeitliche Ressourcen, zu viele Anfragen, momentane Fokusverschiebung von Bau- auf Verpackungsmaterialien oder gänzliche Änderung der Firmenstrategie von der Forschung zur Beratung. Dafür fand mit der holländischen Firma Grown.Bio sowie mit der italienischen Firma Mogu ein Email-Austausch statt. Letztere lieferte auf Anfrage viele wertvolle Zusatzinformationen, welche auf der Webseite oder in den Produktdatenblätter nicht enthalten sind.

Diese Arbeit richtet sich nicht ausschliesslich an Fachpersonen aus dem Baubereich, sondern an alle Interessierten. Die durch die Baubranche verursachte Umweltbelastung betrifft alle und für eine erfolgreiche Bauwende braucht es gleichermassen Fachkräfte wie auch Laien, welche Gegebenheiten kritisch hinterfragen und den Mut haben, neue Wege zu gehen. Um über Myzel-Materialien reden zu können ist es wichtig zu verstehen, wie sie funktionieren und wie genau ihr Herstellungsprozess aussieht. Dies zu veranschaulichen ist Ziel des ersten Teils dieser Arbeit. Daran anschliessend folgt im zweiten Teil eine kurze Auslegeordnung der Anwendungen, an denen entweder momentan geforscht wird oder welche bereits in Projekten getestet wurden. Ebenfalls wird kurz zusammengefasst, welche Produkte bereits auf dem Markt sind. Aufbauend auf den ersten beiden Teilen widmet sich der dritte und ausführlichste Teil dieser Arbeit der Betrachtung von Myzel-Materialien anhand verschiedener baubiologischer Kriterien.

4. Myzelgebundene Werkstoffe: Eine Einführung

Angefangen beim Pilzmyzel klärt und erklärt der erste Teil dieser Arbeit Schritt für Schritt, was myzelgebundene Werkstoffe sind, wie sie hergestellt werden und welche Eigenschaften sie mit sich bringen. Der Fokus liegt dabei noch nicht explizit auf Baumaterialien: Alle Ausführungen treffen zwar auf Baustoffe aus Pilzmyzel zu, gelten aber auch für alle anderen myzelgebundenen Werkstoffe. Das Verständnis, wie Myzelkomposite funktionieren, wie ihr Herstellungsprozess genau aussieht und welche Vor- und Nachteile sie mit sich bringen dient als Grundlage zur Analyse im dritten Teil der Arbeit.

4.1 Wozu Pilzmyzel?

Was wir im alltäglichen Sprachgebrauch als «Pilz» bezeichnen ist eigentlich nur der Fruchtkörper einer viel grösseren Struktur: Vergleichbar mit einem Apfel, welcher auch nur die Frucht des Apfelbaumes ist. Der eigentliche Organismus Pilz besteht aus einem meist unsichtbaren und oft unterirdischen, wurzelähnlichen Geflecht, dem Myzel. Dieses Myzel wiederum besteht aus unzähligen röhrenartigen Zellen, den sogenannten Hyphen, welche ein komplexes, dreidimensionales, enorm kleines und für das menschliche Auge unsichtbares Netzwerk bilden. Die Hyphen haben eine feste Zellwand aus Chitin und dienen dem Transport von Nährstoffen und Wasser im Pilzorganismus. Im Vergleich zu Pflanzen ist das Myzel meist sehr schnell wachsend und kann je nach Art des Pilzes unterschiedliche Formen und Grössen annehmen. Myzel gedeiht in kompletter Dunkelheit und braucht zum Wachsen lediglich eine Nährstoffquelle, Sauerstoff und Feuchtigkeit.

^{3,38}

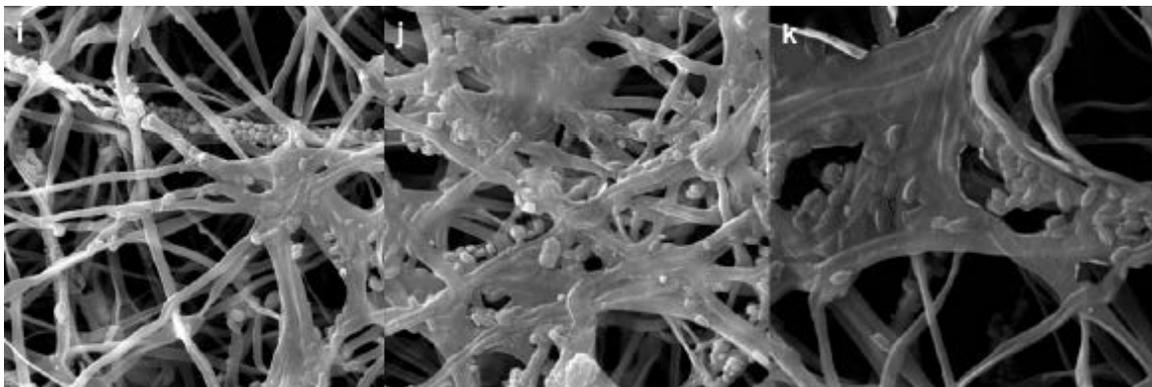


Abb. 1: Mikroskopische Aufnahme eines Pilzmyzels

Die natürliche Aufgabe von Pilzmyzel ist es, organische Bestandteile wie Hölzer, Blätter oder Gräser abzubauen um die für das Wachstum der Hyphen nötigen Nährstoffe zu gewinnen.

Die netzwerkartige Struktur ihres Myzels sowie diese Fähigkeit, verschiedenste organische Materialien zu zersetzen, ermöglicht es, Pilze zur Herstellung von Verbundwerkstoffen zu nutzen.

Ein Verbund- oder Kompositwerkstoff besteht aus mindestens zwei Einzelstoffen: Einem Bindestoff, auch Matrixstoff genannt, sowie einem Verstärkungsstoff. Diese Einzelstoffe gehören unterschiedlichen Werkstoffgruppen an, durch deren Kombination die Eigenschaften beider Verbundpartner in das neue Material integriert werden können.^{9,14,32}

Bei myzelgebundenen Werkstoffen übernimmt das Pilzmyzel die Aufgabe des Bindestoffes. Als Verstärkungsstoff dient ein organisches Substrat, welches aus Reststoffen der Agrar-, Textil-,

oder Holzindustrie wie z.B. Hanffasern, Baumwollfasern, Getreidehülsen, Holzspänen, oder ähnlichem bestehen kann. Wird ein solches Substrat mit Myzel gemischt, erfolgt eine teilweise Zersetzung wobei das Myzel die für die Bildung neuer Hyphen nötigen Substanzen gewinnt. Der restliche und grössere Teil des Substrates wird vom wachsenden Myzel in relativ kurzer Zeit um- und durchwachsen, wobei ein weiches, schwammartiges Verbundmaterial entsteht. Um das Material zu härten sowie den Pilz daran zu hindern, einen Fruchtkörper zu bilden, wird dem Myzel entweder durch natürliche Trocknung oder thermische Behandlung das Wasser entzogen. Diese Denaturierung führt zum Absterben des Pilzorganismus, wodurch das Myzel und somit der entstandene Verbundwerkstoff hart wird. ^{14,13,19,22,28}



Abb. 2: Myzeldurchzogene Substrate nach der Trocknung

4.2 Wie genau werden myzelgebundene Werkstoffe hergestellt?

Die industrielle Herstellung von myzelgebundenen Werkstoffen erfolgt in der Regel anhand der in Tab.1 dargestellten sieben Arbeitsschritten. Diese können je nach Hersteller leicht variieren und abhängig von den Anforderungen an das Material durch weitere Arbeitsschritte ergänzt werden. Als Substrate können sortenreine organische Bestandteile, also beispielsweise nur Holzspäne, oder Mischungen von zwei oder mehreren verschiedenen Stoffen, beispielsweise Hanf- und Baumwollfasern, verwendet werden. Die Wachstums- oder Bebrütungsphase kann wenige Tage bis zu mehreren Wochen dauern, abhängig von der Pilzart, dem verwendeten Substrat, den Bebrütungsbedingungen sowie dem gewünschten Verbindungsgrad zwischen Myzel und Substrat.

^{10,13,21}

1	Einweichen des Substrates	Da jeder Pilz Feuchtigkeit braucht zum Wachsen, wird das Substrat vorgängig eingeweicht und so eine optimale Durchfeuchtung des Substrats gewährleistet.
2	Homogenisieren des Substrates	Das eingeweichte Substrat wird gleichmässig zerkleinert. Dies ermöglicht später ein gleichmässiges Wachstum des Myzels und somit einen guten Zusammenhalt des Kompositmaterials. Dem entsprechend verhindert eine homogene Substratmasse auch mögliche Schwachstellen bei einer mechanischen Beanspruchung des Materials.
3	Sterilisation des Substrats	Um das Wachstum unerwünschter Pilze und weiteren Mikroorganismen zu verhindern, wird das Substrat sterilisiert. Dies erfolgt in der Regel mittels Dampfsterilisation (bei 115°C während 15 Min.), um das erneute Austrocknen des Substrats zu verhindern.
4	Beimpfen des Substrates	Das Substrat wird mit 10-35 Gew.-% Pilzelementen beimpft. Pilzelemente können Sporen in einer flüssigen Lösung sowie Gewebe von Hyphen oder Fruchtkörpern sein.
5	Giessen des Substrates	A. Das beimpfte Substrat wird direkt in Negativformen eingefüllt. B. Oder das beimpfte Substrat wird für den ersten Wachstumsschritt in Plastiksäcke abgefüllt. Der nach ein paar Tagen entstandene weiche Klumpen Myzelkompositmaterial wird wieder zerkleinert und erst dann zur finalen Verdichtung in die Negativformen gegeben.
6	Wachstum/Bebrütung	Die Lagerung des Gemisches bzw. das Wachstum des Myzels kann bei Temperaturen von 5-20°C erfolgen. Soll das Myzel jedoch möglichst schnell wachsen, benötigt es eine Temperatur von 25-30°C kombiniert mit einer Luftfeuchte von 80-95°C. Während der ganzen Wachstumsphase muss für eine ausreichende Sauerstoffzufuhr gesorgt werden.
7	Denaturierung des Myzels	Wenn die gewünschte Durchwachsung des Substrats erfolgt ist, wird das Material aus der Form genommen und das Myzel denaturiert, d.h. biologisch getötet. Dies erfolgt durch eine Erhitzung auf ca. 80°C.
8	Optionale Arbeitsschritte	Je nach gewünschten Produkteigenschaften können die Arbeitsschritte 1-7 durch Heiss- oder Kaltpressen und oder verschiedene Beschichtungs- oder Versiegelungsverfahren ergänzt werden.

Tab. 1: Herstellungsschritte von myzelgebundenen Werkstoffen



Abb. 3: Erste Wachstumsphase des beimpften Substrats in Plastiksäcken

4.3 Allgemeine Eigenschaften von myzelgebundenen Werkstoffen

Natürlich gewachsene myzelgebundene Werkstoffe werden als schwamm- oder schaumartig beschrieben. Diese Charakterisierung erfolgt aufgrund der Luftmenge, welche in und zwischen den eher locker gepackten Substratpartikeln enthalten ist. Werden die Materialien während der Herstellung zusätzlich komprimiert, wird in den Wachstumsprozess «künstlich» eingegriffen und diese schwammartige Charakteristik abgeschwächt oder ganz negiert. In ihrer natürlichen schwammartigen Form haben Myzel-Materialien dank der enthaltenen Luft gute Dämmeigenschaften und eignen sich ebenfalls für akustische Anwendungen. Die in vielen Pilzarten enthaltenen hydrophoben Proteine sorgen dafür, dass auch viele Myzelkomposite wasserabweisend sind. Sind sie allerdings über längere Zeit Feuchtigkeit ausgesetzt, saugen sie sich trotzdem mit Wasser voll. Ist ein Austrocknen nicht möglich, beginnen die Materialien, sich zu zersetzen. So problematisch diese Eigenschaft während der Nutzungsdauer sein kann, so nützlich ist sie dagegen bei der Entsorgung: Myzelgebundene Werkstoffe sind unter geeigneten Bedingungen innert wenigen Monaten vollständig biologisch abbaubar. Auf Grund ihres schwammartigen Charakters fehlt es den meisten Myzelkompositen an Druck-, Zug- und Biegefestigkeit, weshalb sie in ihrer natürlich gewachsenen Form für tragende Anwendungen ungeeignet sind. Ebenfalls weisen sie ein eher sprödes Materialverhalten auf, was beim Sägen, Schneiden oder Bohren zum Ausbrechen des Materials führen kann. Dafür können sie durchgefärbt, mit wasserunlöslicher Farbe, Naturölen oder natürlichen Lacken beschichtet und verputzt werden.^{13,14,31}

Wie stark alle diese Eigenschaften bei einem Myzelkomposit ausgeprägt sind, hängt zu einem grossen Teil von der Pilzart sowie dem verwendeten Substrat oder der verwendeten Substratmischung ab. Jede Pilzspezies genauso wie jede Substratmischung bringt als Einzelstoff andere Charakteristika mit in den Verbundwerkstoff. Beispielsweise spielt für die mechanische Festigkeit eines Materials der Chitingehalt des Myzels eine zentrale Rolle. Pilze mit hohem Chitingehalt wie der Zunderschwamm bilden besonders feste Hyphen und ein ebenso festes Myzelgeflecht. Die Nutzung des Zunderschwamms statt eines weniger chitinhaltigen Myzels kann die Zug- und Druckfestigkeit eines Materials um schätzungsweise 35-40% verbessern¹⁴. Hinsichtlich des Substrats macht beispielsweise Stroh das Material steifer als wenn Baumwolle verwendet wird, dafür auch durchlässiger für Wasser. Neben den Charakteristika der Einzelstoffe, gilt es bei der Wahl

von Pilz- und Substratart auch zu beachten, dass jede Pilzspezies eine andere Nahrungsquelle bevorzugt und nicht jedes Myzelgeflecht die Substratpartikel gleich gut oder gleich homogen verklebt.^{13,14,19}

