ZUKUNFT BAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Bundesinstitut
für Bau-, Stadt- und
Raumforschung
im Bundesamt für Bauwesen
und Raumordnung

BBSR-
Online-Publikation
02/2026

HOME II

Robotergestützte Herstellung von Myzel-Verbundwerkstoffen



von

Prof. Philipp Eversmann
Eda Özdemir
Ole Weyhe
Nadja Nolte
Prof. Dirk Hebel
Nazanin Saeidi
Alireza Javadian
Albert Dwan
Saar Driessen
Simon Lut
Claudia Di Noi
Nicole Varriale
Prof. Dr. Jan Wurm
Andreas Bironf
Tomas Gomez
Richa Saini
Laura Orfali Soria

HOME II

Robotergestützte Herstellung von Myzel-Verbundwerkstoffen

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Wohnen, Stadtentwicklung
und Bauwesen

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ZUKUNFT BAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.
Aktenzeichen: 10.08.18.7-23.09
Projektlaufzeit: 10.2023 bis 09.2025

IMPRESSUM

Herausgeber
Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Deichmanns Aue 31–37
53179 Bonn

Fachbetreuer
Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
Referat WB 3 „Forschung und Innovation im Bauwesen“
Dr. Jan Weckendorf
jan.weckendorf@bbr.bund.de

Autorinnen und Autoren
Universität Kassel, Experimentelles und Digitales Entwerfen und Konstruieren (EDEK)
Prof. Philipp Eversmann (Projektleitung)
eversmann@asl.uni-kassel.de

Eda Özdemir
Ole Weyhe
Nadja Nolte

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Entwerfen und Bautechnik, Professur Nachhaltiges Bauen
Prof. Dirk Hebel
dirk.hebel@kit.edu

Nazanin Saeidi
Alireza Javadian

Arup Deutschland, Berlin
Albert Dwan
albert.dwan@arup.com

Saar Driessen
Simon Lut
Claudia Di Noi
Nicole Varriale

KU Leuven (KUL), Regenerative Architecture, Arts & Design
Prof. Dr. Jan Wurm
jan.wurm@kuleuven.be

Andreas Bironт
Tomas Gomez
Richa Saini
Laura Orfali Soria

Redaktion
Universität Kassel, Experimentelles und Digitales Entwerfen und Konstruieren

Stand
Mai 2026

Gestaltung
Universität Kassel, Experimentelles und Digitales Entwerfen und Konstruieren

Bildnachweis
Titelbild: MycoDivisio, Foto: EDEK, Universität Kassel
Einzelabbildungen siehe Quellenangabe

Vervielfältigung
Alle Rechte vorbehalten

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Zitierweise
Eversmann, P.; Özdemir, E.; Weyhe, O.; Nolte, N.; Hebel, D.; Saeidi, N.; Javadian, A.; Dwan, A.; Driessen, S.; Lut, S.; Di Noi, C.; Varriale, N.; Wurm, J.; Bironт, A.; Gomez, T.; Saini, R.; Orfali Soria, L., 2026: HOME II: Robotergestützte Herstellung von Myzel-Verbundwerkstoffen. BBSR-Online-Publikation 02/2026. Bonn. https://doi.org/10.58007/4g6p-4x03

DOI 10.58007/4g6p-4x03
ISSN 1868-0097 Bonn 2026

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung 9

Abstract 10

Stand der Technik und Forschung 11
- Myzelium 11
- Additive Fertigung mit Holzfilamenten und natürlichen Fasern 11
- Additive Fertigung mit Myzelium 12

Stand der eigenen Forschung: BBSR Projekt HOME 13
- Holz-Myzelium-Verbund 13
- Additive Fertigung mit Furnierstreifen 13
- Additive Fertigung mit Furnierstreifen für die Herstellung von Holz-Myzel-Verbundmaterial 14
- Fertigungskonzept 15

Ziele des Verbundprojekts 18

Forschungsdesign 19

Arbeitshypothesen und Forschungsfragen 19
- Konzeptionierung 19
- Fertigungstechnologien 19
- Charakterisierung 19

Schwerpunkte der Forschungsteams 20
- Universität Kassel, Experimentelles und Digitales Entwerfen und Konstruieren (EDEK) 20
- Institut für Entwerfen und Bautechnik, Fachgebiet Bautechnologie (IEB) (KIT) 20
- ARUP Deutschland GmbH (ARUP) 20
- Regenerative Architecture, Arts & Design (KUL) 20

Projektbeteiligte / Organisationsstruktur 21

Arbeitspakete und Meilensteine 21

Projektergebnisse 24

AP 1 Materialsystem, Konzeptionierung, Vorversuche 24

AP 1.1 Detaillierte Auslegung des Verbundwerkstoffs 24
- Anforderungen an den Holz-Myzel-Bioverbundwerkstoff 24
- Akustische Anforderungen 24
- Anforderungen an die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit 25

AP 1.2 Integration der HOME Ergebnisse für die Materialauswahl 25

AP 1.3 Auswahl der Substrate und Myzelpilzarten 25

AP 1.4 Bewertung der physikalischen und mechanischen Eigenschaften 26
- Mechanische Eigenschaften 26
- Wachstumsverträglichkeit und Schallabsorptionseigenschaften 27
- Bindung zwischen Myzel und Furnier 29

AP 2 Integration Myzelium in digitalen Herstellungsprozess 30

AP 2.1 Konzeptentwicklung für additive Auftragstechnik von Myzelwerkstoffen 30
Anforderungen an die Auftragstechnik 30
Anforderungen an die Prozessschritte 30
Pneumatische Förderung 31

AP 2.2 Entwicklung von Endeffektoren und Verfahren 31
Materialförderung durch Vakuum 31
Verschlussmechanismus und End-Effektor 32
Rüttelprozess 35

AP 2.3 Steuerung des Wachstums unter Beeinflussung klimatischer Parameter 37

AP 2.4 Aushärtungsprozess: Stoppen des Pilzwachstums für großflächige Bauteile 37

AP 2.5 Integration des Myzelsubstrat-Einfüllprozesses im DFG-Roboterlabor 38
Vorversuche mit vorhandener Infrastruktur 38
Versuchsaufbau mit dem Rütteltisch B3000 38

AP 2.6 Entwicklung von Materialadaptionen für das Extrusionsverfahren 39
Druckfestigkeitsversuche 39
Ergebnisse der Druckfestigkeit 40
Materialauswahl 40

AP 2.7 Substrat-/Pilzressourcen zur Verbesserung des Adaptationsprozesses 41

AP 2.8 Optimierungsstudie Bauteilgeometrie für die digitale Fertigung 41
Status Quo der Bauteilgeometrie 41
Additive Myzelauftragstechnik: Möglichkeiten und Grenzen 41
Optimierungsmöglichkeiten der Bauteilgeometrie 42
Die Schichtung des Materials im Schnitt 42
Flächige Gradierung des Materials 44

AP 3 Entwicklung von Verbindungstechnologien 45

AP 3.1 Strukturelle Typologie basierend auf mechanischen Eigenschaften 45
Anschlussformen im Trockenbau 45
Verstärkung und Verbindung von Myzelpaneelen 45
Vorbereitung, Demontage und Modulanschlüsse 46

AP 3.2 Computergestützter Entwurf: Topologisch verzahnte Verbindungssysteme 47

AP 3.3 Andere Verbindungssysteme und strukturelle Integration 49

AP 3.4 Untersuchung von Zuschnittmöglichkeiten / Detaillierung 49
Sägen / Schneiden 51
Fräsen 51
Bohren 51
Schleifen 51
Schneiden mit heißem Draht 51
Laser 51

AP 3.5 Integration in den additiven Fertigungsprozess **51**

AP 3.6 Statischer Entwurf für Verbundsysteme **53**
Grundlagen und Annahmen 53
Zielwerte 54
Lasten 54
Analyse 54

AP 4 Bauteil- und Schalungsentwicklung und Charakterisierung **57**

AP 4.1 Entwicklung und Auslegung von Bauteilen **57**

AP 4.2 Untersuchungen zur Stay-in Place Schalung **58**

AP 4.3 Herstellung von Prüfkörpern zur Charakterisierung **59**

AP 4.4 Strukturelle Charakterisierung von Bauteilen **62**
Testserien und Probenaufbau 62
Mechanische Eigenschaften der Substrate (Serie 1) 63
Einfluss der 3D-Gitterverstärkung (Serie 2) 64
Zusammenfassung und Designimplikationen 65

AP 4.5 Akustik Charakterisierung von Bauteilen **65**
Hintergrund und vorherige Akustikuntersuchungen 66
Messmethodik 69
Schallabsorptionsmessung mit Impedanzrohr 69
Messung der Luftschalldämmung im Prüfstand 71
Akustische Hallraummessung 74
Untersuchungsergebnisse 75
Impedanzrohrmessungen 75
Untersuchung der Luftschalldämmung im Prüfstand 75
Messung der Schallabsorption im Hallraum 78
Zusammenfassung 80

AP 4.6 Physikalische Charakterisierung von Bauteilen **81**
Methode 81
Ergebnisse und Schlussfolgerung 82

AP 5 Demonstratorenentwicklung **84**

AP 5.1 Entwicklung, Formfindung und Oberflächendesign **84**

AP 5.2 Produktion der Demonstratoren zur integrierten Myzelproduktion **88**
Schalungsdesign 88
Rahmeneinfügungssequenz 88
Holzfurnier-Gitterdesign 89
Oberflächendesign und Erstellung einer gradierten Materialverteilung 90
Materialvorbereitung und deposition 91
Trocknungsbedingungen 93

AP 5.3 3D Scanning der Bauteile und Konzepte zur Verbesserung der Präzision **94**

AP 6 Zirkuläre Wertschöpfungskette **95**

AP 6.1 Entwicklung eines Bausystemkonzepts für das Hochskalieren des myzelbasierten Bioverbundsystems inkl. Bauteilanschlüsse 96
Hintergrund 96
Evaluation existierende Trennwandsysteme 98
Designprozess für das Trennwandsystem 100
Mehrlagiges Paneelsystem für akustische Anwendungen 103
Anwendungsfälle 103
Anwendungsfall A – Trennwand für Großraumbüros (Absorption) 104
Anwendungsfall B – Trennwand für Besprechungsräume (Isolierung) 104
Entwicklung des Verbindungsdesigns für den Demonstrator 104
Übersicht über die untersuchten Verbindungsoptionen 104
Zusammenfassung 107

AP 6.2 Stakeholder-Analyse und Interviews für Upscaling 107
Ergebnisse der Interviews (Stakeholder der Kategorie 1) 109
Ergebnisse der Online-Umfrage (Stakeholder der Kategorie 2) 111

AP 6.3 Konzeptionelle Entwicklung einer Wertschöpfungskette für Halbzeuge und Komponenten auf Basis einer automatisierten Produktion 112
Lieferkette vs. Wertschöpfungskette 113
Hintergrund 113
Stand der Technik 113
Grundsätze des zirkulären Designs 114
Systemdesign 115
Lieferkette und Verarbeitungsschritte des Demonstrators 115
Methodik 117
Herausforderungen 119
Chancen 119
Wichtiger Wegbereiter: Übergang zu einer digitalen Kreislaufwirtschaft 120
Überblick Konzeption Wertschöpfungskette 121
Kreislaufwirtschaftliche Materialflüsse 121
Wichtige Stakeholder 123
Wichtige technische Infrastruktur 123
Zusammenfassung 124

AP 6.4 Life Cycle Design und qualitative Entwicklung eines Kreislaufgeschäftsmodells 124

Beschreibung von Änderungen gegenüber dem ursprünglichen Antrag 125

Auswertung 126
Meilenstein 1: Definition eines Lastenhefts 126
Meilenstein 2: Entwicklung eines digitalen Bioherstellungsprozesses 126
Meilenstein 3: Entwicklung von Verbindungstechnologien für Myzeliumbauteile 126
Meilenstein 4: Charakterisierung der Testbauteile 126
Schlussfolgerungen des Gesamtprojekts 126
Projekerfolgsindikatoren 128
Verwertung der Ergebnisse und Ergebnistransfer 129
Wissenschaftliche Anschlussfähigkeit 130
Wirtschaftliche Anschlussfähigkeit 131

Publikationen **132**
Fachzeitschriften 132
Konferenzen 132
Zeitschriften, Bücher 132
Podcast, Radio, Fernsehen 132
Ausstellungen 132

Mitwirkende **134**
Autorinnen und Autoren 134
Fachliche Betreuung 134

Kurzbiographien **135**

Literaturverzeichnis **139**

Anhang **143**
Wertschöpfungskette und Stakeholder 143
LCA 153

Abbildungsverzeichnis **154**

Tabellenverzeichnis **159**

Kurzfassung

Im Vorprojekt HOME konnte das interdisziplinäre Forscherteam nachweisen, dass der entwickelte Holz-Myzel-Bioverbundwerkstoff über Eigenschaften verfügt, die ihn als strukturell belastbares Material einsetzbar machen. Das Ziel des Forschungsprojekts HOME 2.0 - Robotergestützte Herstellung von Myzel-Verbundwerkstoffen ist es nun, den zunächst entwickelten robotisch gesteuerten und klebstofffreien Herstellungsprozess der internen Holzgitterstruktur des entwickelten Verbunds, um die additive, digitale Integration des Myzeliummaterials zu erweitern. Dadurch ergeben sich neue Möglichkeiten im Herstellungs- und Entwurfsprozess, sowie in der Skalierung für ein zukünftiges Anwendungsziel von CO_2 neutralen, akustischen Leichtbautrennwänden aus dem Holz- Myzel-Bioverbundmaterial. Diese Anwendungszielsetzung ergab sich aus der Vorarbeit im Projekt HOME als Resultat mit dem höchsten Nachhaltigkeitspotential. An die Entwicklung von Bauteilkonzepten in HOME anschließend, werden in dieser Forschung außerdem Verbindungstechnologien mithilfe von computergestützten Verfahren untersucht und entwickelt, sowie Möglichkeiten der Materialeinsparung beim Formenbau und in der Gestaltung der Bauteiloberflächen erprobt. Für das strukturelle Verhalten dieser Bautechnologie werden statische Auslegungen und Vorhersagen mithilfe ingenieurbautechnischer Methoden getroffen, gleiches gilt für das akustische Verhalten. Konkrete Potentiale des Materialeinsatzes werden mithilfe von Bauteilversuchen erarbeitet und durch die Entwicklung von Design-Kits herausgestellt. Diese können zur Kommunikation mit Stakeholder-Firmen aus Materialherstellung, Verarbeitung und Anwendung verwendet werden. An der Erreichung der Ziele wird das Projektkonsortium, welches bereits im Projekt HOME interdisziplinär zusammenwirkte, gemeinsam arbeiten. Dadurch werden Fachwissen und Forschungserkenntnisse zu additiver Herstellungstechnik, Biowachstumstechnologien und integriertem Design und Engineering bestmöglich kombiniert.

Abstract

In the preliminary project HOME, the interdisciplinary research team was able to demonstrate that the developed wood-mycelium bio-composite has properties that make it usable as a structurally resilient material. The goal of the research project HOME 2.0 - Robotic Manufacturing of Mycelium Composites is now to extend the initially developed robotically controlled and adhesive-free manufacturing process of the internal wood lattice structure of the developed composite to include the additive, digital integration of the mycelium material. This opens up new possibilities in the manufacturing and design process, as well as in the scaling for a future application target of CO_2 neutral, acoustic lightweight partition walls made of the wood-mycelium bio-composite material. This application target emerged from preliminary work in the HOME project as the outcome with the highest sustainability potential. Following on from the development of component concepts in HOME, this research will also investigate and develop joining technologies using computer-aided methods, and test ways of saving materials in mold construction and in the design of component surfaces. Structural design and predictions are made for the structural behavior of this building technology using engineering methods, and the same applies to the acoustic behavior. Concrete potentials of material use are worked out with the help of component tests and highlighted through the development of design kits. These can be used for communication with stakeholder companies from material production, processing and application. The project consortium, which already worked together in an interdisciplinary way in the HOME project, will work together to achieve the objectives. This will provide the best possible combination of expertise and research knowledge in additive manufacturing technology, bio-growth technologies and integrated design and engineering.

Stand der Technik und Forschung

Myzelium

Viele Pilze, insbesondere diejenigen, die wir heute als Speise- und Arzneipilze kultivieren, ernähren sich von lignozellulosehaltigen Abfallstoffen (Substraten) und bilden ihr Myzel als Wurzelgeflecht, das in einem hocheffizienten biologischen Prozess als natürliches Bindemittel für das Substrat dient. Durch den Abbau von Pflanzensubstraten, bei denen es sich oft um Abfallprodukte wie Sägemehl, Schäben oder Schalen handelt, bindet das Pilzmyzel diese zu einem Materialverbund. Auf diese Weise können Produkte in einem umweltfreundlichen Verfahren hergestellt werden und dienen z.B. als potenzieller Ersatz für verschiedene energieintensive Baustoffe. Zusätzlich können Produkte aus Myzel CO_2 absorbieren und sich dementsprechend positiv auf die Klimabilanz ausweisen. Am Ende ihres Lebenszyklus können die myzelgebundenen Materialien recycelt oder kompostiert werden (Jones et al., 2017). Da keine giftigen Stoffe oder synthetischen Komponenten verwendet werden, passen die Materialien in das Modell der Kreislaufwirtschaft (Javadian et al., 2020).

Myzelmaterialien sind sehr anpassungsfähig und wurden bereits in einer Vielzahl von Anwendungen eingesetzt, darunter 3D-Druck (Soh et al., 2020 und Goidea et al., 2020), Verpackungen (Abhijith et al., 2018), Haushaltsgeräte (Fairs, 2013), Textilien (Silverman et al., 2020 und Johnson & Carlson, 1978 und Gandia et al., 2021, S. 21) und prototypische Pavillonstrukturen (Heisel et al., 2017 und Javadian et al., 2020 und Chan et al., 2021). Die bisherige Forschung hat vorteilhafte Materialeigenschaften wie geringe Wärmeleitfähigkeit, starke Schallabsorption und Feuerbeständigkeit festgestellt (Jones et al., 2020). Der für den Baubereich gebräuchlichste Ansatz ist die Herstellung von Myzelbausteinen, die zu größeren Strukturen zusammengesetzt werden. Diese Anwendung beruht jedoch häufig auf Substrukturen und ist aufgrund der inhärenten Eigenschaften des Myzels, welche nur komprimierte Strukturen zulassen (Silverman et al., 2020 und Heisel & Hebel, 2019) geometrisch begrenzt. Es wurden auch Studien zu monolithischen Myzelkonstruktionen durchgeführt, aber diese Systeme erfordern entweder große Gerüste oder umfangreiche Verstärkungssysteme, die in den meisten Fällen die strukturellen Funktionen übernehmen und das Myzel auf eine Oberflächenveredelung und nicht auf ein tragendes Material reduzieren (Dessi-Olive, 2019).

Die Bioverbundwirkung von Holz und Myzelium für Bausysteme für den Innenraum konnte nachgewiesen werden; allerdings nutzt hier die konventionelle Behandlung von tragenden Holzrahmen und nichttragenden Ausfachungen nicht das Potential der Verbundbauweise (Mogu Srl., 2022).

Um die mangelnde Zug- und Biegefestigkeit des Myzels zu kompensieren, wurde in jüngster Zeit die Forschung zur Verstärkung von Myzel entwickelt. Gewebte Textilien, Holzfasern, oder 3D-gedruckte räumliche Gitter gehören zu den verwendeten Methoden (Costalonga Martins et al., 2020, Pelletier et al., 2019 und Özdemir et al., 2022).

Allerdings sind diese Studien jedoch entweder stark von der manuellen Herstellung abhängig, oder es liegen nur sehr wenige Daten über die Auswirkungen der Verstärkung auf die Festigkeit des Myzelverbunds vor. Für Bauanwendungen wurden bisher nur myzelhaltiger Schaum (MBF) und myzelhaltige Sandwich Verbundwerkstoffe (MBSC) entwickelt und auf ihre Eigenschaften untersucht (Girometta et al., 2019). Letzteres verwendet Naturfasertextilien auf der Ober- und Unterseite der Bauteile, um den Biegewiderstand zu erhöhen (Jiang et al., 2017).

Die Verwendung der Materialien ist nach wie vor, aufgrund des begrenzten Forschungswissens, in der Regel auf nicht-strukturelle oder semi-strukturelle Anwendungen beschränkt.

Additive Fertigung mit Holzfilamenten und natürlichen Fasern

Filamente mit Holzanteil sind bereits auf dem Markt erhältlich. Sie bestehen meist aus PLA und gemahlenem Holz. Die daraus durch 3D-Druck produzierten Objekte weisen jedoch viel geringere mechanische Eigenschaften auf als die Objekte, die durch herkömmliche Herstellungsverfahren hergestellt werden. Das

Vorhandensein von Holzmehl verändert die Mikrostruktur der Matrix, was zu einer Verringerung der Grenzflächenverträglichkeit der Verbundstoffe führt. Studien zeigen, dass der Holzanteil sich sogar negativ auf die strukturellen Eigenschaften von PLA auswirkt (Kariz et al., 2018). Aktuelle Studien zeigen das FDM 3D-Drucken von natürlichen Fasern wie z.B. mit Cellulose-Fasern (Liu et al., 2019) und auch von endlosen flachsfaserverstärkten Biokompositen für strukturelle Anwendungen (Le Duigou et al., 2019). Kontinuierliche Fasern können mit einer modifizierten FDM-Druckmethode additiv aufgetragen werden.

Additive Fertigung mit Myzelium

Der 3D-Druck von Myzel ist ein neues Forschungsgebiet. Während durch 3D-Druck erzeugte Oberflächen das Wachstum des Myzels unterstützen (Goidea et al., 2020) sind für großflächige Strukturen noch keine zeiteffizienten Fertigungsverfahren entwickelt worden und die Richtungsabhängigkeit des Herstellungsverfahrens kann dazu führen, dass die resultierenden Bauteile eine relativ geringe strukturelle Leistungsfähigkeit aufweisen (Ulu et al., 2015).

Stand der eigenen Forschung: BBSR Projekt HOME

Das beantragte Forschungsprojekt fußt auf Erkenntnissen aus dem vom BBSR geförderten Projekt HOME, welches die Entwicklung einer Holz-Myzelium-Verbundbauweise für CO_2-neutrale, zirkuläre Innenausbauten für Büroflächen zur Aufwertung des Gebäudebestands zum Ziel hatte. Ausgehend von dem Potential des Pilzmyzeliums, als schnell erneuerbarer, regenerativer, erschwinglicher kohlenstoffarmer Baustoff, wurden in Verbindung mit additiven, holzbasierten Herstellungsverfahren Bioverbundbauweisen für Innenraumanwendungen erforscht, um dem Mangel an biobasierten Materialien für den Innenausbau zu begegnen. Dafür hat das beantragende Forschungskonsortium mit unterschiedlichen Spezialisierungen und Fachwissen zu additiver Herstellungstechnik, Biowachstumstechnologien und integriertem Design und Engineering aus der Universität Kassel (Prof. Eversmann), dem KIT (Prof. Hebel) und ARUP (Dr.-Ing. Jan Wurm) im Projekt HOME einen innovativen Holz-Myzel-Verbundwerkstoff vorgeschlagen, der einen CO_2-neutralen Innenausbau von Büroräumen ermöglicht (Rossi et al. 2022).

Holz-Myzelium-Verbund

Die Pilzspezies *Ganoderma lucidum (G. lucidum) wurde* aufgrund des bereits bekannten schnellen Wachstums für den Holz-Myzel-Verbund ausgewählt. Der Pilz wird auf Hanfschäben kultiviert und anschließend mit Ahornfurnieren verstärkt. Aus der in HOME getroffenen Vorauswahl heimischer, verfügbarer Furnierhölzer wurde Ahorn ausgewählt, da dieses eine sehr gute Kompatibilität mit dem Wachstum des Myzels und außerdem die beste Holz-Holz-Bindungsqualität beim nachfolgend beschriebenen Fertigungskonzept zeigte.

Additive Fertigung mit Furnierstreifen

An der Universität Kassel wurde ein neues additives Herstellungsverfahren und Druckmaterial auf Basis von Holzfurnier entwickelt, das die Basis für die Herstellung des Holz-Myzel-Verbundwerkstoffs darstellt. Diese additive holzbasierte Herstellungstechnik eignet sich grundsätzlich für die effiziente Herstellung großer Bauteile durch räumliche Gitterstrukturen, ähnlich zu Abstandsgewirken in der Textiltechnik, oder für gewickelte Bauteile (siehe Abbildung 1) (Göbert et al., 2022 und Eversmann et al., 2021). Als Strukturmaterial wird ein Endlosband aus Furnierstreifen verwendet. Dessen natürliche Fasern sind intakt, durchgängig und zugfest. Das ist nicht der Fall bei allen aktuell bekannten Holzfilamenten, die aus einer Mischung aus Thermoplasten und gemahlenem Holz bestehen (Das et al. 2021). In diesen Produkten sind die Langfasern des natürlich gewachsenen Holzes nicht mehr vorhanden, wodurch die inhärenten Materialeigenschaften des Holzes wie Anisotropie und strukturelle Belastbarkeit verloren gehen.

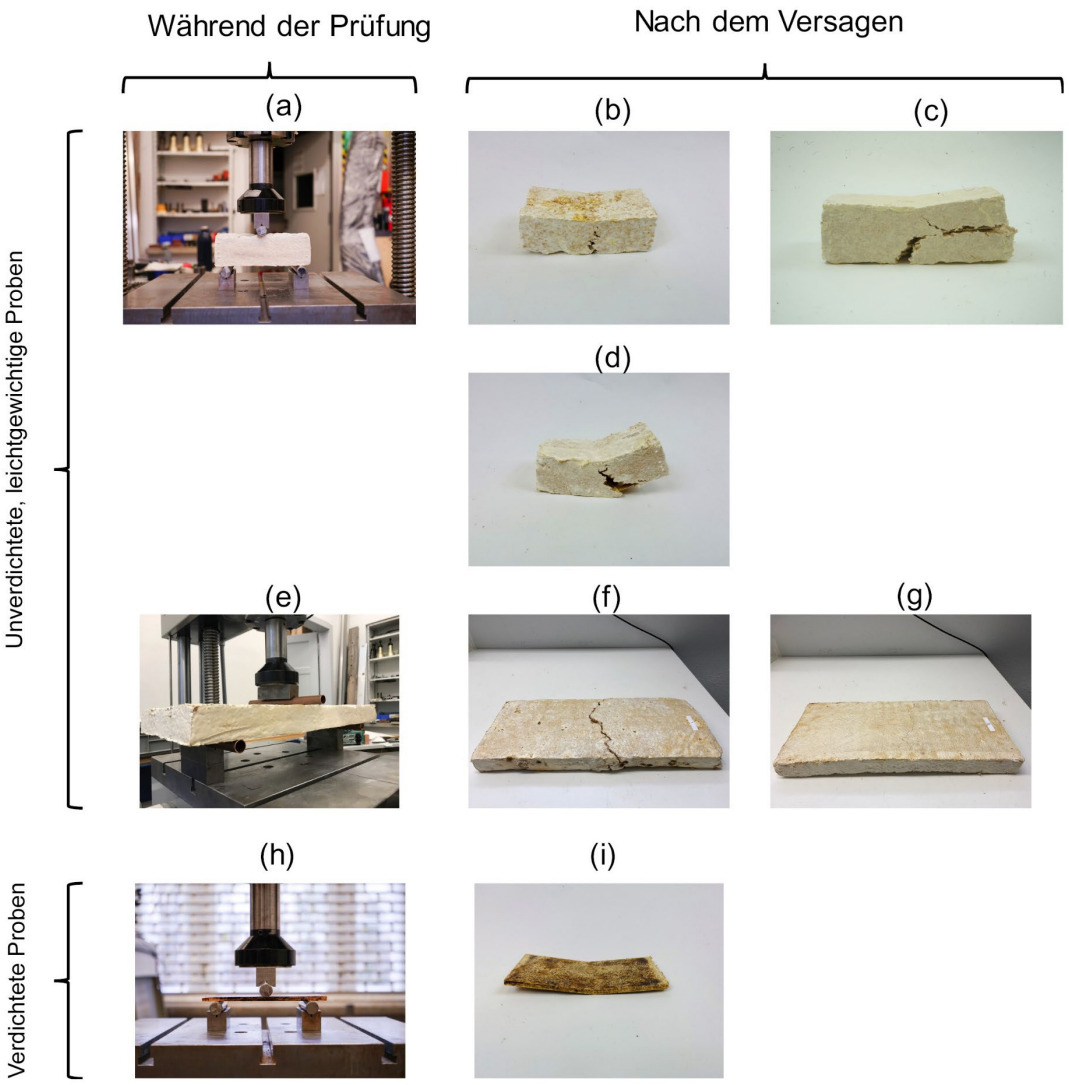


Quelle: EDEK

Abbildung 1 Resultierende Strukturen aus additiven Herstellungsverfahren auf Basis von Holzfurnier

Additive Fertigung mit Furnierstreifen für die Herstellung von Holz-Myzel-Verbundmaterial

In HOME wurden auf Basis des entwickelten additiven Herstellungsverfahrens verschiedene Verstärkungsmöglichkeiten von Myzelmaterialien getestet, die auf einerseits topologisch gestalteten, verschiedenen Variationen von Holzfurniergittern als Verstärkungssystemen basieren und zum anderen auf der Nachbehandlung des Verbundmaterials durch Kompression mit Hitze und Druck. Anhand struktureller Tests an physischen Prototypen (siehe Abbildung 2) wurden die grundlegenden mechanischen Eigenschaften untersucht (Özdemir et al., 2022). Es wurde gezeigt, dass sich beide Strategien grundsätzlich als wirksame Methoden zur Erhöhung der Biegefestigkeit eignen und dass die Wirkung von Furniergittern als Verstärkungssysteme eng von der Dichte und Konfiguration des Gitters abhängig ist.

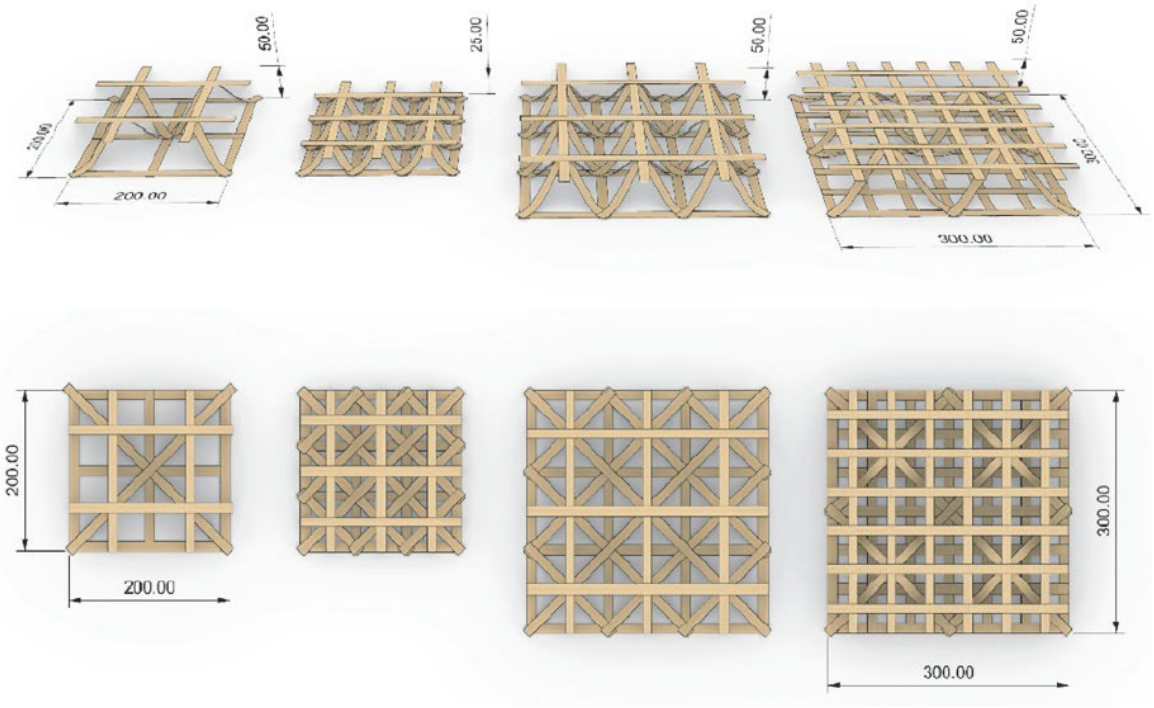


Quelle: KIT

Abbildung 2 Strukturelle Tests an verschiedenen physischen Variationen des Verbundmaterials aus Myzelmaterial und Holzfurniergittern als Verstärkungssysteme

So konnte das Forscherteam bereits zeigen, dass der entwickelte neuartige Holz-Myzel-Bioverbundwerkstoff mit Myzelmaterial als Matrix und Holzfurniergitter als Verstärkung über Eigenschaften verfügt, die einen Einsatz als strukturell belastbares Material ermöglichen. Wenn das Furnier als kontinuierliches System, wie z. B. ein räumliches 3D-Gittersystem, konzipiert ist, kann es außerdem durch die Wahl der Geometrie anstelle einer Materialanhäufung zusätzliche Steifigkeit und Festigkeit bieten. Auf dieser Basis werden 3D-Gittersysteme untersucht, die ein im Verbund oben und ein untenliegendes Gitter miteinander verbinden

(siehe Abbildung 3). Diese sollen zur Vermeidung von Scherbrüchen im unkomprimierten Verbund eingesetzt werden.



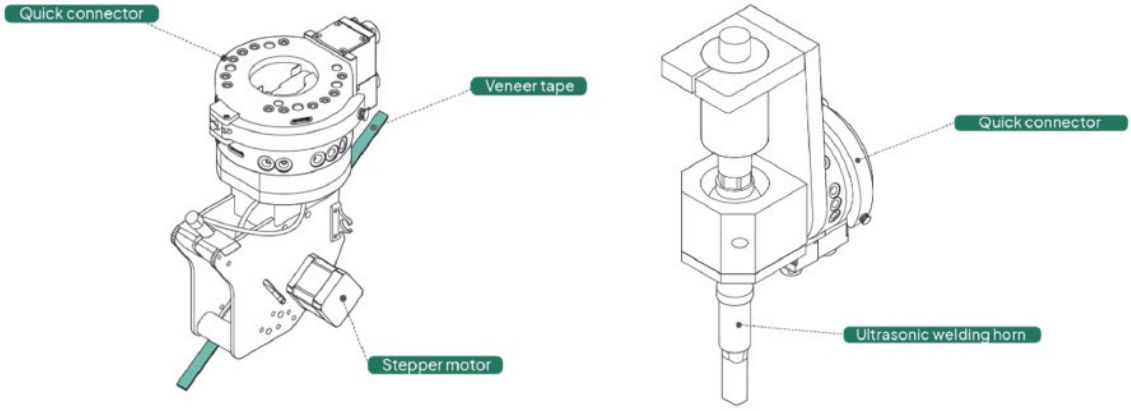
Quelle: EDEK

Abbildung 3 3D Gittersysteme in verschiedenen Layouts

Das Forschungsprojekt hat somit die grundlegenden Materialinformationen für die weitere Entwicklung des Systems im größeren Maßstab geliefert. Die Auswertung der Anwendungsparameter für verschiedene Innenausbauten zeigt den potenziellen Einsatzbereich eines solchen Verbundwerkstoffs für akustische Leichtbauelemente im Innenausbau auf. Für die Hochskalierung sind allerdings weitere grundlegende Forschungsansätze für die Integration des Biowachstums in den digitalen Herstellungsprozess, neue Verbindungstechniken, Einsparung von Materialien im Formenbau und Oberflächengestaltung notwendig.

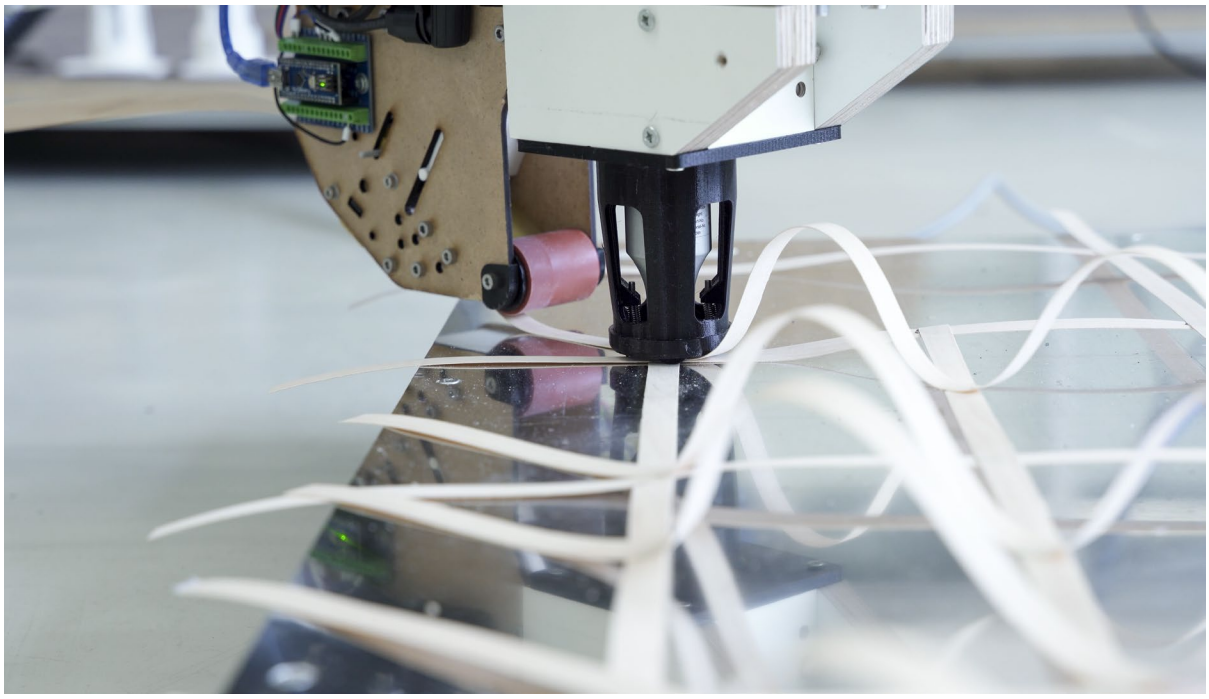
Fertigungskonzept

Die Verstärkungsgitter aus dem Furnier werden mit einer speziellen, kleberfreien Additive Manufacturing (AM)-Methode hergestellt, die es ermöglicht, kontinuierliche Holzfasern entweder in 2-dimensionalen oder 3-dimensionalen Anordnungen zu platzieren und durch Ultraschallschweißen miteinander zu verbinden. Spezifische Endeffektoren für die robotische Fertigung wurden hierfür entwickelt (siehe Abbildung 4 und Abbildung 5).



Quelle: EDEK

Abbildung 4 In HOME entwickelte Endeffektoren zum Platzieren (links) und Verschweißen (rechts) von Holzfilamenten



Quelle: EDEK

Abbildung 5 Prozess des Platzierens sowie des Verschweißens der Holzfurniere mit den entwickelten Endeffektoren

Sobald die Gitter hergestellt sind, wird ein mit Myzel beimpftes Substrat robotisch hinzugefügt. Während des Wachstums verbindet es sich mit dem Gitter und bildet den Verbundwerkstoff (siehe Abbildung 6). Dieser kann durch Veränderung der Position und Anordnung der Bewehrungsgitter in Bezug auf die Myzelmatrix angepasst werden, ähnlich wie Stahlbewehrung zu Betonelementen hinzugefügt werden kann, um deren strukturelle Fähigkeiten zu erhöhen. Durch diese Verarbeitungsstrategie können die inhärenten Materialeigenschaften des Holzes wie Anisotropie und strukturelle Belastbarkeit erhalten bleiben. Das Pilzmyzelsubstrat wiederum hilft, die Gitterstruktur insbesondere an den Druckbereichen sowie an den Verbindungspunkten zu stabilisieren, wodurch Matrix und Verstärkung gemeinsam vielversprechende Wechselwirkungen aufweisen.



Quelle: EDEK

Abbildung 6 Deutlich erkennbare Verbindung zwischen dem Furniergitter und dem Myzelsubstrat, entstanden durch Myzelwachstum

Für die Umsetzung eines Verbundbausystems im Architekturmaßstab wurde die RAP-Lab Anlage der Universität Kassel (DFG Großgerät „Forschungsanlage für Robotische Architektur Produktion“) eingesetzt, um eine Möglichkeit zur Integration der Platzierung des Myzelmaterials zu erweitern. Hierdurch sollte ein Konzept für eine vollständige Automatisierung des Prozesses entwickelt werden. Dazu wurden Möglichkeiten der Platzierung des Materials über Pick- and Place Verfahren, Extrusionsverfahren von beimpftem Material und Extrusionsverfahren von Myzelium prototypisch untersucht. In diesem Maßstabssprung sollten außerdem automatisierte und verlorene (Stay-in-Place-)Schalungssysteme untersucht werden, die mittels 3D-Druck von Holzfilamenten bzw. der Verwendung von Naturtextilien hergestellt wurden. Darüber hinaus sollen großmaßstäbliche Aushärtungsprozesse durch Erhitzen und Trocknen erprobt werden.

Ziele des Verbundprojekts

Das Ziel des Verbundprojekts ist die digitale Integration des Myzeliumwachstums in den Produktionsprozess, wodurch neue gestalterische und funktionale Möglichkeiten eröffnet werden. Ein zentrales Anliegen ist die Entwicklung innovativer Verbindungstechnologien, die eine effiziente und stabile Nutzung der Myzeliumwerkstoffe ermöglichen. Darüber hinaus sollen ingenieurbautechnische Methoden entwickelt werden, um die statische Auslegung und das strukturelle Verhalten der Bauteile präzise vorherzusagen. Ebenso wichtig ist die Vorhersage des akustischen Verhaltens der Bauteile, um diese optimal für ihren Einsatz als akustische Leichtbautrennwände zu charakterisieren und weiterzuentwickeln.

Ein weiterer wesentlicher Aspekt des Projekts ist die detaillierte Charakterisierung der Bauteile, um deren Eigenschaften und Leistungsfähigkeit umfassend zu verstehen und gezielt zu verbessern. In diesem Zusammenhang wird auch die Entwicklung von Bauteilen vorangetrieben, die speziell für den Einsatz als akustische Leichtbautrennwände konzipiert sind.

Um die Innovationskraft des Projekts zu maximieren, wird eine Stakeholder-Gruppe aufgebaut, die aus interessierten Firmen der Materialherstellung, Verarbeitung und Anwendung besteht. Diese Gruppe soll den Wissensaustausch fördern, neue Impulse geben und die praktische Umsetzung der entwickelten Technologien in der Industrie unterstützen.

Forschungsdesign

Arbeitshypothesen und Forschungsfragen

Konzeptionierung

- Welcher Vorfertigungsgrad, welche Komponentenabmessungen und welche Installationsmethodologie bieten das höchste Potenzial für eine automatisierte Fertigung und Skalierung der Bauweise?
- Welche gestalterischen Möglichkeiten und Limitationen ergeben sich durch die Optimierung des Fertigungsprozesses?

Entwicklung der Bauteile, der Faserverstärkung und der Verbindungstechniken auf den verschiedenen Gestaltungsebenen:

(1) Bauteilentwicklung:

- Wie kann durch die die dreidimensionale Ausgestaltung der Bauteile die Stabilität beeinflusst und optimiert werden?
- Welchen raumakustischen Einfluss hat die Gestaltung der Oberflächen?
- Welche biotechnologischen und fertigungstechnischen Möglichkeiten gibt es für die Oberflächen?

(2) Faserverstärkung:

- Welche Gestaltungsmöglichkeiten ergeben sich für die Bauteile und Bauteilverbindungen auf Basis der innenliegenden Gitterstruktur?

(3) Verbindungstechniken:

- Wie kann eine Baukonstruktion für Verbindungen / Verbindungselemente der Bauteile aussehen?
- Welche Modularisierung und Vorfertigungsgrößen sind sinnvoll?

Fertigungstechnologien

- Wie lässt sich die Biokultivierung des Myzels in den additiven Fertigungsprozess integrieren?
- Welche Funierspezifikationen (Holzart, Breite, Dicke) eignen sich besonders für den mit Myzelium kombinierten additiven Fertigungs- und Bindungsprozess?
- Gibt es Fertigungsmethoden für verlorene bzw. Stay-in-Place-Schalungen für Myzeliumbauteile?
- Wie lässt sich Materialkomprimierung in den Fertigungsprozess als strukturverstärkende Technologie integrieren?
- Welche Bauteilverbindungsmethoden lassen sich direkt in den Fertigungsprozess integrieren?

Charakterisierung

- Wie wirkt sich eine Skalierung der Kompositkomponenten auf die Testergebnisse der mechanischen und akustischen Tests aus?
- Welche mechanischen Verbesserungen sind über Komprimierung des Verbundmaterials erreichbar?
- Welche maximale Leistungsfähigkeit besitzt der Verbundwerkstoff bei Kriechversuchen und Beständigkeitsuntersuchungen?

Schwerpunkte der Forschungsteams

Universität Kassel, Experimentelles und Digitales Entwerfen und Konstruieren (EDEK)

- Automatisierungstechnologie
- Geometrische Untersuchung und gestalterische Möglichkeiten
- Digitale Formfindung

Institut für Entwerfen und Bautechnik, Fachgebiet Bautechnologie (IEB) (KIT)

- Konzeptentwicklung Auftragstechnik Myzelwerkstoffe
- Steuerung Myzelwachstum und Aushärtungsprozess
- Materialadaptation für das Extrusionsverfahren
- Materialcharakterisierung
- Bauteilcharakterisierung

ARUP Deutschland GmbH (ARUP)

- Ingenieurbautechnische Entwicklung
- Auslegung und Dimensionierung
- Akustisches Design

Regenerative Architecture, Arts & Design (KUL)

- Akustische Charakterisierung
- Entwicklung einer Konstruktionstypologie
- Entwicklung eines Bausystemkonzepts
- Konzeptionelle Entwicklung einer Circular Value Chain und eines qualitativen Business Cases

Projektbeteiligte / Organisationsstruktur

Die Universität Kassel trat im Projekt als Sprecher des Verbundes auf und stellte die übergeordnete Organisationsstruktur bereit. Im Rahmen der Arbeiten wurden additive Automatisierungstechnologien entwickelt und optimiert, um Bautechnologien für akustische Leichtbautrennwände auf Basis des im Projekt HOME erarbeiteten Holz-Myzel-Bioverbundmaterials zu realisieren. Dazu gehörten insbesondere die Materialforschung, die Entwicklung von (Verfahrens-)Prototypen, die Aufbereitung und Auswertung von Experimenten sowie die Projektsteuerung und die Überwachung zentraler Projektprozesse.

Am KIT wurden die mechanischen Eigenschaften der entwickelten und hochskalierten Verbundmaterialien untersucht und die Verbundwirkung im Hinblick auf das Anwendungsziel charakterisiert. Darüber hinaus erfolgten Analysen zur Fertigungstechnologie und zur Materialcharakterisierung. Hierzu zählten unter anderem Materialuntersuchungen, die Entwicklung von Prototypen, die Auswertung experimenteller Daten, die Koordination und Durchführung von Prüfverfahren sowie die Weiterentwicklung von Verfahren und Prototypen bis hin zur Steuerung und Überwachung der Bauprozesse.

ARUP übernahm die Kompetenzbereiche Raumakustik, Tragwerk und Nachhaltigkeit. Unter der Leitung von Dr. Jan Wurm wurden die Fachdisziplinen koordiniert und die Konzeptentwicklung in enger Zusammenarbeit mit den weiteren Projektpartnern vorangetrieben. Auf Grundlage der optimierten additiven Fertigungsprozesse entstanden Baukonstruktionen für Bauteile des Holz-Myzelium-Verbunds.

Eine akustische Testung der Bauteile wurde an der KU Leuven durchgeführt. Um eine nachhaltige Bauweise zu gewährleisten, wurde ein Konzept für ein zirkuläres und automatisierbares Bausystem erarbeitet, das eine Hochskalierung des Bioverbundsystems ermöglichte. Die entwickelten Konzeptionen und Materialsysteme wurden hinsichtlich ihrer Eignung quantifiziert, bewertet und optimiert und anschließend in integrierte Lösungen überführt. Darüber hinaus wurden Wertschöpfungsketten sowie grundlegende Geschäftsmodelle konzipiert.

Arbeitspakete und Meilensteine

AP 0 Projektleitung

- Projektmanagement (EDEK)
- Einführungsveranstaltungen (ALL)
- Organisation regelmäßiger Projekttreffen (EDEK)
- Projekttage Zukunft Bau (ALL)
- Stakeholder Meetings Industrie (ARUP)
- Dokumentation und Publikation der Ergebnisse (ALL)
- Berichterstattung (ALL)

AP 1 Materialsystem, Konzeptionierung, Vorversuche (3 Monate)

1.1 Detaillierte Auslegung des Verbundwerkstoffs (ALL)

1.2 Integration der HOME Ergebnisse für die Materialauswahl (KIT)

1.3 Auswahl der Substrate und Myzelpilzarten (KIT)

1.4 Bewertung der physikalischen und mechanischen Eigenschaften verschiedener Verbundwerkstoff-Formulierungen (KIT)

MEILENSTEIN 1: Anforderungen, Grundwerkstoffe und Vorversuche definiert

AP 2 Integration Myzelium in digitalen Herstellungsprozess (10 Monate)

2.1 Konzeptentwicklung für additive Auftragstechnik von Myzelwerkstoffen (KIT)

2.2 Entwicklung von Endeffektoren und Verfahren (EDEK)

2.3 Steuerung des Wachstums unter Beeinflussung klimatischer Parameter (KIT)

2.4 Aushärtungsprozess: Stoppen des Pilzwachstums für großflächige Bauteile (KIT, EDEK)

2.5 Versuche im DFG Roboterlabor (EDEK)

2.6 Entwicklung von Materialadaptionen für das Extrusionsverfahren (KIT)

2.7 Substrat-/Pilzressourcen zur Verbesserung des Adaptationsprozesses (KIT)

2.8 Optimierungsstudie Bauteilgeometrie für die digitale Fertigung (KUL)

MEILENSTEIN 2: Digital integrierter Bioherstellungsprozess im Labor realisierbar

AP 3 Entwicklung von Verbindungstechnologien

3.1 Strukturelle Typologie basierend auf mechanischen Eigenschaften (ARUP)

3.2 Computergestützter Entwurf: Topologisch verzahnte Verbindungssysteme (EDEK, ARUP)

3.3 Andere Verbindungssysteme und strukturelle Integration (ARUP)

3.4 Untersuchung von Zuschnittmöglichkeiten / Detaillierung (EDEK)

3.5 Integration in den additiven Fertigungsprozess (EDEK)

3.6 Statischer Entwurf für Verbundsysteme (ARUP)

MEILENSTEIN 3: Verbindungstechnologien entwickelt und charakterisiert

AP 4 Bauteil- und Schalungsentwicklung und Charakterisierung

4.1 Entwicklung und Auslegung von Bauteilen (EDEK)

4.2 Untersuchungen zur Stay-in Place Schalung (EDEK)

4.3 Herstellung von Prüfkörpern zur Charakterisierung (KIT)

4.4 Strukturelle Charakterisierung von Bauteilen (KIT)

4.5 Akustik Charakterisierung von Bauteilen (KUL)

4.6 Physikalische Charakterisierung von Bauteilen (KIT)

MEILENSTEIN 4: Hergestellte Testbauteile erfüllen definierte Anforderungen

AP 5 Demonstratorenentwicklung (6 Monate)

5.1 Entwicklung, Formfindung und Oberflächendesign (EDEK)

5.2 Produktion der Demonstratoren zur integrierten Myzelproduktion (EDEK)

5.3 3D Scanning der Bauteile und Konzepte zur Verbesserung der Präzision (EDEK)

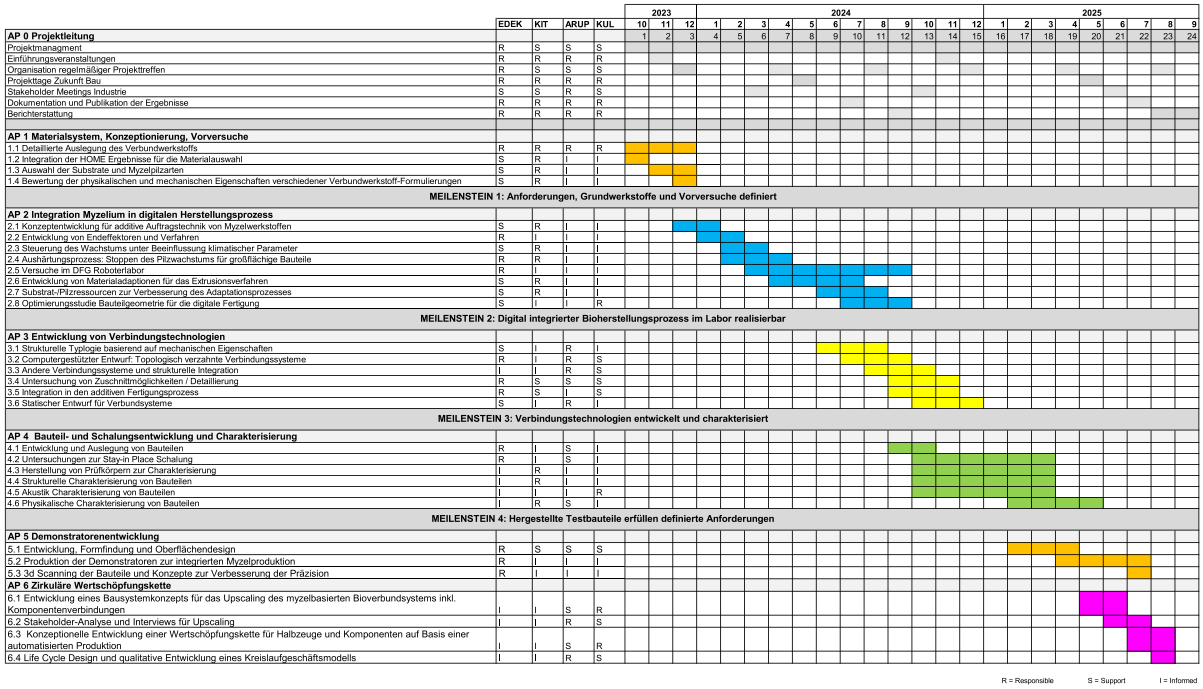
AP 6 Zirkuläre Wertschöpfungskette

6.1 Entwicklung eines Bausystemkonzepts für das Upscaling des myzelbasierten Bioverbundsystems inkl. Komponentenverbindungen (KUL)

6.2 Stakeholder-Analyse und Interviews für Upscaling (ARUP)

6.3 Konzeptionelle Entwicklung einer Wertschöpfungskette für Halbzeuge und Komponenten auf Basis einer automatisierten Produktion (KUL)

6.4 Life Cycle Design und qualitative Entwicklung eines Kreislaufgeschäftsmodells (ARUP)



Quelle: EDEK

Abbildung 7 RASI Schema des Projektplans

Projektergebnisse

AP 1 Materialsystem, Konzeptionierung, Vorversuche

Im Gegensatz zum Schwerpunkt auf der Erforschung der mechanischen Eigenschaften des Verbundstoffs für strukturelle Anwendungsfälle in HOME1.0 konzentrierte sich HOME2.0 auf die Untersuchung der Beziehung zwischen Design (Materialabstufung, Verstärkungsgitterdesign und Oberflächengestaltung) und akustischer Leistung. Dabei dienten die in HOME1.0 gewonnenen Erkenntnisse über die strukturelle Leistungsfähigkeit als Grundlage. Die Hauptziele bestanden in der Entwicklung einer selbsttragenden Trennwand sowie in der Weiterentwicklung und Anpassung des zuvor erarbeiteten Materialkonzepts. Dies wurde insbesondere durch die Erhöhung der Abstimmbarkeit der Leistungseigenschaften mittels Schichtung und gezielter Materialauswahl erreicht. Auf diese Weise eröffneten sich neue Möglichkeiten für unterschiedliche akustische Leistungsniveaus, für funktionale Materialabstufungen innerhalb eines Elements sowie für eine neue Designsprache, die sich direkt aus den Leistungsanforderungen ableitete. Die im Arbeitspaket 1 durchgeführten Untersuchungen umfassten eine Analyse des Materialsystems, bei der die Auswahl und Verwendung geeigneter Substrat- und Furniermaterialien sowie die Wahl der passenden Pilzart im Mittelpunkt standen. Auf Grundlage dieser Materialentscheidungen wurde der Verbundwerkstoff konzipiert, wobei ein besonderes Augenmerk auf die Möglichkeit des Hybridwachstums von Hanf- und Sägespänesubstraten gelegt wurde. Ergänzend dazu wurden Vorversuche durchgeführt, um die Eigenschaften des entwickelten Verbundmaterials zu bewerten und sicherzustellen, dass die angestrebten Qualitätskriterien erfüllt wurden.

AP 1.1 Detaillierte Auslegung des Verbundwerkstoffs

Die präzise Auslegung des Verbundwerkstoffs folgte weiterhin den anspruchsvollen Anforderungen des Ziels, CO_2-neutrale, akustisch optimierte Leichtbautrennwände aus Holz-Myzel-Bioverbundmaterial zu entwickeln.

Anforderungen an den Holz-Myzel-Bioverbundwerkstoff

Akustische Anforderungen

Die Festlegung der schalltechnischen Anforderungen basiert auf dem Potenzial für eine direkte Anwendung des entwickelten Verbundmaterials in der Gebäudeplanung und -konstruktion unter Berücksichtigung der aktuellen akustischen Normen und Regelwerke. Im Falle einer Trennwand besteht das zu Grunde liegende, schalltechnische Kriterium darin, dass die Wandkonstruktion und deren konstruktive Anschlüsse an angrenzende / flankierende Bauteile, die Übertragung akustischer Energie von Raum zu Raum genügend reduziert. Das genaue Mindestmaß an Luftschalldämmung einer Trennwand wird im Hinblick auf die vorgesehene Nutzung des durch die Wand vor Lärmübertragung geschützten Raumes definiert. Beispielweise gilt für besonders akustisch schutzbedürftige Raumnutzungen wie z.B. Schlafnutzung oder Unterricht eine öffentlich-rechtlich geschuldete Mindestanforderung an Luftschalldämmung, um Störpotenzial von fremden oder außenliegenden Geräuschquellen konstruktiv auszuschließen. Innerhalb eines Nutzungsbereiches (wie z.B. zwischen Einzelbüroräumen, die von derselben Firma genutzt werden), werden keine Mindestanforderungen durch öffentliches Recht angefordert, sondern zivilrechtlich mit dem Bauherrn abgestimmt und vertraglich geschuldet.

Das Kriterium an Luftschalldämmung wird in Form eines Bau-Luftschalldämm-Maßes *RW* ausgedrückt, das in Dezibel (dB) angegeben wird. Die öffentlich-rechtlich geschuldeten Mindestanforderungen sind als Teil der Bauordnung in der Norm DIN 4109-01 (DIN 4109-1:2018-01, 2018) festgelegt. Empfehlungen für RW-Werte, die zivilrechtlich für Trennwände innerhalb eines Nutzerbereichs abzustimmen sind, werden in Normen wie DIN 4109 (DIN 4109 | 1989-11, 1989) und VDI 2569 (VDI 2569, 2019) gegeben, sind aber für die Baugenehmigung oder die Einhaltung von Vorschriften nicht gesetzlich vorgeschrieben. Standard-Trennwände bestehen in der Regel aus Metall- oder Holzständern für das Tragwerk, Gipskartonplatten für die Wandbekleidungen und Mineralwolle für die Hohlraumdämmung zur Verbesserung der Schalldämmung RW.

Unter Berücksichtigung der gegebenen akustischen Anforderungen besteht ein Forschungsziel darin, diese CO_2- und abfallintensiven aber schalltechnisch bewährten Wandkonstruktionen durch den neuartigen biobasierten Verbundwerkstoff zu ersetzen. Als Forschungsbasis wird die Standardempfehlung an Luftschalldämmung für Büroräume innerhalb einer Nutzungseinheit bei normalem Schallschutz von RW = 37 dB angesetzt.

Untersucht werden die Verhältnisse zwischen Materialeigenschaften des Substrats bzw. des Verbundstoffs zu dem resultierenden, frequenzabhängigen Luftschalldämmvermögen einzelner Prüfobjekte. Eine schichtweise Variation der Rohdichte des Substrats sowie eine Integration strategisch ausgelegter Holzfurnierstrukturen sind bereits für die Laborprüfung vorgesehen.

Anforderungen an die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit

Die Bemessungsanforderungen an eine Trennwand basieren auf den Grenzzuständen der Tragfähigkeit (Ultimate Limit State, ULS) und der Gebrauchstauglichkeit (Serviceability Limit State, SLS) gemäß DIN EN1990 (DIN EN 1990:2021-10 Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung EN 1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010, 2021, S. 2021) und (DIN EN 1991-1-1 Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke - Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau; Deutsche Fassung EN 1991-1-1:2002 + AC:2009, 2010). Wesentliche Einwirkungen, die berücksichtigt werden müssen, sind das Eigengewicht und Horizontallasten, wie sie in Büro- und Arbeitsbereichen typisch sind (Kategorie B). Während das Eigengewicht in der Regel geringe Flächenlasten erzeugt, sind die entscheidenden Lastfälle für das Versagen von Bauteilen (ULS) und die Einhaltung der Durchbiegungsgrenzen (SLS) die horizontalen Lasten, wie Verkehrs- und Stoßlasten. Zudem müssen für die Gebrauchstauglichkeit, Leistungsfähigkeit, das Aussehen der Wand und den Komfort der Nutzer neben den Verformungen auch Schwingungen berücksichtigt werden.

AP 1.2 Integration der HOME Ergebnisse für die Materialauswahl

Im Rahmen von HOME 1.0 wurden verschiedene Arten von Furnier, darunter Bambus, Eiche, Weide, Buche und Ahorn untersucht. Es wurden Ausreißtests durchgeführt, um die Wachstumskompatibilität und die Haftfestigkeit zwischen Myzel und Furnier zu bewerten. Von den verschiedenen getesteten Furnieren zeigte Bambusfurnier die beste Leistung, gefolgt von Ahornfurnier. Aufgrund der größeren Verfügbarkeit von Ahornfurnier in Europa, der Vergleichsmöglichkeit zu den erzielten Ergebnissen in HOME und der besseren Ultraschallschweißleistung von Ahornfurnier beschloss das Konsortium, auch in HOME 2.0 weiterhin Ahornfurnier (12 mm breit, 0,5 mm dick) mit Vliesunterlage zu verwenden.

AP 1.3 Auswahl der Substrate und Myzelpilzarten

In der Untersuchung der Eigenschaften von Hanf- und Sägemehlsubstraten spielt die Fasergröße eine entscheidende Rolle, da sie maßgeblich die strukturellen und akustischen Eigenschaften der daraus hergestellten Verbundstoffe beeinflusst. Unterschiede in der Fasergrößenverteilung führen zu variierenden Dichte- und Leistungsmerkmalen der Materialien, was sich sowohl auf die Leichtigkeit als auch auf die Schallisolierungseigenschaften auswirkt.

Die Fasergröße sowohl im Hanf- als auch im Sägemehlsubstrat liegt zwischen 4 mm und weniger als 0,5 mm. Tabelle 1 zeigt die Fasergrößenverteilung für Hanf- und Sägemehlfasern. Die größere Größe der Hanffasern trägt zu einer leichtgewichtigen Struktur bei, was sich positiv auf die akustische Leistung auswirkt, während die kleinere Größe der Sägemehlfasern einen dichteren Verbundstoff ergibt, der die schalldämmende Wirkung des Verbundstoffs begünstigt.

Tabelle 1 Fasergrößenverteilung für Hanf- und Sägemehlfasern, ermittelt mit einem Fritsch Sieb. Damit wird der Durchmesser der Fasern ermittelt, die Länge der Fasern kann deutlich abweichen.

Größe	4 mm	2.3 mm	1 mm	<= 500 µm
Hanf	63.5%	3.0%	24.0%	9.5%
Sägemehl	2.10%	5.90%	44.60%	47.40%

Quelle: KIT

Um die optimale Dichte für die einzelnen Substrate zu ermitteln, wurde auch die Druckfestigkeit von Verbundwerkstoffen aus reinem Hanf und reinem Sägemehl bewertet, die mit *Ganoderma lucidum* mit unterschiedlichen Dichten gewachsen sind. Die Ergebnisse sind in AP 2.6 dargestellt.

Das Ergebnis ist, dass das Materialkonzept für HOME 2.0 Hanfschäben und Buchensägemehl als Wachstumssubstrat für das Myzel von *Ganoderma lucidum* vorsieht, während ein Gitter aus Ahornfurnier zur zusätzlichen Verstärkung des Verbundwerkstoffs verwendet wird, was sich sowohl auf die akustische als auch auf die mechanische Leistung der endgültigen Elemente positiv auswirken könnte.

AP 1.4 Bewertung der physikalischen und mechanischen Eigenschaften

Eine Reihe von Tests zur Bewertung der mechanischen Leistung, der Bindung zwischen Myzel und Furnier und der akustischen Leistung wurden entwickelt und durchgeführt. Zu diesen Tests gehören Impedanzrohrtests, Schallübertragungstests, 3-Punkt-Biegetests und Ausreißtests. Tabelle 2 fasst die mechanischen Eigenschaften von leichtgewichtigen Myzelmaterialien zusammen, die aus Hanf und Myzel von *Ganoderma lucidum* mit einem Verstärkungsgitter aus Ahornfurnier, für bestimmte in der Tabelle angegebene Tests gewachsen sind. Die meisten dieser Vorversuche wurden während HOME 1.0 durchgeführt. Tabelle 3 gibt einen Überblick über die Druckfestigkeit der Versuchskörper der Impedanzprüfung.

Mechanische Eigenschaften

Tabelle 2 Mechanische Eigenschaften von leichtgewichtigem Myzelmaterial

Test	Muster	Dichte (kg/m^3)	Festigkeit (MPa)	Elastizität (MPa)
Druckfestigkeit	Würfel	145 ± 14	1.2 ±0.12	4.10±0.67
Auszugsfestigkeit	Würfel + einseitiges		0.34 ±0.04	NA
	Würfel + zwei Seiten ungeschweißtes Furnier		0.36 ±0.1	NA
Zugfestigkeit	Würfel + zweiseitiges geschweißtes Furnier		30.6 ±3.6	NA
Biegefestigkeit im kleinen Maßstab leicht	Leichtbaustein	140 ± 8	0.17 ±0.04	1.31 ±0.33
	Leichtbaustein		0.19 ±0.04	1.32 ±0.29
	Leichtbaustein		0.16 ±0.05	1.29 ±0.16
	Leichtbaustein		0.13 ±0.02	0.89 ±0.24
Biegefestigkeit im kleinen Maßstab gepresste Probe	Gepresste Probe	1180± 75	10.2 ±1.73	2390.95 ±444.91
	Gepresste Probe + Gitter mit geringer Dichte		21.99 ±2.01	6236.22 ±322.2

	Gepresste Probe + Gitter mit hoher Dichte	10.81 ±3.18	3900.2 ±1621.9
Großflächige Biegebruchfestigkeit	Leichtbaustein	0.07 ± 0.02	3.2 ± 0.3
	Leichtbaustein + 3D-Gitter 118 ±12 mit geringer Dichte (3 cm)	0.1 ± 0.01	5.04 ± 2.4
	Leichtbaustein + 3D-Gitter mit hoher Dichte (2 cm)	0.12 ± 0.01	9.9 ± 2.6
	Leichtbaustein + 3D-Gitter mit geringer Dichte (2 cm)	0.1 ± 0.02	6.33 ± 3.2

Quelle: KIT

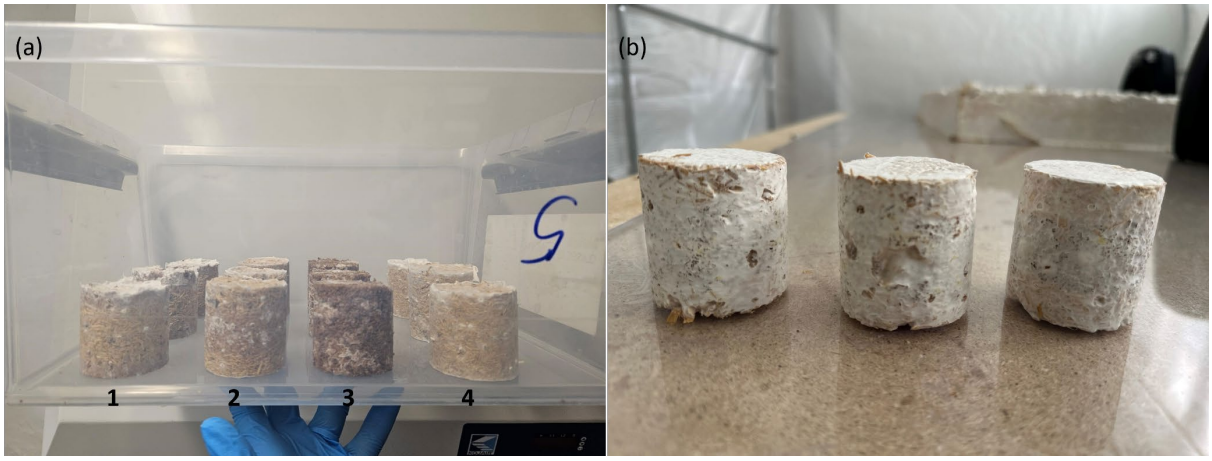
Tabelle 3 Druckfestigkeit der Versuchskörper der Impedanzprüfung

Test	Muster		Dichte (kg/m3)	Festigkeit (MPa)
Druckfestigkeit	Zylinder	Weniger Bewuchs	144 ± 17	0.23 ± 0.02
		Mehr Bewuchs		0.33 ± 0.03
	Zylinder + 3 horizontale Gitterstäbe	Weniger Bewuchs		0.21 ± 0.02
		Mehr Bewuchs		0.28 ± 0.02
	Zylinder + 1 vertikales Niedrigdichte-Gitter	Weniger Bewuchs	118± 10	0.13 ± 0.02
		Mehr Bewuchs		0.17 ± 0.02

Quelle: KIT

Wachstumsverträglichkeit und Schallabsorptionseigenschaften

Im Rahmen des Projekts HOME 2.0 haben wir die Wachstumsverträglichkeit von Hanfschäben und Sägespänen sowohl als eigenständige Substrate als auch in hybriden Verbundwerkstoffen (z. B. unterschiedliche Schichtung von Sägespänen und Hanf) untersucht. Zur Beurteilung der Wachstumsverträglichkeit und zur Messung der akustischen Leistung wurden Impedanzröhren verwendet. Abbildung 8 zeigt die entwickelten Prüfkörper, die belegen, dass das Hybridwachstum von Hanf- und Sägemehlsubstraten erfolgreich war, ohne die Wachstumszeit zu beeinträchtigen.