Ist die ideale Kombination von Pilzspezies und Substrat gefunden, gibt es noch weitere Möglichkeiten, die späteren Materialeigenschaften zu beeinflussen. Hinsichtlich der mechanischen Belastbarkeit gibt es zwei Möglichkeiten:

- A) Das Wachstum des Myzels kann hinsichtlich seiner räumlichen Ausrichtung und Dichtigkeit gezielt gesteuert werden. Ein Beispiel dafür ist die Komprimierung des Myzel-Substrat-Gemischs während des Wachstums: Durch die Komprimierung entsteht ein dichteres Myzelgeflecht, was dem Material eine deutlich höhere Festigkeit und Elastizität verleiht. Widersprüchliche Angaben finden sich darüber, ob das Pressen von Myzelmaterialien die Wasseraufnahmekapazität erhöht oder reduziert. Was es sicherlich verbessert, ist die mechanische Bearbeitbarkeit: Umso dichter ein Myzelkomposit ist, desto weniger besteht die Gefahr, dass die Kanten beim Sägen etc. ausbrechen.^{13,14,15,31}
- B) Durch das Beimischen von Zuschlagstoffen können mechanische Eigenschaften gezielt unterstützt werden. Solche Zuschläge funktionieren ähnliche wie eine Bewehrung im Beton, können verschieden gross und aus unterschiedlichen Materialien, wie beispielsweise Holzspänen, Textilien oder Fasern aus Naturfaserstoffen sein. Der bisherige zweikomponentige Werkstoff wird damit um eine oder mehrere Komponenten erweitert.^{14,31}

In einem nachträglichen Bearbeitungsschritt bietet sich eine Oberflächenbehandlung mit biobasierten Beschichtungen, wie Naturöle, Schellack, Harzen oder wasserunlöslichen Proteinen an. Solche Behandlungen können einerseits ebenfalls das Zug-, Druck, und Biegeverhalten der Materialien verändern, andererseits aber die Materialien witterungs- und feuchtigkeitsbeständiger machen.^{13,14,31}

Zusammengefasst sind es vier wichtige Parameter, mit denen die Eigenschaften von Myzel-Materialien beeinflusst werden können:

1. Pilzspezies
2. Substratart oder Substratmischung
3. Beeinflussung des Myzelwachstums
4. Beimischen von Zuschlagstoffen

Mit einer hypothetischen Annahme von 10 Pilzspezies und 10 Substratmischungen, die in Frage kommen, erreicht man schon nur mit der Auswahl von Parameter 1 und 2 hundert verschiedene Kombinationen. Diese Berechnung zeigt auf, vor was für einer grossen Herausforderung die Forschung mit myzelgebundenen Werkstoffen steht. Sie zeigt aber auch auf, was unbestritten das einzigartige Potenzial dieser Materialien ist: Sie können in einer immensen Vielfalt mit extrem unterschiedlichen Eigenschaften kreiert werden. Eigenschaften wie Dämmwerte, Elastizität, Luftdurchlässigkeit, Festigkeit etc. können nach Bedarf verändert werden, was die gezielte Herstellung von Materialien für ganz bestimmte Anwendungen ermöglicht. Oder wie es Serena Camere, Produktentwicklerin bei der italienischen Firma Mogu, formuliert⁴¹: «Der Einsatz dieses Rohstoffs ist die aufregendste Sache seit der Erfindung von Plastik – mit extrem vielfältigen Möglichkeiten und Ausgestaltungen».^{13,14,28}

5. Myzelgebundene Baumaterialien: Anwendungen, Produkte und Projekte

Auf die theoretischen Ausführungen im ersten Teil folgt der zweite Teil dieser Arbeit mit einem Blick in die Praxis. Besprochen werden nun ausschliesslich myzelgebundene Werkstoffe, welche im Baubereich Verwendung finden oder finden könnten. Es wird erläutert, an welchen spezifischen Materialien bzw. Anwendungen geforscht wird, welche Produkte bereits auf dem Markt erhältlich sind, sowie zur Veranschaulichung eine Auswahl an mit Myzelkompositen umgesetzten Projekten vorgestellt.

5.1 Myzelgebundene Werkstoffe im Baubereich

Für den Baubereich werden verschiedene Anwendungen von myzelgebundenen Werkstoffen erforscht, entwickelt und getestet. Entsprechend der guten Dämmeigenschaft von natürlich gewachsenem, schwammartigem Myzelmaterial ist dessen Anwendung als Dämmstoff die naheliegendste. Diese beschränkt sich allerdings auf den oberirdischen Bereich, da die Anfälligkeit des Materials für biologische Zersetzung einen potenziellen Einsatz als Perimeterdämmung bis anhin verunmöglicht¹¹. In Wand oder Dachkonstruktionen könnten Myzelkomposite in Form von Dämmplatten zum Einsatz kommen. Im «NEST», dem modularen Forschungs- und Innovationsgebäude der beiden Schweizer Forschungsinstitute Empa und Eawag, wurden Dämmplatten aus Myzelium für die Dämmung einer Schlafzimmerwand in einer der Wohneinheiten verwendet²⁷. NEST bietet die Möglichkeit, in verschiedenen Wohn- und Arbeitseinheiten neue Materialien, Technologien und Nutzungskonzepte risikofrei zu testen und weiter zu entwickeln. Hergestellt wurden die verwendeten Dämmplatten von der amerikanischen Firma Ecovative LLC. In Europa bietet nur die 2016 gegründete holländische Firma Grown.Bio solche Platten zum Verkauf an, allerdings auf Grund fehlender DIN-Zertifikate bezüglich Brandfestigkeit erst Mal nur für den Heimwerker-Bereich.

Als dämmender Kern können myzelgebundene Werkstoffe auch in Sandwichkonstruktionen eingesetzt werden. Dafür wird das beimpfte, aber noch unvernetzte Substrat zwischen zwei Holzplatten gefüllt: Während des Myzelwachstums entsteht so nicht nur eine luftdichte Isolierung, sondern bei geeigneten Deckplatten auch eine vollflächige Verklebung mit den Holzplatten. Der Kern aus Myzelkomposit kann danach auf natürliche Weise getrocknet werden, wobei das Sandwichpanel durch die Verhärtung des inneren Kerns statisch belastbar wird. Da myzelgebundene Werkstoffe jede beliebige Form, in welche das Myzel-Substrat-Gemisch zur Bebrütung gefüllt wird, annehmen können, ist mit dieser Methode auch die Herstellung komplexer, z.B. gekrümmter Bauteile denkbar. Dasselbe Vorgehen könnte auch direkt auf der Baustelle genutzt werden, um Innen- und Aussenwände zu verbinden, ohne dass dabei Wärmebrücken entstehen. Sandwichpaneele sind als Bauteil noch nicht kommerziell erhältlich, Ecovative LLC. bietet aber das Substrat für Dämmwendungen in Sandwichkonstruktionen an.^{5,14}



Abb. 4: Dämmplatten von Grown.Bio



Abb. 5: Sandwichpaneel

Ebenfalls in ihrer natürlich gewachsenen, schaumartigen Form werden Myzelkomposite auf Einsatzmöglichkeiten zur Schallabsorption untersucht und auch bereits eingesetzt. Als Massnahmen für letzteres finden sich auch schon Myzelprodukte auf dem Markt: Die norditalienische Firma Mogu produziert und verkauft seit 2014 myzelgebundene Akustikpaneele, welche sie dank der vorhandenen Zertifikate und Datenblätter auch auf dem professionellen Markt anbieten kann. Auch die oben erwähnte Grown.Bio führt Akustikpaneele im Sortiment, allerdings wie bereits erwähnt ohne Zertifikate und ebenfalls ohne Datenblätter mit Angaben zu Absorptionskurven u.Ä. Sowohl Mogu als auch Grown.Bio bieten neben Akustik- auch Wandpaneele an, welche anders dimensioniert sind, aber aus demselben Werkstoff hergestellt werden. Des Weiteren wird daran geforscht, aus dem Myzel-Substrat-Gemisch eine Paste herzustellen, welche für den 3D Druck benutzt werden kann. Der grosse Vorteil eines solchen Verfahrens ist die Vielfalt neu entstehender Formgebungsmöglichkeiten.^{8,31}



Abb. 6: Akustikpaneel «Kite» von Mogu



Abb. 7: Akustikpaneel «Sinewave» von Grown.Bio

Mit entsprechenden Massnahmen, wie beispielsweise Komprimierung, um ihre Festigkeit und Steifigkeit zu verbessern, könnten Myzelmaterialien eine Alternative zu herkömmlichen Holzwerkstoffen bieten. Das Myzel ersetzt dabei die bis anhin verwendeten Bindemittel, welche mehrheitlich durch die Reaktion von Harzen mit dem als gesundheitsschädlich eingestuften Formaldehyd entstehen². Myzelgebundene Holzwerkstoffe sind bisher nicht auf dem Markt erhältlich. Allerdings führt Mogu Bodenplatten im Sortiment, deren Grundplatte aus einer myzelgebundenen Faserplatte besteht, gefolgt von einer biobasierten Polyurethanschicht. Während die Platten zwar einem Holzwerkstoff ähneln, werden sie jedoch wie herkömmliche Fliesen verlegt.^{13,14}



Abb. 8: Bodenfliese von Mogu



Abb. 9: Boden mit Bodenfliesen von Mogu

Komprimierte Myzelkomposite werden auch auf eine Anwendung hin in Mauerwerksystemen getestet. Dazu werden mauersteinähnliche Myzelkompositblöcke geformt, welche sogar ohne Mörtel versetzt werden könnten: Wartet man mit der Denaturierung bis nach der Fügung der Blöcke, vernetzen sich die Myzelien der einzelnen Bausteine an der Oberfläche. Die Mauersteine wachsen sozusagen zusammen, wodurch die Vermischung verschiedener Baustoffe vermieden werden kann. Anstatt in Mauerwerksystemen können Myzelblöcke auch zur Ausfachung von Holz- oder anderen Rahmenbauten verwendet werden. Mauersteinähnliche Myzelblöcke können bei Grown.Bio erworben werden, allerdings fehlen wie bei den anderen Produkten der Firma Zertifikate zur Brandfestigkeit sowie in diesem Fall auch Angaben zur Druckfestigkeit, weshalb die Blöcke nicht oder nur in sehr kleinem Rahmen für konstruktive Anwendungen verwendet werden können. In einer Art Umkehrung ist die Anwendung einer Myzelkompositmasse als Mörtel denkbar, da die einzelnen Hyphen der Myzelien in kleinste Poren vordringen können und somit fähig sind, auch mineralische Materialien miteinander zu verbinden.^{14,19,28}



Abb. 10: Mauerstein aus Myzelkomposit



Abb. 11: Exponatsockel aus Myzel-Mauersteinen

Auch rein myzelgebundene Bauten sind ein Thema in verschiedenen Forschungsgruppen. Hinter der Idee, ganze Häuser einzig und allein aus myzelgebundenen Materialien zu erstellen bzw.

wachsen zu lassen, steht der Grundgedanke, strukturelle, isolierende und schalldämmende Probleme mit einem Material zu lösen und somit Bauzeit zu sparen.⁷

5.2 Projekte mit myzelgebundenen Werkstoffen

Die meisten realisierten Projekte mit Myzelkompositen bewegen sich zwischen Architektur und Kunst. Solche Projekte sind wichtig, um einerseits ausserhalb vom Labor und in einem grösseren Massstab das Potenzial dieses neuen Materials zu erproben und andererseits zu beweisen, dass Bauen – wenn auch noch in beschränkter Form – mit myzelgebundenen Werkstoffen tatsächlich möglich ist. Die folgenden Kurzporträts von fünf Projekten zeigen unterschiedliche Anwendungen von myzelgebundenen Werkstoffen und dienen zur Veranschaulichung, wie Bauen mit Myzelmaterialien aussehen könnte.

5.2.1 HyFi Tower

«HyFi» wurde 2014 in Queens, New York, realisiert. Es handelte sich dabei um einen 13 Meter hohen Turm, der aus 10'000 Myzelkomposit-Ziegelsteinen bestand. Das Projekt zeigt die Möglichkeit auf, Myzelgebundene Werkstoffe in modularer Weise sowie in bereits bestehenden Bauethoden anzuwenden. Die Struktur war mit wiederverwendbaren Erdschrauben auf Hanfbetonblöcken verankert und blieb drei Monate bestehen. Danach wurden die aus Getreidehalmen bestehenden Blöcke zerkleinert und in verschiedenen Gärten auf den Boden gestreut. Nach 60 Tagen waren sie abgebaut.^{7,39}



Abb. 12: HyFi Tower, ein Projekt von The Living Studio (USA)

5.2.2 MycoTree

«MycoTree» war 2017 das Herzstück der Ausstellung «Beyond Mining – Urban Growth» auf der Seoul Biennale of Architecture and Urbanism in Seoul, Korea. Die baumartig verzweigte Struktur bestand aus Myzelkompositelementen, welche mit Steckverbindungen aus Bambus zusammengefügt waren. Als Substrat für das Myzelkomposit wurde Zuckerrohr und Maniokwurzel verwendet. Die Idee hinter MycoTree war zu beweisen, dass die Stabilität einer Konstruktion auch durch Geometrie statt Materialstärke erreicht werden kann.^{7,19}



Abb. 13: MycoTree, ein Projekt von Sustainable Construction KIT Karlsruhe und Block Research Group ETH Zürich

5.2.3 The Growing Pavilion

«The Growing Pavilion» wurde 2019 für die Dutch Design Week in Eindhoven konzipiert, in deren Rahmen er als temporärer Eventsaal diente. Die äusserste Schicht der temporären Struktur wurde durch Myzelkomposit-Panäle aus Rohrkolben, Hanf und Macis (Samenmantel der Muskatnuss) gebildet. Diese waren auf eine Unterkonstruktion aus Holz montiert und zum Schutz vor Feuchtigkeit, Schmutz und UV-Strahlen mit einer biobasierten Beschichtung behandelt. Der Pavilion war eine Studie über biobasierte Konstruktion, indem für dessen Herstellung nur biologische Materialien verwendet wurden. 2022 wurde The Growing Pavilion für die Floriade Expo Amsterdam noch einmal gebaut.^{1, 39}



Abb. 14: Growing Pavilion, ein Projekt von Company New Heroes (NL) und Klarenbeek and Dros (NL)

5.2.4 El Monolito Micelio

«El Monolito Micelio» war 2019 Teil einer Serie von Experimenten, welche sich auf gewölbeförmige monolithische «Abgüsse» von Myzel-Verbundmaterialien konzentrierte. Ähnlich wie im Betonbau wurde das Myzelmaterial in eine Schalung gegossen und die ganze Struktur erst nachdem die gewünschte Myzelvernetzung erreicht war, ausgeschalt. Der monolithische Pavillon war 2.5m x 2.5m x 2.5m gross, benötigte zur Erstellung 800 kg Myzelkomposit aus Hanffasern und wurde nach der Ausschalung luftgetrocknet.⁷



Abb. 15: Monolito Micelio, ein Projekt von Georgia Institute of Technology School of Architecture (USA)

5.2.5 «Natur. Und wir?», Stapferhaus Lenzburg

In der vom Herbst 2022 bis Sommer 2024 laufenden Ausstellung «Natur. Und wir?» im Stapferhaus Lenzburg ist ein Raum von ca. 4m x 4m den Pilzen gewidmet. Der Bodenbelag dieses Raumes besteht aus unbehandelten Myzelkomposit-Platten, hergestellt von dem Luzerner Unternehmen «Mycosuisse». Eine Anwendung im Stapferhaus Lenzburg, wo tausende Besucher darüber laufen, bietet laut Patrick Mürner, dem Gründer des Unternehmens Mycosuisse, eine gute Gelegenheit für den Praxistest wie lange die Platten halten. Bei meinem Besuch im Stapferhaus im September 2023 war ersichtlich, dass die eine Hälfte der Bodenplatten starke Spuren der Abnutzung aufwies und die andere Hälfte vermutlich bereits ausgewechselt wurde.¹⁶



Abb 16: Bodenplatten im Stapferhaus: Starke Abnutzung unten, vermutlich neue Platten oben

6. Myzelgebundene Dämmstoffe: Eine baubiologische Analyse

Die baubiologische Analyse ist Gegenstand des dritten Teils dieser Arbeit. Nachdem in den ersten beiden Kapiteln eine wertfreie Auslegeordnung hinsichtlich was sind Myzelkomposite, was sind mögliche Anwendungsbereiche und was ist der aktuelle Stand der Technik, gemacht wurde, geht es im folgenden Kapitel um eine Bewertung dieses neuartigen Werkstoffes. Erläutert wird was aus baubiologischer Sicht relevante Kriterien für eine Materialwahl sind und welche Vor- und Nachteile Myzelkomposite ebenfalls aus baubiologischer Sicht mit sich bringen.

6.1 Die Ausgangslage der Analyse

Wie in Kapitel 4 und 5 ersichtlich wurde, umfasst der Begriff myzelgebundene Werkstoffe eine sehr heterogene Gruppe an bereits existierenden oder sich in der Entwicklung befindenden neuen Materialien. Da sich ihre Eigenschaften so stark unterscheiden können und ihr Anwendungsbereich so gross ist, ist es für eine aussagekräftige Analyse sinnvoll, den Fokus auf eine bestimmte Werkstoffart und somit auch auf einen eingeschränkten Anwendungsbereich zu legen. Aus mehreren Gründen fällt die Auswahl auf natürlich gewachsene, schaumartige Myzelkomposite in der Anwendung als Dämmstoff:

1. Über schaumartige Myzelkomposite sind am meisten Kenntnisse vorhanden.
2. Dämmmaterialien kommen bei praktisch jeder Bauweise zum Einsatz und der Bedarf ist mit den energetischen Sanierungen enorm gestiegen.
3. Aufgrund des grossen Bedarfs und der Bestrebung, aus Umweltgründen von erdölbasierten Produkten wegzukommen, sind dringend ökologischere Dämmmaterialien gefragt.

Da myzelgebundene Dämmmaterialien als mögliche Alternative für expandiertes Polystyrol EPS gehandelt werden, wird EPS in vielen Bereichen der Analyse zum Vergleich hinzugezogen.

Die Struktur der Analyse orientiert sich an den vier Teilbereichen der Baubiologie 1) Ökologische Verantwortung, 2) Soziale Gerechtigkeit, 3) Wirtschaftliche Entwicklung und 4) Individuelles Wohlbefinden. Alle untersuchten Aspekte werden demnach einem dieser vier Teilbereiche zugeordnet.

6.2 Baubiologischer Themenbereich «Ökologische Verantwortung»

Der Themenbereich Ökologische Verantwortung umspannt alle Aspekte eines Bauprojektes oder eines Baumaterials, welche einen direkten Einfluss auf die Umwelt haben. In der Umsetzung bedeutet dies, dass denjenigen Materialien den Vorzug gegeben wird, welche mit einer möglichst geringen Umweltbelastung hergestellt, verbaut und wieder entsorgt werden können. Den gesamten Lebensweg eines Produktes hinsichtlich Rohstoffgewinnung, Energieverbrauch, Emissionen und evtl. weiteren umweltbelastende Faktoren zu beurteilen ist komplex, aufwendig und für den Endverbraucher oft nur unvollständig möglich. Als Entscheidungshilfe bei einer Produktauswahl können professionell erstellte Ökobilanzen helfen. Diese sind allerdings kostspielig in der Erstellung und aus diesem Grund noch lange nicht für alle Baumaterialien verfügbar. Im Falle von myzelgebundenen Dämmstoffen kann nicht auf eine solche Berechnung zurückgegriffen werden. Für die Analyse werden die vorhandenen Informationen von verschiedenen Unternehmen und Forschungsgruppen zusammengetragen und im Vergleich mit EPS beurteilt. Die behandelten Aspekte umfassen Rohstoffe, Kreislauffähigkeit, Energieaufwand, Transportwege, CO₂- und weitere Emissionen.

6.2.1 Rohstoffe

Rohstoffe werden in der Regel entweder an- oder abgebaut. Beides bedeutet einen Eingriff in die Landschaft und oft auch in bestehende Ökosysteme. Im Falle von Kies- und Steingruben beispielsweise sind die landschaftlichen Veränderungen tiefgreifend und irreversibel, beim Anbau von Getreide oder Baumwolle sind die Eingriffe ins Landschaftsbild zwar nur oberflächlicher Natur, für bestehende Ökosysteme aber genauso relevant. Im Falle von Erdöl, aus welchem der Dämmstoff EPS hergestellt wird, bedeuten die Bohrinseln und Pipelines nicht nur einen Eingriff in die Landschaft, sondern bringen auch die Gefahr von auslaufendem Öl und damit enormen Meeresverschmutzungen mit sich. Hinzu kommt, dass fossile und auch viele mineralische Rohstoffe endlich sind, weshalb ein Abbau sparsam und eine Wieder- oder Weiterverwertung so oft wie möglich erfolgen sollte.

Myzelgebundene Dämmstoffe benötigen hauptsächlich drei Rohstoffe:

1. Myzelmasse zur Beimpfung des Substrates
2. ein Substrat oder Substratgemisch
3. Wasser

Die ersten beiden Rohstoffe haben den Vorteil, dass sie nicht gefördert oder abgebaut werden müssen und somit weder die sowieso schon knappe landwirtschaftliche Nutzfläche beanspruchen noch anderweitig einen Eingriff in die Natur darstellen. Myzelmasse als Gewebe oder in gelöster Form muss wohl im Labor mit Wasser und Nährstoffen kultiviert werden, doch nur als Bruchteil der Menge, welche im Endprodukt enthalten ist. Durch das Myzelwachstum stellt sich der Rohstoff sozusagen während des Produktionsprozesses des Kompositmaterials gleich selber her. Für das Substrat können andernfalls nicht mehr verwertbare Abfälle aus der Agrar-, Holz-, oder Textilindustrie verwendet werden. Die Verwendung von Reststoffen spart nicht nur Ressourcen sondern hilft auch bei der Reduktion des enormen Abfallproblems, welches solche Reststoffe vor allem in Entwicklungsländern darstellt. Üblicherweise werden dort Agrar-, Holz-, oder Textil-Abfälle auf Deponien entsorgt oder durch sogenanntes Stoppelbrennen beseitigt. Bei diesem absichtlichen in Brand setzen der Felder werden grosse Mengen an CO₂ und weiteren Schadstoffen freigesetzt.^{9,13,15}

Dieses Konzept ist nur solange vorteilhaft, wie der Bedarf an myzelgebundenen Dämmstoffen das Angebot an verwendbaren Abfällen nicht übersteigt. Wird die Nachfrage grösser als die verfügbaren Reststoffe, müssten geeignete Pflanzen angebaut werden, um daraus wiederum Substrate für die Myzeldämmstoffe herzustellen. Betrachtet man die momentanen Zahlen, wird dies allerdings kaum je nötig sein: Alleine in der Landwirtschaft fallen weltweit jährlich 13,2 Milliarden Tonnen Abfälle an³⁷. Im Vergleich dazu beziffert eine im Jahr 2022 durchgeführte Marktstudie den weltweiten Verbrauch von EPS im Baubereich auf 3,8 Millionen Tonnen jährlich²⁴. Die Menge der total verbauten Dämmstoffe ist natürlich höher, wobei der Anteil von EPS bei 50-70% liegt²⁴. Doch selbst mit einem 50%-igen Anteil von EPS am Gesamtverbrauch von Dämmstoffen beziffert sich dieser nur auf 7,6 Mio. Tonnen jährlich: Eine Menge, die immer noch mehrfach aus den 13,2 Mrd. Tonnen Agrarabfällen hergestellt werden kann. Allerdings sollen ja nicht alle Dämmstoffe durch myzelgebundene ersetzt werden, sondern allem voran das umweltbelastende EPS.

Gerade bei der Verwendung von Agrarabfällen kann es allerdings nötig sein, dem Substrat zusätzliche Nährstoffe beizumischen. Denn für ein gutes, schnelles und dichtes Myzelwachstum müssen Substrate nährreich sein oder zumindest nährstoffreiche Partikel enthalten^{13,14}.

Nährstoffreiche Partikel bedeuten einfach zugängliche Kohlenstoffquellen wie Einfachzucker, Kohlenhydrate oder Lignin, welche mehr als 20% der Trockenmasse des jeweiligen Stoffes ausmachen^{13,21}. Viele landwirtschaftliche Abfälle erfüllen dieses Kriterium nicht: Haferhülsen beispielsweise enthalten wenig Stärke und nur etwas mehr als 5% Lignin, wohingegen Reishülsen zu 67% aus Siliziumdioxid, welches Pilzwachstum hemmt, besteht und keinerlei Kohlenstoff enthält²¹. Laut Ecovative LLC. muss das Verhältnis von Füllstoff bzw. Fasern ohne nennenswerten Nährwert und nährstoffreichen Partikeln mindestens 15:1 betragen. In einem ihrer Patentdokumente²¹ findet sich folgende Beispielmischung für ein Volumen von 5L trockenem Substrat:

Füllstoff	Nährstoffe	Spurenelemente
335 g Reishüllen	8g Maltodextrin	10g Kalziumsulfat

Tab. 2: Beispielmischung für ein schaumartiges Myzelkomposit

Anhängig von den regional verfügbaren Reststoffen werden demnach zusätzliche Rohstoffe in Form von nährreichen Partikeln benötigt. Im Fall einer industriellen Massenproduktion von myzelgebundenen Dämmstoffen liessen sich vielleicht Reststoffe aus der Lebensmittelindustrie dem Substrat als Nährstoff beimischen. Immerhin ist davon auszugehen, dass in der Lebensmittelindustrie genügend Einfachzucker und Kohlenhydrate als Reststoffe anfallen und sich mit deren Verwendung gleichzeitig die Lebensmittelverschwendung reduzieren liesse.

Die benötigte Wassermenge hängt von der Art des Substrats ab und kann deshalb variieren. Ecovative LLC. verwendet für die obige Beispielmischung 1L Wasser, die italienische Firma Mogu gibt ihren Wasserverbrauch mit 8L pro m² an⁴². Mogu stellt zwar keine Dämmstoffe her, doch sind ihre Akustik- und Wandpaneele ebenso schaumartige Myzelkomposite, deren Herstellung sich nicht von derjenigen von Dämmplatten unterscheidet. Einzig ihre Bodenplatten werden komprimiert, wobei es sich jedoch um einen Arbeitsschritt handelt, welcher auf den Rohstoffaspekt keine Auswirkungen hat. Die Angaben von Ecovative und Mogu auf 1m³ gerechnet (detaillierte Berechnung siehe Anhang) ergeben für Ecovative einen Wasserverbrauch von 200L und für Mogu 133L. Bei der Herstellung von EPS wird Wasser in Form von Wasserdampf zum Aufschäumen der Styrolpartikel benötigt, allerdings finden sich keine Mengenangaben, welche für einen Vergleich hinzugezogen werden könnten.