Quelle: KIT

Abbildung 8 Impedanzrohrtests mit Hanf und Sägemehl, (a) 1: Hanf im Kern und Sägemehl oben und unten, 2: Sägemehl im Kern und Sägemehl oben und unten, 3: reines Sägemehl, 4: reiner Hanf, (b) ausgewachsener Hybridverbund mit Sägemehl als Kern und Hanf unten und oben

Zur Bewertung der Schallabsorptionseigenschaften wurden die Proben in einem Schallprüfungslabor mit einer Impedanzrohrmethode gemäß der in der (DIN EN ISO 10534-2 Akustik - Bestimmung der akustischen Eigenschaften in Impedanzrohren - Teil 2: 2-Mikrofontechnik für Schallabsorptionsgrad und Oberflächenimpedanz bei senkrechtem Einfall (ISO 10534-2:2023); Deutsche Fassung EN ISO 10534-2:2023, 2024, S. 10534–2) beschriebenen Methode geprüft. Insgesamt wurden einundzwanzig runde Proben für die Prüfung bereitgestellt. Diese Proben wurden hergestellt, um den Einfluss der folgenden Faktoren auf die Schallabsorptionseigenschaften des Verbundmaterials zu berücksichtigen:

Faktor 1: Gesamtwachstumszeit des Myzels

- Die Hälfte der Proben wurde bis zur vollen Reife des Myzels wachsen gelassen.
- Die andere Hälfte der Proben durfte nur so lange wachsen, wie es für die strukturelle Stabilität des Substrats erforderlich war.

Faktor 2: Holzfurniergehalt

- Eine Gruppe von Proben enthielt keine Holzfurnierelemente.
- Eine zweite Gruppe von Proben enthielt ein vertikales Holzfurnierelement.
- Eine dritte Gruppe von Proben enthielt drei separate, horizontal angeordnete Holzfurnierelemente, wobei sich die drei Elemente oben, in der Mitte und unten in der Probe befanden.

Diese beiden Faktoren wurden gewählt, um verlässliche Informationen über den Zusammenhang zwischen Myzelwachstum, Furnieranteil im Substrat und Schallabsorption zu erhalten. Für die Weiterentwicklung von Proben für späteren Forschungsphasen wird es wichtig sein, die Auswirkungen eines erhöhten oder verringerten Furnieranteils auf die akustische Leistung des Materials vorhersehen zu können. Darüber hinaus muss der Einfluss des Myzelwachstums untersucht und seine Beziehung zu den Schallabsorptionseigenschaften des Verbundstoffs verstanden werden, um die weitere Entwicklung von Produkten zu ermöglichen.

Es wurde eine Probenserie mit vier Proben in jeder Kategorie umgesetzt, sodass sich die folgende Gesamtverteilung der Prüfmuster ergab:

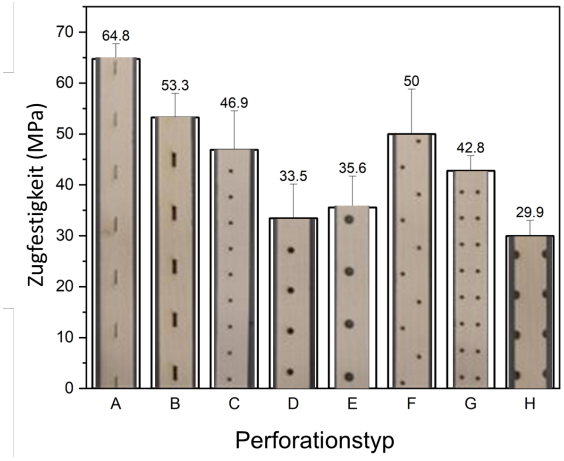
- Vier (4) Proben ohne Furnieranteil und minimalem Myzelwachstum,
- Vier (4) Proben ohne Furnieranteil und maximalem Myzelwachstum,
- Vier (4) Proben mit einem Furnierelement und minimalem Myzelwachstum,
- Vier (4) Proben mit einem Furnierelement und maximalem Myzelwachstum,

- Vier (4) Proben mit drei Furnierelementen und minimalem Myzelwachstum,
- Vier (4) Proben mit drei Furnierelementen und maximalem Myzelwachstum.

Die Ergebnisse dieser Messreihe haben das Verhältnis zwischen Wachstumsgrad, Furnieranteil und Schallabsorptionsvermögen verdeutlicht. Grundsätzlich wird der Schallabsorptionsgrad des Verbundmaterials durch einen reduzierten Wachstumsgrad oder durch einen kleineren Furnieranteil erhöht. Ein möglicher Rückschluss ist, dass die Umwandlung von mechanischer Energie in Form einer Schallwelle zu thermischer Energie durch den Luftstromwiderstand des Verbundmaterials (wobei der energetische Inhalt der Schallwelle verringert / absorbiert wird) überwiegend in den Bereichen des Verbundstoffs zu erwarten ist, wo die Festigkeit bzw. Dichtigkeit des Myzelnetzwerks reduziert ist. Dieses Ergebnis ermöglicht eine Feststellung weiterer Forschungsparameter, indem eine strategische Variation sowohl der Materialeigenschaften des Verbundstoffs als auch des Holzfurnieranteils die resultierenden akustischen Eigenschaften von Proben beeinflussen kann.

Bindung zwischen Myzel und Furnier

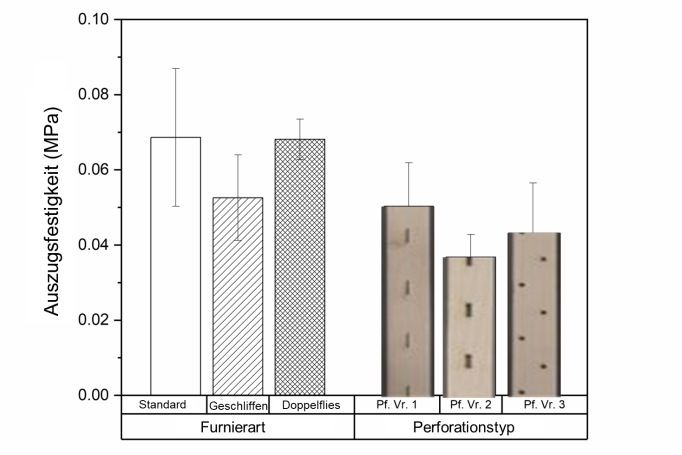
Es wurden verschiedene Arten von Furnierperforationen hergestellt, um die Haftung zwischen Furnier und Myzel zu verbessern. Vor der Prüfung der Haftverbesserung durch Ausreißtests wurden die verschiedenen Perforationstypen auf ihre Zugfestigkeit hin untersucht. Abbildung 9 zeigt die Ergebnisse der Zugtests für diese verschiedenen Perforationen. Insgesamt wurden acht verschiedene Perforationen hergestellt, von denen die drei mit der höchsten Zugfestigkeit für die Ausreißtests ausgewählt wurden.



Quelle: KIT

Abbildung 9 Zugfestigkeit verschiedener Ahornfurnierperforationen

Für den Ausreißtest wurden die Perforationstypen A, B und F ausgewählt, um die Wachstumskompatibilität und die Haftfestigkeit zwischen Myzel und dem Furnier zu bewerten. Ziel war es, die Hypothese zu überprüfen, dass Perforation die Haftung verbessert. Zusätzlich zu diesen drei Perforationsarten wurden drei verschiedene Arten von Ahornfurnieren getestet: reines Ahornfurnier, geschliffenes Ahornfurnier und doppelt gefliestes Ahornfurnier. Die Perforierungen wurden mit einem Lasercutter hergestellt. Abbildung 10 zeigt die Ergebnisse des Ausreißtests für verschiedene Furnierarten und Perforationen. Entgegen unserer Hypothese deuten die Ergebnisse darauf hin, dass die Perforation den Verbund zwischen Myzel und Furnier nicht nur nicht verbessert, sondern sogar geschwächt hat. Der Grund für dieses unerwartete Ergebnis muss weiter untersucht werden. Wir kamen jedoch zu dem Schluss, dass reines Furnier und doppelt gefliestes Furnier am besten abschnitten. Von diesen beiden ist reines Furnier kostengünstiger und hat geringere Umweltauswirkungen, sodass das Konsortium zu dem Schluss kam, dass reines Furnier die beste Lösung ist.



Quelle: KIT

Abbildung 10 Ergebnisse der Ausziehversuche für verschiedene Furniertypen und Perforationen, wobei die Perforationsversionen 1, 2 und 3 jeweils für Typ A, B und F stehen.

AP 2 Integration Myzelium in digitalen Herstellungsprozess

AP 2.1 Konzeptentwicklung für additive Auftragstechnik von Myzelwerkstoffen

Im Vorprojekt *HOME 1* erfolgte die Befüllung mit Myzeliummaterial noch vollständig manuell. Um die Fertigungsmethoden weiter zu digitalisieren, wurde daher der Einsatz einer additiven, robotergestützten Auftragstechnik zur Befüllung untersucht. Diese Neuerung brachte mehrere Vorteile: Zum einen eröffnete die Digitalisierung des Prozesses neue Möglichkeiten in Herstellung und Entwurf, zum anderen schuf sie Potenzial für eine effiziente Skalierung. Dazu wurden folgende Anforderungen an die Auftragstechnik und die Prozessschritte definiert:

Anforderungen an die Auftragstechnik

- **Materialförderung:** Es soll partikelbasiertes Material mit unterschiedlichen Partikelgrößen gefördert werden.
- **Lebendiges Material:** Das Myzelwachstum darf durch den Prozess nicht negativ beeinflusst oder verhindert werden.
- **Reinigung:** Die Technik sollte leicht zu reinigen und idealerweise mit Isopropanol sterilisierbar sein.
- **Deposition:** Das Material sollte in Form von Anhäufungen oder, im besten Fall, kontinuierlich aufgetragen werden.
- **Materialzufuhr:** Das Material wird aus einem externen Materialtank zum Roboter-Endeffektor befördert.
- **Gewicht:** Das Tool muss (wenn mit Material befüllt) leicht genug sein, um die maximale Traglast des Roboterarms nicht zu überschreiten

Anforderungen an die Prozessschritte

Der Auftragsprozess des Materials soll sich aus zwei hauptsächlichen Prozessschritten zusammensetzen: (1) Deposition des Materials in die Form.

(2) Anschließender Rüttelprozess, der das Material gleichmäßig in der Form (und in den Zwischenräumen des Furniergitters) verteilt und verdichtet.

Zunächst wurden verschiedene industrielle und forschungsbasierte Extrusions- und Depositionsverfahren für unterschiedliche Materialien sowie Dosierungsverfahren für Schüttgüter recherchiert. Für eine physische

Umsetzung kamen zwei Verfahren in die engere Auswahl: (1) ein Verfahren basierend auf Materialförderung durch einen Schneckenextruder und (2) ein Verfahren basierend auf pneumatischer Förderung.

Nach ersten Tests beider Systeme stellte sich jedoch heraus, dass sich ein Schneckenextruder für diese Anwendung nicht eignet, da einige Anforderungen an das System nicht erfüllt werden können. Unter anderem erschien es problematisch, einen Extruder zu entwickeln, der die wirkenden Kräfte standhalten kann, ohne die Traglast des Roboterarms zu überschreiten. Ein weiterer Faktor ist die fehlende Flexibilität von Förderschnecken. Selbst wenn eine Förderschnecke als Depositionsmechanismus genutzt würde, müsste eine andere Fördermethode implementiert werden, um das Myzelsubstrat zum Roboterarm zu liefern. Daher wurde dieser Ansatz zugunsten der pneumatischen Förderung nicht weiterverfolgt.

Pneumatische Förderung

Um eine Automatisierung und Skalierung des robotischen Fertigungsprozesses zu ermöglichen, muss das Myzelsubstrat kontinuierlich an das Robotertool angeliefert werden. Viele Fördertechniken kommen in diesem Fall nicht infrage, da sie die Mobilität des Roboters zu stark einschränken würden. Eine Lagerung des Materials direkt am Roboter ist ebenfalls nicht möglich, da dies dessen Traglast überschreiten würde.

Eine flexible Fördertechnologie ist die pneumatische Förderung. Dabei werden Schüttgüter durch eine Rohrleitung transportiert, wobei ein Luft- oder Gasstrom genutzt wird. Sie wird häufig in Branchen wie der Lebensmittelverarbeitung, der Pharmazie und der Landwirtschaft für den Umgang mit Pulvern, Granulaten und anderen leichten Materialien eingesetzt. Sie sollte sich auch für den Transport von Myzel-Substrat eignen.

Die pneumatische Förderung ist ein sauberes, effizientes und geschlossenes System, das Kontaminationen und manuelle Handhabung minimiert. Durch die Anpassung von Luftdruck und Durchflussrate kann das System so fein abgestimmt werden, dass das vergleichsweise empfindliche Substrat schonend transportiert wird, ohne das Pilzgeflecht zu beschädigen. Dies macht die pneumatische Förderung zu einer praktischen Lösung für die Skalierung von Myzelbauteilen, insbesondere in Anwendungen, in denen Sterilität und Effizienz entscheidend sind.

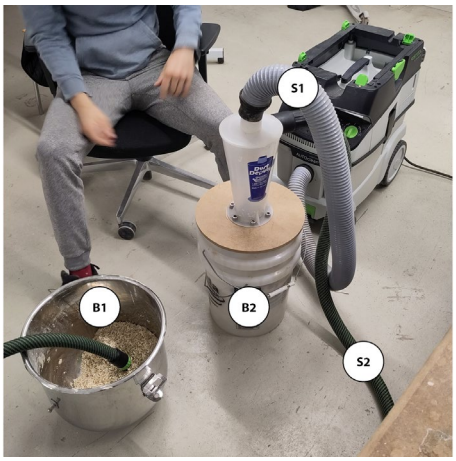
AP 2.2 Entwicklung von Endeffektoren und Verfahren

Im Arbeitspaket 2.2 wurden die zunächst konzipierten Auftragstechniken in die Umsetzung gebracht, indem maßgeschneiderte Werkzeuge entwickelt und physisch umgesetzt wurden. Diese Werkzeuge wurden Schritt für Schritt entwickelt, von manuellem Antrieb bis zur robotischen Integration.

Materialförderung durch Vakuum

Die grundsätzliche Eignung der Materialförderung durch Vakuum wurde getestet, indem zunächst ein Versuch zum Transport von Hanfpartikeln (>2 mm) von einem Start-Materialbehälter (B1) in einen Ziel-Materialbehälter (B2) durchgeführt wurde. Dabei wurde ein Staubsaugerschlauch (S1) an das obere Ende eines Zyklonseparators angeschlossen. An den seitlichen Anschluss des Zyklonseparators wurde ein weiterer Schlauch (S2) angeschlossen, welcher zum Start-Materialbehälter (B1) führte (siehe Abbildung 11).

Bei Starten des Industrie-Staubsaugers wird ein Vakuum durch den Staubsaugerschlauch (S1), den Zyklonseperator und den zweiten Schlauch (S2) hergestellt, was zur Ansaugung der Partikel im Start-Materialbehälter (B1) führt. Diese werden durch den Schlauch (S2) zum Zyklonseperator gesaugt und dort von der angesaugten Luft getrennt und in den Ziel-Materialbehälter (B2) umgefüllt. Letzteres erfolgt durch die Geometrie des Zyklonseperators und kann desweiteren nur erfolgen, solange entweder das untere Ende des Zyklonseperators oder der Ziel-Behälter (B2) luftdicht verschlossen ist.



Quelle: EDEK

Abbildung 11 Test zur grundsätzlichen Eignung der Materialförderung durch Vakuum

Nach dem erfolgreichen Abschluss des ersten Eignungstests wurde ein weiterer Versuch mit lebendem Material, das bereits mit Pilzmyzel beimpft war (Substrat), durchgeführt. Ziel war es zu überprüfen, ob das Substrat ohne anschließende Kontamination oder Wachstumsbeeinträchtigung transportiert werden konnte. Um die Eignung des Systems für eine andere Partikelgröße (<2 mm) weiter zu testen, wurde dieser Versuch mit Sägespäne-Substrat durchgeführt. Das Substrat wurde erneut aus einem Start-Materialbehälter in 10x10 cm große Schalungen befördert, in denen es eine Wachstumsphase durchlief. Der Versuch wurde als erfolgreich bewertet, da die Wachstumsphase ohne Kontamination verlief und Materialproben hergestellt werden konnten (Abbildung 12).



Quelle: EDEK

Abbildung 12 Eignungstests zur Materialförderung durch Vakuum mit lebendem Material. Links: Durchführung der Materialförderung, Mitte: Proben vor der Wachstumsphase, Rechts: Proben nach der Wachstumsphase

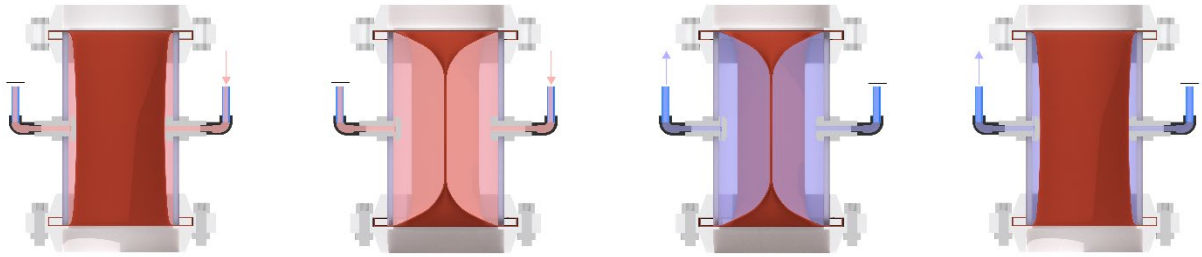
Verschlussmechanismus und End-Effektor

Da die Materialförderung mit Vakuum ausschließlich mit einem luftdicht abschließbaren System funktioniert, wurde sich im nächsten Schritt auf die Entwicklung des Verschlussmechanismus konzentriert, der in den End-Effektor eingebaut werden sollte.

Die Anforderungen:

- leicht zu reinigen
- einfache Ansteuerbarkeit über die Roboteranlage
- möglichst leicht und kompakt
- luftdicht abschließbar

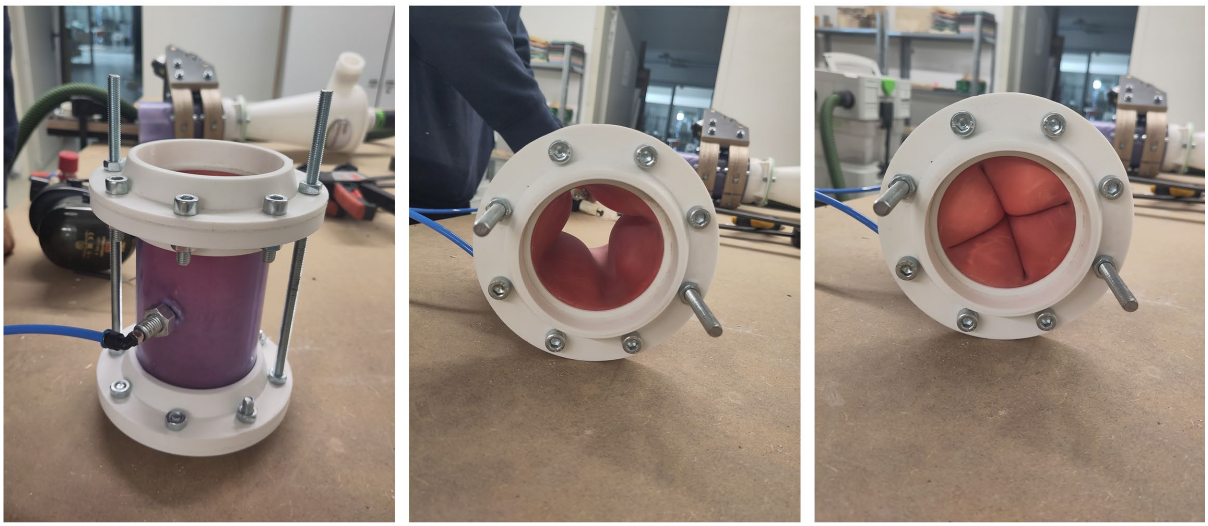
Es wurde zunächst ein händisch verschließbarer Schiebeverschluss entwickelt, der später durch einen motorisierten Schiebeverschluss ersetzt werden sollte (Abbildung 13). Es stellte sich heraus, dass sich ein solcher Verschluss nicht für das Material eignen würde, da es leicht zu Verstopfungen im Mechanismus kommen konnte.



Quelle: EDEK

Abbildung 13 Quetschventil Mechanismus, Pfeile visualisieren die Zu- und Abfuhr von Druckluft zum Öffnen und Schließen des Ventils

Nach weiterer Recherche wurde entschieden, ein anwendungsspezifisches Quetschventil zu entwickeln (Abbildung 14). Zwar sind Quetschventile auch kommerziell erhältlich, doch eignete sich keines für die Anwendung, hauptsächlich aufgrund des hohen Gewichts.



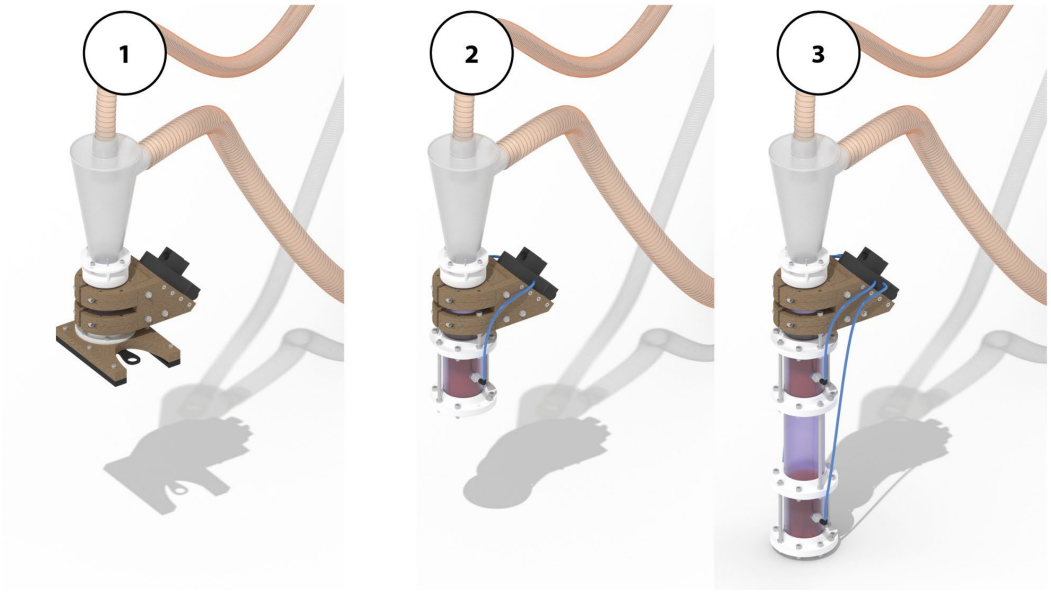
Quelle: EDEK

Abbildung 14 Anwendungsspezifisches Quetschventil, Mitte: Öffnung ohne vakuumbasierte Rückstellhilfe

Der Schließmechanismus des Quetschventils funktioniert durch Zuführung von Druckluft in das Quetschventilgehäuse, sodass ein intern liegender Gummischlauch zusammengepresst wird. Somit wird eine Abdichtung des Materialstroms bewirkt. Sobald die Druckluftzufuhr unterbrochen, das pneumatische Quetschventilgehäuse entlüftet und Vakuum als Rückstellhilfe hergestellt wird, öffnet der Gummischlauch zum freien Durchgang. Das Ventil erfüllt alle zunächst gestellten Anforderungen an den Schließmechanismus.

Dieser Ventiltyp kann sehr leicht gebaut werden, da für die Betätigung das pneumatische System des Roboters verwendet werden kann. Aufgrund der großen Oberfläche der Dichtung kann es selbst dann schließen, wenn einige Partikel zwischen den Membranen stecken bleiben. Das System ist leicht zu reinigen, was das Risiko einer Verunreinigung des Myzelsubstrats verringert. Damit die Funktion des Zyklonabschneiders nicht beeinträchtigt wird, muss ein geschlossenes System gewährleistet werden, indem zwei Ventile in Reihe geschaltet werden.

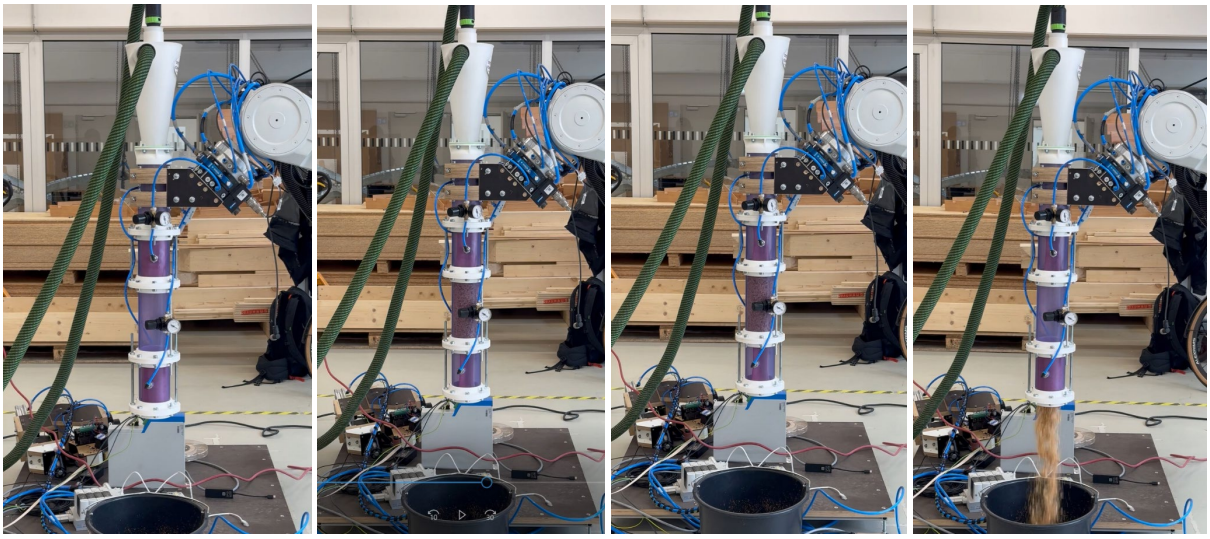
Nach einer erfolgreichen Testung der Kombination des Zyklonseparators mit einem Quetschventil, wurde ein weiteres Quetschventil in das System eingebaut, damit eine Materialschleuse entstehen konnte (Abbildung 15).



Quelle: EDEK

Abbildung 15 Evolution des End-Effektors für die automatisierte Substrateinfüllung: Zunächst ein End-Effektor mit (1) manuellem Schiebeverschluss, später ersetzt durch (2) ein einzelnes Quetschventil und anschließend durch (3) zwei Quetschventile mit zwischenliegender Materialschleuse

Die Materialschleuse ermöglicht eine schnellere Deposition des Substratmaterials, da neues Material vom externen Tank transportiert werden kann, während gerade Material positioniert wird: Während das untere Quetschventil geöffnet ist und das Material aus der Schleuse positioniert wird, ist das obere Quetschventil geschlossen und sorgt damit dafür, das Vakuum für den Materialtransport entstehen kann (Abbildung 16).

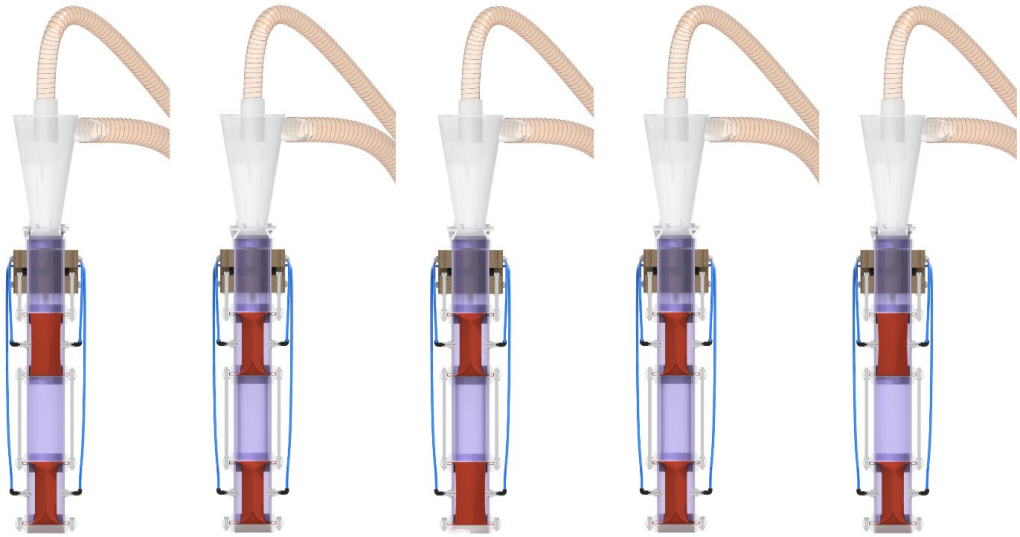


Quelle: EDEK

Abbildung 16 Fotografisch dokumentierter Ablauf der Materialplatzierung durch ein speziell entwickeltes Tool zur Materialförderung durch Vakuum mit einem Zyklonseperator

Materialabscheidungsprozess (siehe Abbildung 17)

1. Grundposition: beide Quetschventile offen, Saugung aus
2. Ansaugung in Materialschleuse: unteres Quetschventil geschlossen, Saugung an (Material wird bis in die Materialschleuse gesaugt)
3. Ansaugung in den Zyklonseperator: oberes Quetschventil schließen (weiteres Material wird angesaugt, bis in den Zyklonseperator)
4. Materialdeposition: währenddessen unteres Quetschventil öffnen (Material aus der Materialschleuse wird platziert)
5. Material nachfüllen: unteres Quetschventil schließen, oberes öffnen (Material wird in die Schleuse nachgefüllt)
6. Wiederholung 3-5



Quelle: EDEK

Abbildung 17 Schematische Darstellung des Tool-Mechanismus zur Materialplatzierung

Rüttelprozess

Für eine homogene Verteilung der Partikel in der Schalung und im Furniergitter, wurde die robotische Materialdeposition / Einfüllung des Partikelmaterials laut konzeptuellem Entwurf durch einen anschließenden Rüttelprozess ergänzt. Die Anforderungen an diesen Teil des Prozesses wurden zunächst definiert: die Partikel der zu verwendenden Substratkonfiguration (Hanf- und Sägemehlsubstrat) müssen sich gleichmäßig in der Schalung und vor allem in den Zwischenräumen des Furniergitters verteilen. Durch die verschiedenen Partikelgrößen des zu extrudierenden Materials sollen verschiedene Materialdichten erreicht werden, die die erforderliche Festigkeit des Bauteils garantieren und die akustischen Anforderungen erfüllen. Außerdem soll das Verfahren optimalerweise zu ebenen Oberflächen führen, um dem Bauteil die gewünschte ästhetische Wirkung zu verleihen.

Eine Annäherung an die Umsetzung des Rüttelprozesses fand zunächst durch eine Auslotung der industriell bereits vorhandenen Verfahren und durch Vortestungen mit im Labor vorhandener Infrastruktur statt.

Die Recherche nach industriell verfügbaren Verfahren orientierte sich an den Möglichkeiten der Betonverdichtung. Bei der Fertigteilherstellung werden u.a. Rütteltische eingesetzt, die durch Elektromotoren oder Pneumatikaggregate angetrieben werden, so dass Schalung und Beton gemeinsam vibrieren. Einige verschiedene Rütteltisch-Optionen waren im DFG Roboterlabor der Universität Kassel vorhanden. Einer der vorhandenen Tische ermöglicht die Umsetzung von kleinformatigen Prototypen (siehe AP 2.5).

Die Firma Netter Vibration unterstützte das Team hier mit der Bereitstellung von einer Kombination aus Klopf- und Rütteltischen, die für eine Versuchsreihe für die gleichmäßige Substratverteilung und Nachverdichtung verwendet wurden.

Die Vibrationstests wurden in zwei Phasen durchgeführt. Zunächst wurde ein Vibrationstisch mit horizontaler Bewegung verwendet, um eine gleichmäßige Verteilung des Myzel-Substrats zu erreichen. Anschließend wurde die Form auf einem Vibrationstisch mit vertikaler Bewegung befestigt, um das Substrat zu verdichten und die gewünschte Dichte zu erreichen. Aufgrund der Abmessungen der zur Verfügung stehenden Vibrationstische wurden die Tests in kleinerem Maßstab durchgeführt. Die verwendete Schalung hatte die Abmessungen 40 cm x 60 cm.

Die Ergebnisse der horizontalen Verteilung waren recht vielversprechend. Die durch die robotergesteuerte Verteilung verursachten Unebenheiten wurden innerhalb von 15 Sekunden Vibration erheblich geglättet. Eine vollkommen gleichmäßige Verteilung konnte jedoch nicht erreicht werden (Abbildung 18 links). Bereits bei dieser geringen Größe war die Dämpfungswirkung des Substrats so stark, dass sich das Substrat in der Mitte der Schalung kaum bewegte. Dies führte zu deutlichen Vertiefungen in der Mitte der Schalung. Dieser Effekt kann durch Hinzufügen eines an der Schalung befestigten Furniergitters vollständig aufgehoben werden. Das Gitter überträgt die Vibrationskräfte gleichmäßig auf die gesamte Schalung, was zu einer gleichmäßigen Verteilung führt (Abbildung 18 rechts).



Quelle: EDEK

Abbildung 18 Ungleichmäßige Verteilung des Myzel-Substrats nach der horizontalen Vibration (Links, Mitte) und gleichmäßige Verteilung nach der Vibration mit Furniernetz (Rechts).

Um das Myzel zu verdichten, wurde die Form anschließen auf einen Klopftisch gespannt. Dieser generiert mithilfe eines Pneumatikaggregats eine vertikale Impulsbewegung mit einer niedrigen Frequenz. Auf Grund der Elastizität des Myzel Substrats war die Amplitude des Klopftisches nicht ausreichend, um eine signifikante Erhöhung der Dichte zu erreichen (Abbildung 19 links). Andere Tests mit konventionellen Vibrationstischen, wie sie in der Betonindustrie üblich sind, führte zu ähnlich unzufriedenstellenden Ergebnissen.

Eine Methode zur Komprimierung des Materials, die sich als sehr effektiv herausstellte, war es die Form wiederholt von ca. 10 cm Höhe auf einen festen Untergrund zu klopfen. Diese Verdichtungsmethode war deutlich effektiver als die bisherigen Tests mit herkömmlichen Rütteltischen und resultierten in einer Reduktion des Volumens um etwa 20% (Abbildung 19 rechts).



Quelle: EDEK

Abbildung 19 Füllhöhe vor Verdichtung (Links), nach Verdichtung mit Klopftisch (Mitte) und nach manueller Verdichtung (rechts)

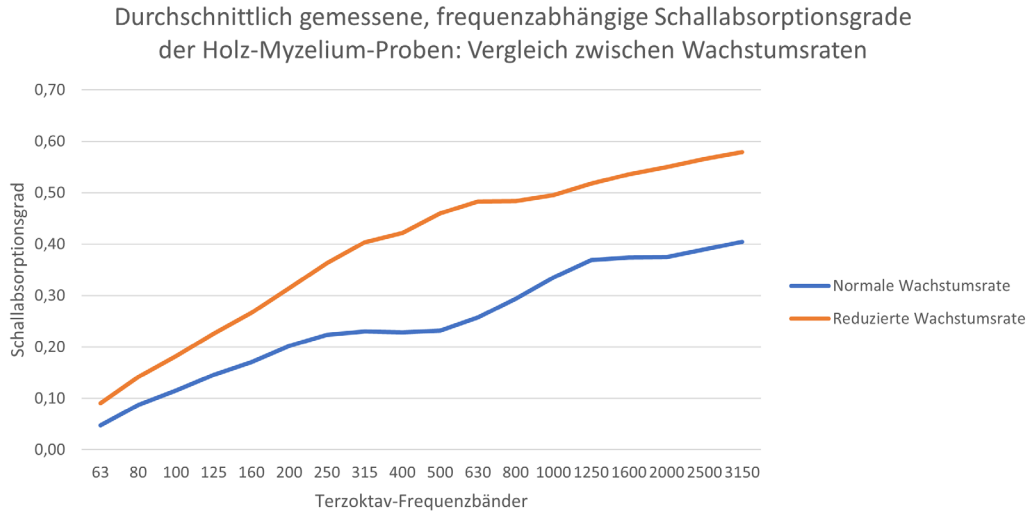
Die im Projekt durchgeführten Versuche zeigen, dass eine maschinelle Verteilung und Verdichtung des Myzelsubstrats durchaus möglich ist. Um eine vollständige Automatisierung zu erreichen, ist die Entwicklung

eines anwendungsspezifischen Rütteltisches, der sowohl horizontal als auch vertikal schwingen kann, notwendig. Dabei ist besonders darauf zu achten, dass die Amplitude der Schwingung groß genug ist, um das Material effektiv verteilen und verdichten zu können.

AP 2.3 Steuerung des Wachstums unter Beeinflussung klimatischer Parameter

Am KIT wurde die Steuerung des Myzelium-Wachstums unter Beeinflussung klimatischer Parameter untersucht. Dies erfolgte auf Basis der in der Literatur für verschiedene Myzelarten angegebenen Luftfeuchtigkeits- und Temperaturbereiche (Stamets, 2013) sowie der vom Myzelbrut-Lieferanten (Tyroler Glückspilze) vorgegebenen Richtlinien. Diese Parameter wurden bei Bedarf je nach Verfügbarkeit der Ressourcen angepasst. In diesem Projekt konzentrierten wir uns auf *Ganoderma lucidum*, eine widerstandsfähige Myzelart, die sich an verschiedene Umgebungen anpassen kann. Während des gesamten Anbauprozesses wurden die Bedingungen so optimiert, dass eine relative Luftfeuchtigkeit von etwa 70 % und eine Temperatur von 21-24 °C aufrechterhalten werden konnte. Dieser Ansatz reduziert den Energiebedarf für das Wachstum des Myzelssubstrats. Andere Faktoren, wie z. B. Licht und CO_2 sind für die Pilzzucht, bei der es auf eine gleichbleibende Qualität und Quantität ankommt, von größerer Bedeutung. Da sich jedoch ausschließlich auf die Aufzucht von Myzel konzentriert wird, sind diese Faktoren weniger von Belang.

Ausgehend von vorläufigen Studien ist die Art des Substrats der kritischste Parameter bei der Kultivierung des Myzels, da es die für die Besiedlung benötigte Zeit direkt beeinflusst. Bei der Verwendung von Hanf als Primärsubstrat werden 10-14 Tage für die Besiedlung benötigt, gefolgt von 3-5 Tagen Wachstum innerhalb des der Form. Danach benötigt das Myzel weitere 1-2 Tage Wachstum außerhalb der Form, um die Myzelhaut zu entwickeln. Die Wachstumszeit verändert nicht nur optisch die Qualität, sondern kann auch eine entscheidende Rolle bei der Erzielung der gewünschten akustischen Leistung spielen, wie in HOME 1.0. untersucht (Abbildung 20).



Quelle: ARUP

Abbildung 20 Adsorptionskoeffizient von Proben, die auf Hanf mit Myzel von *Ganoderma lucidum* gezüchtet wurden. Die orangefarbene Linie zeigt die Proben, die über einen kurzen Zeitraum gezüchtet wurden und daher eine porösere Oberfläche haben, während die blaue Linie die Proben zeigt, die länger gezüchtet wurden, um eine glattere Oberfläche zu entwickeln.

AP 2.4 Aushärtungsprozess: Stoppen des Pilzwachstums für großflächige Bauteile

Die Trocknung von großformatigen Elementen (z. B. Proben, die größer als 50 cm x 50 cm sind) erfolgte am KIT in zwei Stufen. Dazu werden die Proben mit zwei Ventilatoren auf jeder Seite vorgetrocknet, wodurch die Raumtemperatur auf ca. 35-40 °C erhöht wird. Dieser Prozess wird mindestens 24 Stunden lang aufrechterhalten. Danach werden die Proben für weitere 16 Stunden oder bis die innere Luftfeuchtigkeit auf weniger als 10% gesunken ist, in eine Heißpresse mit einer Temperatur von 80 °C gebracht. Es handelt sich

hierbei zwar nicht um die optimale Methode, aber um die einzige Möglichkeit, die mit den derzeit am KIT zur Verfügung stehenden Ressourcen möglich ist. Bei der Erstellung von Proben bei EDEK werden diese zunächst bei Raumbedingungen vorgetrocknet und anschließend mit Infrarot Paneelen in einem 2 x 2 x 2 m großen Raum getrocknet. Dabei wird die Probe zwischen die Infrarotpaneele platziert. Die Raumtemperatur wird durch diese Methode ebenfalls auf 35-40°C erhöht. Da bei EDEK normalerweise keine Proben für Testungen hergestellt werden, wird die verbleibende Feuchtigkeit in den Proben nicht weiter gemessen.

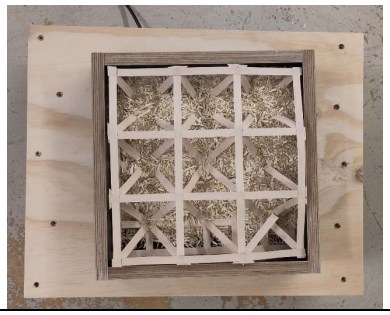
AP 2.5 Integration des Myzelsubstrat-Einfüllprozesses im DFG-Roboterlabor

Zu beiden Hauptprozessschritten des Einfüllungsprozesses wurden Versuche im DFG-Roboterlabor der Universität Kassel durchgeführt. Die Experimente dienten zur schrittweisen Entwicklung des Gesamtprozesses. Versuche zum ersten Prozessschritt (=Deposition) sind im Kapitel *AP 2.2 Entwicklung von Endeffektoren und Verfahren* beschrieben. Im Folgenden wird beschrieben, welche Versuche zum zweiten Prozessschritt (=Rüttelprozess) durchgeführt wurden.

Vorversuche mit vorhandener Infrastruktur

Tabelle 4 beschreibt die Versuchsaufbauten und Ergebnisse mit vorhandener Infrastruktur am Fachgebiet EDEK der Universität Kassel.

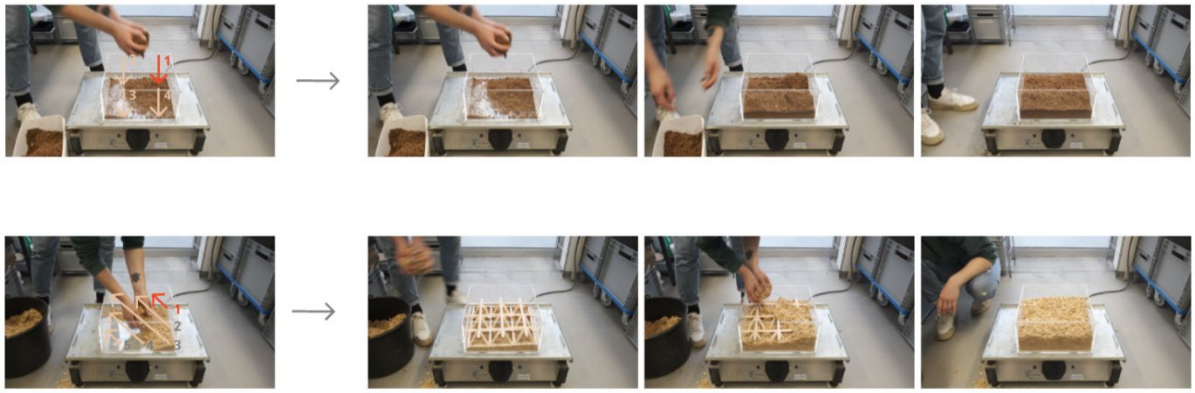
Tabelle 4 Versuchsaufbauten und Ergebnisse mit vorhandener Infrastruktur

Industrieller Rütteltisch (Marke unbekannt)	**Selbstgebauter Rütteltisch**	**Rütteltisch B3000 400 x 600 der Firma Technischer Handel Becker**
		
Motor: 300 W, 400 V	Motor: 40 W, 220 V	Motor: 100 W, 230 V
Ergebnis: gleichmäßige Materialverteilung	Ergebnis: ungleichmäßige Materialverteilung	Ergebnis: akzeptable Materialverteilung, um weitere kleinformatige Prototypen mit diesem Gerät herzustellen
Fazit: Die Materialverteilung ist zwar gut, doch das Gerät ist alt, schwer und nicht in den Prozess integrierbar.	Fazit: Materialverteilung ungleichmäßig, Motor zu schwach	Fazit: Partikel verteilen sich gut, die Kraftübertragung bis in die oberen Schichten des Bauteils sollte optimiert werden

Quelle: EDEK

Versuchsaufbau mit dem Rütteltisch B3000

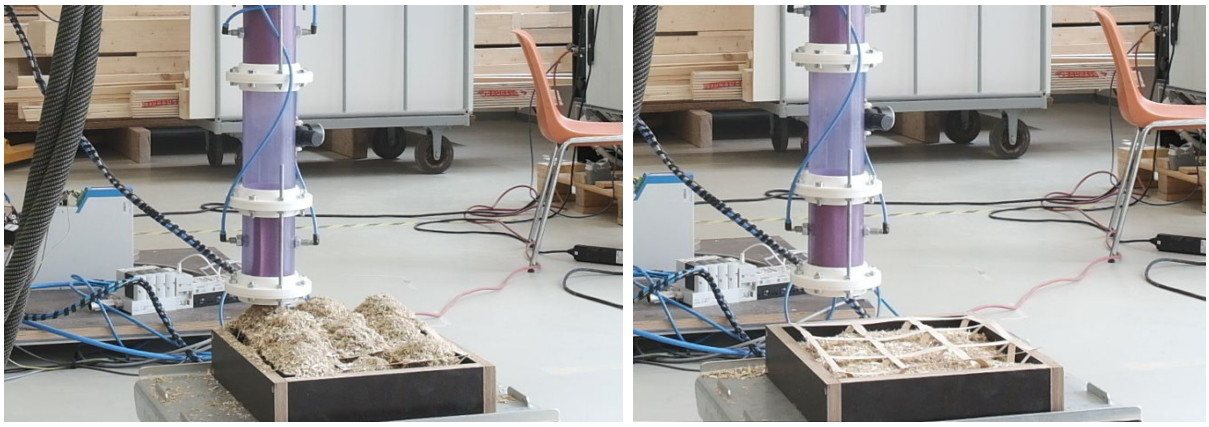
Für die Versuche zur Materialverteilung durch Rütteln wurde der jeweilige Rütteltisch zunächst nivelliert. Anschließend wurde das Material per Hand eingefüllt, wobei die Art des Einfüllens simuliert wurde, die mit dem entwickelten robotischen Tool möglich wäre (Abbildung 21).



Quelle: EDEK

Abbildung 21 obere Reihe: Einfüllung und Verteilung von Sägespäne-Substrat in eine Form ohne Furniergitter, untere Reihe: Einfüllung und Verteilung von Hanfspäne-Substrat in eine Form mit Furniergitter

Mit dem Rütteltisch B3000 400 x 600 wurden akzeptable Ergebnisse (gleichmäßige Materialverteilung) erzielt, auf deren Basis die Entwicklungen mit der Firma KNAUER begonnen wurden (Abbildung 22).



Quelle: EDEK

Abbildung 22 Eingefülltes Substratmaterial vor dem Rüttelprozess (links) und nach dem Rüttelprozess (rechts) mit dem Rütteltisch B3000 400 x 600 der Firma Technischer Handel Becker

AP 2.6 Entwicklung von Materialadaptionen für das Extrusionsverfahren

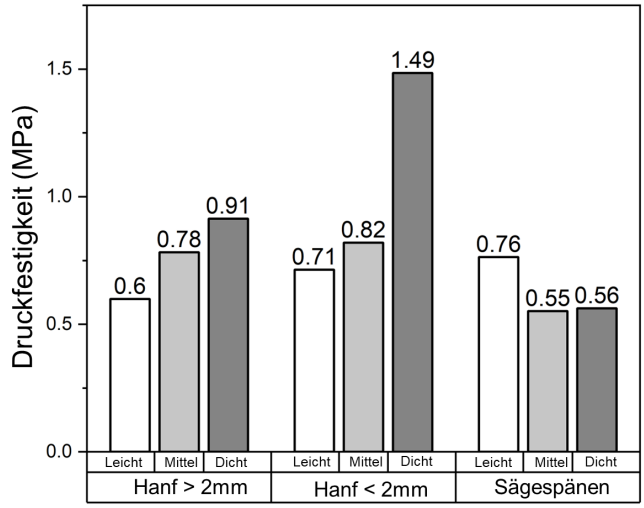
Um sicherzustellen, dass das Substrat für die Extrusion geeignet ist, wurden, wie in AP 1 erläutert, verschiedene Fasergrößen untersucht, um ihre Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften der Myzelmaterialien zu verstehen. Bei diesen Versuchen wurden Hanfschäben und Sägemehl als die beiden Hauptsubstrate verwendet. Zusätzlich zu ihrem ursprünglichen Zustand wurden die Hanfschäben mit einer 2 mm dicken Klinge gemahlen, um eine ähnliche Fasergrößenverteilung wie bei den Sägespänen zu erreichen. So können Hanf und Sägemehl verglichen werden, ohne die Fasergröße als Variable zu berücksichtigen.

Druckfestigkeitsversuche

Die Druckfestigkeit wurde für drei Substrate gemessen: Hanfschäben, Sägemehl und gefräste Hanfschäben, jeweils bei drei verschiedenen Dichten. Die mittlere Dichte für jedes Substrat wird normalerweise erreicht, wenn die Form ohne zusätzliches Pressen gefüllt wird. Zwei weitere Dichten (leicht und dicht) wurden mit einer Abweichung von ±20 % von der mittleren Dichte gewählt. Die mittlere Dichte variiert für jedes Substrat und spiegelt die ursprüngliche Faserdichte und den Feuchtigkeitsgehalt wider. Beispielsweise beträgt die mittlere Dichte von Sägemehl 560 kg/m^3, was zu einer endgültigen Trockendichte von 300 kg/m^3 führt, während die mittlere Dichte von Hanfschäben 328 kg/m^3 beträgt, was zu einer endgültigen Trockendichte von 140 kg/m^3 führt. Für gemahlene Hanfschäben beträgt die mittlere Dichte 432 kg/m^3, was zu einer endgültigen

Trockendichte von 160 kg/m³ führt. Abbildung 23 zeigt das Ergebnis der Druckprüfung der Proben, wobei jede Angabe das Ergebnis der Prüfung von 5 verschiedenen Proben ist. Die Testwürfel sind gleichgroß wie in HOME1.0 (z.B. 5 cm × 5 cm × 5 cm).

Ergebnisse der Druckfestigkeit



Quelle: KIT

Abbildung 23 Ergebnisse von Drucktests von Substraten mit unterschiedlichen Dichten und Fasergrößenverteilungen.

Wie aus dem Diagramm hervorgeht, wird die höchste Druckfestigkeit erreicht, wenn der Hanf gemahlen wird. Allerdings ist das Mahlen in diesem Stadium keine skalierbare oder praktikable Option, da es den Zeit-, Kosten- und Energieaufwand für die Herstellung der endgültigen Elemente erhöhen würde. Eine wichtige Schlussfolgerung aus dem Vergleich von gemahlenem Hanf und Sägemehl bei unterschiedlichen Dichten ist, dass die endgültige Dichte der Sägemehlproben zwar bei allen drei Dichten höher war, was jedoch nicht durchgängig zu einer Verbesserung der Druckfestigkeit führte. Dies deutet darauf hin, dass neben der Enddichte der Proben auch die Dichte des Myzelnetzwerks einen entscheidenden Einfluss auf die Festigkeit der Proben hat. Die höhere Dichte des Myzelnetzes wurde jedoch nur visuell überprüft, da eine quantitative und mikroskopische Analyse den Rahmen dieses Projekts sprengen würde. Dieser Trend zeigt sich auch beim Vergleich von Sägespänen in drei verschiedenen Dichten: Die höchste Druckfestigkeit wird mit dem leichteren Myzelverbundstoff erreicht. Theoretisch ist dies darauf zurückzuführen, dass mit zunehmender Dichte des Sägemehls die Porosität abnimmt. Dies verringert die Luftzirkulation innerhalb der Probe während des Wachstums. Dies führt wiederum zu einer geringeren Dichte des Myzelnetzes im Inneren der Probe.

Materialauswahl

Aufgrund der Ergebnisse wurden leicht gefüllte Sägespäne mit einer Endtrockendichte von 270 kg/m³ und mitteldichte Hanfschäben mit einer Enddichte von 140 kg/m³ ausgewählt. Die Entscheidung, bei Hanf trotz höherer Druckfestigkeit nicht die dichtere Variante zu wählen, beruhte auf zwei Faktoren: 1) Die Verdichtung von Hanfschäben wird schwierig, wenn die Probe ein 3D-Gitter enthält, so dass eine mittlere Dichte eher machbar ist, und 2) eine höhere Dichte bei Hanfschäben ist für eine optimale akustische Leistung nicht förderlich.

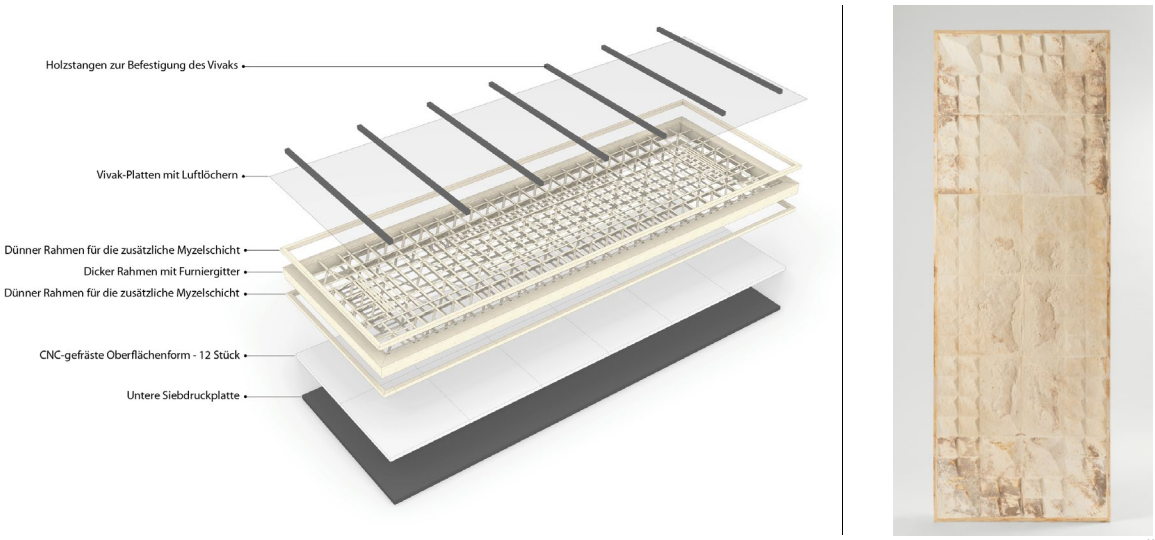
AP 2.7 Substrat-/Pilzressourcen zur Verbesserung des Adaptationsprozesses

Um vergleichbare Ergebnisse wie bei HOME1.0 zu erzielen, wurde beschlossen, auch bei HOME2.0 Hanfmaterial als Substrat zu verwenden. Durch die Hinzunahme von Sägespänen als optionales zweites Substrat wird das Extrusionsverfahren unter Berücksichtigung der Partikelgrößen und des Aggregationsverhaltens der beiden Materialien entwickelt (siehe AP 2.1 und 2.2).

AP 2.8 Optimierungsstudie Bauteilgeometrie für die digitale Fertigung

Status Quo der Bauteilgeometrie

Die Ausgangsgeometrie der Bauteile in HOME 2.0 (Abbildung 24) basiert auf den im ersten HOME-Projekt ermittelten Anforderungen an akustische, strukturelle und ästhetische Eigenschaften sowie auf den bisherigen Fertigungsmöglichkeiten und Projektschwerpunkten. Die digitalen Fabrikationsmöglichkeiten in HOME umschlossen die Fertigung des Furniergitters und die Projektschwerpunkte lagen vor allem auf der Erreichung der strukturellen Anforderungen. Die Fabrikationsmöglichkeiten werden nun in HOME 2.0 durch die digitale Integration des Myzeleinfüllungsprozesses erweitert, wodurch sich neue Möglichkeiten für die Bauteilgeometrie ergeben.



Quelle: EDEK

Abbildung 24 Status Quo Bauteilgeometrie

Der Bauteilgeometrie werden grundsätzlich folgende Elemente zugeordnet:

1. die Gesamtgeometrie
2. die Schichtung des Materials im Schnitt (interne Geometrie)
3. die flächige Gradierung des Materials (interne Geometrie)
4. Die Geometrie des Furniergitters

Grundsätzlich stellt die geometrische Optimierung in HOME 2.0 eine Kompromissfindung zwischen der Optimierung mit dem Ziel der Verbesserung der akustischen und dem Ziel der Verbesserung der strukturellen Eigenschaften dar, da eine Veränderung der Geometrie beides beeinflusst (Eine Änderung der internen Furniergitter-Geometrie zur Optimierung der Akustik hat beispielsweise Einfluss auf die strukturellen Eigenschaften und umgekehrt.)

Additive Myzelauftragstechnik: Möglichkeiten und Grenzen

Bei der neu entwickelten Auftragstechnik handelt es sich (wie in AP 2.1 beschrieben) um eine Kombination von partikelbasierte Materialauftrag und einem anschließenden Rüttelprozess, der das Material gleichmäßig

in der Form (und in den Zwischenräumen des Furniergitters) verteilt und verdichtet. Mit dieser additiven Auftragstechnik können verschiedene Partikel (Art, Material und Größe) kontrolliert platziert werden. Geometrisch bedeutet das, dass die Schichtung des Materials im Schnitt (Abbildung 25) und die flächige Gradierung des Materials gestaltet und kontrolliert werden kann. Diese Möglichkeit bringt den Vorteil, dass gezielt und basierend auf den akustischen und/oder strukturellen Anforderungen einzelner Bereiche des Bauteils, verschiedene Zonen mit unterschiedlicher Materialdichte produziert werden können.



Quelle: KIT

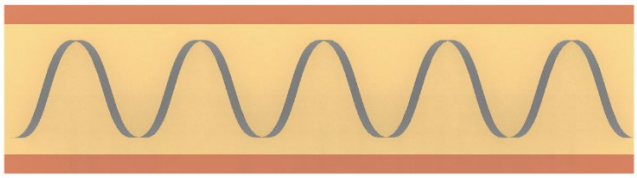
Abbildung 25: Sandwich-Paneel mit drei Schichten: Hanfpartikel – Holzpartikel – Hanfpartikel als Beispiel für mögliche Materialschichtung

Optimierungsmöglichkeiten der Bauteilgeometrie

Im Folgenden werden Optimierungsmöglichkeiten der Bauteilgeometrie unter Berücksichtigung der Möglichkeiten und Beschränkungen der neu entwickelten additiven Auftragstechnik von Myzelwerkstoffen beschrieben und visualisiert. Diese betreffen insbesondere die Schichtung des Materials im Schnitt sowie die Gradierung in der Fläche.

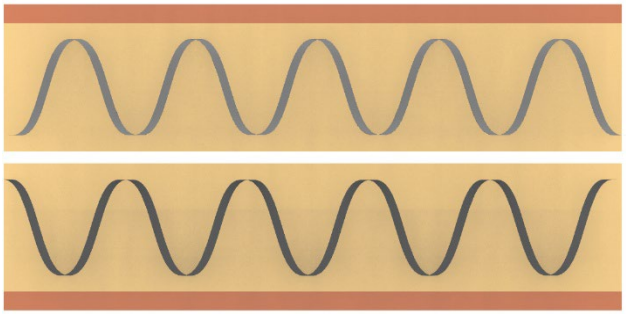
Die Schichtung des Materials im Schnitt

<u>Option 1: Einfaches Sandwich-Paneel (nicht-strukturelles, dichtes Paneel)</u>



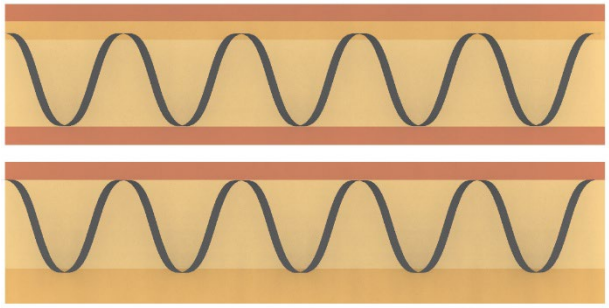
- 3 Schicht-System
  - 1. Schicht: dichtes Paneel
  - 2. Schicht: Unverdichtes Myzelmaterial mit Holzgitter
  - 3. Schicht: dichtes Paneel
- Mögliche Verbindung zwischen den Schichten:
  - Biowelding
  - stärkeres (Dicke) Furnier + Schrauben
- Nicht komprimiertes Profil ist das Hauptstrukturelement

<u>Option 2: Sandwich + innenliegender Luftspalt</u>



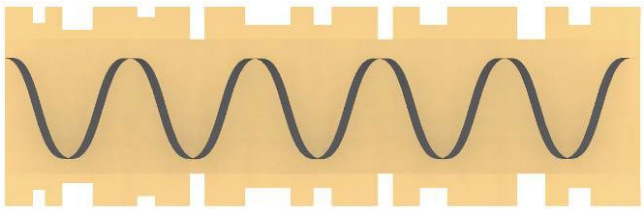
- Multilayer System
    - 1. Schicht: dichtes Paneel
    - 2. Schicht: Unverdichtetes Myzelmaterial mit Holzgitter
    - 3. Schicht: Luftspalt
    - 4. Schicht: dichtes Paneel
    - 5. Schicht: Unverdichtetes Myzelmaterial mit Holzgitter
    - 6. Schicht: dichtes Paneel
- Robustheit reduziert den Bedarf an Stützen
- Resonanz zwischen „Hohlraum"-Schichten könnte problematisch sein

Option 3: Kombination niedrige Dichte mit hoher Dichte und Luftspalt



- 5-Schicht-System:
    - 1. Schicht: Unverdichtet mit ungleichmäßigem Furniergitter und nicht bis zu 100% gefüllten Abschnitten
    - 2. Schicht: dichtes Paneel
    - 3. Schicht: Luftspalt
    - 4. Schicht: dichtes Paneel
    - 5. Schicht: Unverdichtet mit ungleichmäßigem Furniergitter und nicht bis zu 100% gefüllten Abschnitten
- Äußere Oberfläche optimiert für akustische Leistung + Ästhetik
- Verbindung möglich mit Korkdübeln

Option 4: Sandwich-Paneel (mittel - niedrig - mittel)

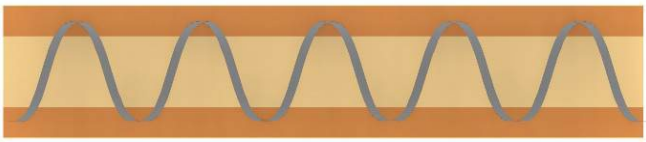


- 3-Schicht-System:

- Myzelmaterial mit mittlerer Dichte, ohne Holzgitter und gekerbten Profilen
- Unverdichtet mit gleichmäßigem Gitter
- Myzelmaterial mit mittlerer Dichte, ohne Holzgitter und gekerbten Profilen

■ Äußere Oberfläche/gekerbte Profile optimiert für akustische Leistung + Ästhetik

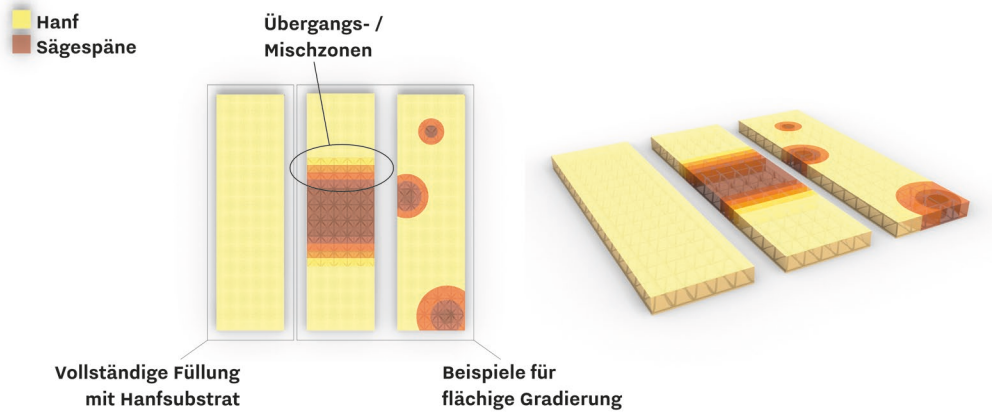
Option 5: Sandwich Paneel (mittel – niedrig – mittel) mit schichtübergreifendem Gitter



■ 3-Schicht-System:
- Dichtes Myzelmaterial
- Unverdichtetes Myzelmaterial
- Dichtes Myzelmaterial
- Furniergitter, welches hauptsächlich im unverdichteten Myzelmaterial platziert ist, gleichzeitig in das dichte Myzelmaterial hineinragt

Flächige Gradierung des Materials

Mithilfe der additiven Auftragstechnik von Myzelsubstrat kann eine kontrollierte, flächige Gradierung des Materials innerhalb eines Bauteils erzielt werden. Dadurch können verschiedene „Akustik-Zonen" innerhalb eines Bauteils erzeugt werden. In einem kleinen bis mittelgroßen Büroraum könnten solche Bauteile mit „Akustik-Zonen" zu mehr Privatsphäre zwischen den einzelnen Nutzungszonen des Raums führen, während die Kommunikationsbereiche stärker akustisch gedämpft werden könnten. Beispiele hierfür sind: Menschen stehen in der Nähe der Paneele, um miteinander zu kommunizieren, oder zwei Gruppen arbeiten auf gegenüberliegenden Seiten des Paneels). In diesem Fall besteht das obere und das untere Drittel aus einem Hanf-Substrat und das mittlere Drittel aus einem Sägespäne-Substrat. Das mittlere Drittel dient dem Schallschutz, also der Verringerung der störenden Übertragung von Sprachlauten zwischen den Arbeitsgruppen. Das obere und untere Drittel dient der „Raumdämpfung", also der Verringerung der Lärmbelastung in der gesamten Arbeitszone.



Quelle: EDEK

Abbildung 26 Flächige Gradierung des Materials

AP 3 Entwicklung von Verbindungstechnologien
AP 3.1 Strukturelle Typologie basierend auf mechanischen Eigenschaften

Anschlussformen im Trockenbau

In der Baubranche werden viele verschiedene Anschlussformen verwendet. Die meisten Trennwände bestehen aus Platten, die entweder an vier Kanten mit Hilfe eines Rahmens verbunden sind oder an zwei Kanten am Boden und an der Decke. Beispiele für ein vierseitiges Anschlusssystem sind die Metallständerwand und die Holzrahmenwand. Beide sind weit verbreitete Systeme für Innenwände, bei denen ein Rahmen aus Metall-C-Profilen oder Holzständern mit dazwischenliegendem Dämmmaterial erstellt wird. Beide Seiten der Wand werden häufig mit Gipsplatten verkleidet. Der Rahmen besteht aus einem an der Decke befestigten Profil und einem am Boden befestigten Profil. Vertikale Profile erstrecken sich zwischen Boden und Decke mit einem Mittenabstand von 600 mm. Die Gipsplatten erstrecken sich zwischen den vertikalen Profilen und werden mit Schrauben am Rahmen befestigt. Da die meisten Gipswände mit Putz verkleidet werden, sind die Schrauben am Ende nicht sichtbar. [1]

Zweiseitige Anschlusssysteme werden häufig für Glaswände oder Schiebewände verwendet. Bei diesen Systemen erstrecken sich die Paneele vom Boden bis zur Decke, wo sie mit einem Pfosten verbunden sind. Zur Ankopplung der Paneele an die Pfosten können verschiedene Anschlussarten verwendet werden, beispielsweise Schrauben, das Festklemmen der Paneele im Rahmen durch Reibung oder das Ineinandergreifen verschiedener Teile. Ein Beispiel ist die Glaswand von Straehle (System 3400), bei der die Glasscheiben für die oberen, unteren und seitlichen Verbindungen in Aluminiumprofile geklemmt werden. Für die einzelnen Plattenfugen wird entweder eine Silikondichtung oder eine Klebeverbindung verwendet. Diese Fuge ist nicht tragend, dient aber der Schalldämmung.

Eine weitere Anschlussmöglichkeit, die in der Baubranche zum Einsatz kommt, ist der Einbauanschluss. Diese Anschlüsse werden in der Regel nicht für Trockenbauwände verwendet, da sie häufig zum Verbinden von Elementen mit Beton eingesetzt werden. Dazu wird beim Gießen des Betons ein Stahlelement, beispielsweise eine Platte oder ein Anker, in das Betonelement eingebettet. Nach dem Aushärten des Betons kann das Element mit dem eingebetteten Stahlteil verbunden werden. Ein ähnlicher Ansatz könnte verwendet werden, indem ein Element vor dem Wachstum in die Myzelwand eingebettet wird.

Wie bereits erwähnt, kann ein Paneel in einem Trockenbausystem entweder an zwei Seiten oder an vier Seiten befestigt werden. Der Vorteil eines beidseitig befestigten Paneels besteht in einer nichttragenden Fuge zwischen den Platten. Dies vereinfacht die Verbindung. Allerdings müssen die Paneele die gesamte Höhe der Wand überspannen, die in Deutschland laut Bauvorschriften mindestens 2500 mm beträgt. Bei Verwendung eines vierseitig abgestützten Systems überspannen die Paneele horizontal die vertikalen Ständer. Dieser Abstand ist deutlich kleiner als die Höhe vom Boden bis zur Decke, wodurch die erforderliche Dicke (aus statischer Sicht) der Wand reduziert wird. In *HOME 1* wurde eine detailliertere Untersuchung der Wirkung der Randstützen unter Verwendung der Finite-Elemente-Modellierung durchgeführt. Diese Untersuchung zeigte, dass die vierseitige Befestigung des Paneels sowohl die horizontale Durchbiegung (um einen Faktor von ca. 1/40) als auch die maximale Biegespannung (um einen Faktor von ca. 1/5) im Vergleich zur Befestigung an der Ober- und Unterseite deutlich reduzierte1. Wie in Kapitel *AP 1.4* dargestellt, ist die Festigkeit und Steifigkeit des Myzels eher gering. Aus diesem Grund wurde beschlossen, die Spannweite der Paneele zu verringern, indem die Paneele an allen vier Seiten abgestützt werden.

Verstärkung und Verbindung von Myzelpaneelen

Um die Festigkeit des Myzels zu erhöhen, wird ein Furniergitter als Verstärkung integriert. Die Auszugsspannung des in das Myzel eingebetteten Furniergitters ist im Vergleich zur Zugfestigkeit des Furniers selbst relativ gering. Um das Furnier unter Zugspannung belasten zu können, wird vorgeschlagen, das Furnier

[1] https://knauf.com/en-GB/systems/interior-systems/partition-systems

mit einem Holzrahmen zu verbinden. Die lange Einbettungslänge des Furniers im Myzel ermöglicht es, dass die Kraft weiterhin vom Paneel auf das Furnier übertragen werden kann.

Vorbereitung, Demontage und Modulanschlüsse

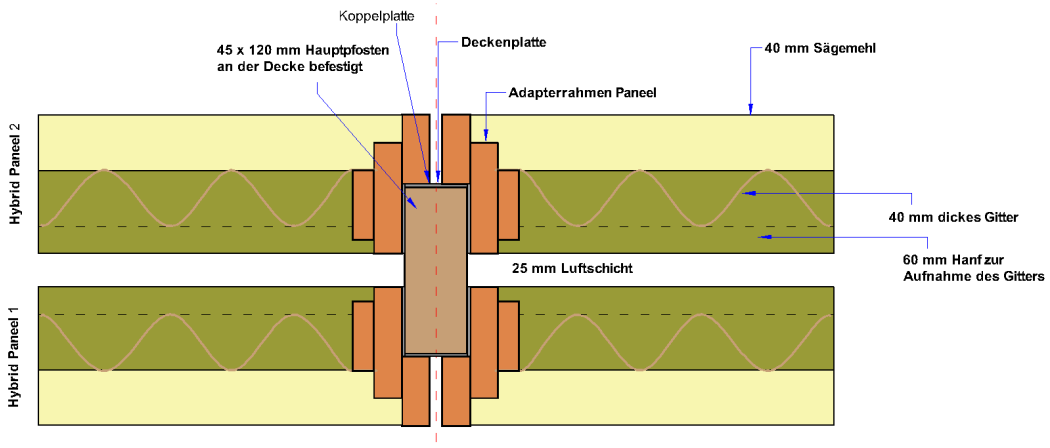
Um die Vorfertigung zu ermöglichen und sicherzustellen, dass die Paneele demontierbar sind, wird bei der Vorfertigung der Paneele an allen Seiten ein Holzpfosten angebracht. Vor dem Wachstum des Myzels wird das Furniergitter mit den Pfosten verbunden, und während des Wachstumsprozesses verbindet sich das Myzel mit den Holzpfosten. Die Holzpfosten dienen auch als Schalung für das Myzel. Diese vorgefertigten Module, bestehend aus dem Myzelpaneel und den Holzpfosten, können vor Ort mit einem Holzrahmen verbunden werden. Diese Verbindung kann demontierbar gestaltet werden, um die Kreislaufwirtschaft zu fördern und die Wiederverwendung der Paneele zu ermöglichen. Innerhalb dieses Systems sind folgende Verbindungen zu berücksichtigen:

- Verbindung zwischen dem Myzel und den Holzpfosten
- Verbindung zwischen dem Furniergitter und den Holzpfosten
- Verbindung zwischen den Holzpfosten und dem Holzrahmen

Die Festigkeit der Verbindung zwischen Myzel und Holz wurde nicht getestet. Aus physikalischen Zerstörungstests lässt sich jedoch schließen, dass eine gewisse Verbindung besteht, wenn auch eine relativ schwache. Das Myzel konnte ohne großen Aufwand vom Holzrahmen entfernt werden, allerdings war dafür der Einsatz einiger Werkzeuge erforderlich. Da die Verbindung nicht allzu stark ist, erfolgt die primäre Kraftübertragung über das Furniergitter. Das Furnier ist in das Myzel eingebettet und mit dem Holzpfosten verbunden. Es wurden Auszugstests des Furniers im Myzel durchgeführt, die vielversprechende Ergebnisse lieferten, siehe Abschnitt *Bindung zwischen Myzel und Furnier*.

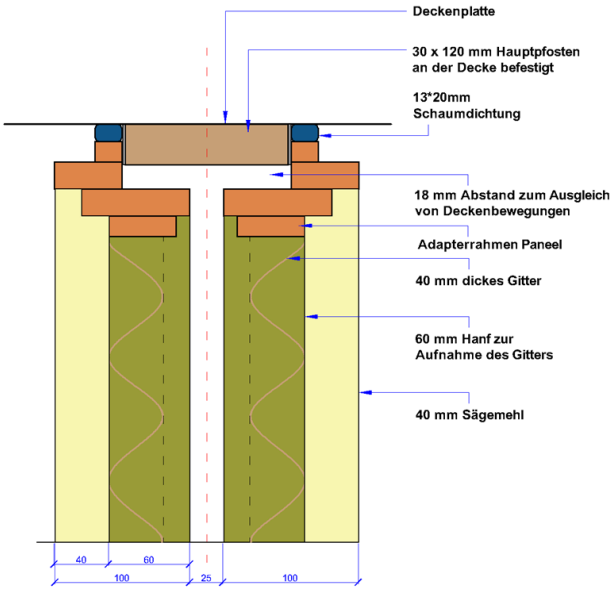
Die Verbindung des Furniers mit dem Holzpfosten muss stark genug sein, um die Kräfte des Paneels auf die Pfosten zu übertragen. Hierfür wurden mehrere Optionen in Betracht gezogen. Das Furnier könnte über mechanische Befestigungselemente wie Nägel oder Klammern mit dem Holzpfosten verbunden werden. Im Allgemeinen erhöhen mechanische Befestigungselemente die Möglichkeit, eine Verbindung wieder zu lösen. Der Nachteil der Verwendung mechanischer Befestigungselemente besteht darin, dass sie hohe lokale Spannungen an der Schnittstelle zwischen dem Befestigungselement und dem Furnier verursachen. Da das Furnier relativ dünn ist, könnte dies zu einem vorzeitigen Versagen führen. Alternativ könnte das Furnier zwischen zwei Holzteilen eingeklemmt werden, beispielsweise indem die beiden Holzteile mit einer Schraube und einer Unterlegscheibe zusammengedrückt werden. Die Reibung zwischen dem Furnier und den Holzpfosten sollte die Kraft übertragen. Bei dieser Verbindung sollte auf die Möglichkeit einer präzisen Verarbeitung geachtet werden. Bei experimentellen Tests wurde festgestellt, dass durch das Einklemmen des Furniers zwischen Holzteilen diese aufgrund der Dicke des Furniers rotieren können, was zu unerwünschten Fehlausrichtungen der Pfosten führen kann. Schließlich könnte das Furnier auf den Holzpfosten geklebt werden. Dies kann eine starke Verbindung zwischen dem Furnier und dem Pfosten herstellen, ist jedoch in der Regel nicht demontierbar. Wenn jedoch das gesamte Paneele wiederverwendbar ist, muss die Verbindung zwischen dem Furnier und den Pfosten möglicherweise nicht demontierbar sein. Zuletzt müssen die Holzpfosten mit dem Holzrahmen verbunden werden. Diese Verbindung muss vor Ort hergestellt werden und sollte demontierbar sein.

Nachfolgend sind mögliche Konstruktionen für einen Anschluss zwischen zwei Paneelen sowie für einen Anschluss zwischen einem Paneel und einer Decke dargestellt (Abbildung 27, Abbildung 28). Diese Skizzen dienten als Ausgangspunkt für die Konstruktion des Demonstrators.



Quelle: KUL

Abbildung 27 Anschlussdetail: Verbindung zwischen Holzrahmen der Biokomposit-Paneelkonstruktion und Holzpfosten



Quelle: KUL

Abbildung 28 Anschlussdetail: Querschnittszeichnung eines Deckenanschlusses der Biokompositpaneele

AP 3.2 Computergestützter Entwurf: Topologisch verzahnte Verbindungssysteme

Topologisch ineinandergreifende Systeme sind modulare Strukturen, deren Stabilität auf der Geometrie der Module und der Reibung zwischen ihnen beruht. Dadurch werden zusätzliche Verbindungselemente oder Klebstoffe überflüssig, was ein vollständig reversibles, vielseitig einsetzbares und rekonfigurierbares System ermöglicht. Ein entscheidendes Kriterium für die effektive Funktionsweise dieses Systems ist die Präzision der Kontaktflächen für eine korrekte Lastübertragung.

Aufgrund der schwer vorhersehbaren Dimensionsänderung von Myzel-Verbundwerkstoffen während des Trocknungsprozesses können topologisch ineinandergreifende Teile nicht mit der erforderlichen Präzision hergestellt werden. Um dieses Problem zu lösen, wird eine „teilweise Kompression" des Myzel-Verbundwerkstoffs vorgeschlagen. Basierend auf der Masterarbeit „MycoPress" von Till Rehling an der Kunsthochschule Kassel wurde ein teilweise komprimiertes, topologisch ineinandergreifendes Trennwandsystem entwickelt.

Der Teilkompressionsprozess funktioniert wie folgt: Das Pressen wurde im getrockneten und im lebenden Zustand getestet. Die Presse bestand aus Aluminium und war so geformt, dass sie sich von der ungepressten

zur gepressten Form kontinuierlich abflachte. Die Presse wurde auf 110–130 °C aufgeheizt (die höchste in der Werkstatt mögliche Temperatur), die Proben wurden im ungefähren Verhältnis 1:4 gepresst und die Presszeit betrug 10 Minuten. Im trockenen Zustand kam es bei den Hanf- und Sägemehlproben zu Materialbrüchen. Im lebenden Zustand führte das Heißpressen dagegen zu der gewünschten Form mit glatten Übergängen. Allerdings dehnte sich die Sägemehlprobe danach wieder um einige Millimeter aus (Abbildung 29).



Quelle: EDEK

Abbildung 29 Teilkompressionstests von links nach rechts: vor der Teilkompression an Hanf- und Sägemehlproben, nach der Teilkompression an Hanf- und Sägemehlproben

Damit dieser Prozess in großem Maßstab funktioniert, müssen zunächst überdimensionale Paneele nach dem Standardverfahren hergestellt werden. Anschließend werden die Kanten während des Trocknungsprozesses, wenn die Paneele noch teilweise feucht sind, unter hohem Druck und Hitze gepresst. Da scharfe Kanten in der Pressform das Myzel zerreißen würden, wurde ein Pressprofil mit sanften Kurven gewählt. Damit die Verriegelung funktioniert, müssen alle vier Kanten des Paneels gepresst werden. Da zwei Kanten von gegenüberliegenden Seiten gepresst werden müssen, wird ein zweistufiger Prozess vorgeschlagen. Dadurch könnten die Presswerkzeuge auf der oberen Platte der Presse angebracht werden, während das Paneel flach auf der unteren Platte der Presse liegen kann, wodurch Verformungen und andere unerwünschte Beschädigungen des Myzelpaneels verhindert werden.

Da die Fertigungs- und Presskapazitäten unseres Labors in Bezug auf das großflächige Pressen von Myzel begrenzt sind, war es nicht möglich, dieses System in großem Maßstab zu überprüfen. Stattdessen wurde zur Überprüfung der Plausibilität dieses Konzepts ein kleines Modell eines solchen Wandsystems im 3D-Druckverfahren hergestellt (Abbildung 30). Dieses Modell zeigte die allgemeine Funktionsweise des Systems. Für die Montage des Systems muss die Decken- oder Bodenleiste unter dem letzten Paneel abnehmbar sein und sollte nach dem Einsetzen des letzten Paneels angebracht werden, um das gesamte System zu verriegeln. Bei Bedarf können die Paneele zusätzlich zur Verriegelung in den komprimierten Bereichen miteinander verschraubt werden.



Quelle: EDEK

Abbildung 30 3D-gedrucktes Modell, entworfen nach dem Prinzip der topologischen Verriegelung

Dieses System ist vielversprechend und könnte in Zukunft zu Konstruktionsvorteilen führen. Da die komprimierten Teile der Paneele die Festigkeit des Myzels erheblich erhöhen, könnte potenziell auf einen externen Holzrahmen verzichtet werden, wodurch Ressourcen gespart würden. Wenn zudem auf vertikale Pfosten verzichtet wird, könnten der Holzverbrauch und die Montagezeit vor Ort zusätzlich reduziert werden.

AP 3.3 Andere Verbindungssysteme und strukturelle Integration

Die Auszugsfestigkeit des Furniers in Myzelium wurde experimentell analysiert, siehe Kapitel *Bindung zwischen Myzel und Furnier*. Bei reinem Furnier beträgt die Auszugsfestigkeit 0,07 ±0,2 MPa. Bei einer Einbaulänge von 200 mm und einer Furnierbreite von 15 mm beträgt die maximale Zugkraft im Furnier 300 N. Das Myzelium Wandelement besteht aus einem Furniergitter, was bedeutet, dass jeder einzelne Strang 300 N übertragen kann. Dies wird als ausreichend stark angesehen, um die Last vom Myzel auf den Holzrahmen zu übertragen. Bei einer Paneelbreite von 80 cm wäre die Einbettungslänge noch größer, wodurch sich die maximale Zugkraft in den Furniersträngen erhöhen würde.

Die Norm „BS EN 204:1991 Klassifizierung von nichttragenden Klebstoffen für die Verbindung von Holz und Holzwerkstoffen" besagt, dass Klebstoffe für die Verbindung von Holz eine Mindesttrocknungsfestigkeit von 10 MPa erreichen müssen. Das bedeutet, dass eine Klebeverbindung des Furniers mit dem Holzpfosten eine Mindestkontaktfläche von etwa 30 mm^2 hat, wenn man die maximale Zugkraft von 300 N berücksichtigt. Dies ist mit einer Breite von 15 mm leicht zu erreichen.

Das Myzel-Wandelement wird an allen vier Seiten von einem Holzrahmen gestützt. Da die Breite des Wandelements im Vergleich zur Höhe gering ist, wird das Wandelement horizontal zwischen den vertikalen Elementen des Rahmens gespannt. Die vertikalen Holzelemente reichen vom Boden bis zur Decke und sind etwa 2500 mm lang. Das Myzel hat ein niedriges Elastizitätsmodul, was bedeutet, dass sich das Wandelement erheblich verformt. Um die Gesamtverformung zu begrenzen, müssen die Holzelemente steif sein. Daher wird ein Holzelement entworfen, das sich nicht mehr als 1 mm verformt. Um dies zu erreichen, sollte der Flächenträgheitsmoment des Holzelements mindestens 9,0*10^6 mm^4 unter Berücksichtigung einer horizontalen Last von 0,5N betragen.

Bei Betrachtung des in Abbildung 27 dargestellten Entwurfs eines Paneel-zu-Paneel-Anschlusses beträgt das zweite Flächenträgheitsmoment des Hauptpfostens (45 mm x 120 mm) etwa 6,5*10^6 mm^4.

$$\frac{1}{12} * 45 * 120^3 = 6{,}5 * 10^6\ mm^4$$

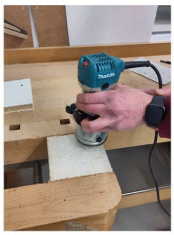
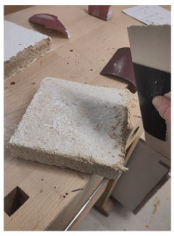
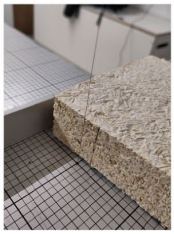
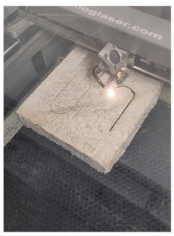
Dies ist zwar kleiner als der angestrebte Wert, jedoch tragen, wie in der Skizze zu sehen ist, mehr Holzteile zur Steifigkeit des Wandelements bei. Da der Anschluss zwischen den kleinen Holzteilen und dem Hauptpfosten demontierbar sein muss, wird das Flächenträgheitsmoment jedes einzelnen Elements zu einem Gesamtwert addiert, anstatt alle Holzteile als ein Element zu betrachten. Unter der Annahme, dass alle kleinen Holzteile eine Abmessung von 20 mm x 50 mm haben, beträgt das zweite Flächenträgheitsmoment aller dieser kleinen Holzteile zusammen 2,5 * 10^6 mm^4:

$$3\ parts * 4\ sides * \frac{1}{12} * 20 * 50^3 = 2{,}5 * 10^6\ mm^4$$

Rechnet man diese zu den Steifigkeiten hinzu, ergibt sich ein Gesamtquadratisches Flächenträgheitsmoment von 9,0*10^6 mm^4, was dem angestrebten Wert entspricht.

AP 3.4 Untersuchung von Zuschnittmöglichkeiten / Detaillierung

Die Oberflächenstruktur und Farbe eines Verbundwerkstoffs auf Myzelbasis können durch Veränderung der Wachstumsbedingungen gesteuert werden. Wie bei herkömmlichen Baumaterialien ist es jedoch interessant, die Myzelpaneele schneiden oder schleifen und Löcher in sie bohren zu können, um sie für bestimmte Anwendungsfälle geeignet zu machen. Beispielsweise, um ein Endprodukt mit bestimmten Maßen zu erhalten, Möbel und Einbauten an einer Myzel-Wandtrennwand anzubringen oder eine rauere Oberfläche auf eines bereits gewachsenen und getrockneten Paneels zu erhalten. Um den Spielraum an Flexibilität und Modifikationen zu erkunden, die mit der Nachbearbeitung erreicht werden können, wurden sechs verschiedene Techniken an Hanf- und Sägemehl-Myzel-Verbundwerkstoffen getestet (Abbildung 31).

Experiment	Prozess		Resultat	
	Hanf	Sägespäne	Hanf	Sägespäne
A. Sägen / Schneiden				
B. Fräsen				
C. Bohren				
D. Schleifen				
E. Heißdraht-schneiden				
F. Laser				

Quelle: EDEK

Abbildung 31 Matrix der sechs verschiedenen Verarbeitungstechniken (A.) Sägen, B.) Fräsen, C.) Bohren, D.) Schleifen, E.) Heißdrahtschneiden und F.) Laserschneiden) für Verbundwerkstoffe aus Hanf und Sägemehlmyzel sowie die Ergebnisse

Sägen / Schneiden

Schneiden der Proben auf die Ausgangsgröße (siehe Abbildung 31: A. Schneiden) 15x15cm. Getrocknete Proben werden mit einer Tischsäge geschnitten, lebende Proben mit einer Bandsäge. Die Ergebnisse sind in beiden Fällen klare Schnittkanten. Keine Absplitterungen und gute Qualität der Ecken.

Fräsen

Fräsen der Proben im getrockneten Zustand mit einer Handfräse. Die gefrästen Formen sind ein Loch, eine Tasche (ca. 5 cm lang) und eine Planfräsung. Es wurde ein 5 mm Bohrer verwendet. Das Ergebnis sind ungleichmäßige Geometrien, insbesondere bei der Hanfprobe. Partikel sind herausgerissen, die Konturen der gefrästen Geometrien sind ungleichmäßig.

Bohren

Die Löcher wurden von Hand (linke Spalte) und mit einer Standbohrmaschine (rechte Spalte) gebohrt. Durchmesser von oben nach unten: 3mm, 7,5mm und 10mm. Die Ergebnisse sind eher weniger überzeugend: Die Myzelhaut behindert präzise Außenkanten auf der Vorder- und Rückseite.

Schleifen

Ursprünglich war geplant, Schleifversuche mit der Hand und mit einem Teller- und Bandschleifer durchzuführen. Letztendlich wurden nur Handschleifversuche durchgeführt (mit Schleifpapier der Körnungen 80, 120, 240 und 400), da die Ergebnisse nicht so vielversprechend waren, um sie maschinell weiterzuführen. Aufgrund der Fasern in den Materialien waren die geschliffenen Kanten bei jedem Versuch ungleichmäßig und mit Absplitterungen versehen.

Schneiden mit heißem Draht

Das Schneiden mit heißem Draht wurde ausprobiert und schlug fehl: Der Draht war nicht in der Lage, durch das Material zu schneiden.

Laser

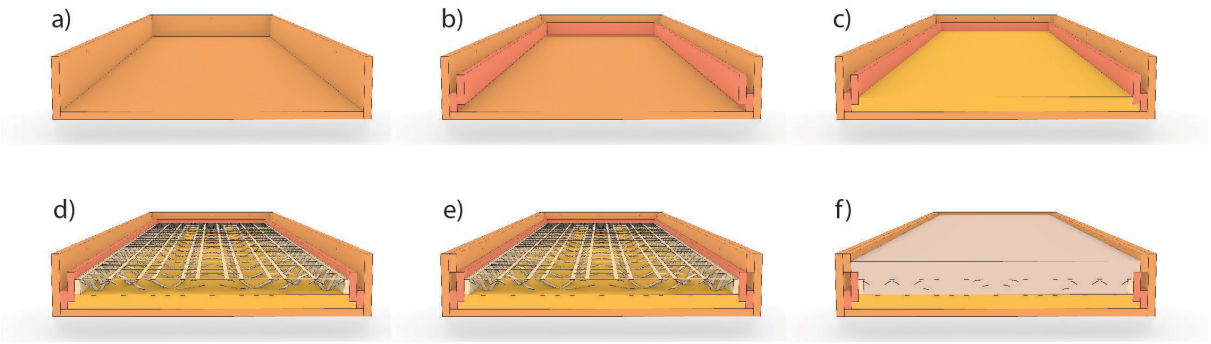
Die Lasertests wurden mit einem 30-Watt-Laser durchgeführt. Es wurde das Gravieren und Schneiden getestet. Die Leistung für das Gravieren wurde auf 20 %, für das Schneiden auf 100 % (W) eingestellt. Das Gravieren zeigte gute Ergebnisse, eine klare Linie wurde sowohl in die Hanf- als auch in die Sägemehlprobe graviert. Das Schneiden funktionierte nicht, die Hanfprobe fing schon beim ersten Versuch Feuer. Bei der Sägemehlprobe wurde sie auch nach 10 Versuchen nicht vollständig durchgeschnitten.

AP 3.5 Integration in den additiven Fertigungsprozess

Das Ziel bestand darin, ein modulares System mit einem hohen Automatisierungsgrad zu entwickeln. Dabei waren die Gestaltung einer robotergestützt herstellbaren Elementgeometrie und die präzise Definition der Fertigungsabfolge von zentraler Bedeutung, um den Übergang vom digitalen Entwurf zur physischen Produktion zu optimieren.

Die Verwendung zweier Myzel-Substrate mit unterschiedlichen Wachstumsraten erforderte die Implementierung eines zweistufigen Wachstumsprozesses. Das langsamer wachsende Sägemehlsubstrat wird zunächst aufgebracht und über 4–7 Tage kultiviert. Wird das robotisch gefertigte Furniergitter während dieser Phase als Teil des Holzrahmens in der Wachstumskammer belassen, führt die hohe Luftfeuchtigkeit zu Verformungen des Gitters und erhöht das Risiko von Schimmelbildung. Um diese Herausforderungen zu adressieren, wurde ein modularer Rahmen entwickelt, der die sequenzielle Fertigung unterstützt: Zunächst wird die Außenform digital vorbereitet und zusammengesetzt. Anschließend wird der Außenrahmen aufgesetzt, das beimpfte Sägemehlmaterial eingebracht und die erste Wachstumsphase durchgeführt. Nach Abschluss dieses Schrittes wird der Innenrahmen inklusive Furniergitter präzise in den Außenrahmen

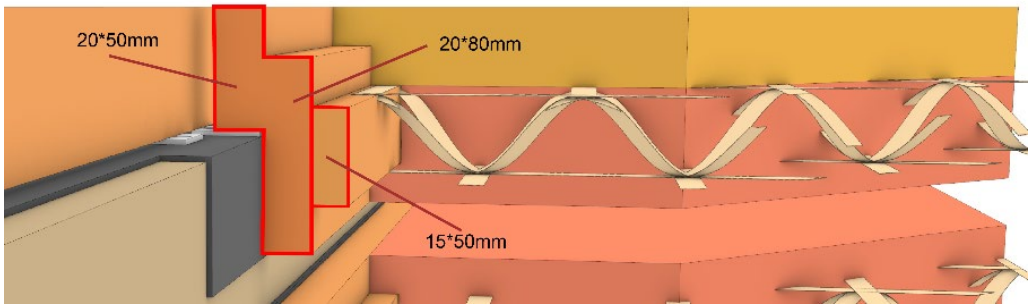
eingesetzt und verschraubt, um die mechanische Kraftübertragung vom Furniergitter auf den Rahmen sicherzustellen. Danach wird das beimpfte Hanfmaterial aufgebracht und etwa eine Woche kultiviert (Abbildung 32).



Quelle: EDEK

Abbildung 32 a) montierte Außenform, b) Anbringen des Außenrahmens, c) Inokulierte Ablagerung und Wachstum von Sägemehlsubstrat, d) Einbau des Innenrahmens mit angebrachtem Gitter, e) Anbringen eines dünnen Holzrahmens, um außen ein schlankes Erscheinungsbild zu erhalten, f) Ablagerung und Wachstum des beimpften Hanfsubstrats

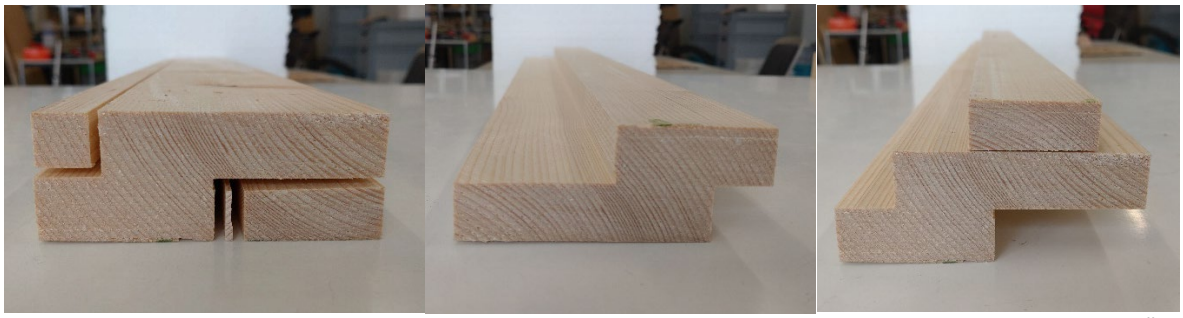
Der modulare Aufbau des Rahmens erfüllt nicht nur die Anforderungen des zweistufigen Wachstumsprozesses, sondern entspricht auch den Prinzipien von Wiederverwendung und Recycling. Am Ende der Lebensdauer der Myzeliumbauteile kann der Rahmen demontiert und für andere Wandkomponenten wiederverwendet werden. Der Holzrahmen selbst besteht aus zwei Komponenten, die unterschiedliche Funktionen übernehmen. Der äußere Rahmen wird aus zwei Kanthölzern zusammengefügt; ein gezielter Versatz der Hölzer ermöglicht die nahtlose Integration in die vertikalen Ständerbau-Elemente. Der innere Rahmen wird mit dem Furniergitter verleimt und nach der ersten Wachstumsphase in den Außenrahmen eingesetzt und verschraubt (Abbildung 33).



Quelle: EDEK

Abbildung 33 Detailzeichnung des Holzrahmens der Myzeliumwandelemente mit Verbindung an das innenliegende Furniergitter und Anschluss an Holzständer

Zur weiteren Optimierung der Produktion wurde untersucht, wie der Fertigungsprozess vereinfacht und der Klebstoffeinsatz minimiert werden kann. Daraus entstand ein Ansatz, bei dem der gesamte Rahmen aus einem einzigen 4 × 10 cm Kantholz gefertigt wird. Durch diese Vorgehensweise entfällt die Klebefuge im äußeren Rahmen, was Material- und Zeiteinsparungen ermöglicht. Der innere Rahmen wird aus einem Reststück gefertigt, das beim Zuschnitt des äußeren Rahmens entsteht, wodurch der Verschnitt minimiert wird (Abbildung 34).



Quelle: EDEK

Abbildung 34 Studie zur Herstellung des Rahmenprofils mit einfachen Schnitten aus einem Kantholz

AP 3.6 Statischer Entwurf für Verbundsysteme

Für den statischen Entwurf des Verbundsystems wurde die strukturelle Konstruktion eines Myzelwandbauteils wird mithilfe der Finite-Elemente-Modellierung analysiert. Das folgende Kapitel beschreibt die Entwurfsprinzipien und Ergebnisse der Analyse.

Grundlagen und Annahmen

Die Struktur eines Wandelements als vollwertige Innenwand mit einer Gesamthöhe von bis zu 2.4 m bis 3 m wird gemäß den europäischen Normen, den Eurocodes, entworfen. Die Konstruktionsberechnungen erfolgen gemäß der Eurocode-Reihe DIN-EN 1990, 1991 und 1995, einschließlich der deutschen nationalen Anhänge. Angesichts des innovativen Charakters des Myzel-Verbundsystems werden zusätzliche Materialdaten und Ergebnisse aus Labortests oder anderen Literaturquellen herangezogen, um zu einer geeigneten Best-Practice-Konstruktion zu gelangen.

Die in Kapitel *AP 1.4* dieses Berichts angegebenen Materialeigenschaften und -merkmale wurden für die Konstruktion zugrunde gelegt, sofern nicht anders angegeben. Für die Materialfaktoren γ_M wird davon ausgegangen, dass der Myzel-Furnier-Verbundwerkstoff derselben Holzklasse angehört. Daher wurde γ_M gemäß DIN-EN 1995 mit 1.3 bestimmt. Da die Wandkomponente in einer Innenraumumgebung mit kontrolliertem Feuchtigkeitsgehalt installiert wird, wird der Modifikationsfaktor k_{mod} für kurzfristige Einwirkungen auf der Grundlage von Tabelle 3.1 der DIN-EN 1995-1-1 mit 0,9 bestimmt. Das Verformungsverhalten des Verbundwerkstoffs unter langfristiger Einwirkung ist noch nicht klar. Ein Faktor im Zusammenhang mit der Verformung für holzähnliche Strukturen, wie z. B. der Kriechfaktor k_{def}, wird in der aktuellen Studie nicht berücksichtigt und soll in einer späteren Phase der Forschung weiter untersucht werden. Die für diese Studie angenommenen Materialeigenschaften sind in Tabelle 5 aufgeführt.

Tabelle 5 Auflistung der in der FEM-Analyse verwendeten Materialeigenschaften

Material	Eigenschaft	Durchschnittswert	Zielwert
Myzel-Biokomposit	Biegefestigkeit	0.12 MPa	0.09 MPa
einschließlich Furnier	Elastizitätsmodul	4.1 MPa	3.15 MPa
Holz	Druckfestigkeit		14.5 MPa
	Zugfestigkeit		10.5 MPa
	Biegefestigkeit		17.4 MPa
	Elastizitätsmodul		11 000 MPa

Quelle: Arup

Zielwerte

Um sicherzustellen, dass die Konstruktion die Anforderungen an ihre Auslegung erfüllt, ist sie in einer angemessenen Anzahl von Grenzfällen zu überprüfen. Alle Grenzfälle, die sich auf die Sicherheit von Personen und/oder die Sicherheit der Konstruktion beziehen, werden als Grenzzustände der Tragfähigkeit (ULS) klassifiziert. Die in DIN-EN-1990 festgelegten Grenzwerte der Tragfähigkeit werden als relevant für die Auslegung angesehen und überprüft.

Die Grenzwerte, die sich auf die Funktion der Konstruktion bei normaler Nutzung, den Komfort von Personen und/oder das Erscheinungsbild des Gebäudes beziehen, werden als Gebrauchstauglichkeitsgrenzwerte (SLS) klassifiziert. Die unten aufgeführten empfohlenen Ausgangspunkte wurden bis zum aktuellen Stand der Konstruktion angewendet.

Die Trennwand wird so konstruiert, dass sie die folgenden Anforderungen an horizontale Verschiebungen erfüllt, wobei h die Höhe der Wand ist:

- Horizontale Verschiebung pro Etage: $u \leq h/300$

Lasten

Die folgenden Lasten werden bei der Konstruktion des Prototyps berücksichtigt:

- Eigengewicht der Verbundwandkomponente unter Berücksichtigung einer Dichte von 200 kg/m3 für das Myzel einschließlich desFurniers.
- Vertikale Auflast 0,06 kN/m² bei zusätzlichen Verkleidungspaneelen auf beiden Seiten des Bauteils.
- Horizontale Last: Linienlast qk, die aus der Ebene der Trennwand herauswirkt. Der Wert von qk wird anhand der Gebäudekategorie (siehe DIN-EN 1991) bestimmt:
    - Kategorie A (Wohngebäude) und B1 (Büroflur ohne schwere Geräte): qk = 0,5 kN/m.
    - Kategorie B2, B3 (Büro, Arbeitsbereich außer den in B1 genannten): qk = 1,0 kN/m.

In der aktuellen Studie wird ein typisches Büro der Kategorie B1 mit qk = 0,5 kN/m betrachtet.

In der Studie werden zwei Lastkombinationen betrachtet, eine für ULS und eine für SLS. Die ULS-Kombination wird zur Bewertung der Spannungen verwendet, die SLS-Kombination zur Bewertung der Verformungen.

- ULS: 1,2*permanent + 1,5*variable
- SLS: 1,0*permanent + 1,0*variable

Analyse

Eine Reihe von Parameterstudien mittels struktureller Finite-Elemente-Analyse (FEA) unter Verwendung von GSA 10.2 wurde durchgeführt, um das strukturelle Verhalten der Myzelwand in Bezug auf einige wichtige Konstruktionsparameter, darunter die Abmessungen der n und des Rahmens, zu verstehen. Diese Studien haben den Entscheidungsprozess für den endgültigen Prototyp erleichtert und dazu beigetragen, die geeigneten Konstruktionsparameter aus den mechanischen Eigenschaften des Verbundwerkstoffs, den geometrischen Abmessungen und der Konstruktion des Holzrahmens auszuwählen, um die Konstruktionsanforderungen zu erfüllen. Die Studie umfasst die folgenden Fälle:

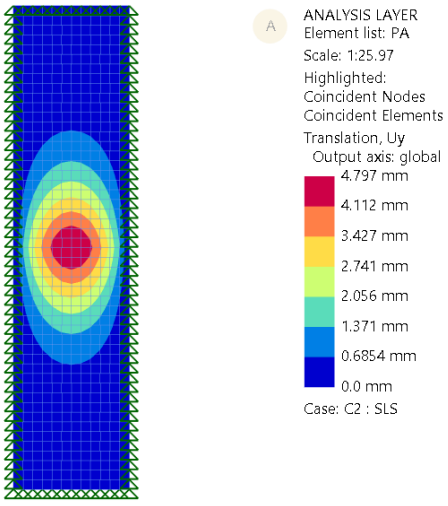
- Fall 1 Wandelementbreite: In Home I wurde der Einfluss der Paneeldicke bewertet. Es wurde festgestellt, dass bei Dicken im Bereich von 150 mm bis 100 mm die resultierenden horizontalen Durchbiegungen zwischen 7,2 mm und 22,7 mm liegen, was 1/416 bis 1/133 der gesamten Wandhöhe entspricht. Die Biegespannungen dieser Fälle liegen ebenfalls in einem angemessenen Bereich, wenn man die Materialeigenschaften berücksichtigt. Diese Durchbiegungen werden jedoch auch von der Höhe und Breite des Wandelements beeinflusst. Die Höhe eines Wandelements variiert nicht stark, da sie durch die Mindesthöhe vom Boden bis zur Decke begrenzt ist. Eine größere Wandelementbreite reduziert jedoch

die Montagezeit. Daher ist es das Ziel, den Einfluss der Wandelementbreite auf die strukturelle Leistung zu bewerten.

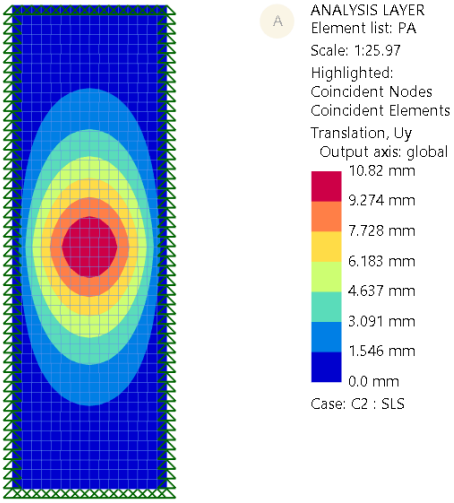
- Fall 2 Eigenschaften des Holzrahmens: Eine steifere Stütze kann zusätzliche strukturelle Vorteile bieten, z. B. eine Verringerung der Durchbiegung außerhalb der Ebene. Durch die Vergrößerung des Holzrahmens wird jedoch mehr Material benötigt, und die Fuge zwischen den Myzelpaneelen wirkt unhandlich.

Fall 1 Wandelementbreite

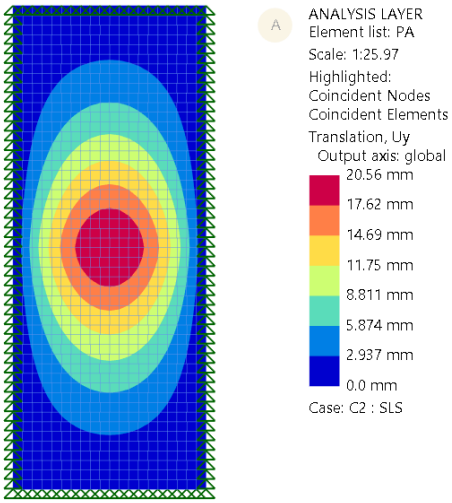
Die Wandelementbreite ist ein wichtiger Parameter, der das Gesamtverhalten der Konstruktion und die Montagefreundlichkeit beeinflusst. In dieser Studie werden vier verschiedene Breiten betrachtet: 600 mm, 800 mm, 1000 mm und 1200 mm. Für diese Studie betragen die Dicke und Höhe des Wandelements jeweils 100 mm und 2500 mm. Um den Einfluss des Holzrahmens auszuschließen, werden alle Kanten des Wandelements mit gelenkigen Stützen abgestützt. In Abbildung 35 und Abbildung 36 sind die Simulationsergebnisse von Fall 1 dargestellt. Bei Betrachtung der Ergebnisse ist zu erkennen, dass sowohl die horizontale Verformung als auch die Biegespannung mit zunehmender Elementbreite zunehmen. Dies ist zu erwarten, da sich die Spannweite des Myzelpaneels vergrößert. Bei allen Wandelementbreiten liegt die maximale Biegespannung unter der Bemessungsbiegefestigkeit von 0,09 MPa. Die maximale Verformung bei einer Wandhöhe von 2500 mm beträgt jedoch 8,3 mm. Eine Elementbreite von 1000 mm oder 1200 mm überschreitet diesen Wert deutlich. Bei einer Elementbreite von 800 mm oder weniger wird die Verformung als akzeptabel angesehen.



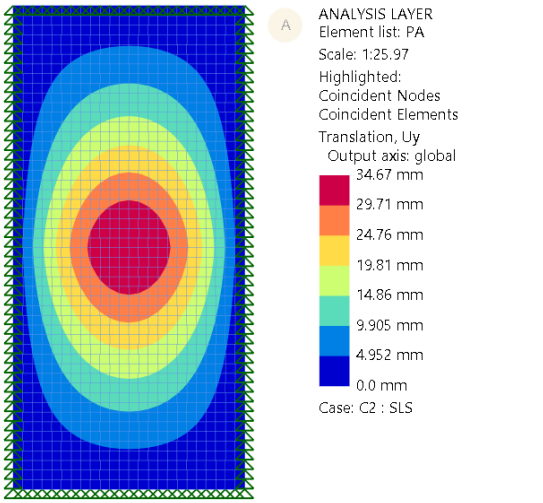
Wandelementbreite: 600mm



Wandelementbreite: 800mm

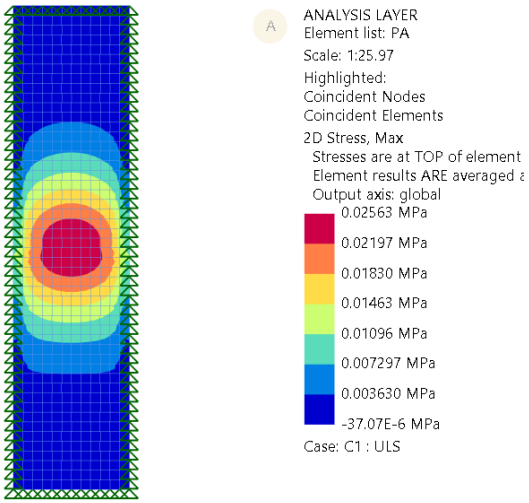


Wandelementbreite: 1000mm

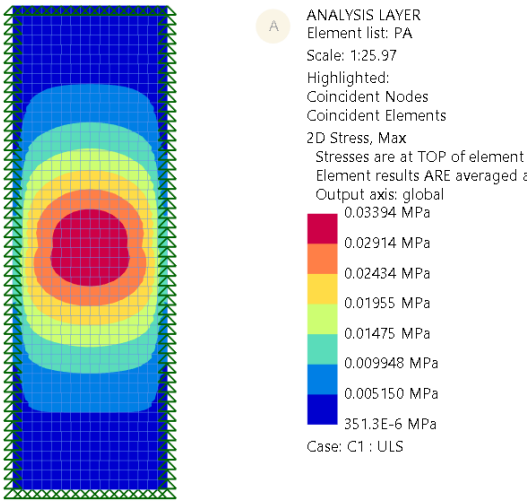


Wandelementbreite: 1200mm

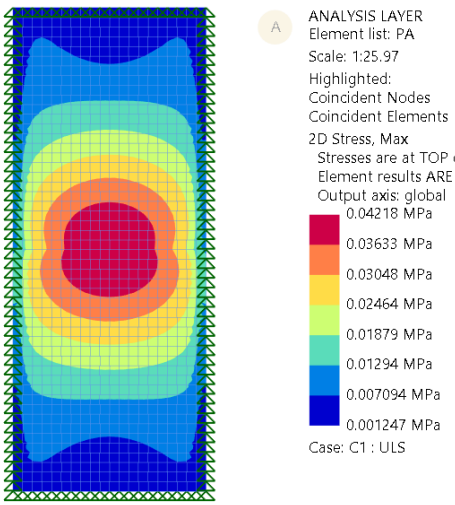
Abbildung 35 Fall 1 Simulationsergebnisse: horizontale Verformung in mm, Wandelementbreite von links oben nach rechts unten: 600 mm, 800 mm, 1000 mm, 1200 mm



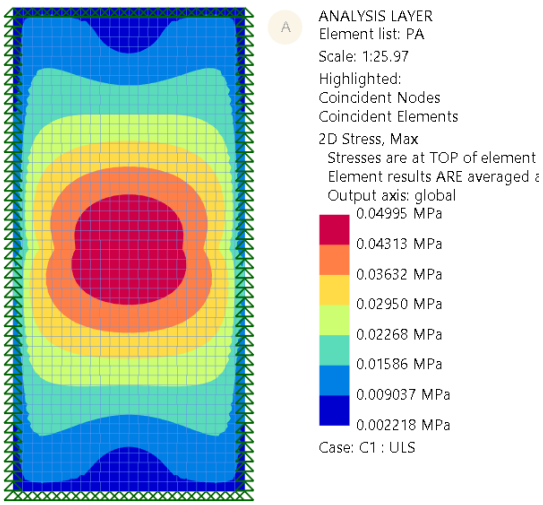
Wandelementbreite: 600mm



Wandelementbreite: 800mm



Wandelementbreite: 1000mm



Wandelementbreite: 1200mm

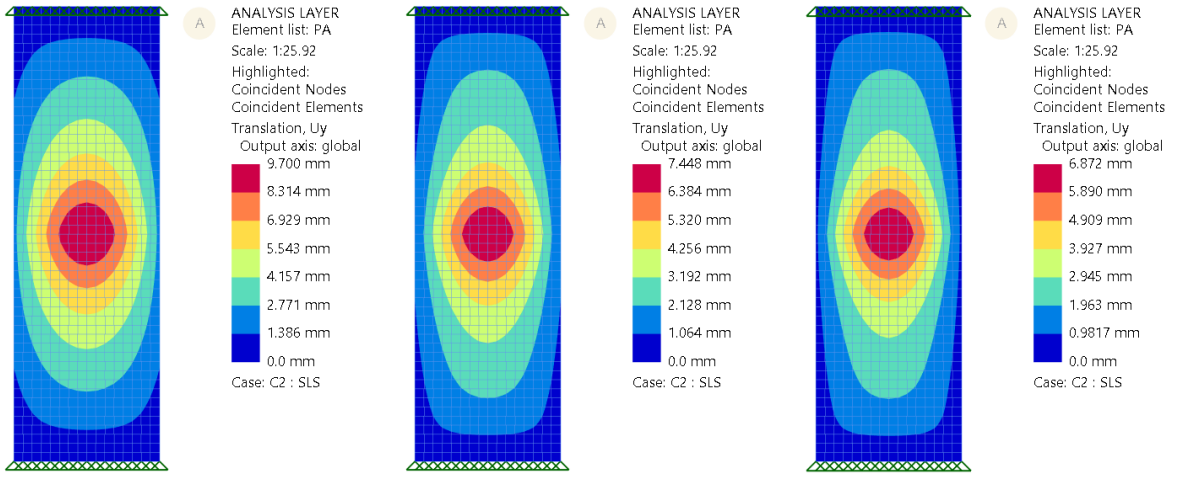
Quelle: ARUP

Abbildung 36 Fall 1 Simulationsergebnisse: Biegespannung in MPa, Wandelementbreite von links oben nach rechts unten: 600 mm, 800 mm, 1000 mm, 1200 mm

Fall 2 Eigenschaften des Holzrahmens

Die Eigenschaften des Holzrahmens sind ein weiterer wichtiger Parameter. Wie aus den Ergebnissen von Fall 1 ersichtlich ist, ist die Verformung eines Wandelements von entscheidender Bedeutung. Die zusätzliche Verformung des Holzrahmens sollte daher minimiert werden. Für diese Studie wird das Flächenträgheitsmoment für den Pfosten (vertikaler Ständer des Holzrahmens) variiert. Es werden drei Werte berücksichtigt: 2,5*10^6 mm^4, 5,0*10^6 mm^4 und 7,5 *10^6 mm^4. Da der Pfosten auf jeder Seite durch ein Wandelement wird, sollte das Flächenträgheitsmoment eines Pfostens, der in einer Wand mit mehreren Elementen verwendet wird, verdoppelt werden. Für diese Studie betragen die Abmessungen des Wandelements 2500 mm x 800 mm x 100 mm (Höhe x Breite x Tiefe).

In Abbildung 37 sind die horizontalen Verformungen des Wandelements für die drei verschiedenen Pfostendimensionen angegeben. Es ist ersichtlich, dass durch die Erhöhung der Steifigkeit des Pfostens die Gesamtverformung des Paneels leicht abnimmt. Bei der geringsten Steifigkeit verformt sich der Pfosten selbst um etwa 2,5 mm, während diese Verformung bei der höchsten Steifigkeit nur 1,2 mm beträgt. Darüber hinaus verringert ein steiferer Pfosten die Drehung des Paneels an den Kanten. In Fall 1 wurde die Kante durch gelenkige Stützen abgestützt, die eine freie Drehung ermöglichten. Es ist zu beachten, dass durch den Ersatz der gelenkigen Stützen durch ein Holzelement die Gesamtverformung des Paneels verringert wird, obwohl sich das Holzelement selbst verformt. Dies hängt damit zusammen, dass das Holzelement eine gewisse Drehung des Paneels einschränkt. Je steifer der Pfosten ist, desto stärker wird die Drehung eingeschränkt.



I_{yy} = 2,5 *10^6 mm^4 I_{yy} = 5,0*10^6 mm^4 I_{yy} = 7,5*10^6 mm^4

Quelle: ARUP

Abbildung 37 Fall 2 Simulationsergebnisse: horizontale Verformung in mm, Flächenträgheitsmoment von links nach rechts: 2,5*106 mm4, 5,0*106 mm4 und 7,5*106 mm4

Aus den Ergebnissen in Abbildung 37 geht hervor, dass zur Begrenzung der Verformung auf h/300 das Flächenträgheitsmoment etwa 5,0*10^6 mm^4 pro Wandelement betragen sollte, was 10,0*10^6 mm^4 pro Pfosten für eine vollständige Wand bedeutet. Dies entspricht in etwa dem in Absatz AP3.3 berechneten Wert von 9,0*10^6 mm^4.

AP 4 Bauteil- und Schalungsentwicklung und Charakterisierung

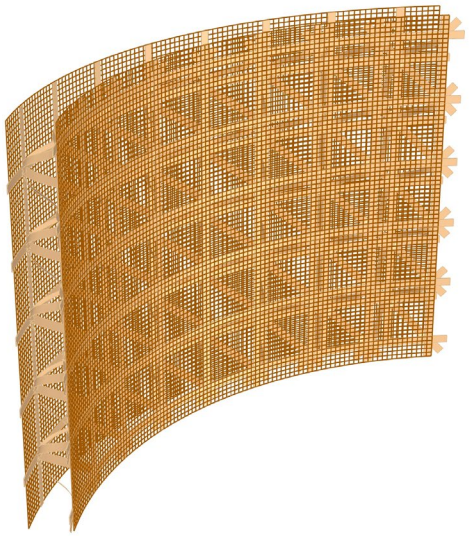
AP 4.1 Entwicklung und Auslegung von Bauteilen

Im Rahmen des HOME1.0-Projekts wurde bereits die erfolgreiche Herstellung einer großflächigen Trennwand aus Myzelium demonstriert. In dem Projekt wurde die Optimierung der Verwendung von Schalungen als einer der potenziellen Verbesserungspunkte identifiziert. Die gefräste Holzschalung war zwar sehr effektiv, um der

Wandfläche eine definierte Form zu geben, jedoch führte der mangelnde Luftstrom auf der Oberfläche zu teilweise schlechtem Myzelwachstum und einem schwierigen Entschalungsprozess. Dabei wurden beispielsweise einige Teile von der Oberfläche abgerissen. Als mögliche Lösung für dieses Problem werden in Kapitel 4.2 Stay-in-Place-Schalungen vorgeschlagen und untersucht. Das HOME1.0-Projekt konzentrierte sich ausschließlich auf die Verwendung von beimpftem Hanfsubstrat, daher bezogen sich alle strukturellen und akustischen Ergebnisse auf dieses Material. Mit der Zugabe von beimpftem Sägemehl im HOME2.0-Projekt musste die Leistung des Hybridsystems erneut untersucht und validiert werden. Zu diesem Zweck wurden eine Reihe von akustischen und strukturellen Tests konzipiert und durchgeführt (Kapitel 4.3). Die Ergebnisse der strukturellen Tests finden sich in Kapitel 4.4, die Ergebnisse der akustischen Tests sind in Kapitel 4.5 dokumentiert. Die letzte Reihe der Materialcharakterisierung umfasste Brandversuche (Kapitel 4.6), die bei der Entwicklung von architektonischen Bauteilen von entscheidender Bedeutung sind.

AP 4.2 Untersuchungen zur Stay-in Place Schalung

Inspiriert von seit langem bekannten formbaren Materialien wie Beton, Ton, Erde usw. wurde eine Stay-in-Place-Schalung entwickelt, die ein integriertes Verstärkungsgitter und natürliche Gewebe kombiniert. Diese Studie erweiterte die Forschung zu furnierverstärktem Myzel auf gekrümmte Elemente, was langfristig die Gestaltungsfreiheit mit Myzel-basierten Verbundwerkstoffen erhöhen könnte. Die vorgeschlagene Stay-in-Place-Schalung für myzelbasierte Verbundwerkstoffe wird durch die Integration von Textilien in das Verstärkungsgitter erreicht. Dadurch kann das mit Myzel beimpfte Substrat darin gehalten werden und es werden keine Schalungsmaterialien mehr benötigt. Die Verstärkung behebt auch die inhärente Schwäche von Myzel, die geringe Biegefestigkeit. Zusätzlich zum eingebetteten 3D-Furniergitter könnte die Integration eines Textils auf der Oberfläche des Verbundwerkstoffs dessen strukturelle Leistungsfähigkeit weiter verbessern (Abbildung 38).

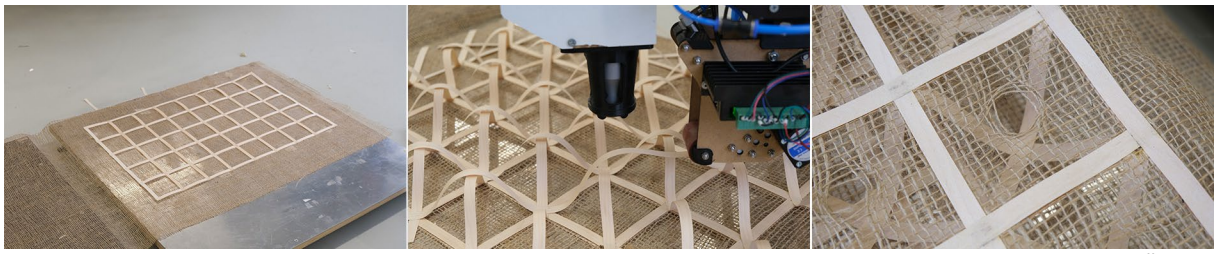


Quelle: EDEK

Abbildung 38 Montagezeichnung der Stützschalung

Zunächst wurden zwei identische untere 2D-Gitter mithilfe eines Roboters hergestellt. Zwischen diesen wurde ein Stück Textil durch Ultraschallverschweißen der Gitterknoten verbunden. Anschließend wurden die diagonalen Wellen mithilfe eines Roboters platziert und mit dem unteren Gitter verschweißt. Im nächsten Schritt wurden 2D-Gitter mit integriertem Textil hergestellt und miteinander verschweißt. Die Probe wurde gewendet und das Textil manuell aufgeweitet, um in der Mitte jeder 2D-Gitterzelle eine Öffnung für die Sonotrode zu schaffen, mit dem der obere Knotenpunkt erreicht werden konnte (Abbildung 39) Schließlich wurden alle Knotenpunkte mit einem handgeführten Ultraschallschweißgerät verschweißt, um die Knotenpunkte und die oberen Wellenabschnitte in einer Linie zu positionieren. Der entscheidende Schritt, um die Krümmung in der Struktur zu erzeugen, war das Verschweißen der Verbindungspunkte der diagonalen

Wellen mit dem 2D-Gitter. Dazu wurde eine Schweißsequenz in Reihen von Knoten verwendet, die senkrecht zur gekrümmten Kante stehen. Dadurch erhält die Struktur aufgrund des kürzeren Abstands zwischen den Furnieren im oberen 2D-Gitter allmählich eine Krümmung.



Quelle: EDEK

Abbildung 39 Links: Eingekapseltes Naturtextil zwischen zwei 2D-Gittern, Mitte: Robotergesteuerte Platzierung diagonaler Wellen, Rechts: Stoffbearbeitung zum Verschweißen für die Fertigstellung des Gitters

Die Schalung wurde mit myzelbeimpftem Hanfsubstrat gefüllt und in einem Wachstumszelt gezüchtet. Die Feuchtigkeit wurde dort sieben Tage lang mithilfe eines Luftbefeuchters bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 85 ± 5 % und einer Umgebungstemperatur von ca. 22 °C reguliert. Um einen höheren Feuchtigkeitsgehalt nahe der Oberfläche zu erreichen und so ein besseres Wachstum zu fördern, wurde der Prototyp der Stay-in-Place-Schalung mit einer Stretchfolie mit kleinen Löchern umwickelt. Nach Ablauf der sieben Tage wurde die Stretchfolie von der Stay-in-Place-Schalung entfernt und der Prototyp für eine bessere Oberflächenabdeckung noch zwei weitere Tage lang gezüchtet. Anschließend wurde das gezüchtete Bauteil über einen Zeitraum von zwei Tagen mit einem Ventilator und zwei Infrarotplatten getrocknet, um das Myzelwachstum zu stoppen.

Die Myzelwachstumsphase schwächte die Verbindung nicht weiter, sodass die Schalung während des gesamten Produktions- und Trocknungsprozesses intakt blieb. Das integrierte Furniergitter stützt und dient als Gerüst für das zu befestigende Gewebe. Diese Hybridschalung behält während der gesamten Wachstumsphase ihre Geometrie bei. Die robotergestützte Fertigung ermöglicht eine individuelle Anpassung des Gitters und somit der Schalung. Dadurch ergibt sich eine größere Bandbreite an Gestaltungsmöglichkeiten, darunter auch gekrümmte Formen (Abbildung 40)



Quelle: EDEK

Abbildung 40 Links: Prototyp aus gebogenem Myzelverbundwerkstoff, hergestellt mit einer feststehenden Schalung, rechts: Nahaufnahme der Oberfläche

AP 4.3 Herstellung von Prüfkörpern zur Charakterisierung

Verschiedene Proben wurden am KIT (IEB) zur Charakterisierung der strukturellen und akustischen Eigenschaften hergestellt. Im Rahmen der vorangegangenen Arbeitspakete wurden das Substrat und die Dichten ausgewählt und in die Testproben integriert.

In diesem Arbeitspaket wurden fünf Proben zur akustischen Prüfung mit den Maßen 60 cm × 120 cm und einer Dicke von 10 cm produziert. Eine Probe wurde mit Sägespänen hergestellt, eine weitere mit Hanf, und eine hybride Probe bestand aus 40 % Hanf und 60 % Sägespänen. Die letzten beiden Proben wurden unter Verwendung von Hanf hergestellt, wobei zusätzlich ein 3D-Gitter in der Mitte eingebracht wurde. Abbildung 41 zeigt den allgemeinen Herstellungsprozess zur Befüllung der akustischen Testproben.



Quelle: KIT

Abbildung 41 Herstellungsprozess zur Befüllung der akustischen Testproben

Um die strukturelle Leistungsfähigkeit zu bewerten, konzentrierte sich das KIT(IEB)-Team auf Dreipunkt-Biegetests und Elastizitätsmessungen. Es wurden zwei verschiedene Chargen von Proben vorbereitet.

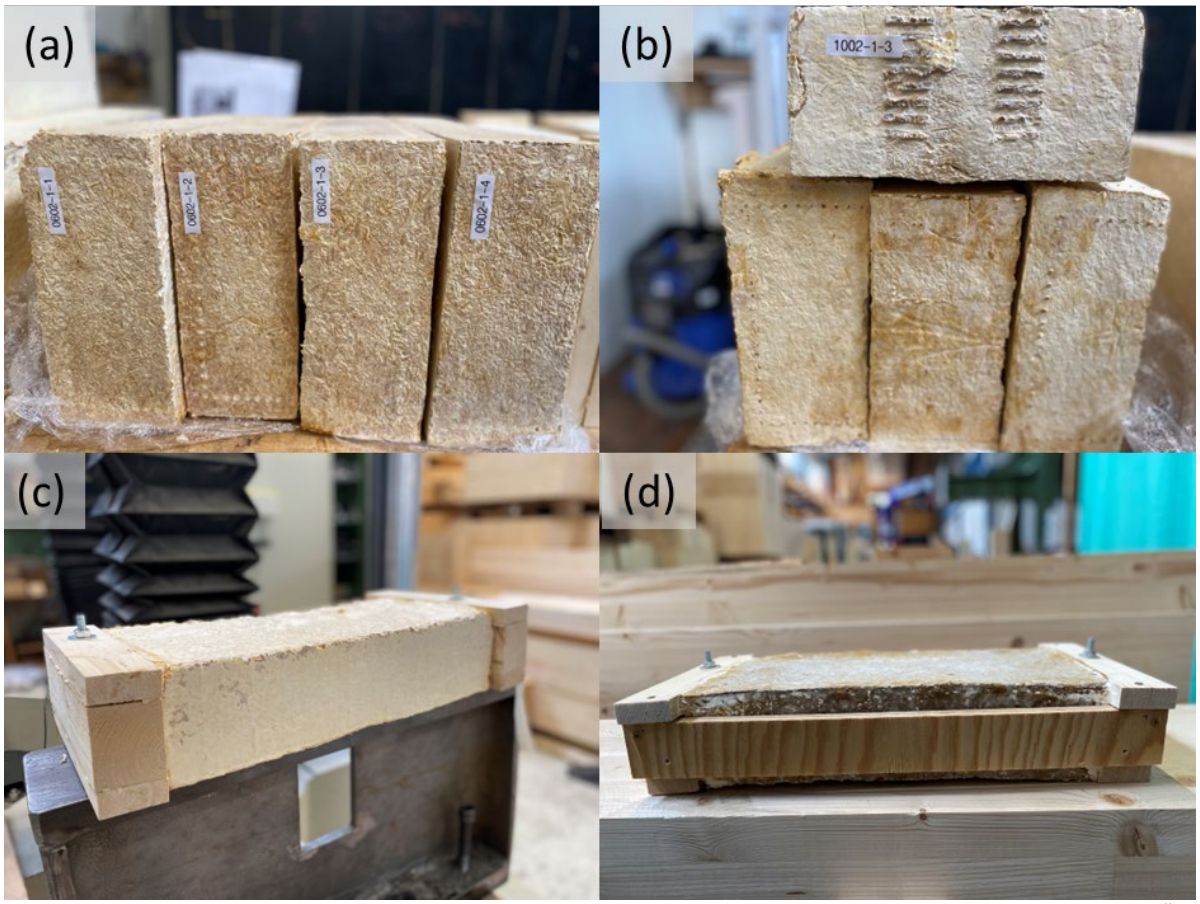
In der ersten Serie lag der Fokus ausschließlich auf Verbundwerkstoffen auf Myzelbasis. Es wurden drei Gruppen von Proben hergestellt: eine mit Hanf als Substrat, eine mit Sägemehl und eine dritte Hybridgruppe, die zu 40 % aus Hanf und zu 60 % aus Sägespänen bestand – ähnlich der Zusammensetzung der Akustikproben. Die Abmessungen dieser Proben betrugen 50 cm × 10 cm bei einer Dicke von 5 cm. Für jede Gruppe wurden vier Proben hergestellt.

Die zweite Serie von Proben konzentrierte sich auf die Einarbeitung von 3D-Furnierstrukturen in den Verbundwerkstoff. Diese Serie umfasste vier Gruppen:

1. Eine Kontrollgruppe, die auf einem Hanfsubstrat ohne jegliche Verstärkung gezüchtet wurde.
2. Eine Gruppe mit einem Hanfsubstrat, das mit einem 3D-Gitter verstärkt wurde.
3. Eine Gruppe mit einem Hanfsubstrat und einem 3D-Gitter, wobei das Gitter an beiden Seiten an einem Holzrahmen befestigt wurde, um seinen strukturellen Beitrag zu verbessern.

4. Eine Gruppe ähnlich wie Gruppe 3, jedoch wurde die Probe während der Prüfung an beiden Enden in der Länge fixiert, um eine Drehung zu verhindern. Durch diesen Aufbau wurde sichergestellt, dass nur die Biegefestigkeit des mit dem 3D-Gitter verstärkten Myzelverbunds gemessen wurde.

Die Proben der zweiten Charge hatten Abmessungen von 60 cm × 120 cm und eine Dicke von 10 cm. Wie bei der ersten Serie wurden für jede Gruppe vier Proben hergestellt. Abbildung 42 zeigt ein Beispiel für jeden Probentyp aus der zweiten Serie.



Quelle: KIT

Abbildung 42 Biegeproben: a) Myzel-Verbund auf Hanfbasis, b) mit 3D-Gitter verstärkt, c) mit 3D-Gitter im Holzrahmen (einfach gelagert), d) mit 3D-Gitter im Holzrahmen (fest eingespannt)

Eine Übersicht der Versuchskörper für die strukturelle, akustische und physikalische Charakterisierung ist in Tabelle 6 dargestellt

Tabelle 6 Übersicht der hergestellten Versuchskörper für die strukturelle, akustische und physikalische Charakterisierung

Test	Probenabmessung (cm)	Substrat	Anzahl hergestellter & geprüfter Proben
Druck	5 × 5 × 5 (H)	Sägemehl in 3 Dichten	15
		Hanf > 2 mm in 3 Dichten	15
		Hanf < 2 mm in 3 Dichten	15
Zug auf Furnier	15 (L) × 1.2 (B) × 0.05 (D)	11 Arten von Furnieren und Perforationen	66
Auszugstest	5 × 5 × 5 (H)	Hanf > 2 mm, verstärkt mit 6 verschiedenen Furnieren und Perforationen	30
Akustischer Zylinder	5 (D) × 5 (H)	Vollständig Sägemehl	3
		Vollständig Hanf > 2 mm	3
		Hanf > 2 mm als Kern	3
		Sägemehl als Kern	3
Akustisches Paneel	60 × 120 × 10 (H)	Hanf > 2 mm	1
		Sägemehl	1
		Hanf > 2 mm (40 %) + Sägemehl (60 %)	1
		Hanf > 2 mm + Furniergitter	2
Biegung	50 × 20 × 5 (H)	Hanf > 2 mm	4
		Sägemehl	4
		Hanf > 2 mm (40 %) + Sägemehl (60 %)	4
	50 × 20 × 10 (H)	Hanf > 2 mm	4
		Hanf > 2 mm + furniergitter	4
		Hanf > 2 mm + Furniergitter im Holzrahmen	8
Brand	5 × 5 × 5 (H)	Hanf > 2 mm in 2 Dichten	6
		Hanf < 2 mm in 1 Dichte	3

Quelle: KIT

AP 4.4 Strukturelle Charakterisierung von Bauteilen

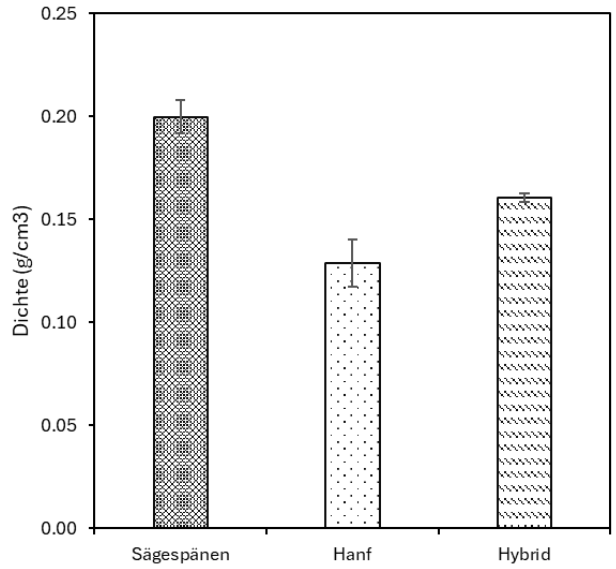
Wie im vorherigen Abschnitt erläutert, wurden die Proben für die Strukturtests in zwei unterschiedlichen Serien hergestellt.

Testserien und Probenaufbau

Die erste Serie konzentrierte sich auf die Bewertung verschiedener Substrate und deren Kombinationen. In der zweiten Serie wurde Hanf als Substrat verwendet, wobei der Fokus auf dem Einfluss der 3D-/Gitterverstärkung auf die mechanische Leistung des Verbundwerkstoffs lag. Die Ergebnisse beider Testserien, zusammen mit den akustischen Leistungsergebnissen, halfen uns dabei, das endgültige Design des Demonstrators festzulegen.

Mechanische Eigenschaften der Substrate (Serie 1)

Die erste Serie von Strukturtests wurde an drei Materialsystemen durchgeführt: einem Hanf-basierten Verbund, einem Verbund auf Basis von Sägespänen sowie einem hybriden System, bestehend aus 40% Hanf und 60% Sägespänen. Abbildung 43 zeigt die gemessenen Enddichten dieser Proben. Im Durchschnitt erreichten die Proben auf Sägespänebasis eine Dichte von etwa 200 kg/m³, die Hanf-basierten Proben lagen bei ca. 130 kg/m³, während die hybriden Proben eine mittlere Dichte von rund 160 kg/m³ aufwiesen.



Quelle: KIT

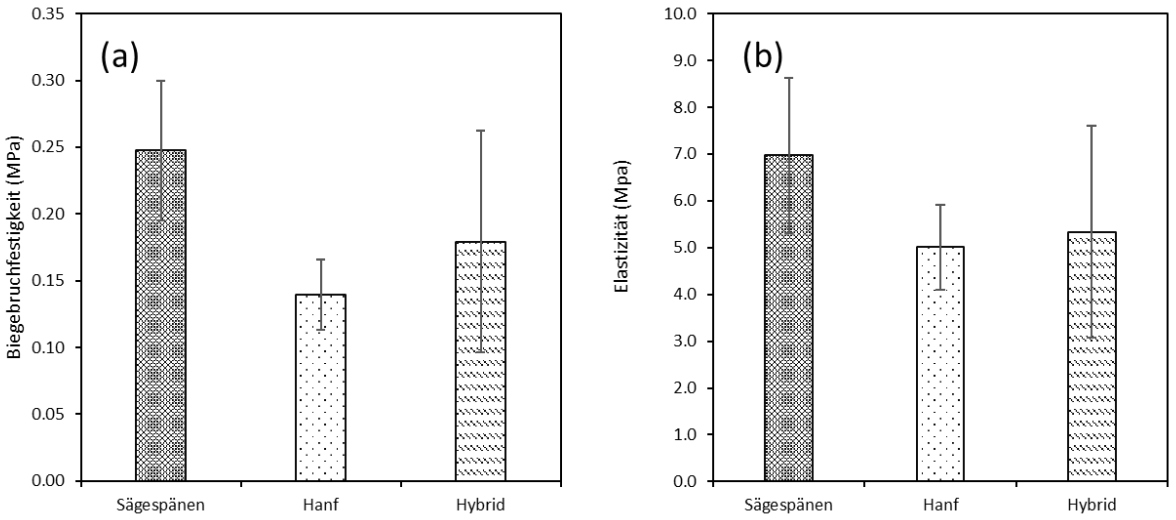
Abbildung 43 Dichten des Myzel-Verbundwerkstoffs aus Serie 1 des Biegetests

Die mechanischen Prüfungen wurden gemäß ASTM D1037 (Standardprüfverfahren zur Bewertung der Eigenschaften von Holzfaser- und Spanplattenmaterialien) durchgeführt, wobei kleinere Anpassungen vorgenommen wurden, um die Prüfgeräte vor Ort nutzen zu können. Abbildung 44 zeigt die Proben der ersten Serie während des Drei-Punkt-Biegetests sowie deren Versagensverhalten. In Abbildung 45 sind außerdem die Ergebnisse zur Biegefestigkeit und zum Elastizitätsmodul dargestellt. Wie zu erkennen ist, zeigten die Proben auf Sägespänebasis die höchste mechanische Leistung, gefolgt von den hybriden Proben; die Hanf-basierten Proben wiesen die geringsten Werte auf. Dieser Trend steht in engem Zusammenhang mit den gemessenen Dichten: Je höher die Dichte der Probe, desto besser die mechanische Leistung.