6.2.2 Kreislauffähigkeit

Die Lebensdauer vieler Baumaterialien reicht weit über ihre Nutzungsdauer hinaus. Dabei sind viele Materialien nicht biologisch abbaubar und müssen aufwendig entsorgt werden. Übliche Entsorgungsstrategien sind thermische Verwertung oder Einlagerung in spezifisch dafür vorgesehenen Deponien. In beiden Fällen gehen Rohstoffe entweder verloren oder werden einfach nicht weiterverwertet. In Anbetracht der Knappheit vieler Rohstoffe und der Umweltbelastung, welche vom Verbrennen der Abfälle ausgeht, ist dies pure Verschwendung. Aus diesem Grund ist es erstrebenswert, möglichst viele Materialien durch re-, up- oder downcycling wieder in den Stoffkreislauf zurückzuführen und ihnen so zumindest eine zweite Lebensdauer zu verschaffen.

Werden myzelgebundene Werkstoffe nicht mit petrochemischen oder anderen problematischen Stoffen vermischt oder behandelt, sind sie zu 100% biologisch abbaubar und somit kreislauffähig. Unter geeigneten Bedingungen bauen sich myzelgebundene Dämmstoffe innerhalb von Monaten restlos ab³⁰. Für eine möglichst schnelle Zersetzung muss das Myzelmaterial zerkleinert werden.

Im Gegensatz zu EPS, welcher nicht biologisch abbaubar ist und, wenn er nicht fachgerecht entsorgt wird sondern liegen bleibt, schlimmstenfalls als Mikroplastik in der Nahrungskette endet, bringen myzelgebundene Dämmstoffe auch keinen Schaden wenn sie nicht fachgerecht kompostiert werden. Ihre Zersetzung braucht dann lediglich länger und ist vielleicht etwas unschön anzusehen. Gerade in Ländern mit weniger strengen oder gar keinen Abfallkonzepten stellt dies aus ökologischer Sicht einen entscheidenden Vorteil von myzelgebundenen Dämmstoffen dar.

Während die Bemühungen, EPS zu recyceln zunehmen, gibt es noch praktisch keine Informationen über ein mögliches Recycling von myzelgebundenen Dämmstoffen. Grundsätzlich müsste es möglich sein, wenn vielleicht auch nicht für das exakt gleiche Produkt: Durch Zerkleinern des Ursprungsproduktes entsteht Füllstoff, welcher dem Substrat für ein neues Produkt beigemischt werden kann. Die dabei relevante Frage ist, inwiefern Anteile von abgestorbenem Myzel im Substrat die Eigenschaften eines neuen Materials beeinflussen. Daraus liesse sich ableiten, ob Dämmplatten mit Recyclinganteilen genau dieselben Eigenschaften aufweisen wie solche ohne Recyclinganteile und für welche alternativen Anwendungen Myzelmaterialien mit Recyclinganteilen allenfalls denkbar sind. Verpackungsmaterialien beispielsweise, müssen weit weniger oder weniger präzise Anforderungen als Dämmplatten erfüllen und sind deshalb als Abnehmer für Recyclinganteile denkbar.

6.2.3 Energieaufwand

Die industrielle Herstellung eines Baumaterials ist immer mit einem Stromverbrauch verbunden. Und die Erzeugung und Verwendung von Strom wiederum verursacht unweigerlich eine Umweltbelastung. Abhängig davon, um welche Art Strom es sich handelt, ob erneuerbar oder nicht erneuerbar, nimmt die Umweltbelastung unterschiedliche Formen und Ausmass an. Aus ökologischer Sicht geht es deshalb nicht nur darum, möglichst erneuerbaren Strom zu nutzen, sondern ganz generell den Stromverbrauch zu senken.

Die für myzelgebundene Dämmstoffe energierelevanten Herstellungsschritte sind:

1. Herstellung oder Aufbereitung der Rohstoffe
2. Transport der Rohstoffe
3. Zerkleinern des Substrates
4. Dampfsterilisation des Substrates bei 115 °C während 15 Min¹⁰.
5. Regulation des Wachstumsklimas: Die spezifische Temperatur ist abhängig von Pilz und angestrebten Produkteigenschaften, liegt aber bei max. 30 °C
6. Trocknungsprozess im Ofen bei max. 80 °C
7. Endverarbeitung und Transport

Umso grösser die Produktion, desto mehr Arbeitsschritte sind automatisiert: Für eine industrielle Massenproduktion müsste also noch der Energieverbrauch für Förderbänder oder Roboter, welche einzelne Arbeitsschritte ausführen, mit eingerechnet werden. Positiv für die Energiebilanz ist, dass für die Herstellung keine Brennvorgänge bei extrem hohen Temperaturen, wie beispielsweise bei der Zementherstellung, wo das Rohmaterial auf über 1000 °C erhitzt wird, nötig sind. Die Temperaturen sind vergleichsweise niedrig, müssen dafür aber für die Regulierung der Wachstumsbedingungen über einen langen Zeitraum aufrecht gehalten werden.

Die Firma Mogu beziffert ihren einen Stromverbrauch auf 10 kWh pro m²⁴². Ecovative LLC. hingegen gibt lediglich an, dass ihrer Schätzung zufolge der Energieaufwand für die Herstellung von schwammartigem Myzelkomposit um 80% geringer ist als derjenige für die Herstellung von expandiertem Polystyrol EPS⁵. Der Verbrauch an Primärenergie zur Herstellung von EPS kann der Ökobilanzliste der Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren KBOB entnommen werden und wird dort mit 30,5 kWh pro kg Material angegeben¹². Umgerechnet auf dieselben Bezugsgrößen ergibt dies gemäss Tab. 3 einen bis zu 15 mal niedrigeren Energieverbrauch der Myzelkomposite im Vergleich zu EPS (detaillierte Berechnung im Anhang):

Material	Bezugsgrösse	Energieverbrauch	Faktor
EPS	1 kg	30.513 kWh	
Myzelkomposit Ecovative	1 kg	6.1 kWh	5 mal weniger als EPS
Myzelkomposit Mogu	1 kg	2 kWh	15 mal weniger als EPS

Tab. 3: Vergleich des Energieverbrauchs schwammartiger Myzelkomposite mit EPS

Einzelne Forschungsgruppen verzichten auf die Sterilisation des Substrates, um weiter Energie und Ressourcen zu schonen⁹. Lassen es Zeit und Herstellungsbedingungen zu, können myzelgebundene Dämmstoffe anstatt im Ofen auch luftgetrocknet werden¹⁷.

6.2.4 Transportwege

Transportwege gilt es möglichst kurz zu halten da Transporte immer energieaufwändig und mit verschiedenen Umweltbelastungen verbunden sind: Luftverschmutzung durch Abgase und Partikel, Boden- und Gewässerverschmutzung durch Reifenabrieb, Rohöl und weitere Schadstoffe, um nur ein paar wenige zu nennen. Reststoffe aus der Landwirtschaft, der Textil- oder Lebensmittelindustrie fallen überall auf der Welt an. Dies führt zur naheliegenden Schlussfolgerung, dass myzelgebundene Dämmstoffe aus regional geförderten Rohstoffen hergestellt werden und somit Transportwege gespart werden können.

Einzelne Projekte haben gezeigt, dass dies zumindest im kleinen Rahmen möglich ist: Bei der Erstellung des HyFi-Towers in Queens stammten die für das Substrat verwendeten Getreidehalme aus der Region New York und die bei der Kompostierung entstandene Erde wurde an örtliche Gemeinschaftsgärten abgegeben³⁹. Die in Norditalien ansässige Firma Mogu importiert für ihre Produkte Hanfschäben aus den Niederlanden, verwendet ansonsten aber wenn immer möglich Restprodukte aus der Region⁴². Das holländische Unternehmen Grown.Bio braucht für seine Materialien ausschliesslich Hanfpartikel aus dem eigenen Land⁴⁵. Die in New York ansässige Ecovative LLC. gibt zwar an, ihre Materialien aus einem Umkreis von 160 km zu beziehen¹¹, für die Rohstoffe eines ihrer im Patent beschriebenen Myzelkomposite werden aber Lieferanten in weit grösserer Entfernung von New York als 160 km (Arkansas, Kalifornien und Pennsylvania) genannt. Die Diskrepanz lässt sich vermutlich damit erklären, dass seit der Formulierung der Patentinhalte die Zusammenarbeit mit regionaleren Lieferanten etabliert wurde.

Da noch keine industrielle Massenproduktion von myzelgebundenen Dämmstoffen stattfindet, können keine weiteren Angaben bezüglich der Transportwege gemacht werden. Was es für eine Massenproduktion und einen globalen Absatz allerdings zu bedenken gilt ist, dass lokal anfallende Abfallprodukte in Art und Verfügbarkeit variieren. Das regionale Angebot von Reststoffen

entspricht vielleicht nicht unbedingt dem regionalen Bedarf an Myzelmaterialien: Fallen beispielsweise viele Hanfabfälle, welche sich gut für die Herstellung von Dämmstoffen eignen, in einer Region an, in welcher die Nachfrage nach Dämmstoffen klein ist, könnte dies Import und Export von Rohstoffen und damit verbunden auch Transportwege zur Folge haben. Ein solches Szenario hängt jedoch zumindest teilweise auch von den Ansprüchen an das Material ab. Dämmstoffe können theoretisch mit vielen verschiedenen Substratarten, z.B. was gerade in der jeweiligen Region anfällt, hergestellt werden, ihre Wärmeleitfähigkeit variiert einfach dem entsprechend. Für einen anspruchsvollen Markt mit genormten Produkten ist dies ein Tabu, für einen Markt in Entwicklungsländer mit einer weniger genormten Baubranche aber vielleicht eine Chance, um kostspielige und umweltbelastende Importe von herkömmlichen Dämmmaterialien zu umgehen. Und genau darin liegt auch einer der Vorteile gegenüber EPS: In fast allen Ländern fallen Reststoffe aus der Agrarindustrie an, weshalb es auch in fast allen Ländern grundsätzlich möglich ist, myzelgebundene Dämmstoffe aus regionalen Rohstoffen herzustellen. Was beim erdölbasierten EPS nicht möglich ist: Ausser das Material wird in rohölfördernden Ländern hergestellt, muss der Rohstoff immer importiert werden. Dies hat schon zu Beginn der Produktion lange Transportwege zur Folge. In der Schweiz wird EPS von der Firma Swisspor hergestellt, wobei die Schweiz 2022 Rohöl aus Nigeria, USA, Libyen, und Kasachstan importierte⁴⁰. Die Entfernung in Luftlinien zwischen diesen Ländern und der Schweiz beträgt grob gerechnet zwischen 3000 km und 9000 km.

6.2.5 CO₂ und weitere Emissionen

Kohlenstoffdioxid ist ein stark wirksames Treibhausgas, welches unter anderem bei der Verbrennung von kohlenstoffhaltigen Materialien, wie z.B. Holz, Kohle oder Gas, entsteht. Durch die Fähigkeit zur Photosynthese binden Pflanzen CO₂, welches erst bei einer Verbrennung oder der natürlichen Zersetzung durch Bakterien und Pilze wieder in die Atmosphäre gelangt. Werden organische Materialien verbaut, redet man von CO₂-Speichern: Solange die Materialien weder verbrannt noch kompostiert werden, bleibt das CO₂ der Atmosphäre entzogen und sicher in den jeweiligen Materialien gebunden.

Durch die Verwendung von organischen Reststoffen für das Substrat fungieren auch Myzel-Materialien als solche CO₂-Speicher. Um an die nötigen Nährstoffe zu gelangen, zersetzt das Myzel zwar einen Teil des Substrats, wodurch Kohlenstoffdioxid freigesetzt wird, allerdings weit weniger als total in der ganzen Substratmasse enthalten ist.^{17,19} Einer für das Projekt «The Growing Pavilion» erstellten Berechnung zufolge bindet eine Tonne schwammartiges Myzelkomposit zwei Tonnen CO₂. In derselben Berechnung enthalten ist der Vergleich mit Polystyrol, bei dessen Herstellung zwischen einer und sechs Tonnen CO₂ in die Atmosphäre gelangt.¹ Die Details der Berechnung sind nicht einsehbar, weshalb unklar ist, ob der durch den Herstellungsprozess entstandene Ausstoss an CO₂ schon mit eingerechnet ist und auf wieviel sich dieser beläuft. Die Firma Mogu hingegen gibt an, dass in ihrer Produktion pro m² Myzelkomposit 8 kg CO₂-Äquivalente ausgestossen werden und dies bei einer Verwendung von 50% erneuerbarer Energien. Mit einer Umstellung auf 100% erneuerbare Energien prognostiziert die Firma eine Reduktion des Ausstosses auf 3.5 kg pro m².⁴² Mit der in der KBOB-Liste enthaltenen Angabe für die Treibhausgasemissionen von EPS lässt sich, wie in Tab. 4 dargestellt, ausrechnen, dass die Produktion von Myzel-Materialien fast dreimal weniger CO₂ ausstösst als diejenige von EPS.