Quelle: KIT

Abbildung 44 Von links nach rechts: Proben vor, während und nach dem Versagen im Drei-Punkt-Biegetest



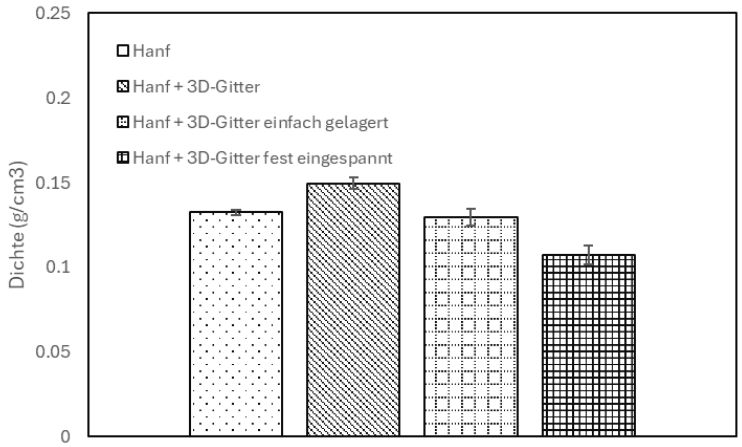
Quelle: KIT

Abbildung 45 a) Drei-Punkt-Biegeleistung, b) Elastizitätsmodul in Biegung aus Serie 1 des Biegetests

Zur Bewertung der statistischen Signifikanz dieser Unterschiede wurde eine einfaktorielle ANOVA für Dichte, Biegefestigkeit und Elastizitätsmodul zwischen den drei Substratgruppen durchgeführt. Die Analyse ergab einen hochsignifikanten Unterschied in der Dichte ($p = 0{,}000001$), was die Relevanz der Substratauswahl für die endgültige Materialdichte bestätigt. Die Unterschiede in der Biegefestigkeit ($p = 0{,}0615$) und im Elastizitätsmodul ($p = 0{,}2710$) waren hingegen auf dem Signifikanzniveau von 95 % nicht signifikant. Dies zeigt, dass zwar deutliche Dichteunterschiede zwischen den Substraten bestehen, sich diese jedoch in den mechanischen Eigenschaften unter Biegung und Elastizität in den vorliegenden Versuchsdaten nicht signifikant widerspiegeln.

Einfluss der 3D-Gitterverstärkung (Serie 2)

Die zweite Testreihe wurde mit einem Hanf-basierten Substrat durchgeführt. Obwohl erwartet wurde, dass die Enddichte bei allen Proben weitgehend konstant bleibt, wurden insbesondere bei den gitterverstärkten Proben mit Holzrahmen gewisse Abweichungen festgestellt. Diese Unterschiede sind unter anderem auf die Rahmenkonstruktion zurückzuführen, die das vollständige Ausfüllen des Verbundmaterials erschwerte. Zusätzlich wurde bei der Berechnung der Dichte das Gewicht des Furniers zusammen mit dem Holzrahmen vom Gesamtgewicht abgezogen. Auch diese Korrektur führte zu leichten Abweichungen bei den gemessenen Dichtewerten. Abbildung 46 zeigt die ermittelten Dichten der verschiedenen Probenkonfigurationen.

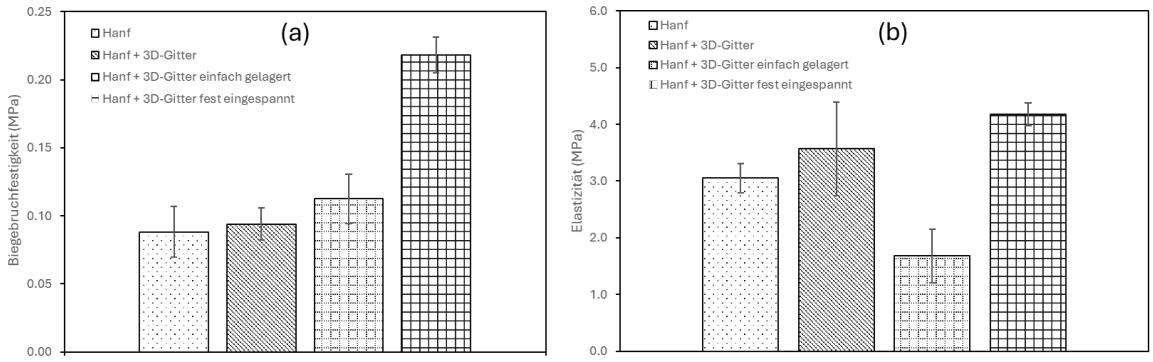


Quelle: KIT

Abbildung 46 Dichte des Myzel-Verbundwerkstoffs aus Serie 2 des Biegetests

Abbildung 47 zeigt die Mittelwerte und Standardabweichungen der Biegebruchfestigkeit und des Elastizitätsmoduls für die vier in Serie 2 getesteten Konfigurationen: Hanf, Hanf + 3D-Gitter, Hanf + 3D-Gitter einfach gelagert und Hanf + 3D-Gitter fest eingespannt. Die Konfiguration *fest eingespannt* zeigt eine deutliche Verbesserung und erreicht die höchste durchschnittliche Biegefestigkeit (> 0,20 MPa); sie schneidet signifikant besser ab als alle anderen Konfigurationen ($p < 0{,}001$). Im Gegensatz dazu weisen die Proben *Hanf* und *Hanf + 3D-Gitter* ähnliche Werte (~0,09–0,10 MPa) auf, ohne einen statistisch signifikanten Unterschied ($p = 0{,}9553$). Dies deutet darauf hin, dass das bloße Einbringen eines 3D-Gitters ohne strukturelle Fixierung die Biegefestigkeit nicht wesentlich verbessert. Die Konfiguration *einfach gelagert* zeigt zwar eine moderate Steigerung (~0,12 MPa), diese ist jedoch im Vergleich zu den Proben *Hanf* und *Hanf + 3D-Gitter* nicht statistisch signifikant.

Ein ähnlicher Trend zeigt sich beim Elastizitätsmodul. Auch hier schneidet die Konfiguration *fest eingespannt* am besten ab und erreicht einen Wert von etwa 4,1 MPa. Die Proben *Hanf* und *Hanf + 3D-Gitter* erreichen etwa 3,0 MPa bzw. 3,6 MPa, wobei zwischen beiden kein signifikanter Unterschied festgestellt wurde. Interessanterweise weist die Konfiguration *einfach gelagert* trotz der verbesserten Biegefestigkeit das niedrigste Elastizitätsmodul (~1,5 MPa) auf. Diese unerwartete Reduktion der Steifigkeit lässt sich vermutlich durch Drehbewegungen des Holzrahmens während der Prüfung erklären. Da die Enden nicht fixiert sind, kann es unter Belastung zu Rotationen kommen, wodurch die tatsächliche Steifigkeit des Verbunds unterschätzt wird. Zusätzlich könnte ein Versagen oder eine Verformung der Furnierschicht während der Prüfung die Lastverteilung beeinträchtigt haben und somit zu einer weiteren Reduktion des gemessenen Elastizitätsmoduls geführt haben.



Quelle: KIT

Abbildung 47 a) Drei-Punkt-Biegeleistung, b) Elastizitätsmodul in Biegung aus Serie 2 des Biegetests

Zusammenfassung und Designimplikationen

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse, dass eine wirksame mechanische Verstärkung nicht allein durch das Einbringen eines 3D-Gitters erreicht werden kann. Entscheidend ist vielmehr die strukturelle Integration und Fixierung des Gitters innerhalb des Verbundsystems. Die Verwendung eines Holzrahmens wird dabei nicht nur als Begrenzung gesehen, sondern soll gezielt dazu dienen, das 3D-Gitter im Inneren mechanisch zu aktivieren. Die Ergebnisse belegen, dass dies nur dann effektiv funktioniert, wenn die Enden des Rahmens fest miteinander verbunden sind – wie es typischerweise in einem Wandsystem der Fall wäre. Nur durch diese feste Einspannung konnte eine signifikante Verbesserung sowohl der Biegefestigkeit als auch der Steifigkeit erzielt werden. Dies unterstreicht die Bedeutung eines ganzheitlichen Systemdesigns, bei dem die Wechselwirkungen zwischen Rahmen, Verstärkungsstruktur und Substrat von Beginn an mitgedacht werden müssen.

AP 4.5 Akustik Charakterisierung von Bauteilen

Die akustische Wirksamkeit von Innenwandsystemen spielt eine entscheidende Rolle für die akustische Behaglichkeit, Produktivität und Privatsphäre in Arbeits- und Wohnräumen. In diesem Kapitel werden die

Ergebnisse einer detaillierten akustischen Charakterisierung der in diesem Projekt entwickelten neuartigen, kreisförmigen Biokompositmaterialien aus Myzel, Hanf und Sägemehl sowie der aus diesen Materialien hergestellten Bauteile vorgestellt. Das übergeordnete Ziel dieser Charakterisierung war es, die zwei wesentlichen akustischen Eigenschaften dieser Materialien und Komponenten – nämlich Schallabsorption und Schalldämmung – zu untersuchen und ihre Integration in nachhaltige Innenwandsysteme zu erforschen.

Die effektive Planung akustisch wirksamer Trennbauteile muss mehrere akustische Eigenschaften und Materialeigenschaften berücksichtigen (DIN EN ISO 12354-1). Eine dieser Eigenschaften ist das Schallabsorptionsvermögen, das die akustische Energie von Schallwellen innerhalb eines Raumes abnimmt. Die Schalldämmung ist ein komplexeres Phänomen, das sich aus mehreren Materialeigenschaften ergibt und letztlich die Luftschallübertragung zwischen benachbarten Räumen mit einer gemeinsamen Trennfläche begrenzt. Diese zwei akustischen Eigenschaften einer Platte oder Wandkonstruktion werden durch die Dichte, die innere Struktur, die Porosität und die Schichtkonfiguration der Substrate beeinflusst. Beide akustischen Eigenschaften können durch einzelne Platten oder komplexere Konstruktionen erreicht werden und sogar in Kombination für die Gestaltung von hochleistungsfähigen akustischen Trennwänden verwendet werden.

Die Ziele dieser akustischen Charakterisierung sind:

- Feststellung des Schallabsorptionsvermögens von Verbundwerkstoffen auf Myzelbasis unter Verwendung von Impedanzrohr- und Nachhallkammerverfahren.
- Messung der Luftschalldämmung von einzelnen Biokompositpaneelen im Prüfstand,
- Untersuchung der Auswirkung von den Substratarten selbst, der Zuordnung der Substratebenen, der Furniergittergeometrie auf die akustischen Eigenschaften einzelner Prüfkörper,
- Etablierung von schalltechnischen Angaben und Planungsansätze für die Weiterentwicklung eines nachhaltigen akustischen Trennwandsystems unter Verwendung von kreislauffähigen Materialien.

Diese Arbeit baut auf früheren Untersuchungen auf, die während der vorherigen Phase des Forschungsprojekts HOME I durchgeführt wurden und die Grundlage für die Materialentwicklung durch Tests in einem frühen Stadium bildeten. Die im Rahmen dieses HOME 2.0-Projekts durchgeführten Forschungsarbeiten treiben die akustische Charakterisierung der Myzel-Holz-Verbundwerkstoffe voran, indem diese Materialien in Plattenformate integriert und unter realistischen akustischen Testbedingungen, einschließlich Übertragungstests, bewertet werden.

Hintergrund und vorherige Akustikuntersuchungen

Die erste Phase dieses Forschungsvorhabens, das zwischen 2021 und 2023 durchgeführte „HOME I“ (BBSR Projekt 10.08.18.7-21.48), konzentrierte sich sowohl auf die Charakterisierung der Absorptionseigenschaften von Materialproben als auch auf raumakustische Messungen in Originalgröße an Prototypen von Trennwänden aus Holz-Myzel-Verbundbaustoffen, darunter ein endgültiger Demonstrator und eine Pop-up-Campuswand. Das primäre Ziel bestand darin, ihr Potenzial als mobile Stellwände für Schallschutz und Schallabsorption in üblichen Innenräumen zu bewerten. Um ein grundlegendes Verständnis der wichtigsten Parameter zu erlangen, die die Absorptionsfähigkeit dieser Biokomposite beeinflussen, wurde eine Reihe von Impedanz-Rohrmessungen an 42 zylindrischen Proben mit unterschiedlichem Myzel-Reifegrad und Furnieranteil durchgeführt. Diese Impedanz-Rohrmessungen zeigten, dass der Reifegrad des Myzels ein entscheidender Faktor für die Verringerung der Schallabsorptionsfähigkeit des Materials ist, da ein reiferes Myzel eine luftdichtere Haut um die Außenseite der Probe bildet, wodurch weniger Schallenergie mit dem porösen Inneren der Probe in Wechselwirkung treten kann, wo die Schallabsorption stattfindet. Es wurde eine weitere Korrelation zwischen dem Furnieranteil und einer Erhöhung der Schallabsorptionsfähigkeit festgestellt, wobei ein geringer Furnieranteil, der strategisch so platziert wurde, dass er eine Schwachstelle in der Myzelhaut an der Außenseite der Probe bildete, die Schallabsorptionsfähigkeit der Probe in bestimmten Frequenzbereichen erhöhen konnte. Diese Testergebnisse lassen die Forscher vermuten, dass das Vorhandensein eines Furnierstreifens im Inneren des Biokompositmaterials einen Weg um die

Furnieroberfläche herum schaffen könnte, der etwas luftdurchlässiger ist als das umgebende Biokompositmaterial, was zu dieser Erhöhung des Schallabsorptionsvermögens führt.

Weitere Akustikmessungen wurden an den Demonstratoren in Originalgröße in einem Seminarraum gemäß DIN EN ISO 3382-2 und DIN 18041 durchgeführt, wobei Nachhallzeiten, Sprachverständlichkeit und räumliche Schallverteilung unter verschiedenen Aufstellszenarien gemessen wurden. Die Ergebnisse zeigten, dass der Demonstrator bei 800 Hz und 1600 Hz eine im Vergleich zu den erwarteten Absorptionseigenschaften, die bei früheren Impedanz-Rohrmessungen mit Proben ohne Furnieranteil ermittelt wurden, erhöhte Absorptionsfähigkeit aufwies. Die Frequenzen, bei denen die Schallabsorptionsfähigkeit erhöht war, entsprachen den Wellenlängen der inneren Furnierstruktur und der Oberflächenform. Dies deutete darauf hin, dass die Schallabsorptionsfähigkeit der Platte entweder durch die Geometrie der Oberfläche und/oder durch die Furnierstruktur beeinflusst oder erweitert wurde. Die geringe Oberfläche (≈4 m^2) schränkte die Gesamtwirkung auf den Raumhall ein, aber die Ergebnisse deuteten auf zusätzliche Absorptionsmechanismen hin, wie z. B. die Wellenstreuung innerhalb der Platte durch die Holzfurnierstruktur. Zwischen bestimmten mittleren Frequenzbereichen (z. B. 500 Hz, 1000 Hz) wirkte die Platte eher wie eine reflektierende Oberfläche mit richtungsabhängiger Schallabstrahlung.

Die Untersuchungsergebnisse aus der ersten Phase dieses Forschungsvorhabens (HOME I) zeigten einige Optimierungspotenziale auf:

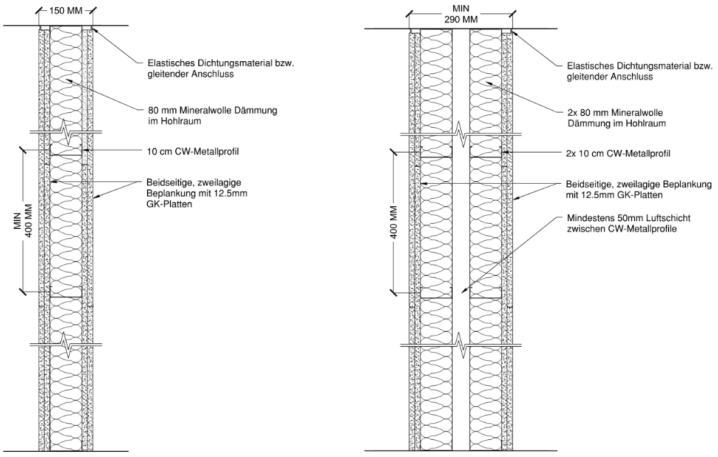
- Erhöhung der Schallabsorption über einen breiteren Frequenzbereich durch Anpassung der Geometrie des Furniergitters,
- Mögliche Berücksichtigung von Schallstreuung als Designparameter,
- Verbesserung der Einfügungsdämm-Maß durch Hinzufügen dichterer Verkleidungsmaterialien, wodurch Hybridkonstruktionen mit einer absorbierenden und einer isolierenden Seite ermöglicht werden.

Diese Erkenntnisse waren der Anlass für das akustische Untersuchungskonzept der HOME 2.0-Laborprüfungen, bei dem die akustische Leistung von Materialien und Komponenten systematisch untersucht und die Zusammensetzung des Substrats, das Furnierdesign und die Plattenbeschichtung für eine ausgewogene Schallabsorption und -isolierung in bio-zirkulären Trennwandsystemen optimiert wurden.

Diese Ergebnisse bildeten die Grundlage für das Studiendesign von HOME 2.0, bei dem der Schwerpunkt von der Leistung im Raum auf die akustische Charakterisierung auf Material- und Plattenebene unter kontrollierten Laborbedingungen verlagert wurde, um gezielte Verbesserungen bei der Zusammensetzung des Substrats, der Furnierverstärkung und dem strukturellen Design zu ermöglichen.

Der im vorliegenden Bericht behandelte Herstellungsprozess ermöglicht die Produktion von Architekturkomponenten für eine Vielzahl von Anwendungen, darunter sowohl schallabsorbierende Raumausstattungen als auch luftschalldämmende Trennwandkonstruktionen. Schallabsorption und Schalldämmung sind zwei unterschiedliche physikalische Prozesse, die sich auf unterschiedliche Eigenschaften der in dieser Forschung untersuchten Materialien stützen. Jede akustische Eigenschaft erfordert einen einzigartigen Untersuchungsprozess mit einer eigenen Methodik. Beide Eigenschaften spielen jedoch eine wichtige Rolle für die Gesamtwirksamkeit komplexer, mehrschichtiger Trennwandkonstruktionen.

Mehrschalige Trennwandkonstruktionen, wie in Abbildung 48 dargestellt, erzielen eine wirksame Luftschalldämmung zwischen benachbarten Räumen durch ein Zusammenspiel von Eigenschaften wie Masse, Schwingungsdämpfung und modifizierten Resonanzen mittels schallabsorbierender Materialien im inneren Hohlraum. Masse, Bewegungswiderstand und Schallabsorption spielen alle eine Rolle für die Wirksamkeit des gesamten Trennwandsystems bei der Reduzierung der Schallübertragung von Raum zu Raum. Diese Trennwandkonstruktionen verfügen in der Regel über eine Außenverkleidung aus homogenen, undurchlässigen Materialien mit mittlerer bis hoher Dichte (z. B. Gipsplatten), die durch einen Innenluftraum (in dem sich die Unterkonstruktion der Trennwand befindet) voneinander getrennt sind, der durch eine schallabsorbierende Schicht wie Mineralwolle gedämpft wird.



Quelle: ARUP

Abbildung 48 Beispielhaft dargestellte typische Aufbaudetails (in horizontaler Schnittansicht) von zweischalige Trennwandkonstruktionen in Leichtbauweise

Eine systematische Untersuchung der grundlegenden Verhältnisse zwischen bestimmten Herstellungsparametern (Reifegrad des Myzelwachstums, Furnieranteil und Substratmaterial) und den daraus resultierenden akustischen Eigenschaften der Biokompositmaterialien wurde durchgeführt, um einen robusten Datensatz zu erstellen, der als Grundlage für Entscheidungen hinsichtlich der Konstruktion eines akustisch wirksamen Demonstrators dienen kann.

Die Ermittlung der akustischen Eigenschaften des furnierverstärkten Biokompositmaterials erfolgte in einem mehrstufigen Prozess, in dem die verschiedenen akustischen Eigenschaften, die für die Gesamtziele dieses Forschungsprojekts relevant sind, durch Labortests dokumentiert wurden. Durch diesen Ansatz konnten Daten zu den optimalen Substratarten, der Wachstumsreife und der Geometrie der Furnierstruktur für ein akustisches Leistungsprofil einer komplexeren, mehrschichtigen Trennwandkonstruktion gesammelt werden, die speziell auf die Unterbindung der Schallübertragung zugeschnitten ist. Die Ergebnisse jedes Untersuchungsschritts wurden analysiert, um den Untersuchungsplan für den nächsten Schritt fertigzustellen. Die Ergebnisse der Impedanzrohrprüfungen zeigten beispielsweise, dass der Furnieranteil einen luftdurchlässigen Weg in das Biokompositmaterial schaffen kann, der für eine effektivere Absorption von Niederfrequenzen und einem breiten Spektrum an Schall in größeren Platten genutzt werden kann. Dieses Potenzial wurde bei der Konstruktion der Testproben für die Hallraummessungen genutzt, und die in Abschnitt 4 aufgeführten Ergebnisse bestätigten die analytische Schlussfolgerung des ersten Untersuchungsschritts als zutreffend.

Bei der Konstruktion der Prüfkörper in der letzten Untersuchungsphase wurde die erforderliche Masse der äußeren Verkleidungsschichten getrennt von der optimalen Konstruktion und Herstellung der schallabsorbierenden Kernschicht berücksichtigt. Die Furnierstruktur des inneren schallabsorbierenden Biokompositkerns wurde für eine Breitband-Schallabsorption optimiert, was die Gesamt-Schalldämmleistung der Demonstrator-Trennwand verbessern sollte. In den folgenden Kapiteln sind detailliertere Informationen zur Untersuchungsmethodik und zu den Ergebnissen dieser drei Experimente gegeben (Tabelle 7).

Tabelle 7 Übersicht über die in HOME 2.0 durchgeführten akustischen Tests

Prüfnummer.	Art der Prüfung	Untersuchungsziel	Anzahl der Prüfkörper	Entsprechende Norm bzw. Regelwerk
1	Impedanzrohr-messung	Messtechnische Untersuchung der Schallabsorptionsgrad von Prüfkörper in einem Impedanzrohr.	9	ISO 10534-2
2	Luftschalldämmung im Prüfstand	Messtechnische Untersuchung der Luftschalldämmung verschiedener Prüfkörper im Labor	5	ISO 10140-1

3	Hallraummessung	Messtechnische Untersuchung der Schallabsorptionsvermögen von Prüfkörper in einem akustischen Hallraum	1	ISO 354

Quelle: ARUP

Messmethodik

Die akustische Charakterisierung in HOME 2.0 erfolgte nach einem strukturierten, mehrstufigen Untersuchungsplan, wobei sowohl die Schallabsorption als auch die Schalldämmungseigenschaften von Myzel-Biokompositpaneelen unter verschiedene Bedingungen untersucht wurden. Die Tests wurden in kontrollierten Messlaboren an der KUL gemäß den relevanten ISO-Normen durchgeführt, um die Konsistenz und Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Die allgemeine Methodik umfasste:

- Herstellung repräsentativer Material- und Plattenproben mit Variationen hinsichtlich Substrattyp (Hanf, Sägemehl, gemischt), Furnierverstärkung und Plattenkonstruktion.
- Durchführung standardisierter akustischer Tests zur Messung der Absorptionskoeffizienten und der Übertragungsverluste über das gesamte hörbare Frequenzspektrum.
- Verwendung von Testaufbauten, die sowohl die Material- als auch die Komponentenleistung nachbilden, sodass die Ergebnisse Aufschluss über reale Anwendungen von Trennwänden geben.

Jede Testmethode wird in den folgenden Abschnitten ausführlich beschrieben, einschließlich der Probenkonfiguration, des Testaufbaus und der Messparameter.

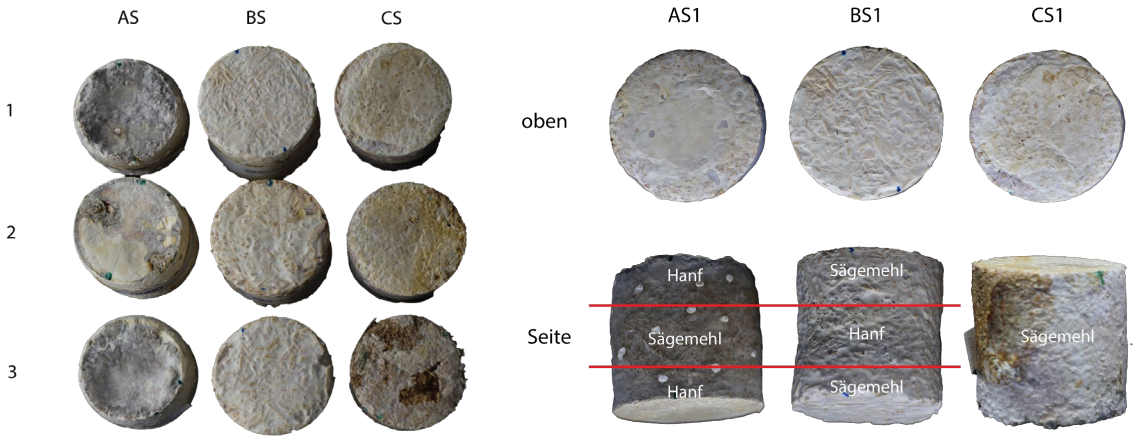
Schallabsorptionsmessung mit Impedanzrohr

Für die Impedanzrohrtests wurden drei verschiedene Arten von zylindrischen Proben (siehe Tabelle 8, Abbildung 49) hergestellt, die in ein Rohr mit einem Durchmesser von 45 mm passten. Der erste Typ, AS-Proben, bestand aus einer Sandwichstruktur mit Hanfschichten oben und unten und Sägemehl in der Mitte. Der zweite Typ, die BS-Proben, wiesen die umgekehrte Anordnung auf: Sägemehlschichten außen und Hanf in der Mitte. Der dritte Typ, die CS-Proben, bestanden vollständig aus Sägemehl, ohne Hanfanteil. Jeder Probentyp wurde dreifach hergestellt, um genaue und reproduzierbare Ergebnisse zu gewährleisten.

Tabelle 8 Probenbeschreibungen für den Impedanzrohrtest

Bezeichnung	**Prüfkörperbeschreibung**	**Gewicht (g)**	**Diameter (mm)**	**Höhe (mm)**	**Rohdichte (g/cm^3)**
AS1	Hanf 60% and Holzpartikel 40%	12.0	41	43	0.21
AS2	Hanf 60% and Holzpartikel 40%	12.0	43	44	0.19
AS3	Hanf 60% and Holzpartikel 40%	12.0	40	43	0.22
BS1	Hanf 40% and Holzpartikel 60%	16.0	46	47	0.20
BS2	Hanf 40% and Holzpartikel 60%	15.0	45	45	0.21
BS3	Hanf 40% and Holzpartikel 60%	15.0	45	47	0.2
CS1	Holzsubstrat	17.0	45	45.5	0.24
CS2	Holzsubstrat	16.0	45	42	0.24
CS3	Holzsubstrat	16.0	43	45	0.24

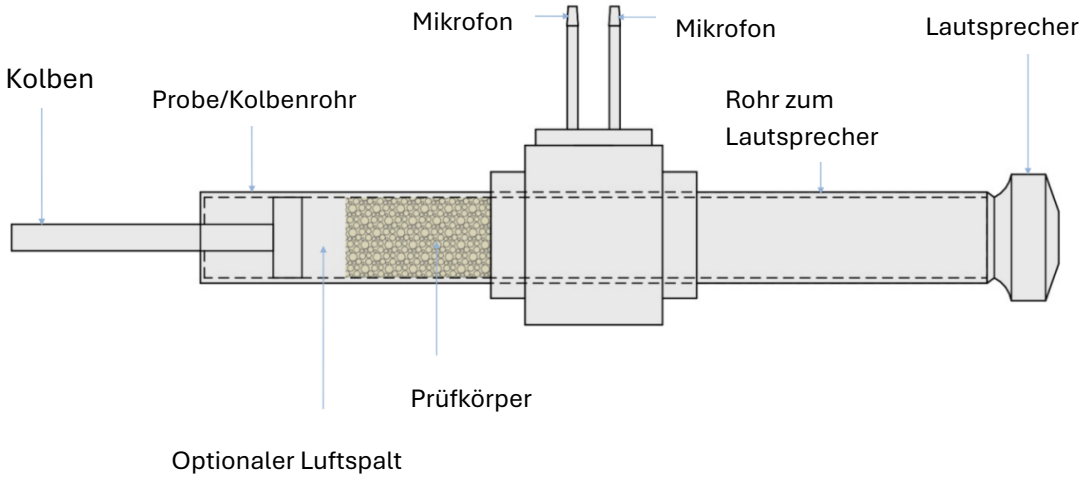
Quelle: ARUP



Quelle: KUL

Abbildung 49 Links: Geprüfte Oberfläche der Prüfkörper (Oberansicht). Rechts: Prüfkörper der Impedanzrohrmessungen

Der Schallabsorptionskoeffizient der getesteten Materialien bei senkrechter Einfallsrichtung wurde gemäß ISO 10534-2 mit der Impedanzrohrmethode bestimmt. Der Aufbau des Systems besteht aus einem geraden, starren und luftdichten Impedanzrohr, an dessen einem Ende ein Lautsprecher angebracht ist und an dessen gegenüberliegendem Ende die Testprobe sicher positioniert ist (Abbildung 50). Zwei B&K-Mikrofone vom Typ 4939 mit einer Nennweite von ¼ Zoll wurden an festen Positionen entlang der Rohrwand bündig montiert.



Quelle: KUL

Abbildung 50 Schematische Darstellung der Aufbau des Impedanzrohrs im Messzustand

Ein logarithmischer Sweep-Testsignal, der von einem Netzwerkanalysator des Modells 780 von Stanford Research Systems erzeugt wurde, wurde verwendet, um das System über einen breiten Frequenzbereich anzuregen. Das Anregungssignal wurde mit einem Yamaha RX-357-Verstärker verstärkt, bevor es an den Lautsprecher gesendet wurde. Das resultierende Schalldruckfeld im Inneren der Röhre wurde gleichzeitig von zwei Mikrofonen aufgezeichnet und vom Netzwerkanalysator verarbeitet. Um den Einfluss der unterschiedlichen Mikrofonempfindlichkeit zu reduzieren, wurden die Mikrofonpositionen zwischen den Messungen getauscht.

Der Absorptionskoeffizient bei senkrechter Schalleinfall wurde wie folgt berechnet:

$\alpha = 1 - |R|^2$, (Gleichung 1)

wobei R der komplexe Reflexionskoeffizient der einfallenden Druckwelle ist, der wie folgt berechnet wird

$R = \frac{H_{12} - e^{-jkd}}{e^{jkd} - H_{12}}$, (Gleichung 2)

Hier ist H_{12} die komplexe Übertragungsfunktion zwischen den Mikrofonen, abgeleitet aus den Druckaufzeichnungen; d ist der Mikrofonabstand; und ist die Wellenzahl, definiert als:

$H_{12} = \frac{|p_2|}{|p_1|} = \frac{e^{jk_0x_2} + re^{-jk_0x_2}}{e^{jk_0x_1} + re^{-jk_0x_1}}$, (Gleichung 3)

$k = \frac{2\pi f}{c}$, (Gleichung 4)

Wobei f ist die Anregungsfrequenz und c ist Schallgeschwindigkeit in der Luft.

Messung der Luftschalldämmung im Prüfstand

Für die Messung der Luftschalldämmung im Prüfstand wurden fünf verschiedene Prüfkörper (siehe Abbildung 51 und Tabelle 9) vorbereitet. Die ersten beiden Prüfkörper, S1 und S2, bestanden aus einem Verbundwerkstoff aus Hanf und einer zentralen Furnierschicht. Die dritte Prüfkörper, S3, wurde aus reinem Hanf hergestellt, während die vierte Probe, S4, nur aus Sägemehl bestand. Die fünfte Prüfkörper, S5, war schließlich ein Mischverbundwerkstoff aus 40 % Hanf und 60 % Sägemehl. Die Prüfkörper unterschieden sich in Dicke, Breite und Länge und hatten eine Dicke von etwa 85–97 mm und eine Breite von 53–62 mm, was bei der Testanordnung berücksichtigt wurde, um eine vergleichende Bewertung zu ermöglichen. Diese Vielfalt an Materialzusammensetzungen und Abmessungen ermöglichte eine systematische Untersuchung des Übertragungsverhaltens aller Proben und lieferte Erkenntnisse über den Einfluss der Zusammensetzung des Trägermaterials und der Furnierverstärkung auf den Übertragungsverlust. Die Messung der Luftschalldämmung wird verwendet, um zwei Arten von Konfigurationen zu testen. Zunächst wird eine Einzelplattenkonfiguration mit S3, S4 und S5 getestet. Konfiguration zwei ist eine Doppelplattenkonfiguration, um reale Trennwand-Szenarien zu simulieren.



Quelle: KUL

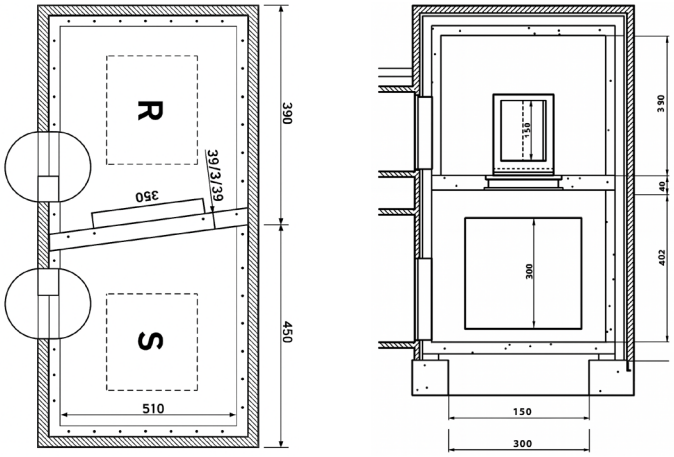
Abbildung 51 Messaufbau einer einschaligen Trennwandkonstruktion, Prüfkörper S5

Tabelle 9 Physikalische Eigenschaften der verwendeten Prüfkörper

Bezeichnung	Aufbau	Dicke (mm)	Breite (mm)	Länge (mm)	Gewicht (kg)	Rohdichte
S1	Hanf ohne Furnier (2cm)+ Hanf mit Furnier (5cm) + Hanf ohne Furnier (3cm)	86.8	620.7	1195	6.3	0.10
S2	Hanf ohne Furnier (2cm)+ Hanf mit Furnier (5cm) + Hanf ohne Furnier (3cm)	85.7	618.3	1190	6.0	0.10
S3	Hanf	97.3	587.3	1141.7	8.2	0.13
S4	Holzpartikel	93.3	536.7	1088.3	12.7	0.23
S5	Hanf (40%)+ Holzpartikel (60%)	86.7	566.7	1140.7	11.9	0.21

Quelle: KUL

Das Schalldämm-Maß der myzelbasierten Prüfkörper wurden in einer Laboreinrichtung gemäß ISO 10140-1, Teil 5, gemessen. Der Versuchsaufbau bestand aus zwei akustisch und strukturell isolierten Räumen (Sende- und Empfangsraum) mit einem Volumen von jeweils 88 m^3, die durch eine Öffnung mit den Maßen 1,20 m × 1,45 m miteinander verbunden waren (Abbildung 52). Um die Maßunterschiede zwischen den Prüfkörpern (S1–S5) und der Öffnung auszugleichen, wurde eine Mauerwerksblockwand (1,20 m × 0,80 m × 0,22 m, Dichte 1717 kg/m^3) installiert. Ihre Isolationsleistung übertraf die der Prüfplatten um mindestens 25 dB über das gesamte Spektrum, sodass ein vernachlässigbarer Einfluss auf die Ergebnisse gewährleistet war.



Quelle: KUL

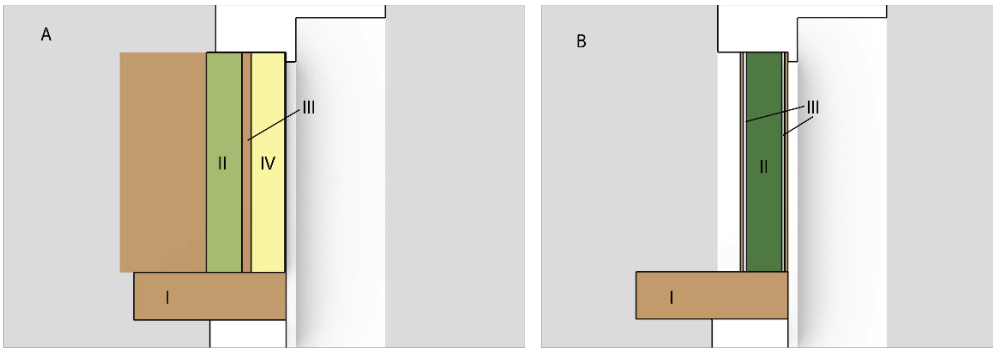
Abbildung 52 Grundriss der akustischen Prüflabor mit Darstellung der Wandöffnung für Luftschallübertragungsmessungen

Bei dem einschaligen Wandaufbau wurde jede Prüfkörper in einen Holzrahmen (2 cm Dicke) eingebaut und mit Glasurton (Illbruck OS201, Dichtungsschicht 1 ± 0,5 cm) versiegelt, um eine Flankenübertragung zu verhindern. Dadurch wurde sichergestellt, dass nur die direkte Luftschallübertragung durch die Platte gemessen wurde.

Bei dem zweischaligen Wandaufbau wurde ein verlängerter MDF-Stützrahmen an der Mauer angebracht, um eine ausreichende Tiefe für Hohlraumkonstruktionen zu schaffen. Es wurden zwei Probenaufbauten getestet, wie in Abbildung 53 und Tabelle 10 dargestellt:

1. Eine doppelte Myzelplattenkonstruktion (S4 und S5) mit einem 15 mm großen Luftraum.
2. Ein Verbundsystem, bestehend aus einem Myzelkern, der zwischen zwei MDF-Platten eingelegt ist, die durch kleine Abstandshalter voneinander getrennt sind, um 8 mm Luftkammern zu bilden.

Beide Aufbauten simulierten typische zweischichtige Trennwandsysteme, wie sie in architektonischen Anwendungen verwendet werden, und ermöglichten eine systematische Bewertung der Schalldämmleistung von Verbundwerkstoffen auf Myzelbasis im Vergleich zu herkömmlichen Hohlwandkonstruktionen.



Quelle: KUL

Abbildung 53 (A) 3D-Ansicht des akustischen Doppelplatten-Testaufbaus mit Hohlraumverlängerung I) Zusätzlicher Rahmen aus verleimten MDF-Platten, II) Probe S5, III) 15 mm Luftraum zwischen den Myzelplatten und IV) Auf Sägemehl gezüchtete Myzelplatte (B) Myzelkern mit zwei MDF-Platten, die ein Trockenwandsystem darstellen. I) MDF-Material mit 8 mm starken Platten, II) auf reinem Hanf gewachsener Myzelkern mit einer 80 mm starken Furnierverstärkung und III) 22 mm Luftspalte zwischen Kern und MDF-Platten.

Tabelle 10 Materialaufbau der Doppelplattenkonfiguration für den Übertragungstest

Versuchsaufbau	**Beschreibung der Aufbauebene**	**Dicke (mm)**
1	Hanf (40%)+ Holzpartikel (60%)	86.7
	Lufthohlraum	15
	Holzpartikel	93.3
2	MDF Platte	8
	Lufthohlraum	22
	Hanf (2cm)+ Hanf mit Furnier (5cm) + Hanf (3cm)	85.7
	Lufthohlraum	22
	MDF Platte	8

Quelle: ARUP

Das Messprinzip besteht darin, die Nachhallzeit und den Nachhallpegel in beiden Räumen bei eingeschalteter Quelle zu bestimmen und die Pegelreduzierung unter Berücksichtigung der Raumakustikbedingungen zu ermitteln. In diesem Fall war das Testsignal ein logarithmischer Sweep von 31 Hz bis 10 kHz, der jeweils 15 Sekunden dauerte. Ein Mikrofon vom Typ B&K 4165 wurde in einem Dreharm platziert, der mehrere Punkte in beiden Räumen abdeckte, um die Schalldruckpegel zu erfassen und zu mitteln sowie die Nachhallzeit zu erfassen.

Drei akustische Messgrößen wurden in 1/3-Oktavbändern berechnet: Die elementnormierte Schallpegeldifferenz ($D_{n,e}$), das Schalldämm-Maß (R) gemäß ISO 10140-1 und die Einfügungsdämm-Maß, wie in den Gleichungen 7 bis 9 dargestellt. Der Hauptunterschied zwischen R und D_{ne} besteht darin, dass R die Oberfläche der Testprobe berücksichtigt, während die normierte Pegeldifferenz zur Bewertung kleinerer Elemente dient und die Referenzschallabsorptionsfläche berücksichtigt.

$D_{n,e} = L_1 - L_2 + 10\log_{10}\left(\frac{A_0}{A}\right)$, (Gleichung 7)

$R = L_1 - L_2 + 10\log_{10}\left(\frac{S}{A}\right)$, (Gleichung 8)

$IL = L_\{"\{before\}\} - L_\{"\{after\}\}]$, (Gleichung 9)

Wobei L1 und L2 jeweils die räumlich gemittelten Schalldruckpegel im Sende- bzw. Empfangsraum sind. S ist die Oberfläche des Prüfkörpers (in m^2); A0 ist die Referenzschallabsorptionsfläche, die für Laboratorien, die der Norm ISO 10140-1 Teil 5 entsprechen, auf 10 m^2 festgelegt ist; A ist die äquivalente Absorptionsfläche im Empfangsraum, definiert als die Summe der Produkte aus den Schallabsorptionskoeffizienten und der Fläche dieser Oberflächen, berechnet gemäß Gleichung 10. L_{before} und L_{after} beziehen sich auf die Pegel im Empfangsraum mit bzw. ohne das Prüfobjekt.

$$A = \sum s_i \alpha_i = 0.16 \cdot \frac{V}{T}, \text{ (Gleichung 10)}$$

mit Si als Fläche jeder Oberfläche im Raum und αi als entsprechendem Schallabsorptionskoeffizienten, V als Volumen des Empfangsraums (in m^3) und T als gemessener Nachhallzeit in Sekunden. Die Nachhallzeit wurde durch Analyse des Abklingens des Schalldruckpegels nach Beendigung der Anregung ermittelt, gemittelt über mehrere Mikrofonpositionen im Empfangsraum.

Akustische Hallraummessung

Das Schallabsorptionsvermögen der Prüfkörper wurde in einem akustischen Hallraum gemäß ISO 354 gemessen. Zu diesem Zweck wurden die Hanfplatten mit Furnier S1 und S2, die die gleiche Materialzusammensetzung hatten (siehe Tabelle 9), zu einer größeren Platte zusammengefügt, um die in der Norm festgelegten Anforderungen an die Oberfläche zu erfüllen. Die Platten wurden auf dem Boden der Nachhallkammer positioniert, wie in Abbildung 3 dargestellt, um eine vollständige Exposition gegenüber dem diffusen Schallfeld zu gewährleisten.



Quelle: KUL

Abbildung 54 Messaufbau im akustischen Hallraum

Die Messungen wurden in einer Hallraum (siehe Abbildung 54) im Labor für Akustik (Forschungsabteilung ATF-LRD) der Fakultät für Physik und Astronomie der KU Leuven durchgeführt, die für ein diffuses Schallfeld ausgelegt ist und ein Volumen von 197 m^3 hat. Dabei wurden die Nachhallzeiten der leeren Kammer mit denen verglichen, die nach Einbringen des Probenmaterials gemessen wurden. Als Anregungsquelle wurde ein logarithmischer Sinus-Sweep von 23,8 s verwendet. Die Abklingkurven wurden mit einem Mikrofon vom Typ B&K 4165 gemessen, das an mehreren Positionen platziert wurde. Die Messungen wurden in 1/3-Oktav-Frequenzbändern von 100 Hz bis 5000 Hz durchgeführt. Die äquivalente Schallabsorptionsfläche A der Probe wurde anhand der Sabine-Gleichung berechnet, die in Gleichung 11 dargestellt ist.

$$A = 55.3 \frac{V}{c}\left(\frac{1}{T1} - \frac{1}{T2}\right) \text{ , (Gleichung 11)}$$

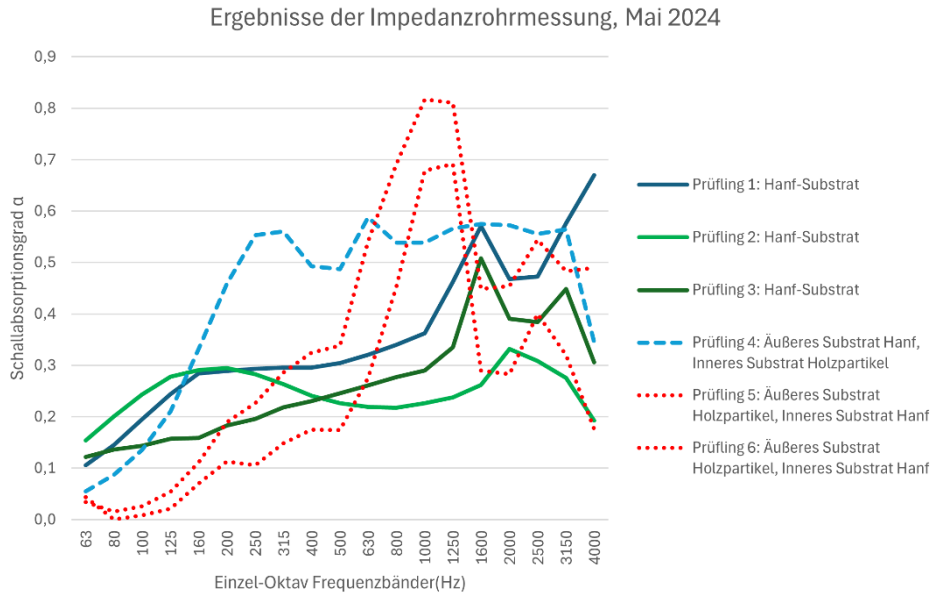
Wobei V das Volumen der Hallraum in Kubikmetern ist, c die Schallgeschwindigkeit in Luft in m/s, T1 die Nachhallzeit des leeren Raums und T2 die Nachhallzeit mit der Probe. Der Schallabsorptionskoeffizient α wurde dann für jedes Frequenzband bestimmt, indem die äquivalente Absorptionsfläche auf die freiliegende Oberfläche S der Probe normiert wurde:

$\alpha = AS$, (Gleichung 12)

Untersuchungsergebnisse

Impedanzrohrmessungen

Die Impedanzrohrmessungen ergaben, dass die Auswahl des Substrats und insbesondere die Schichtung der Substratmaterialien einen starken Einfluss auf die Schallabsorptionsgrad des Biokompositmaterials haben können (Abbildung 55). Die Proben, die mit einem reinen Hanf-Substrat hergestellt wurden, zeigen ähnliche Ergebnisse wie die 2022 getesteten Hanfproben. Dies führt zu einer relativ geringen Schallabsorptionsfähigkeit im unteren Frequenzbereich, die sich zu einer moderaten Absorptionsfähigkeit im Frequenzbereich über 800 Hz erhöht. Proben SB mit einer Außenschicht aus Sägemehl und einem Hanfkern scheinen einen „Resonanzeffekt" zu erzeugen, bei dem eine besonders starke Schallabsorption im Spitzenfrequenzbereich zwischen 800 und 1000 Hz auftritt. Dies ist wahrscheinlich auf die Elastizität des Biokomposits auf Hanfbasis in Kombination mit der Masse der äußeren Sägemehlschichten zurückzuführen. Die umgekehrte Konfiguration, bei der ein Kern aus Sägemehl mit höherer Masse von Hanf-Außenschichten mit geringer Masse umgeben ist, führt zu einer breitbandigen Verbesserung der Schallabsorption, sogar bis hinunter zu 200 Hz.



Quelle: ARUP

Abbildung 55 Ergebnisse der Impedanzrohrmessung

Untersuchung der Luftschalldämmung im Prüfstand

Die Ergebnisse der Untersuchung der Luftschalldämmung im Prüfstand zeigen, dass die Materialität und Zusammensetzung einzelner Biokompositpaneelen einen erheblichen Einfluss auf ihre Fähigkeit haben können, die Schallübertragung zwischen benachbarten Räumen einzudämmen. Das leichtere Substratmaterial Hanf, Probe S3, führt zu einer Platte, die insgesamt eine geringere Massendichte aufweist und daher durch die von einer Schallwelle bereitgestellte mechanische Energie leichter in Bewegung versetzt werden kann. Die Verwendung von Sägemehl als Substrat führt zu einer Testprobe S4 mit einer höheren Massendichte, die mehr mechanische Energie durch eine ankommende Schallwelle benötigt, um das gleiche

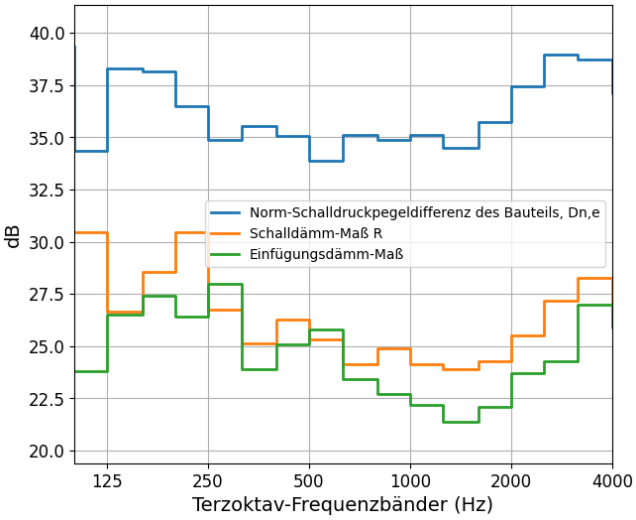
Maß an physikalischer Bewegung oder Vibration zu erzeugen. Diese Beziehung zwischen Masse und Empfindlichkeit gegenüber Schwingungsanregungen wird als „Massengesetz" bezeichnet und macht einen wesentlichen Teil der in den folgenden Grafiken dargestellten Testdaten aus (Abbildung 56 bis Abbildung 60).

Ein weiterer Effekt, der in den Übertragungs-Testdaten deutlich zu erkennen ist, ist eine starke Verringerung der Schalldämmleistung bei allen Biokompositpaneelen, den Proben S1 und S2, die Furnierstrukturen enthalten. Der Grund für diesen starken Rückgang der Schalldämmleistung hängt mit denselben physikalischen Prozessen zusammen, die die Schallabsorption solcher Testproben verbessern. Das Vorhandensein eines Furnierstreifens im Inneren der Biokompositpaneel erzeugt einen Weg mit geringerem Luftströmungswiderstand durch das Innere der Platte. Dies ist zwar für die Schallabsorption von Vorteil, da Schallwellen Partikelverschiebungen und Schwingungen im Inneren der Platte anregen können, gleichzeitig ist es jedoch nachteilig für die Schalldämmleistung, gerade weil es einen Weg gibt, auf dem sich Schallwellen von einer Seite der Platte zur anderen ausbreiten können. Im Wesentlichen erzeugt das Vorhandensein einer 3D-Furnierstruktur „Löcher" in den Biokompositpaneelen, durch die Schallwellen leichter von Raum zu Raum übertragen werden können.

Die optimale Voraussetzung für eine hohe Luftschalldämmung mit einer einschaligen Konstruktion ist, wenn die Platte aus einem homogenen, luftdichten Material mit hoher Massendichte besteht. Diese Voraussetzung ist nur bei der reinen Sägemehl-Testprobe S4 gegeben, die im Vergleich zu den anderen Proben eine deutlich höhere Schalldämmleistung aufweist.

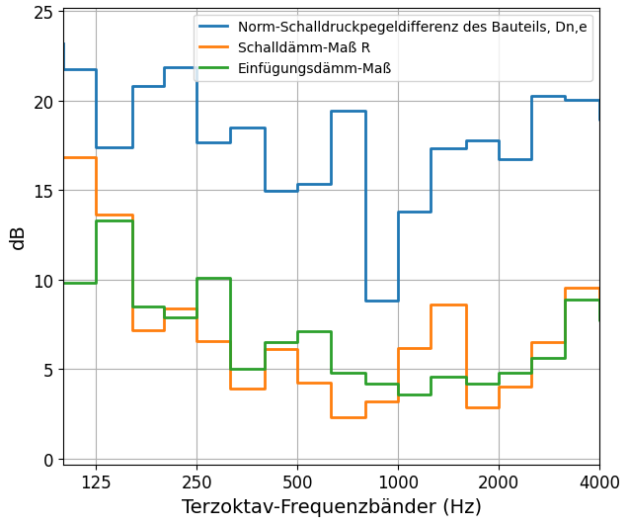
Zweischalige Trennwandkonstruktionen sind komplexer als einschalige Aufbauten und erfordern die sorgfältige Berücksichtigung einer Vielzahl von Parametern. Masse und Luftdichtheit sind zwei der Parameter, die dabei eine Rolle spielen. Ebenfalls relevant sind die Resonanzen, die durch die Wechselwirkung der Plattenvibrationen über ein geschlossenes Luftvolumen entstehen.

Bei der Konstruktion der getesteten Mehrfachplattenkonstruktion wurden die akustischen Vorteile von Außenlagen mit hoher Masse sowie die Notwendigkeit eines schallabsorbierenden Materials im Luftraum zwischen den beiden äußeren Masseschichten berücksichtigt. Die Schalldämmwerte, die mit dem Doppelwand-System erzielt wurden (Abbildung 59 - Abbildung 60), waren im Vergleich zu den allein anhand des Massengesetzes vorhergesagten Werten recht hoch, was darauf hindeutet, dass eine gedämpfte Resonanzwirkung des Doppelwand-Systems mit Schallabsorption im Luftraum vorlag. Dies zeigt sich insbesondere in der Leistung dieses Doppelwand-Systems in den unteren Frequenzbereichen.



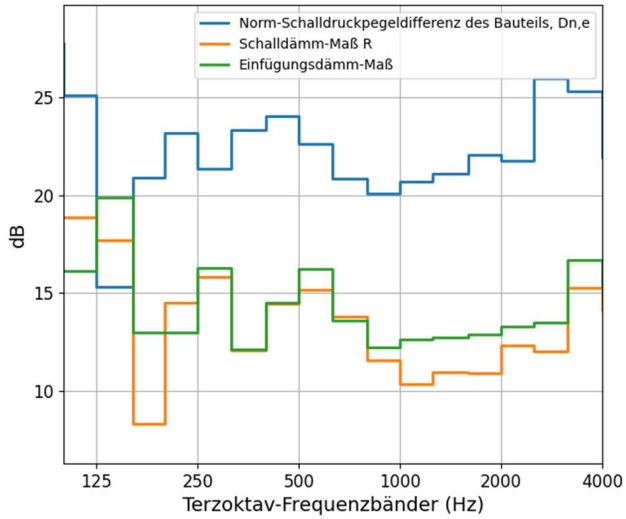
Quelle: KUL

Abbildung 56 Schalldämm-Maß, Einfügungsdämm-Maß und Norm-Schallpegeldifferenz des Prüfkörpers S4 mit Substrat aus Sägemehl



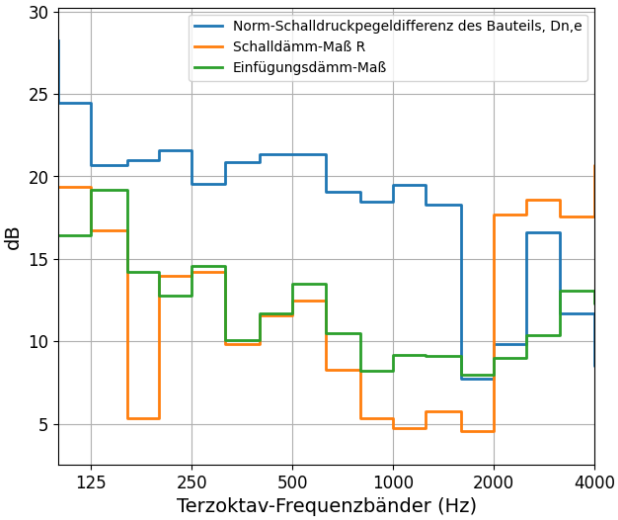
Quelle: KUL

Abbildung 57 Schalldämm-Maß, Einfügungsdämm-Maß und Norm-Schallpegeldifferenz des Prüfkörpers S3 mit gemischtem Substrat



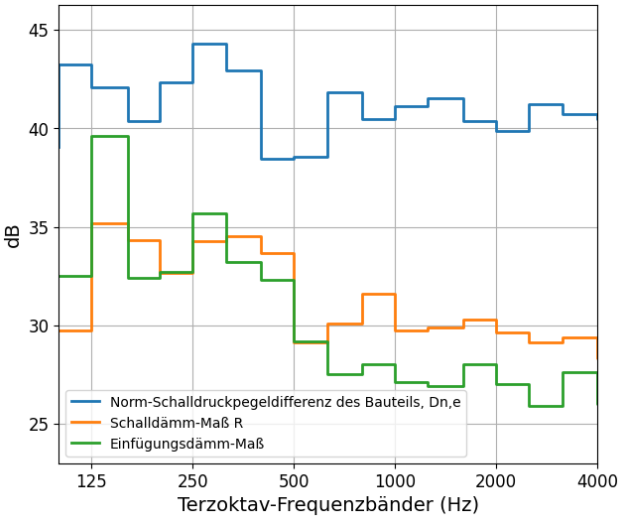
Quelle: KUL

Abbildung 58 Schalldämm-Maß, Einfügungsdämm-Maß und Norm-Schallpegeldifferenz einer zweischaligen Konstruktion aus MDF-Platten ohne Hohlraumbedämpfung



Quelle: KUL

Abbildung 59 Schalldämm-Maß, Einfügungsdämm-Maß und Norm-Schallpegeldifferenz einer zweischaligen Konstruktion aus MDF-Platten mit Hohlraumbedämpfung aus Prüfkörper S1 (Myzel-Biokompositeplatte mit Hanfsubstrat und Furnierstruktur), siehe Abbildung 53 Testaufbau B

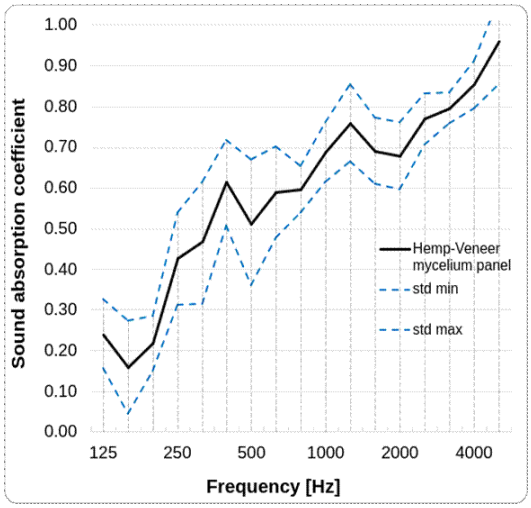


Quelle: KUL

Abbildung 60 Schalldämm-Maß, Einfügungsdämm-Maß und Norm-Schallpegeldifferenz einer zweischaligen Konstruktion aus Prüfkörpern S4 und S5, siehe Abbildung 53 Testaufbau A

Messung der Schallabsorption im Hallraum

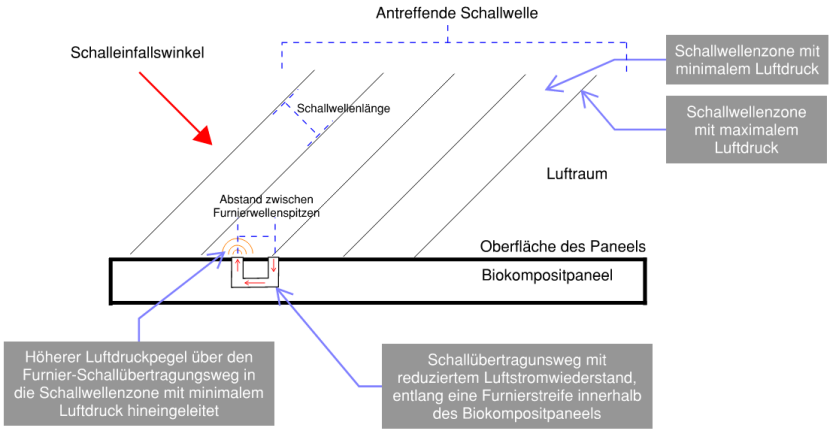
Die Ergebnisse der Messung der Schallabsorption im Hallraum zeigen, dass die innere Furnierstruktur der Biokomposit-Testprobe einen direkten Einfluss auf die Absorptionseigenschaften der Testprobe hat. Dieser Effekt geht über die Beziehungen zwischen den Materialparametern (Substrat, Wachstumsreife) und den schallabsorbierenden Eigenschaften des Biokomposits hinaus und erweitert die Schallabsorptionskapazität auf einstellbare (und potenziell niedrigere) Frequenzbereiche. Die Daten aus den Nachhallkammer-Testergebnissen (Abbildung 61) zeigen eine erhebliche Verbesserung der Schallabsorptionsgrad der Testproben mit Furnierverstärkung bis hinunter zu 200 Hz. Dies wäre für die getestete Probe (S1, S2) mit einer Dicke von 80 mm, die vollständig von einer luftdichten Myzelhaut umgeben war, nicht möglich gewesen.



Quelle: ARUP

Abbildung 61 Messergebnisse der Schallabsorptionsgrad im Hallraum

Die Verbesserung der Schalldämmung durch den Furnieranteil wurde auf der Grundlage der Theorie vorhergesagt, dass in der unmittelbaren Umgebung der Furnierstreifen innerhalb des Biokomposits die Luftdichtheit des Myzelwurzelnetzes verringert ist, was zu einem geringeren Widerstand gegen den Luftstrom in der unmittelbaren Umgebung jedes Furnierstreifens führt. Dieser geringere Widerstand gegen den Luftstrom ermöglicht es den Luftpartikeln, entlang des von jedem Furnierstreifen geschaffenen Weges zu vibrieren, aber diese Partikelvibrationen und -verschiebungen stoßen immer noch auf einen Luftstromwiderstand, der höher ist als der des umgebenden atmosphärischen Mediums. In jedem Fall, in dem sich die inneren Furnierstreifen der Oberfläche der Biokompositpaneel nähern, gibt es, auch wenn möglicherweise eine kleine Schicht Myzelhaut den Furnierstreifen bedeckt, einen Weg mit geringerem Widerstand für die Übertragung elastischer Wellen aus dem umgebenden Luftvolumen in den Luftweg innerhalb der Biokompositpaneel, wie er durch den Furnierstreifen geschaffen wird (Abbildung 62).



Quelle: ARUP

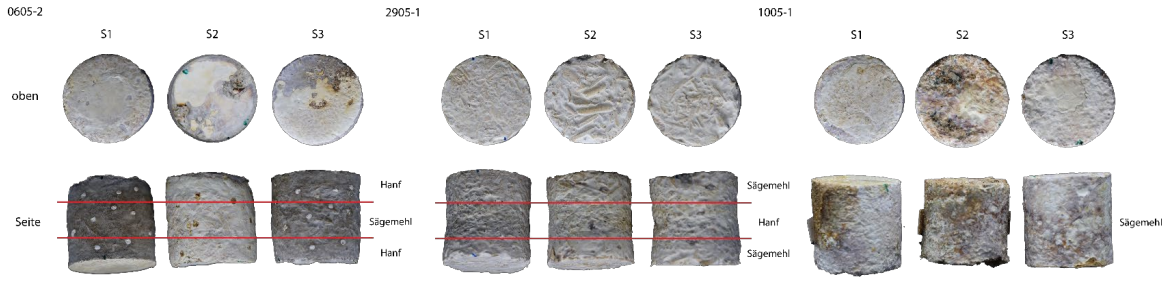
Abbildung 62 Schematische Darstellung des Einflusses von Furnierstreifen auf das Schallabsorptionsvermögen bei einzelnen Frequenzen in Abhängigkeit der Wellenlänge der Furnierstruktur

Dies hat zur Folge, in der das Furnier einen Weg für Schallübertragung bzw. Einleitung von Schallwellen (im Sinne von elastischen Schwingungen im Luft) schafft, um in das Innere der Biokompositpaneelen einzudringen und diese zu durchlaufen, während es gleichzeitig Widerstand gegen die freie Bewegung der Partikel leistet. Dieser Widerstand gegen die Partikelbewegung wandelt die mechanische Wellenenergie in Wärmeenergie um und führt zu einer Verringerung der in der Schallwelle vorhandenen Gesamtenergie. Dieses Phänomen wird als Schallabsorption bezeichnet.

Die Furniergitterstruktur im Inneren der Testproben wurde bewusst so gestaltet, dass sie die Schallabsorption in bestimmten Frequenzbereichen verbessert. Diese Bereiche wurden auf der Grundlage der Beziehung zwischen der Wellenlänge der Schallwellen bei der Zielfrequenz und dem Abstand zwischen den Spitzen der einzelnen Furnierwellenformen an den Punkten vorhergesagt, an denen sich der Furnierstreifen der Oberfläche des Biokompositmaterials nähert. Diese Punkte auf der Oberfläche der Testprobe stellen „Eintrittspunkte" in den Luftstromweg durch das Innere der Biokompositpaneel dar. Wenn aufeinanderfolgende Wellenformspitzen mit entgegengesetzter Polarität der ankommenden Schallwelle verbunden sind (d. h. eine Wellenformspitze trifft auf einen Hochdruckbereich der Schallwelle, während die nächste Wellenformspitze auf einen Niederdruckbereich derselben Schallwelle trifft), treibt dieser Druckunterschied den Luftstrom vom Hochdruckbereich zum Niederdruckbereich. Die Flugbahn der ankommenden Schallwelle über die Oberfläche der Platte führt dann zu einem wechselnden Push-and-Pull-Effekt durch den von jedem Furnierstreifen erzeugten Luftstrom, was zu einer allgemeinen Verringerung der akustischen Energie in den Schallwellen führt, die geometrisch mit den Furnierwellenformen übereinstimmen. Dieser Effekt wird in den oben genannten Testergebnissen deutlich, insbesondere wenn man bedenkt, dass die Verbesserung der Schallabsorption gezielt auf die Frequenzen 400 Hz und 1200 Hz ausgerichtet war.

Zusammenfassung

Die im Rahmen des HOME 2.0-Projekts durchgeführten akustischen Untersuchungen haben wertvolle Erkenntnisse über die Leistungsfähigkeit von Verbundplatten auf Myzelbasis als Komponenten in Trennwandsystemen geliefert. Durch einen strukturierten Ansatz mit einem mehrphasigen Testverfahren – einschließlich Messungen der Schallabsorption mit Impedanzrohr, der Luftschallübertragung im Prüfstand und der Schallabsorption im Hallraum – wurden die akustischen Eigenschaften verschiedener Biokompositproben untersucht (Abbildung 63). Die Forschung untersuchte, wie sich Unterschiede im Materialsubstrat, in der Geometrie der Furnierverstärkung, in der Verbundschichtung und im Gesamtdesign der Platten auf die Schallabsorption und die Schalldämmung der hergestellten Platten auswirken.



Quelle: KUL

Abbildung 63 Für die Impedanzrohrmessung hergestellte Prüfkörper – alle Prüfkörpervarianten: (0605-2) 60% Sägemehl- und 40% Hanfsubstrat. (2905-1) 40% Sägemehl- und 60% Hanfsubstrat. ()1005-1) 100% Sägemehl

Die Ergebnisse zeigen, dass die Furniergitter dazu verwendet werden kann, bei strategisch gewählten Frequenzbändern das Schallabsorptionsvermögen der Biokompositpaneel zu erhöhen. Dies ist wahrscheinlich auf die reduzierte Myzelverbindung unmittelbar, um die Furnierstreifen innerhalb der Platte zurückzuführen, wodurch Wege für einen verbesserten internen Luftstrom innerhalb des Biokompositkerns entstehen. Der entscheidende Parameter bei der Plattenkonstruktion zur Steuerung dieses Effekts ist der Abstand zwischen den Furnierwellenbergen, die sich der Oberfläche der Biokompositpaneel nähern. Wenn die Furnierstruktur aus kürzeren Wellenlängen besteht, liegen die Wellenberge, die sich der Plattenoberfläche nähern, geometrisch näher beieinander. Dieser physikalische Abstand entspricht dem Abstand zwischen den Druckmaxima einer ankommenden Schallwelle einer bestimmten Frequenz im umgebenden Medium Luft (abhängig vom Einfallswinkel). Diese Übereinstimmung des Abstands zwischen Druckmaxima und -minima in der ankommenden Schallwelle und des Abstands zwischen den Eintrittspunkten in die Luftübertragungswege innerhalb der Biokompositpaneel entlang der Furnierwellenformen führt zu einem Push-Pull-Effekt, bei dem

sich der niedrige Druck an einer Furnierwellenformspitze und der hohe Druck an der benachbarten Wellenformspitze abwechseln, wenn die Schallwelle über die Oberfläche der Biokompositpaneel läuft. Bei kürzeren Abständen zwischen den Spitzen der Furnierwellenformen werden höhere Frequenzen effektiver absorbiert. Ist der Abstand zwischen den Spitzen der Furnierwellenformen größer, werden Schallwellen mit niedrigeren Frequenzen und längeren Wellenlängen absorbiert. Auf diese Weise ist es möglich, die Absorptionskapazität der Biokompositpaneel durch Vergrößern oder Verkleinern der Wellenlängen der Furnierwellenformen – genauer gesagt durch Verändern des Abstands zwischen den Wellenformspitzen, die sich der Plattenoberfläche von innen nähern – variabel einzustellen.

Die Fähigkeit der Furnierstreifen, mit einfallenden Schallwellen zu interagieren, indem sie den Luftdruck von einem Punkt auf der Oberfläche zu einem anderen Punkt auf der Oberfläche strömen lassen, wirkt sich positiv auf die Schallabsorption aus, hat jedoch einen negativen Effekt auf die Schalldämmung. Dies liegt daran, dass Schall leichter in den Kern der Platte eindringen und dadurch auf der gegenüberliegenden Seite der Platte austreten kann, wodurch die Luftschalldämmung des Verbundkerns selbst umgangen wird. Dies stellt einen Kompromiss zwischen den Absorptions- und Isolationseigenschaften von Biokompositen dar, unterstreicht aber auch das Potenzial für parametrisches Design spezifischer Lösungen für individuelle Anwendungsfälle, das diese Technologie zur Herstellung von furnierverstärkten Biokompositpaneeln bietet.

Unter den getesteten Materialien zeigten Verbundwerkstoffe auf Sägemehlbasis aufgrund ihrer höheren Masse und homogenen Struktur die beste Schalldämmung, während Verbundwerkstoffe auf Hanfbasis mit Furnierverstärkung eine verbesserte Absorption, aber eine beeinträchtigte Dämmung aufwiesen.

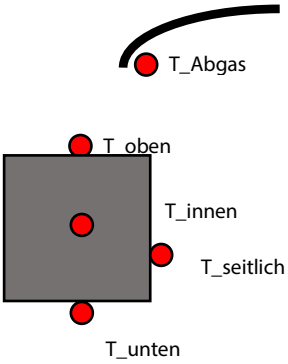
Die Ergebnisse unterstützen die Weiterentwicklung eines modularen, biobasierten Trennwandsystems, das akustische Leistung und Nachhaltigkeit in Einklang bringt. Zukünftige Arbeiten werden sich auf die Optimierung von Materialkonfigurationen und Beschichtung der Paneele konzentrieren, um die architektonischen Anforderungen sowohl an die Schallkontrolle als auch an das zirkuläre Design zu erfüllen.

AP 4.6 Physikalische Charakterisierung von Bauteilen

Methode

Es wurden Brandversuche an myzelbasierten Materialien durchgeführt, die mit Hanfsubstraten unterschiedlicher Partikelgrößen und Dichten hergestellt wurden. Die Proben umfassten Hanffasern mit Partikelgrößen über und unter 2 mm sowie Zielrohdichten von etwa 120 kg/m^3, 150 kg/m^3 und 200 kg/m^3. Der Versuchsaufbau bestand aus einem Strahlungserhitzer mit einer Betriebstemperatur von ca. 840 °C, einer Heizfläche von 120 × 120 mm und einer Leistung von 1000 W, der in einem Abstand von 110 mm zur Probenoberfläche positioniert war. Mehrere Thermoelemente wurden an der Oberseite, im Inneren, an der Unterseite und an der Seite der Proben sowie im Abgasstrom platziert, um Temperaturverläufe während der Brandbelastung aufzuzeichnen. Die Wärmeausbreitung und das Materialverhalten unter Feuerlast wurden bis zum Abschluss des Tests überwacht.

Die Brandversuche wurden nicht als standardisierte Versuche durchgeführt. Der Versuchsaufbau und das Verfahren orientierten sich jedoch an den Grundsätzen der DIN EN 1363-1 (Feuerwiderstandsprüfungen – Allgemeine Anforderungen) und der DIN EN ISO 5660-1 (Reaktion auf Feuer – Wärmefreisetzungsrate, Rauchentwicklung und Massenverlust – Teil 1: Konenkalorimeter-Methode). Diese Referenzen dienen dazu, die Methodik einzuordnen und einen Vergleich mit etablierten Praktiken zu ermöglichen. Die Versuche wurden mit Unterstützung des Engler-Bunte-Instituts, Verbrennungstechnik Forschungsstelle für Brandschutztechnik (EBI-VBT) am KIT durchgeführt. Es handelte sich um explorative Untersuchungen, um ein erstes Verständnis des Brandverhaltens von Hanf-basierten Myzelium-Verbundwerkstoffen zu gewinnen. Weitere Untersuchungen unter standardisierten Bedingungen und mit einer erweiterten Probenpalette sind erforderlich, um validierte und vergleichbare Brandleistungsdaten zu erhalten. Abbildung 64 zeigt die Positionierung der Sensoren an der Probe.



Quelle: KIT

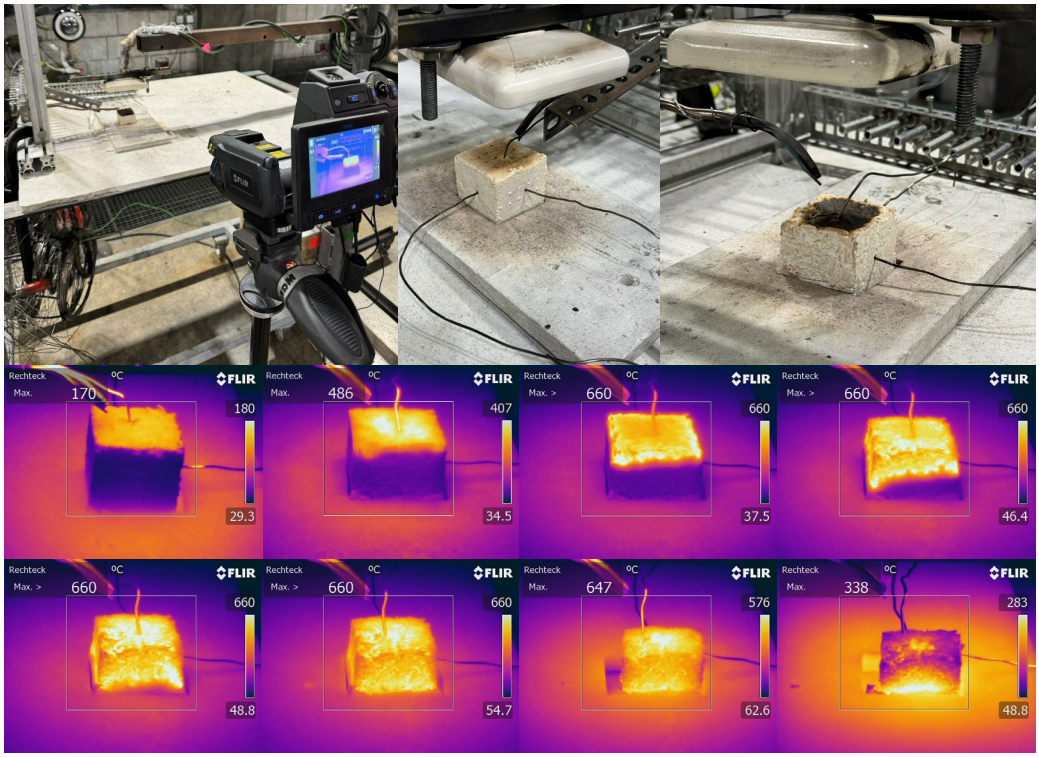
Abbildung 64 Position der Temperatursensoren an der Probe

Ergebnisse und Schlussfolgerung

Die Ergebnisse zeigen, dass Dichte und Partikelgröße einen deutlichen Einfluss auf die Wärmeausbreitung und das Verkohlungsverhalten haben. Das leichteste Material (120 kg/m^3, >2 mm Partikel) wies den besten Feuerwiderstand auf, mit einer langsameren Wärmeübertragung zum Kern und einer besseren Erhaltung der strukturellen Integrität unter Brandeinwirkung. Im Gegensatz dazu zeigten dichtere Proben (150 kg/m^3 und 200 kg/m^3) einen schnelleren Temperaturanstieg im Material, wobei die dichteste Probe (<2 mm Partikel, 200 kg/m^3) die schlechteste Wärmeisolationsleistung erbrachte. Alle Proben bildeten eine Kohleschicht, jedoch behielt das gröbere, weniger dichte Hanfsubstrat über die Zeit eine höhere Schutzwirkung.

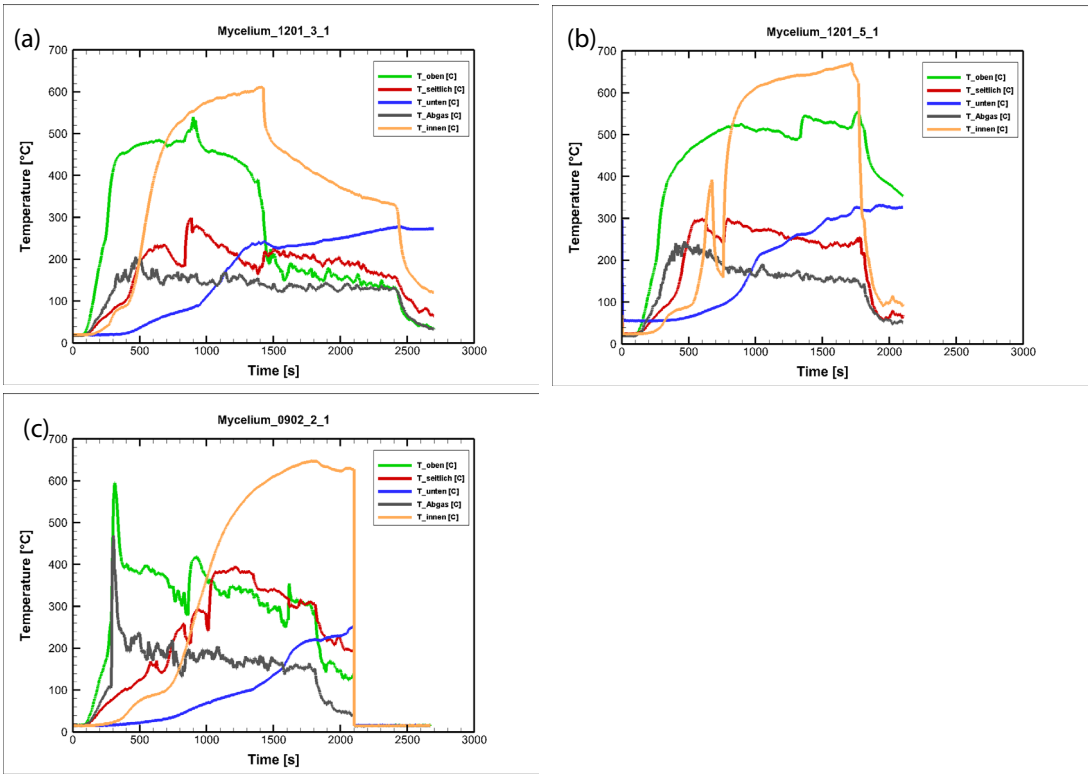
Obwohl aufgrund von Budgetbeschränkungen nur eine begrenzte Anzahl von Versuchen durchgeführt werden konnte, lieferten diese Versuche ein solides Verständnis darüber, wie hanfbasierte Myzelverbundstoffe unter Brandeinwirkung reagieren. Die gewonnenen Erkenntnisse führten direkt zu unserer Materialwahl: Wir entschieden uns für ein Hanfsubstrat mit einer Dichte von ca. 120 kg/m^3 und einer Fasergröße >2 mm, da es eine überlegene Feuerbeständigkeit bietet und zugleich bessere akustische Eigenschaften aufweist. Dieses ausgewogene thermische und akustische Verhalten ist entscheidend für die geplanten Anwendungen unserer Myzeliumwandbauteile.

Abbildung 65 zeigt die Proben während der Prüfung, und Abbildung 66 stellt das Temperaturprofil der Proben mit unterschiedlichen Fasergrößen und Dichten dar. Dabei werden die quantitativen Temperatur-Zeit-Profile der drei Hanf-basierten Myzelverbundstoffe untersucht: (a) Hanf > 2 mm (120 kg/m^3), (b) Hanf > 2 mm (150 kg/m^3) und (c) Hanf < 2 mm (200 kg/m^3). Die Ergebnisse zeigen, dass das leichtere, grobkörnige Substrat eine langsamere Wärmeübertragung zum Kern und eine bessere thermische Schutzwirkung aufweist, während dichtere Proben einen schnelleren Temperaturanstieg zulassen.



Quelle: KIT

Abbildung 65 Verschiedene hanfbasierte Myzelproben unter dem Strahlungserhitzer



Quelle: KIT

Abbildung 66 Temperaturprofil der Proben über die Zeit, a) Hanf >2 mm (120 kg/m^3), b) Hanf >2 mm (150 kg/m^3) und c) Hanf <2 mm (200 kg/m^3)

AP 5 Demonstratorenentwicklung
AP 5.1 Entwicklung, Formfindung und Oberflächendesign

Da bei der Herstellung der Komponenten zwei verschiedene mit Myzel beimpfte Substrate (Hanfschäben und Sägemehl) kombiniert werden, kann die Oberflächenästhetik durch die Hervorhebung des optischen Unterschieds zwischen den beiden Materialien verbessert werden. Frühe Proben haben gezeigt, dass sich die Wachstumsgeschwindigkeit des Myzels zwischen Hanfschäben und Sägemehl unterscheidet. Wie in Tabelle 1 beschrieben, weisen die Hanfschäben eine höhere Anzahl gröberer Fasern auf. Zwar entsprechen die Durchmesser den angegebenen Werten, allerdings wurden Faserlängen bis zu 40 mm beobachtet. Dadurch wird die Menge an Sauerstoff reduziert, die zwischen den Fasern eindringen kann. Dies führt dazu, dass das Myzel deutlich langsamer wächst als bei Hanfschäben. Dieser Unterschied konnte bei Prototypen mittlerer Größe bereits nach etwa einer Woche beobachtet werden.

Wenn die beiden Materialien gleichzeitig aufgebracht werden, um zusammenzuwachsen, muss der Prototyp so lange in der Wachstumskammer verbleiben, bis das langsamere Material (Sägemehl) vollständig gewachsen ist. Zu diesem Zeitpunkt bilden beide Materialien eine weiße Schicht.

Um die unterschiedlichen Wachstumsgeschwindigkeiten der Materialien in den Fertigungsprozess zu integrieren, wurde ein zweistufiger Herstellungsprozess untersucht. Zunächst wurden die Sägemehlpartikel aufgetragen und eine Woche lang wachsen gelassen. Nach einer Woche ist ein ausreichendes Myzelwachstum auf dem Sägemehlmaterial zu beobachten, sodass der Rest der Form mit Hanf gefüllt und die Probe eine weitere Woche lang wachsen gelassen wird (Abbildung 67).



Quelle: EDEK

Abbildung 67 Oben links: abgelagertes Sägemehl, oben rechts: 1 Woche gewachsenes Sägemehl, unten links: Hanfablagerung auf gewachsenem Sägemehl, unten rechts: endgültige Probenoberfläche nach insgesamt 2 Wochen Wachstum

Nach dem Entformen war eine gelbe Linie am Rand der Sägemehlmaterialablagerung zu sehen. Die Linien waren nicht sehr deutlich, zeigten jedoch die Spuren des zweistufigen Herstellungsprozesses. Wenn diese Ästhetik weiter kontrolliert werden könnte, könnte der Oberflächenqualität eine weitere Ebene der Individualisierung hinzugefügt werden.

Die zweite Versuchsreihe wurde mit dem Schwerpunkt auf der Kombination von Oberflächentiefe und Materialvariationen konzipiert. Es wurden zwei Prototypen mit denselben Außenabmessungen hergestellt: einer hatte eine Vertiefung, in der sich das Sägemehlmaterial ansammeln würde, der andere hatte eine Erhebung, die das Sägemehlmaterial um sich herum sammeln würde. Bei beiden Formen wurde das Sägemehl als erste Schicht in die Form eingebracht und eine Woche lang wachsen gelassen. Anschließend wurde Hanf hinzugefügt, um den Rest der Form zu bedecken, und die Probe wurde eine weitere Woche lang wachsen gelassen.

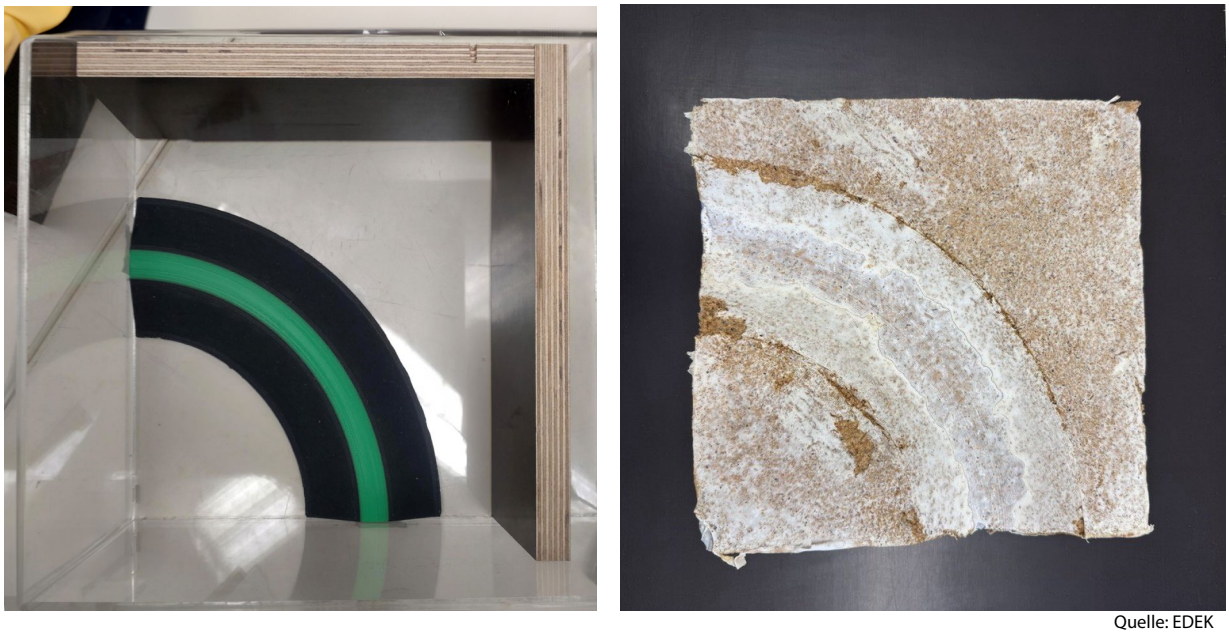
Die Probe, bei der das Sägemehl in die Vertiefung gegeben wurde, zeigte eine ähnliche optische Qualität wie der erste Test. Die Linie war unregelmäßig und natürlich, und der Sägemehlanteil schien im Vergleich zum Braunton des Hanfsubstrats eine gelbere Farbe zu haben (Abbildung 68).



Quelle: EDEK

Abbildung 68 Links: Form mit Talstruktur, rechts: entformtes Muster

Beim Entformen der zweiten Probe wurde etwas Material von der Oberfläche abgerissen. Die Sägemehlschicht, die mit dem Boden der Form in Kontakt stand, erschien brauner, wahrscheinlich aufgrund unzureichenden Wachstums aufgrund von Sauerstoffmangel. Andererseits erschien das Sägemehlmaterial, das an den Seiten der 3D-gedruckten Form hochgeklettert war, wieder gelber. In der Mitte der 3D-gedruckten Form ist die unregelmäßige Linie zu erkennen, die durch den Übergang zum Hanfmaterial verursacht wurde (Abbildung 69)



Quelle: EDEK

Abbildung 69 Links: Form mit Hügelkonfiguration, rechts: entformtes Muster

Ein letzter Testprobe wurde entwickelt, um zu untersuchen, ob derselbe Farb-/Strukturunterschied zu beobachten ist, wenn die Materialien gleichzeitig aufgetragen und gleichzeitig ausgehärtet werden. Das Sägemehlmaterial wurde in zwei parallelen Linien zu den Rändern der Probe aufgetragen, anschließend wurden die Zwischenräume mit dem Hanfsubstrat gefüllt. Obwohl die Probe recht ansprechend aussah und der Unterschied zwischen den Materialien unmittelbar nach dem Entformen deutlich zu erkennen war, war das Sägemehlmaterial sehr zerbrechlich. Daher wurde der Prototyp so lange wachsen gelassen, bis der Sägemehlanteil fester wurde. Am Ende dieses Prozesses hatten sich die Farben beider Materialien vollständig verändert, sodass die unterschiedlichen Materialien nicht mehr deutlich zu erkennen waren (Abbildung 70).



Quelle: EDEK

Abbildung 70 Links: empfindliche Probe mit erkennbarem Unterschied im Substrat, rechts: stabile Probe mit unklarer Unterscheidung des Substrats

AP 5.2 Produktion der Demonstratoren zur integrierten Myzelproduktion

Schalungsdesign

Die Schalung wurde aus 21 mm beschichteten Multiplex Platten, sogenannten Siebdruckplatten. Die Schalung besteht aus einer Bodenplatte, an der ein äußerer Rahmen befestigt werden kann. Zuletzt wird ein Deckel aufgelegt. Sowohl die Bodenplatte als auch der Deckel sind mit 3mm Lochern in einem 4 cm Raster perforiert, um ein gleichmäßiges Wachstum des Myzels zu erreichen. Zudem wird eine 1.5 mm PETG platte in die Schalung zwischen dem Bauteil und der Bodenplatte bzw. dem Deckel eingelegt, um zu verhindern, dass das Myzelium während der Wachstumsphase mit der Schalung verbindet und um den Ausschalungsprozess zu vereinfachen (Abbildung 71).

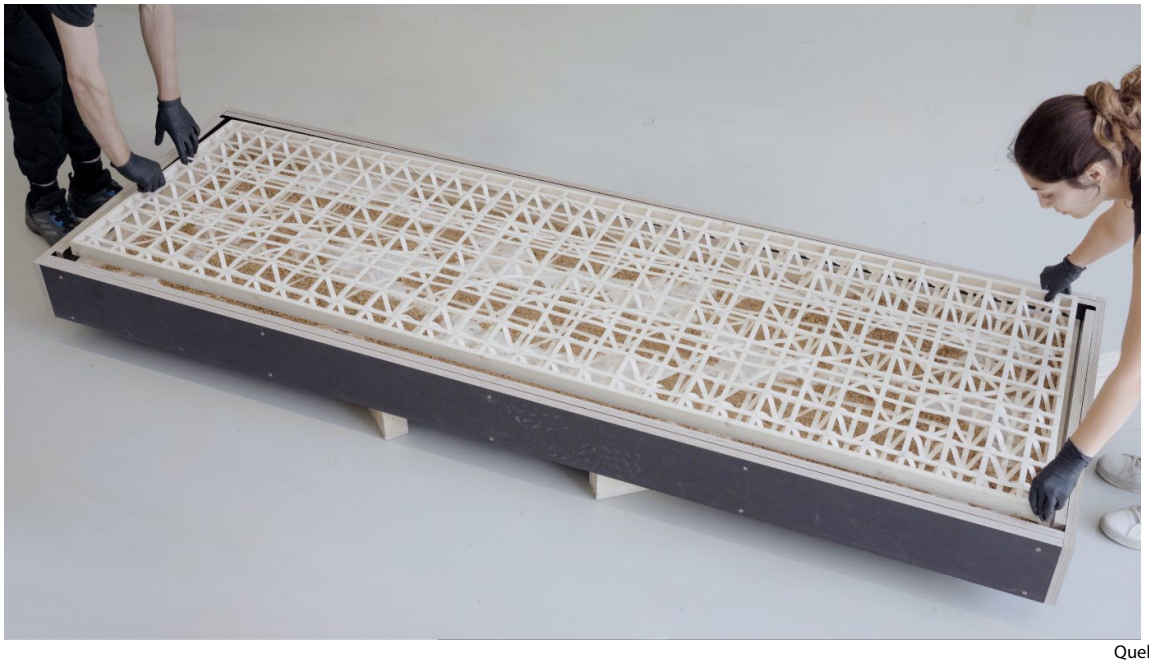


Quelle: EDEK

Abbildung 71 1,5mm PETG Schalungsplatten mit Lochungen werden in die Schalung eingelegt

Rahmeneinfügungssequenz

Zum Herstellen eines Paneels wird zuerst der äußere Holzrahmen in die Schalung eingelegt. Dann wird inokuliertes Sägespansubstrat eingefüllt und verdichtet. Danach wird die Schalung abgedeckt und für ca. eine Woche gelagert. Nach dieser ersten Wachstumsphase wird der innere Rahmen mit dem daran befestigten Furnier in den äußeren Holzrahmen eingesetzt und verschraubt. Die Form wird mit inokuliertem Hanfsubstrat gefüllt und mit dem Deckel verschlossen. Nach einer zweiten Wachstumsphase von ca. einer Woche kann das Paneel aus der Schalung entfernt werden (Abbildung 72).



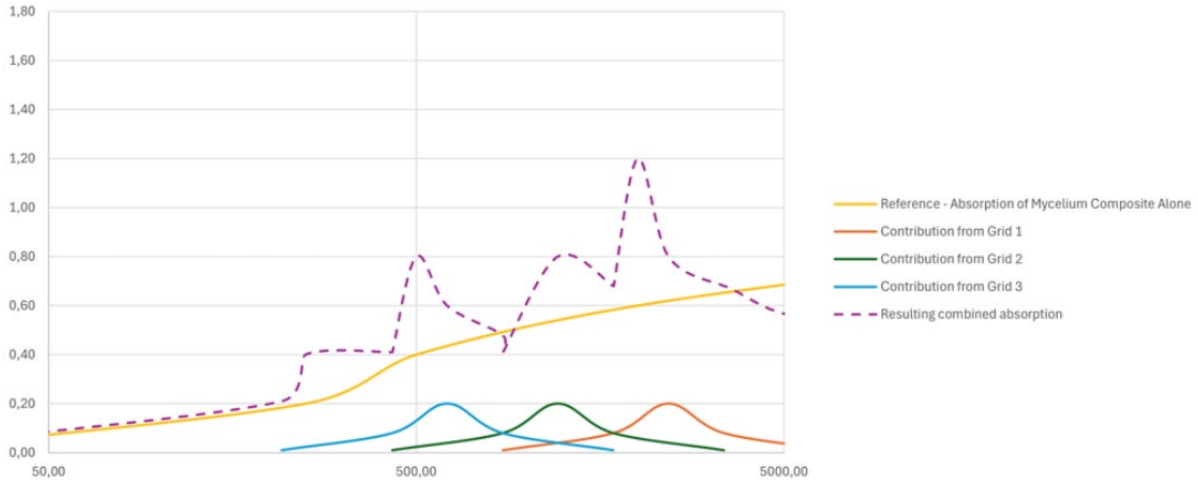
Quelle: EDEK

Abbildung 72 Rahmeneinfügungsequenz im Produktionsprozess

Holzfurnier-Gitterdesign

Es wurde von KUL und ARUP messtechnisch festgestellt, dass die Furniergitter dazu verwendet werden kann, bei strategisch gewählten Frequenzbändern das Schallabsorptionsvermögen der Biokompositpaneel zu erhöhen. Dies ist wahrscheinlich auf die reduzierte Verbindungsstärke des Myzel-Wurzelnetzes unmittelbar um die Furnierstreifen innerhalb der Platte zurückzuführen, wodurch Wege für einen verbesserten internen Luftstrom innerhalb des Biokompositkerns entstehen. Grundsätzlich entspricht jede Furnierwellenlänge einer Schallwellenlänge im Luftmedium, und dieses Verhältnis ermöglicht die strategische Dimensionierung der Furnierwellen nach angestrebtem Schallabsorptionsverhalten (detaillierte Informationen finden Sie in *Kapitel AP 4.5 Akustik Charakterisierung von Bauteilen*). Dieses hat zur Folge, dass die kürzeren Furnierwellenlängen die Schallabsorption bei höheren Frequenzen erhöhen, während die längeren Furnierwellen denselben Effekt bei niedrigeren Frequenzen erzeugen. Die inhärenten Eigenschaften von Myzel-Biokompositpaneelen ohne Furnierstrukturen sind bereits bei der Absorption höherer Frequenzen der menschlichen Stimme wirksam. Um einen breiteren Spektrum-Anteil der üblichen Geräuschkulisse in einer Büroumgebung abzudecken und zu absorbieren, wurden daher niedrigere Frequenzen ins Visier genommen.

Die reguläre Zellgröße, die als Grundlage für das Gitter gewählt wurde, betrug 8 cm x 8 cm, was zu 11,3 cm langen diagonalen Wellen führte. Diese Furnierwellenlänge wäre hinsichtlich der Messergebnisse für die Absorption von Schallwellen im Frequenzbereich um 1518 Hz wirksam. Entsprechend dem empfohlenen Verhältnis von 1:4 zwischen der kleinsten und der größten Zelle wurde die Größe der großen Zelle auf 32 cm x 32 cm festgelegt, was einer diagonalen Wellenlänge von 45,3 cm entspricht - was für die Absorption von Schallwellen im Frequenzbereich um 379 Hz wirksam wäre. Um die dazwischen liegenden Frequenzen besser abzudecken, wurde eine mittlere Zellgröße von 16 cm x 16 cm mit einer diagonalen Wellenlänge von 22,6 cm hinzugefügt (entsprechend Schallwellen im Frequenzbereich um 759 Hz). Durch die Kombination dieser Wellengrößen bei gleichzeitiger Maximierung der Anzahl der längsten Wellen konnten wir das Schallabsorptionsvermögen des Biokompositpaneels im Frequenzbereich zwischen 380 Hz und 3100 Hz erhöhen (Abbildung 73).

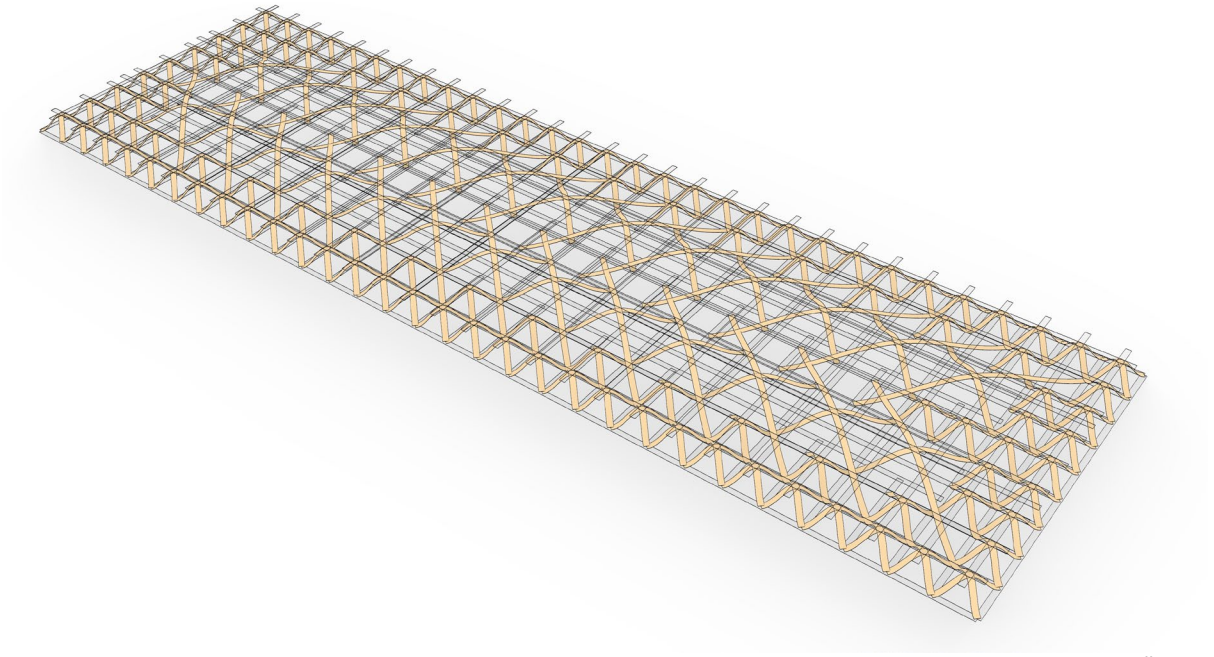


Quelle: EDEK

Abbildung 73 Grobe Schätzung des resultierenden Absorptionskoeffizienten mit Furniergitter

Da das Gitterdesign eine entscheidende Rolle für die strukturelle Leistungsfähigkeit der Paneele spielt, war es wichtig, die äußerste Reihe aus der kleinsten Zellgröße zu gestalten. Die Kontinuität dieser Zellen gewährleistet eine gleichmäßige Lastübertragung am Umfang und eine gleichmäßige Höhe. Dieses Design war auch deshalb vorteilhaft, weil die Eintrittspunkte der langen Wellen im Inneren der Platte begannen, wodurch die Interferenz des Holzrahmens verhindert wurde, was für die akustische Leistung von Vorteil ist.

Unter Beachtung dieser Grundregeln wurde ein Furniergitter mit drei Zellgrößen entworfen (Abbildung 74). Die Fertigungsabfolge wurde abschließend überprüft und das Gitter unter Verwendung von etwa 150 Metern FSC-Mix-Ahornfurnier hergestellt.



Quelle: EDEK

Abbildung 74 Endgültiges Design des Furniergitters, bestehend aus drei Zellgrößen und jeweils drei verschiedenen Wellenlängen

Die Kombination verscheidend langer Wellen in das Furniergitter führt dazu, das am Ende der Fabrikation nicht alle Schweißpunkte zugänglich sind. Daher ist die Reinfolge, in der die Furnierstreifen verschweißt werden bei der Fabrikation zu beachten.

Für das, für den Demonstrator gewählte, Furniergitterdesign war die Fabrikationssequenz wie folgt:

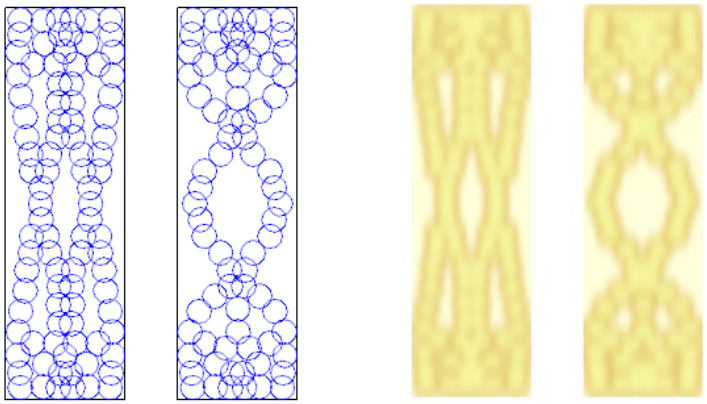
Zuerst wurde ein planares Gitter gefertigt. Darauf wurden in den folgenden Schritten die Furnierwellen angebracht. Um sicherzustellen, dass alle Schweißpunkte gesetzt werden können, war es notwendig, dass die längsten Furnierwellen separat, als letztes verschweißt werden. Dementsprechend wurden erst alle anderen Furnierwellen in einer Orientierung verschweißt. Darauffolgend, werden die orthogonal dazu laufenden Furnierwellen verschweißt. Danach werden die langen Furnierwellen abwechselnd in beide Orientierungen verschweißt. Zuletzt wird ein zweites planares Furniergitter gefertigt und mit dem restlichen Aufbau verschweißt.

Oberflächendesign und Erstellung einer gradierten Materialverteilung

Das Ziel des Oberflächendesigns war es, die beiden unterschiedlichen Substrate, die im Demonstrator verwendet werden, hervorzuheben. Sägemehl und Hanf. Da die strukturelle Leistungsfähigkeit des Myzeliumbauteils hauptsächlich vom Rahmen und dem Verstärkungsgitter abhängt, wurde das Design aus akustischen und ästhetischen Gesichtspunkten ausgewählt.

Da der Materialauftrag über ein Rohr erfolgt, hängt die Auflösung des Oberflächendesigns direkt vom Innendurchmesser des Auftragsrohrs ab, welcher 70 mm beträgt. Angesichts einer Gesamtfläche von 2,40 m x 0,8 m ist die mit dem entwickelten Fertigungsverfahren erreichbare Auflösung relativ gering. Aufgrund der begrenzten Fläche der Trennwand, auf der sich komplexe Muster realisieren lassen, wurde ein geschwungenes Muster bevorzugt, welches die Vertikalität der Platte akzentuiert.

Der rechnergestützte Entwurfsprozess begann daher mit dem Zeichnen von Kurven, die von der Ober- bis zur Unterkante der Wandplatte verlaufen. Im nächsten Schritt wurden die Kurven mit Punkten unterteilt, die mit einem Graph-Mapper gesteuert werden. Dadurch wurden die Punkte von der Mitte des Bauteils zu den Ober- und Unterkanten hin allmählich dichter. Anschließend wurden Kreise mit dem Durchmesser des Auftragsrohrs zu den Teilungspunkten hinzugefügt. Dieses Muster wurde dann in ein texturiertes Mesh umgewandelt, um eine genauere Visualisierung des Endergebnisses zu erhalten. (Abbildung 75).

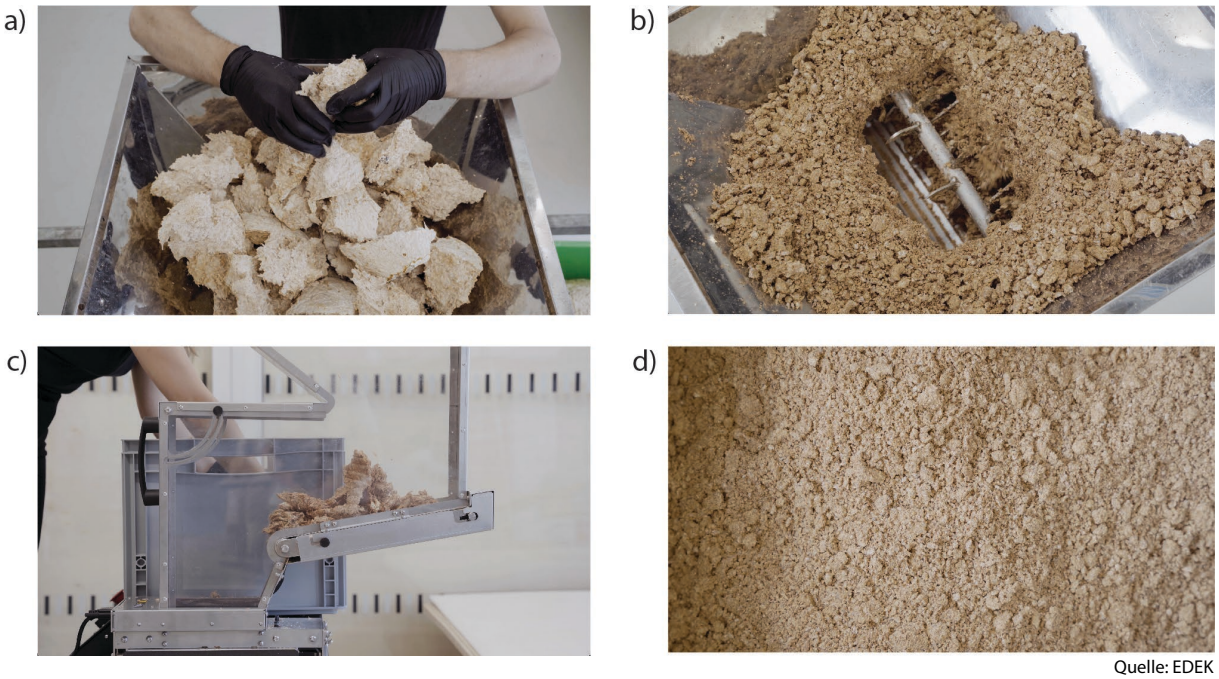


Quelle: EDEK

Abbildung 75 Parametrisches Entwurfstool zur gradierten Materialverteilung von Hanf- und Säge, links geometrische Generierung der Verteilung, rechts Visualisierung des Materialverlaufs

Materialvorbereitung und deposition

Die mit Myzel beimpften Substrate wurden gemäß unserem Rezept in großen Mengen von einer Myzelfarm bestellt. Da das Material bis zur Produktion aufbewahrt werden musste, wurde es in einem großen Kühlschrank gelagert, um es aktiv zu halten und ein Überwachsen zu verhindern. Unmittelbar vor der Produktion wurde das Material für den Fabrikationsprozess vorbereitet. Der erste Schritt bestand darin, das Material von Hand in Stücke zu zerbrechen. Anschließend wurde eine industrielle Obstmühle verwendet, um schnell kleinere Stücke zu erhalten. Dieser Schritt wurde wiederholt, um sicherzustellen, dass keine großen Stücke im verarbeiteten Behälter zurückblieben. Danach wurde das Material mit einem elektrischen Schredder weiterverarbeitet, um feinere Partikel zu erhalten. All diese Schritte waren entscheidend, um das Material für den robotergestützten Auftrag vorzubereiten. Die Verwendung der manuellen Obstmühle reichte hingegen aus, um die verhärtete Schicht zu zerkleinern, die sich auf dem Sägemehlsubstrat bildet. Dadurch wurden die feineren Partikel nach diesem Schritt freigelegt und hatten die richtige Körnung für den späteren Auftragsprozess (Abbildung 76).



Quelle: EDEK

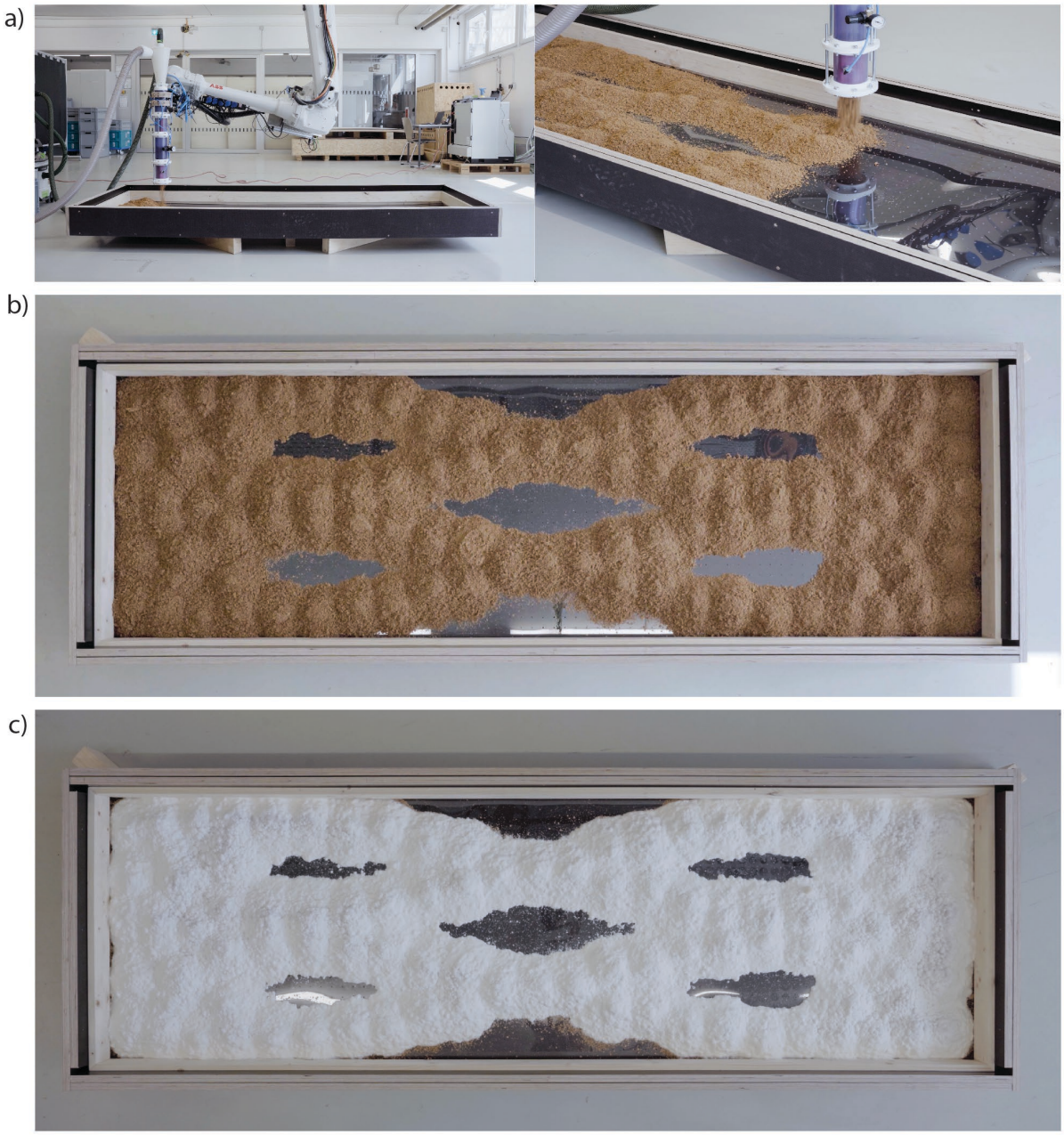
Abbildung 76 Materialvorbereitung a) Zerkleinern des Materials von Hand, b) Zerkleinern des Materials in der Obstmühle, c) Verarbeitung mit einem elektrischen Schredder, d) Material bereit zur Ablagerung

Die Produktion beginnt mit der Deposition des Sägemehlmaterials gemäß dem Werkzeugpfad, der aus dem computergestützten Konstruktionsprozess generiert wird und das Oberflächendesign bestimmt. Dieser

Prozess war relativ schnell, da nur ein Durchgang ausreichte, um das Muster auf der Oberfläche zu erzeugen. Nach dem Fertigungsschritt wurde die Form im genau an der Stelle, an der das Material aufgebracht wurde, mit einer Klarsichtfolie abgedeckt.

Das aufgetragene Material wurde vier Tage lang bei Raumtemperatur und unter Einwirkung seiner eigenen Feuchtigkeit wachsen gelassen. Die Wahl einer klimatisch unkontrollierten Umgebung für den Wachstumsprozess war bewusst getroffen worden, um den Energieverbrauch während der Produktion zu reduzieren und die Skalierbarkeit des Systems zu beweisen, da eine klimatisch kontrollierte Umgebung für die Massenproduktion solcher biobasierter großflächiger Trennwände kein realistisches Szenario wäre. Die Temperaturschwankungen in der Raumluft während der Wachstumsphasen aller hergestellten Paneele waren nur gering: zwischen 24 °C und 26 °C. Die relative Luftfeuchtigkeit innerhalb der Schalung wurde während der Wachstumsphasen dank der verwendeten luftdichten Abdeckungen zwischen 90 % und 99 % gehalten.

Nach vier Tagen wurde das Material abgedeckt und die Bildung einer vollständig weißen und flauschigen Myzelschicht auf dem Sägemehlsubstrat beobachtet. Es folgte die Ablagerung des Hanfmaterials, zunächst entlang des negativen Verlaufs der Sägemehlauslagerung. Dies ermöglichte die Schaffung einer gleichmäßigen Ablagerungshöhe, auf die der Innenrahmen mit dem Gitter aufgesetzt werden kann. Bei den nächsten drei Schichten wurde ein regelmäßiger Ablagerungsweg verfolgt, um die gesamte Oberfläche der Wand zu bedecken, wobei die Ablagerungspunkte die Mittelpunkte der Gitterzellen waren (Abbildung 77). Für das Wachstum des abgelagerten Hanfmaterials wurde das gleiche Verfahren wie zuvor angewendet: Es wurde mit Klarsichtfolie abgedeckt und sieben Tage lang wachsen gelassen.



Quelle: EDEK

Abbildung 77 Sägemehlablagerung a) Robotergesteuerte Ablagerung des beimpften Sägemehlmaterials, b) Ablagerung von Sägemehl, c) Gewachsenes Sägemehl

Die Gesamtmenge des für den endgültigen Prototyp verwendeten Materials betrug 12 kg Sägemehlsubstrat und 36 kg Hanfsubstrat (Nassgewicht). Ohne Berücksichtigung der Vorbereitungszeit für den Rahmen und das Gitter dauerte die Herstellung der Platte 11 Tage: vom Beginn der Ablagerung bis zum Freilegen der Hanfschicht vor dem Trocknungsprozess.

Trocknungsbedingungen

Da beim Trocknen an der Luft die Luft nicht in die inneren Bereiche eindringen kann, trocknen die Platten nicht vollständig. Dadurch wird Feuchtigkeit in der Wand eingeschlossen, sodass nach einer Weile Pilze zu wachsen beginnen, selbst wenn sich die Oberfläche trocken anfühlt und aussieht. Um dies zu vermeiden, wurde eine Heißpresse für den Trocknungsprozess getestet. Um ein Anhaften der Platten an der Oberfläche zu verhindern und die Platten der Maschine vor dem während des Trocknungsprozesses austretenden Wasser zu schützen,

wurden Teflonfolien sowohl auf der Ober- als auch auf der Unterseite der Heizpressenoberflächen angebracht. Die obere Platte ist so eingestellt, dass sie etwa drei Zentimeter von dem Paneel entfernt ist, ohne es zu berühren. Erste Trockenversuche mit einer Heizpresse bei 70 °C führten zu keinen zufriedenstellenden Ergebnissen. Durch die schnelle Trocknung der äußeren Schichten entstand eine hohe Spannung im Paneel, die zu starker Verformung und Rissbildung führte (Abbildung 78).



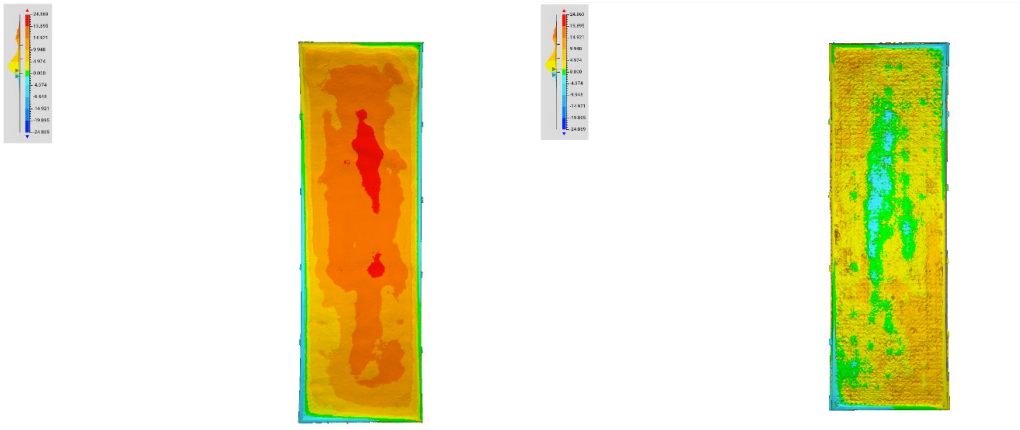
Quelle: EDEK

Abbildung 78 Trennwand in Originalgröße, Trocknung in der Heißpresse

Ein langsamer Trocknungsprozess in einer klimatisierten Kammer bei niedrigeren Temperaturen (30-40°C) und hoher Luftfeuchtigkeit (50-65% r. F), führten zu einer langsameren, gleichmäßigeren Trocknung, wodurch ein besseres Ergebnis erzielt werden konnte. Jedoch waren auch bei dieser Methode Deformierung und Rissbildung nicht auszuschließen.

AP 5.3 3D Scanning der Bauteile und Konzepte zur Verbesserung der Präzision

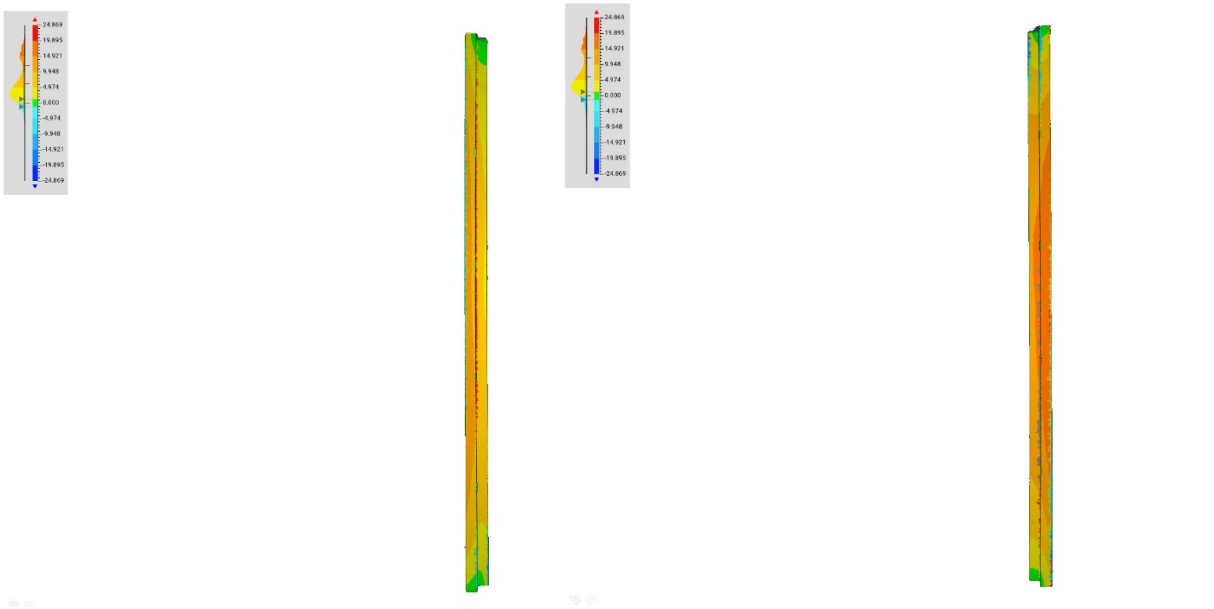
Um die Abweichung des gefertigten Paneels von dem designten idealen Paneel zu evaluieren, wurde ein 3D Scan von dem fabrizierten Paneel angefertigt. Die Überlagerung der beiden Geometrien zeig eine Abweichung von bis zu 25 mm. Dabei ist diese Abweichung nicht gleichmäßig über das Bauteil. Die vorder- und Rückseite des fabrizierten Paneels sind aufgrund der Schrumpfung des Myzelsubstrats beim Trocknen nach innen gewölbt. Die Wölbung ist auf der Seite mit dem Sägespansubstrat deutlich ausgeprägter. Auf dieser Seite finden sich die größten Abweichungen vom idealen Paneel (Abbildung 79).



Quelle: EDEK

Abbildung 79 3D Scan des fertigen Paneels und dessen Deformation relativ zu einem Optimalen Paneel. Vorderseite (Links) Rückseite (Rechts)

Auch der Holzrahmen des Paneels konnte den Schrumpfungskräften nicht standhalten und wurde verformt. Die Verformung ist besonders stark an den langen Seiten des Paneels und beträgt in der Mitte des Paneels bis zu 14–16 mm (Abbildung 80). Interessant ist auch die ungleichmäßige Verformung des Rahmens. So ist auf beiden Seiten eindeutig zu erkennen, dass die Seite, auf der sich das Sägespansubstrat befindet, sich signifikant stärker verformt hat.



Quelle: EDEK

Abbildung 80 Verformung des Rahmens entlang der langen Seiten des Paneels

Um die Abweichung der gefertigten Paneele zukünftig zu begrenzen, ist die Kombination verschiedener Maßnahmen denkbar.

Da die Schrumpfungsrate beim Trocknen des Sägespansubstrats viel höher ist als die des Hanfsubstrats, wäre eine dreischichtige Sandwichkonstruktion von Vorteil. Ein Paneel mit einem Kern aus Hanfsubstrat und gleich dicken Seiten aus Sägespansubstrat wäre im Vergleich zu einem Paneel mit einer Seite aus Sägespansubstrat und einer Seite aus Hanfsubstrat formstabiler, da sich beide Seiten bei der Trocknung gleichmäßig verhalten. Diese Maßnahme reduziert die Verformung des Paneels zwar nicht, verhindert jedoch die Ausbeulung in eine Richtung.

Versteifungen des Rahmens während der Trocknung könnten die Verformung einschränken, allerdings auch zu Rissbildung auf der Oberfläche des Paneels führen.

Anstatt die Schrumpfung eines Paneels zu limitieren, wäre es denkbar, ein Paneel so zu entwerfen, dass es in die gewünschte Geometrie schrumpft. Denkbar wäre eine Schalung, bei der die Vorder- und Rückseite nach außen gewölbt sind, sodass das Paneel nach dem Trocknen plan ist.

Um die Präzision des Rahmens zu erhöhen, wären mehrere Varianten denkbar. So wäre es möglich, einen breiteren Holzrahmen zu fertigen, der nach dem Trocknen von außen abgefräst wird, um die Rechtwinkligkeit wiederherzustellen. Eine andere Möglichkeit wäre, den Holzrahmen in der Schalung so einzuspannen, dass er sich durch die Trocknung wieder gerade zieht.

Die beschriebenen Möglichkeiten müssten in weiteren Untersuchungen noch auf ihre Effektivität und Machbarkeit hin überprüft werden.

AP 6 Zirkuläre Wertschöpfungskette

Eine zirkuläre Wertschöpfungskette zielt darauf ab, Abfälle zu minimieren und die Wiederverwendung, Reparatur, Wiederaufbereitung und das Recycling von Materialien zu fördern. Wichtige Prinzipien einer

solchen Wertschöpfungskette sind die Ressourcenschonung, Wiederverwendung und Reparatur, Recycling und Abfallvermeidung (Umweltbundesamt, o.J.). Diese Prinzipien finden zunächst Anwendung in der Entwicklung eines Bausystemkonzepts für das entwickelte myzelbasierte Verbundmaterial. Durch Interviews und Analysen von Stakeholdern und eines umfassenden Life Cycle Designs soll im weiteren Verlauf ein Kreislaufgeschäftsmodell entwickelt werden.

AP 6.1 Entwicklung eines Bausystemkonzepts für das Hochskalieren des myzelbasierten Bioverbundsystems inkl. Bauteilanschlüsse

Dieses Kapitel präsentiert die Entwicklung des Konzeptdesigns für die Bauteilverbindungen des bio-zirkulären Trennwandsystems aus Verbundwerkstoffen auf Myzelbasis. Die Verbindungsdetails sind entscheidend für die strukturelle Stabilität, die einfache Montage und die Umsetzung zirkulärer Entwurfsprinzipien. Im Rahmen des Designprozesses wurden mehrschichtige Wandaufbauten und Verbindungskonfigurationen untersucht, um die Anforderungen an Leistung, Ästhetik und Nachhaltigkeit zu integrieren. In einer iterativen Entwicklung wurden drei Trennwandsystemkonzepte und mehrere Verbindungsoptionen evaluiert. Die schließlich ausgewählte hybride Lösung, ermöglicht eine hohe Designflexibilität bei guten konstruktiven und akustischen Eigenschaften und unterstützt dabei die Verwendung kreislauffähiger Materialien. Diese Ergebnisse bilden die Grundlage für die weitere Prototypentwicklung und Integration in den Home 2.0-Demonstrator.

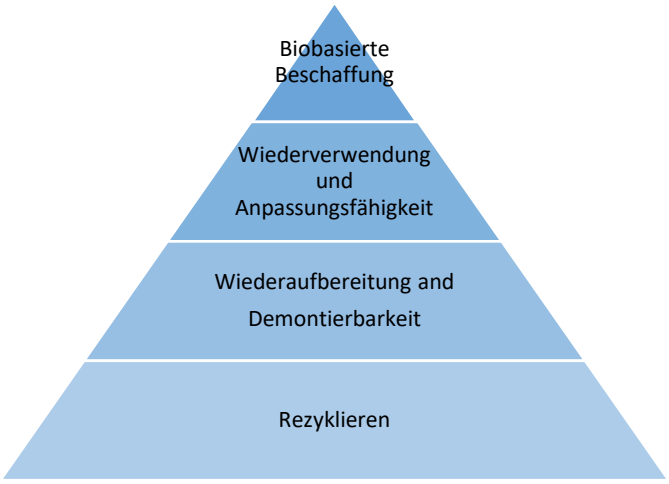
Die Designprinzipien für die Home 2.0-Trennwandsysteme basiert auf den zirkulären Designstrategien des 9R-Framework, das Ressourcenschonung und Werterhaltung priorisiert (Potting et al., 2017; Kirchherr et al., 2017). Das 9R Rahmenwerk wird in vier Designprinzipien verdichtet – biobasierte Beschaffung, Wiederverwendung und Anpassungsfähigkeit, Wiederaufarbeitung und Demontierbarkeit sowie Rezyklieren –, die als Grundlage für die Konzeptentwicklung der mehrschichtigen Paneele bis hin zu den Verbindungsdetails dienen. Diese Ansätze werden durch den Stand der Technik untermauert, der den Einfluss von Langlebigkeit und Haltbarkeit (Bakker et al., 2014), Anpassungsfähigkeit (Durmisevic, 2006), Demontierbarkeit (Durmisevic & Brouwer, 2002), Wiederverwendung (Stahel, 2010) und Materialrückgewinnung (Geissdoerfer et al., 2017) auf die Ressourceneffizienz dokumentiert.

Der letzte Abschnitt dokumentiert die Untersuchung zu verschiedenen Komponentenkonfigurationen und Verbindungskonzepten. Er skizziert und bewertet drei Konzeptionen und Verbindungsmechanismen und beschreibt den schließlich ausgewählten hybriden Ansatz, der konstruktive Integrität, eine effiziente Montage und Kreislauffähigkeit in Einklang bringt.

Hintergrund

Kreislaufgerechte Designprinzipien

Die der Konzeptentwicklung zugrundeliegenden Designprinzipien sind in Abbildung 81 aufgezeigt und werden im Folgenden beschrieben. Diese Prinzipien dienten sowohl als Leitfaden für die Konzeptentwicklung von myzelbasierten Trennwandkonzepten, mehrschichtigen Paneelkonfigurationen und Verbindungssystemen.



Quelle: KUL

Abbildung 81 Kreislaufgerechte Designprinzipien

1. **Biobasierte Beschaffung** – Vorrang für erneuerbare, nachwachsende Materialien, um die Ressourcenabhängigkeit zu verringern.
2. **Wiederverwendung und Anpassungsfähigkeit** – Komponenten müssen in neuen oder bestehenden Umgebungen ohne Funktions- oder Qualitätsverlust wiederverwendet werden können und Modularität, Rekonfiguration und Umnutzung bei sich ändernden räumlichen Anforderungen unterstützen.
3. **Wiederaufarbeitung und Demontierbarkeit** – Entwicklung von Systemen zur einfachen, zerstörungsfreien Trennung von Komponenten, die die Reparatur, den Austausch und die Wiederaufarbeitung von Produkten in neuen Konfigurationen oder für neue Verwendungszwecke ermöglichen.
4. **Rezyklieren** – Sicherstellung, dass Materialien am Ende ihrer Lebensdauer wieder in biologische oder technische Kreisläufe zurückgeführt werden können, wobei eine energetische Verwertung erst nach Ausschöpfung aller höherwertigen Strategien angestrebt wird.

Ansatz zur Konzeptentwicklung

Als Grundlage für den Entwurf des Home 2.0 Demonstrators, wurde eine Analyse nichttragender Trennwandsysteme durchgeführt, bei der verschiedene Wandsysteme über einfache Plattenkonstruktionen hinaus verglichen wurden. Die Erkenntnisse aus dieser Analyse führten zur Entwicklung einer feststehenden Trennwand, die anhand folgender Kriterien ausgewählt wurde:

- Kosteneffizienz
- Flexibilität bei der Anpassung an unterschiedliche Raumaufteilungen
- Herstellbarkeit innerhalb des Projektzeitrahmens

Die Kombination aus dem Rahmenwerk der Designprinzipien und der Markt-/Systemanalyse führte zur Entwicklung mehrerer Trennwandkonzepte auf Myzelbasis, die im Rahmen eines Co-Design Workshops des Projektteams bewertet wurden.

Evaluation existierende Trennwandsysteme

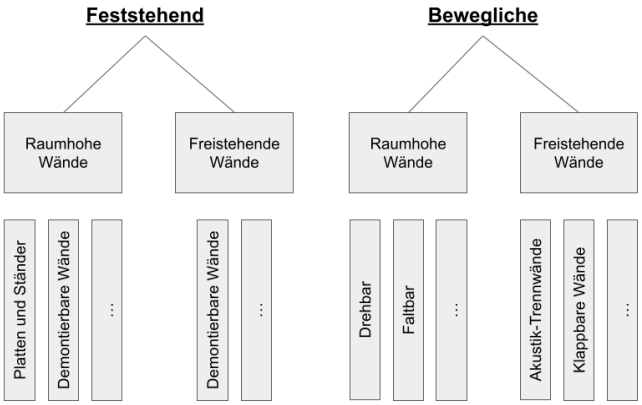
Die konzeptionell in diesem Arbeitspaket umfassten Möglichkeiten in Bezug auf die Bauteilgeometrie sollen eine Grundlage für das später im Projekt zu entwickelnde Bausystem schaffen. Dafür ist die Gestaltung der Verbindungen der Paneele untereinander entscheidend. Aus diesem Grund wurden an dieser Stelle verschiedene nicht-strukturelle Trennwandsysteme, die der Markt derzeit bietet, untersucht, kategorisiert und verglichen. Damit kann ein allgemeines Verständnis des Wandsystems über das Paneel selbst hinaus erlangt werden, das wiederum als Input für die Bauteilgeometrie verwendet werden kann.

Begründung für die Kategorisierung: Im innovativen Bereich des Prototyping von Myzelplatten ist das Design der Verbindungen der Bauteile untereinander (Verbindungsdesign) ein weiterer kritischer Aspekt des Designs. Die einzigartigen Eigenschaften des Myzels können die Verbindungsstrategien beeinflussen. So ermöglichen die natürlichen Bindungsfähigkeiten des Myzels eine organischere und potenziell nachhaltigere Form der Konstruktion, die bereits auf der Ebene der Bauteilgeometrie mitgedacht werden kann.

Verschiedene Verbindungstypen können auf verschiedene Anwendungsfälle zugeschnitten werden, wodurch sowohl die Funktionalität als auch die Umweltverträglichkeit der Entwürfe verbessert werden. Diese Symbiose zwischen Bauteilgeometrie, Verbindungsdesign, Herstellungsmöglichkeiten ist für die Weiterentwicklung einer umweltfreundlichen Architektur unerlässlich.

Daher werden in dieser Untersuchung verschiedene Wandsysteme zunächst nach den Verbindungsarten zwischen den Paneelen und dem Gebäude kategorisiert, d. h. fest oder beweglich; anschließend werden sie nach den Verbindungsarten in Bezug auf die Paneele unterteilt, d. h. faltbar, schwenkbar, usw. (Abbildung 82).

Wandsysteme und ihre Vor- und Nachteile



Quelle: KUL

Abbildung 82 Kategorisierung verschiedener Wandsysteme

In dieser Untersuchung von Trennwandsystemen werden die Produkte weiter nach Größe und Installationsmethode kategorisiert. Wände in voller Höhe sind oft fest mit der Gebäudestruktur verbunden und bieten robuste Stabilität und eine durchgehende Barriere. Freistehende Wände hingegen bieten Flexibilität und Mobilität, da sie nicht an der Struktur verankert sind.

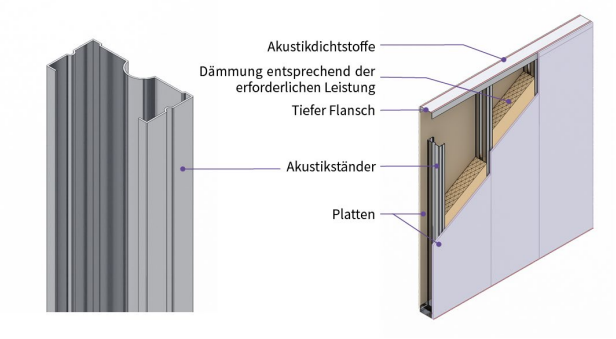
Die weitere Klassifizierung basiert wiederum auf den Verbindungsmechanismen, die bestimmen, wie diese Wände zusammengebaut werden, mit anderen Komponenten interagieren und je nach Bedarf neu konfiguriert oder demontiert werden können. Dieser systematische Ansatz zur Kategorisierung hilft dabei, den richtigen Wandtyp für bestimmte räumliche Anforderungen zu finden.

Feste Trennwände

Feste Trennwandsysteme bieten innerhalb der Wände reichlich Platz für Isolierung, Versorgungsleitungen und Kabel, was die Funktionalität des Raums erhöht (Abbildung 83). Die Stabilität dieser Systeme ist ein weiterer bedeutender Vorteil, der eine dauerhafte und robuste Trennwandlösung gewährleistet. Allerdings ist der

Installationsprozess zeitaufwändiger und kann zu Störungen führen, weshalb sich diese Wandsysteme eher für Projekte eignen, bei denen die Raumaufteilung von Dauer ist.

Volle Höhe: Trockenbauwände in voller Höhe, die in der Regel aus Metallständern und Gipspaneelen bestehen, bieten eine vielseitige Lösung für den modernen Baubedarf. Die Paneele können mit Nägeln oder mit einem speziellen Hakenmechanismus an den Metallkanälen befestigt werden, der die Paneele demontierbar macht (Abbildung 83).



Quelle: KUL

Abbildung 83 Darstellung von Trennwandsystemen, die innerhalb der Wände Platz für Isolierung, Versorgungsleitungen und Kabel bieten

- Freistehend: Freistehende Systeme verwenden Metallständer, um eine stabile, kastenähnliche Struktur zu schaffen, und sind eine effiziente Möglichkeit, den Raum zu unterteilen, ohne sich über die gesamte Höhe des Raumes zu erstrecken. Diese Konstruktion ist besonders nützlich in Räumen mit hohen Decken, da sie eine einfache Installation von Paneelen auf dem Metallrahmen für die gewünschte Unterteilung ermöglicht. Solche Systeme können auch mit Stahlseilen an der Dachkonstruktion verankert werden, um die Stabilität zu gewährleisten, ohne die Trennwände vertikal zu belasten.

Bewegliche Trennwände

Bewegliche Trennwände (auch: bewegliche Trennwandsysteme) bieten eine dynamische Lösung für das Raummanagement in verschiedenen Umgebungen.