Material	Bezugsgrösse	CO ₂ äq. in kg
EPS	kg	4.51
Mogu Myzelkomposite	kg	1.65

Tab. 4: Treibhausgasausstoss im Vergleich (detaillierte Umrechnung der Bezugsgrösse für Mogu im Anhang)

Während bei der Herstellung von EPS die potenziell schädlichen Substanzen Styrol und Pentan Verwendung finden, werden bei der Herstellung von myzelgebundenen Dämmmaterialien problematische Stoffe weder eingesetzt noch emittiert²³. Es besteht auch keine Gefahr, dass während des Herstellungsprozesses Pilzsporen in die Luft gelangen könnten. Denn die Sporenbildung bei Pilzen findet nicht im Myzel, sondern in den Fruchtkörpern statt und die Bildung solcher wird durch die rechtzeitige Denaturierung verhindert.³ Mogu weist zusätzlich darauf hin, dass zumindest für ihre Produkte nur ausgewählte, für Mensch und Umwelt absolut sichere Pilzstämme verwendet werden und somit kein Gesundheitsrisiko für Mitarbeiter oder Endkunden besteht.³⁴

6.2.6 Themenbereich Ökologische Verantwortung: Zusammenfassung und Fazit

Myzelgebundene Dämmstoffe haben gegenüber herkömmlichen Dämmmaterialien wie EPS klare ökologische Vorteile:

1. Sie sind in ihrer reinen Form 100% biologisch abbaubar und somit kreislauffähig
2. Der grösste Teil der für die Herstellung benötigter Rohstoffe kann mit Reststoffen aus der Agrar-, Holz-, oder Textilindustrie abgedeckt werden
3. Die Verwendung von Reststoffen spart Landflächen, Energie und weitere Ressourcen, während sie gleichzeitig zur Reduktion eines Abfallproblems in Drittweltländern führt
4. Der Energieverbrauch fällt basierend auf momentan erhältlichen Zahlen 5-15 Mal geringer aus als derjenige von EPS
5. Theoretisch können myzelgebundene Dämmstoffe regional aus regionalen Rohstoffen hergestellt werden, wodurch Transportwege wegfallen
6. Myzelgebundene Dämmstoffe fungieren auf Grund der organischen Substrate als CO₂-Speicher
7. Bei ihrer Herstellung wird dreimal weniger CO₂ ausgestossen als bei der Herstellung von EPS (unter Verwendung von nur erneuerbaren Energien sogar noch weniger)
8. Bei der Herstellung sind keinerlei Schadstoffe involviert

Bei einer Ökobilanz betrachtet man allerdings immer auch die Lebensdauer eines Materials. Je schneller ein Material ersetzt werden muss, desto schneller wiederholt sich die bei der Herstellung verursachte Umweltbelastung. Aus diesem Grund kann auch ein noch so ökologisches Produkt in der Bilanzierung schlecht abschneiden, wenn es alle zwei Jahre ersetzt werden muss. Bei Dämmmaterialien kommt noch hinzu, dass für ein bestimmtes Dämmresultat je nach Produkt unterschiedliche Mengen verbaut werden müssen. Grund dafür ist die unterschiedliche Wärmeleitfähigkeit von verschiedenen Dämmmaterialien. Während dies Gegenstand des nächsten Unterkapitels ist, gilt für die Lebensdauer von myzelgebundenen Materialien grundsätzlich dasselbe wie für EPS: Bei fachgerechtem Einbau und Schutz vor Feuchtigkeit sind beide Materialien von uneingeschränkter Dauer²³.

6.3 Baubiologischer Themenbereich «Individuelles Wohlbefinden»

In der Baubiologie nimmt das individuelle Wohlbefinden eine zentrale Stellung ein. Denn Bauen, ohne dabei den Komfort des Benutzers im Fokus zu haben, kann – ganz unabhängig von der Materialwahl – nicht nachhaltig sein. Erfüllt ein Gebäude nicht die Ansprüche der Nutzer, wird es entweder abgerissen oder es muss nach kurzer Zeit aufwendig saniert werden. Ziel der Baubiologie ist es deshalb, den individuellen Komfort mit einer Bauweise und einer Materialauswahl sicherzustellen, welche die kleinstmögliche Umweltbelastung darstellt. Die für myzelgebundenen Dämmstoffe untersuchten Aspekte des individuellen Komforts umfassen den thermischen Komfort, die Luftqualität und das Brandverhalten.

6.3.1 Thermischer Komfort

Unter thermischem Komfort wird ein als angenehm empfundenes Raumklima verstanden. Die Raumtemperatur ist dabei eine der relevantesten Grössen und wird durch die Art der Konstruktion, die dafür verwendeten Materialien sowie Heizung und weitere Wärmequellen beeinflusst. Um Wärme- oder Kälteverluste zu reduzieren, werden Dämmstoffe eingesetzt: Dies sind Materialien, welche auf Grund ihrer niedrigen Dichte grosse Mengen an Luft enthalten. Um Dämmstoffe zu vergleichen, wird deren Wärmeleitfähigkeit gemessen. Je kleiner diese ist, umso besser ist das Dämmvermögen des Baustoffes.

Das Dämmvermögen von myzelgebundenen Dämmplatten hängt massgeblich vom gewählten Substrat ab. Hochleistungsfähige Dämmmaterialien wie Stroh- oder Hanffasern bringen diese Eigenschaften mit in das Verbundmaterial¹³. Das holländische Unternehmen Grown.Bio fertigt seine Dämmplatten mit Hanffasern und gibt dessen Wärmeleitfähigkeit zwischen 0,049-0,057 W/mK an³⁰. In Studien wurde für Myzel-Materialien, welche Stroh oder Hanf enthalten eine Wärmeleitfähigkeit von 0,04-0,08 W/mK gemessen¹³. Die englische Firma Biohm soll eine myzelgebundene Dämmplatte hergestellt haben, deren Wärmeleitfähigkeit mit 0,024 W/mK sogar noch niedriger war^{23,31}. Mittlerweile ist die Firma aber nicht mehr in der Produktion von Myzelmaterialien tätig, sondern berät Unternehmen bei der Dekarbonisierung von Prozessen mittels Biotechnologie⁴⁴.

Myzel-Dämmstoffe	Rohdichte	Wärmeleitfähigkeit
Grown.Bio Dämmplatte	115.5 kg/ m ³	0,049-0,057 W/mK
Myzel-Komposit mit Hanf oder Stroh	57-99 kg /m ³	0,04-0,08 W/mK
Biohm Dämmplatte	unbekannt	0,024 W/mK

Tab. 5: Wärmeleitfähigkeit von myzelgebundenen Dämmplatten

Die in der Studie sowie bei Grown.Bio ermittelten Werte sind ungefähr deckungsgleich. Die Dämmplatte von Biohm wird für die weitere Betrachtung aussen vor gelassen, da sie nicht länger produziert wird. Sie ist insofern aber relevant, da sie immerhin auf die Möglichkeit hinweist, dass die Wärmeleitfähigkeit von Myzeldämmstoffen eventuell noch gesenkt werden kann. Um auf dem kommerziellen Markt eine Chance zu haben, muss die Wärmeleitfähigkeit von myzelgebundenen Dämmstoffen ähnlich wie diejenige von EPS oder anderen oft eingesetzten Dämmstoffen sein. Tab. 6 zeigt zum Vergleich nicht nur die Werte von EPS, sondern auch von Holzfaserdämmplatten, Glaswolle und Schafwolle².

Dämmstoff	Rohdichte	Wärmeleitfähigkeit λ
Grown.Bio Dämmplatte	115.5 kg/m ³	0,049-0,057 W/mK
EPS	10-15 kg/m ³	0,035-0,045 W/mK
Holzfaserdämmplatte	140 kg/m ³	0,041 W/mK
Glaswolle	57 kg/m ³	0,04 W/m·K
Schafwolle	18-30 kg/m ³	0,035-0,046 W/mK

Tab. 6: Wärmeleitfähigkeiten verschiedener Dämmstoffe im Vergleich

Mit einer Wärmeleitfähigkeit von im besten Fall 0,04 W/mK und im schlechtesten 0,08 W/mK weisen Myzeldämmstoffe gleiche oder leicht schlechtere Dämmeigenschaften als EPS auf. Um bei einem Beispielwandaufbau von 30 cm Kalksandstein einen U-Wert von unter 0.17 W/(m²K) zu erreichen, sind bei einer Dämmung mit myzelgebundenen Platten mit $\lambda=0,05$ W/mK 6 cm mehr Dämmstärke erforderlich als bei EPS mit $\lambda=0,035$ W/mK (detaillierte Berechnung siehe Anhang). Im Gegensatz zu EPS sind myzelgebundene Dämmstoffe allerdings diffusionsoffen und können deshalb auch in einem diffusionsoffenen Wandaufbau verwendet werden²³.

6.3.2 Brandverhalten

Aus Sicherheitsgründen ist es relevant, wie sich ein Material im Brandfall verhält und welchen Beitrag es zum Brand leistet. Wünschenswert sind Materialien, welche das Ausbreiten eines Brandes möglichst verzögern und deren Rauchentwicklung nur so stark ist, dass eine Flucht aus dem brennenden Gebäude noch möglich ist.

Myzelgebundene Werkstoffe bilden im Brandfall, vergleichbar zu Holz eine Verkohlung der äussersten Schicht. Wegen der geringen Wärmeleitfähigkeit dieser Kohleschicht wird der weitere Abbrand des Materials bedeutend verzögert. Pilzmyzelien alleine haben keine nennenswerten feuerhemmenden Eigenschaften, weshalb der spezifische Feuerwiderstand eines Myzeldämmstoffs von der Art des verwendeten Substrats abhängt: Umso schwerer entflammbar das Substrat ist, desto weniger brennbar ist auch das Verbundmaterial.¹³ Im Falle von Dämmstoffen muss dabei ein Substrat gewählt werden, welches beide Anforderungen erfüllt: Gute Dämmeigenschaften und möglichst schlechte Brennbarkeit. Die aus Hanffasern hergestellten Dämmplatten von Grown.Bio sind nicht nach der Europäischen Norm getestet, werden aber im amerikanischen Testverfahren ASTM E84 der besten Brandklasse Class A zugeordnet³⁰. Mogu hat sämtliche Produkte nach der europäischen Norm EN 13501 testen lassen^{35,36}. Da es sich dabei zwar nicht explizit um Dämmplatten, wohl aber um schwammartige Myzelkomposite auf Hanfbasis handelt, kann davon ausgegangen werden, dass die Dämmplatten von Grown.Bio ähnliche Resultate erzielen würden. Ecovative liess einen Türkern, dessen Substratart allerdings nicht bekannt ist, ebenfalls nach ASTM E84 testen und erreichte ebenfalls Class A¹¹. In Tab. 7 sind die Ergebnisse der drei Firmen bzw. ihrer Produkte aufgelistet.

Firma	Produkt	Norm und Einstufung	Definition
Grown.Bio (NL)	Dämmplatten	(ASTM E84) Class A	wirksam gegen schwere Brandeinwirkung, niedrige Flammenausbreitungsgeschwindigkeit
Mogu (IT)	Wand-&Akustikpanel «fire-proof»	(EN 13501) B-s2-d0	<u>schwer entflammbar</u> mit sehr begrenztem Beitrag zum Brand, mittlere Rauchentwicklung, kein brennendes Abtropfen innerhalb 600 Sekunde
	Wand-&Akustikpanel «color»	(EN 13501) C-s2-d0	<u>schwer entflammbar</u> mit begrenztem Beitrag zum Brand, mittlere Rauchentwicklung, kein brennendes Abtropfen innerhalb 600 Sekunden
	Wand-&Akustikpanel «natural»	(EN 13501) D-s2-d0	<u>normalentflammbar</u> mit hinnehmbarem Beitrag zum Brand, mittlere Rauchentwicklung, kein brennendes Abtropfen innerhalb 600 Sekunden
Ecovative (USA)	Türkern	(ASTM E84) Class A	wirksam gegen schwere Brandeinwirkung, niedrige Flammenausbreitungsgeschwindigkeit

Tab. 7: Brandverhalten verschiedener Myzelprodukte.

Brandklassen nach EN13501: A= Nicht brennbar bis F=leicht entflammbar

Brandklassen nach ASTM E84: Class A=wirksam gegen schwere Brandeinwirkung bis Class C=wirksam gegen leichte Brandeinwirkung

Nur Mogu führt eine Produktreihe (in der Tabelle vermerkt mit «fire proof»), welche mit Brandschutzmittel behandelt wurde um das Brandverhalten zu verbessern. Nach Angaben der Firma wird dafür eine halogen-, brom-, antimon- und schwermetallfreie Veredelung verwendet. Alle anderen Materialien erreichen in ihrem natürlichen Zustand die angegebenen Resultate. Im Gegensatz dazu erreicht EPS nur dank Brandschutzmittel die Brandschutzklasse B, schwer entflammbar. Ohne Brandschutzmittel entspricht EPS der Brandschutzklasse E, normal entflammbar. Im Brandfall entstehen dichter Rauch (Rauchentwicklungsklasse s3), der die Orientierung erschwert, sowie giftige Gase².