- Volle Höhe: Sie sind so konzipiert, dass sie vielseitig einsetzbar sind und sich durch Mechanismen wie Schieben, Schwenken und Falten an verschiedene Grundrisse anpassen lassen. Ihre Installation ist in der Regel schneller als die von Trockenbauwänden, und sie haben den Vorteil, dass sie vorhandene Oberflächen nicht beschädigen, was sie ideal für temporäre Räume macht. Es ist jedoch wichtig zu bedenken, dass sie zwar Flexibilität und eine einfache Installation bieten, aber im Vergleich zu permanenten Wandlösungen höhere Kosten und weniger Stabilität mit sich bringen können.
- Freistehend: Freistehende Bürotrennwände bieten eine unkomplizierte und wirtschaftliche Lösung für die räumliche Unterteilung von Arbeitsbereichen. Diese Trennwände bestehen in der Regel aus mehreren Paneelen, die miteinander verbunden sind und manchmal an einer Wand verankert werden können, um die Stabilität zu erhöhen. Ihre Kosteneffizienz, Flexibilität und Mobilität machen sie zu einer beliebten Wahl, insbesondere wenn eine dauerhafte Konstruktion nicht möglich ist. Es ist jedoch zu beachten, dass sie zwar praktisch sind, aber im Vergleich zu dauerhafteren Konstruktionen nur eine begrenzte Stabilität bieten können.

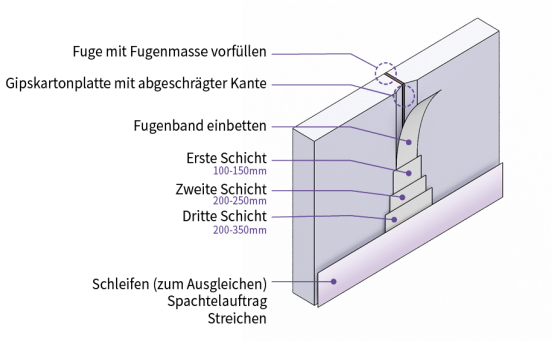
Komponenten, die in den Wandsystemen zur Verbesserung der Leistungen verwendet werden

Viele Hersteller auf dem Markt bieten eine breite Palette von Paneelierungsoptionen an, während die Auswahl an Rahmen im Vergleich dazu eher normal ist. Hier sind einige der Komponenten, die in den zuvor besprochenen Wandsystemen verwendet werden und die zur Verbesserung der Leistung beitragen.

- Strukturell: Strukturelle Komponenten sind integraler Bestandteil der Trennwandsysteme. Sie können so einfach sein wie zusammengenagelte Metallstifte oder so komplex wie ein ganzer Mechanismus. Einige

Hersteller verwenden unterschiedliche Materialien und lokale Geometrien, um die Leistung zu verbessern.

- Akustik: Akustische Komponenten sind auch in den zuvor besprochenen Trennwandsystemen zu finden. Hauptsächlich geht es um zwei Aspekte: Möglichkeiten zur Dämpfung von Trittschall durch die Geometrie der Ständer und Möglichkeiten zur Blockierung des Luftschalls durch Abdichtung des Luftspalts zwischen den Paneelen (Abbildung 84)



Quelle: KUL

Abbildung 84 Beispiele von akustischen Komponenten in Trennwandsystemen

- System: In einigen Fällen werden die Lösungen komplexer, um die Lücken und Unregelmäßigkeiten zu schließen. Bei Ständer- und Paneelwänden gibt es einen Umlenkkopf; bei beweglichen Wänden gibt es vertikale Guillotine- und Druckdichtungen für Decke und Boden sowie Teleskopplatten mit Gummidichtungen für die Seiten.

Was kann man aus dieser Untersuchung lernen?

Nicht-strukturelle Trennwandsysteme bieten vielseitige Lösungen für Büroumgebungen. Der Markt bietet eine Vielzahl von Produkten, von denen die Systeme an spezifische Designanforderungen angepasst werden können.

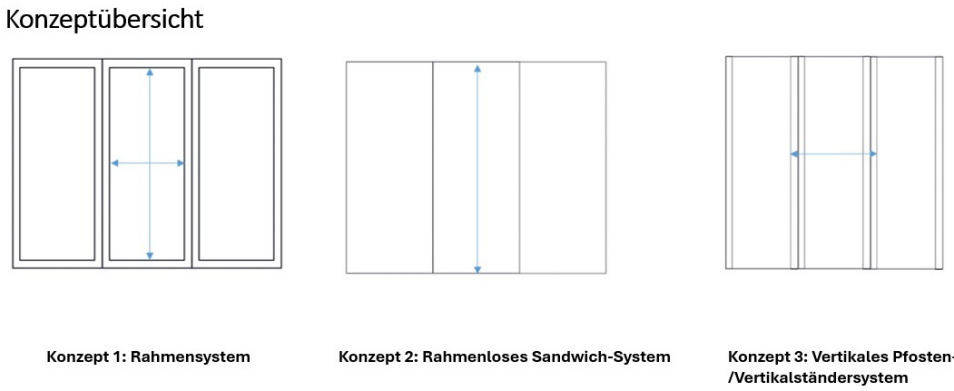
Eine Untersuchung bestehender Produkte kann Möglichkeiten für Innovationen beim Prototyping aufzeigen und bietet uns eine Grundlage für den Entwurf eines besser recycelbaren Prototyps, der möglicherweise zu Verbesserungen bei der Funktionalität, Ästhetik oder sogar Kosteneffizienz führt.

Die in früheren Sitzungen getroffene Entscheidung für eine nicht-strukturelle Trennwand im Prototyp spiegelt eine strategische Entscheidung wider, die auf der Kosteneffizienz, Flexibilität und Herstellungskapazität des Prototyps beruht. Die Untersuchung eröffnet eine wertvolle Diskussion über die Vielseitigkeit von Trennwandsystemen in Arbeitsräumen mit unterschiedlichen Bedürfnissen, die es uns ermöglichen wird, die Möglichkeit der Anpassung des Prototyps an andere Arten von Wandsystemen im Design zu erkunden.

Designprozess für das Trennwandsystem

Designkonzepte

Nach Anwendung des Rahmenwerks für Designprinzipien wurden drei Konzepte für Trennwandsysteme (Abbildung 85) entwickelt, um alternative konstruktive Ansätze für die Integration von Myzel-basierten Verbundwerkstoffen in ein modulares und zirkuläres Trennwandsystem für Innenräume zu testen. Die wesentlichen Unterschiede zwischen den drei Konzepten liegen in der Art der Unterkonstruktion und der verwendeten Montagemethode. Jede Option wurde hinsichtlich ihrer konstruktiven Integrität, ihres akustischen Potenzials, ihrer Montage-/Demontageeffizienz, ihrer optischen Wirkung und ihrer Gesamtumweltbilanz bewertet (siehe Tabelle 11 unten).



Quelle: KUL

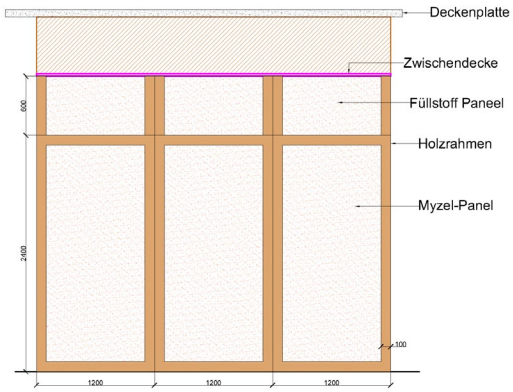
Abbildung 85 Drei vorgeschlagene Designkonzepte mit Darstellung der primären Richtung der Lastabtragung (blaue Pfeile)

Tabelle 11 Übersichtstabelle der Entwurfskonzepte

Konzept	Tragsystem	Stärken	Einschränkungen
1. Rahmen-system	Vierkantiger Holzrahmen, der eine Myzel-Verbundplatte mit Furniergitter trägt.	- Starker Kantenschutz und Ausrichtung. - Reduzierte Biegebeanspruchung bei Stößen durch vierseitige Abstützung. - Modular, vorgefertigt in Standardgrößen.	- Der sichtbare Rahmen unterbricht die nahtlose Oberfläche. - Verweist auf das frühere HOME-Paneeldesign und schränkt die Weiterentwicklung in HOME 2 ein.
2. Rahmenloses Sandwich-System	Myzelkern, der zwischen dünnen Holzfurnierplatten mit Furnierverstärkungs-gitter sandwichartig angeordnet ist.	- Rahmenlose, nahtlose Ästhetik mit sauberen Oberflächen. - Einfach zu pflegen und an unterschiedliche Höhen anpassbar. - Bietet Designflexibilität durch Furnieroberflächen.	- Geringere strukturelle Stabilität bei großen Spannweiten. - Die Furnierverklebung erfordert Genauigkeit und Qualitätskontrolle, um Delamination zu vermeiden.
3. Vertikales Pfosten-/ Ständer-system	Schmale Platten, die von vertikalen Holzpfosten getragen werden; Myzelfüllung, verstärkt mit horizontalen Furniergittern im Abstand von 300 mm.	- Schlanke, leichte Optik. - Modulare schmale Profile ermöglichen flexible Layouts. - Kann auf verschiedene Höhen zugeschnitten werden. - Pfosten können aus wiederverwertetem Holz hergestellt werden.	- Die geringe Breite (800 mm) erfordert bei großen Spannweiten zusätzliche Stützen. - Sichtbare vertikale Pfosten sind möglicherweise nicht für alle ästhetischen Ansprüche geeignet.

Quelle: KUL

Konzept 1: Rahmensystem



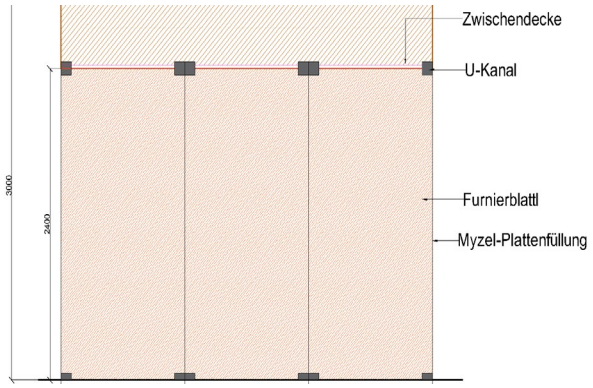
Quelle: KUL

Abbildung 86 Konzept 1 – Schematische Darstellung des Rahmensystems

Das Rahmensystemkonzept (Abbildung 86) besteht aus einer mit einem Furniergitter verstärkten Myzel-Verbundplatte, die an allen vier Kanten in einem umlaufenden Holzrahmen montiert ist. Der Hauptvorteil des umlaufenden Rahmens ist die Verringerung der Biegespannungen, beispielsweise bei Stoßbeanspruchungen, was die gesamte Haltbarkeit und Stabilität der Platte verbessert. Der Holzrahmen schützt außerdem die Plattenkanten bei der Handhabung und gewährleistet eine präzise Ausrichtung bei der Installation. Dieses Konzept bezieht sich jedoch weitgehend auf die im früheren HOME-Projekt entwickelte Trennwandplattenkonstruktion und entspricht daher nicht vollständig dem Ziel von HOME 2.0, das Systemdesign weiterzuentwickeln und zu innovieren.

Konzept 2: Rahmenloses Sandwich-System

Das rahmenlose Sandwichsystem (siehe Abbildung 87) umschließt die Myzel-Verbundplatte zwischen zwei dünnen Holzfurnierplatten, die jeweils mit einem gedruckten Furniergitter verstärkt sind. Dies ermöglicht eine durchgehende, rahmenlose Oberfläche und bietet gleichzeitig strukturelle Unterstützung. Das System wurde entwickelt, um die Ästhetik zu verbessern, glatte Oberflächen zu erzielen und verschiedene dekorative Furnieroptionen zu ermöglichen.



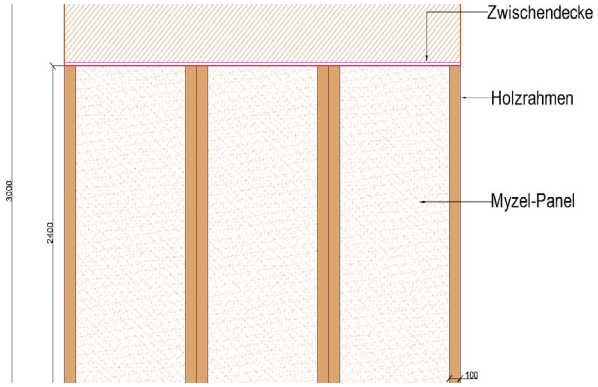
Quelle: KUL

Abbildung 87 Konzept 2 – Schematische Darstellung des rahmenlosen Sandwichsystems

Das rahmenlose Sandwichsystem besteht aus einem leichten, schallabsorbierenden Myzelverbundkern, der zwischen zwei ca. 1,0 mm dicken Holzfurnierplatten eingeschlossen ist, um die Zugfestigkeit zu erhöhen und eine glatte, fertige Oberfläche zu erzielen. Ein Furnierverstärkungsgitter ist in dem Aufbau integriert, wodurch die Steifigkeit und Haltbarkeit verbessert werden, ohne das Gewicht wesentlich zu erhöhen, während ein klares, rahmenloses Erscheinungsbild erhalten bleibt. Die Hypothese für diese Option ist, dass die Aktivierung des Sandwich-Effekts die Platte robust und stabiler macht, sodass sie ohne zusätzliche Unterstützung durch Rahmenelemente von oben bis unten gespannt werden kann. Die Umsetzung dieser Option würde einen zusätzlichen Arbeitsaufwand für die Entwicklung und Erprobung einer Sandwichplatte erfordern, was im Rahmen des HOME 2.0-Projekts nicht realisierbar war. Diese Option wurde daher verworfen.

Konzept 3: Vertikales Pfosten-/Vertikalständersystem

Dieses Konzept mit vertikalen Pfosten (siehe Abbildung 88) basiert auf einem System aus vertikalen Holzpfosten, die als primäre tragende Stützen dienen. Zwischen diesen Pfosten werden Myzel-Verbundplatten als Füllelemente installiert. Um die Steifigkeit zu erhöhen, werden die Platten mit horizontalen Furniergittern in regelmäßigen Abständen verstärkt, allerdings in geringerer Anzahl als bei einer vollständig gerahmten Lösung. Dieser Ansatz minimiert den Einsatz von Verstärkungsmaterialien und gewährleistet dennoch die erforderliche Stabilität der Trennwand. Das Ergebnis sind schlanke vertikale Elemente in Kombination mit einer verteilten Verstärkung, wodurch schmale Module entstehen, die eine beträchtliche Höhe erreichen und flexibel angeordnet werden können, um Räume in verschiedenen Konfigurationen zu unterteilen.



Quelle: KUL

Abbildung 88 Diagramm zu Konzept 3

Mehrlagiges Paneelsystem für akustische Anwendungen

Im Zusammenhang mit dem Trennwandsystem Home 2.0 bezeichnet der Begriff *„geschichteter Ansatz"* zwei sich ergänzende Strategien zur Kombination von Materialien, um maßgeschneiderte akustische und strukturelle Eigenschaften zu erzielen (Siehe auch Abschnitt zu AP 3.1 und AP 4.5).

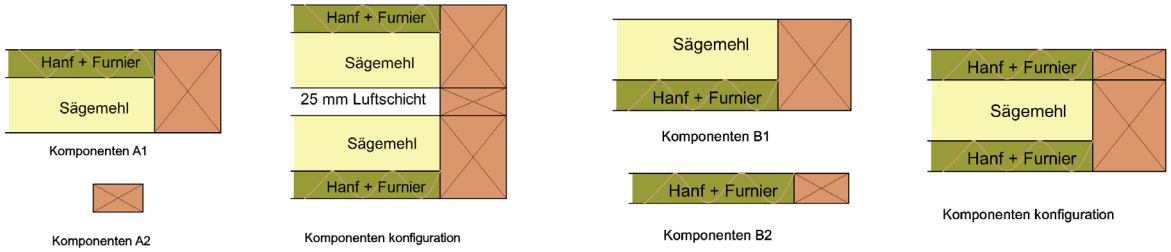
Zunächst bildet das Verbundpaneel das Kernelement des Systems. Diese Platte wird als eine Einheit hergestellt und besteht aus zwei Substraten auf Myzelbasis mit unterschiedlichen Eigenschaften: einer Hanfschicht mit integriertem Furniergitter zur Verbesserung der Schallabsorption und einer Sägemehlschicht ohne Furnier zur Maximierung von Masse, Festigkeit und Schalldämmung. Durch das Zusammenwachsen dieser Substrate bietet das Verbundpaneel eine Doppelfunktionalität: Eine Seite ist für die Schallabsorption optimiert, die andere für die Schalldämmung, während gleichzeitig die notwendige strukturelle Festigkeit gewährleistet wird, um als Wandbildner zu dienen.

Zweitens ermöglicht das System das Aufbringen zusätzlicher absorbierender Schichten auf das Verbundpaneel. So können beispielsweise Platten aus reinem Hanf (ohne Furniergitter) hinzugefügt werden, um die Absorption in offenen Büroumgebungen weiter zu erhöhen, während zusätzliche dichte Platten in Besprechungsräumen zur Verbesserung der Isolierung eingesetzt werden können. Diese Möglichkeit, Platten zu stapeln und neu zu konfigurieren, erweitert die Vielseitigkeit des Systems, sodass es an unterschiedliche räumliche Gegebenheiten und akustische Anforderungen angepasst werden kann und gleichzeitig die Prinzipien des zirkulären Designs in Bezug auf Wiederverwendbarkeit und Anpassungsfähigkeit unterstützt.

Zusammen verkörpern das Verbundpaneel und die konfigurierbaren zusätzlichen Absorberplatten den mehrschichtigen Ansatz, der strukturelle Stabilität, akustische Optimierung und modulare Konfiguration in einem Trennwandsystem vereint. Nach der Auswahl von Konzept 3 wurde das System weiterentwickelt, um die spezifischen akustischen Anforderungen in Büroumgebungen als Anwendungsfälle zu erfüllen.

Anwendungsfälle

Das System deckt zwei Hauptanwendungsbereiche ab, die in Abbildung 89 dargestellt sind: Anwendungsfall A ist für Großraumbüros, in denen Trennwände Lärm und Nachhall reduzieren, und Anwendungsfall B für Besprechungsräume konzipert, in denen Trennwände eine starke Schalldämmung für mehr Privatsphäre bieten.



Quelle: KUL

Abbildung 89 Komponenten und Konfigurationsdiagramm für Anwendungsfall A (Links), Komponenten und Konfigurationsdiagramm von Anwendungsfall B (Rechts)

Anwendungsfall A – Trennwand für Großraumbüros (Absorption)

In offenen Arbeitsbereichen ist die absorbierende Seite der Hybridplatte nach außen ausgerichtet, um den Geräuschpegel zu reduzieren und die Sprachverständlichkeit zu verbessern. Zusätzliche Hanfplatten aus einem einzigen Material ohne Furnier können hinzugefügt werden, um die Absorptionsfähigkeit der Trennwand zu erhöhen. Das Ziel ist hier nicht, den Schall vollständig zu blockieren, sondern den Nachhall zu reduzieren und eine angenehmere akustische Umgebung zu schaffen.

Anwendungsfall B – Trennwand für Besprechungsräume (Isolierung)

In geschlossenen Besprechungsräumen wird das dichtere Sägemehlsubstrat an der Außenseite als akustische Sperre verwendet, um die Schalldämmung zu maximieren und Geräuschübertragungen zwischen den Räumen zu verhindern. In diesem Szenario stehen Masse und Dichte im Vordergrund, um die Übertragung zu blockieren, während intern zusätzliche Absorptionsschichten hinzugefügt werden können, um den Nachhall im Besprechungsraum zu kontrollieren.

Die diesem Entwurf zugrunde liegenden akustischen Prinzipien sind:

- **Masse** – Eine größere Masse (z. B. eine Sägemehlschicht) verbessert die Schalldämmung, indem sie die Übertragung blockiert.
- **Porosität und faserige Struktur** – Offener, weniger dichte Materialien (z. B. Hanf) absorbieren Schall, indem sie Schallenergie durch innere Reibung in Wärme umwandeln.
- **Mehrwegstreuung** – Furniergitter erzeugen komplexe Schallwege und erhöhen so die Absorption in porösen Materialien.
- **Verbund** – Die Kombination von Isolations- und Absorptionsschichten in einem einzigen Modul sorgt für ein ausgewogenes Verhältnis zwischen der Blockierung von Außengeräuschen und der Reduzierung des Nachhalls im Innenraum.
- **Konfigurierbare Oberflächenbehandlungen** – Durch Hinzufügen oder Entfernen von Absorptionsschichten lässt sich die akustische Leistung an bestimmte Umgebungen anpassen.

Dieses mehrschichtige, konfigurierbare System verbessert nicht nur die akustische Leistung, sondern entspricht auch der Kreislaufwirtschaftsstrategie, da Schichten je nach den sich ändernden räumlichen Anforderungen hinzugefügt, ausgetauscht oder wiederverwendet werden können.

Entwicklung des Verbindungsdesigns für den Demonstrator

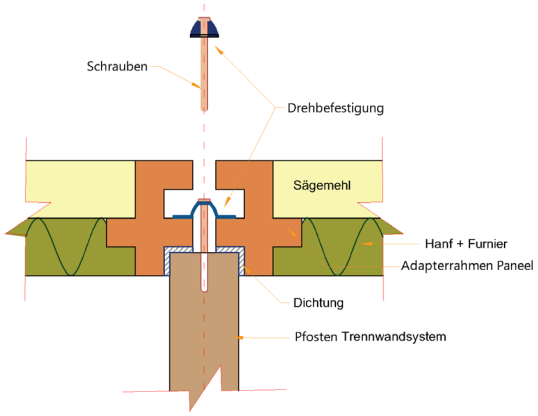
Übersicht über die untersuchten Verbindungsoptionen

Im Entwicklungsprozess wurden mehrere Alternativen für die Verbindungskonstruktion in Betracht gezogen, wobei drei Optionen im Detail untersucht wurden. Jede Option erfüllte unterschiedliche strukturelle und

funktionale Anforderungen, die von Stabilität und Lastübertragung bis hin zu ästhetischer Integration und einfacher Montage reichten. Auf der Grundlage dieser Bewertung wurde eine endgültige Hybridverbindung ausgewählt und in die Konstruktion des Demonstrators implementiert.

Option 1 – Drehbefestigung

Bei dieser Option wird der Hauptpfosten mit einem Kipphebelmechanismus an der Platte befestigt (siehe Abbildung 90). Der Kipphebel wird in einen 20 mm breiten Spalt entlang des Plattenrahmens eingeführt und mit einem Schraubendreher in Position gedreht, sodass er parallel zur Platte einrastet. Anschließend wird eine Schraube zur Sicherung eingesetzt, wodurch eine durchgehende Verbindung entlang der Pfostenlänge entsteht. Dieses System gewährleistet eine starke strukturelle Verbindung zwischen Pfosten und Paneel, verteilt die Lasten gleichmäßig und ermöglicht die Demontage durch Lösen der Drehbefestigung. Der Hauptvorteil liegt in einer robusten und dennoch reversiblen Verbindung, die sich für wiederholte Montage und Neukonfiguration eignet.

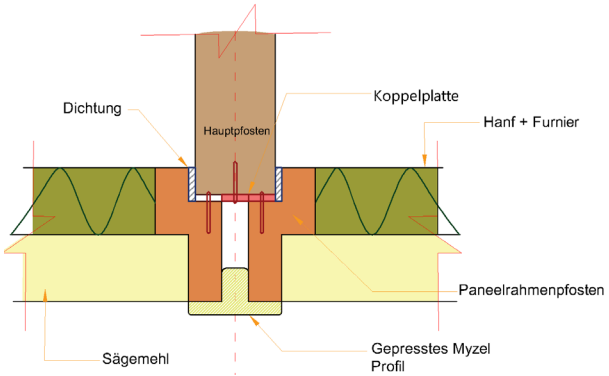


Quelle: KUL

Abbildung 90 Detail mit Drehbefestigung

Option 2 – Koppelplatten Verbindung

Bei dieser Option werden Metallplatten verwendet, um die Verbindung zwischen benachbarten Paneelen herzustellen (Abbildung 91). Jede Platte wird zunächst einzeln mit Schrauben und Bolzen an den Pfosten des Paneelrahmens auf beiden Seiten befestigt. Die beiden vorbereiteten Paneele werden dann miteinander verbunden, indem die Platten durch einen schmalen Spalt zwischen den Paneelen mit dem mittleren Pfosten mit Schrauben fixiert werden. Dieser Vorgang wird in regelmäßigen Abständen entlang der Länge des Systems wiederholt, um eine durchgehende und sichere Verbindung zu gewährleisten. Die Plattenbefestigungsverbindung bietet eine zuverlässige strukturelle Verbindung bei gleichzeitiger Reversibilität, sodass die Paneele im Sinne der Kreislaufwirtschaft wieder abgenommen und wiederverwendet werden können.

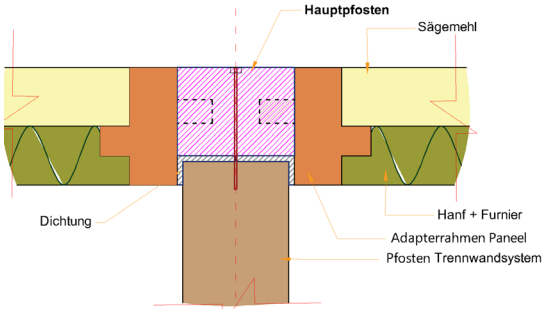


Quelle: KUL

Abbildung 91 Schematische Darstellung der Koppelplattenbefestigung

Option 3 – Verriegelungsverbinder

Diese Option sieht eine Verriegelungsverbindung vor, bei der die Verbindung der Paneele durch die Integration eines Pfostens mit einem Adapterrahmen erreicht wird (Abbildung 92). Der Adapterrahmen wird mit einer durch beide Elemente geführten Schraube mechanisch am Tragpfosten befestigt; die Schraube wird durch ein Füllstück verdeckt, um die ästhetische Kontinuität des Rahmens sicherzustellen. Der Adapterrahmen verfügt über präzise geschnittene Schlitze, in die Dübel aus den Pfosten des Paneelrahmens eingreifen, sodass die Paneele wie ein Puzzle ineinander greifen. Dieses System bietet eine robuste und reversible Verbindung, die Lasten effektiv verteilt und gleichzeitig die für das zirkuläre Design erforderliche Modularität und Wiederverwendbarkeit gewährleistet.

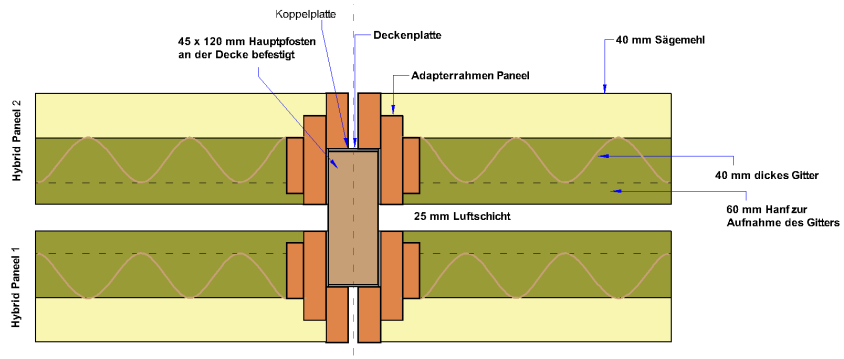


Quelle: KUL

Abbildung 92 Schematische Darstellung der Verriegelungsverbindung

Ausgewählte Kombination (Kombination aus Option 1 und Option 2)

Nach einer gründlichen Bewertung der Verbindungsoptionen wurde für den -Demonstrator eine Hybridstrategie gewählt, die sowohl die Drehverbindung (Option 1) als auch die Koppelplattenbefestigung (Option 2) integriert. Der Drehverschluss besteht aus einem in den Paneelrahmen eingeschraubten Knebel, der eine sichere und robuste strukturelle Verbindung gewährleistet. Diese Methode verteilt die mechanischen Belastungen effektiv und gewährleistet die Stabilität und Langlebigkeit der Trennwand unter verschiedenen Bedingungen. Ergänzend dazu werden Metallplatten an den angrenzenden Paneelpfosten befestigt, die dann durch einen schmalen Spalt miteinander verbunden und mit Schrauben gesichert werden. Diese Befestigung trägt zu einer nahtlosen Paneelschnittstelle bei, verbessert die Luftdichtheit und erleichtert die modulare Erweiterung, da mehrere Paneele einfach ausgerichtet und verbunden werden können. Durch die Kombination dieser beiden Verbindungssysteme erreicht die Konstruktion ein optimales Gleichgewicht zwischen konstruktiver Robustheit und praktischen Aspekten wie Montagezeit für Wartungs- oder Umbauzwecke und Kreislauffähigkeit. Diese hybride Verbindung ermöglicht wiederholtes Auf- und Abbauen ohne Beschädigung der Komponenten und fördert so die Wiederverwendung und Langlebigkeit der Materialien. Die endgültige Konstruktion der Verbindung, die in Abbildung 93 dargestellt ist, wird im Kapitel zum Demonstrator näher erläutert.



Quelle: KUL

Abbildung 93 Vergrößerte Querschnittszeichnung der Verbindung zwischen zwei Paneelen

Zusammenfassung

Das Verbindungs- und Plattensystem für den Demonstrator wurde durch iteratives Design entwickelt, das sich an den Prinzipien des zirkulären Designs orientiert und auf die besonderen akustischen Anforderungen in Büroumgebungen für die Anwendungsfälle A und B zugeschnitten ist. Es wurden drei Konzeptsysteme untersucht, wobei Konzept 3 – Vertikales Pfosten-/Vertikalständersystem – aufgrund seiner Anpassungsfähigkeit, strukturellen Stabilität und Kompatibilität mit einem mehrschichtigen Plattenansatz ausgewählt wurde. Die endgültige Lösung umfasst ein hybride Myzelpaneel, die eine dichte Sägemehlschicht zur Isolierung und eine poröse Hanfschicht mit Furniergitter zur Absorption kombiniert. Diese Schichtstrategie ermöglicht die Anpassung der akustischen Leistung an verschiedene Szenarien, von der Geräuschkontrolle in Großraumbüros bis hin zu hochisolierten Besprechungsräumen, und unterstützt gleichzeitig die Demontage, Wiederverwendung und das Recycling der Materialien.

Schlüsselaspekte des entwickelten Konzepts:

- Auswahl von Konzept 3 aufgrund seiner modularen schmalen Paneele, strukturellen Integrität und optischen Leichtigkeit.
- Entwicklung einer hybriden Hanf-Sägemehlplatte mit unterschiedlichen Isolations- und Absorptionsflächen.
- Integration eines Furniergitters nur in der Hanfschicht, um die Absorption zu verbessern, ohne die Isolierung zu beeinträchtigen.
- Verwendung eines mehrschichtigen Konfigurationssystems, um eine maßgeschneiderte akustische Leistung für offene und geschlossene Büroräume zu ermöglichen.
- Verwendung der Hybridverbindungsstrategie Option 1 + Option 2 für Stabilität und nahtlose Paneelausrichtung.
- Priorisierung der Kreislaufwirtschaft durch Materialauswahl, modulare Konstruktion und einfache Demontage für Wiederverwendung und Recycling.

AP 6.2 Stakeholder-Analyse und Interviews für Upscaling

Ein zentraler Schwerpunkt dieser Forschungsinitiative war die Vorhersage, Prüfung und Charakterisierung der materiellen und technischen Eigenschaften des untersuchten Herstellungsverfahrens für mit Holzfurnier verstärkte Myzel-Biokomposite. Eine wirklich umfassende Untersuchung erfordert jedoch, dass diese technischen Überlegungen durch eine nach außen gerichtete Analyse der Marktbedingungen ergänzt werden, unter denen dieses Herstellungsverfahren in Zukunft umgesetzt werden könnte. Ähnlich wie bei der Optimierung der LCA-Leistung der Prototyp-Demonstratoren besteht auch hier die Möglichkeit, die aktuellen Marktbedingungen für Biokompositprodukte zu bewerten, sodass auch Möglichkeiten zur Optimierung der Wertschöpfungskette evaluiert werden können.

Eine detailliertere Behandlung der wirtschaftlichen Überlegungen findet sich in späteren Kapiteln dieses Berichts, insbesondere im Kapitel über skalierbare Wertschöpfungsketten und Geschäftsmodelle (siehe Kapitel 6.3). Vor der Entwicklung dieser Wertschöpfungsketten- und Geschäftsmodelle wurde eine vorläufige Datenerhebung (als Stakeholder-Engagement-Prozess bezeichnet) durchgeführt, um die aktuellen Marktbedingungen und Geschäftsmodelle zu verstehen, die derzeit von Branchenakteuren mit einer ausreichend relevanten Marktposition verwendet werden. In diesem Zusammenhang wurden zwei Kategorien von Branchenakteuren identifiziert, von denen diese vorläufigen Daten erhoben werden konnten:

- Kategorie 1: Status Quo der Branchenakteure

Unternehmen und Organisationen, die derzeit entweder mit Myzel basierte Biokompositprodukte herstellen, die den in der vorliegenden Studie untersuchten holzfurnierverstärkten Platten ähneln, oder die Komponenten für diese holzfurnierverstärkten Myzelplatten herstellen (z. B. Furnierrollen).

- Kategorie 2: Zukünftige Stakeholder in der vorgeschlagenen Wertschöpfungskette

Unternehmen und Organisationen, die in Zukunft potenziell Nutzer oder Dienstleister innerhalb der vorgeschlagenen Wertschöpfungskette und des Geschäftsmodells der in der vorliegenden Studie untersuchten mit Holzfurnier verstärkten Myzel-Biokompositpaneelen werden könnten (z. B. Architekten und Endnutzer).

Diese beiden Kategorien von Branchenakteuren haben naturgemäß unterschiedliche Perspektiven auf die vorliegende Forschungsinitiative und können unterschiedliche Arten von Informationen mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad liefern. Die Akteure der Kategorie 1 sind bereits an industriellen Prozessen zur Herstellung und zum Verkauf von Biokompositprodukten aus Myzel (oder verwandten Produkten auf dem Baumarkt) beteiligt. Diese Akteure verfügen über praktische Erfahrungen mit konkreten Herausforderungen und Chancen und können detaillierte Informationen über die Wirksamkeit ihrer eigenen Geschäftsmodelle liefern. Im Vergleich dazu verfügen die Akteure der Kategorie 2 nicht unbedingt über praktische Erfahrungen mit dem Einkauf, der Konstruktion, der Herstellung oder der Verwendung von Biokompositmaterialien auf Myzelbasis und können daher nur abstraktes oder allgemeines Feedback zu potenziellen Anwendungen, möglichen Wertversprechen und/oder wahrgenommenen Risiken im Zusammenhang mit diesen Produkten geben.

Zunächst wurde ein allgemeiner Rahmen für die Datenerhebung festgelegt, um eine sinnvolle Entwicklung von Themen und Fragen zu ermöglichen, die für die vorliegende Forschung von allgemeiner Relevanz und für die Entwicklung von Wertschöpfungskettenmodellen nützlich sind. Zu diesem Zweck nutzte das Forschungsteam die Methodik des Value Proposition Canvas (Zitat), um die Schlüsselkomponenten des Wertversprechens eines Biokompositprodukts unter verschiedenen Anwendungsfällen zu identifizieren. Die Schlüsselelemente des Wertversprechens für einen verallgemeinerten Biokomposit-Produkttyp (der sowohl den Gegenstand der vorliegenden Forschung als auch die anderen von den „Status-quo"-Akteuren hergestellten Produkte umfasst) waren:

1. Nachhaltigkeitsleistung des Produkts selbst (einschließlich Einsatzmaterialien, CO2-Bilanz der Produktion, Abfallmanagement und Wiederverwendbarkeit/Kreislaufwirtschaft),
2. Technische Leistung in architektonischen Anwendungsfällen (Schalldämmung, strukturelle Stabilität, ästhetische Qualität, Gebrauchstauglichkeit, Brandverhalten und damit verbundene Eigenschaften),
3. Innovation als Teil der Herstellungstechnologie und -prozesse für Biokomposite,
4. Kosteneffizienz des Produkts.

Die Identifizierung dieser allgemeinen Komponenten des übergreifenden Wertversprechens schuf einen Rahmen für das Verständnis der Gemeinsamkeiten zwischen den Akteuren der Branche mit unterschiedlichen Herstellungsprozessen und Produkttypen. Außerdem ermöglichte dies einen gemeinsamen Rahmen zwischen den Akteuren der Kategorie 1 und der Kategorie 2, da Fragen, die denselben Aspekt des allgemeinen Wertversprechens betrafen, je nach Bedarf so umformuliert werden konnten, dass sie für einen erfahrenen Hersteller (Kategorie 1) oder einen zukünftigen Verbraucher (Kategorie 2) relevant waren.

Unter jeder der allgemeinen Komponenten des Wertversprechens gibt es viele Unterthemen, und nicht alle Unterthemen sind für alle Akteure relevant. Ein erfahrener Hersteller verfügt beispielsweise über ein detailliertes Verständnis der „Nachhaltigkeitsleistung" seines Produkts, das auf der Zertifizierung und Prüfung von Rohstoffen, Berichtsprozessen, Datenqualität und Logistikketten basiert. Ein interessierter Verbraucher hingegen versteht die Nachhaltigkeitsleistung nur im Hinblick auf die Endergebnisse dieser Zertifizierungsprozesse (z. B. ob das Produkt die Zertifizierungsstufen „Gold" oder „Silber" erreicht) und nutzt

diese Daten im breiteren Kontext seiner Projektziele, Budgets und der wahrgenommenen Qualität seines Bauprojekts.

Die spezifische Methodik zur Datenerhebung im Rahmen des Stakeholder-Engagement-Prozesses wurde an den erwarteten Umfang, die Qualität und die Art der Daten jeder Stakeholder-Kategorie angepasst.

Die Stakeholder der Kategorie 1 wurden zu einstündigen Interviews per Videokonferenz eingeladen, um eine detailliertere Diskussion ihrer aktuellen Geschäfts- und Fertigungsprozesse unter Berücksichtigung des vom Forschungsteam festgelegten Wertversprechungsrahmens zu ermöglichen. Alle Interviews waren um die vier Komponenten des Wertversprechungsrahmens (Nachhaltigkeit, technische Leistung, Innovation und Kosten) herum strukturiert und bestanden stets aus Fragen, die von der Input-/Rohstoffseite ihres Produktionsprozesses bis zum Output und Verkauf ihrer Fertigprodukte reichten. Insgesamt wurden fünf Unternehmen auf diese Weise befragt, darunter ein Hersteller von Furnierstreifen, ein Hersteller von Akustikplatten aus Glaswolle, der derzeit versucht, in den Markt für Biokomposite einzusteigen, sowie drei Hersteller von Produkten auf Myzelbasis (mit Sitz in den Niederlanden, Deutschland und Italien).

Die Stakeholder der Kategorie 2 wurden hingegen zur Teilnahme an einer Online-Umfrage mit sieben Fragen eingeladen. Insgesamt nahmen acht Unternehmen an der Online-Umfrage teil, darunter Bauplanungsbüros, Architekten und Endverbraucher. Die Fragen der Umfrage lauteten:

1. Verfügt Ihr Unternehmen bereits über einen Prozess, um sich über neue, innovative und alternative Materialien wie Myzel zu informieren?
2. Wie integriert Ihr Unternehmen derzeit neue, nachhaltige alternative Materialien wie Myzel in seine Arbeit?
3. Welcher Aufwand wäre erforderlich, damit Ihr Unternehmen mit Myzel-Architekturprodukten arbeiten kann?
4. Welche Informationen und Materialien würde Ihr Unternehmen benötigen, um mit Myzel-Architekturprodukten zu arbeiten?
5. Würde die Verwendung von Myzel-Architekturprodukten Ihrem Unternehmen neue Partnerschaften oder Geschäftsmöglichkeiten eröffnen?
6. Sehen Sie einen potenziellen Mehrwert in der Verwendung von Architekturprodukten auf Myzelbasis?
7. Was halten Sie von Myzel an sich? Halten Sie es persönlich für ein geeignetes Material für die Architektur?

Ergebnisse der Interviews (Stakeholder der Kategorie 1)

Die Ergebnisse der Interviews mit den Stakeholdern der Kategorie 1 lieferten eine Reihe interessanter Datenpunkte. Die in jedem Interview gesammelten Daten waren informativ und aussagekräftig. Im Anschluss an die Interviews wurde eine vergleichende Analyse der Interviewantworten durchgeführt, um die Unterschiede zwischen den Antworten der Stakeholder in Bezug auf die Geschäftsstrategien und die einzigartigen Ansätze für den Umgang mit dem übergeordneten Wertversprechen von Biokompositprodukten zu verstehen.

Diese vergleichende Analyse konzentrierte sich darauf, die Themen Nachhaltigkeit, technische Leistung, Innovation und Kosteneffizienz in den Antworten der einzelnen Stakeholder nachzuverfolgen und Gemeinsamkeiten und Unterschiede in ihrem Umgang mit diesen Themen zu identifizieren. Einige der wichtigsten Herausforderungen, die von mehreren Stakeholdern genannt wurden, waren die folgenden:

- Lokale Beschaffung hochwertiger Rohstoffe,
- Inkongruente oder nicht standardisierte Materialzertifizierungsprozesse,
- Verwaltung von geistigem Eigentum,

- Verfolgung von Produkten und Materialien im Hinblick auf Kreislaufwirtschaft/Wiederverwendung,
- Identifizierung und Pflege von Anwendungsfällen und Verbrauchern in nachgelagerten Bereichen.

Keiner der befragten Stakeholder gab an, dass spezifische Probleme mit Forschung, Wissensentwicklung, Ausrüstung, Herstellungsprozessen oder Facility Management wesentliche Hindernisse für ihre derzeitigen Geschäftsabläufe darstellen. Der zentrale Teil ihres Herstellungsprozesses, nämlich der Besitz und Betrieb ihrer Ausrüstung und Anlagen, stellte für keinen der Stakeholder eine wesentliche Herausforderung dar. Die wichtigsten Herausforderungen betrafen in erster Linie Partnerschaften, sowohl vorgelagert (für die Beschaffung von Materialien) als auch nachgelagert (für die Bereitstellung von Produkten und Dienstleistungen).

Einer der befragten Stakeholder war ein Hersteller von Architekturprodukten auf Myzelbasis mit Sitz in Italien. Dieser Stakeholder berichtete, dass Rohstoffe für Hanfsubstrate zwar in seiner eigenen Region angebaut werden, die lokalen Betriebe jedoch keine ausreichend hohen Standards für die Hanfqualität haben, um diesen Stakeholder die Verwendung ihrer Materialien zu ermöglichen. Diese mangelnde Standardisierung der Qualität schloss diese lokalen Lieferanten von ihrem Produktionsprozess aus. Dieser Stakeholder war gezwungen, seine Hanf-Substratmaterialien von Lieferanten in Frankreich zu beziehen, die das für seine Herstellungsprozesse erforderliche gleichbleibende Qualitätsniveau garantieren konnten, aber die geografische Entfernung erhöhte die Produktionskosten und verringerte die allgemeine Nachhaltigkeit des Herstellungsprozesses. Dieser Stakeholder vertrat die Meinung, dass es Aufgabe der Regierungen sein sollte, eine angemessene Standardisierung der Rohstoffqualität durchzusetzen, um die weitere Entwicklung des Biokompositmarktes zu unterstützen.

Zu diesem speziellen Thema herrschte unter den befragten Interessengruppen keine einheitliche Meinung. Ein anderer Stakeholder gab an, dass er ebenfalls Rohhanf von einem Lieferanten in Frankreich bezog, was praktisch sei, da sich seine Produktionsstätte in den Niederlanden befinde. Auf die Frage nach dem Potenzial für eine weltweite Ausweitung antwortete er jedoch, dass weltweit einzigartige lokale Substrate verfügbar seien und es lediglich notwendig sei, angemessene Untersuchungen zu lokalen biologischen Materialien (wie Bambus und anderen Faserpflanzen) durchzuführen, um das beste Substrat für die Region zu ermitteln, in der die neue Produktionsstätte angesiedelt sein werde.

Ein dritter Stakeholder, ein etablierter deutscher Hersteller von schallabsorbierenden Platten aus Glaswolle, der derzeit versucht, seinen Herstellungsprozess auf biobasierte Materialien auszuweiten, hatte eine weitere Perspektive auf die Beschaffung hochwertiger Rohstoffe. Bis vor kurzem wurden in seinen Produktionsprozessen keine biobasierten Materialien oder Biokomposite verwendet. Um in diesen Marktbereich zu expandieren, war es für ihn notwendig, Partnerschaften mit anderen Unternehmen einzugehen (und in einigen Fällen diese zu kaufen), die bereits über etablierte Herstellungsverfahren für biobasierte Materialien verfügen. Derzeit konzentriert er sich auf die Erweiterung seines Angebots an Schallabsorbern aus Holzwolle und Holzfasern. Die Herausforderung besteht jedoch darin, dass diese neuen Partnerunternehmen nicht die gleichen Qualitätskontroll- oder Datenmanagementprozesse implementiert haben und nicht die gleichen Nachhaltigkeitszertifizierungsprotokolle befolgen. Die effektive Integration zweier etablierter Unternehmen ist ein anspruchsvoller Prozess, der umfangreiche Verhandlungen zwischen Verfahrensunterschieden und strategischen Perspektiven erfordert. Dies stellt in der Regel ein Hindernis für diesen Stakeholder dar, der bei der weiteren Expansion in den Markt für biobasierte Materialien vorsichtig ist.

Dieses Beispiel, bei dem drei Stakeholder unterschiedliche Perspektiven auf eine ähnliche Herausforderung bei der Beschaffung hochwertiger Rohstoffe hatten, war Teil eines größeren Trends, der in der vergleichenden Analyse der Interviews festgestellt wurde. Dieser Unterschied hat viel mehr mit ihrer Geschäftsstrategie für die Einführung von Biokompositprodukten auf dem Baumarkt zu tun und weniger mit den Rohstoffen selbst. Durch die vergleichende Analyse der Antworten der Stakeholder konnte das Arup-Team drei strategische Geschäftsansätze identifizieren, die diesen drei Antworten zugrunde liegen:

1. Der erste Stakeholder (Hersteller von Myzelprodukten in Italien) entschied sich dafür, die gesamte Produktionskette zu übernehmen, vom Eingang der Rohstoffe bis zum Verkauf der fertigen

Architekturprodukte. Dies zwang ihn dazu, die höchsten internen Qualitätsstandards anzuwenden, was seine Möglichkeiten zur Zusammenarbeit mit Materiallieferanten einschränkte. Seine Skalierungsstrategie sah dann vor, bestimmte Aspekte dieser Produktionskette an vertrauenswürdige Partner auszulagern, wenn er davon überzeugt war, dass deren Qualitätsstandards seinen Anforderungen entsprachen. Dies hat den Vorteil, dass seine Qualitätsstandards intern stets eingehalten werden, allerdings hat er Schwierigkeiten, geeignete Partner zu finden.

2. Der zweite Stakeholder (Hersteller von Myzelprodukten in den Niederlanden) entschied sich stattdessen dafür, sich auf einen kleineren Bereich der Fertigung zu konzentrieren, nämlich die Herstellung von Myzelmaterialien, die andere Unternehmen dann zur Herstellung von Fertigprodukten verwenden können. Dieses Unternehmen stellt Myzelplatten her, die andere Unternehmen zur Herstellung von Leder auf Myzelbasis, Akustikplatten und anderen verwandten Produkten verwenden können. Es übernimmt nicht die Verantwortung für die gesamte Produktionskette bis zum Endprodukt, sondern besetzt lediglich einen kleineren Teil einer größeren Wertschöpfungskette. Dies hat den Vorteil, dass seine Qualitätsstandards nur einen kleineren Produktionsbereich betreffen und es weniger Schwierigkeiten hat, Partner auf der Input- und Output-Seite seiner Produktionsaktivitäten zu finden.

3. Der dritte Stakeholder (Glaswolleplattenhersteller in Deutschland) entschied sich dafür, seine bestehende Produktpalette durch den Kauf anderer bestehender Unternehmen auf den Biokompositmarkt auszuweiten. Dies hat zu Herausforderungen in Bezug auf uneinheitliche Berichterstattung, Qualitätssicherung und Qualitätsbewertung geführt. Dies hat weniger mit der Erfüllung ihrer internen Qualitätsstandards zu tun, sondern eher mit der Inkongruenz zwischen den etablierten internen Qualitätsstandards der beiden Unternehmen, die sich zu einer Partnerschaft zusammengeschlossen haben.

Die Frage des Datenmanagements über Partnerschaften hinweg war auch im Zusammenhang mit der Kreislaufwirtschaft von Produkten relevant. In allen Fällen gaben die befragten Interessengruppen an, dass ihre eigenen internen Rest- oder Abfallstoffe leicht wieder in ihren eigenen Produktionsprozess integriert werden können. Diese Kreislaufwirtschaft im kleinen Kreis ist innerhalb einer Fertigungseinheit einfach zu erreichen. Die Wiederverwendung von Produkten und Materialien, die bereits von Dritten verwendet wurden, wird jedoch schwieriger. Es ist notwendig, die genauen Inhaltsstoffe jedes Produkts zu kennen, das zur Wiederverwendung oder Modifizierung gesammelt wird. Daten über Datum, Uhrzeit, Methode und Rohstoffe, die zur Herstellung eines bestimmten Produkts verwendet wurden, müssen zum Zeitpunkt der Produktion erfasst, einheitlich nachverfolgt und abrufbar sein, wenn das Produkt nach seiner Verwendung gesammelt wird. Wenn mehrere Partnerunternehmen an einer Produktionskette beteiligt sind, kann dies zu einem aufwändigen Prozess werden, der die Kosten für das Kreislaufdienstleistungsangebot erhöht.

Ergebnisse der Online-Umfrage (Stakeholder der Kategorie 2)

Der Prozess der Einbindung von Stakeholdern der Kategorie 2 umfasste die Verteilung einer kurzen Online-Umfrage, auf die sie Textantworten geben konnten. Die Analyse konzentrierte sich auf den Vergleich der Antworten auf einzelne Fragen. Die Ergebnisse dieser Analyse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. 37,5 % der Befragten verfügen über einen formellen Prozess zur Untersuchung innovativer Materialien wie Myzel, um zu verstehen, wie sie diese in ihrer bestehenden Arbeit besser nutzen können. Von den Befragten, die über einen Forschungs- und Innovationsprozess verfügen, beschrieben 100 % einen internen Prozess und keine externen Forschungspartnerschaften.

2. 25 % der Befragten haben bereits Biokompositprodukte auf Myzelbasis in ihrer tatsächlichen Arbeit verwendet. Die übrigen Befragten gaben an, dass sie sich gerne über die Entwicklungen in diesem Bereich informieren, aber gezwungen sind, mit „marktreifen“ oder „markterprobten“ Baumaterialien und Architekturprodukten zu arbeiten. Die mangelnde „Marktreife“ wurde als Grund dafür genannt, warum sie nicht mit Biokompositen auf Myzelbasis arbeiten.

3. Die Befragten, die derzeit nicht mit Biokompositprodukten auf Myzelbasis arbeiten, nannten die folgenden konkreten Hindernisse für deren Verwendung:

- Schwierigkeiten, Kunden von der Verwendung dieser Materialien zu überzeugen,
- Unklarheiten hinsichtlich ihrer Kosten und Produktionsdauer/Lieferfristen,
- Fehlende klare Richtlinien oder Normen für ihre Installation und Wartung,
- Fehlende festgelegte Regulierungskriterien für diese Produkte,
- Fehlende klare Dokumentation der technischen Leistungsfähigkeit in rechtlich relevanten Bereichen wie dem Brandschutz.

4. Alle Befragten gaben an, dass sie technisches Wissen über diese Produkte benötigen würden, um sie nutzen zu können. Mehrere Befragte erwähnten technische Leistungsmerkmale, Labortests sowie Preisdaten.

5. Alle Befragten gaben an, dass die Verwendung von Produkten auf Myzelbasis in ihrer Arbeit ihnen die Möglichkeit bieten würde, neue Partnerschaften und Geschäftsmöglichkeiten zu erschließen. Ein Befragter sagte, dass ein wesentliches Hindernis für dieses Potenzial die Herausforderung der Wahrnehmung sei, nämlich dass Myzel aufgrund seiner Ähnlichkeit mit Schimmel negativ wahrgenommen wird und die Menschen es instinktiv meiden.

6. Fast alle Befragten gaben an, dass sie einen Mehrwert in der Verwendung von Produkten auf Myzelbasis für die Architektur sehen. Nur ein Befragter gab an, dass er nicht über ausreichende Kenntnisse über diese Produkte verfügt, um eine klare Bewertung oder Aussage treffen zu können. Mehrere Befragte gaben detaillierte Antworten, aus denen hervorgeht, dass der potenzielle Mehrwert von Myzelprodukten in wirtschaftlicher Hinsicht ausgedrückt werden muss und dass ein klarer Vergleich mit den „Status-quo"-Produkten, die sie ersetzen, erforderlich ist, damit dieser Mehrwert realisiert werden kann.

7. Alle Befragten gaben an, dass sie Myzel selbst positiv wahrnehmen und es für architektonische Anwendungen als geeignet empfinden.

AP 6.3 Konzeptionelle Entwicklung einer Wertschöpfungskette für Halbzeuge und Komponenten auf Basis einer automatisierten Produktion

Ziel dieses Kapitels ist es, eine skalierbare Wertschöpfungskette auf der Grundlage der Prinzipien der Kreislaufwirtschaft für die Herstellung eines CO_2-neutralen, modularen, biobasierten Bürotrennwandsystems aus Myzel-Verbundwerkstoffen (mycelium-based composites (MBC)) zu skizzieren, wie es im Rahmen des Projekts HOME 2.0 entwickelt wurde. Dies ergänzt die Herstellung des Demonstrators, der in einer Laborumgebung weitgehend manuell hergestellt wurde und die Einschränkungen der Fertigungsmöglichkeiten eines Grundlagenforschungsprojekts widerspiegelt. In diesem Kapitel wird der Herstellungsprozess des Demonstrators mit einer industriellen Kreislaufwertschöpfungskette verglichen, um Informationen für die Skalierung der entwickelten Materialien und Technologien zu gewinnen und wichtige Akteure, Materialien, Prozesse und grundlegende Technologien zu identifizieren. Das übergeordnete Ziel besteht darin, die Grundlage für die künftige Zusammenarbeit mit Industriepartnern und Interessengruppen zu schaffen, ein skalierbares Modell für die zirkuläre Biofabrikation im Bausektor zu etablieren und die Produktlösungen von HOME 2.0 weiterzuentwickeln und auf den Markt zu bringen.

Die wichtigsten Ziele sind:

1. Erfassung einer Kreislaufwertschöpfungskette für MBC-Paneele für Trennwände durch Identifizierung aller relevanten Stakeholder, Materialflüsse und Prozessstufen von der Beschaffung bis zum Ende der Lebensdauer (End of Life (EoL)).

2. Berücksichtigung zirkulärer Designstrategien – wie Materialeffizienz, Modularität, Demontage und Rückgewinnung – entlang der gesamten Wertschöpfungskette.
3. Bewertung der aktuellen Herausforderungen und Skalierungsmöglichkeiten, insbesondere beim Übergang von der kleinmaßstäblichen, experimentellen Fertigung zur automatisierten Produktion im industriellen Maßstab.
4. Definition der Rollen und Beiträge der Stakeholder zur Wertschöpfung, einschließlich technischer Verantwortlichkeiten, Zirkularitäts-Leistungskennzahlen (key performance indicators (KPI)) und gegenseitiger Abhängigkeiten.
5. Potenzialanalyse für die Skalierung einer zirkulären Wertschöpfungskette, unter Berücksichtigung automatisierter Produktionsmethoden, die den Übergang zu einem Kreislaufmodell unterstützen

Lieferkette vs. Wertschöpfungskette

In diesem Kapitel wird zwischen dem aktuellen Herstellungsprozess (der Lieferkette) und dem angestrebten industriellen Prozess (der Wertschöpfungskette) unterschieden. Bei der Fertigung des Demonstrators lag der Schwerpunkt auf der Koordination der Material- und Komponentenflüsse zwischen Lieferanten und Forschungspartnern, wobei die Machbarkeit im Rahmen des verfügbaren Budgets und vorhandener technischer Ressourcen im Vordergrund stand. Infolgedessen konzentrierte sich die Lieferkette des Demonstrators hauptsächlich auf die Logistik und nicht primär auf den Kundennutzen.

Im Gegensatz dazu umfasst die Wertschöpfungskette das gesamte Kontinuum der Aktivitäten, Akteure und Prozesse, die für die Produktentwicklung erforderlich sind – angefangen von der ersten Idee und der Beschaffung der Rohstoffe über die Fertigung und den Vertrieb bis hin zur Produktnutzung und den Optionen am Ende des Lebenszyklus wie Wiederverwendung, Recycling, oder Entsorgung. In jedem Schritt wird ein Mehrwert geschaffen, sei es durch Materialumwandlung, verbesserte Funktionalität oder nachhaltige Rückgewinnung (Porter, 1985). Während sich die Lieferkette auf den Transport von Waren und Dienstleistungen vom Lieferanten zum Kunden konzentriert, legt die Wertschöpfungskette einen größeren Schwerpunkt auf die Schaffung von Wert in jeder Phase – sowohl für das Produkt als auch für die beteiligten Stakeholder. Insbesondere aus Sicht der Nachhaltigkeit ist das Wertschöpfungsmodell wertvoll, da es sowohl interne als auch externe Stakeholder explizit einbezieht und eine vollständige Lebenszyklusperspektive bietet, die ethische, ökologische und funktionale Wertschöpfung berücksichtigt (Cambridge Institute for Sustainability Leadership [CISL], o. J.).

Dementsprechend wird im Folgenden eine skalierbare Wertschöpfungskette aufgezeigt, indem die wirtschaftlichen Beziehungen zwischen den Stakeholdern, sowie die zugrundeliegenden Material-, Prozess- und Technologieflüsse untersucht werden. Da eine umfassende Marktanalyse den Rahmen dieser Untersuchung sprengen würde, werden etablierte Wertschöpfungskettenmodelle für Trennwandsysteme als Grundlage herangezogen.

Hintergrund

Stand der Technik

Der Bausektor befindet sich in einem strukturellen Wandel, der von drei sich verstärkenden Trends angetrieben wird: Digitalisierung, industrialisierte/automatisierte Produktion und Kreislaufwirtschaft. Die industrialisierte und automatisierte Produktion – Offsite-Fertigung, modulare und paneelisierte Systeme, Robotik und fortschrittliche Prozesssteuerung – hat sich von Pilotprojekten zur Einführung in bestimmten Gebäudetypen und Regionen entwickelt. Es gibt Belege dafür, dass modulare/Offsite-Lösungen die Zeitpläne um zweistellige Prozentsätze verkürzen können und die Voraussetzungen für eine tiefere Automatisierung (robotergestütztes Schneiden/Montieren, automatisiertes Trocknen/Aushärten, Inline-Qualitätskontrolle) schaffen, da sich das Bauwesen zunehmend anderen fortschrittlichen Fertigungsbranchen angleicht. Dieser „Factory-First"-Ansatz

ist von zentraler Bedeutung für die Skalierung neuer biobasierter Materialien und die Erzielung einer wiederholbaren Qualität bei geringeren Kosten und weniger Abfall (World Economic Forum, 2025).

Parallel dazu beschleunigen politische und marktwirtschaftliche Impulse zur Dekarbonisierung die Kreislaufwirtschaft. Neue Leitlinien betonen zirkuläres Bauen (Design für die Demontage, Product-as-a-Service, Komponentenpässe) und industrialisierte Arbeitsabläufe, um eine hochwertige Rückgewinnung, Aufarbeitung und Wiederverwendung am Ende der Lebensdauer zu ermöglichen. Zusammen mit digitalen Produktdaten schaffen diese Praktiken glaubwürdige zirkuläre Wertschöpfungsketten, die die Ökobilanz verbessern und gleichzeitig die Kosten- und Terminsicherheit erhöhen (United Nations Environment Programme & Global Alliance for Buildings and Construction, 2025).

In diesem Kontext werden MBCs werden zunehmend als erneuerbare, biologisch abbaubare Alternativen zu herkömmlichen Bau- und Innenausbaumaterialien untersucht. Eine wachsendes Ökosystem von Start-ups und Unternehmen entwickeln kommerzielle MBC-Produkte für die Bauanwendung, wobei der Schwerpunkt auf der Weiterentwicklung und Skalierung der Produktionsmethoden und nicht auf Materialinnovationen liegt (Mattanavichean et al., 2025). Zur Steigerung der Effizienz wird in der Bauindustrie zunehmend auf die Entwicklung von vorgefertigten, modularen Bausystemen gesetzt (Jones et al., 2025, Mackenbach et al., 2020). Diese Systeme sind auf einfache Montage, Demontage und Neukonfiguration ausgelegt und unterstützen damit die Prinzipien der Kreislaufwirtschaft. Modulare MBC-Trennwandsysteme sind zwar noch nicht kommerziell erhältlich, aber das Anwendungspotenzial zur technischen Integration von MBC Komponenten in vorgefertigte Bausysteme ist hoch. Wie im vorigen Kapitel über bestehende Trennwandsysteme beschrieben, bieten modulare Paneele Flexibilität bei der Innenausstattung und reduzieren gleichzeitig das Abfallaufkommen, da sie die Wiederverwendung und Neukonfiguration von Komponenten ohne Leistungseinbußen ermöglichen.

Die Fermentation von losen Substraten wurde 2007 von Ecovative patentiert und bildete die Grundlage für die kommerzielle Skalierung von MBCs (Bayer & McIntyre, 2007). Mehrere europäische Hersteller, darunter Mogu, Mykor und Grow.bio, produzieren unter Lizenz von Ecovative MBCs im industriellen Maßstab. Parallel dazu werden andere Initiativen durch öffentliche Investitionen ausgebaut: So hat beispielsweise Permafungi (Europäische Kommission, 2022) in Brüssel kürzlich eine umfangreiche Förderung aus dem EU-LIFE-Programm erhalten, um die MBC-Produktion für industrielle Anwendungen zu skalieren. Neben diesen Entwicklungen treiben wachsende Investitionen in die Flüssigfermentation die Produktion von reinem Myzel voran und ermöglichen neue Materialien auf Myzelbasis. Insgesamt spiegeln diese Entwicklungen die steigende Nachfrage nach MBCs als vielseitige Materialplattform wider, die den Übergang zur industriellen Umsetzung erleichtern und die Entwicklung nachhaltiger Lösungen für den Innenausbau unterstützen.

Grundsätze des zirkulären Designs

Das Systemdesign für das HOME 2.0-Trennwandsystem orientiert sich an den in WP 4.1 ausgearbeiteten Prinzipien des zirkulären Designs, die sowohl Materialkreisläufe als auch langfristige Anpassungsfähigkeit ermöglichen. Im Mittelpunkt dieses Ansatzes steht ein komponenten- und modularer Aufbau, der es ermöglicht, Paneele, Rahmen und Pfosten unabhängig voneinander herzustellen, auszutauschen oder neu zu konfigurieren. Das Design für die Demontage ist durch mechanische Verbindungen und reversible Verbindungen integriert, wodurch die Wiederverwendung von Komponenten ermöglicht und Qualitätsverluste reduziert werden (Dewagoda, 2024).

Eine wichtige Voraussetzung ist die vollständig biobasierte Zusammensetzung der Hybridpaneele, die durch die Integration von Myzel-Verbundwerkstoffen mit FSC-zertifiziertem Holz und Hanfsubstraten erreicht wird. Die Entwicklung eines automatisierten Holzschweißverfahrens ersetzt herkömmliche Klebstoffe, verbessert die Recyclingfähigkeit und reduziert schädliche Emissionen. Die Materialauswahl folgt den Prinzipien der Ökologie, Erneuerbarkeit und lokalen Beschaffung. Zusammen bilden diese Prinzipien die Grundlage für eine skalierbare und zirkuläre Wertschöpfungskette, in der automatisierte Produktion, Modularität und biobasierte Innovationen in Synergie mit zirkulären Geschäftsmodellen wie Wiederverwendung, Wiederaufarbeitung und Product-as-a-Service zusammenwirken.

Systemdesign

Das HOME 2.0-System ist eine modulare, paneelbasierte Trennwand, die Myzel-Verbundwerkstoffe mit einem Furniergitter und einem Holzrahmen integriert. Der Adapterrahmen dient als Produktionshilfe während der Biofabrikation, wodurch eine Hybridkomponente entsteht, die für die Wiederverwendung und Neukonfiguration ausgelegt ist (s. Abbildung 1). In der kompletten Trennwandkonstruktion sind vertikale Hauptpfosten an den oberen und unteren Schienen befestigt, die als Bauwerksanschlüsse dienen. Die Paneelrahmen sind so konstruiert, dass sie nahtlos mit diesen Pfosten verbunden werden können, wodurch ein durchgängiges Trennwandsystem entsteht, das rekonfigurierbar und für die Demontage ausgelegt ist. Die furnierverstärkte Myzeliumpaneele, dies aus einer mehrlagigen Substratschicht besteht stellt die Kernkomponente des Systems dar, die aufgrund der Komplexität der Fertigung das größte Potential zur automatisierten Fertigung und Qualitätskontrolle aufweist. Tabelle 12 Aufschlüsselung der Systemkomponenten zeigt die Aufschlüsselung der Systemkomponenten.

Tabelle 12 Aufschlüsselung der Systemkomponenten

Komponente	Elemente	Material	Herstellungsverfahren	Funktion im System
Pfosten		Vollholz	Manueller Prozess CNC-Fräsen, mechanische Verbindung	Haupttragwerk im Trennwandsystem, Verbindung zur oberen und unteren Schiene
Anschlüsse zu Decke und Boden	Obere Schiene		Manueller Prozess CNC-geschnitten, mechanische Befestigungen, horizontale Lastübertragung, Ausrichtung der Trennwände und Verbindung zu einem System	Verbindung mit den tragenden Bauteilen – Decke und Boden
	Untere Schiene			
Paneel	Sägemehlsubstrat	Mischung aus Kiefern-/Fichtensägemehl mit Myzel	Automatische Ablagerung mit in Form gefügtem Rahmen	Akustische Masseisolierung, strukturelle Festigkeit
	Hanfsubstrat	Hanfschäben mit Myzel		Verbessert die porösen Eigenschaften für die Absorption mit Furniergitter
	Furnierverstärkungsgitter	Ahornfurnierstreifen	Halbautomatischer Prozess Robotergesteuerte Ultraschall-Holzschweißung	Zugverstärkung, Schlagfestigkeit
	Adapterrahmen	Vollholz	Manueller Prozess CNC-Zuschnitt, Klebever-bindung	Perimeterrahmen der Paneels zum Anschluss an Pfosten

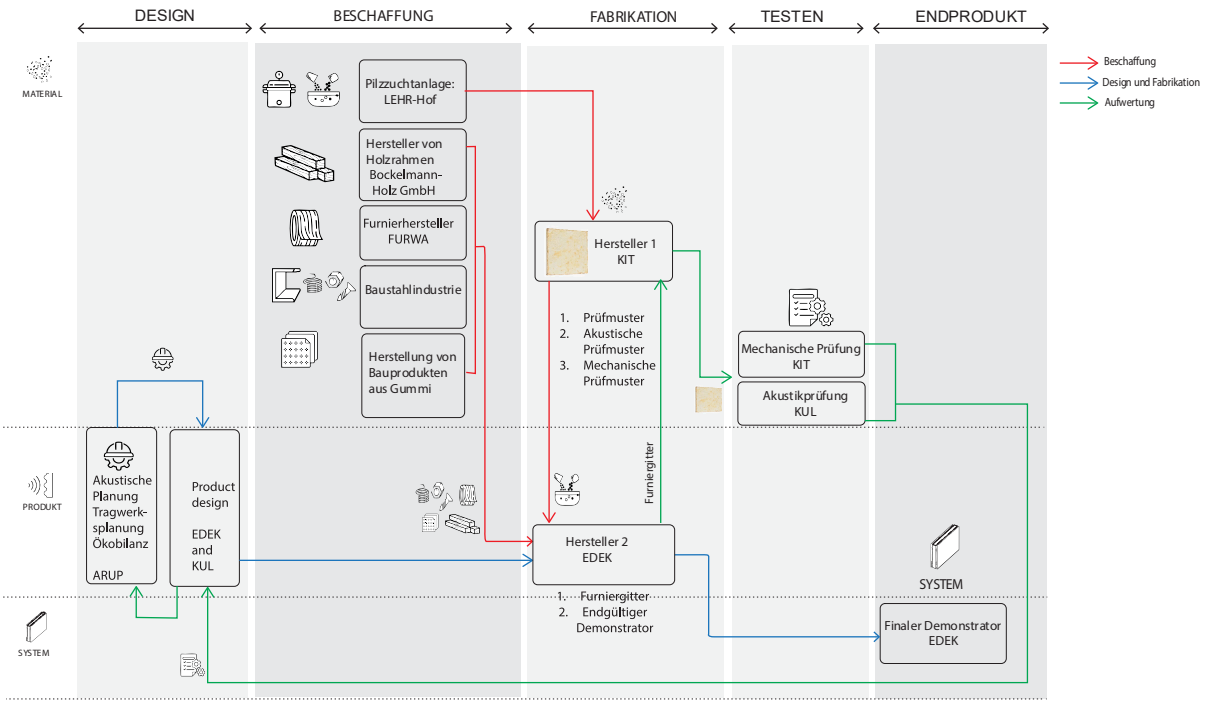
Quelle: KUL

Lieferkette und Verarbeitungsschritte des Demonstrators

Der Produktionsprozess der Myzelium Paneele umfasst eine Lieferkette von voneinander abhängigen Akteuren, von Rohstofflieferanten bis hin zu Fertigungspartnern. Diese Interaktionen sind durch

Forschungskooperationen und nicht durch marktorientierte wirtschaftliche Logik geprägt, sodass der Prozess nicht mit einer integrierten Wertschöpfungskette gleichzusetzen ist. Die Materialbeschaffung ist weitgehend linear und fragmentiert und nicht auf die Wiederverwendung und Rückverfolgbarkeit von Materialien und Komponenten ausgelegt.

Das abgebildete Diagramm (Abbildung 94) zeigt die aktuelle Lieferkette des Demonstrators, die aus fünf Hauptphasen besteht.



Quelle: KUL

Abbildung 94 Diagramm der Verarbeitungskette des HOME 2.0 Demonstrators

Phase 1: Entwurf und Planung

Das Systemdesign wurde von EDEK und KUL unter Einbeziehung der Fachkenntnisse von ARUP in den Bereichen Akustik und Tragwerksplanung sowie Lebenszyklusanalyse (LCA) geleitet. Im Rahmen dieser Aktivitäten wurden die Produktanforderungen, Leistungsziele und Umweltziele für den Demonstrator festgelegt.