6.3.4 Luftqualität

Baumaterialien, welche Schad- oder Geruchsstoffe emittieren, können das Raumklima und die Gesundheit der Nutzer negativ beeinflussen. Wie in Abschnitt 6.2.5 erläutert wurde, werden bei der Herstellung von schaumartigen Myzelkompositen weder Sporen freigesetzt, noch gesundheitsschädliche Stoffe verwendet. Wie Tab. 8 aufzeigt, können dennoch sowohl Grown.Bio als auch Mogu für ihre Produkte Messungen^{30,35,36} vorweisen:

Firma	Testverfahren	Werte
Grown. bio	VOC und Aldehyd getestet nach ASTM E1333	<0,01-0,03 ppm
Mogu	TVOC 28-Tage Kammertest nach dem Indoor Air Comfort Test von Eurofins	15 µg /m ² h

Tab. 8: Emissionsmessungen bei Myzelmaterialien

VOC = Volatile organic compounds = flüchtige organische Verbindungen

TVOC = Totale volatile organic compounds = Summe aller flüchtigen organischen Verbindungen

Rechnet man beide Angaben in dieselbe Einheit um, ergibt das für Grown.Bio einen Wert von 30-90 µg/m³ und für Mogu 54 µg/m³ (detaillierte Berechnung siehe Anhang). Für VOC- und TVOC-Werte gibt es keine offiziellen Grenzwerte in Innenräumen. Der von Minergie-Eco festgelegte Zielwert liegt bei <1000 µg/m³. Die baubiologischen Richtwerte für Schlafbereiche definieren für TVOC Mengen <100 µg/m³ als unauffällig und Mengen von 100-300 µg/m³ als schwach auffällig⁶. Sowohl die Werte von Grown.Bio als auch von Mogu gelten demnach als unauffällig. Dies gilt allerdings auch für EPS³³: 28 Tage nach der Produktion ergab ein Test des Prüflabor Eurofin für EPS einen VOC-Wert von 58 µg /m³. Im Widerspruch dazu findet sich an anderer Stelle die Angabe, dass EPS-Platten Pentan emittieren und dies bei raumseitiger Verlegung die Raumluftqualität negativ beeinflussen kann².

6.3.5 Themenbereich Individuelles Wohlbefinden: Zusammenfassung und Fazit

Myzelgebundene Dämmplatten können einen ähnlich guten individuellen Komfort gewährleisten wie EPS:

1. Ihre Wärmeleitfähigkeit ist zwar leicht höher als diejenige von EPS, dennoch aber gut genug um als Dämmstoff in Betracht gezogen zu werden
2. Myzelkomposite sind im Gegensatz zu EPS diffusionsoffen
3. Myzeldämmstoffe sind normal bis schwer entflammbar, haben eine geringe Rauchentwicklung und es entstehen im Brandfall keine giftigen Gase
4. Ähnlich wie bei Holz bildet sich durch Verkohlung der obersten Schicht eine Schutzschicht, welche das weitere Abbrennen verzögert
5. Myzelmaterialien haben keinen negativen Einfluss auf die Raumluftqualität, da ihre TVOC- oder VOC-Emissionen unter den aus baubiologischer Sicht als auffällig empfundenen Grenzwerten liegt

Obwohl die Wärmeleitfähigkeit von myzelgebundenen Dämmstoffen nicht ausserordentlich hoch ist, müssen sie dennoch in grösserer Stärke verbaut werden als EPS um denselben U-Wert zu erreichen. Dies kann konstruktiv ein Nachteil sein, aber auch finanziell, wenn die Kosten durch eine stärkere Dämmung steigen. Mit welchen Kosten bei Myzelmaterialien zu rechnen sind, ist unter anderem Thema des nächsten Kapitels.

6.4 Baubiologischer Themenbereiche «Soziale Gerechtigkeit und wirtschaftliche Entwicklung»

Die zwei Bereiche Soziale Gerechtigkeit und wirtschaftliche Entwicklung werden hier zusammengefasst, da die besprochenen Aspekte jeweils beiden Bereichen zugeordnet werden können. Unter wirtschaftlicher Entwicklung wird in der Baubiologie nicht reines Wachstum verstanden, sondern die Entwicklung einer regenerativen und möglichst regionalen Ökonomie, welche langfristig plant und dabei ganze Lebenszyklen in die Betrachtung miteinbezieht.

Überall auf der Welt fallen Reststoffe an, welche als Substrat für myzelgebundene Werkstoffe eingesetzt werden könnten. Dies bedeutet, dass solche Materialien auch überall auf der Welt produziert werden könnten. Eine steigende Nachfrage nach Myzeldämmstoffen könnte die Entwicklung neuer Industrien in ruralen Gebieten, wo die meisten Agrarabfälle anfallen, fördern und somit die Regionalökonomie stärken.²⁰ Gerade für Entwicklungsländer würde dies Unabhängigkeit von teuren Importmaterialien bedeuten und lokal Arbeitsplätze schaffen. Löst man sich von genormten Produkten und komplexen Baugesetzen, könnte man noch einen Schritt weiter gehen: Ähnlich wie im Lehmhausbau wäre es den Leuten ermöglichen, in Kombination mit anderen Materialien verhältnismässig einfach und ökologisch selber ein Haus zu bauen. Denn das einzig komplizierte an myzelgebundenen Materialien ist die Kultivierung der Myzelmasse für die Beimischung. Ist das Substrat einmal beimpft, kann es daheim bei Zimmertemperatur wachsen und an der Luft getrocknet werden. Muss es nicht spezifische Anforderungen wie bestimmte Dämmwerte erfüllen, ist es das ideale Do-it-yourself Produkt. Ausserhalb unserer Europäischen Baunormen spielt es vielleicht keine so grosse Rolle, ob immer Agrarabfälle mit den besten Dämmeigenschaften zur Verfügung stehen, weil auch diejenigen mit den zweit- oder drittbesten Eigenschaften gut genug sind. Auch für temporäre Behausungen wie beispielsweise Flüchtlingsunterkünfte ist eine Verwendung von myzelgebundenen Dämmstoffen denkbar: Aufgrund ihrer Kreislauffähigkeit stellen sie bei einem Abbruch im Gegensatz zu anderen Materialien kein Abfallproblem dar.

In den meisten Ländern und bei vielen Projekten ist einer der entscheidendsten Faktoren der für oder wider ein Produkt spricht der Preis. Myzelgebundene Dämmstoffe mögen ökologisch und regional herstellbar sein, doch wenn sie für einen Grossteil der Bevölkerung nicht erschwinglich sind, verringert das massgeblich ihre Marktfähigkeit. Ausserhalb der industriellen Massenproduktion, wie oben beschrieben als Do-it-yourself Produkt, sollte der Preis kein Hindernis sein. Wo Agrarabfälle vorhanden sind und nicht weit transportiert werden müssen, ist das Teuerste die Infrastruktur für die Myzelkultivierung. Da es dazu aber keine komplexen Laboreinrichtungen benötigt, kann von überschaubaren Kosten ausgegangen werden. Die Autoren Jones et al. gehen sogar davon aus, dass die Rohstoffkosten den grössten Teil der Gesamtkosten ausmachen. Sie beziffern die Rohstoffkosten für Myzel-Verbundwerkstoffe auf 0.07-0.17 USD (0.06-0.15CHF) pro kg¹³. Als Vergleich dazu geben sie wie in Tab.9 aufgeführt auch Grosshandelspreise von anderen Materialien an:

Rohstoffe für	Preis in USD	Umrechnung in CHF
Myzelkomposite	0.07 – 0.17	0.06 – 0.15
Polystyrol	2.10 – 2.30	1.89 – 2.07
Sperrholz	0.50 – 1.10	0.45 – 0.99
Hartholz	3.00 – 11.00	2.70 – 9.91

Tab. 9: Rohstoffpreise im Vergleich

Geht man von Rohstoffkosten von unter 20 Rappen/kg aus, müssten auch in einer industriellen Grossproduktion hergestellte Myzelkomposite günstig sein. Die Preise der momentan auf dem Markt verfügbaren Produkte zeigen allerdings ein anderes Bild. Wie Tab. 10 aufzeigt, sind weder die Produkte von Grown.Bio noch diejenigen von Mogu besonders günstig.

Baumaterial	Firma	Preis pro Stk.	Preis pro m ²
Dämmplatten 25mm	Grown.Bio (NL)	40.00-52.00 €	40.00-52.00 €
Dämmplatte 60mm		45.00-60.00 €	63.00-83.00 €
Wandpaneel	Grown.Bio (NL) Mogu (IT)	15.00 - 35.00 €	88.00 - 206.00 € 220.00 €
Akustikpaneel	Grown.Bio (NL) Mogu (IT)	12.50 - 25.00 €	78.00 - 156.00 € 240.00 - 335.00 €
Ziegel/Backsteine	Grown. Bio (NL)	4.00 - 6.00 €	
Bodenbelag	Mogu (IT)		180.00 €
Grow It Yourself Kit (Beimpftes Substrat)	Ecovative (USA)	2.00 - 8.00 €	

Tab. 10: Preise der auf dem Markt erhältlichen Myzel-Produkte. Variierende Preise bei Grown.Bio durch Mengenrabatte.

Relevant für diese Analyse sind vor allem die Dämmplatten von Grown.Bio. Im Vergleich liegen sie weit über den Preisen für EPS Dämmplatten gleicher Stärke von der Firma Swisspor: Diese kosten je nach Model lediglich 3.30-7.30 CHF/m² und 7.90-17.40 CHF/m². Die myzelgebundenen Dämmplatten kosten bis zu 10mal mehr und sind damit nicht konkurrenzfähig. Die Firma Grown.Bio ist sich dem Problem bewusst und arbeitet nach eigenen Angaben daran, die Preise zu senken⁴⁵. Die Firma Mogu hingegen definiert ihre Produkte als dem Luxussegment angehörend³⁴, wobei die Preise für Materialien für den Innenausbau nicht ungewöhnlich hoch sind. Trotzdem mögen sie auf Grund der so günstig geschätzten Rohstoffe überraschen. Gründe für die hohen Preise könnten folgende sein:

1. Initialkosten: Eine industrielle Produktionskette muss zuerst aufgebaut werden. Die Entwicklung des Produktes, die Justierung der Arbeitsabläufe sowie die Anschaffung der Infrastruktur sind Initialkosten, welche sich zumindest anfänglich in den Produktpreisen niederschlagen.
2. Kleinproduktionen: Produktionen werden mit zunehmender Menge günstiger, bis anhin werden die verfügbaren Myzelprodukte aber nach wie vor in Kleinmengen produziert.
3. Patentkosten: Der grösste Anteil an gewerblichem Eigentum im Bereiche Myzelkomposite gehört der amerikanischen Firma Ecovative LLC.^{4,13,17}
4. Zertifizierungskosten: Die Prüfung der Materialien um die für den professionellen Markt notwendigen Zertifikate zu erhalten sind teuer.¹⁴
5. Fehlende Konkurrenz: Der Markt für myzelgebundene Baumaterialien steckt mit ein paar wenigen Anbietern noch in den Anfängen, wobei der Konkurrenzdruck klein ist oder noch gar nicht besteht.

Liegen die momentan noch hohen Preise an einem oder mehreren dieser Gründe, ist die Wahrscheinlichkeit allerdings gross, dass, sobald myzelgebundene Werkstoffe als Baumaterialien etabliert sind, die Nachfrage steigt und Patentrechte ablaufen, die Preise automatisch sinken.

6.5 Zusammenfassung Analyse

Myzelgebundene Dämmplatten können in allen vier baubiologischen Themenbereichen einen Beitrag leisten. Sie erfüllen aus ökologischer Sicht die Kriterien der Kreislauffähigkeit, der niedrigen Herstellungsenergie, der niedrigen Treibhausgasemissionen und haben darüber hinaus einen kleinen Ressourcenbedarf, da sie mit Reststoffen der Agrar-, Holz- oder Textilindustrie hergestellt werden können. Gleichzeitig leisten sie damit einen Beitrag zur Bewältigung der in eben diesen Industrien in grossen Mengen anfallenden Abfälle. Aus Sicht des individuellen Komforts haben sie eine gute Wärmeleitfähigkeit, ein sehr gutes Brandverhalten und keinerlei negativen Einfluss auf die Raumluftqualität. Hinsichtlich sozialer Gerechtigkeit bieten Myzelkomposite einen Dämmstoff, der mit etwas Starthilfe (beimpfen des Substrates) in wirtschaftlich benachteiligten Ländern von den Leuten einfach selber hergestellt und weiterverarbeitet werden kann. Da überall auf der Welt Reststoffe aus der Agrar-, Textil-, oder Holzindustrie anfallen, bieten myzelgebundene Dämmstoffe die Möglichkeit, regional produziert zu werden, wobei Arbeitsplätze geschaffen und regionale Ökonomien gestärkt werden. Auch dies könnte für wirtschaftlich schlechter gestellte Länder eine Möglichkeit sein, teure Importmaterialien zu ersetzen. Was sie allerdings zumindest momentan und in einer westlichen Bau- und Produktionskultur noch nicht erfüllen können, sind für alle Bevölkerungsschichten erschwingliche Preise.

7. Fazit und Ausblick

Myzelgebundene Dämmstoffe erfüllen viele baubiologische Kriterien. Aus ökologischer Sicht schneiden sie, gerade im Vergleich zu EPS, hervorragend ab. Aus Sicht des individuellen Komforts sind es gute Materialien, die hinsichtlich ihrer Wärmeleitfähigkeit eventuell sogar noch verbessert werden können. Und sie haben das Potenzial, zur sozialen Gerechtigkeit weltweit sowie zur Entwicklung einer regionalen und regenerativen Ökonomie beizutragen. Doch sie haben auch Nachteile, allen voran ihre Anfälligkeit auf biologische Zersetzung. Bei Feuchtigkeit in der Konstruktion wird diese schnell zum Problem. Damit myzelgebundene Dämmstoffe tatsächlich eine ökologischere Variante zu EPS werden können, ist dies einer der Punkte, welcher noch verbessert werden muss. Ein weiterer Punkt ist der Preis: Ein Dämmstoff kann noch so ökologisch sein, bleibt er zwei- bis zehnmal teurer als EPS, wird er sich nicht durchsetzen können.