Phase 2: Material- und Komponentenbeschaffung

Die folgenden Materialien und Komponenten, die für die Herstellung des Demonstrators benötigt wurden, wurden von Stakeholdern außerhalb des Projektteams beschafft:

- Substrate aus Hanfschäben und Sägemehl: diese wurden in der Pilzzucht *LEHR-Hof* nach den vom KIT entwickelten Rezepturen hergestellt und für das Myzelwachstum optimiert. Bei LEHR wurden die Substrate sterilisiert, gemischt, beimpft und unter kontrollierten Bedingungen in Beutel zur Kolonisierung verpackt und an das KIT geschickt. Das KIT stellte EDEK das gleiche Material für die Herstellung der Platten zur Verfügung.
    - Holzrahmen von Bockelmann-Holz GmbH: Derzeitige Holzelemente werden überwiegend mit Klebstoffen verbunden, was die Demontage und Wiederverwendung einschränkt. Um den Prinzipien des Kreislaufdesigns zu entsprechen, sollten bei zukünftigen Iterationen mechanische Befestigungen Vorrang haben und eine digitale Kennzeichnung zur Rückverfolgbarkeit der Materialien integriert werden.
      10 % Abfall – kann als Rohstoff wiederverwendet werden

- Furniere von FURWA: Für den Demonstrator wurden Furniere von FURWA als maßgeschneiderte Platten auf Bestellung beschafft. Das spezifizierte Material war europäischer Ahorn (Acer pseudoplatanus) mit FSC 100 %-Zertifizierung, um eine nachhaltige Beschaffung zu gewährleisten. Die Furniere wurden in den erforderlichen Abmessungen geliefert, die für den Einbau in den Holzrahmen und das Verstärkungsgitter des Hybridpaneelsystems geeignet sind.

Darüber hinaus mussten Standardkomponenten wie Schraubbefestigungen, Gummidichtungen und Aluminiumhalbzeuge im Baufachhandel besorgt werden.

Stufe 3: Fertigung und Prototypenbau

Die am KIT vorbereiteten Substrate wurden an EDEK geliefert, wo der endgültige Demonstrator hergestellt wurde. Bei EDEK wurden mit einer automatisierten UV-Schweißmaschine die Furnierverstärkungsgitter hergestellt und mit Holzrahmen zum Verbundwerkstoff integriert. Die Platten wurden unter kontrollierten Bedingungen gezüchtet, anschließend luft- und wärmetrocknet und schließlich zum Trennwandsystem-Demonstrator montiert. Mehrere Schritte – darunter die Befestigung der Furnierbewehrung, der Rahmenbau und die Trocknung (manuelles Wenden und Prüfen) – erfolgten manuell.

Phase 4: Prüfung und Verifizierung

EDEK stellte die Furniergitter her, die am KIT mit den besiedelten Substraten von LEHR Farm kombiniert wurden, um Testproben zu kultivieren. KIT führte die mechanischen Tests durch, während KUL die in Tabelle 13 aufgeführten akustischen Tests durchführte. ARUP stellte anschließend die Ergebnisse zusammen und analysierte sie, um die endgültigen Konstruktionsspezifikationen zu erstellen.

Tabelle 13 Liste der für die Verifizierung in HOME 2.0 durchgeführten Prüfverfahren

Posten	Liste der durchgeführten Tests	Art der Tests	Verantwortlicher Partner
1	Akustische Tests	Impedanzrohrprüfung	KUL
		Nachhallraumprüfung	
		Übertragungstest	
		Dynamische Steifigkeitsprüfung	
2	Mechanische Prüfungen	3-Punkt-Biegeversuch	KIT
3	Verbindung zwischen Myzelverbund und Furniergitter	Ausreißversuche	

Quelle: KUL

Phase 5: Endmontage und Übergabe

EDEK integrierte die verifizierten Komponenten in den endgültigen Demonstrator, der aus einer Trennwand in voller Höhe und einem halben Wandabschnitt bestand, der die innere Struktur freilegte. Der Demonstrator zeigt den modularen Aufbau des Trennwandsystems, zeigt aber auch Herausforderungen bei der Produktion auf, wie bzw. Trocknungsrisse und Verformungen aufgrund der unterschiedliche Schrumpfungsraten der Hanf- und Sägemehlsubstrate.

Methodik

Die Entwicklung des Rahmens für die zirkuläre Wertschöpfungskette für HOME 2.0 erfolgte in einem mehrstufigen methodischen Ansatz, der Literaturrecherche, Einbeziehung von Interessengruppen und iterative Systemkartierung kombinierte. Der Prozess folgte sowohl explorativen als auch angewandten Forschungsmethoden, um akademische Stringenz und praktische Relevanz sicherzustellen.

Die Analyse kombinierte die Prozesskartierung der Lieferkette des Demonstrators, Interviews mit Stakeholdern und direkte Beobachtungen der Prototypenproduktion, um technische und organisatorische Engpässe zu identifizieren. Diese Erkenntnisse wurden durch eine Literaturrecherche und einen Vergleich mit modernsten biobasierten und zirkulären Produktionssystemen ergänzt. Die Ergebnisse wurden anhand eines Rahmenwerks für Herausforderungen und Chancen zusammengefasst, das entlang der sequenziellen Schritte der Wertschöpfungskette – von der Rohstoffbeschaffung bis zur Wiederverwendung und Verwertung – strukturiert war, um sicherzustellen, dass sowohl praktische Erfahrungen als auch akademische Perspektiven in die Entwicklung einer skalierbaren zirkulären Wertschöpfungskette einflossen (Kaplinsky & Morris, 2001; Bocken et al., 2016; Geissdoerfer et al., 2017).

1. Literaturrecherche und theoretische Grundlagen
   Es wurde online eine Literaturrecherche durchgeführt, um die konzeptionellen Grundlagen des Wertschöpfungsketten-Ansatzes zu ermitteln, wobei auf wegweisende Arbeiten (z. B. Porter, 1985) und aktuelle Studien zur Kreislaufwirtschaft und Bioökonomie zurückgegriffen wurde. Die Prinzipien des zirkulären Designs (Ellen MacArthur Foundation, 2013) und Berichte zur Dekarbonisierung des Bausektors (UNEP, 2022) bildeten den Rahmen für die Identifizierung von Möglichkeiten zur Schaffung zirkulärer Wertschöpfung.

2. Fallstudie zum Demonstrator
   Die Produktion des Demonstrators HOME 2.0 diente als Fallstudie zur Untersuchung der aktuellen Lieferkette. Materialflüsse, Rollen der Stakeholder und Verarbeitungsschritte wurden auf der Grundlage von Projektaktivitäten, Beschaffungsprozessen und interner Berichterstattung dokumentiert. So konnten Engpässe, Machbarkeitsbeschränkungen und Herausforderungen bei der Skalierung vom Prototyp zur industriellen Produktion identifiziert werden.

3. Einbeziehung der Stakeholder
   Es wurden semi-strukturierte Interviews mit wichtigen Stakeholdern geführt, darunter Materialzulieferer (Hanf, Sägemehl, Pilz , Getreidesporen), Furnier- und MBC-Hersteller. In diesen Interviews wurden die Perspektiven der Stakeholder zu aktuellen Praktiken, Skalierungsbedarf und potenziellen Rollen innerhalb einer industriellen zirkulären Wertschöpfungskette erfasst. Die Ergebnisse flossen sowohl in die Systemkartierung als auch in die Identifizierung von ermöglichenden Faktoren für die Skalierung ein. Vertreter von Kineco, Mogu, Mycolutions, Furwa und Ecophone wurden befragt, die im Abschnitt 6.2 ausführlich behandelt werden.

4. Abbildung der Wertschöpfungskette
   Es wurde ein Wertschöpfungsketten-Diagramm (siehe Abbildung 3) entwickelt, um Materialfluss, Prozesse und Stakeholder in drei Hauptsegmenten zu veranschaulichen: vorgelagerte Lieferung, Kernwertschöpfung sowie nachgelagerter Vertrieb, Betrieb und Verwertung. Die Kartierung umfasste sowohl technische Prozesse (Substratvorbereitung, Wachstum, Montage und Prüfung) als auch Rahmenbedingungen (Logistik, Zertifizierung, Rückgewinnung). Diese Visualisierung wurde auf Grundlage der Beiträge der Projektpartner iterativ verfeinert.

5. Identifizierung von Herausforderungen und Chancen
   Aus der Fallstudie und den Interviews wurden Herausforderungen wie Skalierbarkeit, Materialkompatibilität und begrenzte Lieferantenvielfalt herausgearbeitet. Chancen wurden in Form von Kreislaufstrategien (Wiederverwendung, Modularität, Product-as-a-Service, biologischer Kreislauf) und technologischen Faktoren (Automatisierung, digitale Nachverfolgung, Vorfertigung) formuliert. Diese Erkenntnisse flossen direkt in die Entwicklung eines vorgeschlagenen Kreislaufwertschöpfungsmodells (Abbildung 3) für die Großserienfertigung ein.

6. Entwicklung eines skalierbaren Rahmens für eine zirkuläre Wertschöpfungskette
   Der letzte Schritt bestand darin, die Ergebnisse in ein Konzept für eine Kreislaufwertschöpfungskette im industriellen Maßstab umzusetzen. Dieser Rahmen integriert Schlüsselkomponenten (Hybridpaneele und Holzrahmensystem), Interessengruppen, grundlegende Technologien und grundlegende zirkuläre Geschäftsmodelle.

Aus der Analyse des aktuellen Fertigungsprozesses des HOME 2.0-Demonstrators und aus Interviews mit Stakeholdern wurden die folgenden Herausforderungen und Chancen identifiziert.

Herausforderungen

- Beschaffung Substrate **–** Die Abhängigkeit von einem einzigen lokalen Bauernhof mit begrenzter Transparenz hinsichtlich der Lieferanten von Substrat-Fertigmischungen schränkt die Verfügbarkeit ein; eine Skalierung erfordert eine Diversifizierung der Bezugsquellen durch die Land- und Forstwirtschaft.
- Technische Skalierbarkeit – Aktuelle MBC-Verfahren stoßen an Grenzen hinsichtlich Kultivierungszeitraum, Kontaminationskontrolle und dimensionale Stabilität großformatiger Paneele.
- Standardisierungsbedarf – Uneinheitliche Substratqualität und Bewehrungsgitter behindern die Kompatibilität und Reproduzierbarkeit.
- Infrastrukturdefizite – Der Mangel an groß angelegten automatisierten Anlagen (z. B. industrielle Autoklaven, robotergesteuerte Fertigung) schränkt die Produktionskapazität ein.
- Leistungsfähigkeit – Aktuelle MBC-Verbundmaterialien erfüllen zur Zeit noch nicht durchgängig die Anforderungen an Struktur, Akustik oder Haltbarkeit, was eine breitere Anwendung einschränkt.
- Hindernisse bei der Zertifizierung und Akzeptanz durch die Nutzer – Biobasierte Materialien insbesondere MBC sind vielen Kunden und Bauschaffenden noch unbekannt, was zu Zurückhaltung bei der Beschaffung führt.
- Fehlende politische Anreize – Es gibt nur wenige regulatorische Impulse, die die Einführung neuartiger biobasierter Werkstoffe fördern.
- Wirtschaftliche Machbarkeit – Der Übergang von der Pilot- zur industriellen Produktion erfordert hohe Vorabinvestitionen und zuverlässige Lieferketten für alle Materialien.

Um diese Herausforderungen zu bewältigen, sind eine koordinierte Einbindung der Interessengruppen, gezielte Investitionen in grundlegende Technologien und die Integration zirkulärer Geschäftsmodelle erforderlich, um sowohl den ökologischen als auch den wirtschaftlichen Wert über den gesamten Lebenszyklus hinweg zu sichern.

Chancen

- Rohstoffversorgung – Einbeziehung von land- und forstwirtschaftlichen Nebenprodukten in die Substratversorgung, um Skaleneffekte zu erzielen, Kosten zu senken und lokale Reststoffe zu verwerten.
- Substratvorbereitung und Kultivierung – Einsatz halbautomatischer Robotersysteme für die Substratbefüllung, Plattenmontage und Kontrolle, zur Steigerung von Qualität und Effizienz während der Kultivierung
- Ausrichtung der Paneel Herstellung auf zirkuläres Design durch Verwendung mechanischer Verbindungselemente, die leicht demontierbar sind, und Einbettung digitaler Rückverfolgbarkeitssysteme, die Daten zu Materialherkunft, Zusammensetzung und Lebenszyklus erfassen und verfolgen, um Transparenz, Wiederverwendung und kreislauffähige Verwertung zu gewährleisten.
- Fertigung und Montage – Verlagerung der Plattenproduktion in spezielle Vorfertigungsanlagen, die Furnierbewehrung, Rahmenintegration und kontrollierte Wachstumsbedingungen kombinieren. Die Vorfertigung von Komponenten wie modulare Holzrahmen, Furnierbewehrungsgitter und MBC-Platten gewährleistet Wiederholbarkeit, Kompatibilität und einfache Wiederverwendbarkeit (Bertoldi & Bianchi, 2025).
- Automatisierung der Produktion – Die automatisierte Produktion und Vorfertigung bieten erhebliche Möglichkeiten für die Skalierung biobasierter Lösungen wie MBC-Platten auf Myzelbasis. Durch die

Integration von digitalem Design und robotergestützter Fertigung bieten diese Systeme wirtschaftliche Vorteile durch reduzierte Arbeitskosten, konforme Qualität und schnellere Produktionszyklen.

- Einführung von Rücknahmesystemen, um zurückgewonnene Materialien wieder in Produktionszyklen zu integrieren.
- Zertifizierung und Marktakzeptanz – Tests und Zertifizierungen durch anerkannte Stellen (z. B. Akustik, Brandschutz, VOC-Emissionen) zur Schaffung von Vertrauen der Endverbraucher und zur Beschleunigung der Akzeptanz.
- Implementierung von Product-as-a-Service-Modellen (PaaS), bei denen Auftragnehmer Trennwandsysteme leasen, die Verantwortung für die Wartung übernehmen und die Systeme am Ende ihrer Nutzungsdauer zurücknehmen.
- Verwertung am Ende der Lebensdauer – Einbeziehung von Abfallentsorgern in Szenarien, in denen Komponenten nicht wiederverwendet werden können, um den Wiederverkauf, das Recycling oder die energetische Verwertung zu ermöglichen.
- Breite Einführung von Kreislaufpraktiken (Bezug erneuerbarer Energien, optimierte Logistik und effiziente Ressourcennutzung) bei allen Beteiligten.

Wichtiger Wegbereiter: Übergang zu einer digitalen Kreislaufwirtschaft

Die Anwendung von Kreislaufprinzipien in diesem Zusammenhang kann diese Vorteile noch erweitern. Laut Arup und der Ellen MacArthur Foundation (2018) werden Innenausstattungskomponenten in gewerblichen Gebäuden in der Regel alle 10 bis 15 Jahre ausgetauscht, was zu einem überproportionalen Anteil an CO2-Emissionen und Abfall führt. Minunno, O'Grady, Morrison, Gruner und Colling (2018) diskutieren Strategien für die Anwendung der Kreislaufwirtschaft auf Fertigteilgebäude. Kreislaufstrategien – Wiederverwendung, Modularität und biologischer Kreislauf – können den ökologischen Fußabdruck erheblich verringern und gleichzeitig funktionale und ästhetische Anforderungen erfüllen. Marktverschiebungen hin zu anpassungsfähigen Räumen (Co-Working, Co-Living) unterstützen diesen Ansatz zusätzlich und schaffen eine Nachfrage nach modularen, rekonfigurierbaren Innensystemen.

Der Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft beinhaltet die Umsetzung des 9R-Rahmenwerks, wie in WP 4.1 Entwicklung und Design von Komponenten beschrieben und von der PBL Netherlands Environmental Assessment Agency in ihrem CE-Bericht dargelegt.

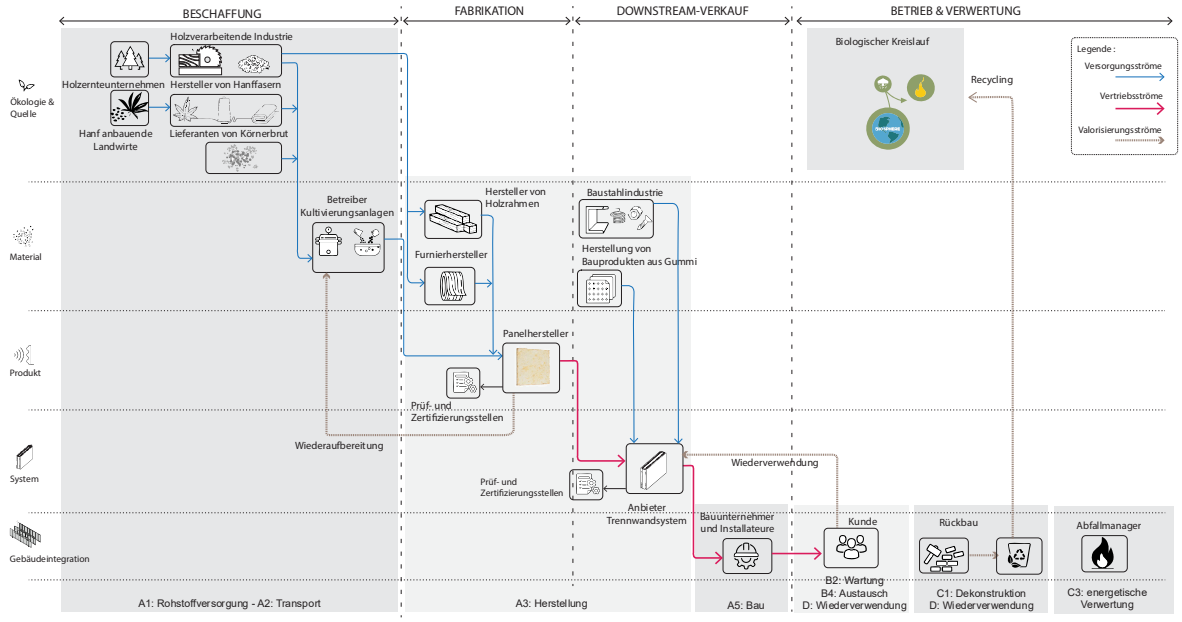
Das bedeutet, von Anfang an über die sinnvolle Nutzung von Ressourcen, die Verlängerung der Produktlebensdauer und die Schließung des Kreislaufs nachzudenken. Aus Sicht des Produktdesigns bedeutet dies, die folgenden Strategien in die Designphase einzubeziehen:

- **Design for Disassembly (DfD):** Berücksichtigung des Produktlebensendes, um eine Wiederverwendung oder Wiederaufarbeitung unter denselben Produktionsprozessen zu ermöglichen.
- **Design für Anpassbarkeit (DfA):** Verlängerung der Nutzungsdauer des Produkts durch Anpassung an sich ändernde Anforderungen während der Nutzung.
- **Ressourceneffizienz:** Minimierung der Abfallerzeugung und des Materialverbrauchs während der Herstellung.
- **Kreislaufgerechter Materialfluss:** Auswahl von Materialien nach den Prinzipien der Kreislaufwirtschaft.

Trotz ihres Potenzials ist die Einführung von zirkulären Produkten im Bausektor jedoch nach wie vor begrenzt, wie mehrere Studien zeigen ((Illankoon und Vithanage, 2023), (Guerra *et al.*, 2021), (AlJaber, Martinez-Vazquez und Baniotopoulos, 2023)). Jüngste Forschungsergebnisse identifizieren jedoch Geschäftsmodelle der Kreislaufwirtschaft (CEBMs) als wichtige Wegbereiter für die Transformation des Bausektors (Mhlanga *et al.*, 2025). So bietet das Modell Product-as-a-Service langfristige finanzielle Renditen. Studien zeigen potenzielle Kosteneinsparungen von 5 % über einen Zeitraum von zehn Jahren und bis zu 3 % IRR-Gewinne über 30 Jahre (ARUP,2020).

Überblick Konzeption Wertschöpfungskette

Die vorgeschlagene Wertschöpfungskette für Home 2.0 (Abbildung 95) skizziert die Schritte, die erforderlich sind, um ein skalierbares Produkt zu erreichen. Das folgende Diagramm veranschaulicht die Produktströme über alle Phasen des Produktlebenszyklus hinweg, entsprechend den Modulen der Umweltproduktdeklarationsnorm EN 15804, von der Rohstoffbeschaffung (A1) über die Herstellung (A3) und die Integration des Trennwandsystems in das Gebäude (A5) bis hin zur Nutzungsphase (B) und der Verwertung des Produkts am Ende seiner Lebensdauer (C, D). Jede Phase ist mit bestimmten Interessengruppen, Technologien und Wechselbeziehungen verbunden, die in den folgenden Unterabschnitten detailliert beschrieben werden und ein klares Verständnis für die Wertschöpfung in einem Kreislaufsystem vermitteln.

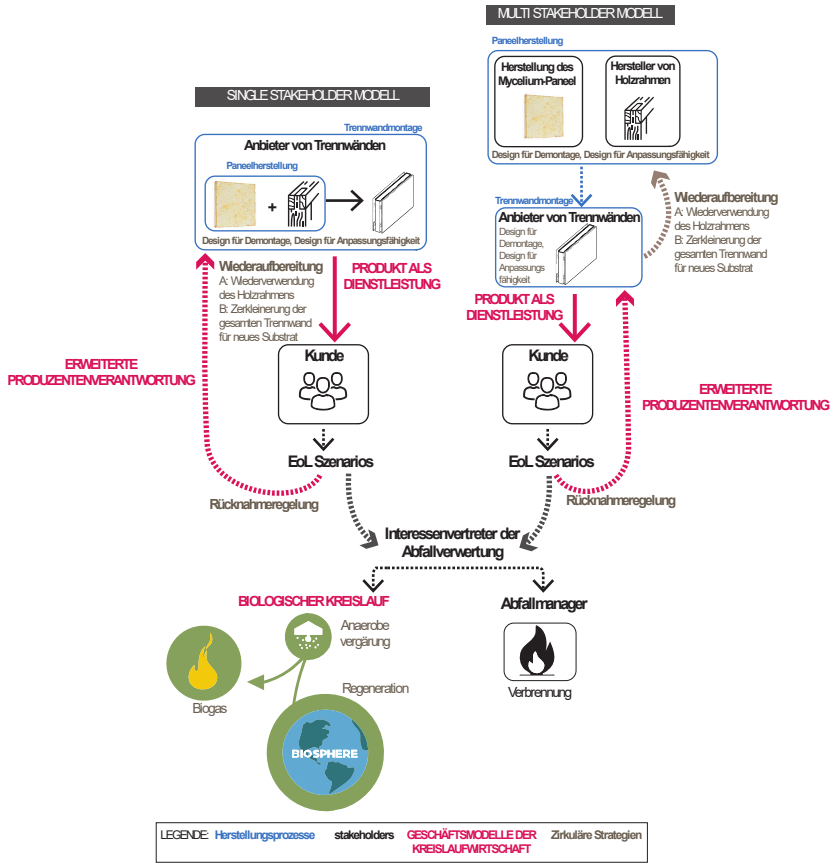


Quelle: KUL

Abbildung 95 Vorgeschlagenes skalierbares Wertschöpfungs-Diagramm für HOME 2.0

Kreislaufwirtschaftliche Materialflüsse

Im folgenden Abschnitt werden die vorgeschlagenen Kreislaufmaterialflüsse für Home 2.0 beschrieben und in Abbildung 95 dargestellt. Die vorgeschlagenen Kreislaufmaterialflüsse für Home 2.0-Trennwandsysteme sind in Abbildung 96 dargestellt. Im Gegensatz zu herkömmlichen Bauprodukten, die direkt verkauft werden, sind Home 2.0-Komponenten für die Wiederverwendung und das Recycling in einem geschlossenen Kreislauf konzipiert, sodass die Komponenten im Besitz der Hersteller oder Lieferanten bleiben und die Rücknahme am Ende des Lebenszyklus (EoL) zusichern.



Quelle: KUL

Abbildung 96 HOME 2.0 Kreislaufmaterialflüsse und Geschäftsmodelle

Für die Umsetzung dieser Kreisläufe sind zwei Modelle möglich:

- Einzelakteursmodell: Ein einziger Lieferant stellt sowohl die myzelbasierten Paneele als auch die Holzrahmen her, montiert die Trennwände und vermietet sie an die Kunden. Das Eigentum an den Produkten verbleibt beim Lieferanten, der die Rücknahme und Verwertung am Ende des Lebenszyklus organisiert. Dieses Modell vereinfacht die Logistik und gewährleistet den Werterhalt, erfordert jedoch eine höhere Kapitalintegration.
- Multi-Stakeholder-Modell: Der Paneelhersteller und der Holzrahmenhersteller bleiben separate Unternehmen, während ein spezieller Trennwandlieferant die Montage, Vermietung und Rücknahme koordiniert. Hier verbleibt das Eigentum an den Produkten beim Trennwandlieferanten, wodurch eine zentralisierte Verantwortung für die Rücknahmelogistik und die Verwertung gewährleistet ist.

In beiden Fällen wendet Home 2.0 zwei sich ergänzende Geschäftsmodelle der Kreislaufwirtschaft (CEBMs) an:

- Product as a Service (PaaS): Trennwände werden den Kunden nicht verkauft, sondern auf Miet- oder Servicebasis zur Verfügung gestellt.
- Erweiterte Herstellerverantwortung (EPR): Der Lieferant garantiert die Rücknahme am Ende der Lebensdauer über ein Rücknahmesystem. Trennwände können entweder für die Wiederverwendung des Holzrahmens zerlegt (Option A) oder vollständig zu neuem Myzel-Substrat recycelt werden (Option B). Nicht wiederverwertbare Materialien werden entweder anaerob vergärt (Biogasproduktion) oder zur Wärmegewinnung kontrolliert verbrannt, sodass keine unkontrollierten Emissionen entstehen.

Diese Konzeption für Demontage, Anpassungsfähigkeit und biologischen Kreislauf verankert das Materialsystem von Home 2.0 in einem regenerativen, geschlossenen Kreislauf.

Um dieses Geschäftsmodell umzusetzen und die Rentabilität sicherzustellen, müssen die folgenden Kreislaufstrategien in der Wertschöpfungskette implementiert werden:

- Wiederverwendung (Reuse) – Das Ziel des Herstellers ist es, die Lebensdauer des Produkts so weit wie möglich zu verlängern, um höhere Einnahmen aus dem PaaS-Modell zu erzielen, weshalb das Produkt auf Anpassungsfähigkeit (DfA) ausgelegt ist. Im Fall von Home 2.0 kann dies durch die Modularität der Tragkonstruktion und der Paneele sowie durch die Konstruktion der Verbindungen zwischen den Komponenten erreicht werden, die durch lösbare Verbindungen zerlegbar sind (DfD). Dies erleichtert Änderungen und Anpassungen am Rahmen für die Wiederverwendung der Trennwand in einer anderen Umgebung (z. B. durch neuen Zuschnitt).
- Wiederaufbereitung (Remanufacturing) – Das Myzel Paneel von Home 2.0 hat eine geschätzte Lebensdauer von 8 Jahren und ist nach diesem Zeitraum möglicherweise nicht wiederverwendbar. Wenn eine Platte im Laufe der Zeit beschädigt wird, z. B. durch Aufprall von Objekten oder Personen und eine Reparatur nicht möglich ist, wird der Rahmen herausgelöst und zu neuen Paneelen wiederaufbereitet.
- Recycling – Da das System ohne Metallverbindungen oder organische Klebstoffe auskommt, können beschädigte Platten zerkleinert und dem Substratmix für das Wachstum neuer Myzelmaterialien hinzugefügt werden.
- Alle Abfallstoffe und -produkte, die nicht wieder in den Herstellungsprozess zurückgeführt werden können, werden an Abfallverwertungsunternehmen weitergeleitet, wo sie durch Kompostierung biologisch verwertet werden. Die Verbrennung zur Energiegewinnung trägt zwar nicht zur Kreislaufwirtschaft bei, kann aber dennoch zu einer Verringerung der Emissionen bei der Energieerzeugung beitragen.

Wichtige Stakeholder

Der vorgeschlagene Kreislauf der Materialflüsse basiert auf der Zusammenarbeit mehrerer Akteure:

- **Vorstufe –** Holzverarbeiter (Sägemehl), Hanffaserproduzenten, Getreidesporenlieferanten, Furnierhersteller, Energie- und Transportdienstleister.
- **Produktion –** Betreiber von Anbauanlagen, Plattenhersteller, Lieferanten von Trennwandsystemen, Prüf- und Zertifizierungsstellen.
- **Umsetzung und Nutzung –** Bauunternehmer, Installateure und Kunden (Unternehmen, Architekten und Facility Manager).
- **Ende der Lebensdauer –** Rückbauspezialisten, Abfallentsorger, Verwertungsindustrie (Recycling, Kompostierung, energetische Verwertung).

Jeder Stakeholder trägt mit technischen Fähigkeiten und wertschöpfenden Maßnahmen bei, von der Aufrechterhaltung der Substratqualität über die Einhaltung gesetzlicher Vorschriften bis hin zur Ermöglichung von Wiederverwendungskreisläufen.

Wichtige technische Infrastruktur

Grundlegende Technologien sind für den Ausbau einer industriellen Kreislaufwertschöpfungskette für MBC-Paneele von entscheidender Bedeutung:

- **Materialaufbereitung** – Verarbeitungsanlagen für die Zerkleinerung von Biomasse, Substratmischsysteme und automatische Dosierung von Zusatzstoffen (z. B. Calciumsulfat, Kleie).
- **Biologische Verarbeitung** – industrielle Autoklaven zur Sterilisation, Wachstumskammern mit kontrollierter Umgebung, Feuchtigkeits- und CO_2-Regulierungssysteme.

- **Digitale Fertigung und Montage** – automatisierte Produktionsanlagen einschließlich robotischer Fertigung, Ultraschall-Holzschweißen, CNC-Furnierzuschnitt, modulare Rahmenmontagelinien.
- **Qualitätssicherung** – akkreditierte Einrichtungen zur Prüfung der akustischen Eigenschaften, der Feuerbeständigkeit und der Raumluftqualität (z. B. VOC-Emissionen)
- **End-of-Life-Verarbeitung** – automatisierte Sortieranlagen zur Trennung von Holzfraktionen aus dem MBC-Material, um hohe Rückgewinnungsraten von Holzanteilen und das Recycling der Myzel-Verbundwerkstoffe als Substrate für die Biofabrikation neuer Komponenten zu ermöglichen.

Diese technischen Infrastrukturen gewährleisten eine gleichbleibende Qualität, minimieren Abfall und ermöglichen einen effizienten Übergang zwischen biologischen und technischen Materialkreisläufen und sind daher für die Skalierung der Produktionsprozesse von entscheidender Bedeutung.

Die oben beschriebenen Schlüsselaspekte sind in der vorgeschlagenen Wertschöpfungskette integriert.

Zusammenfassung

So ist die Einführung einer Kreislaufwertschöpfungskette nicht nur ökologisch verantwortungsbewusst, sondern bietet auch funktionale und finanzielle Vorteile für den Nutzer. Die Umsetzung dieser Prinzipien versetzt die Bauindustrie in die Lage, die wachsende Nachfrage nach anpassungsfähigen, nachhaltigen und kostengünstigen Innenraumlösungen zu befriedigen und ebnet den Weg für eine langfristige, skalierbare Kreislaufwirtschaft in der Baupraxis.

AP 6.4 Life Cycle Design und qualitative Entwicklung eines Kreislaufgeschäftsmodells

Die Lebenszyklusanalyse (LCA) im HOME 2-Projekt zielt darauf ab, das aktualisierte Design auf der Grundlage des neuen Demonstrators widerzuspiegeln. Der Schwerpunkt liegt auf der Verbesserung der Kreislaufwirtschaft und der Ermöglichung der Demontage, wobei die in HOME 1 festgestellten Einschränkungen – insbesondere die Verwendung von geklebten Holzrahmen, die die Wiederverwendung behinderten – berücksichtigt werden. Die aktualisierte LCA (siehe auch externer Anhang *Anhang_LCA_HOME_II*) bewertet ein Szenario mit einem neu gestalteten Rahmensystem, bei dem geklebte Verbindungen durch mechanische Befestigungen ersetzt werden, um die Demontage und die Materialrückgewinnung am Ende der Lebensdauer zu erleichtern.

Die LCA untersucht auch, wie Strategien für zirkuläres Design mit Innovationen im Geschäftsmodell in Einklang stehen. Mit Tools wie dem Business Case Canvas wird bewertet, wie Zirkularität entlang der gesamten Lieferkette – vom Materiallieferanten bis zum Endverbraucher – Wert schaffen kann.

Zur Unterstützung der Entscheidungen in der Entwurfsphase wurden bereits Forschungsarbeiten und vorläufige LCA-Vergleichsanalysen durchgeführt:

- Rahmenmaterialien: Es wurden mehrere Holzoptionen bewertet, darunter Brettschichtholz, Massivholz, Brettsperrholz und verschiedene Schnittholzkonfigurationen. Unter diesen wiesen Weichholzoptionen (insbesondere gehobeltes Massivweichholz mit 20 % Feuchtigkeit) das geringste Treibhauspotenzial und günstige Vorteile hinsichtlich der Wiederverwendung am Ende der Lebensdauer auf.
- Dichtungsmembranen: Es wurden verschiedene Dichtungsmaterialien verglichen, darunter synthetischer Kautschuk (EPDM), Naturkautschuk, Silikon sowie biobasierte und standardmäßige thermoplastische Elastomere (TPE). Biobasiertes TPE erwies sich hinsichtlich der Auswirkungen der Produktion als die umweltfreundlichste Option. Die Auswahl der Membranen ist noch nicht endgültig abgeschlossen.

Beschreibung von Änderungen gegenüber dem ursprünglichen Antrag

Folgende Änderung ergaben sich im Projekt gegenüber dem Ursprünglichen Antrag:

- Projektbeginn im Oktober 2023 statt im Juni 2023
- Großmaßstäbliche Tests zur akustischen und mechanischen Leistungsfähigkeit der Komponenten wurden vorgezogen
- Recherche zu 6.1 Entwicklung eines Bausystemkonzepts für das Upscaling des myzelbasierten Bioverbundsystems inkl. Komponentenverbindungen wurde vorgezogen

Auswertung

Meilenstein 1: Definition eines Lastenhefts

Mit dem ersten Meilenstein, der Definition eines Lastenhefts sollten die Anforderungen, Grundwerkstoffe und Vorversuche definiert werden. Als mögliche Abbruchkriterien waren das Nichterreichen der Bauteilanforderungen definiert. Der Meilenstein wurde innerhalb von AP 1 erreicht.

Meilenstein 2: Entwicklung eines digitalen Bioherstellungsprozesses

Der zweite Meilenstein umfasste die Entwicklung des digitalen Bioherstellungsprozesses. Dazu sollte die Realisierbarkeit eines digital integrierten Bioherstellungsprozesses im Labor erfolgen. Zu diesem Zweck wurde ein neuer Materialtransport- und Auftragsprozess mit integrierten robotischen Werkzeugen für Myzelsubstrate im DFG-Roboterlabor entwickelt. Dies wurde mithilfe von 1:1-Versuchen überprüft. Dadurch wurde Meilenstein 2 erreicht.

Meilenstein 3: Entwicklung von Verbindungstechnologien für Myzeliumbauteile

Der dritte Meilenstein umfasste die Entwicklung von Verbindungstechnologien für die Myzelbauteile. Zu diesem sollte die Entwicklung und Charakterisierung dieser Verbindungstechnologien erfolgen. In Zusammenarbeit mit den Verbundpartnern, insbesondere mit Arup, wurden geeignete Verbindungsmethoden durch physische Experimente und FE-Modellierung überprüft. Die Methoden zur Auslegung und Dimensionierung der Verbundteile wurden abgeschlossen. Damit ist der Meilenstein 3 abgeschlossen.

Meilenstein 4: Charakterisierung der Testbauteile

Im Rahmen des vierten Meilensteins erfolgte die Charakterisierung der Testbauteile. Zu diesem Zweck wurden im Arbeitspaket 4 umfangreiche Versuche von den Projektpartnern geplant und durchgeführt. Dies umfasste die akustische, strukturelle und physische Charakterisierung. Auf Basis der Ergebnisse wurde im Arbeitspaket 5 ein Demonstrator ausgelegt und entwickelt, der die Anforderungen an Statik, Schallschutz und Raumakustik für eine Bürotrennwand erfüllt. Zusammenfassend wurde Meilenstein 4 erreicht.

Schlussfolgerungen des Gesamtprojekts

Das übergeordnete Ziel des Forschungsprojekts war die Entwicklung einer Holz-Myzelium-Verbundbauweise für CO_2-neutrale, zirkuläre Innenausbauten. Damit sollen Büroflächen im Bestand aufgewertet werden. Auf Basis der Ergebnisse des Vorgängerprojektes HOME I, in dem das Konzept der Furnierbewehrung und der zunächst entwickelte, robotisch gesteuerte und klebstofffreie Herstellungsprozess der internen Holzgitterstruktur des entwickelten Verbunds erarbeitet wurden, umfasste das Projekt die additive, digitale Integration des Myzeliummaterials. Dadurch sollten sich neue Möglichkeiten im Herstellungs- und Entwurfsprozess sowie in der Skalierung für ein zukünftiges Anwendungsziel ergeben: CO_2-neutrale, akustische Leichtbautrennwände aus dem Holz-Myzel-Bioverbundmaterial. Konkret wurden die folgenden Ziele verfolgt:

- Digitale Integration der Myzeliumwachstums in den Prozess und damit verbundene gestalterische und funktionale Möglichkeiten
- Verbindungstechnologien
- Ingenieurbautechnische Methoden zur statischen Auslegung und Vorhersage vom strukturellen Verhalten von Bauteilen
- Ingenieurbautechnische Methoden zur Vorhersage vom akustischen Verhalten von Bauteilen
- Bauteilcharakterisierung

- Bauteilentwicklung für Anwendungsziel akustische Leichtbautrennwand
- Entwicklung einer Stakeholder Gruppe an interessierten Firmen aus der Materialherstellung, Verarbeitung und Anwendung

Zunächst wurde ein biobasierter Holz-Myzel-Verbundwerkstoff für selbsttragende, akustisch optimierte Trennwände entwickelt. Aufbauend auf HOME 1.0 lag der Fokus auf der Wechselwirkung zwischen Materialdesign, Schichtung, Furnieranordnung und akustischer Leistung. Hanf und Sägemehl dienten als Substrate, Ganoderma lucidum als Myzelkultur. Verschiedene Fasergrößen und Schichtkombinationen wurden getestet, um mechanische Tragfähigkeit und Schallabsorption zu optimieren. Vorversuche mit Druck- , Zug- und Biegetests sowie Impedanzrohrmessungen zeigten, dass Materialschichtung, Furnieranteil und Myzelwachstumsgrad gezielt zur Steuerung von Tragfähigkeit und Akustik genutzt werden können, wodurch anpassbare und nachhaltige Trennwandlösungen entstehen.

Die Fertigung wurde auf eine digitale, robotergestützte Methode übertragen, um Materialauftragsprozesse zu automatisieren und präzise Bauteilgeometrien zu ermöglichen. Dabei wurde das Material schonend pneumatisch transportiert und über maßgeschneiderte Endeffektoren in die Formen depositiert. Ein robotisch unterstützter Rüttel- und Klopfprozess sicherte eine gleichmäßige Verteilung, konstante Dichte und optisch gleichmäßige Oberflächen. Klimatische Bedingungen wurden für optimales Myzelwachstum kontrolliert, und ein zweistufiger Aushärtungsprozess stoppte das Pilzwachstum, ohne die Materialintegrität zu beeinträchtigen. Digitale Fertigung erlaubt gezielte Schichtung, Gradierung und Integration von Furniergittern, sodass innerhalb eines Paneels unterschiedliche Akustik- und Strukturzonen geschaffen werden können.

Die Verbindungstechnologien orientierten sich an Baukonventionen. Aufgrund der geringen Festigkeit der Myzelpaneele wurde ein vierseitiges Stützsystem mit eingebettetem Furniergitter gewählt. Die Kraftübertragung erfolgt über das Furnier, das mit Holzpfosten verbunden ist, die gleichzeitig als Schalung dienen. Modulare Rahmen ermöglichen Vorfertigung, Demontierbarkeit und sequentielle Herstellung verschiedener Substrate. Ein Konzept topologisch ineinandergreifender, komprimierter Verbindungen zeigte Potenzial für ein reversibles Verriegelungssystem, das die Festigkeit erhöht und den Holzrahmen teilweise ersetzen könnte.

Zur Materialcharakterisierung wurden verschiedene Substrate und hybride Varianten untersucht. Dreipunkt-Biegeversuche zeigten, dass Enddichte und mechanische Fixierung von Furniergittern entscheidend für Festigkeit und Steifigkeit sind. Akustische Messungen belegten, dass Furnierstruktur und auch die Geometrie der Furnierwellen die Schallabsorption verbessern, während schwere, homogene Substrate die Luftschalldämmung optimieren. Brandtests bestätigten, dass grobe Partikel und geringe Dichte die Wärmeausbreitung verlangsamen und die strukturelle Integrität erhöhen.

Für die Demonstratoren wurde ein zweistufiger Herstellungsprozess umgesetzt: Sägemehl wuchs zunächst, anschließend wurde Hanf hinzugefügt, um Materialunterschiede sichtbar zu machen. Die Produktion erfolgte in perforierten Schalungen mit PETG-Zwischenlagen, und ein Holzrahmen mit Furniergittern verstärkte die Paneele und verbesserte die Schallabsorption. Robotergestützte Auftragung, kontrollierte Feuchtigkeit und moderate Temperaturen sicherten gleichmäßiges Wachstum. Klimatisierte Trocknung verhinderte Schrumpfen und Verformungen. Künftige Optimierungen zielen auf dreischichtige Sandwichkonstruktionen, gezielte Rahmeneinspannung und Schalungsdesigns zur Verbesserung von Formstabilität und Präzision.

Aufbauend auf den Demonstratoren wurde eine skalierbare Wertschöpfungskette konzipiert, die Materialflüsse, Technologien und Stakeholder entlang des Lebenszyklus integriert. Hybridpaneele aus Myzel, Hanf- und Sägemehlsubstraten in furnierverstärkten Holzrahmen ermöglichen Demontage, Wiederverwendung und Recycling. Analysen zeigten Herausforderungen wie Substratverfügbarkeit, dimensionsstabile Produktion großformatiger Paneele, Materialstandardisierung und Automatisierung. Gleichzeitig eröffnen digitale Rückverfolgbarkeit, modulare Vorfertigung und Service-orientierte Geschäftsmodelle wie Product-as-a-Service Chancen für industrielle Skalierung. Eine ergänzende Lebenszyklusanalyse bewertete Materialwahl und Umweltwirkung und unterstützte die Kreislauffähigkeit.

HOME 2.0 demonstriert, wie biobasierte Innenraumsysteme ökologische und wirtschaftliche Vorteile entlang des gesamten Lebenszyklus erzielen und die industrielle Umsetzung nachhaltiger Produkte im Bauwesen ermöglichen.

Projekerfolgsindikatoren

Anhand der Evaluation der folgenden Erfolgsindikatoren wird im Folgenden beschrieben, inwiefern die Projektziele erreicht worden sind.

(1) Die digitale Integration der Myzeliumwachstums in den Prozess wurde erreicht. Damit verbundene gestalterische und funktionale Möglichkeiten wurden aufgezeigt

Die digitale Integration des Myzelwachstums in den Produktionsprozess konnte erfolgreich umgesetzt werden. Mithilfe robotergestützter Auftragsverfahren war es möglich, mehrere Substrate wie Hanf und Sägemehl nach rechnerisch generierten Mustern gezielt in Schalungen einzubringen. Dadurch wurden Wachstumszeiten, Materialverteilung und Schichtung digital planbar, sodass sich Materialgradienten, Oberflächenstrukturen und funktionale Zonen präzise gestalten ließen. Die Prozesslogik erlaubte eine kontrollierte Wechselwirkung von Materialauftrag, Myzelwachstum und Trocknungsphase. Somit konnte die Wachstumsdynamik erstmals als form- und leistungsbestimmender Parameter in die Strategie des Bauteilentwurfs integriert werden. Dadurch konnten sowohl gestalterische Möglichkeiten wie differenzierte Materialquerschnitte, sichtbare Materialzonen und akustisch wirksame Oberflächen als auch funktionale Vorteile hinsichtlich geringerer Emissionen und einer ressourceneffizienten Fertigung aufgezeigt werden.

(2) Es wurden passende Verbindungstechnologien für entstehende Bauteile entwickelt

Zur konstruktiven Integration der biobasierten Paneele in modulare Innenwandsysteme wurden geeignete Verbindungstechnologien entwickelt. Aufgrund der vergleichsweise geringen Eigensteifigkeit der Myzelverbundpaneele wurde ein Holzrahmen-Furnier-Verstärkungssystem ausgearbeitet. Dabei fungieren ein Holzrahmen und ein integriertes Furniergitter als lastübertragende Struktur. Mechanische Verankerungen zwischen Furnier und Myzelsubstrat wurden getestet und optimiert, um Auszugsfestigkeit und Dauerhaftigkeit sicherzustellen. Zusätzlich wurde ein reversibles Verbindungssystem für Paneelkanten untersucht, bei dem die Verbindung durch Heißpressen verdichtet und versteift wird. Beide Systeme ermöglichen eine Demontage und Wiederverwendung. Damit wurden konstruktive Lösungen entwickelt, die tragfähig und kreislaufgerecht sind und sich in modulare Bauteil- und Raumsysteme integrieren lassen.

(3) Es wurden ingenieurbautechnische Methoden zur statischen Auslegung und Vorhersage vom strukturellen Verhalten von Bauteilen entwickelt

Es wurden ingenieurbautechnische Methoden zur Vorhersage des strukturellen Verhaltens von Myzelverbundbauteilen erarbeitet. Dazu wurden Parameter wie Materialdichte, Faserorientierung, Schichtaufbau und Furnieranteil systematisch untersucht und in mechanische Prüfverfahren integriert. Die resultierenden Versuchsreihen lieferten belastbare Kennwerte für die Druck-, Zug- und Biegefestigkeit. Diese wurden wiederum in Berechnungsmodelle überführt. Auf Basis dieser Daten konnten Struktur- und Steifigkeitsmodelle entwickelt werden, die eine dimensionierende Auslegung der Paneele für Innenwandanwendungen ermöglichen. Die Methoden bilden somit die Grundlage dafür, myzelbasierte Komponenten gezielt nach statischen Anforderungen zu planen und sicher in Baukonstruktionen einzusetzen.

(4) Es wurden Ingenieurbautechnische Methoden zur Vorhersage vom akustischen Verhalten von Bauteilen entwickelt

Zur Vorhersage des akustischen Verhaltens wurden Modellierungs- und Messverfahren entwickelt, die den Zusammenhang zwischen Porosität, Materialaufbau, Schichtkombinationen und Furnierstrukturen erfassen. Untersuchungen im Impedanzrohr und großmaßstäbliche Prüfungen zeigten, dass verschiedene Substrate unterschiedliche Absorptionsbereiche bedienen und dass Furniergitter die Schallabsorption insbesondere im mittleren und tiefen Frequenzbereich steigern können. Durch gezielte Planung der Furnierverstärkungsgitter können bestimmte Frequenzbereiche absorbiert werden. Darauf aufbauend wurden Entwurfsparameter

definiert, die es erlauben, eine gewünschte akustische Wirkung – beispielsweise für Büro- oder Besprechungsräume – schon im digitalen Modell zu erzeugen. Die entwickelten Methoden erlauben daher die gezielte akustische Leistungsplanung myzelbasierter Trennwandsysteme.

(5) Entstehende Bauteile wurden unter akustischen und strukturellen Gesichtspunkten charakterisiert

Die hergestellten Demonstratoren wurden umfassend charakterisiert und hinsichtlich ihrer akustischen und strukturellen Eigenschaften bewertet. Mechanische Tests bestätigten die Tragwirkung des integrierten Furniergitters und zeigten, wie Materialdichte und Schichtung die Biegefestigkeit beeinflussen. Akustische Messungen belegten eine wirksame Absorption insbesondere im für Sprachkommunikation relevanten Frequenzbereich, die über die Kombination verschiedener Gitterzellgrößen weiter optimiert werden konnte. Ergänzend wurden 3D-Scans zur Analyse von Verformungen und Schrumpfungsprozessen durchgeführt, die konkrete Ansätze zur Verbesserung der Produktionsgenauigkeit ermöglichten. Die Ergebnisse bestätigten, dass die Bauteile sowohl funktional leistungsfähig als auch gestalterisch variabel sind und sich für den Einsatz in raumakustisch wirksamen Innenwandsystemen eignen.

Verwertung der Ergebnisse und Ergebnistransfer

Im Rahmen des Forschungsvorhabens konnten mehrere Fachartikel, Konferenzbeiträge und Buchkapitel erfolgreich veröffentlicht werden. Zudem wurden mehrere öffentliche Ausstellungen, Radio- und Fernsehbeiträge sowie ein Podcast realisiert. In seinem „Haus der Zukunft“ präsentierte das Wissensmagazin Galileo auf Pro7 mehrere Demonstratoren aus den HOME Projekten und veröffentlichte eine Fernsehsendung zu den Myzeliumwänden. Eine Übersicht dieser Veröffentlichungen ist im *Kapitel Publikationen* zusammengestellt. Der finale Demonstrator von HOME 2.0 wurde auf der Exempla 2026 im Rahmen der Handwerksmesse München auf einem vom Fachgebiet EDEK der Universität Kassel kuratierten Stand präsentiert (Abbildung 97, Abbildung 98).



Quelle: EDEK

Abbildung 97 Messestand von EDEK auf der Exempla 2026 in München



Quelle: EXEMPLAmünchen 2026, Foto: Eva Jünger

Abbildung 98 Präsentation des Home 2.0 Demonstrators auf der EXEMPLAmünchen 2026

An dem Forschungsvorhaben waren außerdem die Unternehmen Furwa Furnierkanten und Netter GmbH beteiligt. Dadurch konnte aktuelles Industrie-Know-how im Bereich der Furnierkantenherstellung sowie der Verdichtungstechnologie über Vibrationstische einfließen. Gleichzeitig ließen sich Rückschlüsse auf realistische Verwertungsszenarien ziehen. Den beteiligten Unternehmen wird somit die Möglichkeit eröffnet, neue Marktanwendungen zu entwickeln und zu erschließen.

Im Folgenden wird eine Bewertung des Vorhabens hinsichtlich seiner wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Anschlussfähigkeit vorgenommen.

Wissenschaftliche Anschlussfähigkeit

Die entwickelten ingenieurbautechnischen Methoden erlauben erste Abschätzungen des statischen und akustischen Verhaltens der Myzelverbundpaneele. Sie berücksichtigen Materialeigenschaften, Schichtaufbau und Furnierverstärkungen und liefern Hinweise zur Tragfähigkeit, Durchbiegung sowie Schallabsorption und Schalldämmung. Die Ergebnisse bieten eine erste Grundlage für den Transfer in Planungs- und Entwurfsprozesse und unterstützen die Gestaltung modularer, anpassungsfähiger Trennwandsysteme, ohne bereits als finale Normierungsgrundlage zu gelten.

Die beteiligten Fachgebiete führen derzeit weiterführende Forschungsprojekte zu Myzelium im Bauwesen durch, darunter das Projekt *My.Le*, in dem dämmende Ziegelbauteile aus einer Kombination von Myzelium und Lehm im 3D-Druck entwickelt werden, sowie das Projekt *MyCeiling*, das die Erforschung tragender Deckenschalen aus verdichtetem und verstärktem Myzelium zum Ziel hat (Universität Kassel & KIT).

Der wissenschaftliche Nachwuchs wurde durch forschende Lehre unterstützt. Zu diesem Zweck wurde an der Universität Kassel das interdisziplinäre Seminar „Transdisziplinäres Gestalten, Experimentieren und Lernen mit und von Pilzen" in Zusammenarbeit mit Prof. Dr. Susanne Ritzmann vom Fachgebiet Produktdesign der Kunsthochschule sowie Prof. Dr. Ewald Langer vom Fachgebiet Ökologie entwickelt. Zudem wurde ein Biolabor an der Kunsthochschule für Lehrzwecke eingerichtet. Das Seminar und das Biolabor wurden über die Zentrale Lernförderung der Universität Kassel finanziert.

2026 sind noch weitere wissenschaftliche Publikationen der Projektergebnisse in Fachzeitschriften geplant.

Wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Mittelfristig strebt das Forschungsteam an, die digitale, industrielle Fertigung von holzbewehrten Myzeliumbauteilen in Deutschland weiterzuentwickeln. Aufbauend auf den Demonstratoren werden Robotik-gestützte Materialauftrags- und Verdichtungsprozesse skalierbar gemacht, wobei digitale Prozesssteuerung und Sensortechnik die Qualität und Reproduzierbarkeit sichern. Das Team arbeitet aktiv daran, Industriepartner zu identifizieren, einzubinden und für die Umsetzung modularer, demontierbarer Bauteile zu begeistern, um sowohl effiziente Produktion als auch Kreislaufwirtschaft entlang des gesamten Lebenszyklus zu ermöglichen. So sollen Myzeliumbauteile mittelfristig in industriellem Maßstab hergestellt und in nachhaltige Innenraumsysteme integriert werden.

Zur Förderung der Gründung eines Start-ups durch Mitarbeiter der Universität Kassel nahmen die wissenschaftlichen Mitarbeitenden N. Nolte, E. Özdemir und A. Rossi am Startup Wettbewerb Startup Hack Nordhessen 2024 teil. Mit ihrer innovativen Idee, modulare, 3D-gedruckte Schalungen für Myzeliumbauteile zu entwickeln, konnten sie den ersten Platz erreichen. Dieses Konzept ermöglicht eine präzise, reproduzierbare und effiziente Fertigung nachhaltiger Myzeliumkomponenten und legt den Grundstein für eine industrielle Umsetzung. Gleichzeitig zeigt die erfolgreiche Teilnahme, wie Forschungsergebnisse aktiv in praxisrelevante Anwendungen und Unternehmensgründungen transferiert werden können, um die Entwicklung zirkulärer und biobasierter Bauprodukte voranzutreiben.

Publikationen

Fachzeitschriften

Rossi, A., Nolte, N., Özdemir, E., Eversmann, P., Saeidi, N., Javadian, A., Hebel, D., Dwan, A., Ren, S., Acosta, I., Watts, J., Wurm, J. (2024). Upscaling Mycelium-Based Composites: Strategies for Biofabrication of Sustainable Building Components. In *Fabricate 2024: Creating Resourceful Futures* (pp. 130–137). UCL Press. https://doi.org/10.2307/jj.11374766.20

Özdemir, E., Rossi, A. & Eversmann, P. MycoCurva: stay-in-place fabric formworks for curved veneer-reinforced mycelium building components. *Archit. Struct. Constr.* **5**, 16 (2025). https://doi.org/10.1007/s44150-025-00134-6

Konferenzen

Dwan, A. (2024). Myzelium als Schallabsorber. In *DAGA 2024: 50. Jahrestagung für Akustik, 18.–21. März 2024, Hannover.*

Özdemir, E., Nolte, N., Eversmann, P. (2024). Poster Präsentation. Future of Construction 2024 Programme USI Mendrisio, Switzerland 5-7 November

Zeitschriften, Bücher

RWTH Aachen University. (2025). *Material Flows* (A. Sowa & M. Hladik, Hrsg.). RWTH Aachen University. ISBN 978-3-00-082070-0.

Özdemir, E., Nolte, N., & Eversmann, P. (in press). Additive manufacturing strategies for enabling large-scale mycelium-based composites. In D. Ozkan (Hrsg.), *Mycology for architecture*.

Podcast, Radio, Fernsehen

Hessen schafft Wissen Podcast. (2024). Philipp Eversmann: Pilze als Öko-Baustoff der Zukunft. *Hessen schafft Wissen Podcast.* https://www.hessen-schafft-wissen.de/artikel/podcast-philipp-eversmann (Abgerufen am 19.08.2025)

hr-Wissensmagazin. (2024). Pilze – die verborgenen Netzwerker. https://www.hr-inforadio.de/programm/der-tag/der-tag-pilze--die-verborgenen-netzwerker-,epg-di-14118.html (Abgerufen am 19.08.2025)

Sat 1. (2023). Pilze als Baumaterial. https://www.1730live.de/pilze-als-baumaterial/ (Abgerufen am 19.08.2025)

Pro7 Galileo (2026). Haus der Zukunft. https://www.joyn.de/serien/das-galileo-haus-der-zukunft. Folge 2 ab Minute 18:00 (Abgerufen am 08.05.2026)

Ausstellungen

Chidori Bunka. (2025). *Material flows* [Ausstellung]. Kuratiert von A. Sowa & M. Hladik. 26.4-30.6.2025, Chidori Bunka, Kita-Kagaya, Osaka.

Staatstheater Mainz. (2024). *Poltikum – ein Tag für Kunst und Politik* [Ausstellung]. Kuratiert von D. Marino & K. Schleicher. 21.-24.11.2024, Staatstheater Mainz, Mainz.

GRASSI Museum for Applied Arts. (2024-2025). FUTURES. Materials and Design of tomorrow [Austellung]. Kuratiert von Dr. S. Peters. 21.11.2024-24.08.2025, Leipzig.

Formnext Messe. BE-AM Symposium (2024). Ausstellung Prototyp Myzelium Wall Myco-Lock. Nov 19.-22.11.2024, Frankfurt am Main.

Orgatec 2024, hall 4, stand E030, KölnMesse. (2024). Circular Biomaterials, Special area on circular biomaterials. [Austellung]. Kuratiert von Dr. S. Peters und D. Drewes. 22.-25.10.2024, Cologne.

German Ecodesign Award 2024. (2024). Exhibition at the Metropolenhaus. [Austellung]. Kuratiert von German Ecodesign Award. 20.-24.09.2024, Berlin.

UNI:lokal. (2024). *Forschungsnetzwerk Material und Technologie MUT* [Ausstellung]. Kuratiert von K. Meckbach. 26.4-15.6.2024, UNI:lokal, Kassel.

Architectured Materials Across Scales. (2023). *Poster & Object Viewing.* [Ausstellung]. Kuratiert von C. Wenig. 13.-14.12.2023, Conference Center of Max Planck Society, Berlin.

Mitwirkende

Autorinnen und Autoren

Prof. Philipp Eversmann

Eda Özdemir

Nadja Nolte

Ole Weyhe

Prof. Dirk Hebel

Nazanin Saeidi

Alireza Javadian

Prof. Dr. Jan Wurm

Tomas Gomez

Laura Orfali Soria

Andreas Bironт

Albert Dwan

Saar Driessen

Simon Lut

Claudia Di Noi

Richa Saini

Fachliche Betreuung

Dr. Jan Weckendorf, Referat WB 3 - Forschung und Innovation im Bauwesen

Kurzbiographien

Univ. Prof. Philipp Eversmann



Philipp Eversmann ist eingetragener Architekt in München und Professor an der Universität Kassel, wo er das Fachgebiet Experimentelles und Digitales Entwerfen und Konstruieren (EDEK) leitet. Seine Forschungsgruppe konzentriert sich auf digitale Entwurfs- und Konstruktionsmethoden unter Verwendung nachhaltiger Materialien und robotergestützter additiver Fertigungsverfahren, wie z. B. erneuerbare und biobasierte Baumaterialien, die von Massivholzelementen über Endlosholzfasern bis hin zu Abfallpartikeln und lebenden Materialien reichen. Von 2014 bis 2016 war er Ausbildungsleiter des Nationalen Forschungsschwerpunkts NCCR Digital Fabrication an der ETH Zürich, wo er einen neuen Masterstudiengang mit Schwerpunkt auf Robotertechnologien in der Architektur aufbaute. Als Gastprofessor leitete er von 2011 bis 2014 Architekturforschungsklassen an der EPF Lausanne, von 2011 bis 2014 an der Ecole Spéciale d'Architecture in Paris und von 2012 bis 2014 an der TU München.

M.Sc. Eda Özdemir



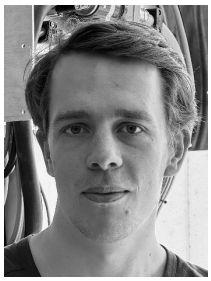
Eda Özdemir ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl EDEK an der Universität Kassel. Sie erwarb 2017 einen Bachelor of Science in Architekturwissenschaften am Politecnico di Milano, Italien, und schloss ihr Studium mit einem Forschungsprojekt über additive Fertigung für komplexen Betonguss ab. Im Jahr 2020 erhielt sie einen Master of Science im Studiengang Integrative Technologies and Architectural Design Research (ITECH) an der Universität Stuttgart. Während ihres Studiums war sie als wissenschaftliche Mitarbeiterin am ICD und ITKE tätig. Ihr Forschungsschwerpunkt liegt auf der additiven Fertigung im großen Maßstab und neuartigen digitalen Fertigungsmethoden unter Verwendung nachhaltiger Materialien für die Architektur. Derzeit forscht sie an verstärkten Myzelverbundwerkstoffen und führt Lehrtätigkeiten an der Universität Kassel durch.

Dipl.-Des Nadja Nolte



Nadja Nolte ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am EDEK, Universität Kassel. Sie erhielt ihr Diplom in Produktdesign im Jahr 2021 von der Kunsthochschule Kassel. Gegen Ende ihres Studiums fokussierte sie sich auf den Bereich der nachhaltigen Materialien und Fermentation mit dem Schwerpunkt auf Myzelmaterialien. Dementsprechend gründete sie 2019 das BIOLAB an der Kunsthochschule mit, das seither eine Plattform für Gestaltung und Forschung an der Schnittstelle von Design, Kunst und Biologie ist. Seit August 2021 arbeitet Nadja bei EDEK. Sie erforscht nun die Kombination von nachhaltigen, wachsenden Materialien mit computergestütztem Design und digitalen Fabrikationsstrategien.

M.Sc. Ole Weyhe



Ole Weyhe ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl EDEK an der Universität Kassel. Er erwarb 2025 einen Master of Science in Architektur an der Universität Kassel. Während seines Studiums war er als Mitarbeiter an verschiedenen Forschungsprojekten zum Thema der robotergestützten Bauteilfertigung von neuartigen, nachhaltigen Bauteilen beteiligt. Sein Fokus lag dabei auf robotischem Tooldesign und Prozessentwicklung und Optimierung. Zurzeit forscht er an Förder- und Fertigungstechniken von Myzelverbundwerkstoffen.

Prof. Dirk Hebel



Dirk E. Hebel ist Professor für Nachhaltiges Bauen und Dekan der Fakultät für Architektur am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Deutschland, sowie Principal Investigator des Projekts Urban Bio-cycles am Future Cities Laboratory in Singapur. Seine Arbeiten wurden in zahlreichen Ausstellungen weltweit gezeigt, zuletzt u.a. in SORGE UM DEN BESTAND, BDA, Berlin (2020/21), CRITICAL ZONES, ZKM Karlsruhe (2020), FUTURIUM Berlin (2019), der Beazly-Design of the Year Exhibition (2018), Er erhielt den Green Solution Award 2021, den Deutschen Materialpreis 2019, zwei Innovationspreise "Bauhaus 100 - Prototyping the Future" der Bundesregierung und der deutschen Wirtschaft 2019.

Dr. Nazanin Saeidi



Dr. Nazanin Saeidi ist derzeit Forschungsleiterin am Lehrstuhl für Nachhaltiges Bauen am Karlsruher Institut für Technologie und Co-Principal Investigator des Urban-Biocycle-Projekts am Future Cities Laboratory des Singapore-ETH Centre in Singapur. Im Rahmen ihrer Promotion an der Nanyang Technological University in Singapur arbeitete sie zum Thema "Engineering microbes to sense and eradicate a human pathogen", das 2011 von der Nature Publishing Group in der Rubrik Molecular Systems Biology veröffentlicht wurde und über das in mehr als 70 öffentlichen und akademischen Medien berichtet wurde. Im Jahr 2013 arbeitete sie als Postdoktorandin am Singapore Membrane Technology Centre. Im Jahr 2014 wechselte sie an die Abteilung für Bau- und Umwelttechnik der National University of Singapore. Sie hat mehrere Auszeichnungen und Anerkennungen von verschiedenen Konferenzen erhalten und wurde von MIT Technology Review als eine der 20 aufstrebenden Innovatoren im asiatisch-pazifischen Raum im Jahr 2020 genannt.

Prof. Dr. Jan Wurm



Dr. Jan Wurm ist Professor für Regeneratives Design an der Fakultät für Architektur der Universität KU Leuven und Forschungs- und Innovationsleiter für Arup in Europa. Er erwarb 1999 ein Architekturdiplom an der RWTH Aachen, gefolgt von einer Promotion an der Fakultät für Architektur im Jahr 2005. Jan Wurm war Direktor bei Arup und leitete die Bereiche Foresight, Forschung und Innovation in Deutschland, das Forschungs- und Innovationsportfolio des Unternehmens in Europa und das Material Skillnetwork von Arup in Europa. Als international anerkannter Experte für nachhaltige Materialien und Bausysteme hat er eine Reihe von preisgekrönten angewandten Forschungsprojekten geleitet, die das Potenzial biobasierter Prozesse und Materialien für das Bauwesen erforschen, wie z.B. SolarLeaf (2013), BioBuild (2015) und FORESTA (2021) - ein Akustikausbausystem auf Basis von Holzmyzelen. An der KUL baut er derzeit ein Forschungsprogramm für Biofabrikation und Biokonstruktion auf.

Albert Dwan



Albert Dwan ist leitender Akustikingenieur bei der Beratungsfirma Arup Deutschland GmbH. Herr Dwan schloss 2010 sein Studium an der Johns Hopkins University mit einem Master in Audiowissenschaften ab und ist seit 2010 bis heute beruflich als Akustikberater, Designer und Forscher tätig. Derzeit koordiniert er unter anderem interne Forschungsprojekte bei Arup. Seine Forschungsschwerpunkte sind nachhaltige Alternativen für akustische Behandlungen sowie das subjektive Erleben und die psychologische Interpretation von akustischen Umgebungen in Innenräumen, auch als Soundscape-Studien bezeichnet. Er ist Mitglied von INCE.

Saar Driessen



Saar Driessen ist Bauingenieurin bei Arup Netherlands. Sie erwarb 2023 ihren Master-Abschluss an der Technischen Universität Eindhoven, wo sie Bauingenieurwesen und Konstruktion studierte. Ihre Abschlussarbeit befasste sich mit demontierbaren Verbindungen für 3D-gedruckte Betonelemente, wodurch sie Einblicke in die digitale Fertigung und demontierbare Verbindungen gewann. Seit 2023 arbeitet sie bei Arup als Bauingenieurin und wirkt dort an interdisziplinären Projekten mit. Innerhalb dieser Projekte konzentriert sie sich auf die Förderung der nachhaltigen Materialverwendung und den Einsatz von computergestütztem Design.

Claudia Di Noi



Claudia Di Noi ist ausgebildete Bauingenieurin und Architektin und arbeitet als Senior Sustainability Consultant mit Schwerpunkt Lebenszyklusanalysen (LCA) bei Arup in Berlin. Claudia ist Expertin für die Bewertung der ökologischen und sozialen Auswirkungen von Produkten, Prozessen und Unternehmen in verschiedenen Branchen, darunter Bauwesen, Rohstoffe, Chemie und Energie. Sie verfügt über langjährige Erfahrung auf Gebäude-, Material- und Prozessebene, einschließlich der Anwendung international anerkannter LCA-Rahmenwerke und -Tools. Dank ihrer umfassenden Expertise in der Quantifizierung und Optimierung von Lebenszyklen hat sie mehrere multidisziplinäre Projekte geleitet, die zu Emissions Einsparungen beigetragen haben. Darüber hinaus ist sie eine erfahrene Trainerin für LCA-Methodik und verschiedene LCA-Software und -Datenbanken.



Nicole Varriale

Mit einem Hintergrund in Bauingenieurwesen und Architektur ist Nicole seit 2023 als Nachhaltigkeitsberaterin im Team für Klima- und Nachhaltigkeitsdienstleistungen bei Arup tätig. Ihre Arbeit konzentriert sich in erster Linie auf die Durchführung von Lebenszyklusanalysen für Neubau- und Ausstattungsprojekte, um Kunden dabei zu helfen, die Umweltauswirkungen ihrer Entwicklungen zu verstehen. Darüber hinaus engagiert sich Nicole aktiv in Nachhaltigkeitszertifizierungssystemen wie LEED und hat kürzlich die LEED Green Associate-Zertifizierung erworben.

M.Sc. Richa Saini



Richa ist Designforscherin mit Schwerpunkt auf der digitalen Herstellung nachhaltiger Biomaterialien und arbeitet derzeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fachbereich Design and Engineering of Construction and Architecture der KU Leuven. Sie hat einen Master-Abschluss in Industriedesign von der TU/e in den Niederlanden (2023) und einen Bachelor-Abschluss in Innenarchitektur von A.P.I.E.D. in Indien (2017). Sie arbeitete an mehreren Projekten im Bereich des Innen- und Möbeldesigns, was ihr umfangreiche industrielle Erfahrung im Produkt- und Raumdesign verschaffte. Während ihres Masterstudiums erforschte sie nachhaltige Materialien durch Kompositmaterialien auf Mycelbasis und entwickelte schallabsorbierende Akustikplatten. Ihr Abschlussprojekt „mycoSonic“ wurde auf der Dutch Design Week 2023 vorgestellt. Durch die Kombination von Industriedesign, Biodesign und Innenarchitektur möchte sie innovative Lösungen entwickeln, die die Verbindung zwischen Mensch und Natur stärken.

Literaturverzeichnis

Abhijith, R., Ashok, A., & Rejeesh, C. R. (2018). Sustainable packaging applications from mycelium to substitute polystyrene: A review. *Materials Today: Proceedings*, 5(1, Part 2), 2139–2145. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.09.211

Adamatzky, A., Ayres, P., Belotti, G., & Wösten, H. (2019). *Fungal architecture* (arXiv:1912.13262). arXiv. http://arxiv.org/abs/1912.13262

Al Jaber, A., Martinez-Vazquez, P., & Baniotopoulos, C. (2023). Hindernisse und Wegbereiter für die Einführung des Kreislaufwirtschaftskonzepts im Bausektor: Eine systematische Literaturübersicht. *Buildings*, 13(11), 2778. https://doi.org/10.3390/buildings13112778

Arup, & Ellen MacArthur Foundation. (2018). *Von den Prinzipien zur Praxis: Die Wertschöpfung der Kreislaufwirtschaft im Immobilienbereich.* (Abgerufen am 19.08.2025)

Arup. (2020, February). *Realising the value of the circular economy in real estate.* https://www.arup.com/insights/realising-the-value-of-the-circular-economy-in-real-estate (Abgerufen am 19.08.2025)

Bakker, C., den Hollander, M., van Hinte, E., & Zijlstra, Y. (2014). *Produkte, die halten: Produktdesign für zirkuläre Geschäftsmodelle*. TU Delft Library.

Bayer, E., & McIntyre, G. (2007). *Verfahren zur Herstellung von gezüchteten Materialien und daraus hergestellten Produkten* (Patent Nr. US9485917B2). US-Patent- und Markenamt. https://patents.google.com/patent/US9485917B2 (Abgerufen am 19.08.2025)

Bertoldi, M., & Bianchi, F. (2025). Automatisierte Produktion von Verbundprodukten auf Myzelbasis. In *Digital and Circular Economy: Innovations in Sustainable Manufacturing* (S. 45–59). Springer Vieweg. https://doi.org/10.1007/978-3-658-45889-8_4

Bocken, N. M. P., de Pauw, I. C., Bakker, C., & van der Grinten, B. (2016). Produktdesign und Geschäftsmodellstrategien für eine Kreislaufwirtschaft. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 33(5), 308–320.

Cambridge Institute for Sustainability Leadership. (n.d.). *Was ist eine Wertschöpfungskette?* https://www.cisl.cam.ac.uk/education/graduate-study/pgcerts/value-chain-defs (Abgerufen am 19.08.2025)

Chan, X. Y., Saeidi, N., Javadian, A., Hebel, D. E., & Gupta, M. (2021). Mechanical properties of dense mycelium-bound composites under accelerated tropical weathering conditions. *Scientific Reports*, 11, 22112. https://doi.org/10.1038/s41598-021-01598-4

Costalonga Martins, V., Cutajar, S., van der Hoven, C., Baszyński, P., & Dahy, H. (2020). FlexFlax Stool: Validation of moldless fabrication of complex spatial forms of natural fiber-reinforced polymer (NFRP) structures. *Applied Sciences*, 10(9). https://doi.org/10.3390/app10093278

Das, A. K., Agar, D. A., Rudolfsson, M., & Larsson, S. H. (2021). A review on wood powders in 3D printing: Processes, properties and potential applications. *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 241–255. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.07.110

Dessi-Olive, J. (2019). Monolithic mycelium: Growing vault structures. 8th International Conference on Non-Conventional Materials and Technologies. (Abgerufen am 19.08.2025)

Dewagoda, K. G. (2024). Design for Circular Manufacturing and Assembly (DfCMA): Synergising circularity and modularity in the building construction industry. *Sustainability*, 16(21), 9192. https://doi.org/10.3390/su16219192

DIN 4109 | 1989-11. Schallschutz im Hochbau; Anforderungen und Nachweise.

DIN 4109-1:2018-01. Schallschutz im Hochbau – Teil 1: Mindestanforderungen.

DIN EN 1990:2021-10. Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung.

DIN EN 1991-1-1. Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke.

DIN EN ISO 10534-2. Akustik – Bestimmung der akustischen Eigenschaften in Impedanzrohren – Teil 2.

Ellen MacArthur Foundation. (2013). Auf dem Weg zur Kreislaufwirtschaft, Band 1.

Eversmann, P., Ochs, J., Heise, J., Akbar, Z., & Böhm, S. (2021). Additive Timber Manufacturing: A Novel, Wood-Based Filament and Its Additive Robotic Fabrication Techniques for Large-Scale, Material-Efficient Construction. *3D Printing and Additive Manufacturing.* https://doi.org/10.1089/3dp.2020.0356

Fairs, M. (2013, Oktober 20). Mycelium Chair by Eric Klarenbeek is 3D-printed with living fungus. *Dezeen.* https://www.dezeen.com/2013/10/20/mycelium-chair-by-eric-klarenbeek-is-3d-printed-with-living-fungus/ (Abgerufen am 19.08.2025)

Gandia, A., Van Den Brandhof, J. G., Appels, F. V. W., & Jones, M. P. (2021). Flexible Fungal Materials: Shaping the Future. *Trends in Biotechnology*, 39(12), 1321–1331. https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2021.03.002

Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). Die Kreislaufwirtschaft – Ein neues Paradigma der Nachhaltigkeit? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757–768.

Girometta, C., Picco, A. M., Baiguera, R. M., Dondi, D., Babbini, S., Cartabia, M., Pellegrini, M., & Savino, E. (2019). Physico-Mechanical and Thermodynamic Properties of Mycelium-Based Biocomposites: A Review. *Sustainability*, 11(1), 281. https://doi.org/10.3390/su11010281

Göbert, A., Deetman, A., Rossi, A., Weyhe, O., & Eversmann, P. (2022). 3DWoodWind: Robotic winding processes for material-efficient lightweight veneer components. *Construction Robotics*, 6. https://doi.org/10.1007/s41693-022-00067-2

Goidea, A., Floudas, D., Andréen, D., Burry, J., Sabin, J., Sheil, B., & Skavara, M. (2020). Pulp Faction: 3D printed material assemblies through microbial biotransformation. In *Fabricate 2020* (S. 42–49). UCL Press; JSTOR. https://doi.org/10.2307/j.ctv13xpsvw.10

GlobalABC/UNEP. (2024/25). *Global Status Report for Buildings and Construction 2024/25*. (Abgerufen am 19.08.2025)

Heisel, F., & Hebel, D. E. (2019). Pioneering Construction Materials through Prototypological Research. *Biomimetics*, 4(3), 56. https://doi.org/10.3390/biomimetics4030056

Heisel, F., Lee, J., Schlesier, K., Rippmann, M., Saeidi, N., Javadian, A., Nugroho, A. R., Mele, T. V., Block, P., & Hebel, D. E. (2017). Design, Cultivation and Application of Load-Bearing Mycelium Components: The MycoTree at the 2017 Seoul Biennale of Architecture and Urbanism. *International Journal of Sustainable Energy Development*, 6(1), 296–303. https://doi.org/10.20533/ijsed.2046.3707.2017.0039

Illankoon, C., & Vithanage, S. C. (2023). Closing the loop in the construction industry: A systematic literature review on the development of circular economy. *Journal of Building Engineering*, 76, 107362. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107362

Javadian, A., Ferrand, H. L., Hebel, D. E., & Saeidi, N. (2020a). Application of Mycelium-Bound Composite Materials in Construction Industry: A Short Review. *IOP Conference Series*, 9.

Javadian, A., Ferrand, H. L., Hebel, D., & Saeidi, N. (2020b). Application of Mycelium-Bound Composite Materials in Construction Industry: A Short Review. https://www.semanticscholar.org/paper/Application-of-Mycelium-Bound-Composite-Materials-A-Javadian-Ferrand/9070067ca5a3aed37daea39d88dd5dfa40ee009b (Abgerufen am 19.08.2025)

Jiang, L., Walczyk, D., McIntyre, G., Bucinell, R., & Tudryn, G. (2017). Manufacturing of biocomposite sandwich structures using mycelium-bound cores and preforms. *Journal of Manufacturing Processes*, 28, 50–59. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.04.029

Johnson, M. A., & Carlson, J. A. (1978). Mycelial paper: A potential resource recovery process? *Biotechnology and Bioengineering*, 20(7), 1063–1084. https://doi.org/10.1002/bit.260200708

Jones, M., Gandia, A., John, S., & Bismarck, A. (2020). Leather-like material biofabrication using fungi. *Nature Sustainability*, 4(1), 9–16. https://doi.org/10.1038/s41893-020-00606-1

Jones, M., Huynh, T., Dekiwadia, C., Daver, F., & John, S. (2017). Mycelium Composites: A Review of Engineering Characteristics and Growth Kinetics. *Journal of Bionanoscience*, 11(4), 241–257. https://doi.org/10.1166/jbns.2017.1440

Jones, J., Lee, K., & Huang, Y. (2025). Modulares Design und Vorfertigung in energieorientierter Kreislaufarchitektur. *Frontiers in Sustainable Cities*, 1569362. https://doi.org/10.3389/frsc.2025.1569362

Kakkos, E., Heisel, F., Hebel, D. E., & Hischier, R. (2019). Environmental assessment of the Urban Mining and Recycling (UMAR) unit by applying the LCA framework. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 225(1), 012043. https://doi.org/10.1088/1755-1315/225/1/012043

Kariz, M., Sernek, M., Obućina, M., & Kuzman, M. K. (2018). Effect of wood content in FDM filament on properties of 3D printed parts. *Materials Today Communications*, 14, 135–140. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2017.12.016

Le Duigou, A., Barbé, A., Guillou, E., & Castro, M. (2019). 3D printing of continuous flax fibre reinforced biocomposites for structural applications. *Materials & Design*, 180, 107884. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107884

Liu, H., He, H., Peng, X., Huang, B., & Li, J. (2019). Three-dimensional printing of poly(lactic acid) bio-based composites with sugarcane bagasse fiber: Effect of printing orientation on tensile performance. *Polymers for Advanced Technologies*, 30(4), 910–922. https://doi.org/10.1002/pat.4524

Mogu Srl. (2022). *Mogu Acoustic*. https://mogu.bio/acoustic-collection/ (Abgerufen am 19.08.2025)

Mosen, F., Trautz, M., Beger, A.-L., et al. (2017). Fungal mycelium as a building material. *Proceedings of IASS Annual Symposia*, 2017(1), 1–7.

MycoWorks. (n.d.). *MycoWorks*. https://www.mycoworks.com/ (Abgerufen am 19.08.2025)

Özdemir, E., Saeidi, N., Javadian, A., Rossi, A., Nolte, N., Ren, S., Dwan, A., Acosta, I., Hebel, D. E., Wurm, J., & Eversmann, P. (2022). Wood-Veneer-Reinforced Mycelium Composites for Sustainable Building Components. *Biomimetics*, 7(2), 39. https://doi.org/10.3390/biomimetics7020039

Pelletier, M. G., Holt, G. A., Wanjura, J. D., Greetham, L., McIntyre, G., Bayer, E., & Kaplan-Bie, J. (2019). Acoustic evaluation of mycological biopolymer, an all-natural closed cell foam alternative. *Industrial Crops and Products*, 139, 111533. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111533

PermaFungi. (n.d.). *PermaLIFE: Großflächige Produktion von Mykomaterialien aus städtischen organischen Abfällen*. https://www.permafungi.be/en/permalife/ (Abgerufen am 19.08.2025)

Rossi, A., Javadian, A., Acosta, I., Özdemir, E., Nolte, N., Saeidi, N., Dwan, A., Ren, S., Vries, L., Hebel, D., Wurm, J., & Eversmann, P. (2022). HOME: Wood-Mycelium Composites for CO2-Neutral, Circular Interior Construction and Fittings. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1078(1), 012068. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1078/1/012068

Silverman, J., Cao, H., & Cobb, K. (2020). Development of Mushroom Mycelium Composites for Footwear Products. *Clothing and Textiles Research Journal*, 38(2), 119–133. https://doi.org/10.1177/0887302X19890006

Soh, E., Chew, Z. Y., Saeidi, N., Javadian, A., Hebel, D., & Le Ferrand, H. (2020). Development of an extrudable paste to build mycelium-bound composites. *Materials & Design*, 195, 109058. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109058

Ulu, E., Korkmaz, E., Yay, K., Burak Ozdoganlar, O., & Burak Kara, L. (2015). Enhancing the Structural Performance of Additively Manufactured Objects Through Build Orientation Optimization. *Journal of Mechanical Design*, 137(11). https://doi.org/10.1115/1.4030998

Umweltbundesamt. (n.d.). *Umweltbundesamt – Abfall- und Kreislaufwirtschaft.* https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/abfall-kreislaufwirtschaft (Abgerufen am 19.08.2025)

VDI 2569 (2019). Schallschutz und akustische Gestaltung in Büros.

Wattanavichean, N., Phanthuwongpakdee, J., Koedrith, P., Laoratanakul, P., Thaithatgoon, B., Somrithipol, S., & Boonyuen, N. (2025). Durchbrüche auf Myzelbasis: Erforschung der Kommerzialisierung, Forschung und Möglichkeiten der nächsten Generation. *Kreislaufwirtschaft und Nachhaltigkeit.* https://doi.org/10.1007/s43615-025-00539-x

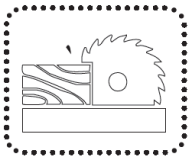
Weil, K. E. (1985). PORTER, Wettbewerbsvorteile, Schaffung und Erhalt überlegener Leistung. *Revista De Administração De Empresas*, 25(2), 82–84. https://doi.org/10.1590/s0034-75901985000200009

Weltwirtschaftsforum. (2025). *Wie modulare Bauweise Produktivität und Kreislaufwirtschaft fördert.*

Anhang

Wertschöpfungskette und Stakeholder

Wertbeitrag pro Stakeholder: Der Wertbeitrag jedes Stakeholders wird neu definiert, um Regeneration, Wiederverwendung und Skalierbarkeit zu priorisieren, und im folgenden Unterabschnitt detailliert beschrieben:

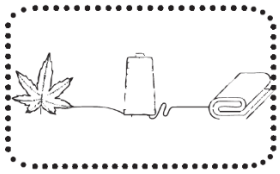


Holzverarbeitende Industrie

Potenzielle Partner auf dem deutschen Markt: Fritz Kohl https://fritz-kohl.de/en/ ; Danzer https://www.danzer.com/en/

Rolle: Die holzverarbeitende Industrie liefert große Mengen an Sägemehl – ein wichtiger Rohstoff für die Herstellung von Myzelplatten, bei der Holzreststoffe in hochwertige biogene Rohstoffe umgewandelt werden. Sägemehl entsteht bei der Holzverarbeitung, beim Schneiden oder Hobeln und ist ein Beispiel für die Verwertung von Abfällen, da aus einem geringwertigen Reststoff eine Ressource für die Herstellung biobasierter Verbundwerkstoffe wird. Die zertifizierte, rückverfolgbare Beschaffung unterstützt eine nachhaltige Forstwirtschaft und eine zuverlässige lokale Versorgung.

<table>
<tr><td>Aktuelle Vorteile
Liefert erneuerbare, biobasierte Materialien für Myzel-Verbundwerkstoffe
Verwertet minderwertige Holzabfälle zu hochwertigen Rohstoffen
Unterstützt CO2-neutrale, kreislauffähige Materialkreisläufe
Ermöglicht lokale, ressourceneffiziente Beschaffung
Entspricht FSC-zertifizierten und umweltschonenden Forstwirtschaftspraktiken</td><td>KPIs
% wiederverwendete oder verwertete Sägespäne
FSC-Zertifizierungsrate
Beschaffung aus lokalem Umkreis
Konsistenz des Feuchtigkeitsgehalts
% Sägeausbeute/Materialverfügbarkeit</td></tr>
<tr><td colspan="2">Anforderungen der Stakeholder an eine Kleinproduktion</td></tr>
<tr><td><u>Mittel:</u>
Stabiler Absatzmarkt für minderwertige Holzreste (Sägemehl)
Koordination mit lokalen Myzelzüchtern hinsichtlich Menge und Qualität
Sicherstellung der Materialtauglichkeit (sauberes, unbehandeltes Sägemehl)</td><td><u>Technologien:</u>
Einfache Staubabsaugung und -abscheidung
Werkzeuge zur Überwachung des Feuchtigkeitsgehalts
Manuelle oder halbautomatische Verpackung und Handhabung für Kleinserienlieferungen</td></tr>
<tr><td colspan="2">Anforderungen der Stakeholder an eine Produktion im industriellen Maßstab</td></tr>
<tr><td><u>Mittel:</u>
Langfristige Verträge oder Partnerschaften mit Bio-Herstellern
Klare Produktspezifikationen für Partikelgröße, Feuchtigkeit und Reinheit
Zertifizierung für nachhaltige Beschaffung (FSC/PEFC)
Integration in ein Materialrückverfolgungssystem (QR-Kennzeichnung, Chargenverfolgung, Materialpass)</td><td><u>Technologien:</u>
Staubabsaugungs- und Klassifizierungssysteme im industriellen Maßstab
Automatisierung von Sieb-, Trocknungs- und Verpackungslinien
Datensysteme für Chargenüberwachung, Bestandsverwaltung und Logistik
<u>Integration in digitale Lieferkettenplattformen und in BIM (Building Information Modeling)</u></td></tr>
<tr><td>Maßnahmen zur Produktionssteigerung:
Aufbau langfristiger Partnerschaften mit Herstellern biobasierter Produkte
Investitionen in Präzisionssysteme zur Sägemehlverarbeitung
Entwicklung einer Lager- und Logistikinfrastruktur vor Ort</td><td>Aktuelle Herausforderungen:
Ressourcenknappheit und Druck durch Abholzung
Zertifizierung und Einhaltung der Rückverfolgbarkeit
Kohlenstoffemissionen und Energieverbrauch</td></tr>
</table>

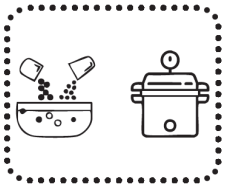


Hanffaserproduzenten

Potenzielle Partner auf dem deutschen Markt: BAFA gmbh https://bafa-gmbh.de/index.asp?

Rolle: Nebenprodukte aus dem Hanfanbau werden als erneuerbare, hochwertige Materialien angeboten und unterstützen so die Nachhaltigkeit von Produkten auf Myzelbasis. Hanfschäben, die als Nebenprodukt der Faserverarbeitung anfallen, eignen sich als Substrat für die MBC-Produktion.

Aktuelle Vorteile ▪ Lieferung biobasierter Substrate ▪ Verwertung landwirtschaftlicher Nebenprodukte ▪ Bodenregeneration ▪ Unterstützung der lokalen Wirtschaft	**KPIs** ▪ Konstante Liefermenge über das ganze Jahr ▪ Genauigkeit des Feuchtigkeitsgehalts ▪ Saisonale Ertragsstabilität ▪ Regionaler Beschaffungsradius ▪ Kohlenstoffarme Logistik
Anforderungen der Stakeholder an eine kleine Produktion	
Mittel ▪ Zugang zu lokalen oder regionalen Hanfbetrieben für die Ernte der Stängel ▪ Einfache Entrindungsanlage zur Trennung von Rinde und Fasern ▪ Saubere Lagerräume zur Erhaltung der Materialqualität	**Technologien** ▪ Manuelle oder kleine mechanische Entrindungsmaschinen ▪ Feuchtigkeitsmesser zur Qualitätskontrolle ▪ Handsortierung oder Siebung zur Gewährleistung einer einheitlichen Partikelgröße
Anforderungen der Interessengruppen für eine Produktion im industriellen Maßstab	
Mittel: ▪ Großflächiger Anbau mit zuverlässigen Erntezyklen ▪ Industrielle Entrindungs- und Sortieranlagen ▪ Standardisierte Abmessungen und Feuchtigkeitsgehalt der Rindenstücke für die biologische Verarbeitung ▪ Einhaltung von Umweltzertifizierungen (z. B. Bio, GACP)	**Technologien:** ▪ Automatisierte Entrindungs- und Reinigungssysteme ▪ Staubabsaugung und Fasertrennungseinheiten ▪ Förderbandbasierte Trocknungs- und Verpackungslinien ▪ Digitale Bestands- und Logistikverwaltung (z. B. Chargenverfolgung, QR-Kennzeichnung)
Maßnahmen zur Produktionssteigerung: ▪ Ausbau des Hanfanbau-Netzwerks durch Partnerschaften mit regionalen Lieferanten ▪ Investition in industrielle Entrindungsanlagen ▪ Entwicklung von Materialspezifikationen und Standards zur Rückverfolgbarkeit von Materialien ▪ Verbesserung der Lager- und Distributionslogistik	**Aktuelle Herausforderungen:** ▪ Marktfluktuaktionen und saisonale Abhängigkeit



Lieferanten für Getreidesporen

Potenzielle Partner auf dem deutschen Markt: Kineco, Mycelia (BE) Grown.bio, Ecovative, Mycolutions

Rolle: Der Getreidesporenlieferant spielt eine wichtige Rolle in der Kreislaufwertschöpfungskette, indem er den biologischen Impfstoff (Myzelsporen) liefert, der zur Kultivierung des Biomasse-Substrats verwendet wird. Er gewährleistet die Lebensfähigkeit, Reinheit und Konsistenz der Pilzkultur, was sich direkt auf das Wachstum, die Bindungsqualität und die endgültigen Materialeigenschaften der Myzel-basierten Verbundplatten auswirkt.

Aktuelle Vorteile ▪ Die steigende Nachfrage nach biobasierten Materialien schafft einen stabilen Markt für hochwertige Pilz-Getreidesporen. ▪ Getreidesporen sind ein hochwertiges Produkt mit geringem Volumen, das kleinen Produzenten wirtschaftliche Rentabilität bietet. ▪ Unterstützt regenerative Materialsysteme, indem es das Wachstum von Myzel auf nachwachsenden Substraten ermöglicht. ▪ Fördert Innovationen in der lokalen Biotechnologie und Landwirtschaft.	**KPIs** ▪ Lebensfähigkeit der Stämme ▪ Prozentualer Anteil der Sporenlieferungen ohne Kontamination ▪ Kolonisationsgeschwindigkeit und -konsistenz in Testsubstraten ▪ Effektive Lebensdauer bei Lagerung in der Kühlkette ▪ Möglichkeit zur Rückverfolgung von Pilzstämmen, Getreideherkunft und Produktionsdatum 3.
Anforderungen der Stakeholder an eine Produktion in kleinem Maßstab	
<u>Mittel</u> ▪ Zugang zu einer sterilen Laborumgebung ▪ Lieferung von sauberem Roggen- oder Hirsemehl ▪ Einfache Verpackung und Kühllagerung	**<u>Technologien:</u>** ▪ Druckkocher oder Autoklaven ▪ Laminar-Flow-Hauben, Biolabor oder sterile Räumlichkeiten ▪ Hilfsmittel zur manuellen Inokulation (Gläser oder Beutel)
Anforderungen der Interessengruppen für eine Produktion im industriellen Maßstab	
<u>Mittel:</u> ▪ Systeme zur Herstellung und Sterilisation großer Substratmengen ▪ Zuverlässige Stammbibliotheken und Qualitätskontrollverfahren ▪ Temperaturkontrollierte Lagerung und Logistik für die regionale Lieferung ▪ Einhaltung von GMP- oder ISO-Standards	**<u>Technologien:</u>** ▪ Industrielle Autoklaven oder Dampfsterilisatoren ▪ Automatisierte Maschinen zur Getreieinokulation und Abfüllung ▪ Kühlkettenlogistiksysteme ▪ Digitale Chargenverfolgung und Bestandsverwaltung
Maßnahmen zur Produktionssteigerung: ▪ Erweiterung von Pilzstamm-Bibliotheken ▪ Entwicklung einer regionalen Kühlkettenlogistik	**Aktuelle Herausforderungen:** ▪ Kontaminationsrisiko ▪ Begrenzte Verfügbarkeit von Ausrüstung ▪ Abhängigkeit von geschlossenen Kühlketten



Holzrahmenhersteller

Potenzielle Partner auf dem deutschen Markt: Bockelmann-Holz GmbH

https://www.bockelmann-holz.de/start.html

Rolle: Hersteller von Holzrahmen liefern präzise gefertigte Holzrahmen, die als tragendes Gerüst für Rahmenprofile für Verbundpaneele auf Myzelbasis dienen.

Aktuelle Vorteile ▪ Lieferung hochwertiger Strukturkomponenten, die für die Integrität und Modularität der Platten unerlässlich sind. ▪ Profitieren Sie von der steigenden Nachfrage nach biobasierten, vorgefertigten Systemen für den Innenausbau. ▪ Nutzung des vorhandenen Holz-Know-hows für den Einstieg in den Markt für zirkuläre und hybride Bauweisen. ▪ Die Verwendung von FSC-zertifiziertem, minderwertigem Holz sorgt für Kreislaufwirtschaft und Nachhaltigkeit.	**KPIs** ▪ Maßgenauigkeit, % der Rahmen, die die genauen Konstruktionstoleranzen erfüllen ▪ % FSC-zertifiziertes Holz, Anteil des Materials aus zertifiziert nachhaltiger Forstwirtschaft; Volumen der wiederverwendeten oder vermiedenen Rest- oder Ausschussware ▪ Produktionsvorlaufzeit, durchschnittliche Zeit für die Herstellung einer Charge von Rahmen

Bedürfnisse der Stakeholder für eine Produktion in kleinem Maßstab	
Mittel: ▪ Zugang zu kleinen Mengen FSC-zertifiziertem Holz ▪ Erfahrene Tischler für präzise Tischlerarbeiten ▪ Manuelle Montage einfacher modularer Rahmen	**Technologien:** ▪ Tischsägen, Fräsmaschinen und Klemmen ▪ Manuelle Vorrichtungen für Eckverbindungen und Dübel ▪ Feuchtigkeitsmesser für die Holzbehandlung
Anforderungen der Stakeholder für eine Produktion im industriellen Maßstab	
Mittel: ▪ Standardisierte Rahmenabmessungen und modulare Konstruktionsspezifikationen ▪ CNC-gesteuerte Fertigungslinien für die Großserienfertigung ▪ Verträge über nachhaltige Beschaffung und Zertifizierungssysteme ▪ Integration mit Design- und Produktmanagement-Software	**Technologien:** ▪ CNC-Fräsmaschinen und automatisierte Tischlereimaschinen ▪ 3D-Modellierungswerkzeuge (z. B. CAD/BIM) für Workflows vom Entwurf bis zur Fertigung ▪ Digitale Kennzeichnung (QR-Codes, Teileverfolgung) für Rückverfolgbarkeit ▪ Fertigungslinien mit robotergesteuerter Nagelung oder Dübelinsertion
Maßnahmen zur Produktionssteigerung: ▪ Einführung von CNC- und digitalen Fertigungswerkzeugen zur Verbesserung von Geschwindigkeit, Präzision und Wiederholbarkeit über alle Chargen hinweg. ▪ Standardisierung modularer Rahmenkonstruktionen ▪ Ausbau der FSC- oder PEFC-zertifizierten Holzversorgung ▪ Entwicklung reversibler Verbindungssysteme	**Aktuelle Herausforderungen:** ▪ Schwankungen in der Holzqualität und Feuchtigkeitskontrolle ▪ Zusammenarbeit mit Systemdesignern und Plattenherstellern – Toleranzen, Schnittstellen und Rahmengeometrie an die Spezifikationen der Myzelplatten anpassen.



Furnierhersteller

Potenzielle Partner auf dem deutschen Markt:
FURWA, https://www.furwa.com/

Rolle: Furnierhersteller liefern dünne, FSC-zertifizierte Holzfurniere, die Myzel-basierte Verbundplatten verstärken und deren strukturelle Festigkeit und akustische Eigenschaften verbessern.

Aktuelle Vorteile	**KPIs**
▪ Aufwertung von minderwertigem Holz durch Umwandlung in dünne Furnierlagen. ▪ Unterstützung des Übergangs zu biobasiertem, modularem Bauen durch die Lieferung flexibler Verstärkungsmaterialien. ▪ Beteiligung an nachhaltigen Forstwirtschaftsketten durch die Beschaffung und Verarbeitung von FSC-zertifiziertem Holz. ▪ Erschließung neuer Märkte für zirkuläre Innenausstattungssysteme, bei denen geringe Toxizität und die Demontierbarkeit der Komponenten im Vordergrund stehen.	▪ Liefern Sie dünne, FSC-zertifizierte Holzfurniere zur Verstärkung von Myzelplatten, um deren mechanische Festigkeit zu verbessern. ▪ Ermöglichen Sie eine giftarme und klebstofffreie Verklebung durch Kompatibilität mit Ultraschallschweißung.
Anforderungen der Stakeholder für eine Produktion in kleinem Maßstab	

Mittel ▪ Produktionslinien für Furnier in kleinen Chargen ▪ Zugang zu minderwertigem oder überschüssigem Holz ▪ Manuelle Sortier- und Klebevorgänge	**Technologien:** ▪ Furnier-Schneidemaschinen oder Rotationsschäler ▪ Fingerzinkungswerkzeuge und Leimpressen ▪ Grundlegende Feuchtigkeitskontrolle und Walzmaschinen
Anforderungen der Interessengruppen für eine Produktion im industriellen Maßstab	
Mittel: ▪ Langfristige Verträge oder Partnerschaften mit Bio-Herstellern ▪ Klare Produktspezifikationen für Partikelgröße, Feuchtigkeit und Reinheit ▪ Zertifizierung für nachhaltige Beschaffung (FSC/PEFC) ▪ Integration in ein Materialrückverfolgungssystem (QR-Kennzeichnung, Chargenverfolgung, Materialpass)	**Technologien:** ▪ Automatisierte Furnier-Schneide- und Fügeanlagen ▪ Ultraschallschweißmaschine ▪ Feuchtigkeitskontrollgeräte und Lagersysteme ▪ CNC-fähige digitale Fertigungsdateien und Material-Barcodierung
Maßnahmen zur Produktionssteigerung: ▪ Investition in CNC- oder Robotersysteme zur Reduzierung des Arbeitsaufwands und zur Steigerung der Präzision. ▪ Optimierung der Furnierblätter für Standardgrößen	**Aktuelle Herausforderungen:** ▪ Hohe Empfindlichkeit gegenüber Feuchtigkeitsschwankungen, was zu Verziehen oder Rissen führt. ▪ Die Abhängigkeit von Klebstoffen und Harzen in herkömmlichen Verfahren schränkt die Demontage ein. ▪ Schwierigkeiten bei der Beschaffung von Holz gleichbleibender Qualität und niedriger Güteklasse für nachhaltige Furniere. ▪ Begrenzte Anzahl von Lieferanten für Furnier mit bestimmten Spezifikationen



Hersteller von Trennwänden

Potenzielle Partner auf dem deutschen Markt: Mycolutions, https://mycolutions.de/en/ Derix Group, Holzindustrie Schweighofer

Rolle: Die Plattenhersteller sind für die digitale Integration des Bioherstellungsprozesses verantwortlich, einschließlich der Montage und Trocknung der myzelbasierten Verbundplatten in der Produktionsanlage.

Aktuelle Vorteile ▪ Tätig an der Schnittstelle zwischen biologischem Wachstum und industrieller Fertigung, wo lebende Materialien in funktionale Produkte verwandelt werden. ▪ Schaffen einen hohen Mehrwert durch die Herstellung gebrauchsfertiger modularer Platten, die biobasiert, kohlenstoffarm und für die Demontage konzipiert sind. ▪ Profitieren vom wachsenden Markt für nachhaltige und regenerative Baumaterialien. ▪ Treiben die Industrialisierung von Myzel-Verbundwerkstoffen voran, indem Sie Robotik, Holz und Biofabrikation kombinieren.	**KPIs** ▪ Maßgenauigkeit der Platten, % der Platten, die die genauen Form- und Dickenspezifikationen erfüllen ▪ Erfolgsrate des Wachstumszyklus, % der Chargen, die vollständige Besiedlung und Festigkeit erreichen ▪ Prozentualer Anteil an Abfall während der Formgebung, Volumen der Verschnitt- oder Ausschussplatten pro Charge ▪ Montagezeit pro Platte, durchschnittliche Zeit vom Einlegen in die Form bis zum Trocknen
Anforderungen der Stakeholder an eine Kleinserienfertigung	
Mittel: ▪ Manuelle Montagewerkzeuge und kleine Formen ▪ Zugang zu einer kontrollierten Wachstumsumgebung	**Technologien:** ▪ Handgefertigte Formen und Klemmwerkzeuge

▪ Begrenzte Trocknungs-/Lagerkapazitäten	▪ Kleine Wachstumszelte oder -kammern mit Heizungen/Befeuchtern, Öfen oder Lufttrocknern
Anforderungen der Interessengruppen für eine Produktion im industriellen Maßstab	
Mittel: ▪ Automatisierte oder halbautomatisierte Formgebung und Verstärkungsmontage ▪ Großflächige klimatisierte Aufzuchtkammern ▪ In den Arbeitsablauf integrierte Trocknungssysteme mit hoher Kapazität ▪ Digitale Integration in Versorgungs- und Logistiksysteme	**Technologien:** ▪ Roboterarme zum Laden von Substraten und zum Platzieren von Furnieren ▪ Modulare Formsysteme mit automatischer Temperatur- und Feuchtigkeitsregelung ▪ Bandbeschickte oder gestellbestückte Trocknungsöfen
Maßnahmen zur Produktionssteigerung: ▪ Integration von Robotersystemen zur Reduzierung manueller Arbeit und zur Verbesserung der Geschwindigkeit. ▪ Einsatz energiesparender Trocknungsverfahren in Kooperation mit wärmeerzeugenden Industrien ▪ Verwendung digitaler Protokolle zur Überwachung von Wachstumsparametern, Fehlern und Lebenszyklusstatus.	**Aktuelle Herausforderungen:** ▪ Hohe Schwankungen bei den Wachstums- und Besiedlungsbedingungen beeinträchtigen die Konsistenz. ▪ Die Trocknung ist energieintensiv und kann bei unkontrollierter Durchführung zu Verformungen oder Schrumpfung führen. ▪ Manuelle Prozesse schränken die Skalierbarkeit ein (z. B. Furniergittermontage).

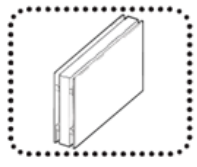


Prüf- und Zertifizierungsstellen

Potenzielle Partner auf dem deutschen Markt: Fraunhofer IBP, MPA Dresden

Rolle: Prüf- und Zertifizierungsstellen validieren die Sicherheit, Leistungsfähigkeit und Konformität von Verbundplatten auf Myzelbasis und stellen sicher, dass sie die Anforderungen an Akustik, Brandschutz und Raumluftqualität erfüllen.

Aktuelle Vorteile ▪ Sie spielen eine entscheidende Rolle bei der Überprüfung der Leistung, Sicherheit und Umweltverträglichkeit und ermöglichen so den Markteintritt neuartiger Materialien. ▪ Bieten eine unabhängige Validierung der akustischen, brandtechnischen, mechanischen und gesundheitsbezogenen Eigenschaften von MBC-Platten. ▪ Ermöglichung der Qualifizierung von Produkten für Zertifizierungen für grünes Bauen (z. B. DGNB, BREEAM, LEED). ▪ Förderung von Vertrauen, Beschaffungsfähigkeit und Kreislaufwirtschaft im gesamten Bausektor	**KPIs** ▪ Prozentualer Anteil der MBC-Plattenchargen, die die Standardschwellenwerte erfüllen ▪ Durchschnittliche Dauer für Prüfung und Zulassung ▪ Umfang der verfügbaren Tests (Brandschutz, Akustik, VOC, Ökobilanz, Haltbarkeit)
	Aktuelle Herausforderungen: ▪ Fehlende standardisierte Testmethoden für neue biobasierte Verbundwerkstoffe wie Myzelplatten. ▪ Hohe Kosten und Zeitaufwand für mehrphasige Zertifizierungsprozesse. ▪ Varianz Eigenschaften von Biomaterialien

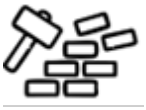


Anbieter von Trennwandsystemen

Potenzielle Partner auf dem deutschen Markt: Strähle Raum-Systeme, Lindner Group, Knauff

Rolle: Trennwandsystemlieferanten sind für die Integration von Platten auf Myzelbasis in modulare Innensysteme verantwortlich, um deren Einsatz in gewerblichen Umgebungen zu ermöglichen.

<table>
<tr><td>Aktuelle Vorteile
Erweiterung des Produktangebots um biobasierte, CO2 neutrale Materialien, die den Anforderungen von Zertifizierungen für grünes Bauen entsprechen.
Bedienung der wachsenden Nachfrage nach modularen, anpassungsfähigen Trennwandsystemen für Büro- und Gewerbebereiche.
Differenzierung auf dem Markt durch Integration von Kreislaufwirtschaftsprinzipien wie Reversibilität und Wiederverwendbarkeit.
Schaffung langfristiger Werte durch Systemleasing oder Product-as-a-Service (PaaS)-Modelle.</td><td>KPIs
Lebensdauer System und Systemkomponenten
Flexibilität der Systemlayouts und Anwendungsmöglichkeiten
Cradle to Cradle Zertifizierung</td></tr>
<tr><td colspan="2">Bedarf der Stakeholder an einer Produktion in kleinem Maßstab</td></tr>
<tr><td><u>Mittel:</u>
Flexible Systemkomponenten, die nicht standardisierte Plattengrößen aufnehmen können
Grundlegende Kompatibilität zwischen MBC-Paneelen und bestehenden Rahmenformaten
Direkte Feedbackschleifen mit Designern und Installateuren für Feldtests</td><td><u>Technologien:</u>
Manuelle Verbinder, Clips oder Schienen für eine flexible Montage
CAD-Dateien für die Integration neuer Materialien in bestehende Systeme
Kleinserienfertigung für Pilotinstallationen</td></tr>
<tr><td colspan="2">Anforderungen der Stakeholder an eine Produktion im industriellen Maßstab</td></tr>
<tr><td><u>Mittel:</u>
Standardisierte, maßgenaue Platten und Rahmenanschlüsse
Hohe Kompatibilität mit modularen Trennwandlayouts
Integrierte Produktdaten (Materialien, Zertifizierungen, Lebenszyklusinformationen) für Beschaffungsplattformen</td><td><u>Technologien:</u>
Werkzeuglose Befestigungssysteme (Steckverbindungen, Magnetverbindungen, mechanische Verbindungen)
3D-Konfiguratoren für Layoutgestaltung und Produktauswahl
Digitale Produktpässe und Rückverfolg-barkeitssysteme
Integration mit BIM für Planung, Montage und Lebenszyklusverfolgung</td></tr>
<tr><td>Maßnahmen zur Produktionssteigerung:
Entwicklung von Standardrahmenabmessungen und Verbindungselementen, die auf die Toleranzen zugeschnitten sind
Entwurf auf Reversibilität formaund Modularität durch Verwendung zerstörungsfreier Verbindungselemente und Möglichkeit der Neukonfiguration ohne Materialverlust.
Zusammenarbeit mit Platten- und Rahmenherstellern, um eine nahtlose Integration und Kreislauffluss zu gewährleisten.
Einführung von Kreislauf-Leasing- oder Rückkaufmodellen durch Rücknahmesysteme oder Abonnementsysteme zur Verlängerung der Produktlebensdauer.
Paketierung von Systemen mit digitalen Pässen und Leistungsdaten für Architekten und Planer.</td><td>Aktuelle Herausforderungen:
Biobasierte Paneele entsprechen möglicherweise nicht den bestehenden Systemtoleranzen oder Leistungsstandards.
Es werden standardisierte Befestigungselemente und Schnittstellen zwischen Paneelen und Rahmen benötigt, um die Wiederverwendung zu gewährleisten.
Begrenztes Verständnis des materialspezifischen Verhaltens (z. B. Biegsamkeit, Feuchtigkeitsreaktion) in modularen Systemen.
Schwierigkeiten bei der Integration neuer Materialien in bestehende Zertifizierungssysteme oder Beschaffungssysteme.
Lücken in der Rückverfolgbarkeit und Koordination über den gesamten Liefer- und Wiederverwendungszyklus hinweg.</td></tr>
</table>



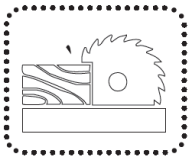
Auftragnehmer und Installateure

Potenzielle Partner auf dem deutschen Markt: Bauwerk Schwarzwald, Dussmann Service

Rolle: Bauunternehmer und Installateure sind für die Montage, Anpassung und Wartung der Trennwandsysteme aus myzelbasierten Verbundplatten vor Ort verantwortlich.

<table>
<tr><td>Aktuelle Vorteile
Sie fungieren als direkte Schnittstelle zwischen der Fertigung und der gebauten Umwelt und ermöglichen so die reale Umsetzung zirkulärer Komponenten.
Erschließung neuer Märkte mit Fokus auf nachhaltigen, modularen Innenräumen.
Reduzierung der Komplexität und des Zeitaufwands für die Installation durch vorgefertigte, modulare Systeme.
Erweiterung des Serviceangebots um Wartung, Neukonfiguration und Deinstallation in Kreislaufmodellen.</td><td>KPIs
Durchschnittliche Zeit für die Installation einer modularen Trennwand
Prozentualer Anteil wiederverwendbarer Komponenten nach der Installation
Fehler-/Anpassungsrate vor Ort
Schulungsabdeckung für die Installation im Kreislauf
Kundenzufriedenheitsbewertung
Feedback zu Qualität, Sauberkeit und Anpassungsfähigkeit der Installation</td></tr>
<tr><td colspan="2">Anforderungen der Stakeholder an eine Kleinserienfertigung</td></tr>
<tr><td><u>Mittel</u>
Klare Installationsanleitungen und Prototypen für Pilotprojekte
Modulare, leichte Komponenten, die manuell gehandhabt und angepasst werden können
Einfache Werkzeuge zur Anpassung vor Ort und Flexibilität</td><td><u>Technologien:</u>
Manuelle Werkzeuge (z. B. Schraubendreher, Klemmen, Schneidwerkzeuge)
Gedruckte oder QR-basierte Montageanleitungen
Musterkits für Schulungen und zum Testen der modularen Passform</td></tr>
<tr><td colspan="2">Anforderungen der Stakeholder für eine Produktion im industriellen Maßstab</td></tr>
<tr><td><u>Mittel:</u>
Einheitlich dimensionierte Platten und Rahmen mit digitaler Passformdokumentation
Schulungen zu werkzeuglosen, reversiblen Montagetechniken
Integration in Projektmanagement- und BIM-Plattformen für Layout und Ablaufplanung
Koordination mit der Kreislauflogistik für die Rücknahme oder Wiederverwendung von Platten
Schaffung von Rücknahme- und Wiederinstallationsservices, z. B. Entwicklung von Dienstleistungen durch Auftragnehmer für den Umzug oder die Demontage von Platten zur Wiederverwendung an anderen Orten.
Integration mit BIM- und Projektmanagement-Tools, damit Installateure vor Ort auf digitale Layouts, Passungstoleranzen und Chargen-IDs zugreifen können.</td><td><u>Technologien:</u>
Lasermessgeräte vor Ort
Digitale Apps mit Installationsprotokollen und Panel-Tracking
Bestandsverwaltungstools für zurückgegebene oder wiederinstallierte Teile
Modulare Befestigungssysteme, die keine Klebstoffe erfordern</td></tr>
<tr><td>Maßnahmen zur Produktionssteigerung:
Standardisierung modularer Schnittstellen, um sicherzustellen, dass alle Paneele und Rahmen kompatible Verbindungen und reversible Befestigungselemente verwenden.
Entwicklung klarer Montageprotokolle, visueller Handbücher, Videos oder digitale Tools, um eine kreislauffreundliche Installation zu gewährleisten.
Angebot von Workshops zu den Themen Design für Demontage, Wiederverwendung und Materialhandhabung an.</td><td>Aktuelle Herausforderungen:
Begrenzte Vertrautheit mit biobasierten oder modularen Materialien wie MBC-Paneelen.
Fehlende Erfahrung mit reversiblen Installationen; die Branche greift häufig auf dauerhafte Lösungen zurück.
Unterschiedliche Gegebenheiten vor Ort (Wände, Böden) können unerwartete Anpassungen erfordern.
Klaren, standardisierten Installationssystemen, um Schäden beim Aufbau oder der Demontage zu vermeiden.</td></tr>
</table>

	▪ Schwierigkeiten bei der Verfolgung und Verwaltung zurückgewonnener Komponenten für die Kreislaufwirtschaft.



Kunde

Potenzielle Partner auf dem deutschen Markt: Siemens Real Estate, SAP Facility Management

Rolle: Kunden spielen eine zentrale Rolle bei der Aktivierung und Aufrechterhaltung der Kreislaufnachfrage, indem sie Myzel-basierte Trennwandsysteme für ihre Gebäude auswählen, verwenden und warten. Als Endnutzer oder Auftraggeber (z. B. Facility Manager, Innenarchitekten, Architekten, Immobilienentwickler) beeinflussen Kunden die Einführung von kreislauffähigen Materialien und Geschäftsmodellen wie Product-as-a-Service und Leasing-Systemen.

Aktuelle Vorteile ▪ Zugang zu nachhaltigen, kohlenstoffarmen Innenraumlösungen, die mit den Zielen für Umwelt, Soziales und Unternehmensführung (ESG) im Einklang stehen ▪ Erreichen Sie Zertifizierungen (z. B. LEED, DGNB, BREEAM) durch zirkuläre Beschaffung. ▪ Reduzierung der langfristigen Kosten durch den Einsatz modularer und wiederverwendbarer Systeme.	**KPIs** ▪ CO_2-Fußabdruck pro m^2 installierter Fläche ▪ % wiederverwendete oder wiederverwendbare Komponenten ▪ Feedback zu akustischer Leistung, Komfort und Ästhetik ▪ Anzahl der Anpassungen des Systems ohne vollständigen Austausch ▪ Prozentualer Anteil der Innenkomponenten, die nach Kreislaufkriterien beschafft wurden
	Aktuelle Herausforderungen: ▪ Begrenzte Vertrautheit mit biobasierten oder Myzel-Produkten und ihrer langfristigen Haltbarkeit. ▪ Widerstand gegen die Umstellung von linearen Kaufmodellen auf Leasing- oder Servicemodelle. ▪ Fehlende interne Systeme zur Verfolgung der Wiederverwendung, Rückgewinnung oder Materialbeschaffenheit von Komponenten. ▪ Unsicherheit über das Kosten-Nutzen-Verhältnis von Investitionen in kreislauffähige Produkte im Vergleich zu konventionellen Produkten. ▪ Bedarf an belastbaren Leistungsdaten und Zertifizierungen zur Unterstützung von Beschaffungsentscheidungen.



Verwertungsindustrie

Potenzielle Partner auf dem deutschen Markt: REMEX GmbH

Rolle: Die Verwertungsindustrie in der HOME 2.0-Wertschöpfungskette umfasst Rückbauunternehmen, die für die sorgfältige Demontage von Trennsystemen und die Verwaltung der Wiederverwendung und des Recyclings von Komponenten innerhalb des Produktionszyklus verantwortlich sind.

Aktuelle Vorteile ▪ Zugang zu neuen Materialströmen wie biologisch abbaubarem Myzel und wiederverwendbaren Holzkomponenten. ▪ Schaffung von Mehrwert durch die Umleitung von Innenausbauabfällen aus Deponien und Verbrennungsanlagen. ▪ Stärkung der Rolle der Abfallverwertung in der Bioökonomie und in Kreislaufwirtschaftsmodellen für das Bauwesen. ▪ Erweiterung des Dienstleistungsangebots um die Rücknahme von Bauteilen, die Demontagelogistik und die Kompostierung.	**KPIs** ▪ Prozentualer Anteil der von Deponien umgeleiteten Materialien ▪ Recycling oder Kompostierung ▪ Menge der erfolgreich kompostierten oder in den Boden zurückgeführten Myzelplatten ▪ Prozentualer Anteil von Holzrahmen oder Beschlägen, die in neuen Anwendungen wiederverwendet werden ▪ Effektivität der Trennung von biologischen und technischen Komponenten ▪ Prozentualer Anteil der zurückgewonnenen Materialien mit dokumentierten Lebenszyklusdaten oder QR-Tracking
Bedarf der Stakeholder an einer Produktion in kleinem Maßstab	
Mittel: ▪ Klare Identifizierung der Materialarten und Rückgewinnungswege ▪ Sammelvereinbarungen mit Auftragnehmern oder Kunden für Pilot-Deinstallationen ▪ Infrastruktur für Kompostierung oder Wiederverwendungstests in kleinem Maßstab	**Technologien** ▪ Manuelle Demontagewerkzeuge ▪ Sortier- und Kompostierungsstationen vor Ort
Anforderungen der Interessengruppen für eine Produktion im industriellen Maßstab	
Mittel ▪ Logistiksysteme für die Sammlung gebrauchter Trennwände an mehreren Standorten ▪ Standardisierte Materialdokumentation (z. B. Materialpässe) für eine effiziente Sortierung ▪ Integration in digitale Rücknahmesysteme und Kreislaufwirtschaftsnetzwerke ▪ Infrastruktur für industrielle Kompostierung, Wiederaufarbeitung oder Wiederverkauf	**Technologien:** ▪ Mechanische Trenn- und Sortiersysteme für Plattenkomponenten ▪ Digitale Plattformen zur Verfolgung von zurückgewonnenen Materialien und Zertifizierungsstatus ▪ Bioabfallbehandlungssysteme wie anaerobe Vergärung, Heißkompostierung ▪ Automatisierungsfähige Demontagelinien für die Wiederverwendung von Rahmen
Maßnahmen zur Produktionssteigerung: ▪ Entwicklung materialspezifischer Rückgewinnungsprotokolle ▪ Zusammenarbeit mit Designern und Herstellern, um Materialformate an die Rückgewinnungslogistik und Sortieranlagen anzupassen. ▪ Ausbau der Kapazitäten für industrielle Kompostierung und Bioabfallverarbeitung. ▪ Digitale Rückverfolgbarkeit und QR-Tracking ermöglichen ▪ Angebot von Rücknahme- oder Abonnementdiensten durch Bereitstellung von Deinstallations-, Abhol- und Wiederverwendungsdiensten als Teil von Verträgen für zirkuläres Bauen.	**Aktuelle Herausforderungen:** ▪ Mangelnde Vertrautheit mit neuen Materialien wie Myzel und deren Verarbeitung am Ende ihrer Lebensdauer. ▪ Es fehlen klare Verwertungswege sowie regulatorische Vorgaben für hybride biotechnologische Materialien. ▪ Schwierigkeiten bei der Trennung von geklebten oder kontaminierten Komponenten ohne Materialverlust. ▪ Begrenzte Infrastruktur für die Kompostierung oder Wiederaufbereitung von Platten im industriellen Maßstab. ▪ Notwendigkeit der Zusammenarbeit mit vorgelagerten Partnern, um eine saubere Trennung und Rückverfolgbarkeit zu gewährleisten.



Abfallentsorger

Potenzielle Partner auf dem deutschen Markt: Interzero, Kompogas

Rolle: Abfallentsorger sind für die Schließung des Kreislaufs in der Wertschöpfungskette von entscheidender Bedeutung, da sie die verantwortungsvolle Handhabung, Trennung und Verwertung von Materialien am Ende des Lebenszyklus des myzelbasierten Trennsystems gewährleisten.

Aktuelle Vorteile ▪ Einstieg in neue Märkte für die Verwertung biobasierter Materialien durch die Verarbeitung von Myzel und modularen Holzkomponenten.	**KPIs** ▪ % zurückgewonnenes Material ▪ % wiederverwendete Komponenten ▪ % wiederverwendete oder recycelte Holzrahmen

▪ Stärkung der Ausrichtung an den Prinzipien der Kreislaufwirtschaft durch die Umleitung von Bauabfällen aus Deponien. ▪ Schaffung von Mehrwert durch Materialtrennung, Kompostierungskoordination und Wiederverwendungslogistik. ▪ Teilnahme an neuen Rücknahme- und Rückführungslogistikprogrammen mit Herstellern und Kunden.	▪ Bearbeitungszeit pro Charge ▪ Rückverfolgbarkeit ▪ CO_2-Emissionen aus der Rücknahmelogistik
Anforderungen der Stakeholder an eine Produktion in kleinem Maßstab	
Mittel: ▪ Klare Materialkennzeichnung und Sortieranweisungen ▪ Partnerschaften mit lokalen Kompostierungs- oder Wiederverwendungszentren ▪ Schulungen zum Umgang mit biobasierten Baumaterialien	**Technologien:** ▪ Manuelle Sortierstationen ▪ Einfache Kompostbehälter oder Abgabestellen bei kommunalen Dienstleistern ▪ Dokumentation der Rückgewinnung mit Papier- oder QR-Tags
Anforderungen der Interessengruppen für eine Produktion im industriellen Maßstab	
Mittel: ▪ Logistik für die Rücknahme von Materialien auf Volumenbasis ▪ Koordination mit Herstellern und Auftragnehmern hinsichtlich des Zeitplans für die Demontage ▪ Integration mit digitalen Plattformen für die Verfolgung und Berichterstattung der Rückgewinnung ▪ Infrastruktur für die Verarbeitung von Bioabfällen und die Trennung von Verbundstoffen	**Technologien:** ▪ Automatisierte Materialtrennlinien ▪ Industrielle Kompostierungssysteme oder Zugang zu anaeroben Vergärungsanlagen ▪ Reverse-Logistik-Software mit integrierten Materialpässen ▪ Scansysteme zur Verfolgung zerlegter oder zurückgegebener Komponenten
Maßnahmen zur Steigerung der Produktion: ▪ Schaffung klarer Systeme für die Verarbeitung von Myzel im Vergleich zu Holz/Hardware. ▪ Aufbau von Rücknahmesystemen und Zusammenarbeit mit Kunden und Installateuren, um Paneele am Ende ihrer Lebensdauer zurückzunehmen. ▪ Integration digitaler Nachverfolgung und Berichterstattung ▪ Zusammenarbeit mit Kompostierungs- und Recyclingpartnern ▪ Bereitstellung von Daten für EPDs, Cradle-to-Cradle-Zertifizierung und Kreislaufberichterstattung.	**Aktuelle Herausforderungen:** ▪ Fehlende standardisierte Rückgewinnungsprozesse für hybride Materialien (z. B. Holz + Myzel). ▪ Begrenzter Zugang zu Kompostierungsanlagen, die für industrielle Bioabfälle ausgerüstet sind. ▪ Schwierigkeiten bei der Trennung von Komponenten, wenn Klebstoffe oder ungeeignete Befestigungselemente verwendet werden. ▪ Bessere Koordination mit vorgelagerten Akteuren (z. B. Auftragnehmern, Designern) für die Rückgewinnungsplanung erforderlich. ▪ Fehlen digitaler Systeme zur Verfolgung, Überprüfung und Berichterstattung der Rückgewinnungsergebnisse.

LCA

Die Life Cycle Analyse ist als externer Anhang unter *Anhang_LCA_HOME_II* abrufbar.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Resultierende Strukturen aus additiven Herstellungsverfahren auf Basis von Holzfurnier 13

Abbildung 2 Strukturelle Tests an verschiedenen physischen Variationen des Verbundmaterials aus Myzelmaterial und Holzfurniergittern als Verstärkungssysteme 14

Abbildung 3 3D Gittersysteme in verschiedenen Layouts 15

Abbildung 4 In HOME entwickelte Endeffektoren zum Platzieren (links) und Verschweißen (rechts) von Holzfilamenten 16

Abbildung 5 Prozess des Platzierens sowie des Verschweißens der Holzfurniere mit den entwickelten Endeffektoren 16

Abbildung 6 Deutlich erkennbare Verbindung zwischen dem Furniergitter und dem Myzelsubstrat, entstanden durch Myzelwachstum 17

Abbildung 7 RASI Schema des Projektplans 23

Abbildung 8 Impedanzrohrtests mit Hanf und Sägemehl, (a) 1: Hanf im Kern und Sägemehl oben und unten, 2: Sägemehl im Kern und Sägemehl oben und unten, 3: reines Sägemehl, 4: reiner Hanf, (b) ausgewachsener Hybridverbund mit Sägemehl als Kern und Hanf unten und oben 28

Abbildung 9 Zugfestigkeit verschiedener Ahornfurnierperforationen 29

Abbildung 10 Ergebnisse der Ausziehversuche für verschiedene Furniertypen und Perforationen, wobei die Perforationsversionen 1, 2 und 3 jeweils für Typ A, B und F stehen. 30

Abbildung 11 Test zur grundsätzlichen Eignung der Materialförderung durch Vakuum 32

Abbildung 12 Eignungstests zur Materialförderung durch Vakuum mit lebendem Material. Links: Durchführung der Materialförderung, Mitte: Proben vor der Wachstumsphase, Rechts: Proben nach der Wachstumsphase 32

Abbildung 13 Quetschventil Mechanismus, Pfeile visualisieren die Zu- und Abfuhr von Druckluft zum Öffnen und Schließen des Ventils 33

Abbildung 14 Anwendungsspezifisches Quetschventil, Mitte: Öffnung ohne vakuumbasierte Rückstellhilfe 33

Abbildung 15 Evolution des End-Effektors für die automatisierte Substrateinfüllung: Zunächst ein End-Effektor mit (1) manuellem Schiebeverschluss, später ersetzt durch (2) ein einzelnes Quetschventil und anschließend durch (3) zwei Quetschventile mit zwischenliegender Materialschleuse 34

Abbildung 16 Fotografisch dokumentierter Ablauf der Materialplatzierung durch ein speziell entwickeltes Tool zur Materialförderung durch Vakuum mit einem Zyklonseperator 34

Abbildung 17 Schematische Darstellung des Tool-Mechanismus zur Materialplatzierung 35

Abbildung 18 Ungleichmäßige Verteilung des Myzel-Substrats nach der horizontalen Vibration (Links, Mitte) und gleichmäßige Verteilung nach der Vibration mit Furniernetz (Rechts). 36

Abbildung 19 Füllhöhe vor Verdichtung (Links), nach Verdichtung mit Klopftisch (Mitte) und nach manueller Verdichtung (rechts) 36

Abbildung 20 Adsorptionskoeffizient von Proben, die auf Hanf mit Myzel von *Ganoderma lucidum* gezüchtet wurden. Die orangefarbene Linie zeigt die Proben, die über einen kurzen Zeitraum gezüchtet wurden und daher eine porösere Oberfläche haben, während die blaue Linie die Proben zeigt, die länger gezüchtet wurden, um eine glattere Oberfläche zu entwickeln. 37

Abbildung 21 obere Reihe: Einfüllung und Verteilung von Sägespäne-Substrat in eine Form ohne Furniergitter, untere Reihe: Einfüllung und Verteilung von Hanfspäne-Substrat in eine Form mit Furniergitter 39

Abbildung 22 Eingefülltes Substratmaterial vor dem Rüttelprozess (links) und nach dem Rüttelprozess (rechts) mit dem Rütteltisch B3000 400 x 600 der Firma Technischer Handel Becker 39

Abbildung 23 Ergebnisse von Drucktests von Substraten mit unterschiedlichen Dichten und Fasergrößenverteilungen. 40

Abbildung 24 Status Quo Bauteilgeometrie 41

Abbildung 25: Sandwich-Paneel mit drei Schichten: Hanfpartikel – Holzpartikel – Hanfpartikel als Beispiel für mögliche Materialschichtung 42

Abbildung 26 Flächige Gradierung des Materials 44

Abbildung 27 Anschlussdetail: Verbindung zwischen Holzrahmen der Biokomposit-Paneelkonstruktion und Holzpfosten 47

Abbildung 28 Anschlussdetail: Querschnittszeichnung eines Deckenanschlusses der Biokompositpaneele 47

Abbildung 29 Teilkompressionstests von links nach rechts: vor der Teilkompression an Hanf- und Sägemehlproben, nach der Teilkompression an Hanf- und Sägemehlproben 48

Abbildung 30 3D-gedrucktes Modell, entworfen nach dem Prinzip der topologischen Verriegelung 48

Abbildung 31 Matrix der sechs verschiedenen Verarbeitungstechniken (A.) Sägen, B.) Fräsen, C.) Bohren, D.) Schleifen, E.) Heißdrahtschneiden und F.) Laserschneiden) für Verbundwerkstoffe aus Hanf und Sägemehlmyzel sowie die Ergebnisse 50

Abbildung 32 a) montierte Außenform, b) Anbringen des Außenrahmens, c) Inokulierte Ablagerung und Wachstum von Sägemehlsubstrat, d) Einbau des Innenrahmens mit angebrachtem Gitter, e) Anbringen eines dünnen Holzrahmens, um außen ein schlankes Erscheinungsbild zu erhalten, f) Ablagerung und Wachstum des beimpften Hanfsubstrats 52

Abbildung 33 Detailzeichnung des Holzrahmens der Myzeliumwandelemente mit Verbindung an das innenliegende Furniergitter und Anschluss an Holzständer 52

Abbildung 34 Studie zur Herstellung des Rahmenprofils mit einfachen Schnitten aus einem Kantholz 53

Abbildung 35 Fall 1 Simulationsergebnisse: horizontale Verformung in mm, Wandelementbreite von links oben nach rechts unten: 600 mm, 800 mm, 1000 mm, 1200 mm 56

Abbildung 36 Fall 1 Simulationsergebnisse: Biegespannung in MPa, Wandelementbreite von links oben nach rechts unten: 600 mm, 800 mm, 1000 mm, 1200 mm 57

Abbildung 37 Fall 2 Simulationsergebnisse: horizontale Verformung in mm, Flächenträgheitsmoment von links nach rechts: 2,5*106 mm4, 5,0*106 mm4 und 7,5*106 mm4 57

Abbildung 38 Montagezeichnung der Stützschalung 58

Abbildung 39 Links: Eingekapseltes Naturtextil zwischen zwei 2D-Gittern, Mitte: Robotergesteuerte Platzierung diagonaler Wellen, Rechts: Stoffbearbeitung zum Verschweißen für die Fertigstellung des Gitters 59

Abbildung 40 Links: Prototyp aus gebogenem Myzelverbundwerkstoff, hergestellt mit einer feststehenden Schalung, rechts: Nahaufnahme der Oberfläche 59

Abbildung 41 Herstellungsprozess zur Befüllung der akustischen Testproben 60

Abbildung 42 Biegeproben: a) Myzel-Verbund auf Hanfbasis, b) mit 3D-Gitter verstärkt, c) mit 3D-Gitter im Holzrahmen (einfach gelagert), d) mit 3D-Gitter im Holzrahmen (fest eingespannt) 61

Abbildung 43 Dichten des Myzel-Verbundwerkstoffs aus Serie 1 des Biegetests 63

Abbildung 44 Von links nach rechts: Proben vor, während und nach dem Versagen im Drei-Punkt-Biegetest 63

Abbildung 45 a) Drei-Punkt-Biegeleistung, b) Elastizitätsmodul in Biegung aus Serie 1 des Biegetests 64

Abbildung 46 Dichte des Myzel-Verbundwerkstoffs aus Serie 2 des Biegetests 64

Abbildung 47 a) Drei-Punkt-Biegeleistung, b) Elastizitätsmodul in Biegung aus Serie 2 des Biegetests 65

Abbildung 48 Beispielhaft dargestellte typische Aufbaudetails (in horizontaler Schnittansicht) von zweischalige Trennwandkonstruktionen in Leichtbauweise 68

Abbildung 49 Links: Geprüfte Oberfläche der Prüfkörper (Oberansicht). Rechts: Prüfkörper der Impedanzrohrmessungen 70

Abbildung 50 Schematische Darstellung der Aufbau des Impedanzrohrs im Messzustand 70

Abbildung 51 Messaufbau einer einschaligen Trennwandkonstruktion, Prüfkörper S5 71

Abbildung 52 Grundriss der akustischen Prüflabor mit Darstellung der Wandöffnung für Luftschallübertragungsmessungen 72

Abbildung 53 (A) 3D-Ansicht des akustischen Doppelplatten-Testaufbaus mit Hohlraumverlängerung I) Zusätzlicher Rahmen aus verleimten MDF-Platten, II) Probe S5, III) 15 mm Luftraum zwischen den Myzelplatten und IV) Auf Sägemehl gezüchtete Myzelplatte 73

Abbildung 54 Messaufbau im akustischen Hallraum 74

Abbildung 55 Ergebnisse der Impedanzrohrmessung 75

Abbildung 56 Schalldämm-Maß, Einfügungsdämm-Maß und Norm-Schallpegeldifferenz des Prüfkörpers S4 mit Substrat aus Sägemehl 76

Abbildung 57 Schalldämm-Maß, Einfügungsdämm-Maß und Norm-Schallpegeldifferenz des Prüfkörpers S3 mit gemischtem Substrat 77

Abbildung 58 Schalldämm-Maß, Einfügungsdämm-Maß und Norm-Schallpegeldifferenz einer zweischaligen Konstruktion aus MDF-Platten ohne Hohlraumbedämpfung 77

Abbildung 59 Schalldämm-Maß, Einfügungsdämm-Maß und Norm-Schallpegeldifferenz einer zweischaligen Konstruktion aus MDF-Platten mit Hohlraumbedämpfung aus Prüfkörper S1 (Myzel-Biokompositeplatte mit Hanfsubstrat und Furnierstruktur), siehe Abbildung 53 Testaufbau B 78

Abbildung 60 Schalldämm-Maß, Einfügungsdämm-Maß und Norm-Schallpegeldifferenz einer zweischaligen Konstruktion aus Prüfkörpern S4 und S5, siehe Abbildung 53 Testaufbau A 78

Abbildung 61 Messergebnisse der Schallabsorptionsgrad im Hallraum 79

Abbildung 62 Schematische Darstellung des Einflusses von Furnierstreifen auf das Schallabsorptionsvermögen bei einzelnen Frequenzen in Abhängigkeit der Wellenlänge der Furnierstruktur 79

Abbildung 63 Für die Impedanzrohrmessung hergestellte Prüfkörper – alle Prüfkörpervarianten: (0605-2) 60% Sägemehl- und 40% Hanfsubstrat. (2905-1) 40% Sägemehl- und 60% Hanfsubstrat. ()1005-1) 100% Sägemehl 80

Abbildung 64 Position der Temperatursensoren an der Probe 82

Abbildung 65 Verschiedene hanfbasierte Myzelproben unter dem Strahlungserhitzer 83

Abbildung 66 Temperaturprofil der Proben über die Zeit, a) Hanf >2 mm (120 kg/m³), b) Hanf >2 mm (150 kg/m³) und c) Hanf <2 mm (200 kg/m³) 83

Abbildung 67 Oben links: abgelagertes Sägemehl, oben rechts: 1 Woche gewachsenes Sägemehl, unten links: Hanfablagerung auf gewachsenem Sägemehl, unten rechts: endgültige Probenoberfläche nach insgesamt 2 Wochen Wachstum 85

Abbildung 68 Links: Form mit Talstruktur, rechts: entformtes Muster 86

Abbildung 69 Links: Form mit Hügelkonfiguration, rechts: entformtes Muster 87

Abbildung 70 Links: empfindliche Probe mit erkennbarem Unterschied im Substrat, rechts: stabile Probe mit unklarer Unterscheidung des Substrats 87

Abbildung 71 1,5mm PETG Schalungsplatten mit Lochungen werden in die Schalung eingelegt 88

Abbildung 72 Rahmeneinfügungsequenz im Produktionsprozess 88

Abbildung 73 Grobe Schätzung des resultierenden Absorptionskoeffizienten mit Furniergitter 89

Abbildung 74 Endgültiges Design des Furniergitters, bestehend aus drei Zellgrößen und jeweils drei verschiedenen Wellenlängen 90

Abbildung 75 Parametrisches Entwurfstool zur gradierten Materialverteilung von Hanf- und Säge, links geometrische Generierung der Verteilung, rechts Visualisierung des Materialverlaufs 91

Abbildung 76 Materialvorbereitung a) Zerkleinern des Materials von Hand, b) Zerkleinern des Materials in der Obstmühle, c) Verarbeitung mit einem elektrischen Schredder, d) Material bereit zur Ablagerung 91

Abbildung 77 Sägemehlablagerung a) Robotergesteuerte Ablagerung des beimpften Sägemehlmaterials, b) Ablagerung von Sägemehl, c) Gewachsenes Sägemehl 93

Abbildung 78 Trennwand in Originalgröße, Trocknung in der Heißpresse 94

Abbildung 79 3D Scan des fertigen Paneels und dessen Deformation relativ zu einem Optimalen Paneel. Vorderseite (Links) Rückseite (Rechts) 94

Abbildung 80 Verformung des Rahmens entlang der langen Seiten des Paneels 95

Abbildung 81 Kreislaufgerechte Designprinzipien 97

Abbildung 82 Kategorisierung verschiedener Wandsysteme 98

Abbildung 83 Darstellung von Trennwandsystemen, die innerhalb der Wände Platz für Isolierung, Versorgungsleitungen und Kabel bieten 99

Abbildung 84 Beispiele von akustischen Komponenten in Trennwandsystemen 100

Abbildung 85 Drei vorgeschlagene Designkonzepte mit Darstellung der primären Richtung der Lastabtragung (blaue Pfeile) 101

Abbildung 86 Konzept 1 – Schematische Darstellung des Rahmensystems 101

Abbildung 87 Konzept 2 – Schematische Darstellung des rahmenlosen Sandwichsystems 102

Abbildung 88 Diagramm zu Konzept 3 103

Abbildung 89 Komponenten und Konfigurationsdiagramm für Anwendungsfall A (Links), Komponenten und Konfigurationsdiagramm von Anwendungsfall B (Rechts) 104

Abbildung 90 Detail mit Drehbefestigung 105

Abbildung 91 Schematische Darstellung der Koppelplattenbefestigung 105

Abbildung 92 Schematische Darstellung der Verriegelungsverbindung 106

Abbildung 93 Vergrößerte Querschnittszeichnung der Verbindung zwischen zwei Paneelen 106
Abbildung 94 Diagramm der Verarbeitungskette des HOME 2.0 Demonstrators 116
Abbildung 95 Vorgeschlagenes skalierbares Wertschöpfungs-Diagramm für HOME 2.0 121
Abbildung 96 HOME 2.0 Kreislaufmaterialflüsse und Geschäftsmodelle 122
Abbildung 97 Messestand von EDEK auf der Exempla 2026 in München 129
Abbildung 98 Präsentation des Home 2.0 Demonstrators auf der Exempla 2026 in München 130

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Fasergrößenverteilung für Hanf- und Sägemehlfasern. 26

Tabelle 2 Mechanische Eigenschaften von leichtgewichtigem Myzelmaterial 26

Tabelle 3 Druckfestigkeit der Versuchskörper der Impedanzprüfung 27

Tabelle 4 Versuchsaufbauten und Ergebnisse mit vorhandener Infrastruktur 38

Tabelle 5 Auflistung der in der FEM-Analyse verwendeten Materialeigenschaften 53

Tabelle 6 Übersicht der hergestellten Versuchskörper für die strukturelle, akustische und physikalische Charakterisierung 62

Tabelle 7 Übersicht über die in HOME 2.0 durchgeführten akustischen Tests 68

Tabelle 8 Probenbeschreibungen für den Impedanzrohrtest 69

Tabelle 9 Physikalische Eigenschaften der verwendeten Prüfkörper 72

Tabelle 10 Materialaufbau der Doppelplattenkonfiguration für den Übertragungstest 73

Tabelle 11 Übersichtstabelle der Entwurfskonzepte 101

Tabelle 12 Aufschlüsselung der Systemkomponenten 115

Tabelle 13 Liste der für die Verifizierung in HOME 2.0 durchgeführten Prüfverfahren 117