Aufgrund eines nur marginal abweichenden Produktionsprozesses kann auch bei komprimierten Myzelkompositen von den gleichen ökologischen Vorteilen ausgegangen werden. Der Energiebedarf wird durch das zusätzliche Komprimieren etwas höher sein als bei der Herstellung von schwammartigen Myzelmaterialien, ebenso wie der Rohstoffbedarf durch armierende Zuschlagstoffe variieren wird. Die Forschung scheint auf dem Weg zu sein, die von Natur aus mangelhafte mechanische Belastbarkeit mittels verschiedener Parameter nach Wunsch zu beeinflussen und so Materialien mit spezifischen Eigenschaften kreieren zu können. Wenn auch nicht morgen, so ist es doch denkbar, dass myzelgebundene Komposite in Zukunft eine Alternative für herkömmliche Holzwerkstoffe und vielleicht sogar Mauersteine bieten.

Damit Baustoffe aus Pilzmyzel grossflächig zum Einsatz kommen, braucht es aber noch mehr als nur Forschungsarbeit: Ausser auf dem Teller sind Pilze für die meisten Menschen negativ konnotiert und werden hauptsächlich mit Verwesung in Verbindung gebracht. Um die nützlichen

Eigenschaften von Pilzen ins Bewusstsein der Menschen zu bringen, sowie Vertrauen in diese neuartigen Baustoffe zu schaffen, braucht es neben Zeit vermutlich auch einiges an Aufklärungsarbeit.

8. Fachliches Fazit

Diese Arbeit ermöglichte mir nicht nur einen tieferen Einblick in die Welt der Pilze, sondern auch oder vielleicht sogar vor allem in die Welt der Materialwissenschaften. Mein Verständnis dafür, wieviel Effort es manchmal braucht, um aus einer guten Idee ein konkurrenzfähiges Material zu entwickeln, hat sich enorm vergrössert. Bei meiner Recherche bin ich auf sehr unterschiedliche Beiträge zum Thema gestossen, was mir aufgezeigt hat, wie wichtig die interdisziplinäre Zusammenarbeit ist und dass es eine grosse Bandbreite an Menschen und Fähigkeiten braucht, um in diesem Fall Myzelmaterialien zukunftsfähig zu machen.

Hinsichtlich meiner erarbeiteten Erkenntnisse im Bereich Myzelmaterial, wie auch im Bereich Materialentwicklung sind meine Erwartungen erfüllt. Die offenen Fragen, mit welchen ich in diese Arbeit gestartet bin, konnte ich – dem Stand der Forschung und Entwicklung entsprechend – beantworten. Was in der Durchführung allerdings nicht meinen Vorstellungen entsprechend lief war, dass es mir nicht gelang, jemanden für ein persönliches Gespräch zu gewinnen. Darüber hinaus wurde mir erst im Laufe der Arbeit bewusst, wieviel Vorbereitung ein Gespräch braucht, damit es eine bereits vertiefte Recherche sinnvoll ergänzen kann oder umgekehrt, wie vertieft eine Recherche bereits sein muss, damit man gut vorbereitet in ein Gespräch gehen kann. Bei meiner ersten Anfrage im August hätte der Stand meiner Recherche idealerweise schon demjenigen von Ende Oktober entsprochen, was zeitlich einen viel grösseren Vorlauf gebraucht hätte.

9. Quellenverzeichnis

Bücher

1. *Company New Heroes (Hrsg.)(2019): «Material Atlas The Growing Pavilion».* Online Zugriff: <https://thegrowingpavilion.com/material-atlas/>
2. *Linden W., Marquardt I. (Hrsg.)(2018): «Ökologisches Baustofflexikon: Bauprodukte, Chemikalien, Schadstoffe, Ökologie, Innenraum».* ISBN 978-8007-3232-6
3. *Sheldrake, M. (2021): «Verwobenes Leben. Wie Pilze unsere Welt formen und unsere Zukunft beeinflussen».* ISBN 978-3-548-06531-1.
4. *Sydor, M., Bonenberg, A., Doczekalska, B., Grzegorz, C.(2021): «Mycelium-Based Composites in Art, Architecture, and Interior Design: A Review».* In: «Eco-Friendly Wood Composites: Design, Characterization and Applications» (2023). ISBN 978-3-0365-7187-4. Online Zugriff: <https://www.mdpi.com/2073-4360/14/1/145>

Artikel und Zeitschriften

5. *Architecture and Design. McLaren, W.: «Mushrooms emerging in construction realm as insulation».* 5.3.2014. Online Zugriff: <https://www.architectureanddesign.com.au/news/mushrooms-emerging-in-construction-realm-as-insula>
6. *Baubiologie MAES: Institut für Baubiologie + Nachhaltigkeit IBN. Kein Autor. «Baubiologische Richtwerte für Schlafbereiche».* Ergänzung zum Standard der baubiologischen Messtechnik SBM-2015. Online Zugriff: <https://www.baubiologie.de/downloads/richtwerte-schlafbereiche-15.pdf>
7. *BMC. Fungal Biology and Biotechnology. Almpanti-Lekka, D., Pfeiffer, S., Schmidts, C., Seung-il, S.: «A review on architecture with fungal biomaterials: the desired and the feasible».* 19.11.2021. Online Zugriff: <https://fungalbiolbiotech.biomedcentral.com/articles/10.1186/s40694-021-00124-5#availability-of-data-and-materials>
8. *Fraunhofer Umsicht. Kein Autor. Interview mit Julia Kraye. «Pilze als Werkstoffquelle».* 12.6.2020. Online Zugriff: <https://www.umsicht.fraunhofer.de/de/ueber-fraunhofer-umsicht/historie/30-jahre-umsicht/forschung-im-fokus/julia-krae.html>
9. *Future Dimensions – What moves the world tomorrow? «Dimension #3 – what if we grew homes from mushrooms?».* November 2022. Online Zugriff: <https://open.spotify.com/episode/75eJK7hFLjqTsvPCIPAnE0>
10. *IOP Conferene Series: Earth and Environmental Science. Xing, P., Brewer M., El-Gharabawy, H., Griffith, G., Jones, P.: «Growing and testing mycelium bricks as building insulation materials».* Volume 121, 2018. Online Zugriff: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/121/2/022032/pdf>
11. *JDO Vaults. Craft, Computation and Constructions Research and Teaching by Jonathan Dessy-Olive. «ResArch Lab: Mycelium Architecture – Building with Fungi».* 8.6.2020. Online Zugriff: <https://jdovaults.com/ABOUT-JDO-BIO>
12. *KBOB: «Ökobilanzdaten im Baubereich».* 2009/1:2022, Version 3. Online Zugriff: https://www.kbob.admin.ch/kbob/de/home/themen-leistungen/nachhaltiges-bauen/oekobilanzdaten_baubereich.html

13. *Materials&Design*. Jones, M., Mautner, A., Luenco, S., Bismarck, A., John, S.: «Engineered mycelium composite construction materials from fungal biorefineries: A critical review». 187/2020. Online Zugriff: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127519308354>
14. *Nbau. Nachhaltig Bauen*. Trautz, M., Saez, D.L., Grizmann, D., Werner, A.: «Myzelkomposit als vielseitig einsetzbarer, kreislaufgerechter Werkstoff für das Bauen». 2022. Online Zugriff: <https://www.nbau.org/2022/06/28/myzelkomposit-als-vielseitig-einsetzbarer-kreislaufgerechter-werkstoff-fuer-das-bauen/>
15. *Plos One*. Elsacker, E., Vandellook, S., Brancart, J., Peeters, E., De Laet, L. : «Mechanical, physical and chemical characterization of mycelium-based composites with different types of lignocellulosic substrates». 22.7. 2019. Online Zugriff: <https://journals.plos.org/plosone/article/file?id=10.1371/journal.pone.0213954&type=printable>
16. *SRF. Echo der Zeit*. «Nachhaltiger Baustoff Pilz: Wohnen wir bald in Pilzhäusern?». 2.11.2022. Online Zugriff: <https://www.srf.ch/news/schweiz/nachhaltiger-baustoff-pilz-wohnen-wir-bald-in-pilzhaeusern>
17. *SRF. Kulturplatz*. «Weltenretter Pilze?». 29.3.2023. Online Zugriff: <https://www.srf.ch/play/tv/kulturplatz/video/weltenretter-pilze?urn=urn:srf:video:d5ec7103-5dbe-46f5-8933-c82044115dd7>
18. *Tagesanzeiger. Das Magazin*. Hein, T.: «Hoffnungsschimmel für die Menschheit – Mit Pilzen die Welt retten». 14.10.2022. Online Zugriff: <https://www.tagesanzeiger.ch/hoffnungsschimmel-fuer-die-menschheit-mit-pilzen-die-welt-retten-825837034124>
19. *TEC21, Schweizerische Bauzeitung*. Fischer, D: «Baupioniere aus dem Untergrund». 25-26/2021
20. *The Conversation*. Fletcher, I.: «How fungi can help create a green construction industry». 3.2.2020. Online Zugriff: <https://theconversation.com/how-fungi-can-help-create-a-green-construction-industry-128041>
21. *United States Patent*. Patent No: US 9,394,512 B2. Bayer, E., McIntyre, G.: «Method for Growing Mycological Materials». 19.7. 2016.
22. *United States Patent*. Patent No: US 9,485,917 B2. Bayer, E., McIntyre, G.: «Method for Producing Grown Materials and Products Made Thereby». 8.11. 2016.

Webseiten

23. *Allplan*. Kein Autor. (2.3.2022) «Mycel: Pilze als perfekter Baustoff?» <https://blog.allplan.com/de/pilze-als-perfekter-baustoff> Zugriff: 29.9.2023
24. *Ceresana. Market Research Since 2002*. <https://ceresana.com/produkt/marktstudie-expandierbares-polystyrol-eps> Zugriff: 25.10.2023
25. *Circular Hub*. Wiprächtiger, M. (März 2021): «Die Zukunft zirkulärer Dämmstoffe». <https://circularhub.ch/magazin/details/die-zukunft-zirkulaerer-daemmstoffe> Zugriff: 29.10.2023
26. *Ecovative LLC*. <https://www.ecovative.com/> Zugriff: 27.20.2023
27. *Empa. Materials Science and Technology*. «Das ist NEST». <https://www.empa.ch/de/web/nest/aboutnest> Zugriff: 8. 9.2023

28. Gebäudeforum Klimaneutral. Kein Autor (Stand 11/2021): «Pilze als organischer Baustoff». <https://www.gebaeudeforum.de/realisieren/baustoffe/nachwachsende-rohstoffe/pilze/> Zugriff: 3.10.2023
29. Grown.Bio. «Frequently Asked Question». <https://www.grown.bio/faq/?v=1ee0bf89c5d1> Zugriff: 20.10.2023
30. Grown.Bio. «Spec Sheet: Mycelium Product Specifications». Download unter: <https://www.grown.bio/faq/?v=1ee0bf89c5d1> Zugriff: 20.10.2023
31. Material Archiv. Müller-Reissmann, F. (Erstellung 2015), Kotoun, L. (Überarbeitung 2023): «Myzel-gebundenes Komposit». https://materialarchiv.ch/de/ma:material/1741?maapi:f_all_groups=ma:group_981 Zugriff: 6.10.2023
32. Material Magazin. «Verbundwerkstoffe». <https://www.materialmagazin.com/index.php/composites/einteilung-von-verbundwerkstoffen> Zugriff: 6.10.2023
33. Mit Sicherheit EPS. «Qualität der Innenraumluft». <https://mit-sicherheit-eps.de/eps-gesundheit-umwelt> Zugriff: 31.10.2013
34. Mogu. Radical by Nature. <https://mogu.bio/> Zugriff: 27.10.2023
35. Mogu. Radical by Nature. «Acoustic. Material Data Sheet». https://mogu.bio/mg19b10/wp-content/uploads/2023/09/Acoustic_Technical-Datasheet_2023.pdf Zugriff: 13.10.2023
36. Mogu. Radical by Nature. «Pluma Panels. Material Data Sheet». <https://mogu.bio/pluma-panels/> Zugriff: 13.10.2023
37. Paperwise. FAQ: «How much agricultural waste becomes available worldwide every year?». <https://paperwise.eu/en/faq/#9.-is-paperwise-paper-made-with-100%-agricultural-waste> Zugriff: 17.10.2023
38. Pflanzenforschung.de. «Hyphe». <https://www.pflanzenforschung.de/de/pflanzenwissen/lexikon-a-z/hyphe-1282> Zugriff: 6.10.2023
39. Rise. Saxton, M.: «Mycelium Fungi as a Building Material». Februar 2020, überarbeitet Oktober 2021. Zugriff: 1.9.2023. <https://www.buildwithrise.com/stories/mycelium-fungi-as-a-building-material>
40. Statista. «Import von Rohöl in die Schweiz nach Herkunftsland von 2016 bis 2022». <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/912988/umfrage/import-von-erdoel-in-die-schweiz-nach-herkunftsland/> Zugriff: 1.11.2023
41. Ubm magazin. Benkö, L.: «Pilzfäden als Baustoff der Zukunft». <https://www.ubm-development.com/magazin/pilz-baustoff-zukunft/> Zugriff: 12.9.2023

Weitere Quellen

42. Foglia, N., Marketing & Communication Mogu S.r.l, 21020 Inarzo. Email 27.10.2023
43. Pascalis, L., Sales Manager Mogu S.r.l, 21020 Inarzo. Email 2.10.2023
44. Samuel. Biohm, SE14 5RW, London. Email 7. September 2023
45. Thurner, C., Marketing & Sales Grown.Bio, 6624 Heerewaarden. Email 5.9.2023, 19.9.2023 und 1.11.2023

9. Abbildungsverzeichnis

Titelbild: <https://meter-magazin.de/de/bauen/18644-baustoff-der-zukunft>

Abb. 1: Mikroskopische Aufnahme eines Pilzmyzels

<https://www.nbau.org/2022/06/28/myzelkomposit-als-vielseitig-einsetzbarer-kreislaufgerechter-werkstoff-fuer-das-bauen/>

Abb. 2: Myzeldurchzogene Substrate

<https://www.materialincubator.com/building-on-mycelium>

Abb. 3: Bilder Substratsäcke

Mogu Acoustic Catalogue 2022

Abb. 4: Dämmplatte Grown.Bio

<https://www.grown.bio/product/insulation-panel-set-of-10/?v=1ee0bf89c5d1>

Abb. 5: Sandwichpaneel

<https://www.nbau.org/2022/06/28/myzelkomposit-als-vielseitig-einsetzbarer-kreislaufgerechter-werkstoff-fuer-das-bauen/>

Abb. 6: Akustikpaneel «Kite» von Mogu

Mogu Acoustic Catalogue 2022

Abb. 7: Akustikpanel «Sinewave» von Grown.Bio

<https://www.grown.bio/product/sinewave-panel-set-of-4/?v=1ee0bf89c5d1>

Abb. 8: Bodenfliese von Mogu

Mogu Floor Catalogue 2022

Abb. 9: Boden mit Bodenfliesen von Mogu

Mogu Floor Catalogue 2022

Abb. 10: Mauerstein aus Myzelkomposit

<https://www.nbau.org/2022/06/28/myzelkomposit-als-vielseitig-einsetzbarer-kreislaufgerechter-werkstoff-fuer-das-bauen/>

Abb. 11: Exponatsockel aus Myzel-Mauersteinen

<https://www.grown.bio/product/mycelium-block/?v=1ee0bf89c5d1>

Abb. 12: HyFi Tower, ein Projekt von The Living Studio (USA)

The Living Hy-Fi Exterior. Photo Credit: Cecil Barnes V

<https://www.buildwithrise.com/stories/mycelium-fungi-as-a-building-material>

Abb. 13: Myco Tree

<https://block.arch.ethz.ch/brg/project/mycotree-seoul-architecture-biennale-2017>

Abb. 14: Growing Pavilion, ein Projekt von Company New Heroes (NL) und Klarenbeek and Dros (NL)

Image by Oscar Vinck. <https://www.dezeen.com/2019/10/29/growing-pavilion-mycelium-dutch-design-week/>

Abb. 15: Monolito Micelio, ein Projekt von Georgia Institute of Technology School of Architecture (USA)

<https://jdovaults.com/El-Monolito-Micelio>

*Abb. 16: Bodenplatten im Stapferhaus, hergestellt von Patrick Mürner, Mycosuisse LU
Fotos von Claudia Urbani, September 2023*

Tab. 1-10: Erstellt durch Verfasserin, 2023.

10. Anhang

10.1 Berechnungen

Umrechnung Wasserverbrauch pro m³

Ecovative

5L Substratvolumen → 0,005m³. (1 m³ : 0,005 m³) = 200

Wasserverbrauch Ecovative = 1L pro 5L Substratvolumen bzw. pro 0,005m³ → ergibt pro m³ (200 x 1L) = 200L

Mogu

Angabe 8L pro m² → wieviel m³ sind m² Mogu-Material? → durchschnittliche Stärke ausgerechnet anhand der Angaben in den Datenblättern, ergibt 612mm.

1m² Mogu Material sind demnach 0,06m³ → (1 m³ : 0,06 m³) = 16,6

Wasserverbrauch Mogu = 8L pro 0,06m³ → (16,6 x 8L) = 133L

Umrechnung Energieverbrauch pro kg

EPS

Gemäss KBOB Liste 30,5 kWh pro kg Materiel

Ecovative

Angabe 80% weniger als EPS → (30,5 x 0,2) = 6,1 kWh

Mogu

Angabe 10 kWh pro m² → Umrechnung in kg → Welches Gewicht hat m² Mogu-Produkte?

Ausrechnen der durchschnittlichen Rohdichte aller Mogu-Produkte anhand der Angaben in den Datenblättern, ergibt 4,85 kg/m² → 4,85 kg verbrauchen 10kWh Strom

Stromverbrauch pro kg → (10 : 4,85) = 2,06 kWh

Umrechnung Treibhausgasemissionen pro kg

Mogu

Angabe 8kg CO₂-äq. pro m² → Umrechnung in kg → Welches Gewicht hat m² Mogu-Produkte?

Ausrechnen der durchschnittlichen Rohdichte aller Mogu-Produkte anhand der Angaben in den Datenblättern, ergibt 4,85 kg/m² → 4,85 kg emittieren 8kg CO₂-äq.

CO₂-äq. pro kg → (8 : 4,85) = 1,65 kg CO₂-äq.

Berechnung U-Wert

Aufbau einer Wand mit EPS-Dämmung, damit U-Wert <0,17 erreicht wird, Berechnung mit Ubakus.

Innen: Reduzierte Luftzirkulation 20 °C 50 % Luftfeuchtigkeit Rsi...

Von innen nach außen: umkehren Dicke Breite Abstand λ μ

№	Material	Dicke (mm)	Breite (mm)	Abstand (mm)	λ	μ
1	Knauf Gipsmaschinenputz MP 75	20			0,39	6/10
2	Kalksandstein (Rohdichteklasse 1,2)	300			0,56	5/10
3	EPS 035	190			0,035	20/100
4	HASIT 640 Leichtputz	10			0,33	20
5						

Außen: Direkter Übergang zur Außenluft -5 °C 80 % Luftfeuchtigkeit Rse...

Nutzung nur für Studium und Lehre. Freigeschaltet für Claudia Urbani

U-Wert: 0,161 W/(m²K) Tauwasser: 0 kg/m³ sd-Wert: 5,6 m Dicke: 52 cm Temp.Ampl.Dämpfung (1/TAV): >100
 MuKE14 Neubau U ≤ 0,17 Holzfeuchte: +0,0 % Oberfläche innen: 19,0°C (53%) Gewicht: 400 kg/m³ Phasenverschiebung: 16 h

Myzel-Dämmplatte

$\lambda = 0,05 \text{ W/mK}$

$U = 1/R \quad R = d/\lambda \quad \text{Materialstärke Dämmung } d = 0,25$

$U = \frac{1}{(1:8) + (0,02:0,39) + (0,3:0,56) + (0,25:0,035) + (0,01:0,33) + (1:25)} = 1,173$

Umrechnung TVOC in $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Grown.Bio
 Angabe <0,01-0,03 ppm
 Molekulares Gewicht von VOC → mittleres Gewicht ausgerechnet anhand der in Wikipedia angegebenen Zusammensetzung von VOC https://en.wikipedia.org/wiki/Volatile_organic_compound → 72g/mol
 Umrechnung ppm in mg/m³ mit <https://markes.com/calculator> → 30-90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Mogu
 Angabe in $15\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$
 Eurofins Indoor Air Comfort Test → nach DIN 16516 → <https://www.ingenieur.de/fachmedien/gefahrstoffe/regelwerk/untersuchungen-zur-etablierung-der-din-en-16516-als-neue-referenznorm-fuer-die-pruefung-von-formaldehydemissionen-aus-holzwerkstoffen-gemaess-chemikalien-verbotsverordnung/>
 Umrechnung in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ gemäss Angaben zu Din 16516 → Beladung L= $1,8 \text{ m}^2/\text{m}^3$ (Wand, Decke, Boden), Luftwechsel n pro h = 0,5, Luftdurchflussrate q=0,28 $\text{m}^3/\text{m}^2\text{h}$ → $(15\mu\text{g}:q) \rightarrow (15:0,28) = 53,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$

EPS
 Angabe in $50\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$
 Berechnung wie bei Mogu → $(50:q) \rightarrow (50:0,28) = 179 \mu\text{g}/\text{m}^3$

10.2 Emails

Pascalis, Lorenzo. Mogu

Am 02.10.2023 um 09:11 schrieb Sales - MOGU S.r.l. <sales@mogu.bio>:

Hello Claudia,
Many thanks for your interest in our products.
We are happy to share some infos about pricing:

For the acoustic panels:
Wave: 295€ / sqm
Kite: 335€ / sqm
Fields: 335€ / sqm
Foresta: 580€ / sqm (incl. fixing)
Plain: 240€ / sqm

Wall Panels:
Pluma: 220€/sqm
All the prices are excluding VAT and transport and fixing fees (except the Foresta)
We have 3 Installation system alternatives:

- mechanical fixing (z-clip hangers, one of them already attached to the panel): 50,00 € -75,00 €/ sqm depending on model
- glueing them to the wall; in this case, you can also decide to purchase the glue directly. If you purchase it through us, it will cost 12 € / sqm
- magnetic fixing, composed of magnetic plates pre-mounted on the panel and a metal grid to screw on the wall; this option will cost 150 € / sqm (both plate and grid).

At page 102-105 of our Catalogue, you can consult the description of each fixing system.
As for the flooring products, our Floor Tiles are priced 180€/sqm and our Floor Flex ranges between 65€ - 80€/sqm.

We usually work on a quotation basis, depending on the order quantity and other specifications, we may be able to provide you with a specific and tailored price.

Looking forward to hearing from you,
Best regards,

Lorenzo Pascalis
Sales Manager
Mogu S.r.l

+39 333 188 0115
Via S. Francesco d'Assisi 62,
21020 Inarzo (VA)

Foglia, Nausicaa. Mogu

Am 27.10.2023 um 10:26 schrieb Nausicaa Foglia - MOGU S.r.l. <nf@mogu.bio>:

Dear Claudia,

I'm Nausicaa from mogu, nice to meet you. Thank you for your email and your enthusiastic interest in mycelium products. We are delighted to provide you with a more detailed insight into the ecological aspects of our mycelium-based materials.

One of the standout features of mycelium product production is its energy efficiency. We use approximately 10 kWh per square meter, which is strikingly low in comparison to many other materials. This showcases our dedication to sustainability and minimizing energy usage in our processes.

During the soaking of the substrate for mycelium products, we utilize just 8 liters of water per square meter.

Understanding the environmental impact is crucial. At our current facility in mogu, we generate approximately 8 kg of CO2 equivalent emissions per square meter during stages A1 to A3. However, here's the standout potential: By transitioning to 100% renewable energy sources (we're currently at 50%), we foresee a substantial reduction in emissions, potentially as low as 3.5 kg of CO2 equivalent per square meter in stages A1 to A3. This highlights the substantial carbon savings we can achieve by integrating renewable energy into our production processes.

Most of our materials are from the North of Italy except for Hemp Shives which are sourced from the Netherlands. The local sourcing approach reduces transportation-related carbon emissions and supports local economies.

Sustainability is not only about production but also sourcing. We strive to use waste and by-products from the region whenever possible. While the availability of such residues may vary, we are unwavering in our commitment to sustainable sourcing practices.

In summary mycelium products offer an exceptional ecological profile with remarkably low energy and water requirements.

Should you have any further questions or need more in-depth information, please feel free to reach out. Have a nice day

Nausicaa Foglia
Marketing & Communication
Mogu S.r.l

Via S. Francesco d'Assisi 62,
21020 Inarzo (VA)

Thurner, Christina. Mogu

Am 05.09.2023 um 09:12 schrieb Christina Thurner <christina@grown.bio>:

Hi Claudia,

we're happy to hear that you're interested in our mycelium materials!
But I have to inform you, that our panels are not used in professional building environments yet. Only by people who create hobby structures, garden sheds, carports, self-built tiny houses, bike shelters.
The reason why we don't supply the pro market yet, is that we don't have the required certificates. Topics that should be tested are the insulation value, and fire safety. Also, we will be working on lower price levels!
But our focus is on the packaging market at the moment.

Is it still interesting for you?

Am 19.09.2023 um 09:39 schrieb Christina Thurner <christina@grown.bio>:

Hi Claudia,

thanks for your answer! However, at the moment, we're not working on projects related to the building industry, so we don't have the resources to dedicate to this topic. I'm very sorry, but we won't be able to assist you with this.

We're planning to start focusing on this market in 2025.

Until then, best wishes!



Am 01.11.2023 um 13:48 schrieb Christina Thurner <christina@grown.bio>:

Hi Claudia,

thanks for your message. Yes, the hemp we're using is from the Netherlands.
We only use local agricultural waste.

Best,



Samuel. Biohm

Am 07.09.2023 um 15:42 schrieb hello@biohm.co.uk:

Hello Claudia,

Thanks for getting in touch and keeping up with our development.

We are no longer manufacturers; instead, Biohm helps manufacturers develop high-performance products using biotechnologies to decarbonise their operations.

We have created a novel and innovative way to process our mycelium technology that enables us to achieve the highest social and economic impact on the community while having a low environmental impact.

We are able to achieve this by partnering with key industry players in various markets who manufacture products and/or materials. By licensing our technology, we are able to provide a solution and support our partners and their customers by adapting our technology to create a product that holistically solves their needs, whether they are performance, cost, or impact-related. All the benefits that our mycelium technology can bring depend on the level of complexity of the project and the license's scope and objectives.

I hope this information helps.

Warm regards,
Samuel

11. Urhebererklärung

Vorname: **Claudia**

Name: **Urbani**

Wohnadresse: **Byfangweg 28**

PLZ: **4051**

Ort: **Basel**

Die Unterzeichnende bestätigt hiermit, die Arbeit selber ausgeführt zu haben. Zudem bestätigt sie, die Richtlinie von 20 bis 25 A4-Textseiten für den selbst erfassten Text der Projektarbeit eingehalten zu haben.

Ort:

Basel

Datum:

16.11.2023

Unterschrift:

