

BBSR-
Online-Publikation
23/2025

HOME

Holz-Myzelium-Verbundbauweise für CO₂- neutrale, kreislauffähige Ein- und Ausbauten

von

Prof. Philipp Eversmann
Eda Özdemir
Andrea Rossi
Nadja Nolte
Prof. Dirk Hebel
Nazanin Saeidi
Alireza Javadian
Prof. Dr. Jan Wurm
Ivan Acosta
Albert Dwan
Shibo Ren
Carsten Hein



HOME

Holz-Myzelium Verbundbauweise für CO₂-neutrale,
kreislauffähige Ein- und Ausbauten

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: 10.08.18.7-21.48

Projektlaufzeit: 06.2021 bis 05.2023

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
Prof. Philipp Eversmann (Projektleitung)
eversmann@asl.uni-kassel.de

Eda Özdemir
Andrea Rossi
Nadja Nolte

Karlsruher Institut für Technologie
Institut für Entwerfen und Bautechnik, Fachgebiet Bautechnologie (IEB)
Prof. Dirk Hebel
dirk.hebel@kit.edu

Nazanin Saeidi
Alireza Javadian

Arup Deutschland, Berlin
Prof. Dr. Jan Wurm
jan.wurm@kuleuven.be

Ivan Acosta
Albert Dwan
Shibo Ren
Carsten Hein

Redaktion

Universität Kassel
Experimentelles und Digitales Entwerfen und Konstruieren

Stand

Juni 2025

Gestaltung

Universität Kassel
Experimentelles und Digitales Entwerfen und Konstruieren

Bildnachweis

Titelbild: Myzelium Prototyp, Foto: Nicolas Wefers
Alle weiteren Foto- und Bildnachweise siehe Abbildungsverzeichnis, S. 163 ff.

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.; Rossi, A.; Nolte, N.; Hebel, D.; Saeidi, N.; Javadian, A.; Wurm, J.; Acosta, I.; Dwan, A.; Ren, S.; Hein, C., 2025: HOME: Holz-Myzelium-Verbundbauweise für CO₂-neutrale, kreislauffähige Ein- und Ausbauten. BBSR-Online-Publikation 23/2025, Bonn. <https://doi.org/10.58007/nh53-jy18>

DOI 10.58007/nh53-jy18
ISSN 1868-0097

Bonn 2025

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	7
Abstract	8
Stand der Forschung	9
Myzelium	9
Additive Fertigung mit Filamenten aus Holzmehl	10
Additive Fertigung mit natürlichen Fasern	10
Stand der eigenen Forschung	11
Myzelium	11
Additive Herstellung mit Weidenfilament / Furnierstreifen	15
Fertigungskonzept	16
Lebenszyklus/ Ökologische Bewertung der Bauteile	18
Forschungslücke/Entwicklungsbedarf	18
Zielsetzung	19
Forschungsdesign	20
Forschungsfragen	20
Konzeptionierung	20
Fertigung	20
Kreislauffähigkeit	20
Charakterisierung	20
Methodischer Ansatz und Organisation	21
Universität Kassel – Additive Fertigungstechnologie 3D Holzgitter, Projektleitung	21
KIT – Biowachstum und Charakterisierung	21
ARUP - Raumakustik, Tragwerk und Nachhaltigkeit	21
Projektteam	22
Arbeitspakete und Meilensteine	22
Projektergebnisse	27
AP 1 MATERIAL UND BAUTEILKONZEPT	27
AP 1.1 Definition eines Lasten- und Pflichtenheftes (ARUP)	27
Definition der Anwendungsbereiche	27
Strukturelle Anforderungen	27
Akustische Anforderungen	28
Bewertung der Nachhaltigkeitseffekte	29
AP 1.2 Auswahl und Systematisierung der Grundwerkstoffe (UK, KIT, ARUP)	30
Holzarten	30
Substrate	31
Myzelarten	31

AP 1.3 Charakterisierung und Herstellung Grundwerkstoffe (KIT, ARUP)	32
Substratbesiedlung	32
AP 1.4 Entwurf Bauteilkonzept (ARUP)	32
AP 2 FERTIGUNGSTECHNOLOGIE UND BOKULTIVIERUNGSPROZESS	33
AP 2.1 Additive Fertigungstechnologie Holzgitterstrukturen (UK)	33
Roboter gesteuerte Platzierung von Holzfilamenten	34
Ultraschallschweißen von Holz-Holz-Verbindungen	35
Integrierter Fertigungsprozess	36
Studien zur Anordnung der Furnierbewehrung	37
AP 2.2 Biokultivierungsprozess auf Basis der Holzgitterstrukturen (KIT)	38
Herstellung von Myzel-Verbundwerkstoffen	38
Nachbearbeitung	40
AP 3 CHARAKTERISIERUNG BIOVERBUNDMATERIAL	40
AP 3.1 Charakterisierung Verbundquerschnitte (KIT)	40
Strukturelle und akustische Versuche	40
Ergebnisse	42
AP 3.2 Ansätze zur Dimensionierung und Auslegung (ARUP)	48
AP 4 BAUTEILDESIGN UND CHARAKTERISIERUNG	52
AP 4.1.1 Pop-Up Campus Trennwand Demonstratoren	52
Furnierbewehrte flache Trennwand	52
Furnierverstärkte gebogene Trennwand	54
Topologically Interlocking Partition Wall	56
Nachnutzungskonzepte im Rahmen des Pop-Up Campus	58
Reshape	59
Biocycle	59
Reuse	60
AP 4.1.1 Analyse bestehender Trennwandlösungen	62
AP 4.1.2 Bauteildesign für einen konkreten Anwendungsfall (ARUP, UK, KIT)	63
AP 4.2 Bauteilherstellung (UK, KIT)	75
Großmaßstäbliche Produktion von Myzel	80
Befüllung der Form, Wachstums- und Trocknungsphase	81
AP 4.3 Charakterisierung Bauteil(e) (ARUP, UK)	89
Akustische Versuche an 1:1 Bauteilen (Pop-Up Campus Wand und finaler Prototyp)	89
Strukturelle Versuche an 1:1 Bauteilen	101
AP 5 TECHNOLOGIEBEWERTUNG (ARUP)	103
AP 5.1 Lebenszyklusbewertung	103
Zusammenfassung	103
Einführung	104

Zielsetzung	104
Grundlagen & Festlegung der Funktionseinheit	105
Hauptkomponenten und Bauteile	105
Phasen des Lebenszyklus	106
Ausschlüsse	113
Berechnungsansatz	113
Lebenszyklus-Inventarisierung	113
Verfahren der Datenerhebung	114
Bewertung der Auswirkungen auf den Lebenszyklus	115
Ergebnisse	117
Vergleich der Szenarien für das Lebensende	122
AP 5.2 Ressourceneffizienz und Identifikation Technologiepotentiale	124
Übersicht der kritischen Umweltauswirkungen	124
Optimierungsvorschläge	125
Vergleich mit einem Standardprodukt	126
Empfehlungen an zukünftige Forschung	127
Technologiepotentiale	128
Beschreibung von Änderungen gegenüber dem ursprünglichen Antrag	128
Auswertung	129
Meilenstein 1: Anforderungen, Grundwerkstoffe und Bauteilkonzept definiert	129
Meilenstein 2: Kombiniertes Verbundherstellungsprozess im Labor realisierbar	129
Meilenstein 3: Verbundmaterial charakterisiert und mit digitaler Simulation kalibriert	129
Meilenstein 4: Hergestellte Testbauteile erfüllen definierte Anforderungen	129
Schlussfolgerungen des Gesamtprojekts	129
Publikationen	133
Fachzeitschriften	133
Konferenzen	133
Zeitschriften, Bücher	133
Schlussworte	134
Danksagung	134
Mitwirkende	135
Autorinnen und Autoren	135
Weitere Mitwirkende	135
Fachliche Betreuung	135
Kurzbiographien	136
Literaturverzeichnis	139
Anhang 1	144
Anhang 2	148
Abbildungsverzeichnis	163
Tabellenverzeichnis	169

Kurzfassung

Das Forschungsprojekt hat die Entwicklung einer Holz-Myzelium-Verbundbauweise für CO₂-neutrale, zirkuläre Innenausbauten für Büroflächen zur Aufwertung des Gebäudebestands zum Ziel. Erforscht werden adaptive und flexible Bausysteme, die das Wohlbefinden der Menschen in den Mittelpunkt stellen. Ausgehend von dem Potential des Pilzmyzeliums, als schnell erneuerbarer, regenerativer, erschwinglicher kohlenstoffarmer Baustoff, sollen in Verbindung mit additiven, holzbasierten Herstellungsverfahren Bioverbundbauweisen für Innenraumanwendungen erforscht werden. Da Myzelium hervorragende schallabsorbierende Eigenschaften aber eine geringe strukturelle Tragfähigkeit besitzt, steht die Verbundbauweise von Holz und Myzelium als zukunftsfähige Technologie im Fokus der Forschung. Es werden automatisierte Verfahren für die effiziente Erstellung von 3D-Gitterstrukturen aus heimischen Holzsorten entwickelt, die als Bewehrungs- und Formgerüst für das Biowachstum dienen. Das so hergestellte Verbundmaterial wird durch Versuchsreihen hinsichtlich der mechanischen Belastbarkeit und der Raumakustik charakterisiert. Mit computergestützten Simulationsverfahren werden Ansätze zur statischen Berechnung entwickelt, die mit den Versuchen kalibriert werden. Aufbauend auf dem Eigenschafts- und Anforderungsprofil kommen parametrische Werkzeuge bei der Formfindung zur Anwendung. Mögliche Wertschöpfungsketten für die Umsetzung einer Kreislaufwirtschaft werden konzeptioniert, die CO₂ Aufwendungen werden über den Lebenszyklus hinweg bilanziert und mit anderen am Markt etablierten Lösungen verglichen. Zur Erreichung dieser Ziele wird ein Projektkonsortium mit unterschiedlichen Spezialisierungen aus der Universität Kassel (Prof. Eversmann), KIT (Prof. Hebel) und ARUP (Dr.-Ing. Jan Wurm) gebildet. Dadurch werden das für dieses Projekt notwendige und anschlussfähige Fachwissen sowie Forschungserkenntnisse zu additiver Herstellungstechnik, Biowachstumstechnologien und integriertem Design und Engineering ideal kombiniert.

Abstract

The research project aims to develop a wood-mycelium composite construction method for CO₂-neutral, circular interior office spaces to upgrade existing buildings. Adaptive and flexible building systems that focus on people's well-being are being researched. Based on the potential of fungal mycelium, as a rapidly renewable, regenerative, affordable low-carbon building material, bio-composite construction methods for interior applications will be explored in conjunction with additive wood-based manufacturing processes. Because mycelium has excellent sound-absorbing properties but low load-bearing capacity, composite construction of wood and mycelium is the focus of research as a viable technology for the future. Automated processes are being developed for the efficient creation of 3D lattice structures from native wood species that serve as reinforcement and molding scaffolds for biogrowth. The resulting composite material is characterized through series of tests with respect to mechanical load capacity and room acoustics. Computer-aided simulation methods are used to develop approaches for static calculation, which are calibrated with the experiments. Based on the property and requirement profile, parametric work displays are used in form finding. Possible value chains for the implementation of a circular economy will be conceptualized and the CO₂ expenditures over the life cycle will be balanced and compared with other solutions established on the market. To achieve these goals, a project consortium with different specializations from the University of Kassel (Prof. Eversmann), KIT (Prof. Hebel) and ARUP (Dr.-Ing. Jan Wurm) will be formed. This ideally combines the necessary and connectable expertise and research knowledge on additive manufacturing technology, biogrowth technologies and integrated design and engineering for this project.

Stand der Forschung

Myzelium

Myzel oder Myzelium ist das Wurzelnetzwerk von Pilzen, eine schnell wachsende Matrix, die als selbstorganisierendes, natürliches Bindemittel fungieren kann. Es besteht aus einzelnen Hyphen, die aus Sporen des Myzel-Pilzstamms wachsen und Materialien zersetzen, die Kohlenstoff und Stickstoff enthalten (Islam et al., 2017). Durch die Verwendung pflanzlicher Abfallprodukte, wie Sägemehl oder Schalen, bindet das dichte Netzwerk des Myzels das Substrat in einen strukturellen Materialverbund. Treffen sich einzelne Hyphen, verwachsen sie zusammen und bilden so eine verwobene Netzstruktur. Diese Eigenschaft soll genutzt werden, da beim Wachstum dieses Netzwerks, so etwas wie ein biologischer Zement entsteht, der sowohl die schon eingemischten biologischen Substrate miteinander vernetzt, als auch die Bindung zu Holzstrukturen schaffen kann. Erhitzt man so entstehende Bauteile auf 60-70° Celcius, entzieht dies das Wasser und der Pilzorganismus stirbt ab (Santos et al., 2021). Zurück bleibt eine rhizom-artige, belastbare und haltbare Struktur. Die Vorteile solcher Materialien sind erheblich: Da myzelgebundene Bauteile organisch sind, können sie nach ihrer ursprünglichen Verwendung einfach kompostiert werden (Dänzer, 2018). Das Material kann lokal und unabhängig von landwirtschaftlicher Bodennutzung (wie z.B. für die Lebensmittelindustrie) angebaut werden, wodurch sowohl die Energie als auch die für den Transport erforderliche Zeit reduziert werden. Darüber hinaus können myzelgebundene Bauteile CO2 absorbieren und speichern und somit als Baumaterial positive Effekte auf die Klimabilanz ausweisen (Livne et al., 2022). Die Forschungsaktivitäten am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) konzentrieren sich auf die Entwicklung myzelgebundener Bauteile unter Verwendung landwirtschaftlicher Abfallprodukte als Substrate.

Die Myzeliumforschung wurde vor einigen Jahren in den USA populär. Es haben sich an der West- und an der Ostküste zwei Forschergruppen etabliert, welche ganz unterschiedlich vorgehen. In San Francisco ist dies Phil Ross, ein Künstler, der sich über mehrere Experimente nun der Züchtung von reinem Myzelium widmet, das weiterverarbeitet als veganer Lederersatz sehr erfolgreich zum Einsatz kommt. Das Produkt wird nun unter der Firma „Mycoworks“ vertrieben (Mycoworks, o.J.). Hier steht die Erarbeitung eines Lederersatzstoffes im Vordergrund. Das Wachstum des puren Myzels erfolgt auf einer nährstoffreichen Flüssigkultur und die Wachstumsbedingungen sowie die Weiterverarbeitung führen zu Ergebnissen mit einer gleichmäßigen Konsistenz und flächenartiger Form. Für den Bausektor sind diese Produkte als strukturell belastbare Elemente nur sehr schwer und bei sehr spezifischen Oberflächenanwendungen denkbar.

Die zweite Forschergruppe, „Ecovative Design“ aus New York, hat sich hauptsächlich auf alternative, styroporersetzende Verpackungsmaterialien spezialisiert (Ecovative, o.J.). Interessant ist hier die Möglichkeit, stoß- und schallisolierende Materialien auf Basis von Myzelium herzustellen. Erste Versuche hierzu wurden vom „KIT Team“, im „NEST“ Projekt der Eidgenössischen Materialprüfungsanstalt Empa, in Dübendorf bei Zürich gemacht: Myzel-Platten wurden für den Einsatz als Dämmstoff, sowie als Putzträger für Lehmputze untersucht (Kakkos et al., 2019). Auch diese Art Produkte eignen sich nicht als strukturelle Bauteile für eine Verwendung in der Bauindustrie.

An der RWTH Aachen wurden Bausteine aus Myzel entwickelt, allerdings sind hier noch keine konkreten Anwendungen verfügbar. Während die Charakterisierung der materiellen Eigenschaften in Abhängigkeit von Kultivierungsprozessen dokumentiert ist (Moser et al., 2017) bedarf es grundlegende anwendungsbezogene Forschung, um diese Materialien in die Bauanwendung zu bringen.

In einem EU geförderten Projekt, „Fungal Architectures“ (Adamatzky et al., 2019)(FUNGAR), forscht aktuell eine Gruppe internationaler Forscher („CITA“, Zentrum für Informationstechnologie und Architektur der „KADK“, Zentrum für unkonventionelles Rechnen, „UWE Bristol“, und Mykologie, Universität Utrecht und Industriepartner „MOGU“) an intelligentem Verhalten von Myzel in Architektur und Gebäuden (Adamatzky et al., 2019). Hier liegt der Fokus weniger auf der Entwicklung einer Bautechnologie, sondern auf der Untersuchung der Möglichkeit adaptiver Veränderungen von Myzel auf Licht, Temperatur und

Umweltverschmutzung, sowie der Funktionalisierung des Myzel-Netzwerkes als „computing device“ (Goles et al., 2020).

Die italienische Firma MOGU hat zusammen mit ARUP diverse Forschungsprojekte für Architekturanwendungen von Myzelium abgeschlossen (ARUP, o.J.), (Mogu Srl., 2022) und vertreibt aktuell Myzel-Platten, welche als Akustikelemente und Fußbodenplatten verwendet werden können.

Es wurden konzeptionelle Untersuchungen zur Verwendung von natürlich gewachsenen Holzstrukturen und Myzelium durchgeführt (Vallas & Courard, 2017) allerdings ohne die Entwicklung eines konkreten Verbundbausystems.

Additive Fertigung mit Filamenten aus Holzmehl

Filamente mit Holzanteil sind bereits auf dem Markt erhältlich. Diese Filamente sind im Fused Deposition Modeling (FDM) -Verfahren druckbar. In der Forschung wurden verschiedene Polymerfilamente mit Lignocellulose mit verbesserter Qualität hergestellt. Mit Holzmehl (5%) angereichertes Polylactide (PLA)-Verbundfilament wurde von (Tao et al., 2017) (2017) entwickelt. Ähnliche PLA- oder Polypropylen (PP) -Filamente mit höherem Holzmehlanteil, nämlich 10, 20 und 30%, wurden durch Doppelschneckenextrusion hergestellt und im FDM-Verfahren weiterverwendet (Montalvo Navarrete et al., 2018). Die 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. Gleichmäßig strukturierte Filamente auf der Basis von mikronisierten Kakaoschalenabfällen (bis zu 50%) und biologisch abbaubarem Poly (ϵ -caprolactone), PCL, wurden hergestellt und im 3D-Druck verwendet. Holzverbundstrukturen mit überlegenen mechanischen Eigenschaften wurden von (Pitt et al., 2017)) entwickelt. Die verbesserten mechanischen Eigenschaften wurden hauptsächlich auf eine verbesserte Wechselwirkung zwischen den Schichten durch Überlappung von Filamenten, eine gleichmäßige Dispersion von Holzpulver, eine Verdichtung von Ausgangsmaterialpaste und Faserausrichtung zurückgeführt. 3D-Druckfilamente mit bis zu 30% oberflächenmodifiziertem Mikro- / Nanocellulose-PLA-Verbund wurden von (Wang et al., 2017) hergestellt. Hochmoderne faserverstärkte Polymere (einschließlich Cellulose-Nanofasern) in additiven Fertigungstechnologien wurden von (Parandoush & Lin, 2017) vorgestellt. Auch der 3D-Druck mit Holzmehl, einem fein pulverisierten Holz oder wiedergewonnenem Holz, in Kombination mit einem Bindemittel aus Cellulose, Nanokristallen und Xyloglucan ist möglich (Kam et al., 2019). Liquid Deposition Modeling (LDM) ermöglicht das Drucken von Werkstoffen von flüssiger Konsistenz. Die ersten Versuche, Holzwerkstoffe mittels Liquid Deposition Modeling (LDM) zu drucken, beschreiben Kariz et al. (2016). Sie verwendeten Polyvinylacetat (PVAc) und Urea-Formaldehyd (UF) als Bindemittel. Die Menge an Holzpulver in den 3D-Druckobjekten war auf 15–20% beschränkt. Rosenthal et al. (2018) konnten den Holzanteil in Studien mit dieser Methode bis auf 90% erhöhen. Weitere Studien befassen sich mit dem 4D-Druck mit Lignocellulosematerialien für intelligente Materialien. Unter Ausnutzung der anisotropen und hygroskopischen Strukturen der Holzfaserrichtung wurden Holzverbundwerkstoffe am „Self-Assembly Lab“ des MIT entwickelt, die sich unter Veränderung der Feuchtigkeit automatisch verformen (Correa et al., 2015). Dieses als 4D-Druck (zusätzlich zeitliche Anpassung des Materials) bekannte Verfahren wurde durch differenziertes Drucken mehrerer Materialien mit Filamenten auf Holzbasis und anderen Polymerfilamenten erzielt.

Additive Fertigung mit natürlichen Fasern

Flachs, Hanf und Ramiefaser gehören zu den Naturfasern auf Cellulosebasis, die die höchsten spezifischen Elastizitätsmodule und Zugfestigkeiten aufweisen. Allerdings ist festzuhalten, dass in der Literatur große Variabilität zu beobachten ist. Bei der Auswahl der Fasern spielt im Allgemeinen die Geografie in Bezug auf die Verfügbarkeit von Fasern eine wichtige Rolle. In Europa lag der Schwerpunkt beispielsweise auf Flachsfasern, während Hanf, Jute, Ramie, Kenaf und Sisal in Asien von größerem Interesse waren. Die „Harakeke“-Faser (Phormium tenax, allgemein bekannt als neuseeländischer Flachs) wird aufgrund ihrer guten mechanischen Eigenschaften und ihrer örtlichen Verfügbarkeit in Neuseeland auch für strukturelle Anwendungen in Betracht

gezogen (Pickering et al., 2016). Auch Anwendungen von Biofaserverbundwerkstoffen in der Automobilindustrie wurden untersucht (Bledzki et al., 2006). 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. Thermoplastisches Filament und Endlosfasern können jeweils dem 3D-Drucker separat zugeführt werden, die Fasern werden unmittelbar vor dem Drucken, in der erhitzten Düse, mit dem Filament des Druckers imprägniert (Matsuzaki et al., 2016). (Hinchcliffe et al., 2016) zeigen, dass die spezifischen mechanischen Eigenschaften des Drucks verbessert werden können, indem eine Kombination aus additiver Fertigung (3D-Druck) und Vorspannung der kontinuierlichen Faserverstärkung verwendet wird. Durch Electro-, Dry-, und Wet-spinning von Cellulosematerialien wurden Submikron-Fasern und ultrafeine Filamente mit einer starken Struktur hergestellt (Carra et al., 2017) (Lundahl et al. 2017).

Stand der eigenen Forschung

Myzelium

Am „KIT“ in Karlsruhe und am Future Cities Laboratory in Singapore forscht eine Gruppe um Prof. Dirk E. Hebel seit 2016 an dem Vorhaben, Myzelium zur Herstellung von Bauteilen und Baumaterialien einzusetzen. Ziel ist es, die Druckfähigkeit des Materials in einen Bereich zu erhöhen, der einem gebrannten Ziegel nahekommmt (ca. 10 MPa). 2017 wurde auf der Architekturbiennale in Seoul der sogenannte „Mycotree“ präsentiert, die erste selbsttragende Myzelium-Struktur weltweit (Abbildung 1).



Foto: Links: Carlina Teteris, Rechts: Volker Kreidler

Abbildung 1

Links: Mycotree Seoul Biennale 2017, Rechts: MycoTree Futurium Berlin, 2019.

In NYC hatte „Ecovative Design“ bereits 2014 ein ähnliches Projekt entwickelt, in Zusammenarbeit mit dem Architekten David Benjamin: Die Struktur benötigte im Inneren allerdings noch ein Holzgerüst. Die selbsttragende Struktur und die Forschung an Myzelmaterialien selbst wurde 2019 von der Initiative „Land der Ideen“ im Wettbewerb „Beyond Bauhaus“ ausgezeichnet; Material aus Pilzmyzel wurde als eines der zukunftsträchtigsten Baumaterialien der Zukunft eingeschätzt. Kleinere Versionen der Struktur sind heute im Haus der Zukunft, dem „Futurium“ in Berlin zu besichtigen. Weiterhin wurden neuartige Plattenwerkstoffe entwickelt, welche in naher Zukunft chemisch verklebte Holzwerkstoffplatten ersetzen könnten. Diese Platten werden zurzeit in Indonesien einer Langzeitstudie unterzogen, um die Langlebigkeit zu validieren (Abbildung 2). In einem eigens entwickelten Myzelium Labor wurde an verschiedenen Pilzarten, unterschiedlichen Wachstumsbedingungen, verschiedensten Substraten, biologischen Immunitäten gegenüber anderen

Mikroorganismen und zu verschiedensten Produktionsmechanismen und Apparaten geforscht, um das Material als Baustoff zu etablieren.



Fotos: Carlina Teteris

Abbildung 2

Links: Plattenwerkstoffe aus Myzelium, Rechts: Testbau in Indonesien.

Die Entwicklung von zirkulären, bio-basierten Bausystemen ist ein Forschungsschwerpunkt des ARUP Material-Expertennetzwerks, unter der Leitung von Dr. Jan Wurm. Aufbauend auf den Erkenntnissen des europäischen Verbundforschungsprojektes „BioBuild“, das im Rahmen des „Framework Programs 7“ (FP7) gefördert wurde und des eigens initiierten Forschungsprojektes „Urban Bio Loops“ (Carra et al. 2017), hat ARUP Deutschland ein breites und anschlussfähiges Wissen zu der Leistungsfähigkeit, grundsätzlichen Anwendbarkeit und den zugrundeliegenden Prozessketten von Baustoffen aus rasch nachwachsenden Rohstoffen erarbeitet. Initiiert durch das bereits erwähnte Projekt „HyFi Tower“, eine großmaßstäbliche Installation aus Myzelium Eco-Bricks am „MoMA PS1“ in New York (Abbildung 3), forscht ARUP seit 2014 an der Verwendung von Myzelium Materialien für das Bauwesen und hat ein internationales Netzwerk zu anderen Forschungseinrichtungen und spezialisierten Unternehmen wie „Ecovative“ und „mogu“ aufgebaut.



Quelle: Arup

Abbildung 3

Pavilion für das MOMA PS 1 in New York aus Myzelium, The Living/ ARUP, 2014.

Mit „mogu“ forscht ARUP seit 2018 an Holz und Myzelium basierten Bausystemen für den Innenraum (Abbildung 4). Die Konzeptentwicklung wurde 2019 im Rahmen der „DGNB Sustainability Challenge“ im Bereich Forschung und Innovation ausgezeichnet. Die Bioverbundwirkung von Holz und Myzelium konnte nachgewiesen werden. Allerdings wird das Potential der Verbundbauweise hier nicht genutzt, sondern es wird ganz konventionell auf eine konventionelle Behandlung von tragenden Holzrahmen und nichttragenden Ausfachungen zurückgegriffen.



Quelle: Arup

Abbildung 4
Konzepte von ARUP / Mogu zum Einsatz von vorfabrizierten Myzeliumbauteilen, beispielsweise zur Verbindung von Myzeliumpanelen in Holzrahmen

Die Forschungen führten zu der gemeinsamen Produktentwicklung von FORESTA, ein seit 2021 kommerziell erhältliches Produkt für den Innenausbau zur Verbesserung der Raumakustik (Abbildung 5) (ARUP, o.J.).



Foto: Jan Wurm

Abbildung 5
FORESTA – Ein gemeinsame Produktentwicklung von Arup und Mogu. Das Produkt ist seit 2021 am Markt eingeführt und besteht aus akustischen Absorbern aus Myzelium und einer unbehandelten Holzunterkonstruktion

Seit 2010 kollaboriert ARUP mit dem dänischen Designer Jonas Edvard, ein Pionier in der Verwendung von bio-fabrizierten Materialien für Produktdesign, in der Entwicklung einer akustisch wirksamen Rauminstallation. Dieses Projekt zielt auf die Erforschung von menschlichen Sinneswahrnehmungen in Bezug zu Myzelium-Materialien ab (Abbildung 6, Abbildung 7). Durch die Vorarbeiten bringt ARUP für die grundlegende Erforschung einer Holz-Myzelium Verbundbauweise ein umfassendes Verständnis der grundsätzlichen Eigenschaften und Anwendungsbedingungen von Myzelium in Bezug zu Akustik, Brandschutz, Konstruktion und Bauphysik mit in das Projekt ein.



Foto: Jonas Edvard

Abbildung 6
Studien zu der Formfindung einer akustisch wirksamen Rauminstallation, Zusammenarbeit Jonas Edvard und Arup

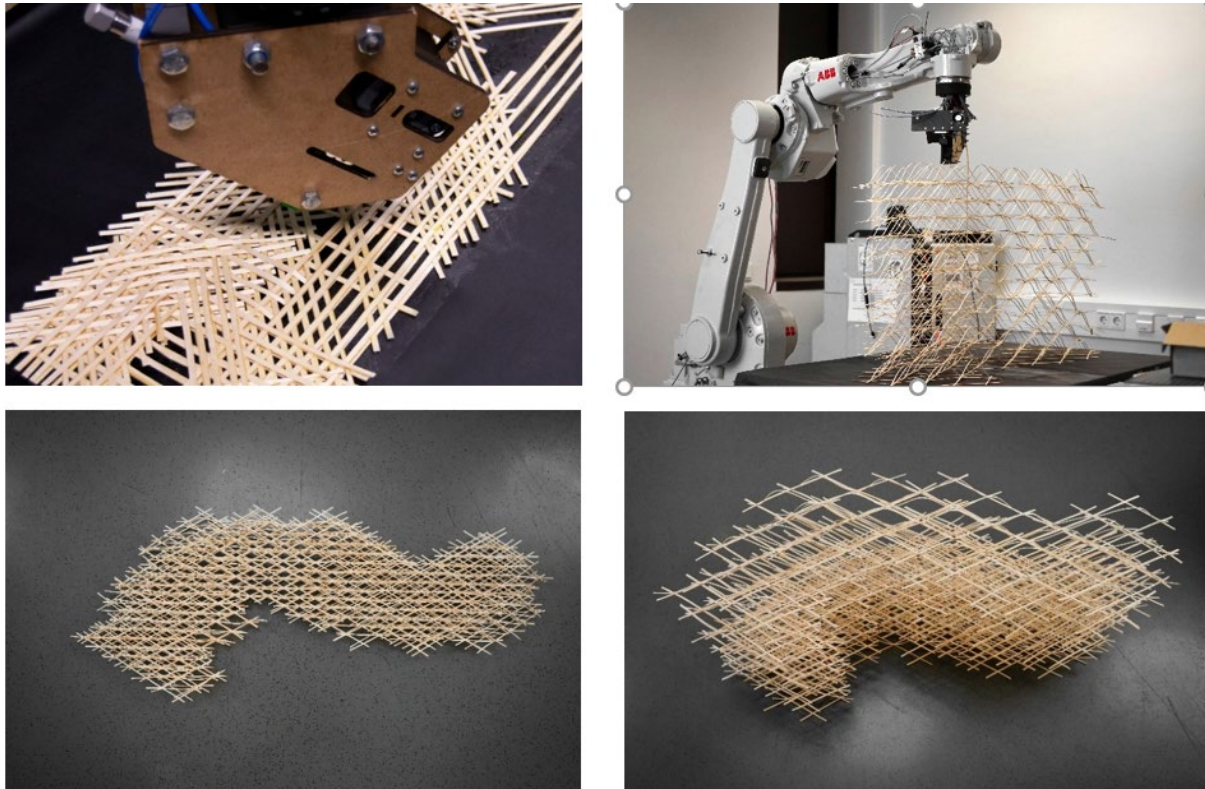


Foto: Jan Wurm

Abbildung 7
MyxSail – eine Zusammenarbeit zwischen Jonas Edvard mit Arup / Prof. Jan Wurm. Das akustische Segel besteht aus Myzelium Matten

Additive Herstellung mit Weidenfilament / Furnierstreifen

An der Universität Kassel wurde ein neues additives Herstellungsverfahren und Druckmaterial auf Basis von Flechtweide entwickelt (Eversmann et al., 2021) (Abbildung 8). Diese additive holzbasierte Herstellungstechnik eignet sich für die effiziente Herstellung großer Bauteile durch räumliche Gitterstrukturen, ähnlich zu Abstandsgewirken in der Textiltechnik. Als Strukturmaterial wird ein Endlosband aus Flechtweiden bzw. 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 Thermoplast und gemahlenem Holz bestehen. 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: FG Experimentelles und Digitales Entwerfen, Universität Kassel

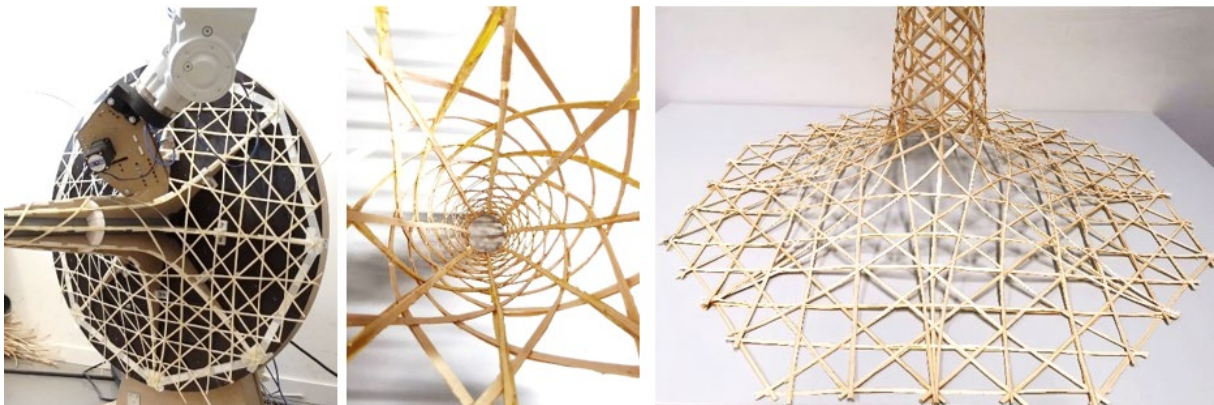
Abbildung 8
Additive Herstellung mit einem Endlosfilament aus Weidenholz, Universität Kassel.

In ersten Studien wurden prototypische Verfahren zur additiven Herstellung von räumlichen Bauteilen aus Weidenholz und aus Furnierband entwickelt. Dabei wurden plattenförmige und gekrümmte Bauteile (Eversmann et al. 2022), rechteckige Hohlrohrprofile, graduell variable Formen und pilzförmige Bauteile (Göbert et al., 2022) entwickelt. In einer Masterarbeit wurde das robotische Wickeln von Hohlrohrprofilen untersucht (Liu et al., 2019). Dabei wird Furnierband mit einem speziell entwickelten Endeffektor mit heißem Wasserdampf für enge Biegeradien biegsam gemacht und auf einem Drehpositionierer unter synchroner Bewegung aufgetragen. Der Verbund der einzelnen Schichten wird über Holzleim realisiert, der manuell aufgetragen wurde. Der Anpressdruck wird über Zug des Furnierbandes hergestellt. In weiteren prototypischen Studien wurde das Wickeln von variablen Geometrien und auch ein sich graduell verändernder Materialanteil (Abbildung 9) sowie das Wickeln von Übergängen flächiger Bauteile zu Stützen (Abbildung 10) untersucht.



Quelle: FG Experimentelles und Digitales Entwerfen, Universität Kassel

Abbildung 9
Robotisches Wickeln von Freiformen mit gradueller Materialverteilung, Universität Kassel.

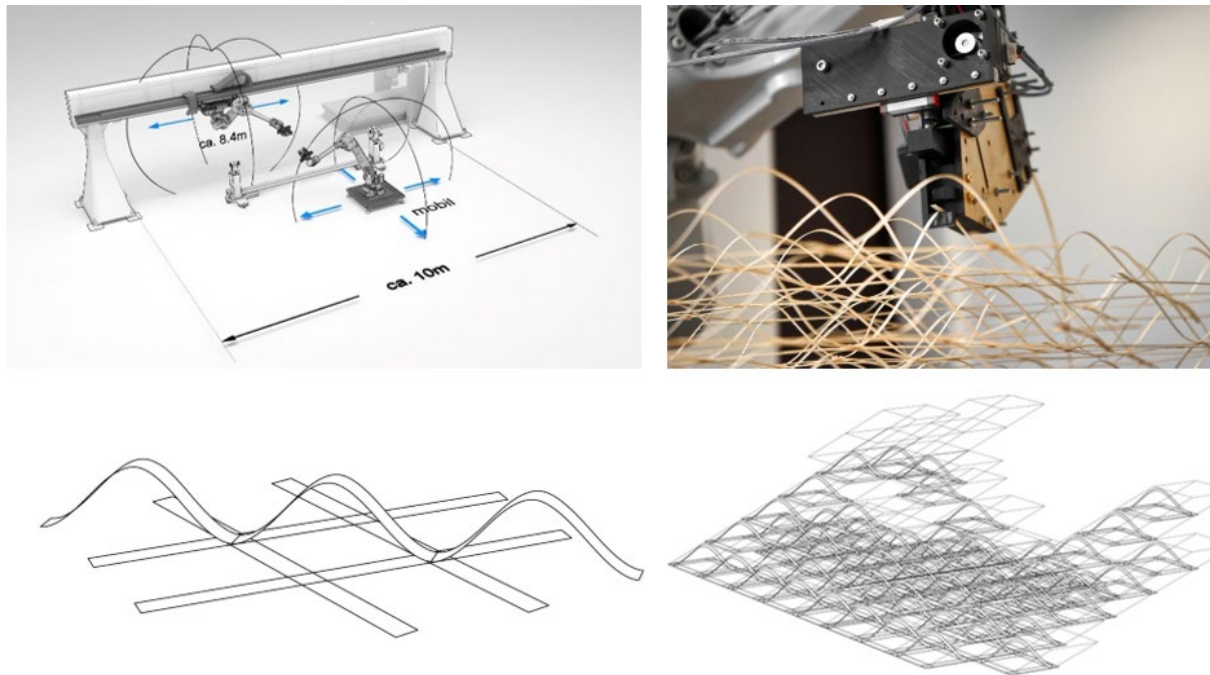


Quelle: FG Experimentelles und Digitales Entwerfen, Universität Kassel

Abbildung 10
Robotisches Wickeln von Übergängen von flächigen Bauteilen zu Stützen, Universität Kassel.

Fertigungskonzept

Additive Holztechnik: Das Fachgebiet Experimentelles und Digitales Entwerfen und Konstruieren verfügt über ein durch die DFG und die Universität Kassel finanziertes Großgerät (Abbildung 11). Diese Forschungsanlage für Robotische Architektur-Produktion (RAP-Lab) ermöglicht eine große Bandbreite an architektonischen, baukonstruktiven und materialwissenschaftlichen Versuchsanordnungen. Die Anlage besteht aus einem hängenden, an einem Portal verfahrbaren Industrieroboter, einer horizontalen Positioniereinheit und einem mobil versetzbaren Roboter. Diese Bestandteile können kooperativ miteinander vernetzt werden und in unterschiedlichsten Konfigurationen für Forschungsprojekte im Architekturmaßstab verwendet werden. Der Arbeitsraum von ca. 10 x 4 x 2,5 m ist für maximale Nutzungsflexibilität durch Schnellwechselsysteme und Anschlussmöglichkeiten für den Einsatz in verschiedenartigen Forschungsvorhaben ausgelegt. Geplant ist, spezifische Endeffektoren zu entwickeln, die 3D-Holzgitterstrukturen aus Holzfilament oder -furnier effizient und präzise herstellen können, welche auf planaren sowie gekrümmten Formen aufgetragen werden können.



Quelle: FG Experimentelles und Digitales Entwerfen, Universität Kassel

Abbildung 11
Forschungsanlage für Robotische Architektur-Produktion (RAP-Lab): Geplanter Versuchsaufbau und Toolentwicklung zur Herstellung von 3D-Holzgitterstrukturen.

Myzeliumfertigung: Am KIT besteht seit 2020 ein eigens entwickeltes Myzelium-Labor. Hier können myzeliumgebundene Werkstoffe unter biologisch reinen Bedingungen gezüchtet und deren Eigenschaften anschließend präzise analysiert werden. Das KIT setzt hierzu verschiedene Pilzstämme ein, deren Anwendungsmöglichkeit sich durch vorherige Grundforschungsprojekte ergeben hat. Ebenfalls werden hier verschiedenartige Additive und Substrate getestet, die das Wachstum und damit die späteren Materialeigenschaften beeinflussen. In dem Labor stehen Autoklaven, eine Sterilwerkbank mit Absaugsystem, Wachstumskammern, Luftfeuchte-, Temperatur- und Abluftregelungssysteme, eine Trockenkammer, eine große Warm/ Kaltpresse mit geregelter Druck- und Temperatursystem und eine Universal Testing Machine (UTM) zur Verfügung. Geplant ist, die vorgefertigten Holzstrukturen von einem Myzelium-Substrat-Gemisch umwachsen zu lassen. Dabei dient die Holzstruktur als Armierung wie auch als zusätzliches Substrat, um einen Oberflächen-Formschluss durch Wachstum zu erreichen. Das Ergebnis können Bioverbundbauplatten sein, die in Innenräumen sehr vielfältig eingesetzt werden können und deren Eigenschaften sich von isolierend bis schallabsorbierend beschreiben lassen (

Abbildung 12). Das System kann somit zu alternativen biologischen Wandbauplatten ausgereift werden, welche einer 100% Kreislaufwirtschaft genügen.



Quelle: FG Experimentelles und Digitales Entwerfen, Universität Kassel

Abbildung 12
Konzept für Verbundbauweise: Additiv hergestellte 3D-Holzgitterstruktur (links), Biowachstum des Myzelium-Substrat-Gemischs in Holzstruktur (mitte), finales Verbundpanel (rechts)

Lebenszyklus/ Ökologische Bewertung der Bauteile

Die Untersuchung der Umwelteinflüsse ist für die Entwicklung der Verbundbauweise von zentraler Bedeutung. In allen Projektphasen von Material- bis zur Konstruktionsentwicklung werden Materialien und Verarbeitungstechnologien im Rahmen einer Lebenszyklusbetrachtung bewertet. Zunächst wird der Stand der Technik zur Ökobilanzierung von bio-basierten Materialien und relevanter Kategorien von Umwelteinflüssen herangezogen, eine Datengrundlage für die Bewertung von Bioverbundmaterialien zusammengestellt und so weit wie möglich verifiziert. Wo keine Datengrundlage vorhanden ist, werden plausible Annahmen für:

- Entnahme und Vorhaltung der nachwachsenden Rohstoffe (NR)
- Herstellung und Verarbeitung der NR
- Transport und Verteilung
- Pflege und Wiederverwendung
- Rezyklierung
- Kompostierung

getroffen. Für die Bewertung von bio-basierten Materialien aus Abfall- und Reststoffen wird eine entsprechende Bewertungsmethode und ein Bilanzierungsraum nach Stand der Technik und etablierten Verfahren nach und DIN EN ISO 14044 (2021) festgelegt. Im Laufe des Projekts werden Ansätze und Konzeptionen auf Grundlage eines QuickScan Tools (in Anlehnung an „One Click LCA“ (2023)) mit Fokus auf CO₂-Fußabdruck im Vergleich zu zwei anderen am Markt etablierten Lösungen kontinuierlich und abschließend bewertet.

Forschungslücke/Entwicklungsbedarf

Inneneinrichtungen in Büro und Einzelhandel haben eine relative kurze Nutzungsdauer von 5-7 Jahren (*Embodied Carbon and Circularity in Office Interiors.pdf*, o. J.). Die Verwendung von Verbundmaterialien ist hier besonders hoch (Salpriyan et al., 2024) – Trägerplatten werden mit dekorativen Deckschichten oder Funktionsbeschichtungen versehen, die brandschutztechnische, lichttechnische oder akustische Eigenschaften erfüllen müssen. Oftmals kommen Verbundmaterialien zum Einsatz, die biologisch abbaubare Materialien wie Holzfasern mit nicht biologisch abbaubaren Materialien wie technische Klebstoffe, dauerhaft verbinden, was deren Kreislauffähigkeit zerstört. Insgesamt ist der ökologische Fußabdruck von Innenausbauten beträchtlich und es gibt zurzeit nur eine begrenzte Auswahl an alternativen biobasierten, leistungsfähigen und bezahlbaren Materialien (Arup Deutschland GmbH, o. J.). Diese Lücke möchte das Projekt mit der Erforschung einer neuartigen, zirkulären Bioverbundbauweise schließen. Additive Herstellungsprozesse sind vielversprechende Bauprozesse, die eine effiziente Herstellung von Bauteilen direkt aus der 3D-Planung möglich machen. Im Holzbau, der das aktuell wichtigste nachwachsende Materialsystem Holz nutzt, finden additive Verfahren trotz der hohen Digitalisierung und technischen Entwicklung noch kaum Anwendung. Aktuell bekannte Verfahren verwenden Holz in pulverisierter Form (s.u. Additive Fertigung mit Filamenten aus Holzmehl), wodurch die Materialeigenschaften weitestgehend verloren gehen (Das et al., 2021). Weitere Herausforderungen sind der Maßstab und die Geschwindigkeit, die bei aktuellen 3D-Druckverfahren noch nicht mit traditionellen Herstellungstechniken konkurrieren können (Perkins & Skitmore, 2015). Myzelium dagegen stellt ein neuartiges schnellwachsendes Materialsystem dar, das die Möglichkeit bietet, akustisch wirksame und vielgestaltige Flächenbauteile zu produzieren (Pelletier et al., 2013). Diese sind jedoch aufgrund der geringen strukturellen Belastbarkeit in der Größe und Anwendung stark begrenzt. In diesem Forschungsprojekt soll das komplementäre Zusammenspiel beider Materialien und Bauweisen grundlegend erforscht und das Potenzial dieser Bioverbundwerkstoffe aufgezeigt werden.

Zielsetzung

Das Forschungsvorhaben bearbeitet konkret zwei Themenschwerpunkte des Zukunft Bau-Förderaufrufs 2021 (Zukunft Bau, 2021): die Entwicklung neuer Materialien und Techniken vor dem Hintergrund der Kreislaufwirtschaft, und die Etablierung klima- und umweltfreundlicher Bauweisen. Dies soll durch die Entwicklung einer innovativen Bioverbundbauweise, für das nachhaltige und zirkuläre Bauen im Innenraum erreicht werden. Innenausbauten sind maßgeblich für Wohlempfinden, Gesundheit und Produktivität der Menschen. Aufgrund der hohen Anforderungen in Bezug zu Akustik, Brandschutz und Ästhetik sind Innenausbauten mit einem hohen Ressourceneinsatz verbunden. Bei geringen durchschnittlichen Lebenszyklen tragen Innenausbauten maßgeblich zum Abfallaufkommen und dem CO₂ Verbrauch im Bausektor bei. Bausysteme, die auf Grundlage von Leasingmodellen eine mehrmalige Wiederverwendbarkeit ermöglichen und damit den Ressourcenverbrauch signifikant reduzieren könnten, werden noch kaum angeboten. Anpassungen an lokale Gegebenheiten z.B. in Bezug zum technischen Ausbau erfordern eine hohe Adaptivität, die in der Regel im System nicht wirtschaftlich umzusetzen ist. Eine andere hier vorgeschlagene Herangehensweise, den Ressourcenverbrauch und CO₂-Fußabdruck von Innenausbauten zu reduzieren, liegt in der Entwicklung einer neuen klima- und umweltfreundlichen Bauweise durch die Verwendung von nachwachsenden Rohstoffen mit geringer oder positiver CO₂-Bilanz, die am Ende des Lebenszyklus wiederverwendet oder komplett in den biologischen Kreislauf rückgeführt werden können. Die additiven Fertigungsmethoden erlauben die wirtschaftliche Aufwertung von natürlichen Materialien mit geringem wirtschaftlichen Wert zu leistungsfähigen, kosteneffizienteren Bauweisen. Das vorliegende Forschungsvorhaben entwickelt und bewertet in grundsätzlicher Weise Lösungsansätze, funktionale Innenausbautensysteme aus heimischen, schnell nachwachsenden, regenerativen Rohstoffen herzustellen.

Forschungsdesign

Forschungsfragen

Konzeptionierung

- Welche Anforderungen werden an die Bauelemente gestellt wie z.B. in Bezug auf die mechanische Belastbarkeit, Langlebigkeit, Brandschutz und Akustik?
- Wie können die raumakustischen und konstruktiven Eigenschaften für die Anwendung als Innenraumeinbauten durch Materialauswahl, Fertigung und Design beeinflusst und optimiert werden?
- Welche Gestaltungsvielfalt ermöglicht die Bioverbundbauweise?

Fertigung

- Welche heimischen Holzarten eignen sich ideal als Substrat für das Myzelium, und können gleichzeitig additiv effizient verarbeitet werden?
- Welche Abfall- und Reststoffe aus der heimischen Landwirtschaft eignen sich?
- Welche Automatisierungstechnologien eignen sich für die Erstellung von 3D-Holzgitterstrukturen?
- Mit welchen Fertigungsparametern kann eine ideale Verbundwirkung aus Holz und Myzelium erreicht werden?
- In welchen Abmessungen lassen sich Bioverbundbauteile fertigen?
- Wie lassen sich Bioverbundbauteile vor Ort fügen?

Kreislauffähigkeit

- Wie sehen die Wertschöpfungsketten und der Materialfluss und Konzepte zur Wiederverwendung und Rückführung in den biologischen Kreislauf aus?
- Wie groß ist der CO₂-Fußabdruck der Bioverbundbauweise über den Lebenszyklus und wie vergleicht sich dieser mit etablierten Lösungen?

Charakterisierung

- Wie wirkt sich der Bioverbund von Holz und Myzelium in Zusammenspiel mit der Geometrie auf die raumakustischen und konstruktiven Eigenschaften aus, und welche Substrate sind vorteilhaft?
- Welche Ansätze der mechanischen und akustischen Dimensionierung können entwickelt und angewandt werden?
- Welche Pilzstämme sind hierfür geeignet? Welche Zuschlagsstoffe können sinnvoll verwendet werden? Und wie kann eine Verbindung zur inneren Holzstruktur gewährleistet werden?
- Welche maximale Leistungsfähigkeit besitzt der Verbundwerkstoff, und in welchen Bereichen ist er einsetzbar?
- Welche zusätzlichen Schutzmaßnahmen für z.B. Langlebigkeit, Resistenz gegenüber Bakterien und anderen Pilzsporen sind nötig und möglich?

Methodischer Ansatz und Organisation

Universität Kassel – Additive Fertigungstechnologie 3D Holzgitter, Projektleitung

- Entwicklung Automatisierungstechnologie durch empirische Versuchsreihen
- Untersuchung herstellbarer Geometrien, maximaler Krümmungsradien
- Untersuchung und Bewertung der Eignung unterschiedlicher Holzarten
- Entwicklung Bindertechnologie für Holzgitter
- Messung Bauteilpräzision durch 3D-Scanning
- Optimierung Fertigungspräzision und Geschwindigkeit

KIT – Biowachstum und Charakterisierung

- Wachstumsversuche Myzelium auf 3D-Gitterstruktur
- Bewertung unterschiedlicher Holzarten und deren mechanische Verbindung während des Myzeliumwachstums (biologische Bindung)
- Untersuchung Geometrie, unterschiedliche Pilzarten und deren Eignung im Zusammenspiel mit der Holz-Gitter-Struktur
- Untersuchungen unterschiedlicher Zuschlagsstoffe (Substrate)
- Variation der Wachstumsbedingungen und Nachbehandlungen
- Mechanische Belastungsversuche, Alterung, Dauerhaftigkeit

ARUP - Raumakustik, Tragwerk und Nachhaltigkeit

- Technisches Anforderungsprofil für Material- und Technologieentwicklung im Bereich Raumakustik, Mechanik und Nachhaltigkeit nach gängigen Normen, Bestimmungen und Stand der Technik
- Interviews zur Akzeptanz und Wechselwirkung in Bezug auf das Wohlempfinden
- Bemessungstool zur frühzeitigen Abschätzung des ökologischen Fußabdrucks auf Grundlage zirkulärer Wertschöpfungsketten
- Bestimmung des akustischen Verhaltens
- Systemische Untersuchungen zu Wechselwirkung Material, Konstruktion und Form mit Bezug zu raumakustischen und
- mechanischen Eigenschaften
- Ansätze für die Auslegung und Dimensionierung von Bauteilen und Verbindungsmitteln
- Deduktion von Konstruktionsregeln für Bioverbundbauweise
- Lebenszyklusbetrachtung
- Regelmäßige Veranstaltungen zum Forschungsstand mit Stake-holdern zur Netzwerkentwicklung von Unternehmen aus dem Bauwesen, Bio-Tech, Architekten und Designern

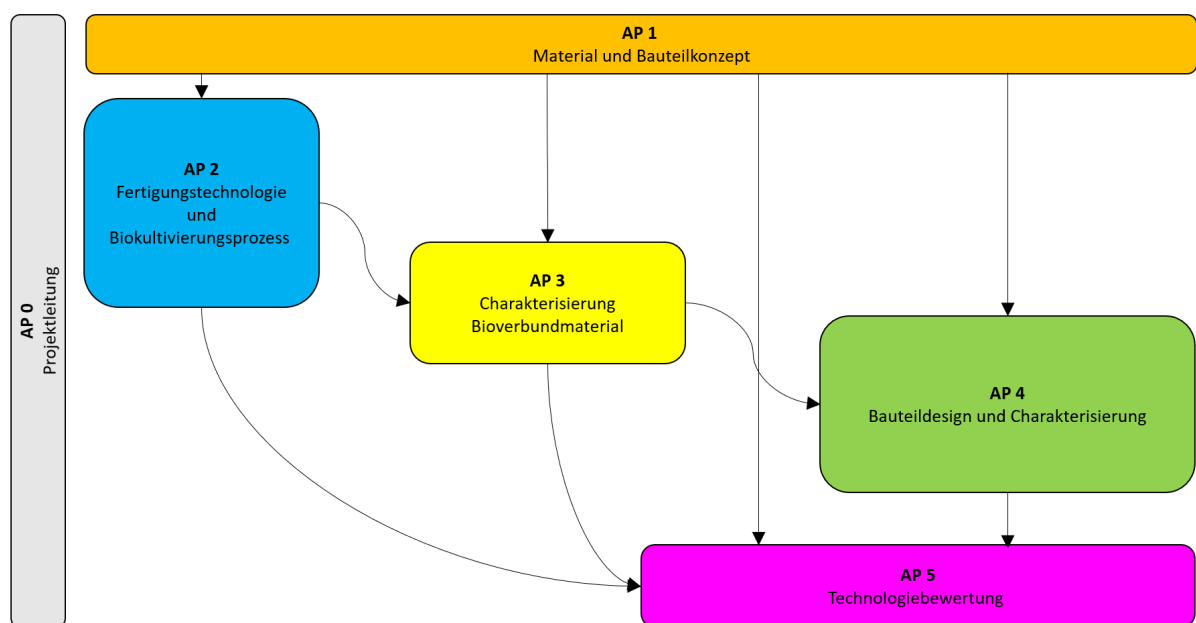
Projektteam

Prof. Dirk Hebel: Die Professur Nachhaltiges Bauen widmet sich der Frage nach alternativen Baumaterialien in einer zukünftigen Kreislaufwirtschaft, wie z.B. der Forschung an myzelgebundenen biotischen Baumaterialien. Realisierte Projekte, welche aus dieser Forschung hervorgegangen sind, stellen die *UMAR* Einheit im *NEST* Gebäude der Eidgenössischen Materialprüfungsanstalt „Empa“ in Dübendorf bei Zürich oder das Projekt *MycoTree* and der Architekturbiennale in Seoul, Süd-Korea dar. Parallel dazu beschäftigt sich die Professur mit neuartigen hochfesten biologischen Faserverbundstoffen aus Grasfasern aber auch Materialien aus der *urbanen Mine*.

Prof. Philipp Eversmann: Die Professur Experimentelles und Digitales Entwerfen und Konstruieren widmet sich der Forschung von computerbasierten Entwurfs- und Fabrikationsprozessen in der Architektur. Mit der Motivation Massivholz zu textilen Gebilden weiter zu verarbeiten wurde das Verbundprojekt *TETHOK* initiiert. Dabei wird die Idee der Nachhaltigkeit und des *Local Sourcing*s mit Robotik und Digitalisierung von Fertigungsprozessen kombiniert. Im Forschungsvorhaben *FLIGNUM* wird ein Endlosfaden aus Massivholz für textile Architektur entwickelt. Im Projekt *NaHoPro* werden über Wickelungs- und Formungsprozesse dünne Furniere zu rechteckigen Hohlprofilen verarbeitet.

Dr. Ing. Jan Wurm: Dr. Jan Wurm leitet den Bereich Innovationsberatung in Deutschland und koordiniert das Forschungs- und Innovationsportfolio für ARUP. Als Integrator von gestalterischen Konzepten und innovativen ingenieurtechnischen Lösungsansätzen hat er bei diversen Forschungsprojekten zur grundlegenden Erforschung neuer Materialien und Technologien im Bauwesen maßgeblich mitgewirkt. Seit 2018 hat Jan Wurm eine Reihe von Forschungsprojekten zu Myzelium für die Bauanwendung initiiert, wie z.B. mit *mogu* zu der Erforschung von Myzelium als Akustikabsorber und die Zusammenarbeit mit Jonas Edvard für die Entwicklung eines Akustiksegels.

Arbeitspakete und Meilensteine



Quelle: FG Experimentelles und Digitales Entwerfen, Universität Kassel

Abbildung 13
Diagramm Arbeitspakete und deren Verbindung

AP 0 Projektleitung

- Projektmanagement (UK)
- Einführungsveranstaltungen (ALL)
- Organisation regelmäßiger Projekttreffen
- Projekttag Zukunft Bau (ALL)
- Dokumentation und Publikation der Ergebnisse (ALL)
- Berichterstattung (ALL)

AP 1 Material und Bauteilkonzept (3 Monate)

AP 1.1 Definition eines Lasten- und Pflichtenheftes (ARUP)

- Definition prinzipieller use-cases und user-groups
- Erstellung Anforderungskatalog für einen konkreten Anwendungsfall im Bereich Akustik, Brandschutz und Robustheit und Nachhaltigkeit (CO₂)
- Erfassen Ausgangslage durch Benchmarking von etablierten Systemen. Interviews mit Entwicklern, Architekten und Nutzern zu Nutzeranforderungen und Akzeptanz
- Zusammenfassung in einem Lastenheft

AP 1.2 Auswahl und Systematisierung der Grundwerkstoffe (UK, KIT, ARUP)

- Erstellen Zielspezifikation und Bewertungsmatrix Material (Im Bereich Langlebigkeit, Akustik, Mechanik)
- Vorauswahl schnellwachsender, heimischer Sorten, geeignet für den additiven Fertigungsprozess und die Bioverbundwirkung
- Vorauswahl schnellwachsender Mikroorganismen und Substrate von Abfällen aus der heimischen Agrar- und Forstwirtschaft

AP 1.3 Charakterisierung Grundwerkstoffe (KIT, ARUP)

- Erstellen Anforderungsprofil (Normen, Richtlinien, Empfehlungen)
- Morphologische Analyse
- Ermittlung mechanischer und akustischer Kennwerte

AP 1.4 Entwurf Bauteilkonzept (ARUP)

- Konzeptionierung Verbundbauweise, typologische Bauteile, Verbindungsmittel und Montageablauf (drei Optionen), Skizzierung Wertschöpfungskette und Expertenfeedback von ausgewählten Stakeholdern
- Auswahl Bauweise, Festlegung Beispielbauteil und Grobdimensionierung

MEILENSTEIN 1: Anforderungen, Grundwerkstoffe und Bauteilkonzept definiert

AP 2 Fertigungstechnologie und Biokultivierungsprozess (7 Monate)

AP 2.1 Additive Fertigungstechnologie Holzgitterstrukturen (UK)

- Additive Fertigung für Herstellung von Flechtkörpern und Formbau aus filigranen Holzstäben und -bändern für Struktur- und Formgebung von Bioverbundkomponenten, Optimierung von Material und Querschnitt
- Entwicklung und Evaluation von Bindermethoden für dreidimensional vernetzte Holzfilamente

AP 2.2 Biokultivierungsprozess auf Basis der Holzgitterstrukturen (KIT)

- Prozesstechnik zu Reproduzierbarkeit technischer Eigenschaften während Kultivierung, Optimierung Verbundwirkung und Schallabsorption

MEILENSTEIN 2: Kombierter Verbundherstellungsprozess im Labor realisierbar

AP 3 Charakterisierung Bioverbundmaterial (5 Monate)

AP 3.1 Charakterisierung Verbundquerschnitte (KIT)

- Festlegung der Versuchsreihen
- Durchführung der physischen Testreihe
- Mechanische Eigenschaften des Verbundmaterials
- Akustische Eigenschaften des Verbundmaterials
- Auswertung der Charakterisierung und Optimierung

AP 3.2 Ansätze zur Dimensionierung und Auslegung (ARUP)

- Entwicklung von Methoden und Ansätzen zur Auslegung und Dimensionierung der Verbundbauteile im Bereich Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Raumakustik
- Gestützt auf Modellierungen, Simulationen und Benchmarking

MEILENSTEIN 3: Verbundmaterial charakterisiert und mit digitaler Simulation kalibriert

AP 4 Bauteildesign und –charakterisierung (9 Monate)

AP 4.1 Bauteildesign für einen konkreten Anwendungsfall (ARUP, UK, KIT)

- Konkretisierung, Umsetzung und Konzeption
- Variantenentwicklung verschiedener Konstruktionsansätze und Vordimensionierung
- Auswahl bevorzugter Option und Dimensionierung
- Massenermittlung

AP 4.2 Bauteilherstellung (UK, KIT)

- Herstellung von Testkörpern (Demonstratoren)
- Variantenentwicklung von verschiedenen Myzeliumansätzen (Pilzarten, Zuschlagsstoffe, Zusatzmittel)

AP 4.3 Charakterisierung Bauteil(e) (KIT)

- Untersuchung der mechanischen und akustischen Eigenschaften
- Evaluierung der einzelnen Komponentenparameter
- Weiterentwicklung im Feedback-Loop Verfahren

MEILENSTEIN 4: Hergestellte Testbauteile erfüllen definierte Anforderungen

AP 5 Technologiebewertung (3 Monate)

AP 5.1 Lebenszyklusbewertung

- Erfassung und Bewertung der gesamten Wertschöpfungskette
- Bewertung aufgrund eines "Total Value Frameworks" zur Erfassung direkter und indirekter Wirkungen
- Lebenszyklusanalyse Bauteil und vergleichende Bewertung Demonstrator
- Ansätze zur Systematisierung und Modularisierung der Prozesskette
- Bewertung Potential Wirkungsweise CO₂-Reduzierung Bauweise bei Skalierung

AP 5.2 Ressourceneffizienz und Identifikation Technologiepotentiale

- Evaluation der Stoffströme
- Entwicklung und Validierung unterstützender zirkulärer Wertschöpfungsketten und Geschäftsmodelle

	2021												2022												2023													
AP 0 Projektleitung	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5		
Projektmanagement (UK)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24														
Einführungsveranstaltungen (ALL)																																						
Organisation regelmäßiger Projekttreffen (UK)																																						
Projekttag Zukunft Bau (ALL)																																						
Stakeholder Meetings Industrie (ARUP)																																						
Dokumentation und Publikation der Ergebnisse (ALL)																																						
Berichterstattung (ALL)																																						
AP 1 Material und Bauteilkonzept	1	2	3																																			
1.1 Definition eines Lasten- und Pflichtenheftes (ARUP)																																						
1.2 Auswahl und Systematisierung der Grundwerkstoffe (UK, KIT)																																						
1.3 Charakterisierung Grundwerkstoffe (KIT)																																						
1.4 Entwurf Bauteilkonzept (ARUP)																																						
MEILENSTEIN 1: Anforderungen, Grundwerkstoffe und Bauteilkonzept definiert																																						
AP 2 Fertigungstechnologie und Blockkultivierungsprozess																																						
2.1 Additive Fertigungstechnologie Holzgitterstrukturen (UK)																																						
2.2 Blockkultivierungsprozess auf Basis der Holzgitterstrukturen (KIT)																																						
MEILENSTEIN 2: Kombierter Verbundherstellungsprozess im Labor realisierbar																																						
AP 3 Charakterisierung Bioverbundmaterial (5 Monate)																																						
3.1 Charakterisierung Verbundquerschnitte (KIT)																																						
3.2 Ansätze zur Dimensionierung und Auslegung (ARUP)																																						
MEILENSTEIN 3: Verbundmaterial charakterisiert und mit digitaler Simulation kalibriert																																						
AP 4 Bauteildesign und -Charakterisierung																																						
4.1 Bauteildesign für einen konkreten Anwendungsfall (ALL)																																						
4.2 Bauteilherstellung (UK, KIT)																																						
4.3 Charakterisierung Bauteile (KIT)																																						
MEILENSTEIN 4: Hergestellte Testbauteile erfüllen definierte Anforderungen																																						
AP 5 Technologiebewertung																																						
5.1 Lebenszyklusbewertung (ARUP, KIT)																																						
5.2 Ressourceneffizienz und Identifikation Technologiepotentiale (ARUP, KIT)																																						

Quelle: FG Experimentelles und Digitales Entwerfen, Universität Kassel

Abbildung 14
Diagramm RASI Schema der Arbeitspakete

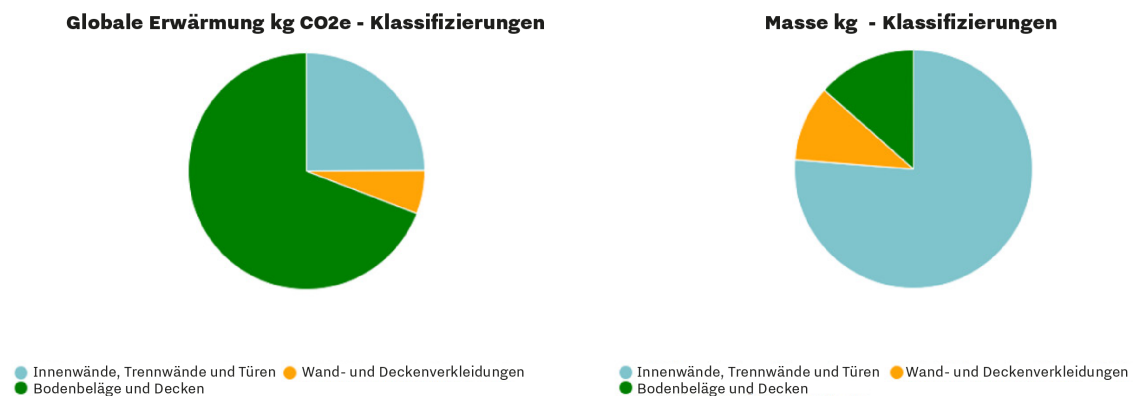
Projektergebnisse

AP 1 MATERIAL UND BAUTEILKONZEPT

AP 1.1 Definition eines Lasten- und Pflichtenheftes (ARUP)

Definition der Anwendungsbereiche

Um die am besten geeigneten Anwendungen für den vorgeschlagenen Verbundwerkstoff zu ermitteln, wurde eine breite Palette möglicher Endanwendungen identifiziert und bewertet, darunter Decken- und Wandpaneele, Trennwände, Fußbodensysteme, Akustiksegel, Möbel und Konferenzräume. Für jede Anwendung wurden der Wunsch, die Machbarkeit und die Durchführbarkeit skalierbarer, konformer Produkte bewertet, die die Leistung von Standard-Baumaterialien erreichen oder übertreffen könnten. Zwei Anwendungen, die Trennwand und das Akustiksegel, wurden als potenzielle Anwendungsfälle vorausgewählt, da sie einen relativ großen Beitrag zum Gesamtkohlenstoffausstoß leisten (Abbildung 15) und hohe Anforderungen an die strukturelle und akustische Leistung sowie die Designflexibilität stellen.

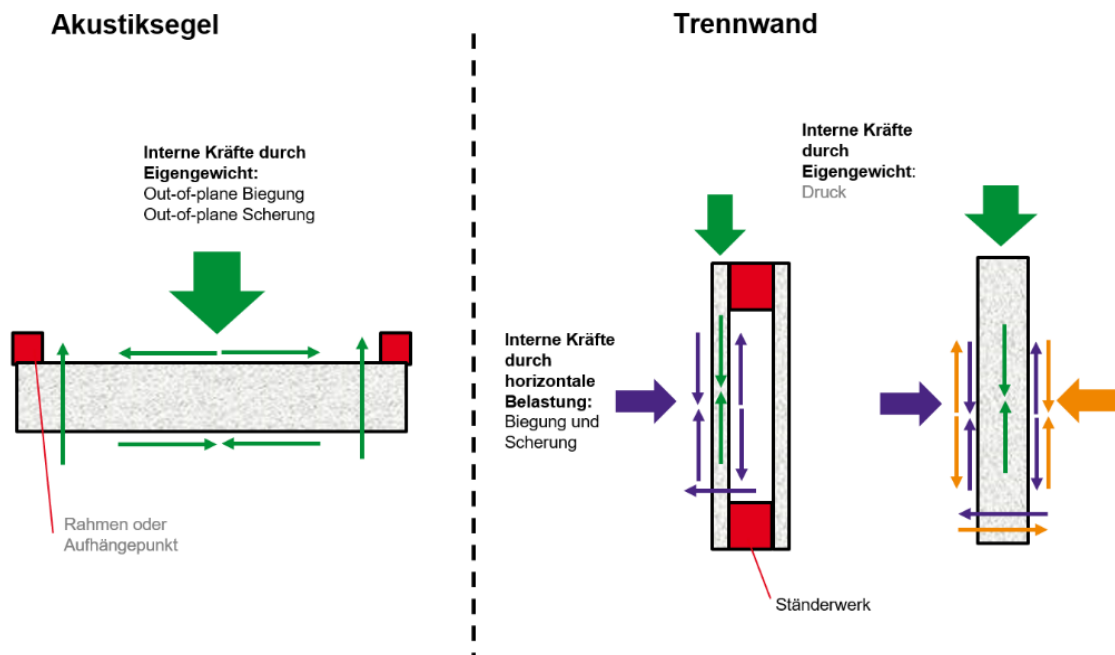


Quelle: ARUP

Abbildung 15
Vergleich des Nachhaltigkeitspotentials von Bodenbelägen, Trennwänden und Wand- und Deckenbelägen.

Strukturelle Anforderungen

Als allgemeine Bemessungsanforderungen wurden die Grenzzustände der Tragfähigkeit *Ultimate Limit State* (ULS) und der Gebrauchstauglichkeit *Serviceability Limit State* (SLS) nach DIN EN1990 (2021) und DIN EN1991 (2010) zugrunde gelegt. Zu den wesentlichen Einwirkungen, die für eine Trennwand zu berücksichtigen sind, gehören Eigengewicht und Horizontallasten, wie sie für Büro- und Arbeitsbereiche typisch sind (Kat. B). Während die Eigenlast bei einer oben und unten gestützten Trennwand in der Regel zu relativ geringen Flächenlasten führt, sind die maßgeblichen Lastfälle für das Versagen von Bauteilen (ULS) und Durchbiegungsgrenzen (SLS) horizontale Lasten wie z. B. Verkehrs- und Stoßlasten. Für die Gebrauchstauglichkeit, die Leistungsfähigkeit und das Aussehen der Wand sowie den Komfort der Benutzer müssen neben den Verformungen auch Schwingungen berücksichtigt werden. Für ein Akustiksegel, das mit einer bestimmten Form von Unterkonstruktion von der Decke abgehängt ist, sind die strukturellen Anforderungen relativ gering, vorausgesetzt, das Segel befindet sich außerhalb der Reichweite von Personen oder anderen zufälligen Belastungen. Die zu berücksichtigende Einwirkung ist in erster Linie das Eigengewicht des Materials, das bei dem vorgeschlagenen Verbundwerkstoff gering sein wird. Mögliche Auswirkungen auf das Segel sind Biege- und Scherkräfte außerhalb der Ebene, die nur durch das Eigengewicht verursacht werden, und möglicherweise Axialkräfte in der Ebene, abhängig von der Gesamtform des Segels (Abbildung 16).

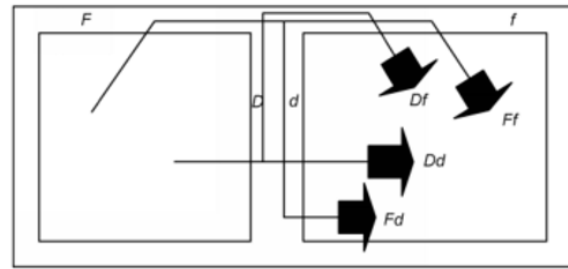


Quelle: ARUP

Abbildung 16
Mögliche Belastungen und innere Kräfteinwirkungen für die Anwendungsbereiche Akustiksegel und Trennwände

Akustische Anforderungen

Die akustische Bewertung der Anwendungsfälle konzentrierte sich auf das Potenzial für die direkte Anwendung in der Gebäudeplanung und -konstruktion unter Berücksichtigung der aktuellen akustischen Normen und Leistungskriterien. Während internationale Normen allgemein in Betracht kamen, konzentrierte sich der Bewertungsprozess auf die in Deutschland geltenden ISO- und DIN-Normen. Im Falle einer Trennwand besteht die grundlegende Anforderung an die Planung darin, dass die Konstruktion ein Mindestmaß an „Schutz vor Lärm“ gewährleistet. Dieses Kriterium wird in Form des Luftschalldämmmaßes R'_w ausgedrückt, das in Dezibel (dB) angegeben wird. Die Mindestkriterien sind als Teil der Bauordnung für verschiedene Gebäudetypen in der Norm DIN 4109-01 (2018) festgelegt. Empfehlungen für R'_w -Werte, die optional auf Trennwände zwischen Räumen innerhalb eines Nutzerbereichs angewendet werden können, werden in Normen wie DIN 4109 (1989) und 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 R_w . Unter Berücksichtigung der gegebenen akustischen Anforderungen besteht das Ziel darin, diese Materialien durch den neuartigen biobasierten Verbundwerkstoff zu ersetzen. Das Akustiksegel wurde im Vorfeld als ein Anwendungsfall mit hohem Potenzial bewertet, vor allem wegen der nachgewiesenen Fähigkeit von Myzel als schallabsorbierendes Material. Die Schallabsorption in bewohnten Räumen wird durch eine Reihe von Normen und Planungskriterien vorgeschrieben. Die Norm DIN 18041 (2016) beispielsweise legt spezifische Planungskriterien für Nachhallzeiten in einer Reihe von Raumtypen als Teil der „barrierefreien“ Gestaltung fest, um sicherzustellen, dass die Räume für alle Nutzer:innen eine ausreichende „Schallleistung“ bieten. Darüber hinaus legt die Arbeitsstättenverordnung ASR §3.7 (2021) Mindestkriterien für die Minderung des Schallpegels in Arbeitsstätten fest, um sicherzustellen, dass die Beschäftigten angemessen vor Lärm geschützt sind (Abbildung 17). Eine Reduzierung des Schallpegels in lärmbelasteten Umgebungen kann durch schallabsorbierende Materialien erreicht werden, die nach Normen wie DIN EN ISO 11654 (1997) bewertet werden.

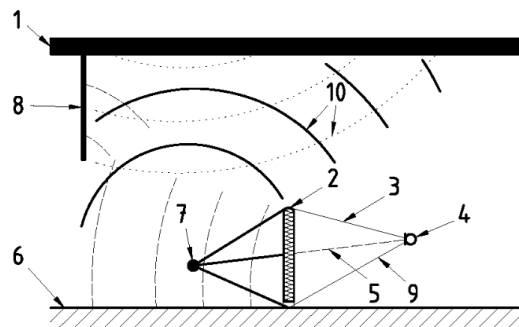


Quelle: DIN EN 12354-1 (2017)

Abbildung 17

Rechenmodell zur Schallübertragung, DIN EN 12354-1 (2017), angemessener Lärmschutz zwischen zwei normalen Arbeitsräumen: $R'_w = 37 + 5 \text{ dB}$.

Im Raum freistehende Stellwände können nicht nach den zitierten Normen als Trennwände bewertet werden, und tragen in ihrem eingebauten Zustand kein R'_w -Werte. R'_w als schalltechnischer Begriff betrifft ausschließlich die Schallübertragung über Bauteile zwischen zwei raumakustisch entkoppelten Räumen. Stellwänden kommen zur Reduzierung von Lärmpegel und Schallabstrahlung in größeren Räumen mit höher Personenbelegungsgrad wie Call-Centers oder lauten Schallquellen wie Werkstätten zum Einsatz. Schallübertragung zwischen zwei Bereichen innerhalb eines Raumes mit einem zwischenstehenden schirmenden Element besteht aus einer Kombination von Anregung des diffusen Schallfeldes im Raum, Schallreflexionen auf harten Raumbooberflächen, Schallabsorption, und Schallschirmung. Die akustischen Eigenschaften eines Raumes, die an Schallübertragung innerhalb des Raumes beteiligt sind, sind unterschiedlich zu den akustischen Eigenschaften der trennenden und flankierenden Bauteile, die für Schallübertragung zwischen zwei geschlossenen Räumen in Frage kommen. Deswegen können Stellwände nicht als trennende Bauteile mit einem R'_w bewertet werden, sondern als schallschirmende Gegenstände mit einer Einfügungsdämmung. Diese besteht aus der Kombination der Schalldämmungsfähigkeit und des Schallabsorptionsvermögens der Stellwand und wird nach DIN EN 17624 als die Differenz in Pegel zwischen den A-bewerteten Schalldruckpegeln ohne und mit dem Schirm an einem festgelegten Messpunkt beschrieben (Abbildung 18). Diese Differenz wird als A-bewertete Einfügungs-Schalldruckpegeldifferenz D_{pa} gekennzeichnet.



Quelle: DIN EN 17624

Abbildung 18

Schematische Darstellung von Schallausbreitung in einem Raum mit Schirm – DIN EN 17624.

Bewertung der Nachhaltigkeitseffekte

Eine ganzheitliche Bewertung der Nachhaltigkeitsauswirkungen beinhaltet eine Leistungsbewertung des Holz-Myzel-Verbunds unter verschiedenen Nachhaltigkeitszielen, mit besonderem Fokus auf Netto-Null-CO₂-Emissionen und Kreislauffähigkeit. Diese beiden Aspekte sollen durch eine ganzheitliche Lebenszyklusbewertung (WLCA) bewertet werden. Dabei werden alle Umweltauswirkungen, die mit jeder einzelnen Lebenszyklusphase verbunden sind, gemäß den Normen CEN 350 (2022), DIN EN 15978 (2012) und DIN EN 15804 (2022) berücksichtigt. Konkret erfordert eine WLCA die Bewertung der CO₂-Emissionen entlang der Produktphase (Module A1-A3), der Bauphase (Module A4-A5), der Nutzungsphase (Module B1-B5) und der End-of-Life-Phase (Module C1-C4), um Netto-Null-Emissionen zu erreichen. Zusätzlich erfordert eine WLCA

eine Bewertung des Nutzens und der Belastungen jenseits der Systemgrenze (Modul D), welche Aspekte der Kreislaufwirtschaft berücksichtigt. Die Umweltauswirkungen werden als Ergebnis der verschiedenen Prozesse, die während jeder Phase durchgeführt werden, berücksichtigt. Insbesondere der mit jedem Prozess verbundene Gesamtenergieverbrauch, die Energiequellen/-auslöser und der mit jedem Auslöser verbundene Kohlenstoffemissionsfaktor. In Modul A3 (Herstellung) müssen beispielsweise alle Energieströme und die damit verbundenen CO₂-Emissionen berücksichtigt werden, die bei der Herstellung aller Komponenten entstehen, aus denen das Produkt besteht, einschließlich des Holz-Myzel-Verbunds und anderer möglicher Elemente. Die gleichen Überlegungen gelten für alle Phasen des Lebenszyklus. Damit ein Produkt eine Netto-Null-Leistung oder eine kohlenstoffnegative Leistung erreicht, spielen Strategien des Kreislaufdesigns eine wichtige Rolle. Diese beziehen sich hauptsächlich auf die Verringerung der Auswirkungen während der Nutzungsphase (B1-B5) und der End-of-Life-Phase (C1-C4). Geeignete Strategien sind solche, die letztlich die Abfallerzeugung reduzieren und die Lebensdauer aller Komponenten maximieren. Beispiele hierfür sind Demontage, Modularität oder Wiederverwendbarkeit. Die Demontierbarkeit modularer Elemente optimiert beispielsweise die Ressourcennutzung während der Herstellungs- und Installationsphasen, erhöht das Potenzial für die Reparatur oder den Austausch einzelner Einheiten und verringert so das Abfallaufkommen und den Bedarf an zusätzlicher Materialgewinnung. Die Umsetzung der Grundsätze und Strategien des Kreislaufdesigns wird anhand der Leistungskriterien der Cradle-2-Cradle (C2C)-Zertifizierung (2023) bewertet. Die C2C-Zertifizierung umfasst eine Reihe von Indikatoren, die über die Kohlenstoffemissionen im gesamten Lebenszyklus hinausgehen. Sie legt den Schwerpunkt auf die Verwendung von Materialien, die zur Gesundheit und zum Wohlbefinden der Nutzer:innen beitragen, sowie auf die Umstellung auf zirkuläre Herstellungsprozesse. Die Gesundheitsanforderungen konzentrieren sich auf Aspekte wie die Identifizierung von Chemikalien, den Ersatz von Chemikalien, einen niedrigen Gehalt an flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) und den Gesamtgehalt an gefährlichen Materialien. Die Anforderungen an die Kreislaufwirtschaft umfassen konkrete Ziele und Aspekte wie die verstärkte Verwendung von biobasierten und erneuerbaren Inhaltsstoffen, die Verwendung von Materialien, die mehr als einen Kreislaufweg zulassen (d. h. recycelbar, kompostierbar oder biologisch abbaubar), oder die Überwachung der Kreislaufraten eines Produkts. Der Holz-Myzel-Verbundwerkstoff bietet ein großes Potenzial, um eine hohe Leistung im Rahmen der C2C-Zertifizierungskriterien zu erreichen. Durch die Verwendung von überwiegend, wenn nicht ausschließlich, biobasierten Materialien wird eine niedrige oder negative Kohlenstoffemissionsrate über den gesamten Lebenszyklus erwartet. Daher muss dem Herstellungsprozess, den damit verbundenen Energiequellen und den Kreislaufstrategien, die die zukünftigen Umweltauswirkungen minimieren, besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden.

AP 1.2 Auswahl und Systematisierung der Grundwerkstoffe (UK, KIT, ARUP)

Holzarten

Für die Herstellung von Holzgitterstrukturen wurden Furnierkantenfäden aus verschiedenen Holzarten (Buche - *Fagus sylvatica*, Fichte - *Picea abies*, Ahorn - *Acer pseudoplatanus*, Eiche - *Quercus robur*) ausgewählt. Zusätzlich wurden Tests mit einem festen Filament durchgeführt, das aus gespaltenen Weidenruten hergestellt wurde (Eversmann et al., 2021). Alle Arten wurden auf ihre Eignung für die Anwendung des vorgeschlagenen additiven Herstellungsverfahrens sowie auf ihre Bindungsfähigkeit und Verträglichkeit mit dem Myzel-Substrat-Gemisch geprüft. Final wurden Furnierkantenfäden aus Ahorn mit einer Stärke von 0,5mm und einer Breite von 12mm von H. Heitz Furnierkantenwerk (Melle, Deutschland) ausgewählt und erworben. Es ist anzumerken, dass zum gegenwärtigen Zeitpunkt eine Seite des Furniers mit einem Vlies auf Zellulosebasis versehen wird, welches mit PVAc-Dispersionskleber verklebt wird, um sicherzustellen, dass das Material während der Anwendung nicht bricht. Aus diesem Grund können die vorgestellten Verbundwerkstoffe noch nicht als vollständig biobasiert bezeichnet werden. Es könnten jedoch maßgeschneiderte Furniere mit Bio-Klebstoffen hergestellt und in zukünftigen Studien verwendet werden.

Substrate

Während der Voruntersuchungen wurden eine Reihe verschiedener Substrate wie Miscanthus, Bambus, Zuckerrohr, Stroh, Holzreste, Hanffasern, Hanfschäben und andere verwendet. In diesen Studien wurde festgestellt, dass Hanfschäben eines der günstigsten Substrate für das Wachstum von Myzel sind, was die Wachstumszeit und die erforderlichen Wachstumsbedingungen im Labor betrifft. Hanfschäben wurden auch deshalb ausgewählt, weil sie in Europa weit verbreitet sind und der Anbau von Hanf mehrere Vorteile für die Umwelt mit sich bringen würde. Während Hanfsamen und Hanffasern industrielle Anwendungen in der Pharma-, Lebensmittel-, Textil- und Bauindustrie finden, gelten Hanfschäben als Abfallprodukt der landwirtschaftlichen Betriebe und werden hauptsächlich als Energiequelle oder als Einstreu für Tiere verwendet. Neben den Vorteilen für die Umwelt kann das Myzel auf der Mischung aus Hanffasern und Wasser selbständig wachsen, ohne oder mit nur minimalem Bedarf an Zusatzstoffen wie Kleie und Kalziumsulfat, was das Verfahren für die großtechnische Herstellung von Materialien auf Myzelbasis attraktiver macht. Die Hanfschäben wurden von der Bafa GmbH (Malsch, Deutschland), einer lokalen Holzfabrik, bezogen (Abbildung 19).

Myzelarten

Im Allgemeinen sind für die Entwicklung von Verbundwerkstoffen auf Myzelbasis die holzersetzenden Basidiomyceten von Interesse, wie z. B. verschiedene Arten von *Ganoderma* (z. B. *Ganoderma lucidum*), *Pleurotus* (z. B. *Pleurotus ostreatus*) und *Trametes* (z. B. *Trametes versicolor*). Diese Pilzarten sind in der Lage, Lignin schnell zu verdauen und die chemische Struktur des Lignins in Radikale auf Ligninbasis umzuwandeln. Bei ausreichender Zufuhr von Sauerstoff können diese Radikale Vernetzungen bilden und wie ein Klebstoff wirken. Zu diesen Pilzarten gehören nicht die üblichen toxischen, pathogenen und allergenen Schimmelpilze, die allgemein als „Mehltau“ bezeichnet werden und in Innenräumen ein zunehmendes Gesundheitsrisiko darstellen. Aufgrund ihres stabilen Myzelnetzwerks, welches einen stabilen Verbundstoff ergeben würde, wurde sich innerhalb der Vorversuche auf Polyporus-Myzelarten wie *Ganoderma* und *Trametes* beschränkt. Am Ende fiel die Wahl auf *Ganoderma lucidum* (*G. lucidum*), gemeinhin als Lingzhi oder Reishi bekannt (Abbildung 19), da diese Pilzart schneller wächst, leichter zugänglich ist und weniger anfällig für Verunreinigungen während des Wachstums ist und als eine der am besten dokumentierten und untersuchten Myzelarten weltweit gilt. Die Myzel-Mutterkulturen von *Ganoderma lucidum* und *Trametes versicolor* (*T. versicolor*), gemeinhin als Turkeytail oder Schmetterlingstramete bekannt, wurden von der Firma *Tyroler Glückspilze* (Innsbruck, Österreich) in Form von Körnerbrut erworben und bei 4 °C bis zu 4 Wochen gelagert.



Quelle: FG Experimentelles und Digitales Entwerfen, Universität Kassel

Abbildung 19
Auswahl der Grundwerkstoffe. Substrate und Myzelarten. Hanfspäne (links). *Ganoderma lucidum* (Reishi) (rechts)

AP 1.3 Charakterisierung und Herstellung Grundwerkstoffe (KIT, ARUP)

Substratbesiedlung

Es wurde eine Reihe von Materialien mit den ausgewählten Substraten, Holzfurnieren und Myzelarten gezüchtet, um die beste Zusammensetzung für weitere Tests des mit Holzfurnieren verstärkten Myzelverbunds zu finden. Wie bereits erläutert, wurden Hanfschäben, *G. lucidum* und Ahornfurnier als endgültige Zusammensetzung ausgewählt. Diese Auswahl wurde aufgrund der Verfügbarkeit, der Wachstumsverträglichkeit, der geringen Kontaminationsrate und der hohen Wachstumsrate getroffen. In den folgenden Abschnitten wird das Verfahren zur Besiedlung des Myzels erläutert, das als Ausgangsmaterial für die Herstellung von myzelverstärkten Verbundwerkstoffen verwendet wird.

Hanfschäben wurden von der Bafa GmbH (Malsch, Deutschland) gesammelt und mit 60 Gew.-% Wasser und 2% Kalziumsulfat gemischt, um den pH-Wert des Substrats auf den gewünschten Wert von 5 bis 6 einzustellen, und anschließend 60 Minuten lang bei 121 °C sterilisiert. Die Mischung wurde dann auf Raumtemperatur abgekühlt, bevor sie mit 1-10 Gew.-% kolonisierter *G. lucidum*-Körnerbrut beimpft wurde. Das kolonisierte Substrat wuchs schließlich 2 Wochen lang im Inkubationsraum bei 26-28 °C und 70-80 % Luftfeuchtigkeit, damit sich das gesamte Myzelnetz entwickeln konnte. Später wurde dieses kolonisierte Substrat für die Herstellung von Myzelverbundwerkstoffen mit Furnierverstärkung verwendet (Abbildung 20).

Im Allgemeinen benötigen die meisten Myzelarten einen Wassergehalt von etwa 60 % als günstigste Bedingung für ihr Wachstum (Sona Singh et al., 2014). Daher wurden in einem experimentellen Verfahren verschiedene Fasern und Zusatznahrung mit 60 % Wasser gemischt und mit Myzel beimpft, um die Wachstumsverträglichkeit zu testen.



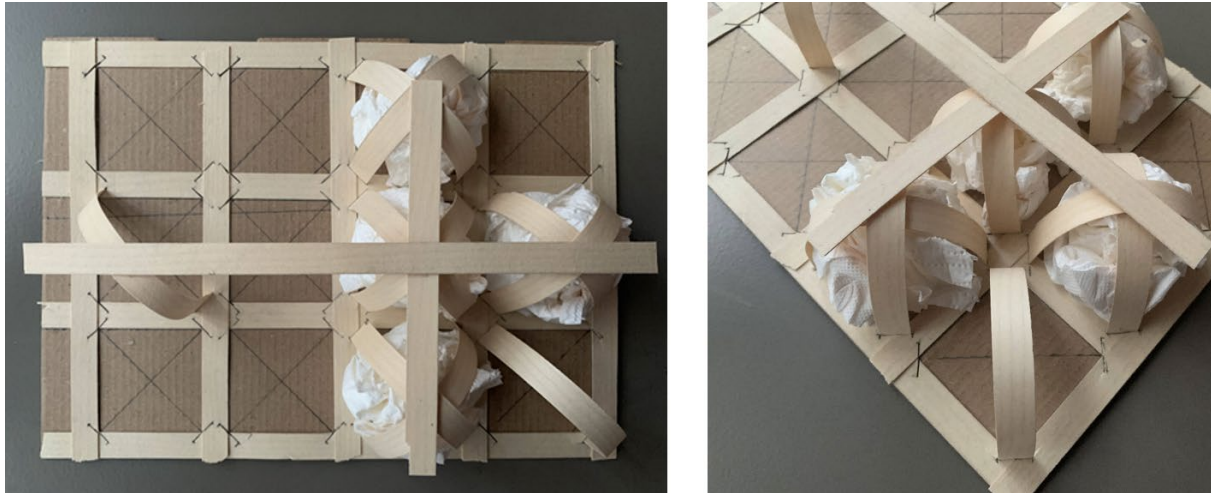
Abbildung 20
Substrat kombiniert mit 2D-Holzarmierung.

Quelle: Institut für Entwerfen und Bautechnik, KIT

AP 1.4 Entwurf Bauteilkonzept (ARUP)

Anhand der definierten Anforderungen für diverse Innenausstattungen wird deutlich, dass die verschiedenen Bauteile einer Mischung aus Axial-, Scher- und Biegekräften standhalten und gleichzeitig unterschiedlichen akustischen Anforderungen genügen müssen. Herkömmliche Myzelverbundwerkstoffe scheinen nicht in der Lage zu sein, alle diese Anforderungen zu erfüllen (Bitting et al., 2022). Aus diesem Grund wurde ein neuartiges Materialkonzept vorgeschlagen, das auf der Kombination einer Myzelverbundmatrix mit einem aus Furnierstreifen bestehenden Bewehrungsgitter basiert. Die Geometrie der Gitterstrukturen folgen dabei den in der Literatur ausführlich beschriebenen geometrischen Strukturen von räumlichen Stabtragwerken, die auf der dichten Raumpackung von Tetraedern und halben Oktaedern beruhen (Makowski, 1963). Die Übertragung auf die Myzelium-Holzverbundbauweise wurde anhand von Modellen entwickelt und überprüft.

Diese Gitter werden mit einer speziellen *additive manufacturing* (AM) -Methode hergestellt, die es ermöglicht, kontinuierliche Holzfasern entweder in 2-dimensionalen oder 3-dimensionalen Layouts aufzutragen (siehe Konzeptmodelle in Abbildung 21). Sobald die Gitter hergestellt sind, wird das mit Myzel beimpfte Substrat hinzugefügt. Während des Wachstums verbindet es sich mit dem Gitter und bildet einen Verbundwerkstoff. Der resultierende Verbundwerkstoff kann durch Änderung der Position und Anordnung der Bewehrungsgitter im Verhältnis zur Myzelmatrix individuell angepasst werden, ähnlich wie Stahlbewehrung zu Betonelementen hinzugefügt werden kann, um deren strukturelle Fähigkeiten zu erhöhen.



Quelle: Jan Wurm (Arup)

Abbildung 21
Konzeptmodelle zur Entwicklung der Anordnung der Furnierstreifenstruktur im Verbund.

Strukturell kann der Verbundwerkstoff als zweiphasiger Verbundwerkstoff betrachtet werden, wobei das Myzel die kontinuierliche Matrixphase und das Furniergitter das Verstärkungselement darstellt. Es wird erwartet, dass das Furnier hauptsächlich parallel zu seiner Faserrichtung bei Zug- und Druckkräften zur Verbesserung des Gesamtverhaltens der Verbundplatte beiträgt. Das Muster und die Dichte des Furniergitters als Verstärkungselement können in Abhängigkeit von den Belastungsbedingungen und dem Kraftfluss der spezifischen Endanwendungen optimiert werden.

Die Schallabsorption betrachtend unterscheidet sich dieser Bio-Verbundwerkstoff dadurch von den Myzelmaterialien, die in früheren Studien zur Schallabsorption verwendet wurden, dass der Verbundwerkstoff einen variablen Prozentsatz an schallreflektierendem Holzfurnier in verschiedenen Tiefen innerhalb der Myzelmatrix enthält. Durch die Verwendung leichter und dünner Furnierstreifen kann der schallreflektierende Einfluss dieser Materialien minimiert werden, wobei die schallabsorbierenden Eigenschaften des Verbundwerkstoffs insgesamt nicht von einem zu hohen Holzfurniergehalt beeinträchtigt wird. Erste Bewertungen dieses Verbundwerkstoffs haben ergeben, dass die Verringerung der Schallabsorption durch das akustische Verhalten schallreflektierender Holzfurnierelementen kontrollierbar und in ihrem Ausmaß leicht zu begrenzen ist.

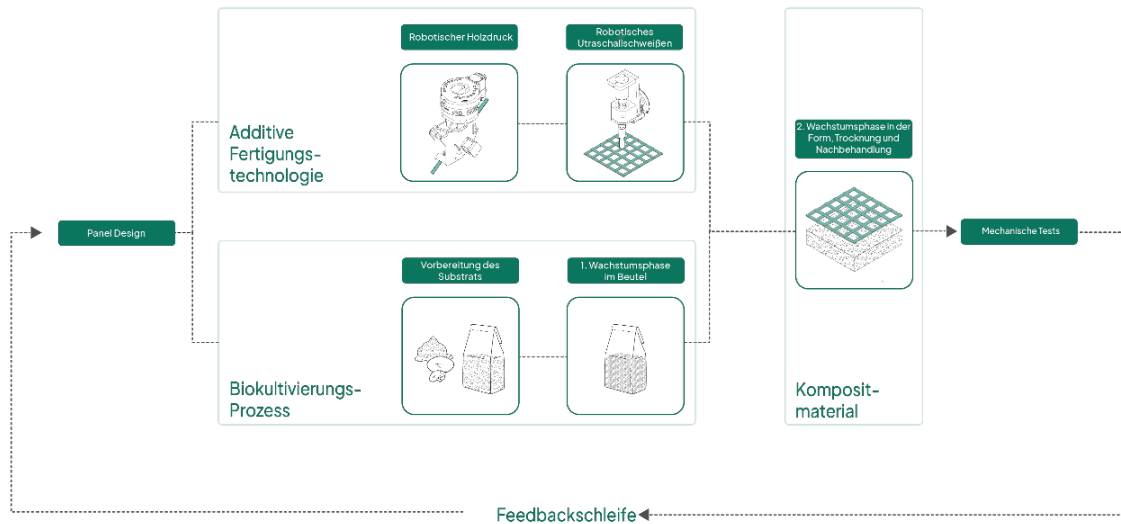
AP 2 FERTIGUNGSTECHNOLOGIE UND BIOKULTIVIERUNGSPROZESS

AP 2.1 Additive Fertigungstechnologie Holzgitterstrukturen (UK)

Für die Herstellung von Bewehrungsgittern aus Holzfasern wurden die bestehenden Forschungsarbeiten des EDEK-Teams angepasst, um Furnierfasern in benutzerdefinierten Layouts zu platzieren und sie an Ort und Stelle zu verbinden. Ziel war es, mit einem automatisierten Verfahren maßgefertigte Bewehrungsstrukturen herzustellen und die Holzfasern mit einer Methode zu verbinden, die mit dem Myzelwachstum kompatibel ist.

Der Herstellungsprozess (Abbildung 22) beginnt mit dem Elemententwurf und gliedert sich dann in zwei parallel ablaufende Produktionsprozesse: die additive Fertigungstechnologie und die Biokultivierung. Durch robotischen Holz-3D-Druck werden 2D- oder 3D-Bewehrungsgitter aus Furnierkanten hergestellt.

Währenddessen wächst das Myzelmaterial in Beuteln vor. Die Produkte beider Prozesse werden anschließend in einer Form zusammengeführt, in der das Myzelsubstrat mit dem Gitter zu einem biobasierten Komposit zusammenwächst. Nach dem Wachstum wird das entstehende Element getrocknet und nachbehandelt. Anschließend können verschiedene Tests durchgeführt werden, um den Elemententwurf zu optimieren.

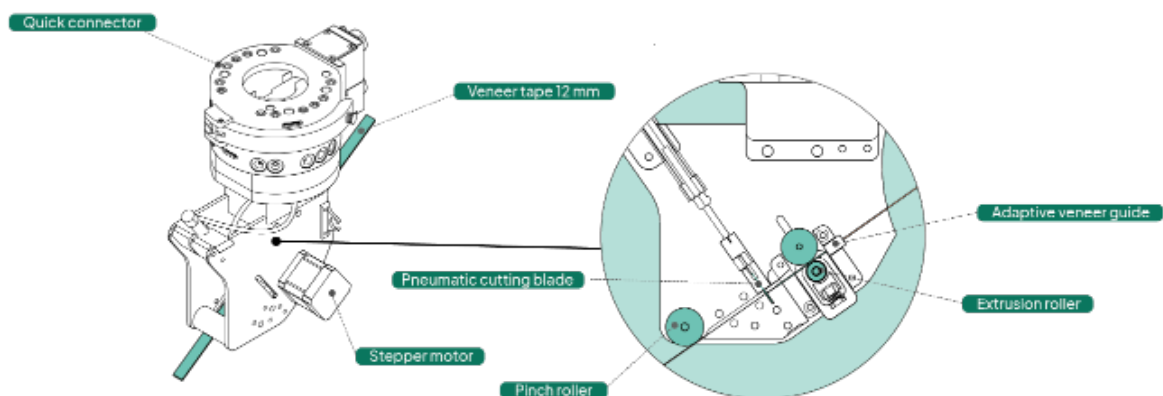


Quelle: FG Experimentelles und Digitales Entwerfen, Universität Kassel

Abbildung 22
Diagramm Herstellungsprozess Holz-Myzelium Verbundmaterial

Roboter-gesteuerte Platzierung von Holzfilamenten

Die Furnierstreifen wurden mit Hilfe eines Roboterverfahrens mit einem speziellen Endeffektor (aufbauend auf (Dawod et al., 2019), siehe Abbildung 23) in benutzerdefinierte Layouts gelegt. Das Werkzeug umfasste einen Schrittmotor für die Extrusion, eine durch einen Pneumatikzylinder betriebene Schneidklinge und einen Satz von Führungen, die Streifen mit unterschiedlichen Breiten einpassen können. Das Werkzeug war auf einem ABB4600-Roboter montiert und wurde über ein Arduino-Board und IO-Signale von der Robotersteuerung gesteuert. Das Roboterprogramm wurde mit Robot Components (Rossi et al., 2022) erstellt, einem Grasshopper-Plugin für die Roboterprogrammierung, das vom EDEK-Team entwickelt wurde. Die Filamente wurden vor dem Druckprozess vorübergehend mit doppelseitigem Klebeband an den Rändern des Druckbereichs fixiert.

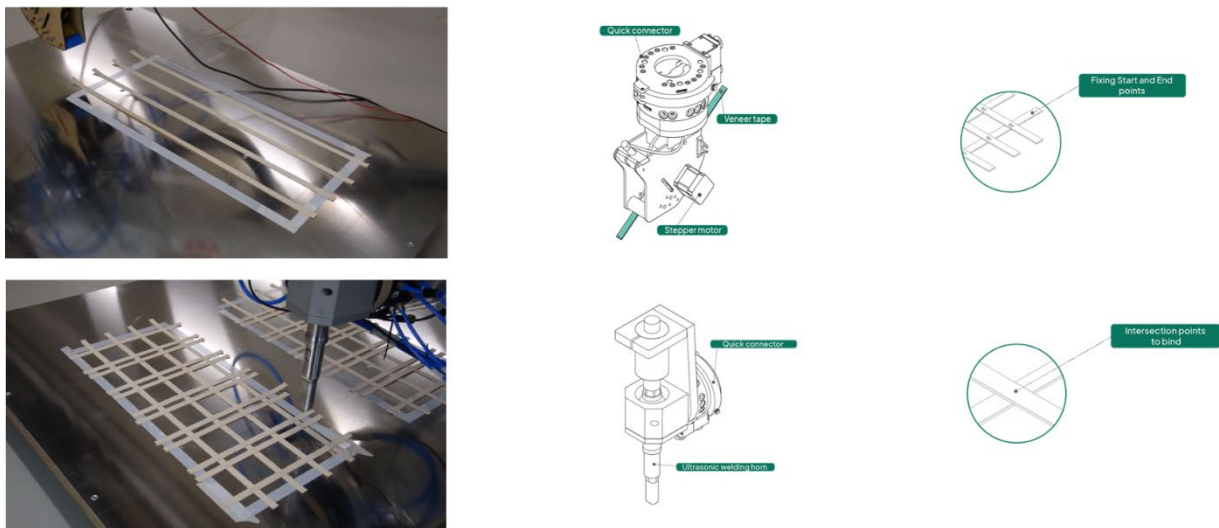


Quelle: FG Experimentelles und Digitales Entwerfen, Universität Kassel

Abbildung 23
Entwurf eines Roboter-Endeffektors für die Furnier-Extrusion, Universität Kassel.

Ultraschallschweißen von Holz-Holz-Verbindungen

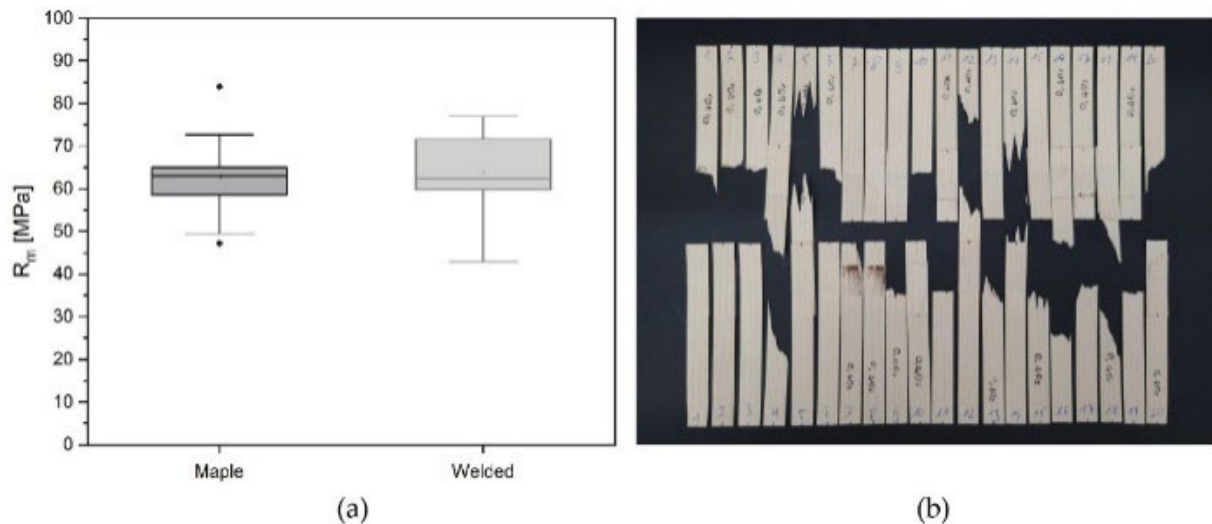
Eine der größten Herausforderungen bei der Entwicklung einer filamentbasierten AM-Methode für Biomaterialien ist der Prozess, der für das Zusammenfügen der Filamente erforderlich ist. In der Forschung zum kontinuierlichen Holzdruck wurden bisher synthetische Bindemittel wie UV-härtender Klebstoff, Kontaktkleber und Heißkleber untersucht (Eversmann et al., 2021). Da das Myzelwachstum mit synthetischen Materialien unverträglich ist und das Ziel, einen 100% biobasierten Verbundwerkstoff herzustellen, mit den bisher untersuchten Bindemitteln nicht erreicht werden kann, musste nach alternativen geeigneten Bindemethoden gesucht werden. Das Ultraschallschweißen ist ein gängiges klebstofffreies Fügeverfahren, das aufgrund seiner Schnelligkeit und einfachen Automatisierung in vielen Industriezweigen wie der Automobil-, Elektronik- und Medizintechnik eingesetzt wird. Bei diesem Verfahren wird Ultraschallenergie mit hohen Frequenzen eingesetzt, die mechanische Schwingungen erzeugt, die zu Wärme führen. Die Wärme schmilzt thermoplastische Materialien und verbindet die Teile nach dem Abkühlen miteinander (Troughton, 2009). In den letzten Jahrzehnten wurde diese Methode zum Schweißen von dünnem Holz verwendet, da die Hitze das Lignin im Holz erweicht und schmilzt und die Fasern verbindet (Tondi et al., 2007). Da für die Verbindung keine Klebstoffe erforderlich sind, wurde diese Methode als Holz-Holz-Bindungsstrategie für unser Herstellungsverfahren gewählt. Erste Schweißversuche wurden bei Hermann Ultraschall (Karlsbad, DE) sowie bei Weber Ultrasonics (Karlsbad, DE) in Auftrag gegeben, die die Machbarkeit des gewählten Bindeverfahrens für Furnierbänder nachwiesen. In der folgenden Versuchsrunde wurde ein 20kHz-Generator mit einer flachen Sonotrode von Weber Ultrasonics ausgeliehen und zum erfolgreichen Binden von Furnierfilamenten eingesetzt. Die Sonotrode wurde an einem ABB IRB4600-Roboterarm montiert, und die Bewegung des Roboters wurde genutzt, um Druck auf das Furnier auszuüben (Abbildung 24).



Quelle: FG Experimentelles und Digitales Entwerfen, Universität Kassel

Abbildung 24
Robotisches Platzieren von Holzfurnier (obere Zeile), Automatisiertes Ultraschall-Holzschweißen (untere Zeile).

Eine erste Runde von Zugtests wurde mit Proben von Ahornfurnier durchgeführt. Bei den meisten Proben kam es zu einem Zugversagen des Holzes und nicht zu einem Versagen des Schweißbereichs, was beweist, dass die Schweißnahtfestigkeit höher ist als die Zugfestigkeit des Furniers. Die durchschnittliche Zugfestigkeit der geschweißten Proben wurde mit $63,6 \pm 10,5$ MPa gemessen, was fast der durchschnittlichen Zugfestigkeit eines einzelnen Ahornfurnierstreifens entspricht: $61,95 \pm 10,83$ MPa (Abbildung 25).



Quelle: FG Experimentelles und Digitales Entwerfen, Universität Kassel

Abbildung 25

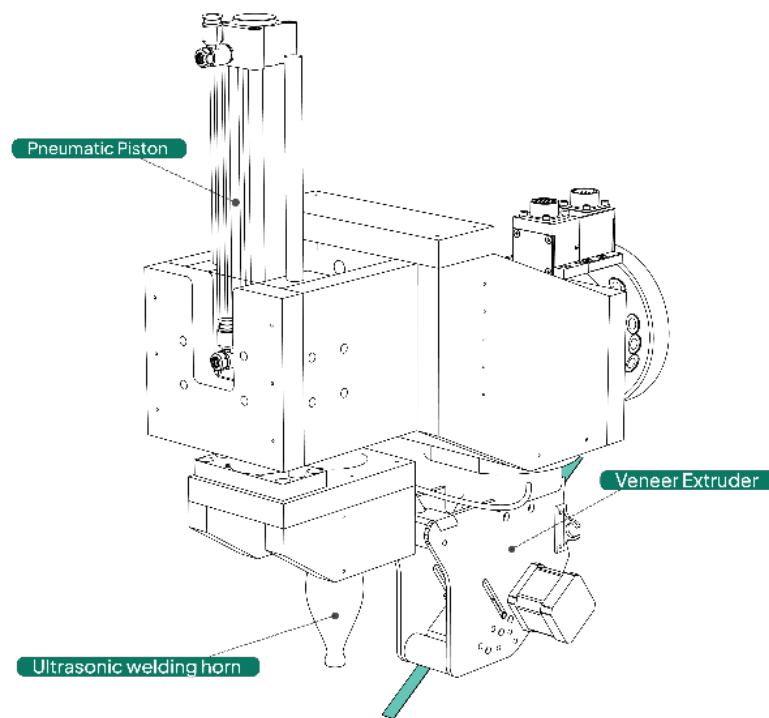
Analyse der Zugfestigkeit von massiven Ahornstreifen und geschweißten Verbindungen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Verbindung eine ähnliche Festigkeit aufweist wie das Vollmaterial.

Trotz des Erfolgs der Schweißversuche erwies sich das Gerät aufgrund seiner Größe und der erforderlichen hohen Druckkräfte als schwierig in den bestehenden Roboterprozess zu integrieren. Aus diesem Grund wurden ein kleinerer 35kHz-Generator und eine Sonotrode von Hermann Ultraschall angemietet. Diese Geräte, inklusive der zu betrachtenden Parameter konnten erfolgreich in den Prozess integriert werden. Um die Genauigkeit und Zuverlässigkeit des Schweißprozesses zu erhöhen, wurde außerdem ein druckgesteuertes pneumatisches Steuersystem von Festo erworben, um gleichmäßigen Druck auf die zu schweißende Struktur zu gewährleisten.

Integrierter Fertigungsprozess

Nach der Entwicklung getrennter Prozesse für das Furnierlegen und Schweißen wird nun an der Entwicklung eines integrierten Fertigungsprozesses geforscht, bei dem Furniere in einem kontinuierlichen Prozess gelegt und geschweißt werden. Dies hat mehrere Vorteile, denn es würde eine effizientere Produktion ermöglichen und die Bandbreite der möglichen Bewehrungsstrukturen erhöhen. Dies ist insbesondere für die Erforschung von 3D-Bewehrungsstrukturen von Bedeutung, bei denen eine Reihe von dreidimensionalen Furnier-„Wellen“ zur Verbindung zwischen zwei flachen Furniergittern verwendet wird, wodurch ein Muster entsteht, das demjenigen ähnelt, das üblicherweise bei der Stahlbewehrung von Betonbalken und -platten verwendet wird.

Um ein solches integriertes Verfahren zu erreichen, wurde ein neues Werkzeug entwickelt, das den bestehenden Furnierextruder mit einer auf einem pneumatischen Kolben montierten Ultraschall-Schweißsonotrode kombiniert (Abbildung 26). Der Pneumatikkolben wird über ein Terminal gesteuert, welches es ermöglicht, den gewünschten Druck genau zu definieren und somit eine gleichmäßige Schweißung zu gewährleisten. Alle Prozessparameter werden direkt von der Robotersteuerung ferngesteuert, sodass die Schweißqualität entlang des Werkzeugspfades des Druckwerkzeugs individuell angepasst werden kann.



Quelle: FG Experimentelles und Digitales Entwerfen, Universität Kassel

Abbildung 26
Vollautomatischer Extruder, der sowohl das Extrudieren als auch das Schweißen in einem einzigen Prozess integriert.

Studien zur Anordnung der Furnierbewehrung

Händisch angefertigte Vorstudien dienten als Grundlage für die Studie zu verschiedenen Anordnungsmöglichkeiten des Gitters in der Bewehrung (Abbildung 27).

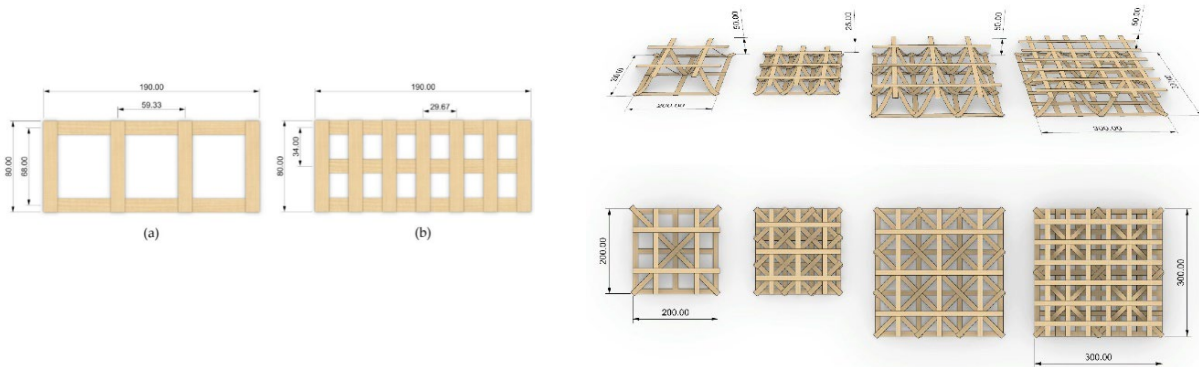


Quelle: FG Experimentelles und Digitales Entwerfen, Universität Kassel

Abbildung 27
Holzgitteranordnungen für die Bewehrung, von links: 2D-Gitter, 2D-Gitter mit massiven Seiten, 3D-Gitter

Anschließend wurden für diese Studie zunächst zwei Arten von 2D-Furniergittern zur Verstärkung der Myzelmaterialien entworfen: Gitter mit hoher und niedriger Dichte (Abbildung 28 links). Während das Gitter mit geringer Dichte zwei Furnierstreifen in der Längsrichtung und vier in der Querrichtung hatte, hatte das Gitter mit hoher Dichte drei bzw. sieben Furnierstreifen. In jedem Gitter wurden die Furniere so angeordnet, dass sie einen Rahmen von 19 cm x 8 cm in insgesamt zwei Schichten bildeten, die senkrecht zueinanderstanden. Die Furnierstreifen wurden während des Drucks an ihren Enden mit einem doppelseitigen Klebeband fixiert. Nachdem alle Streifen mit der gleichen Richtung aufgelegt waren, wurde die zweite Lage von Streifen senkrecht zur ersten Lage hinzugefügt, und die Gitter waren bereit für das Ultraschallschweißen der Schnittpunkte. Bei der Herstellung von 3D-Furniergittern (Abbildung 28, rechts) wird nach der Herstellung

des ersten 2D-Gitters der gleiche Prozess nochmal für die Zwischenschicht wiederholt, wobei eine bestimmte Menge mehr Furnier zusätzlich extrudiert wird, wodurch die dreidimensionalen Verbindungswellen entstehen: die Plattendicke wird also durch zusätzliche Furnierextrusion vor jeder Schweißung erzeugt. Nach dem Drucken der ersten beiden Schichten wird das noch unfertige Gitter vom Druckbett entfernt. Das zweite 2D-Gitter wird mit demselben Verfahren gedruckt, anschließend werden die zuvor verbundenen ersten beiden Schichten über das Gitter gelegt und verschweißt, wodurch ein dreidimensionales Gitter mit konstanter Höhe entsteht.



Quelle: FG Experimentelles und Digitales Entwerfen, Universität Kassel

Abbildung 28
Additiv hergestellte 2D und 3D Holzgitter, Geometrieentwicklung, Maße in mm

AP 2.2 Biokultivierungsprozess auf Basis der Holzgitterstrukturen (KIT)

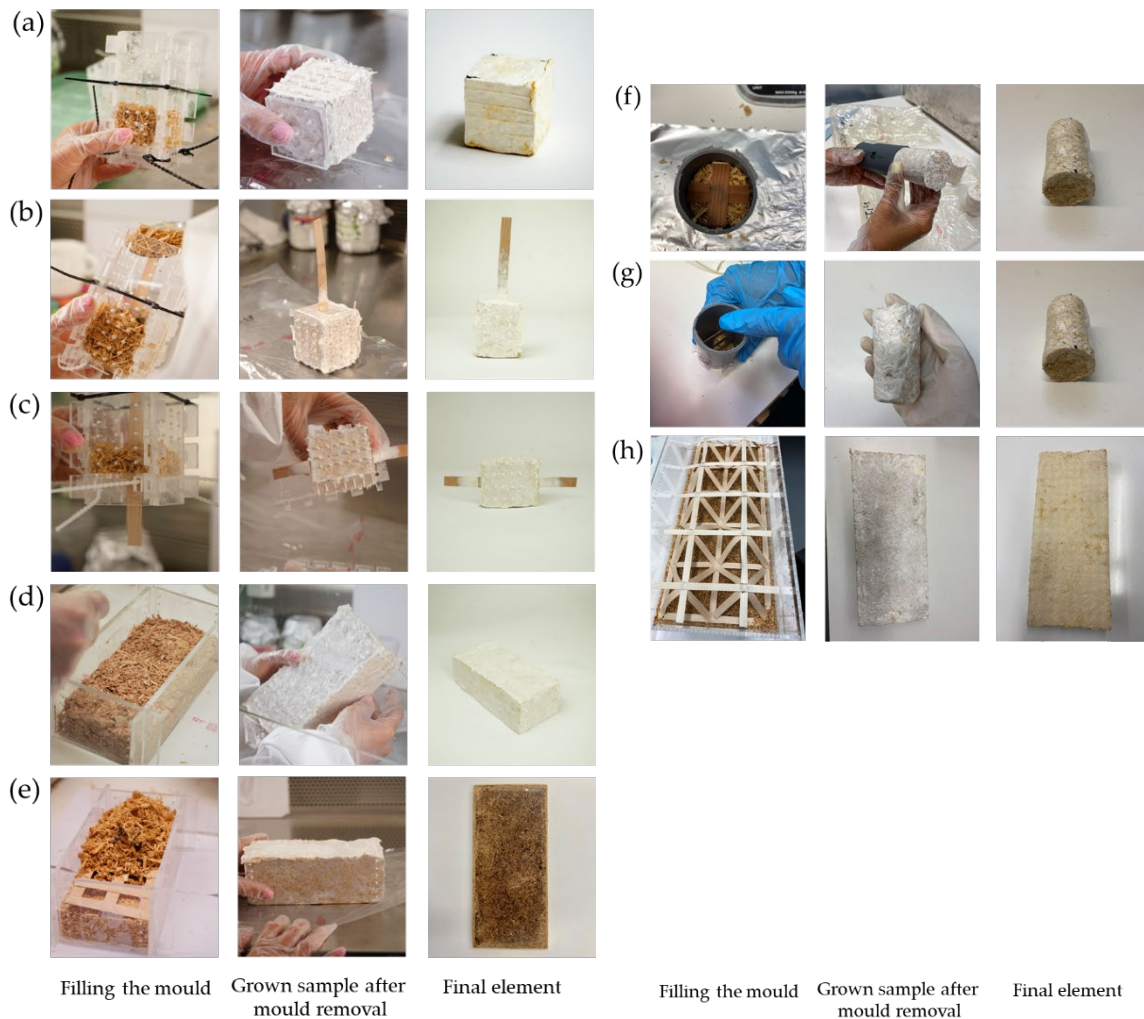
Herstellung von Myzel-Verbundwerkstoffen

Besiedelte Substrate, die in Beuteln vorgewachsen waren, wurden zerkleinert und in Formen gefüllt, die für Druck-, Ausreiß- und Biegeversuche sowie für die Schallabsorptionstests der Proben vorbereitet waren. Nach dem Befüllen der Formen mit Substraten wurden diese in den Inkubationsraum unter ähnlichen Bedingungen wie in der vorherigen Phase gebracht (siehe AP 1.3 *Charakterisierung und Herstellung Grundwerkstoffe*). Die entstehenden Prüfkörper wurden weitere 3 bis 6 Tage im Inkubationsraum belassen, bis das Myzelnetzwerk die Oberfläche des Substrats bedeckt hatte. Anschließend wurde die Form entfernt, und die auf Myzel basierenden Verbundproben wurden für weitere 3-5 Tage im Inkubationsraum belassen, um das Wachstum des Myzelnetzwerks zu beschleunigen. Das Entfernen der Form trägt zu einer besseren Belüftung bei, was zu einem weiteren Wachstum des Myzelnetzwerks im Inneren und auf der Oberfläche der Proben führt. Der Biowachstumsprozess in sechs Arbeitsschritten ist in Abbildung 29 dargestellt. Der Vorbereitungsprozess der Proben und die endgültigen Kompositmaterialien auf Myzeliumbasis für jeden Testtyp sind in Abbildung 30 dargestellt.



Quelle: Institut für Entwerfen und Bautechnik, KIT

Abbildung 29
Biowachstumsprozess in sechs Arbeitsschritten.



Quelle: Institut für Entwerfen und Bautechnik, KIT

Abbildung 30

Herstellungsverfahren von Myzelium-Verbundproben: (a) Würfel für die Druckfestigkeitsprüfung; (b) Würfel für die Ausreißprüfung mit einseitigem Furnier; (c) Würfel mit beidseitiger, mittlerer Furnierüberlappung mit und ohne Schweißverstärkung; (d) Myzelblock (Leichtbaustein) mit und ohne Gitter mit niedriger und hoher Dichte; (e) Gepresster Block mit und ohne Gitter mit niedriger und hoher Dichte; (f) Rohrprobe für die Schallabsorptionsprüfung mit und ohne horizontale Furnierverstärkung; (g) Rohrprobe für die Schallabsorptionsprüfung mit vertikaler Furnierverstärkung; (h) Großformatiger Block mit und ohne 3D-Gitter mit niedriger und hoher Dichte.

Für die Druck- und Ausreißversuche wurden 5x5x5 cm Plexiglasformen vorbereitet (Abbildung 30, a-c). Ein angefeuchteter und sterilisierter Ahornfurnierstreifen mit einer Länge, Breite und Dicke von etwa 16 cm, 1,2 cm bzw. 0,5 cm wurde für die Ausreißversuche senkrecht und parallel zu einer Seite der Form in der Mitte in das Myzelsubstrat einwachsen gelassen. Es wurden drei Arten von Ausreißproben vorbereitet: Ausreißproben, bei denen der Furnierstreifen bis zu 75% der Höhe des Würfels eingewachsen war, Ausreißproben mit nicht verschweißtem, sich in der Mitte des Würfels überlappendem Furnier und schließlich Ausreißproben mit sich in der Mitte überlappendem und verschweißtem Furnier. Ziel der Tests war es, die Grenzflächen-Scherfestigkeit zwischen der Myzelmatrix und dem Furnier zu bestimmen und den Bindungsmechanismus zu bewerten, der sich an der Grenzfläche zwischen Furnier und Myzelmatrix entwickeln könnte.

Die kleinmaßstäblichen Biegeproben wurden in Formen von 19x8x7 cm mit und ohne Furniergitter hergestellt, wie in Abbildung 30d,e dargestellt. Für letzteres wurden besiedelte Substrate zunächst bis zur Hälfte der Form gefüllt, dann wurde ein Furniergitter gelegt, bevor der Rest der Form mit Substrat aufgefüllt wurde. Es wurde sichergestellt, dass die Dichte aller Proben während der gesamten Probenvorbereitung gleich blieb. Für diese Studie wurden zwei Arten von Furniergittern verwendet: ein Gitter mit hoher Dichte und ein Gitter mit niedriger Dichte. Da es bisher keine Untersuchungen über die Verwendung von Furnierverstärkungen für

Verbundwerkstoffe auf Myzelbasis gab, wurde die Größe der Proben so gewählt, dass sie den verfügbaren Prüfeinrichtungen entsprach, wobei die notwendigen Verweise auf ASTM- und europäische Normen gemacht wurden. Es wurden außerdem Biegeproben mit zwei Lagen von Furniergittern geringer Dichte hergestellt: ein Gitter wurde oben und eines unten in die Formen eingebettet, der Abstand zur Oberfläche des Substrats betrug 10 mm.

Die akustischen Proben im kleinen Maßstab wurden in PVC-Rohren mit einem Innendurchmesser von 4,5 cm und einer Höhe von 9 cm mit und ohne verstärkendes Furnier hergestellt (Abbildung 30f,g). Für diese Probenreihe wurden zwei verschiedene Arten von Furnierverstärkungen verwendet: 1) Drei Lagen gekreuzter Furniere mit einer Größe von 4,5x4,5 cm wurden horizontal unten, in der Mitte und oben in den Proben platziert, wobei die Furniere an der Unterseite und der Oberseite der Proben von beiden Seiten mit ca. 1-2 cm Myzelmaterial bedeckt wurden, um eine vollständige Abdeckung des Furniers mit Myzel zu gewährleisten. 2) Ein Furnier mit geringer Dichte und einer Größe von 4,5x8 cm wurde senkrecht in der Mitte des Furniers platziert und mit 0,5 cm Abstand von der Unter- und Oberseite der Probe mit Myzelium bedeckt, um eine vollständige Bedeckung sicherzustellen.

Die großmaßstäblichen Biegeproben wurden in 50x100x2 cm großen Formen mit und ohne Furniergitter niedriger und hoher Dichte mit unterschiedlichen Höhen hergestellt, wie in Abbildung 30h dargestellt. Die Höhe der Proben wurde durch die Höhe des 3D-Gitters bestimmt, welches mit 10 mm Abstand von der Unter- und Oberseite der Proben eingelegt wurde. Im Falle eines 3D-Gitters mit einer Höhe von 3 cm beträgt die endgültige Probenhöhe beispielsweise 5 cm.

Nachbearbeitung

Nach Abschluss des Wachstumszyklus wurden die Proben in einen Trockenofen gebracht und dort für 2-3 Tage bei einer Temperatur zwischen 60 und 70 °C getrocknet. Während dieses Zeitraums wurden die Proben regelmäßig gewogen, um sicherzustellen, dass sich ihr Gewicht stabilisierte. Wenn keine Veränderung des Gewichts mehr zu beobachten war, wurden sie aus dem Ofen genommen und ihre endgültige Dichte gemessen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Die Proben für die Druck- und Ausreißversuche sowie die ungepressten Biegeproben wurden direkt nach dem Trocknen geprüft. Die kleinen Biegeproben mit und ohne Furniergitter wurden für ein zusätzliches Pressverfahren vorbereitet, um gepresste Verbundwerkstoffe auf Myzelbasis (= Dense Mycelium Composites) herzustellen. Die Biegeproben wurden in eine Heißpressformmaschine eingelegt und bei einer Temperatur von 120 °C gepresst, wobei der Pressdruck der Maschine auf 10 MPa eingestellt war und 15 Minuten lang anhielt. Die verwendete Temperatur und der verwendete Druck basieren auf einer Reihe von Experimenten, die in abgeschlossenen früheren Projekten am KIT durchgeführt wurden, und die Ergebnisse wurden direkt auf das HOME-Projekt übertragen (Chan et al., 2021). Anschließend wurden die Proben dann in einem Ofen 12 bis 24 Stunden lang bei einer Temperatur von 40 °C stabilisiert, um sich an die Raumtemperatur anzupassen und einen thermischen Spannungsschock innerhalb der Proben zu vermeiden. Eine der fertigen Proben ist in Abbildung 30e dargestellt.

Die Akustikproben wurden auch an das Akustiklabor der K.U. Leuven, Belgien, zur weiteren Prüfung versandt (ARUP).

AP 3 CHARAKTERISIERUNG BIOVERBUNDMATERIAL

AP 3.1 Charakterisierung Verbundquerschnitte (KIT)

Strukturelle und akustische Versuche

Im Rahmen dieses Projekts wurden Druck-, Ausreiß- und Biegeversuche an mit Holzurnier verstärkten Myzelverbundwerkstoffen durchgeführt. Weitere Informationen sind in Tabelle 1 zu finden. Die Druckproben hatten eine durchschnittliche Dichte von 145 kg/m³, wodurch sie aufgrund ihrer weichen Textur und geringen Dichte in den Bereich der Polyurethan-Weichschaumprodukte eingeordnet werden können. Da es keine

genormten Prüfverfahren für auf Myzel basierende Materialien (Leichtbausteine) gibt, wurde für diese Studie als Referenz für die Prüfung und Bewertung der Druckeigenschaften die ASTM D3574 (2017) (Standard Test Methods for Flexible Cellular Materials-Slab, Bonded, and Molded Urethane Foams) verwendet, welche eine allgemein verwendete Norm für die Prüfung von flexiblen, zellularen Schaummaterialien ist. Die Proben wurden mit einer Universalprüfmaschine (UTM) mit einer 5 kN HBM-Kraftmessdose (HBK, Deutschland) geprüft.

Zur Bewertung des Verbundes zwischen Holzfurnier und Myzelverbund wurden Ausreißversuche durchgeführt. Mit einer UTM wurde die Bewehrung durch Aufbringen einer Zugkraft mit einer definierten Belastungsrate herausgezogen. Die Probe wurde währenddessen eingespannt, um eine Bewegung während des Tests zu vermeiden. Auf der Suche nach einschlägigen Normen, die für die in dieser Studie verwendeten Materialien geeignet sind, wurde leider keine geeignete Prüfnorm gefunden. Die in der technischen Empfehlung von RILEM (RC6 Bond test for reinforcement steel. 2. Pull-out test) (1994) und ASTM D7913 (2020) (Standard Test Method for Bond Strength of Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite Bars to Concrete by Pullout Testing) erläuterten Verfahren erwiesen sich jedoch als die für diese Studie am besten geeigneten. Daher wurde der Prüfaufbau gemäß den Empfehlungen dieser beiden Prüfnormen entwickelt, wobei notwendige Änderungen vorgenommen wurden, um den verfügbaren Prüfmaschinen gerecht zu werden.

Zur Bewertung der Biegefähigkeit der Proben wurden die Empfehlungen der ASTM D1037:2020 (Standard Test Methods for Evaluating Properties of Wood-Based Fiber and Particle Panel Materials) übernommen. Zur Ermittlung des Bruchmoduls und zur Bewertung der Biegeeigenschaften, einschließlich des Biegeelastizitätsmoduls, wurde der 3-Punkt-Biegeversuch verwendet.

Zur Bewertung der Schallabsorptionseigenschaften wurden die Proben in einem Schallprüfungslabor mit einer Impedanzrohrmethode gemäß der in der Norm ISO 10534-2 (2001) 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 künftige Entwicklung von Produkten 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 und Baugruppen zu ermöglichen.

Ursprünglich war geplant, eine Probenserie mit vier Proben in jeder Kategorie umzusetzen, so dass sich folgende Gesamtverteilung der Prüfmuster ergeben würde:

- Vier Proben ohne Furnieranteil und minimalem Myzelwachstum,
- Vier Proben ohne Furnieranteil und maximalem Myzelwachstum,

- Vier Proben mit einem Furnierelement und minimalem Myzelwachstum,
- Vier Proben mit einem Furnierelement und maximalem Myzelwachstum,
- Vier Proben mit drei Furnierelementen und minimalem Myzelwachstum,
- Vier Proben mit drei Furnierelementen und maximalem Myzelwachstum.

Aufgrund von Herstellungs- und Versandproblemen wurden statt vier nur drei Proben pro Kategorie umgesetzt. Für die Zukunft ist eine weitere Testrunde geplant, um die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Testergebnisse zu erhöhen.

Ergebnisse

Die Ergebnisse der Druck-, Ausreiß- und Biegeversuche aller Proben sowie ihre Dichten sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1

Zusammenfassende Tabelle der physikalischen und mechanischen Eigenschaften von Verbundwerkstoffen auf Myzelbasis mit und ohne Furniergitter.

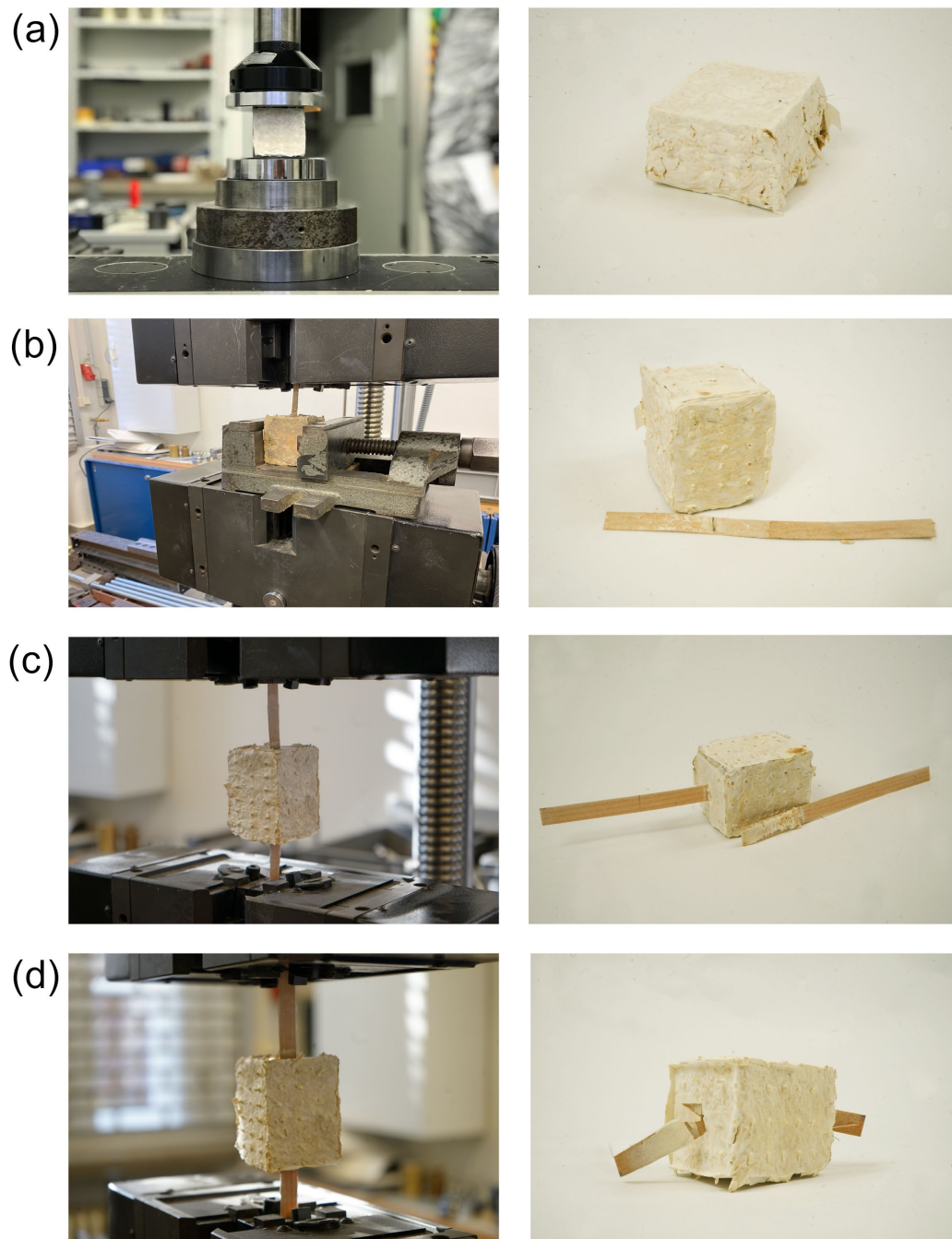
Test	Muster	Dichte (kg/m ³)	Festigkeit (Mpa)	Elastizität (Mpa)
Druckfestigkeit	Würfel		1.2 ±0.12	4.10±0.67
Auszugsfestigkeit	Würfel + einseitiges	145 ± 14	0.34 ±0.04	NA
	Würfel + zwei Seiten		0.36 ±0.1	NA
	ungeschweißtes Furnier			
Zugfestigkeit	Würfel + zweiseitiges geschweißtes Furnier		30.6 ±3.6	NA
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	118 ±12	0.07 ± 0.02	3.2 ± 0.3
	Leichtbaustein + 3D-Gitter 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: Institut für Entwerfen und Bautechnik, KIT

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die durchschnittliche Druckfestigkeit der Proben 1,2 MPa betrug und das durchschnittliche Elastizitätsmodul unter Druck mit etwa 4,1 MPa gemessen wurde. Wie in Abbildung 31a zu sehen ist, wurden die Proben auf bis zu 50% ihrer ursprünglichen Höhe zusammengedrückt. Während der Tests wurden keine Risse oder Brüche beobachtet.

Die Ausreißproben mit einem Streifen Ahornfurnier in der Mitte wiesen eine ähnliche Grenzflächen-Scherspannung (Interfacial Shear Stress, kurz IFSS) auf wie die Proben, die mit zwei Streifen überlappenden, ungeschweißten Ahornfurnierstreifen in der Myzelmatrix hergestellt wurden. Wie in Abbildung 31b,c zu sehen ist, wurde das Myzelwachstum auf der Oberfläche des in die Myzelmatrix eingebetteten Ahornfurniers beobachtet. Die Proben wiesen eine relativ gute Haftung auf: Die Haftfestigkeit zwischen der Myzelmatrix und den Furnierstreifen wurde mit 0,34 MPa für einen einzelnen Furnierstreifen und 0,36 MPa für überlappende Furnierstreifen gemessen. Der leichte Anstieg der IFSS bei Proben mit zwei unverschweißten, überlappenden Furnierstreifen kann auf das bessere Wachstum des Myzelnetzwerks um und zwischen den Schichten der Furnierstreifen zurückgeführt werden. Im Vergleich zu Proben mit einem einzelnen Furnierstreifen, bei denen die geringere Oberfläche zu einer geringeren Myzelwachstumsdichte geführt hat, konnte in diesen Bereichen eine stärkere Bindung entwickelt werden. Bei beiden Probenserien wurden die Furniere deutlich aus der Myzelmatrix herausgezogen.

Bei den geschweißten Ahornfurnieren wurde jedoch kein Ausreißen der Furniere aus den Proben beobachtet. Bei allen Proben, die mit verschweißten Furnierstreifen hergestellt wurden, wurde das Versagen der Furnierstreifen aufgrund von Zugversagen beobachtet, wie in Abbildung 31d dargestellt. Dies lässt sich durch die höhere Versagenslast erklären, die während der Tests im Vergleich zu den anderen Ausreißproben beobachtet wurde. Wenn die resultierende Spannung mit der Zugfestigkeit des Ahornfurniers verglichen wird, kann die Hypothese bestätigt werden, dass die Schweißnahtfestigkeit höher ist als die Haftfestigkeit zwischen den Furnierstreifen und der Myzelmatrix. Es sind jedoch weitere Tests erforderlich, um herauszufinden, wie sich das Wachstum des Myzels in Kombination mit dem Schweißen auf die Verbesserung der Verbundfestigkeit zwischen Furnier und Myzelmatrix in holzfurnierverstärkten Verbundwerkstoffen auf Myzelbasis auswirkt.



Quelle: Institut für Entwerfen und Bautechnik, KIT

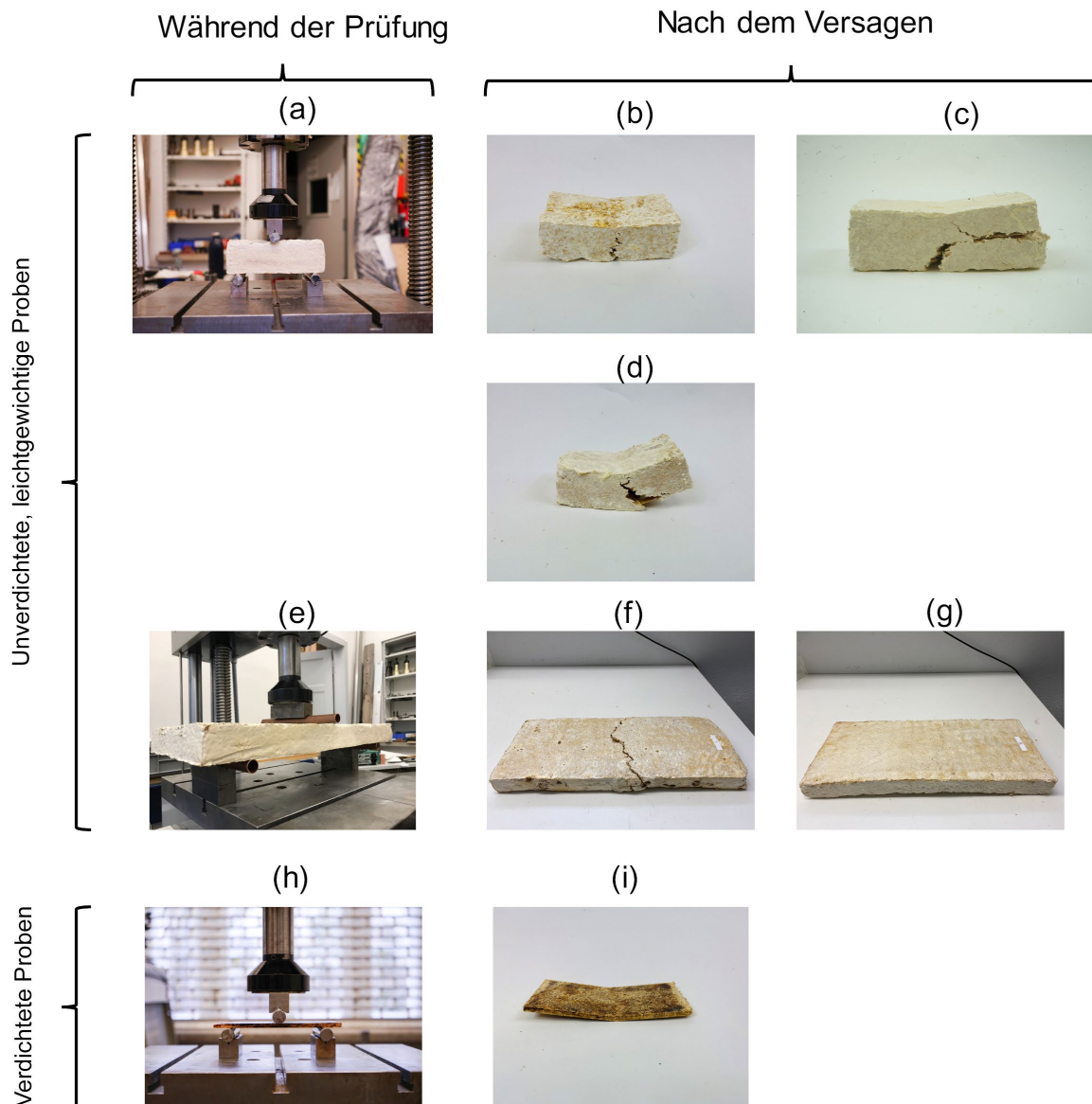
Abbildung 31
Proben während (linke Spalte) und nach der Prüfung (rechte Spalte): (a) Druckfestigkeitsprüfung; (b) Einseitiger Furnierausreißversuch; (c) Zweiseitiger Ausreißversuch für ungeschweißtes Furnier; (d) Zweiseitiger Zugversuch für verschweißtes Furnier.

Bei der Biegeprüfung der kleinformatischen Proben zeigten die ungepressten Proben (Leichtbausteine) mit einer Lage Furniergitter hoher Dichte und die ungepressten Proben (Leichtbausteine) mit Furniergittern oben und unten in der Probe Scherversagen, während alle anderen Proben ein Biegeversagen zeigten; einschließlich aller gepressten Platten mit Furniergittern niedriger und hoher Dichte sowie Proben ohne Furniergitter, wie in Abbildung 32 dargestellt. Die Biegefestigkeit der Leichtbausteine hat sich durch das Hinzufügen einer Lage Furniergitters niedriger Dichte in der Mitte der Probe im Vergleich zu den nicht verstärkten Bausteinen leicht erhöht. Andererseits führte die Verwendung von Gittern mit hoher Dichte zu einem Scherversagen und einer geringeren Biegefestigkeit. Proben mit Gittern niedriger Dichte oben und unten wiesen ebenfalls eine geringere Biegefestigkeit auf. Dieses Verhalten könnte durch das beobachtete Scherversagen erklärt werden, welches auf eine möglicherweise geringere Bindungsstärke zwischen den Furniergittern und der Myzelmatrix zurückzuführen ist.

Bei der Biegeprüfung der großformatigen Proben ohne 3D-Verstärkungsgitter wurde ein Biegeversagen beobachtet, wie in Abbildung 32f dargestellt. Bei den Proben, die mit einem geringdichtem 3D-Gitter (3 cm) verstärkt waren, wurde ein geringer Anstieg der Biegefestigkeit und der elastischen Festigkeit beobachtet (siehe Tabelle 1), und es wurde kein signifikanter Riss im Block nach 35 mm Durchbiegung beobachtet (siehe Abbildung 32 g). Wie aus Tabelle 1 ersichtlich, weist die Probe mit geringdichtem 3D-Gitter und einer Höhe von 2 cm eine ähnliche Biegefestigkeit auf wie die mit dem gering dichten Gitter und einer Höhe von 3 cm. Jedoch ist ein leichter Anstieg des Elastizitätsmoduls zu beobachten, der weiter untersucht werden muss. Vergleicht man die Proben mit gering- und hochdichten 3D-Gittern und einer Höhe von 2 cm, so ist eine leichte Erhöhung der Biegefestigkeit bei den Proben mit hochdichten Gittern zu beobachten. Jedoch war das Elastizitätsmodul im Fall des hochdichten Gitters deutlich höher. Im Allgemeinen wurde bei allen mit 3D-Gittern verstärkten Proben nach 35 mm Durchbiegung während des Tests kein signifikanter Riss im Block beobachtet.

Vergleicht man die großformatigen mit den kleinformatischen Blöcken, so war die Biegefestigkeit der kleinformatischen Proben höher als die der großformatigen Proben, was auf die endgültige Dichte der Proben zurückzuführen ist, da die Dichte eine wichtige Rolle bei den mechanischen Eigenschaften der Proben spielt.

Im Gegensatz zu den ungepressten Proben (Leichtbausteine) haben die gepressten Platten ein deutliches Biegeversagen gezeigt, was auf einen stärkeren Bindungsmechanismus zwischen den Furnierstreifen und der Myzelmatrix hindeutet, wie in Abbildung 32i dargestellt. Obwohl kein Scherversagen beobachtet wurde, konnten ähnliche Tendenzen bei der Biegefestigkeit beobachtet werden, wenn Furniergitter mit hoher Dichte innerhalb der gepressten Platten verwendet wurden. Es wurde keine signifikante Zunahme der Biegefestigkeit bei gepressten Platten mit hochdichten Gittern im Vergleich zu gepressten Platten ohne Gitter festgestellt. Bei Pressplatten mit geringdichten Gittern wurde jedoch eine signifikante Erhöhung der Biegefestigkeit und des Elastizitätsmoduls festgestellt. Die Furniergitter wirken als Verstärkungssysteme und tragen zur weiteren Versteifung der auf Myzel basierenden Verbundplatten bei, ähnlich wie bei Stahlbetonproben, bei denen die Stahlbewehrung zur Biege- und Zugfestigkeit beiträgt. Die Erhöhung der Dichte der Gitter hätte die Biegekapazität der Platten weiter erhöhen können, jedoch beeinträchtigt auch ein Furniergitter mit hoher Dichte die Scherfestigkeit der Platten und führt zu einem Scherversagen, bevor ein Biegeversagen auftritt. Dies könnte auch dadurch erklärt werden, dass die Platzierung von Gittern mit hoher Dichte innerhalb der Platten die Oberflächeninteraktion der Myzelschichten innerhalb der Platten verringern würde und somit der Bindungsmechanismus von Myzel zu Myzel innerhalb der Platte selbst gestört werden kann, was zu einer geringeren Zwischenschichtbindung zwischen den Gittern und dem Myzelverbund führt. Weitere Untersuchungen wären notwendig, um diese Hypothese auf mikrostruktureller Ebene zu bestätigen.



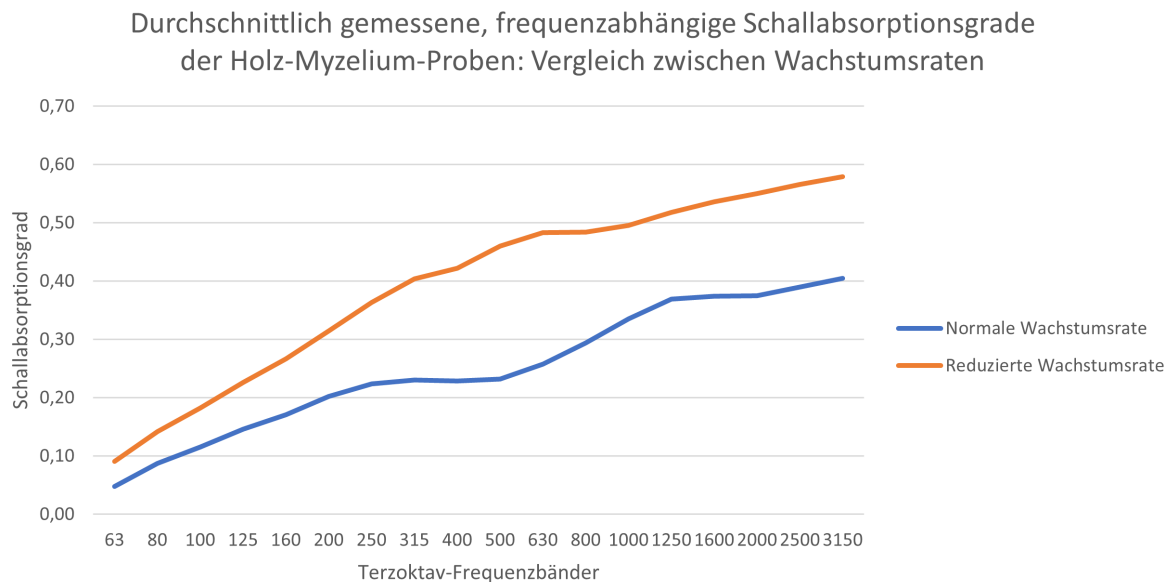
Quelle: Institut für Entwerfen und Bautechnik, KIT

Abbildung 32

Proben während und nach der Prüfung: (a) Leichtbaustein im Drei-Punkt-Biegeversuch (b) Leichtbaustein ohne oder mit einem geringdichten Gitter in der Mitte (c) Leichtbaustein mit einem hochdichten Gitter in der Mitte (Scherversagen) (d) Leichtbaustein mit zwei Schichten geringdichten Gitter nahe der Ober- und Unterseite des Bausteins (e) Großer Leichtbaustein im Drei-Punkt-Biegeversuch (f) Großer Leichtbaustein ohne 3D-Gitterverstärkung nach dem Versagen (g) Großer Leichtbaustein mit 3D-Gitterverstärkung nach dem Versagen (h) Gepresster Baustein im Drei-Punkt-Biegeversuch (i) Gepresster Baustein nach dem Versagen.

Was die akustischen Schallabsorptionstests betrifft, so wurden die Rohmessdaten einer vorläufigen Multifaktoranalyse unterzogen. Die Schallabsorptionstests haben ein sehr breites Spektrum von Schallabsorptionsgraden ergeben, mit Werten von $\alpha_w=0,2$ zu $\alpha_w=0,7$. Alle Proben haben ein zunehmendes Schallabsorptionsvermögen in den höheren Frequenzbereichen. Während einer Analyse der Messergebnisse wurde festgestellt, dass bestimmte Herstellungsfaktoren eine deutliche Rolle bei der resultierenden Schallabsorptionsgrade spielen, nämlich der Wachstumsgrad des Myzels und die Dichte der integralen Holzfurnierelemente. Ein vorläufiges Verständnis von deren Zusammenhang ist den Messergebnissen entnehmbar, aber die genauen Faktoren, Grenzwerte und Optimierungspotenziale sind noch zu untersuchen.

Diese vorläufige Analyse der akustischen Rohmessdaten zeigt, dass das Myzelwachstum ein wichtiger Kontrollfaktor für den Breitband-Schallabsorptionskoeffizienten der Proben ist. Es besteht auch eine umgekehrte Beziehung zwischen der Probendichte und dem Schallabsorptionskoeffizienten, allerdings ist diese Beziehung nichtlinear und scheint nicht von primärer Bedeutung zu sein. Der Einfluss der Wachstumsrate auf die Schallabsorption hängt höchstwahrscheinlich mit der Luftdichtigkeit der Außenhaut der Probe zusammen. Die durchschnittliche Schallabsorptionsgrade aller Proben mit normalen und reduzierten Wachstumsraten sind in der nachfolgenden Abbildung 33 dargestellt.



Quelle: Arup

Abbildung 33
Durchschnittlich gemessene Schallabsorptionsgrade, nach Wachstumsrate.

Bei allen Proben wurde eine klare Beziehung zwischen der Wachstumsrate des Myzels und der Schallabsorption festgestellt, so dass geringere Wachstumsraten mit einer höheren Schallabsorption einhergehen (Abbildung 34). Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass ein reifes, ausgewachsenes Myzel eine dichtere Probe mit geringerer Porosität und höherem Luftströmungswiderstand erzeugt, was das akustische Reflexionsvermögen der Probe erhöht. Verbundwerkstoffe mit höherer Dichte können für schalldämmende Anwendungen nützlich sein, aber Verbundwerkstoffe mit geringerer Dichte und weniger reifem Myzel scheinen für schallabsorbierende raumakustische Behandlungen besser geeignet zu sein.

Die Art der Platzierung der Holzfurnierelemente in den Proben hat Einfluss auf die Schallabsorptionsgrade. Proben ohne Holzfurnierelemente weisen einen mittleren Schallabsorptionsgrad auf. Die Schallabsorptionsgrade im Tieffrequenzbereich wurden verbessert bei den Proben, die ein vertikales Holzfurnierelement im Inneren der Probe hatten. Diese Ergebnisse könnten bedeuten, dass ein einzelnes Holzfurnierelement die Luftdurchlässigkeit der Probe durch Zerbrechen der Myzel-Netzstruktur verstärkt, und dadurch eine Verbesserung zur Schallabsorption verursacht. Die Proben mit einem dichteren Holzfurnierinhalt weisen eine stark reduzierte Schallabsorptionsfähigkeit auf. Die Ergebnisse stellen eine komplexe Beziehung zwischen Holzfurnierinhalt, Myzel-Netzstruktur und Schallabsorption dar, wobei die Holzfurnierelemente zu einer Verstärkung der Schallabsorptionsfähigkeit führen können, aber nur innerhalb gewissen Grenzen.

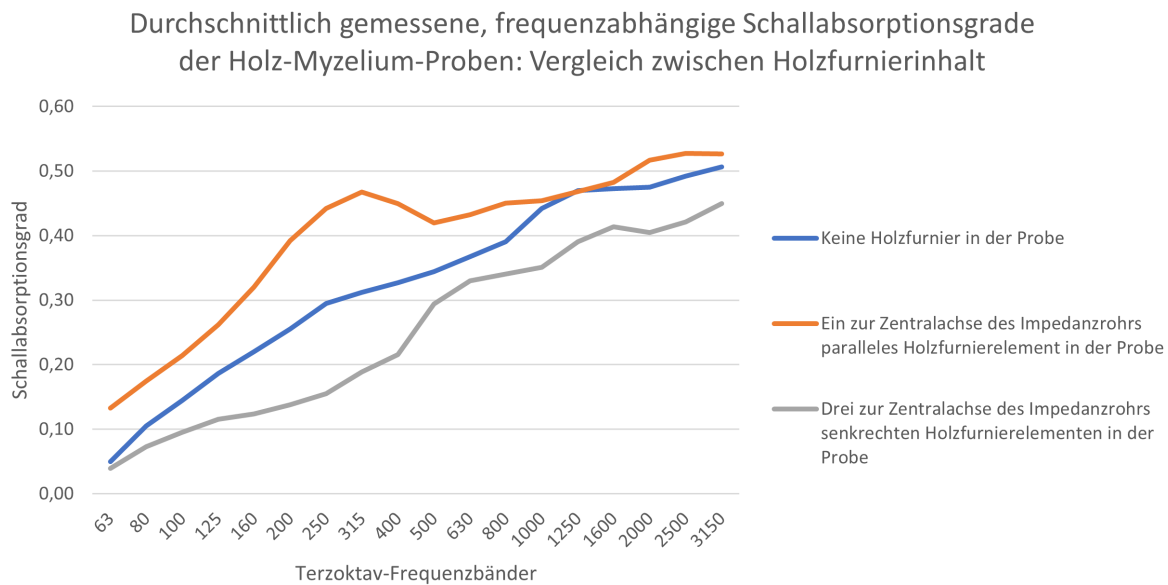
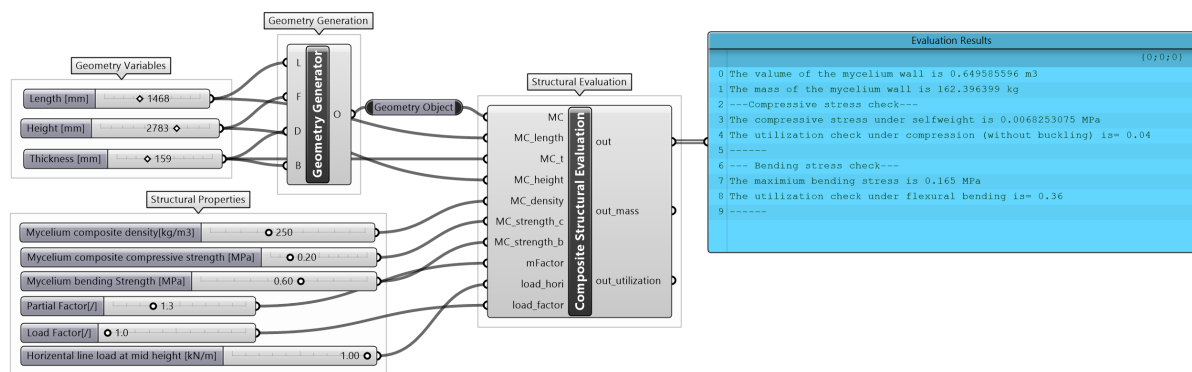


Abbildung 34
Durchschnittlich gemessene Schallabsorptionsgrade, Vergleich nach Holzfurnierinhalt.

AP 3.2 Ansätze zur Dimensionierung und Auslegung (ARUP)

Die Versuche haben ein erstes Verständnis des mechanischen Verhaltens der holzfurnierverstärkten Verbundwerkstoffe auf Myzelbasis in Bezug auf Dichte, Festigkeit und Steifigkeit im Materialmaßstab vermittelt. Es wurde gezeigt, dass die Zugabe von Furniergittern als Verstärkungssysteme, wenn sie mit der richtigen Dichte und Konfiguration ausgelegt sind, zur Steigerung der Biegeeigenschaften der Myzel-Furnier-Verbundwerkstoffproben beitragen kann. Darüber hinaus hat sich das Verpressen der Proben als wirksames Mittel zur Verbesserung der Biegeeigenschaften der Verbundwerkstoffe erwiesen, indem der Bindungsmechanismus zwischen den Furniergittern und der Myzelmatrix verbessert wurde. Die Studie lieferte die grundlegenden Materialinputs für die weitere Entwicklung des Materialsystems in größerem Maßstab und Einblicke in das Materialverhalten, die anschließend das Design und die Entwicklung dieser Verbundwerkstoffe unterstützen werden.

Derzeit werden ein Berechnungsrahmen und digitale Modelle entwickelt, um Bauteile in größerem Maßstab zu entwerfen und zu dimensionieren. Dieser rechnerische Rahmen wird die mechanischen Eigenschaften des Materials resultierend aus Tests mit den geometrischen Variablen des Designs integrieren. Es werden Tests in Originalgröße und die Finite-Elemente-Analyse (FEA) als Methoden zur strukturellen Bewertung eingesetzt, um die Designoptionen auf der Grundlage bestimmter Belastungs- und Stützbedingungen für die spezifischen Endanwendungen weiterzuentwickeln und zu optimieren. Zur Veranschaulichung des Konzepts sind in Abbildung 35 die vier Module des Berechnungsrahmens dargestellt: 1 Definition der geometrischen Variablen und Erzeugung der Geometrie; 2 Mechanische Eigenschaften und Struktureingaben; 3 Strukturelle Bewertung; und 4 Ergebnisse.



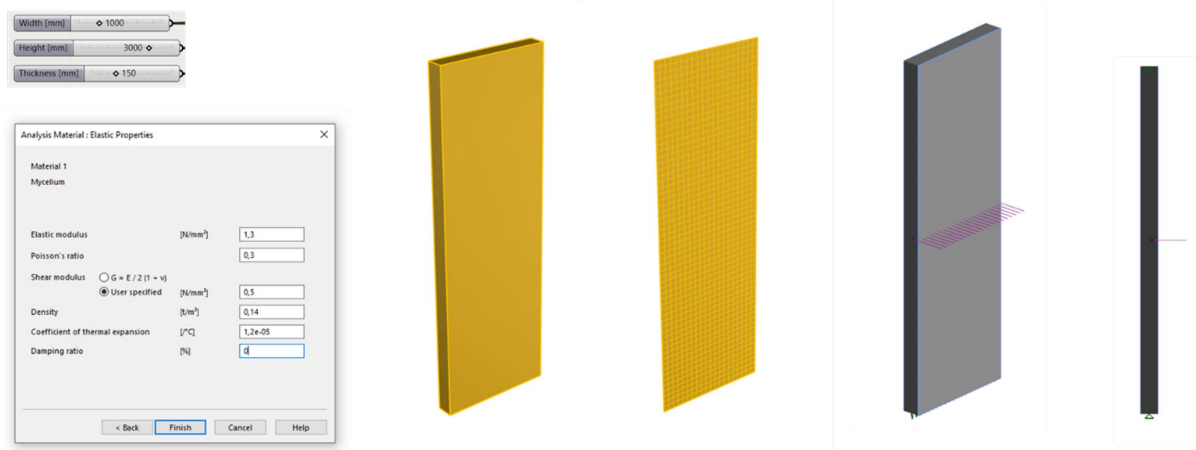
Quelle: ARUP

Abbildung 35

Konzeptnachweis des digitalen, computergestützten Dimensionierungssystems mit struktureller Auswertung.

Mit den aus den Biegeversuchen im kleinen Maßstab ermittelten Materialeigenschaften (Myzelverbundwerkstoff mit 2D-Gittern, Dichte = 140 kg/m³) wurde eine Reihe von numerischen Simulationen durchgeführt, um das strukturelle Verhalten der Verbundplatte zu verstehen, wenn sie für eine Trennwand ausgelegt ist.

Es wurden zwei Anwendungsfälle betrachtet: Fall 1 geht von einem freistehenden Wandpaneel mit den Abmessungen 1m x 3m x 0,15m aus, das unten und oben mit Zapfenverbindungen ohne zusätzliche Rahmenkonstruktion gestützt wird. Die berücksichtigten Lasten sind das Eigengewicht der Verbundplatte und eine horizontale Linienlast $q_k = 1,0$ kN/m, die in der Mitte der Wand aufgebracht wird, wie im Eurocode (2021) für die Kategorien B2 und B3 (Büro, Arbeitsraum, ausgenommen die unter B1 genannten) angegeben (Abbildung 36).

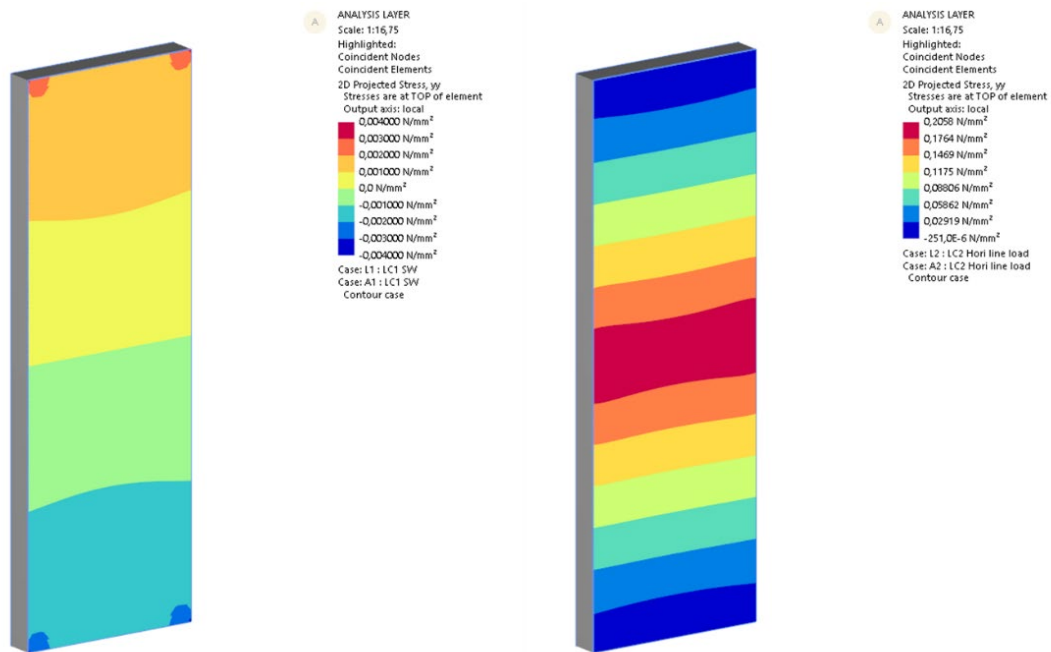


Quelle: ARUP

Abbildung 36

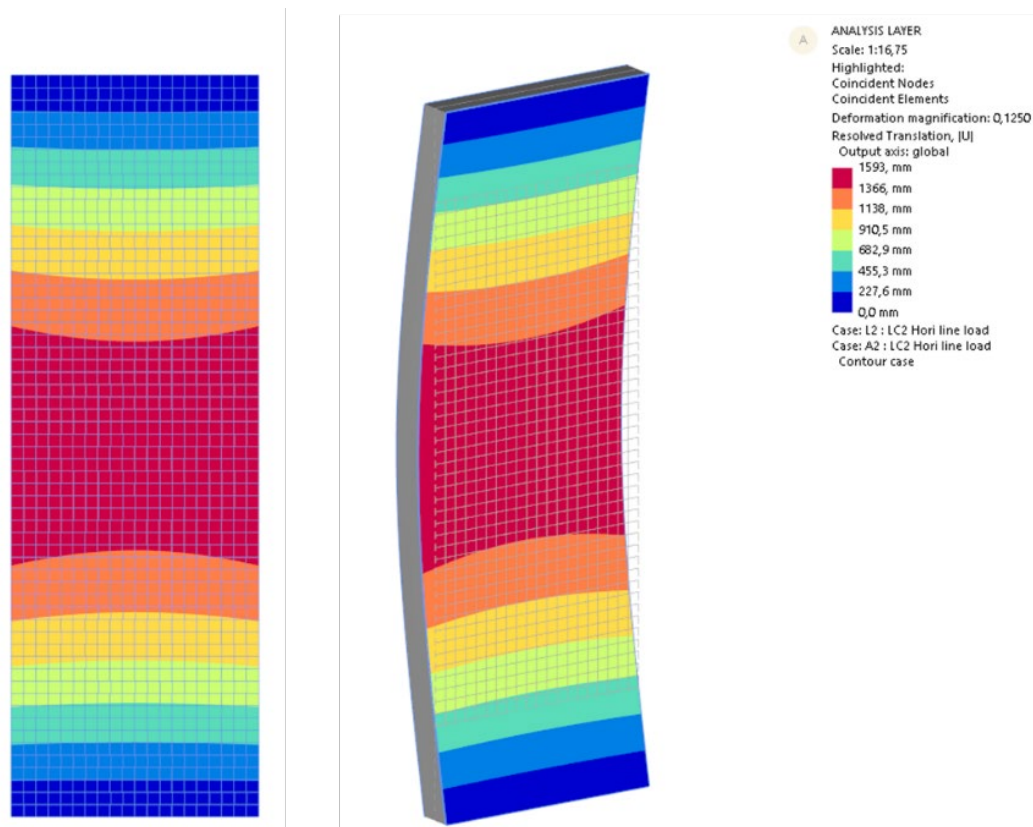
Geometrischer und materieller Aufbau für Anwendungsfall 1.

Wie aus den Simulationsergebnissen ersichtlich ist, beträgt die durch das Eigengewicht verursachte axiale Druckspannung in der Wand nur 0,004 MPa (Abbildung 37, links), was gering ist und daher für die Bemessung weniger maßgeblich ist. Der Maximalwert der Biegespannung, die durch die horizontale Last verursacht wird, beträgt 0,21 MPa (Abbildung 37, rechts). Dieser Wert liegt bereits über dem Materialgrenzwert aus dem kleinmaßstäblichen Versuch (0,16-0,19 MPa, ohne Anwendung eines Bemessungsfaktors). Darüber hinaus wird aufgrund der großen Spannweite und des geringen Elastizitätsmoduls des Materials eine sehr große horizontale Durchbiegung beobachtet (Abbildung 38). In Anbetracht der Festigkeits- und Steifigkeitsanforderungen für eine Trennwand wäre es schwierig, das Paneel als freistehendes System ohne zusätzliche Verstärkung zu verwenden.



Quelle: ARUP

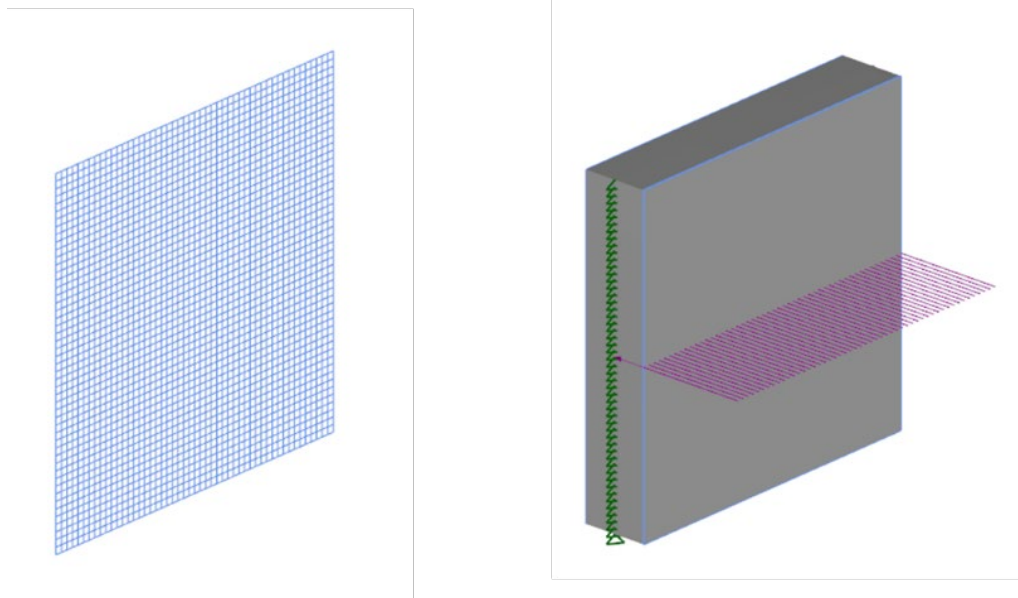
Abbildung 37
Simulationsergebnisse von Anwendungsfall 1: Axiale Druckspannung (links) und Biegespannung (rechts) in MPa.



Quelle: ARUP

Abbildung 38
Simulationsergebnisse für Fall 1: Horizontale Durchbiegung in mm.

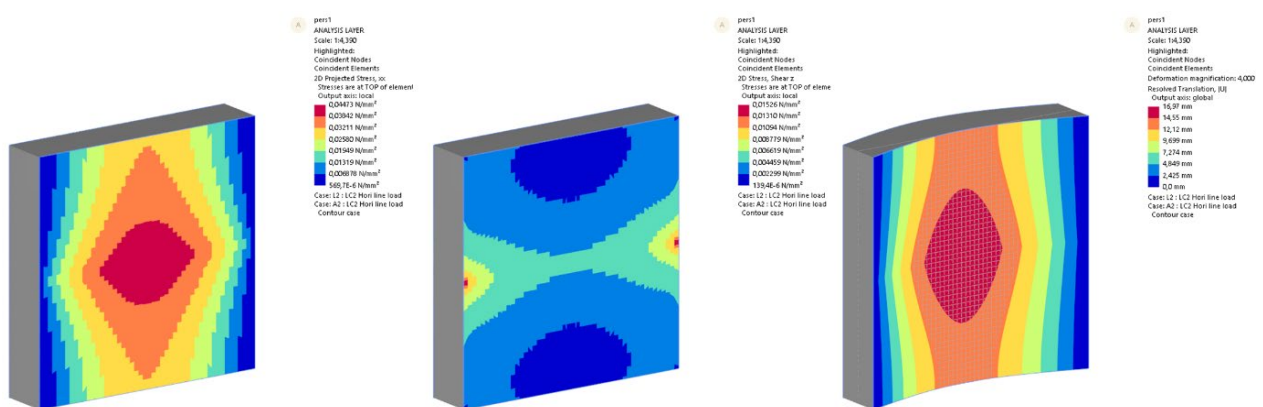
Eine mögliche Verbesserung der Last- und Biegeverhalten durch geometrische Anpassungen wurde in Simulationsfall 2 untersucht. Simulationsfall 2 geht von einem kleineren Wandpaneel mit den Abmessungen 0,5 m x 0,5 m x 0,1 m aus, das links und rechts vom Paneel durch einen Rahmen gestützt wird. Die berücksichtigten Lasten sind ähnlich wie in Fall 1 mit dem Eigengewicht und einer horizontalen Linienlast in der Mitte der Platte (Abbildung 39)



Quelle: ARUP

Abbildung 39
Modellaufbau und Lagerungsbedingungen für den Anwendungsfall 2.

Die Simulation zeigt eine maximal auftretende Biegespannung von 0,45 MPa und eine maximale Schubspannung von 0,15 MPa. Die horizontale Durchbiegung beträgt 17mm (Abbildung 40). Den Ergebnissen ist zu entnehmen, dass eine Anpassung der Lagerung und der Form eines Bauteils zu einer Verbesserung der Last- und Biegeverhalten führen kann. Die Ergebnisse der beiden Simulationen sind hier nicht als direkter Vergleich konzipiert, sondern dienen als Entscheidungsgrundlage für spätere Arbeitspakete, indem eine geometrische Optimierung individueller Proben in Erwägung gezogen werden kann.



Quelle: ARUP

Abbildung 40
Simulationsergebnisse von Anwendungsfall 2: Biegespannung (links), Scherspannung (Mitte) und horizontale Durchbiegung (rechts).

AP 4 BAUTEILDESIGN UND CHARAKTERISIERUNG

AP 4.1.1 Pop-Up Campus Trennwand Demonstratoren

POP-UP HOME, durchgeführt vom EDEK-Team, stellte auf dem Pop-up Campus in Aachen die ersten großflächigen Trennwand-Demonstratoren auf der Grundlage der bisherigen Projektergebnisse aus. Es wurden drei Prototypen entwickelt und produziert: eine furnierverstärkte flache Trennwand, eine furnierverstärkte gebogene Trennwand und eine Trennwand aus topologisch verzahnten Einzelmodulen (Abbildung 41).



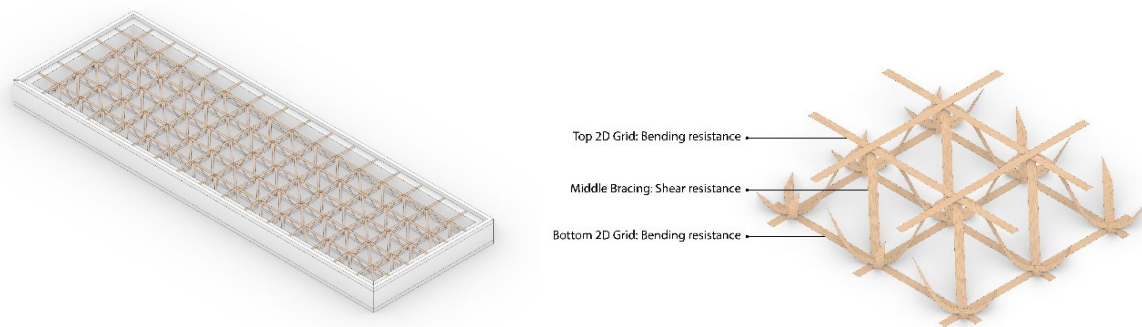
Quelle: FG Experimentelles und Digitales Entwerfen, Universität Kassel

Abbildung 41

POP-UP HOME ausgestellt in Aachen: Furnierverstärkte flache Trennwand (links), furnierverstärkte gebogene Trennwand (mitte), topologisch verzahnte Trennwand (rechts).

Furnierbewehrte flache Trennwand

Der Produktionsprozess beginnt mit der Montage des äußeren Holzrahmens. Anschließend kann das Furniergitter angebracht werden, indem zunächst das Material in horizontaler und vertikaler Richtung auf einer der Außenschichten aufgespannt wird, gefolgt von den mittleren, wellenförmigen Versteifungsfurnieren, die das untere und obere 2D-Gitter verbinden, und schließlich dem Anbringen der zweiten Außenschicht. Alle Verbindungen werden mit einer handgeführten Ultraschallschweißsonde geschweißt (Abbildung 42).



Quelle: EDEK

Abbildung 42
3D-Gitterbewehrung der flachen Trennwand (links), 3D-Gitterkonstruktion und die Funktion der verschiedenen Schichten (rechts).

Nach der Herstellung des Gitters wird die Platte auf eine ebene Fläche gelegt und mit Hanfschäben gefüllt, die mit Myzel geimpft sind. Die Platte wird dann mit einer Plastikfolie versiegelt und für 5 Tage in eine Inkubationskammer mit einer durchschnittlichen relativen Luftfeuchtigkeit von 95% gelegt. Nach dieser ersten Wachstumsphase werden die Kunststoffabdeckungen entfernt, und die Platte bleibt weitere 3 Tage in der Inkubationskammer, bis sie eine glatte weiße Oberfläche aufweist. Schließlich wird sie aus der Kammer entfernt und getrocknet. Aufgrund fehlender Ausstattung wurde diese Wand an der Luft getrocknet, aber der Prozess könnte mit einem Ofen beschleunigt werden. Der endgültige Prototyp demonstrierte die strukturelle Fähigkeit des Systems, sich in einer Höhe vom Boden bis zur Decke selbst zu tragen, und bewies die positive Auswirkung der Furnierverstärkung auf die Stabilität der Myzelplatte. Die beiden Außenflächen weisen unterschiedliche Oberflächen auf: eine glatte und eine mit unterschiedlicher Textur (Abbildung 43). Diese Oberflächen können je nach den gewünschten ästhetischen Ansprüchen oder Leistungskriterien angepasst werden, indem entweder die Geometrie der Formoberflächen oder die Wachstumsparameter geändert werden.



Abbildung 43

Nahaufnahme der Oberflächenqualität der flachen Trennwand (links), flache Trennwand mit einer Person als Maßstab (rechts).

Quelle: FG Experimentelles und Digitales Entwerfen, Universität Kassel, Nicolas Wefers

Die Wand befindet sich zwar noch in der Prototypphase, zeigt aber das Potenzial des vorgeschlagenen Verbundwerkstoffs, das Myzelmaterial nicht nur für Beschichtungen oder dekorative Zwecke zu verwenden, sondern auch funktionale Komponenten herzustellen, die als Trennwände in Innenräumen verwendet werden können.

Furnierverstärkte gebogene Trennwand

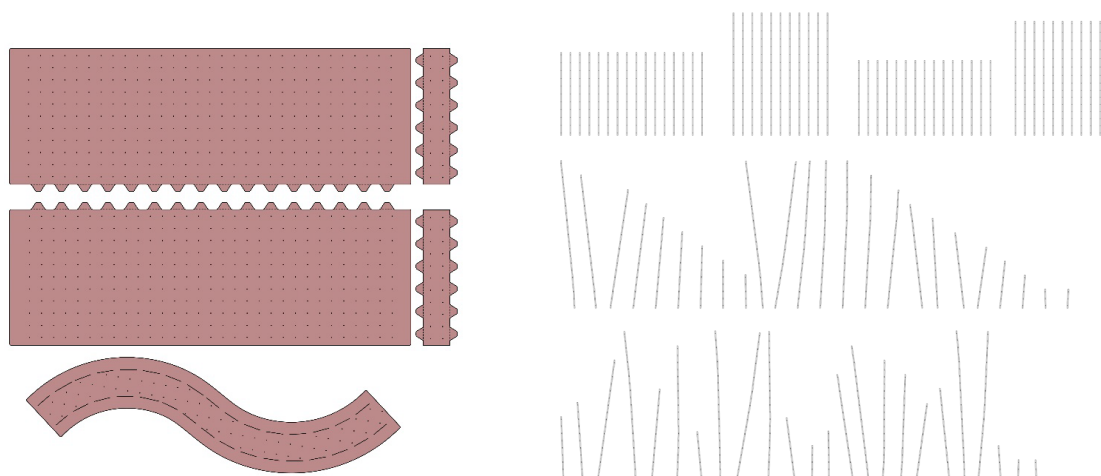
Um das Potenzial des vorgeschlagenen Holz-Myzel-Verbundstoffs weiter zu erforschen, wurde ein Prototyp einer gebogenen Wand hergestellt (Abbildung 44). Ziel war es, die Methoden zur Erzeugung von Krümmungen mit diesem neuen Verbundwerkstoff zu erforschen, die mehr Flexibilität bei der Gestaltung von Trennwänden in Innenräumen bieten würden.



Quelle: FG Experimentelles und Digitales Entwerfen, Universität Kassel, Nicolas Wefers

Abbildung 44
Der physische Prototyp der gebogenen Wand.

Um ein gebogenes Paneel herzustellen, muss die Geometrie der Innenverstärkung sowie der Form genau auf die Zielform abgestimmt werden. Für die Furnierbewehrung wird dies erreicht, indem das Layout ausgehend von der Zielfläche der Wand parametrisch generiert wird. Sobald das dreidimensionale Layout erstellt ist, werden die Abmessungen und Verbindungspunkte für jeden der Streifen extrahiert (Abbildung 45 rechts) und auf den Furnieren markiert. Anhand dieser Markierungen kann das Raster dann manuell zusammengesetzt werden. Alle Verbindungen werden mit einer Ultraschallschweißsonotrode verschweißt, so dass die endgültige Holzbewehrung ohne Klebstoff fixiert wird.



Quelle: FG Experimentelles und Digitales Entwerfen, Universität Kassel

Abbildung 45
Aus PETG (mit Glykol modifiziertes PET)-Platten herzustellende Formelemente (links), abgerollte Furnierstreifen von der Zielfläche zur Erzeugung von Furnierschablonen (rechts).

Der zweite Schritt ist die Herstellung der Form. Diese wird aus 1 mm dicken PETG-Platten hergestellt, die auf den geometrisch abgewinkelten Oberflächen der Zielgeometrie basieren (Abbildung 45 links)

Die verschiedenen Seiten der Formfläche werden mit Steckverbindungen zusammengefügt. Anschließend wird die Furnierverstärkung in die Form eingelegt und die Form mit den beimpften Hanfschäben gefüllt. Bei dem hier vorgestellten Prototyp ist die Form für die untere Hälfte der Platte vorgesehen, damit das Furnierraster sichtbar wird.

Die gefüllte Form wird in die Inkubationskammer gestellt und 5 Tage lang bei 95% relativer Luftfeuchtigkeit wachsen gelassen. Danach wird die Platte entformt und 3 weitere Tage wachsen gelassen, um eine weiße und glatte Oberfläche zu erhalten. Derzeit wird weiter geforscht, um die PETG-Form durch eine nachhaltige Alternative zu ersetzen, z. B. durch Hanf-Textilplatten, welche als dauerhafte Form verwendet werden könnten.

Der ausgestellte Prototyp zeigt die Möglichkeiten, die diese Methode bietet, um komplexe und präzise dreidimensionale Formen mit Holz-Myzel-Verbundwerkstoffen zu realisieren. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt ist die Platte einfach gekrümmt, es wird weiter geforscht, um Verfahren zur Herstellung doppelt gekrümmter Platten mit ähnlichen Methoden zu entwickeln.



Quelle: FG Experimentelles und Digitales Entwerfen, Universität Kassel

Abbildung 46
Nahaufnahme der Schnittstelle zwischen Myzel und Bewehrung.

Topologically Interlocking Partition Wall

Topological interlocking assemblies (TIA) sind eine Klasse von Struktursystemen, die auf kinematisch ineinander greifenden Elementen basieren, die zu Strukturen zusammengesetzt werden können, die Lasten in mehreren Richtungen tragen, ohne dass sie verbunden werden müssen. Die ausgestellten Module sind Teil des ersten Forschungsergebnisses, nämlich einer Wand, die aus ineinandergreifenden Myzelementen besteht. Das System basiert auf dem Konzept der topologischen Verzahnung und ist vollständig reversibel, da es ohne die Verwendung von Klebstoff oder Mörtel zusammengesetzt werden kann. Bei festen Grenzen sind die Elemente kinematisch aneinander gebunden und können reversibel demontiert werden, indem die Fixierung der Grenzen aufgehoben wird (Abbildung 47).

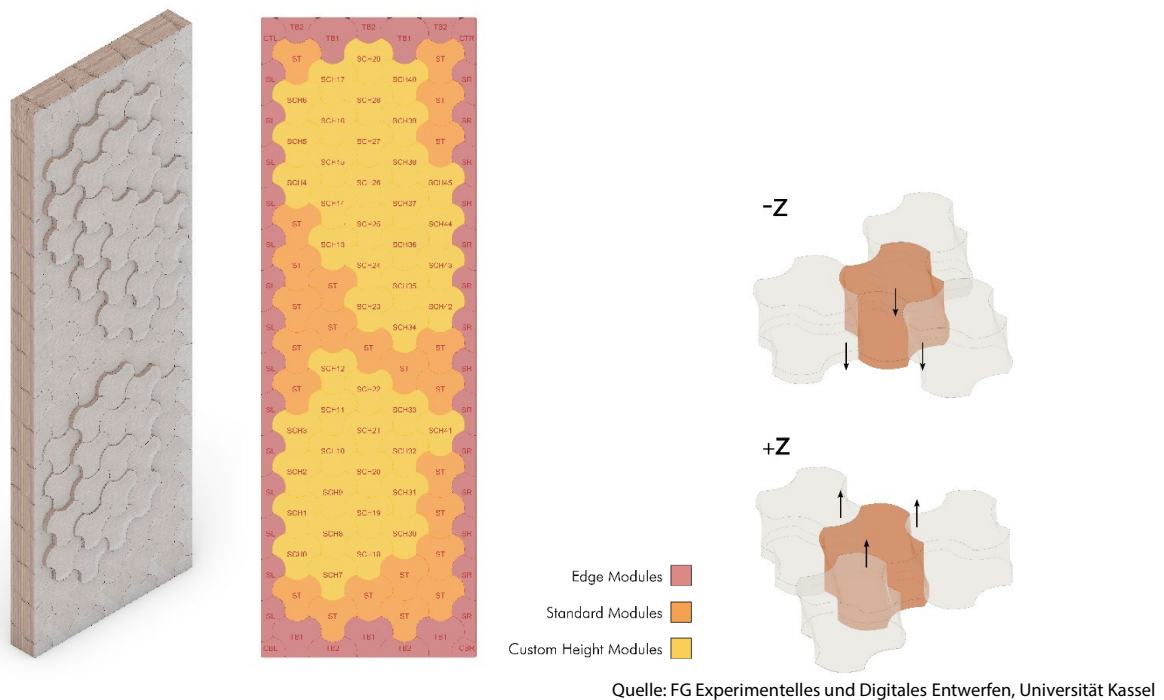


Abbildung 47

Digitales Modell der Trennwand aus topologisch verzahnten Einzelmodulen (links), Bauteilklassifizierung und -beschriftung (Mitte), topologisches Verzahnungsprinzip (rechts).

Um strukturelle Integrität zu erreichen, müssen die ineinandergreifenden Blöcke eine ausreichende Genauigkeit auf den ineinandergreifenden Flächen aufweisen. Aus diesem Grund wurde eine Außenschale aus einem mit Holzpartikeln infundierten PLA-Biokunststoff 3D-gedruckt, die als verlorene Schalung für die Module dient. Das Vorhandensein von Holzpartikeln im gedruckten Material stellte sicher, dass sich das Myzel von der gedruckten Schale ernährte und eine Verbindung zwischen dem Druckfilament und der Innenfüllung herstellte. Die Schalen wurden im Laufe einer Woche mit 5 kostengünstigen Prusa FDM 3D-Druckern hergestellt, wobei insgesamt etwa 7,5 kg Filament verbraucht wurden.

Das endgültige Design besteht aus 112 ineinandergreifenden Blöcken, von denen 46 mit unterschiedlichen Höhen angepasst wurden, um die Flexibilität des Systems zu demonstrieren. Die Blöcke können in einer Vielzahl von Konfigurationen zusammengesetzt werden, da die Geometrie der ineinandergreifenden Flächen für alle Elemente konstant bleibt. Im vorliegenden Fall werden die Komponenten zu einer 240x80 cm großen Wand zusammengesetzt, die von einem externen Rahmen zusammengehalten wird, der nicht mit den Blöcken verbunden ist, sondern sie nur durch Druck zusammenhält. Um einen ausreichenden Druck zu erzielen, wurden die Elemente zunächst in der gewünschten Konfiguration zusammengebaut, dann wurden die Seiten des Rahmens mit einem Spanngurt zusammengedrückt und mit Schrauben befestigt. Auf diese Weise ist ein vollständig reversibler Montageprozess gewährleistet.

Wie bei dem vorgestellten Prototyp zu erkennen ist, besteht die größte Herausforderung in der derzeitigen Phase in der Schrumpfung des Myzels nach dem Wachstum, die zu Verformungen und zur Trennung zwischen der inneren Füllung des Blocks und der äußeren Schale führt. In Zukunft könnte dieses Problem durch die Verwendung anderer Myzelsubstrate angegangen werden, die während des Wachstums weniger Feuchtigkeit speichern und daher zu vernachlässigbaren Verformungen und Schrumpfungen führen (Abbildung 48).



Quelle: FG Experimentelles und Digitales Entwerfen, Universität Kassel

Abbildung 48

Detailaufnahme der Schnittstellen zwischen den Modulen. In den Zwischenräumen der Blöcke sind die jungen Fruchtkörper des Pilzes zu erkennen, die zur Demonstration der Echtheit des Materials gewollt wachsen gelassen wurden.

Das Ziel des vorgestellten Prototyps war es, das Potenzial der Herstellung von verlorenen Formen mit 3D-Druckern zu demonstrieren. Für weitere Anwendungen wäre es denkbar, die Komponenten zu vergrößern, indem größere Drucker (oder ein Roboterarm) für die Herstellung der Schalen verwendet und Furnierverstärkungen in die Blöcke eingebracht werden, wie bei den anderen Prototypen.

Nachnutzungskonzepte im Rahmen des Pop-Up Campus

Gemäß den Strategien des Kreislaufdesigns, (wie oben unter *AP 1.1 Definition eines Lasten- und Pflichtenheftes, Bewertung der Nachhaltigkeitseffekte* beschrieben) die dazu beitragen können eine kohlenstoffnegative Leistung unseres Holz-Myzel-Verbundmaterials zu erreichen, haben wir erste Konzepte entwickelt, die darauf abzielen, die Abfallerzeugung in der End-of-Life-Phase zu reduzieren und den Lebenszyklus zu maximieren. Die modularen Elemente der *Topologically Interlocking Partition Wall* können z.B. für Büroräume weiterverwendet werden; weiterhin können die Elemente zerkleinert und neuen Biofabrikationsprozessen zugeführt oder das Material kann durch Kompostierung in den biologischen Kreislauf zurückgeführt werden. Diese **Nachnutzungskonzepte** lassen sich so anhand der verschiedenen Varianten REUSE, RESHAPE, BIOCYCLE wie folgt beschreiben:

Die Variante Reshape beschreiben wir am Beispiel von Systemen basierend auf ineinandergreifenden Myzelementen, die entsprechend dem Konzept der Topologically Interlocking assemblies (TIA) gestaltet sind. Systeme, die diesem Konzept entsprechen, werden ohne die Verwendung von Klebstoff oder Mörtel zusammengesetzt, sodass ein vollständig reversibler Montageprozess gewährleistet ist. Dementsprechend können die Module flexibel zu neuen Systemen zusammengesetzt werden, wie z.B. zu Akustikseglern, Tischbeinen oder Sichtschutzelementen in Büroräumen (Abbildung 49).

Reshape



Quelle: FG Experimentelles und Digitales Entwerfen, Universität Kassel

Abbildung 49
Verschiedene Büroelemente, die durch den reversiblen Montageprozess von ineinandergreifenden Myzelementen möglich sind.

Biocycle

Die Variante **Biocycle** beschreibt die Möglichkeit, das Material nach der Nutzung durch Kompostierung in den biologischen Kreislauf zurückzuführen. In den biologischen Kreislauf oder auch Biosphäre, gelangen im Optimalfall alle Verbrauchsmaterialien. Diese werden nach ihrer Nutzung biologisch abgebaut, wodurch neue Nährstoffe in Form von Biomasse entstehen. Laut der Definition des Deutschen Institut für Normung (DIN) gilt ein Material als biologisch abbaubar, wenn eine „Zerlegung einer chemischen Verbindung oder eines organischen Materials durch Mikroorganismen in Gegenwart von Sauerstoff in Kohlendioxid, Wasser und Salze anderer vorhandener Elemente (Mineralisation) unter Bildung neuer Biomasse oder in Abwesenheit von Sauerstoff in Kohlendioxid, Methan, Mineralsalze und neue Biomasse“ stattfindet (DIN EN 13432 (2000) und DIN EN 14995 (2007)). Ob ein Material also biologisch abgebaut werden kann oder nicht, hängt von der chemischen Struktur eines Stoffes ab. Eine Vorgabe für den für den Abbau benötigten Zeitraum gibt es nicht. In der Definition gibt es einen Unterschied zwischen biologisch abbaubaren Materialien und kompostierbaren Materialien. Grundsätzlich gilt: alle kompostierbaren Materialien sind auch biologisch abbaubar, aber nicht alle biologisch abbaubaren Materialien sind kompostierbar. Um als industriell kompostierbar zu gelten, muss sich das Material nach einer fest geschriebenen Zeit von 6 Monaten unter definierten Temperatur-, Sauerstoff- und Feuchtebedingungen in Anwesenheit von Mikroorganismen zu mehr als 90% zu Wasser, Kohlendioxid (CO₂) und Biomasse abgebaut haben. Die industrielle Kompostierung führt zu einem beschleunigten biologischen Abbau unter künstlich hergestellten und konstanten Bedingungen und stellt so einen künstlichen Prozess dar, der normalerweise nicht in der Natur vorkommt. Damit ein Material als *im Garten kompostierbar* gilt, muss nachgewiesen werden, dass es sich nach einem Jahr bei 30°C zersetzt hat. Materialien auf Myzelbasis werden gängigerweise für ihre biologische Abbaubarkeit (BA) gepriesen. Standardprotokolle, die dies nachweisen, gibt es jedoch (noch) nicht. Stattdessen wurden erste explorative Methoden entwickelt, um die BA nachzuweisen. Eine Methodik basierend auf einem Bodenvergrabungstest bewies die grundsätzliche BA von Myzelmaterialien aus *Ganoderma resinaceum* und Hanffasern. Es wurde festgestellt, dass die Zersetzungsgeschwindigkeit des Materials im Boden von der Materialzusammensetzung, dem Herstellungsverfahren und den Bedingungen des Abbaus zusammenhängen (Van Wylick et al., 2022). Um grundsätzliche Angaben zur BA des Holz-Myzel-Verbundmaterials unseres Projekts zu machen, werden in der folgenden Tabelle (Tabelle 2) die verwendeten Grundmaterialien, entsprechend der Angaben der Produzenten, in BA = biologisch abbaubar, K = im Garten kompostierbar und IK = industriell kompostierbar eingeteilt:

Tabelle 2

Grundmaterialien der entwickelten Komponenten, eingeteilt nach biologischer Abbaubarkeit

GRUNDMATERIAL	ZUSAMMENSETZUNG	BIOLOGISCHE ABBAUBARKEIT
Substrat	Myzel (Ganoderma l.)	K
	Hanfschäben	K
Holzfurnier	Ahorn (Acer Pseudoplatanus)	K
	Polyester-Cellulose Vlies	IK BA
	Polyvinyl-Acetat-Leim (PVAc) [5]	IK BA
PLA-Holzfilament	Holzteilchen (gemahlen)	K
	Polylactid (PLA)	IK BA

BA = BIOLOGISCH ABBAUBAR:

Grundsätzliche Verrottung von Stoffen durch biologische Mechanismen – Zeit unerheblich.

IK = INDUSTRIELLE KOMPOSTIERUNG:

Stoffe werden durch Mikroben tatsächlich zu Kompost zersetzt – Zeit erheblich.

K = KOMPOSTIERUNG IM GARTEN:

Die Materialien müssen sich nach einem Jahr bei 30°C zersetzt haben.

Quelle: FG Experimentelles und Digitales Entwerfen, Universität Kassel

Reuse

Die Variante Reuse beschreibt die Möglichkeit Holz-Myzel-Elemente zu zerkleinern und neuen Biofabrikationsprozessen zuzuführen, um daraus neue Elemente herzustellen. Für die Überprüfung dieser Variante wurde eine explorative Methodik entwickelt: In einer Versuchsreihe wurde das Ausgangsmaterial (ein TIA-Element) inklusive der 3D gedruckten PLA-Schalung geschreddert (Abbildung 50) und zu verschiedenen Anteilen einem erneuten Biofabrikationsprozess hinzugeführt. Das geschredderte Material wurde unsterilisiert nach der ersten Wachstumsphase, zum Zeitpunkt der Umfüllung in eine Form hinzugefügt und durchlief eine weitere Wachstumsphase von ca. 7 Tagen.



Quelle: FG Experimentelles und Digitales Entwerfen, Universität Kassel

Abbildung 50

Von links nach rechts: (1) ein TIA-Element wird zunächst mit der Säge zerkleinert und anschließend geschreddert (2). Es entsteht ein faseriges Material mit einer Partikelgröße von ca. 0,5mm-2mm (3)

Nach der Wachstumsphase wurden die Proben aus der Form entnommen und getrocknet. Anschließend wurde eine auf subjektiver Wahrnehmung basierende Bewertung des Wachstums vorgenommen (Tabelle 3). Bewertet wurde nach Optik, Kontaminationsrate mit Schimmelpilzen o.Ä. und haptischer Festigkeit des Materials. Bei einem Anteil von 10-20% geschreddertem Ausgangsmaterial wurde ein sehr gutes bis gutes Myzelwachstum festgestellt. Damit wurde konzeptionell nachgewiesen, dass das in unserem Projekt entstandene Holz-Myzel-Verbundmaterial nach seiner Nutzung durch die beschriebene Variante wiederverwendet werden kann. Die mechanische Festigkeit des durch diese Variante entstehenden Materials könnte in fortführenden Tests geprüft werden.

Tabelle 3

Myzelmaterialien mit verschiedenen Anteilen an zugefügtem, geschreddertem TIA-Material. Vergleich Anteil geschreddertes Material, Frisches Substrat, Wachstumsbewertung und Kontamination durch Schimmel oder anderer Mikroorganismen.



	Anteil geschreddertes Material in g	Anteil geschreddertes Material in %	Anteil frisches Substrat in g	Anteil frisches Substrat in %	Bewertung des Wachstums	Kontamination
I	26,44g	10	238g	90	++(+)	sehr leicht an den Rändern der Oberseite
II	52,88g	20	211,52g	80	++(+)	(sehr) leicht auf der Oberseite
III	79,32g	30	185,08g	70	+	Oberseite
IV	105,76g	40	158,64g	60	0	stärker kontaminiert
V	132,2g	50	132,2g	50	X	stärker kontaminiert

Ein Element entspricht 264,4g frischem Substrat.

BEWERTUNGSSYSTEM:

Sehr gut: +++

Gut: ++

Weniger gut: +

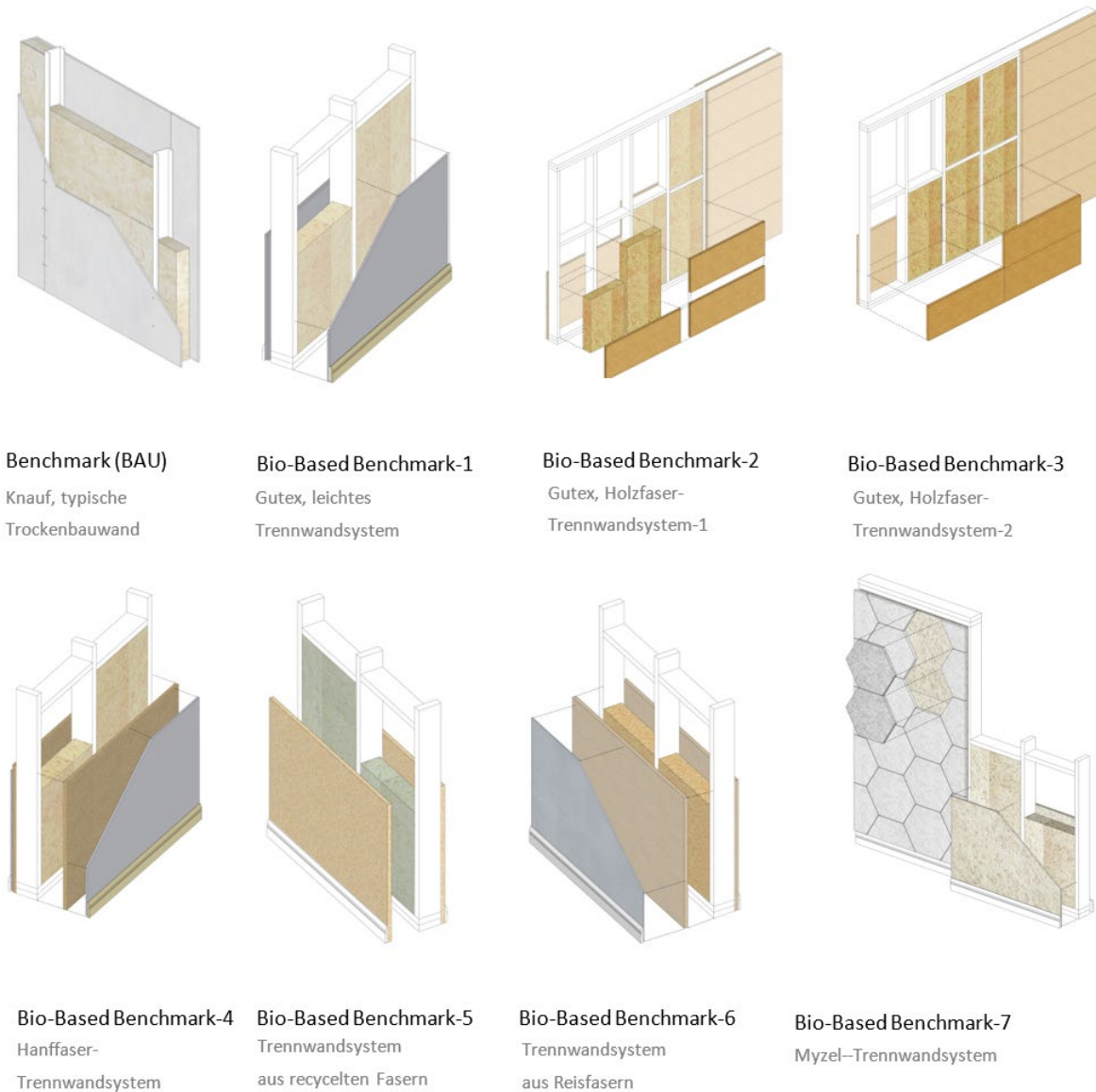
Erfüllt nicht die Anforderungen: 0

Nicht bewertbar aufgrund von Kontamination: X

Quelle: FG Experimentelles und Digitales Entwerfen, Universität Kassel

AP 4.1.1 Analyse bestehender Trennwandlösungen

Zu Beginn der Konzeptionierung der Trennwand, wurden bestehende bio-basierte Konstruktionssysteme mit am Markt etablierten, herkömmlichen Lösungen verglichen (Abbildung 51). Die detaillierten Beschreibungen befinden sich im Anhang 1. Die Systemlösung 7 mit Myzelium-Absorbern an den Außenseiten und einem verdichteten Myzeliumpanel als Kern innerhalb einer Holzrahmenkonstruktion diene als Benchmark für die weitere Entwicklung.



Quelle: Arup/KU Leuven

Abbildung 51
Übersicht von Trennwandsystemen zum Vergleich herkömmlicher Lösungen (BAU). Mit am Markt erhältlichen bio-basierten Lösungen (Benchmark 1-6) und konzeptioneller Lösung mit Myzeliumbauteilen (Benchmark 7).

AP 4.1.2 Bauteildesign für einen konkreten Anwendungsfall (ARUP, UK, KIT)

Strukturelle Entwicklung des Prototyps

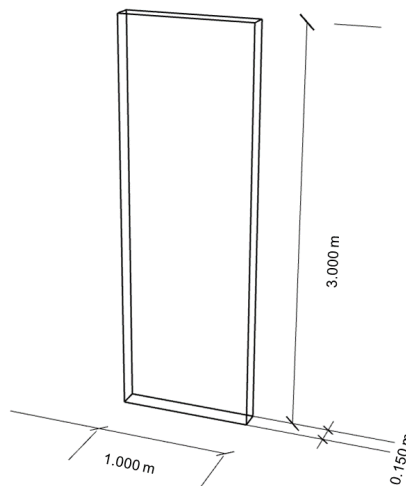
Parameter-Studien

Es wurde eine Reihe von Parameterstudien mittels Finite-Elemente-Strukturanalyse (FEA) unter Verwendung der Industriestandard Software für strukturelle Modellierung, Analyse und Design „GSA 10.1“ von Oasys durchgeführt, um das strukturelle Verhalten der Myzelwand unter Berücksichtigung einiger wichtiger Konstruktionsparameter, einschließlich der Materialeigenschaften, der Stütz- und Randbedingungen und der Plattendicke, zu verstehen. Diese Studien erleichtern den Entscheidungsprozess für den endgültigen Prototyp und tragen dazu bei, die geeigneten Konstruktionsparameter aus den mechanischen Eigenschaften des Verbundstoffs, den geometrischen Abmessungen und der Gestaltung der Randstützen auszuwählen, um die Konstruktionsanforderungen zu erfüllen.

Die Studie umfasst die folgenden Fälle:

- Fall 1: Materialeigenschaften: Ziel ist es, herauszufinden, inwieweit der Verbundwerkstoff durch die Verwendung des 2D- und 3D-Furniergitters im Hinblick auf das globale Verhalten verbessert werden kann.
- Fall 2 Randstützen und Randbedingungen: Eine steifere Halterung kann zusätzliche strukturelle Vorteile bieten, z.B. um die Durchbiegung außerhalb der Ebene zu reduzieren. Ein starrer Anschluss würde jedoch in der Regel auch komplizierte Details an den Anschlüssen bedeuten. Ziel ist es, eine Reihe von verschiedenen Auflagerbedingungen und deren Auswirkungen auf das Gesamtverhalten zu untersuchen und zu bewerten.
- Fall 3 Plattendicke: Es sollte eine geeignete Dicke bestimmt werden, die eine ausreichende Festigkeit und Steifigkeit gewährleistet. Mit zunehmender Dicke gewinnt die Struktur an Gesamtkapazität und Steifigkeit, während sie gleichzeitig zusätzlichen Innenraum benötigt und der Materialverbrauch erhöht wird.

Die globalen Abmessungen der in den Parameterstudien verwendeten Geometrie sind in der nachstehenden Abbildung 52 dargestellt.



Quelle: ARUP

Abbildung 52

Globale Dimensionierung der in den Parameterstudien verwendeten Geometrie. Hinweis: Für Fall 3 ist die Wandstärke die Entwurfsvariable und variiert zwischen 0,080 m und 0,150 m.

Fall 1: Materialeigenschaften

Im Fall 1 wurden zwei variable Sätze von Materialeigenschaften aus den Prüfergebnissen in Kapitel 5.1.2 berücksichtigt: „Großmaßstäblicher Biegeversuch - Block“ und „Großmaßstäblicher Biegeversuch - Block + 3D-Gitter mit geringer Dichte (3 cm)“. Ziel ist es, einen Einblick in die Wirkung des mit 3D-Gitterstruktur verstärkten

Verbunds im Vergleich zu reinem Myzel ohne zusätzliche Verstärkung im Maßstab einer Wandstruktur zu erhalten.

■ Großmaßstäblicher Biegeversuch - reiner Myzel Block:

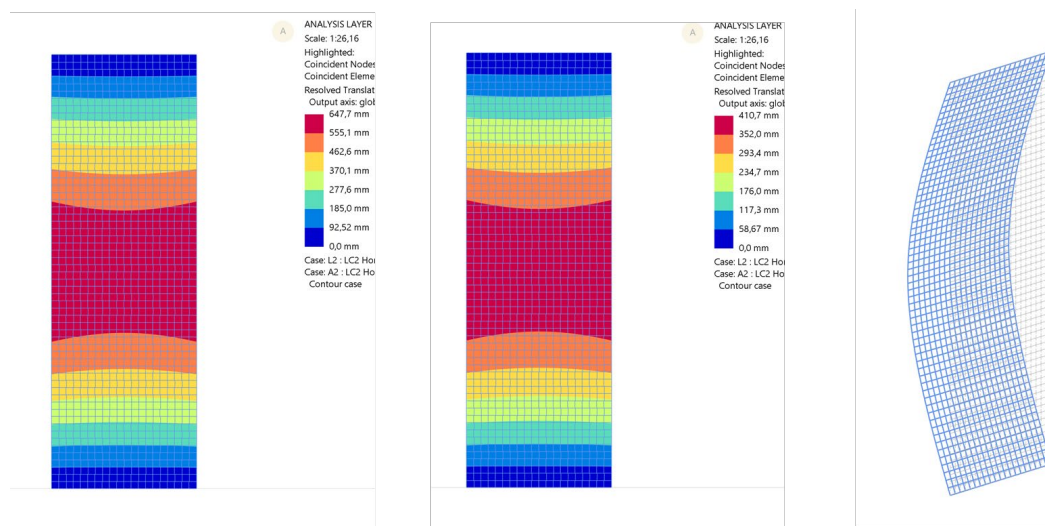
1. Biegefestigkeit = 0,07 MPa. Elastizitätsmodul: 3,20 MPa.

■ Großflächiger Biegeversuch - mit 3D-Furniergitter:

2. Biegefestigkeit = 0,10 MPa. Elastizitätsmodul: 5,04 MPa.

Die in dieser Fallstudie berücksichtigten konstanten Parameter sind: Dichte des Materials: 118 kg/m³, Gesamtabmessungen der Wand: 3m x 1m x 0,15m (Höhe x Breite x Dicke), ohne Randrahmen entlang des Plattenumfangs, Stützen nur oben und unten mit Stiftverbindung.

Wie aus den Simulationsergebnissen ersichtlich ist, beträgt die maximale horizontale Durchbiegung in der Mitte der Wand 647,7 mm für die reine Myzelwand. Im Fall des 3D-Furniergitters sinkt die Durchbiegung auf 410,7 mm, was auf die zusätzliche Steifigkeit durch den Verbundeffekt des Myzel-Furnier-Systems zurückzuführen ist. Die in beiden Fällen beobachtete Durchbiegung, die 1/4,6 und 1/7,3 der gesamten Wandhöhe beträgt, ist jedoch immer noch zu groß für die Durchbiegungsgrenze (siehe Abbildung 53 und Tabelle 4). Daraus lässt sich schließen, dass die strukturelle Verbesserung der Steifigkeit durch das 3D-Furniergitter offensichtlich ist, dass aber andere Entwurfsparameter noch weiter untersucht werden müssen, um die Entwurfsanforderungen zu erfüllen.



Quelle: ARUP

Abbildung 53
Simulationsergebnisse für Fall 1: Horizontale Durchbiegung in mm, links: reines Myzel; Mitte: 3D-verstärkter Verbundwerkstoff; rechts: verformte Form unter horizontaler Belastung.

Tabelle 4
Übersichtstabelle für die Analyseergebnisse von Fall 1

Variablen	Maximale horizontale Durchbiegung in [mm]
Pures Myzel	647.7
Furnier-verstärkter Komposit	410.7

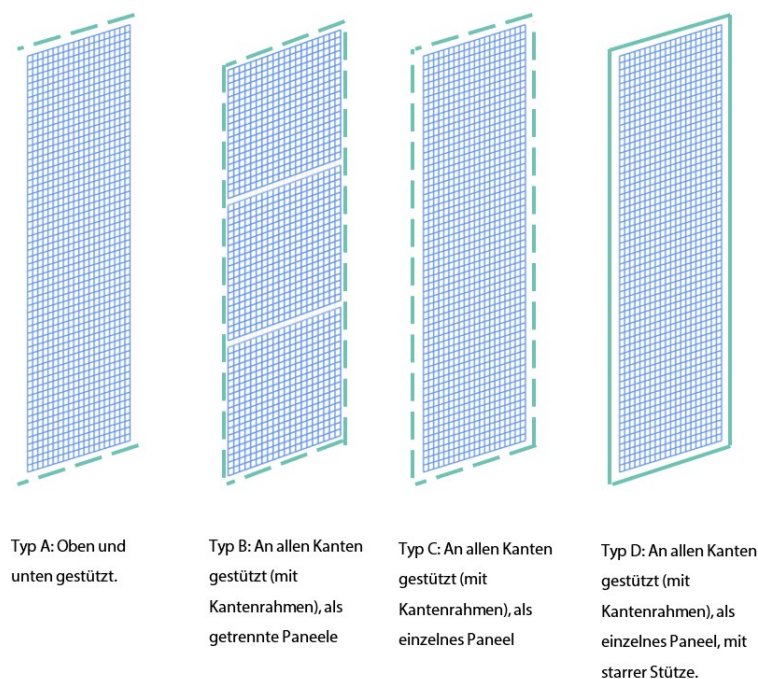
Quelle: ARUP

Fall 2: Randstützen und Randbedingungen

In dieser Parameterstudie wurden die Simulationen durchgeführt, um den Einfluss verschiedener Randstützen der Verbundwand zu untersuchen. Insgesamt wurden vier verschiedene Randbedingungen berücksichtigt, wie in der Abbildung 54 dargestellt, darunter:

- Typ A: Oben und unten gestützt, als ein einziges Paneel, gelenkige Verbindung
- Typ B: An allen Kanten gestützt (mit Kantenrahmen), als getrennte Paneele, gelenkige Verbindung
- Typ C: An allen Kanten gestützt (mit Kantenrahmen), als einzelnes Paneel, gelenkige Verbindung
- Typ D: An allen Kanten gestützt (mit Kantenrahmen), als einzelnes Paneel, mit steifer Verbindung.

Ziel der Studie ist es, die Auswirkungen der Randstützen zu verstehen und die am besten geeignete Randbedingung für die Verbundplatte zu ermitteln.



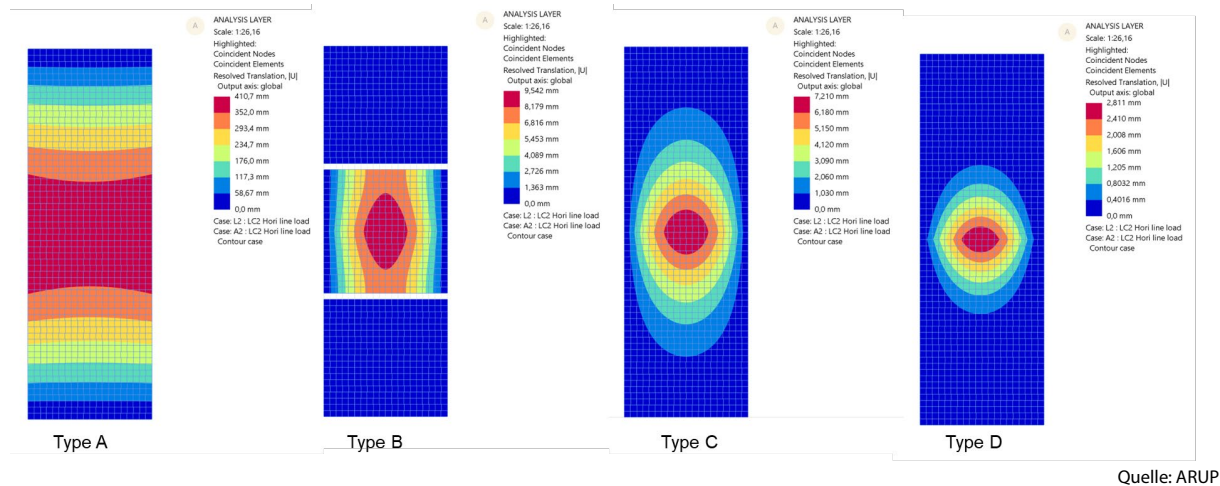
Quelle: ARUP

Abbildung 54
Die verschiedenen in Fall 2 berücksichtigten Randbedingungen.

Zu den konstanten Parametern, die in dieser Fallstudie berücksichtigt wurden, gehören: Gesamtabmessungen der Wand: 3m x 1m x 0,15m (Höhe x Breite x Dicke). Für alle Simulationen (siehe Abbildung 55 und Abbildung 56) werden die gleichen Materialeigenschaften angenommen, die aus dem „Großflächigen Biegeversuch - Block + 3D-Gitter mit geringer Dichte (3 cm)“ gewonnen wurden. Wie aus den Simulationsergebnissen hervorgeht, sinkt die maximale horizontale Durchbiegung in der Mitte der Wand drastisch von 410,7 mm auf 9,5 mm, 7,2 mm und 2,8 mm, wenn die Auflagerbedingungen von nur oben und unten auf alle Kanten geändert werden. Wenn die Platte entlang ihres Umfangs über einen Randrahmen gestützt wird, ändert sich die Hauptspannungsrichtung von der vertikalen in die horizontale Richtung, was zu einer viel geringeren Durchbiegung außerhalb der Ebene führt. Die Platte verformt sich am wenigsten, wenn sie an allen Kanten durch starre Verbindungen gestützt wird. In der Praxis kann die starre oder halbstarre Verbindung durch Verkleben des Furniers mit dem Randrahmen realisiert werden. Gelenkige Verbindungen können in diesem Anwendungsfall kein stabiles Last- und Biegeverhalten gewährleisten, und wurden daher nicht untersucht. In Bezug auf die Festigkeit ist die Biegespannung in der Mitte der Spannweite maßgebend. Bei einer einfachen Abstützung an allen Kanten (gelenkig oder steif) liegt die unbewertete Biegespannung im Bereich von 0,022-

0,032 MPa. Dies entspricht etwa 31%-46% des charakteristischen Wertes der Prüfmuster und bietet ein vielversprechendes Verhalten hinsichtlich der Festigkeitsanforderungen.

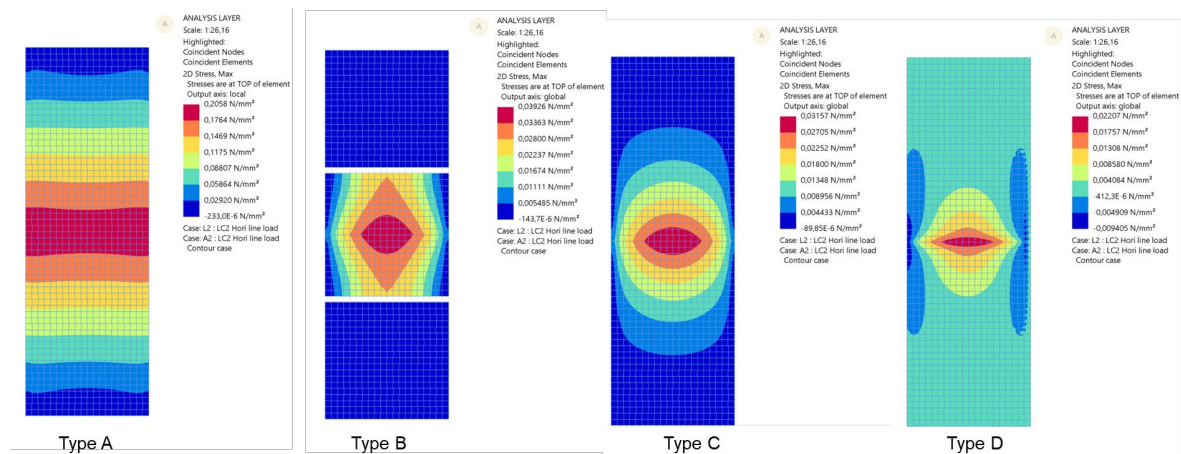
Es ist zu beachten, dass bei getrennten Platten nur die mittlere Platte im Modell belastet wird. Es wird erwartet, dass die obere und die untere Platte ein ähnliches Verhalten wie die mittlere Platte aufweisen und werden daher im Modell ignoriert. Die Analyseergebnisse sind in Tabelle 5 zusammengefasst.



Quelle: ARUP

Abbildung 55

Simulationsergebnisse für Fall 2: Horizontale Durchbiegung in mm, von links nach rechts: Typ A Oben und unten abgestützt (gelenkige Verbindung); Typ B An allen Kanten abgestützt mit getrennten Platten (gebolzte Verbindung); Typ C An allen Kanten abgestützt mit einer einzigen Platte (gebolzte Verbindung); Typ D An allen Kanten abgestützt mit einer Platte (starre Verbindung).



Quelle: ARUP

Abbildung 56

Simulationsergebnisse für Fall 2: Biegespannung in MPa, von links nach rechts: Oben und unten abgestützt (gelenkige Verbindung); an allen Kanten mit getrennten Platten abgestützt (gebolzte Verbindung); an allen Kanten mit einer einzigen Platte abgestützt (gelenkige Verbindung); an allen Kanten mit einer Platte abgestützt (steife Verbindung).

Tabelle 5

Zusammenfassende Analyseergebnisse von Fall 2

Variablen	Maximale horizontale Durchbiegung in [mm]	Maximale Biegespannung in [MPa]
Typ A	410.7	0.206
Typ B	9.5	0.039
Typ C	7.2	0.032
Typ D	2.8	0.022

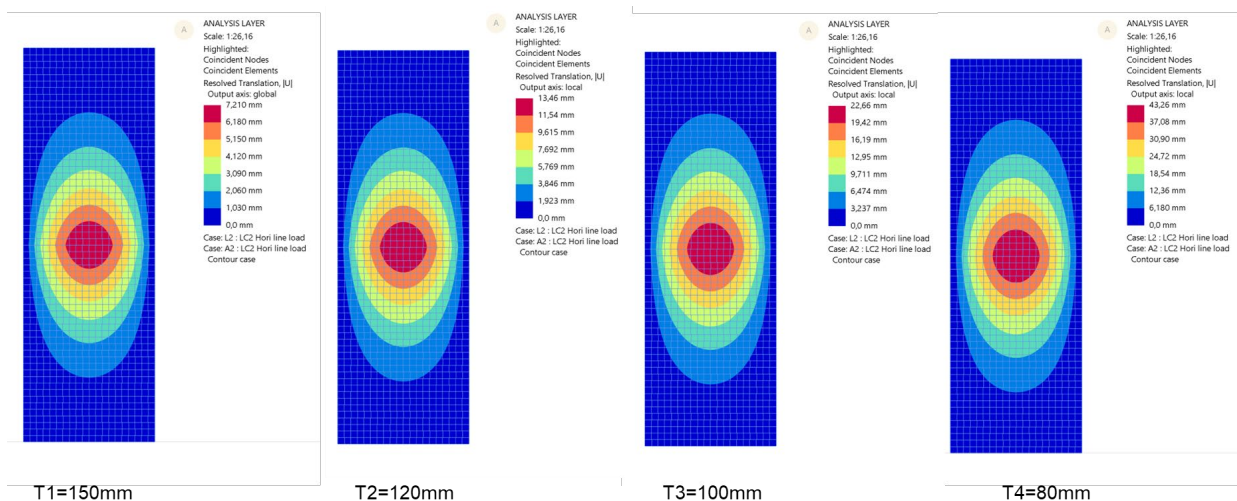
Quelle: ARUP

Fall 3: Plattendicke

Die Plattendicke ist ein weiterer wichtiger Parameter, der das Gesamtverhalten der Struktur beeinflusst. In dieser Studie werden vier verschiedene Dicken betrachtet: 150 mm, 120 mm, 100 mm und 80 mm. Ziel ist es, den richtigen Dickenbereich für die Verbundplatte zu ermitteln, der die Konstruktionsanforderungen erfüllt.

Zu den konstanten Parametern, die in dieser Fallstudie berücksichtigt werden, gehören: Gesamtabmessungen der Wand: 3m x 1m (Höhe x Breite). Für alle Simulationen werden dieselben Materialeigenschaften angenommen, die aus dem „Großversuch Biegeversuch - Block + 3D-Gitter mit geringer Dichte (3 cm)“ gewonnen wurden. Die Randbedingung eines einzigen Paneels, gestützt an allen Kanten (gelenkig), gilt für alle Fälle.

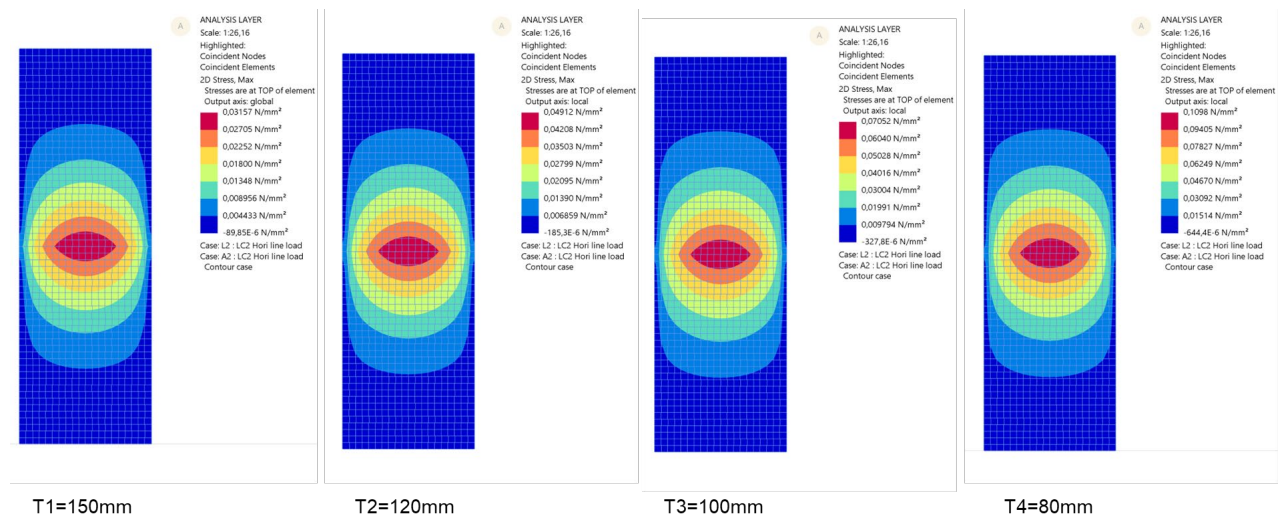
Wenn die Dicken im Bereich von 150mm - 100mm liegen, belaufen sich die resultierenden horizontalen Durchbiegungen auf 7,2mm-22,7mm, was 1/416-1/133 der gesamten Wandhöhe entspricht. Die Biegespannungen liegen in diesen Fällen ebenfalls normgerecht in einem akzeptablen Bereich, wenn man die Materialeigenschaften berücksichtigt (siehe Abbildung 57 und Abbildung 58, als auch Tabelle 6).



Quelle: ARUP

Abbildung 57

Simulationsergebnisse für Fall 3: Horizontale Durchbiegung in mm, von links nach rechts: Dicke = 150 mm; Dicke = 120 mm; Dicke = 100 mm; Dicke = 80 mm.



Quelle: ARUP

Abbildung 58

Simulationsergebnisse für Fall 3: Biegespannung in MPa, von links nach rechts: Dicke = 150mm; Dicke = 120mm; Dicke = 100mm; Dicke = 80mm

Tabelle 6

Zusammenfassende Analyseergebnisse von Fall 3

Variablen	Maximale horizontale Durchbiegung in [mm]	Maximale Biegespannung in [MPa]
T1 = 150mm	7.2	0.032
T2 = 120mm	13.5	0.049
T3 = 100mm	22.7	0.071
T4 = 80mm	43.2	0.110

Quelle: ARUP

Dimensionierung und Konstruktion des finalen Demonstrators

Auf der Grundlage der Ergebnisse der vorangegangenen Parameterstudien und unter Berücksichtigung verschiedener Herstellungszwänge und der Baubarkeit werden die endgültigen Abmessungen des Demonstrators auf 2,4 m x 0,8 m x 0,1 m als Einzelplatte festgelegt (Abbildung 59). Das Furniergitter wird mit verschiedenen Zell-Dichten auf der Grundlage der Spannungsverteilung für die obere und untere Schicht entworfen, die für die Biegefestigkeit in zwei Richtungen optimiert sind, und das 3D-Furniergitter in der mittleren Schicht wird für die Scherfestigkeit optimiert. Im Entwurfsprozess wurde ein rechnergestützter Arbeitsablauf eingerichtet, um das komplexe Design des Furnierlayouts mit den Spannungsverteilungen zu verknüpfen. Dies führt zu einem optimalen, ungleichmäßig verteilten Furnierlayout mit insgesamt weniger Material, um die gleichen Designanforderungen zu erfüllen.

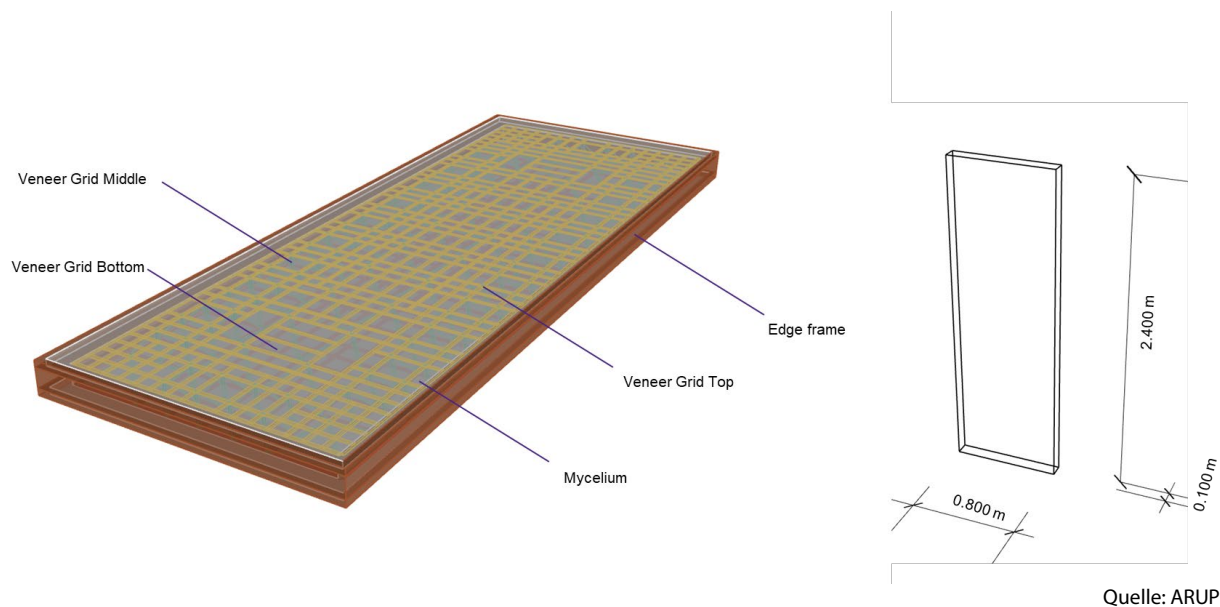


Abbildung 59
Das Design und die globale Dimensionierung des finalen Demonstrators

Der Randrahmen wird entlang des Umfangs der Verbundplatte angebracht, wobei das Furnier direkt mit dem Rahmen verklebt wird. Es wird erwartet, dass dies zu einer halbstarren Verbindung entlang aller Kanten der Platte führt, was zu einer Auflagerbedingung zwischen Typ C und Typ D führt. Im Modell wird konservativ eine gelenkige Verbindung (Typ C) angenommen, um eine gewisse Kapazität zu reservieren.

Für die in der FEA-Simulation verwendeten Eigenschaften der Verbundwerkstoffe wurden die Durchschnittswerte der großmaßstäblichen Biegeprüfung mit 3D-Gitter angenommen (siehe

Tabelle 7).

Tabelle

7

Materialspezifikationen der Verbundplatte

Dichte	118 kg/m ³
Biegefestigkeit	0.11 MPa
Elastizitätsmodul	7.09 MPa

Quelle: ARUP

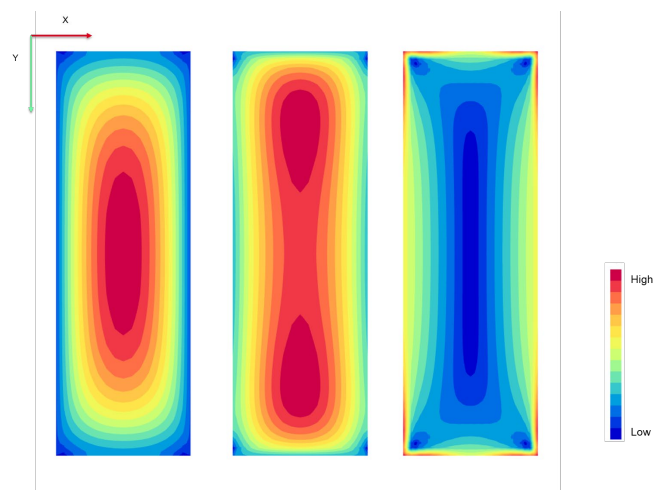
Die Spezifikationen des für den endgültigen Prototyp verwendeten Furniers sind in der nachstehenden Tabelle 8 aufgeführt:

Tabelle 8
Materialspezifikationen für das Furnier

Materialtyp	Ahorn
Dicke	0.5 mm
Breite	12 mm
Zugfestigkeit	61.95 MPa

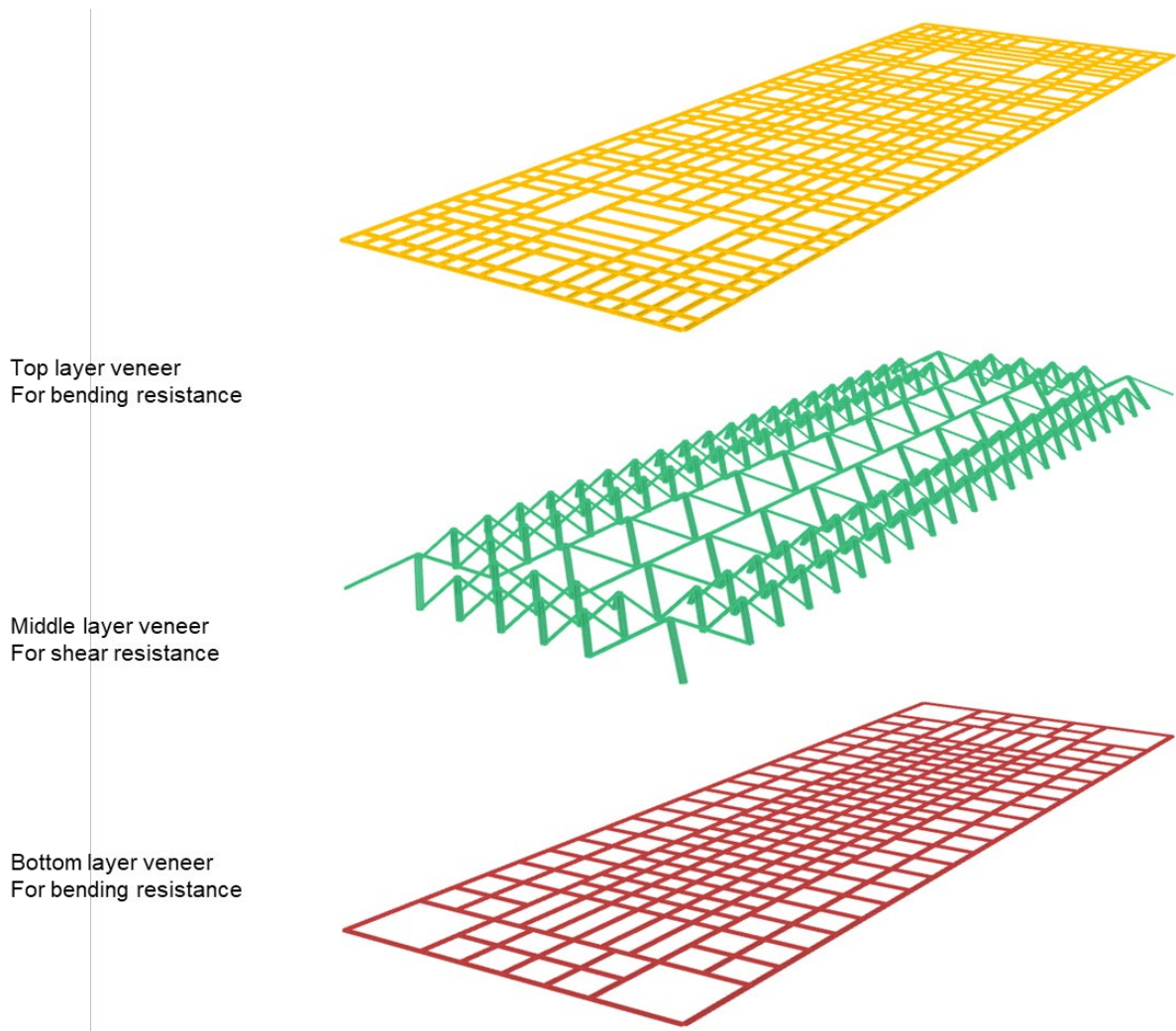
Quelle: ARUP

Anstelle eines gleichmäßigen Furniergitters wie bei früheren Prüfmustern wurde das 2D-Flachfurniergitter entsprechend den Biegespannungen in der kurzen Spannweitenrichtung (X-Richtung) und den Biegespannungen in der langen Spannweitenrichtung (Y-Richtung) optimiert. In beiden Richtungen sind die Biegespannungen in der zentralen Zone größer und nehmen zum Rand hin allmählich ab (Abbildung 60). Das 3D-Furniergitter wurde entsprechend der Dichte des Scherspannungsmusters entworfen, mit einem Bereich hoher Spannungen in der Nähe des Rahmens und einem Bereich niedriger Spannungen in der Mitte. Diese Optimierung führt zu einem optimalen Layout für alle drei Schichten des Gitters und verbessert die Gesamteffizienz des Materials, indem mehr Furniere im Bereich hoher Spannungen und weniger Furniere im Bereich niedriger Spannungen eingesetzt werden (Abbildung 61).



Quelle: ARUP

Abbildung 60
Spannungsverteilung, von links nach rechts: Biegespannung X (Biegespannung in Richtung der kurzen Spannweite), Biegespannung Y (Biegespannung in Richtung der langen Spannweite), Scherspannung Z (Scherspannung außerhalb der Ebene).

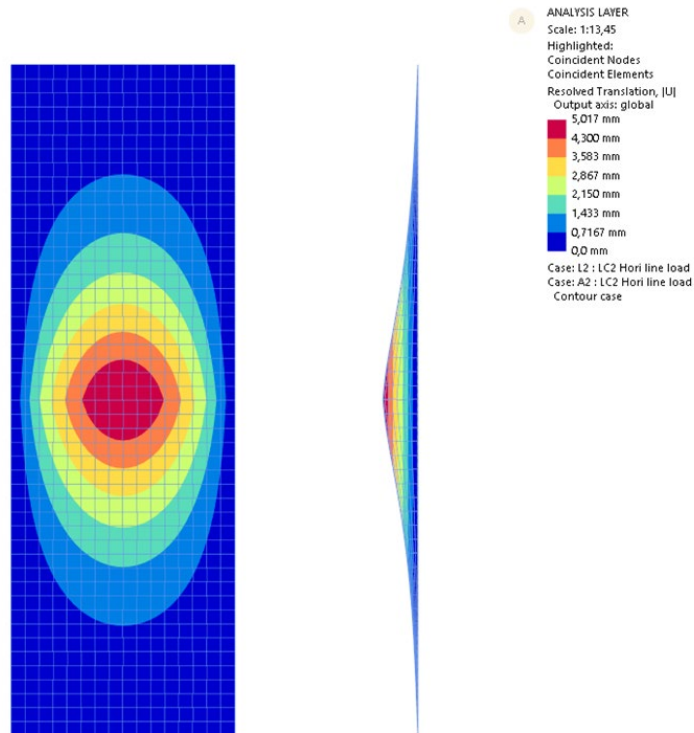


Quelle: ARUP

Abbildung 61

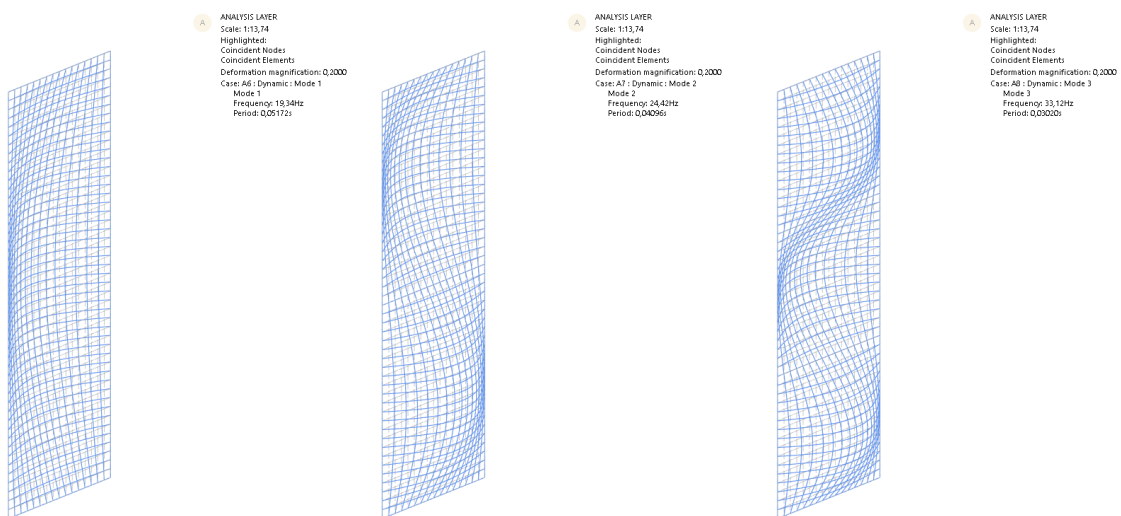
Die Verteilung des Furniergitters: obere und untere Schicht mit unterschiedlicher Dichte für die Biegefestigkeit und mittlere Schicht für die Scherfestigkeit.

Ein zusätzliches FEA-Modell wurde erstellt, um die strukturelle Leistung des finalen Demonstrators zu bewerten (Abbildung 62). Wie aus den nachstehenden Analyseergebnissen hervorgeht, beträgt die maximale horizontale Durchbiegung nur 5 mm und liegt damit innerhalb der Grenze von $H/300 = 8$ mm. Es wurde auch eine dynamische Analyse durchgeführt, um die dynamischen Eigenschaften der Wand zu verstehen (Abbildung 63). Die entworfene Struktur zeigt sich steif mit einer Frequenz von 19,3 Hz für den ersten Modus. Es bestehen keine allgemeinen Anhaltswerte oder Kriterien für Eigenfrequenz. Die dynamischen Eigenschaften einer Wand sind unter Berücksichtigung eines bauakustischen Konzepts zur Optimierung der Luftschalldämmung in Hinblick auf einen vorhabenspezifischen architektonischen Zusammenhang zu bewerten.



Quelle: ARUP

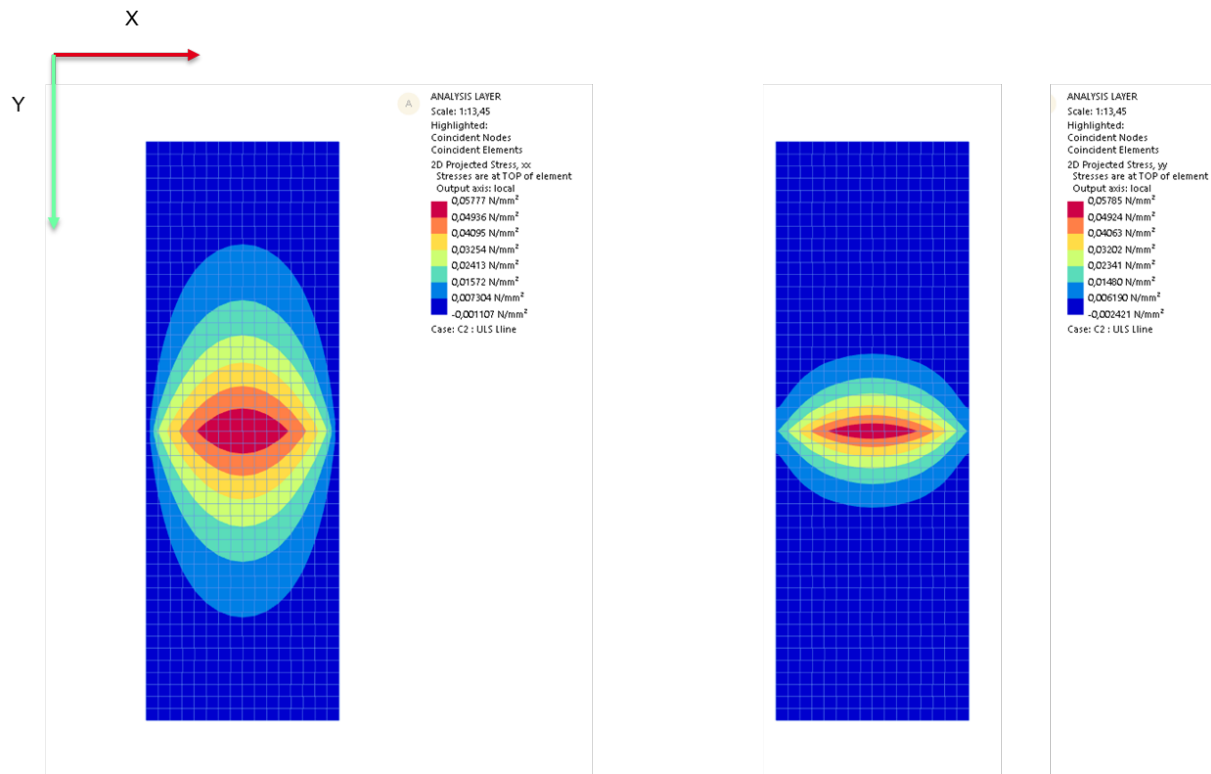
Abbildung 62
Simulationsergebnisse des Demonstrators: Horizontale Durchbiegung in mm.



Quelle: ARUP

Abbildung 63
Simulationsergebnisse des Prototyps: Schwingungsmodi und Frequenzen der ersten drei Modi, von links nach rechts: erster Modus (19,3 Hz), zweiter Modus (24,4 Hz) und dritter Modus (33,1 Hz).

Für den Festigkeitsnachweis beträgt die maximale Biegespannung innerhalb der Platte 0,058 MPa unter der maßgeblichen ULS-Lastkombination (Abbildung 64). Die auftretende Biegespannung liegt unter Berücksichtigung des Materialfaktors γ_M und des Modifikationsfaktors k_{mod} innerhalb der Grenzen der Bemessungswerte des Materials.



Quelle: ARUP

Abbildung 64

Simulationsergebnisse des Demonstrators: Biegespannung in MPa. Links: Biegespannung X (Biegespannung in Richtung der kurzen Spannweite), Rechts: Biegespannung Y (Biegespannung in der Richtung der kurzen Spannweite).

Formgestaltung

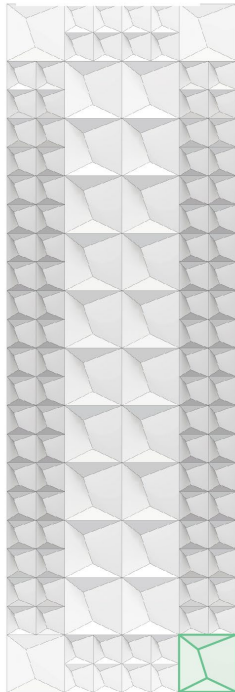
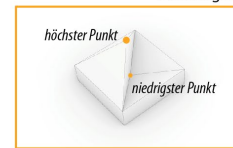
Das Oberflächendesign des endgültigen Demonstrators basierte auf folgenden zentralen Zielen: Da das Furniergitter in das Myzel eingebettet und nicht mehr sichtbar ist, sollte das Oberflächendesign die optimierte innere Verstärkungsstruktur widerspiegeln. Die unterschiedlichen Zellgrößen, die auf der Oberfläche wahrgenommen werden können, werden durch die Zellgrößen der wellenförmigen Schicht des Furniergitters bestimmt, die entsprechend der Strukturanalysen optimiert wurden. Für die Zellgeometrie wurden eine Reihe von dreidimensionalen Geometrien untersucht (Abbildung 65), die parametrisch verändert werden können, um verschiedene Variationen für Ästhetik, individuelle lokale akustische Leistung und Schatteneffekte zu schaffen.

Das Oberflächendesign wurde anhand einiger Schlüsselparameter und Fertigungsbeschränkungen untersucht, die als Konstruktionsfaktoren dienten. Da die Form aus 21 mm dicken Siebdruckplatten hergestellt werden sollte, war die zu erreichende dreidimensionale Materialtiefe des Designs sehr begrenzt. Es musste ein Design mit subtilen Änderungen in der Höhe entwickelt werden, das aber dennoch einen Gradienten von Höhenvariationen in dem vorgegebenen Bereich erzeugen kann.

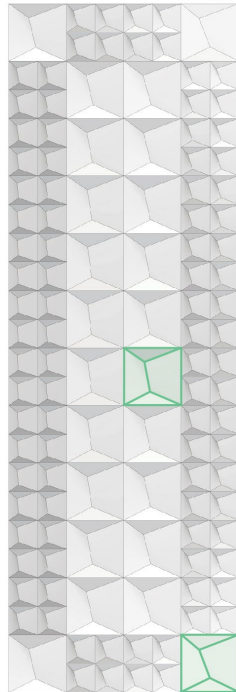
Zelldesign A



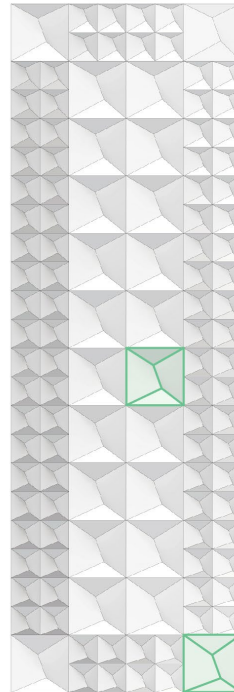
Zelldesign B



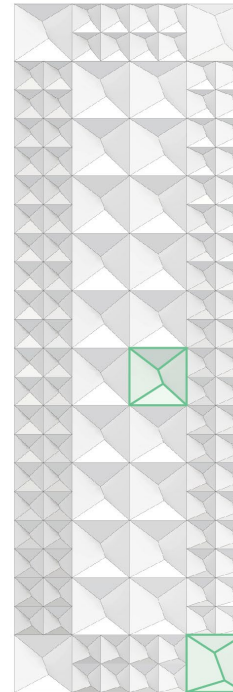
Opt 1: Spitzenlinie mit festem Winkel



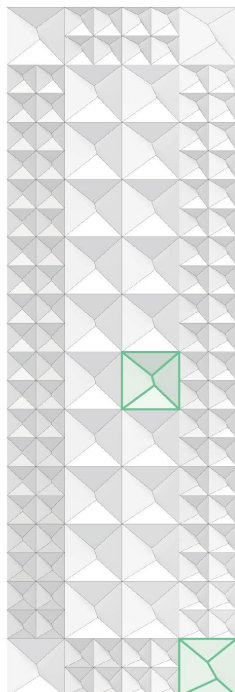
Opt 2: Spitzenlinienwinkel vergrößert sich nach außen



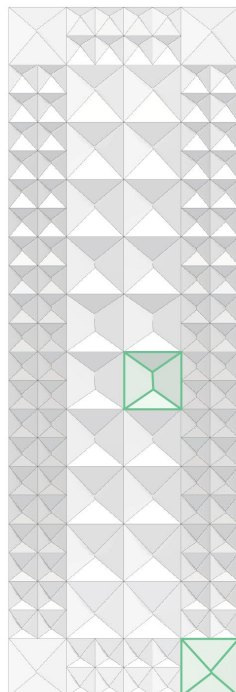
Opt 3: Spitzenlinie wird nach außen weggeschoben



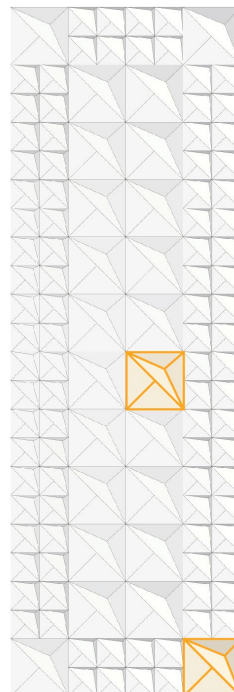
Opt 4: Spitzenlinie ist länger und wird nach außen weggeschoben



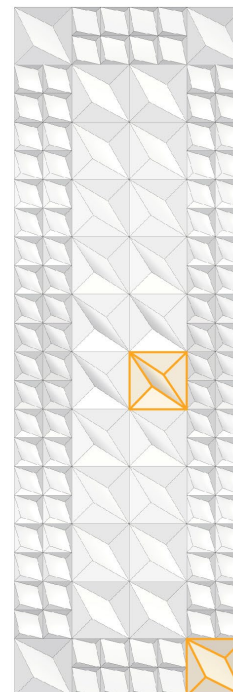
Opt 5: Die Spitzenlinie ist länger, stärker gewinkelt und nach außen weggedrückt



Opt 6: Die Spitzenlinie ist kürzer, stärker gewinkelt und nach außen verschoben



Opt 7: Höchster Punkt bewegt sich mehr nach außen



Opt 8: Niedrigster und höchster Punkt verschieben sich stärker nach außen

Quelle: FG Experimentelles und Digitales Entwerfen, Universität Kassel

Abbildung 65
Designstudien-Matrix.

Ausgangspunkt war die Erstellung des Grundrasters, das die Zellengrenzen auf der Grundlage des inneren Verstärkungsgitters festlegen sollte. Die Positionierung der Zellen und die Zellengrößen wurden direkt aus dem Entwurf des Verstärkungsgitters übernommen und mit der gewählten Zellengeometrie entsprechend gefüllt. Im parametrischen Entwurf wurde anschließend ein Attraktorpunkt in der Mitte der Wandgeometrie platziert und die Geometrie jeder Zelle wurde entsprechend ihrer individuellen Abstände zum Attraktorpunkt verändert. Die gewählten Parameter zur Änderung der Geometrie waren: der Winkel der Spitzenlinie, die Lage der Spitzenlinie, die Länge der Spitzenlinie, die Lage des höchsten Punktes und die Lage des niedrigsten Punktes.

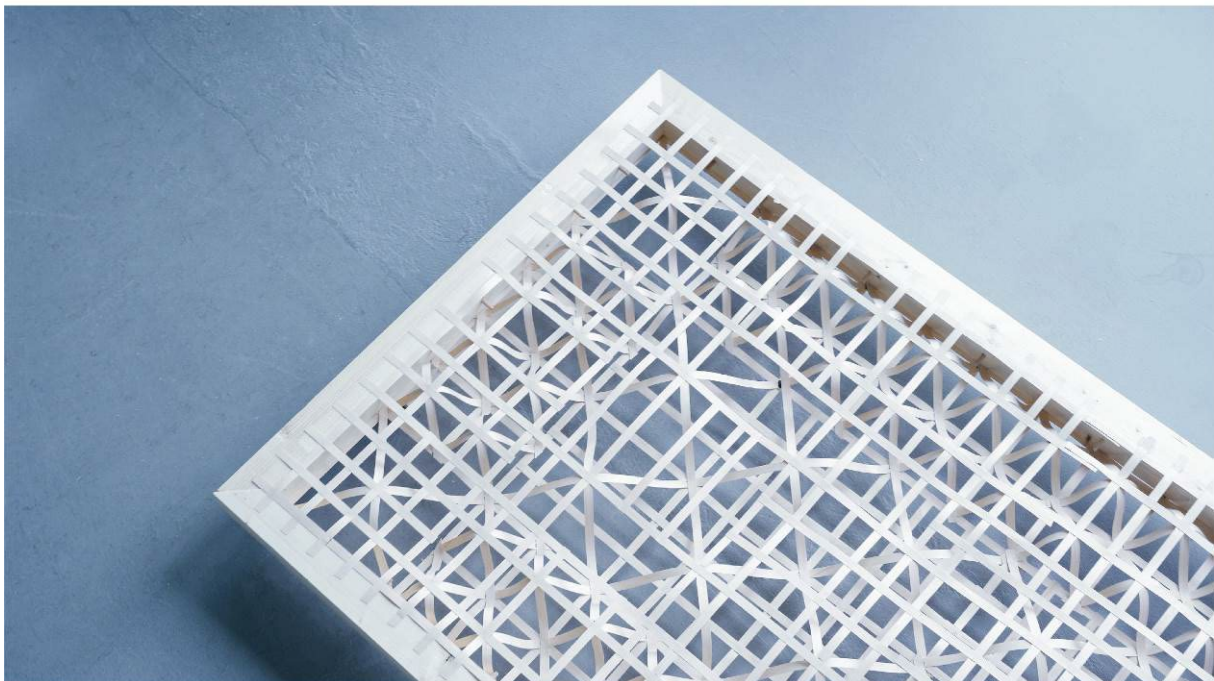
Die Entwurfsstudien wurden in einer Reihenfolge durchgeführt, in der die Anzahl der Parameter und damit die Komplexität der Entwürfe schrittweise erhöht wurde. Am Ende wurde ein Design gewählt, das auf der Position des höchsten und des niedrigsten Punktes der Zellen basiert (Option 8). Diese Entscheidung wurde aufgrund des dynamischen Charakters des Oberflächendesigns, der winkligen Anordnung der Kanten jeder Zelle, die das strenge orthogonale Raster durchbricht, und der Vielfalt der Zelldesigns, die dadurch erreicht werden konnten, getroffen. Nach der Fertigstellung der Zellenentwürfe wurde in der Testphase ein Höhengefälle mit einem Gradienten angewandt. So ist die Oberfläche in der Mitte des Prototyps flach und wird dreidimensionaler Richtung äußerem Rand. Die Auswirkungen dieser speziellen Zellengeometrie auf die akustische Leistung wurde anschließend getestet.

AP 4.2 Bauteilherstellung (UK, KIT)

Roboterherstellung des 3D-Holzgitters

Für die Herstellung des 3D Holzgitters für den finalen Demonstrator wurden Ahornfurnierspulen mit einer Dicke von 0,5 mm und einer Breite von 12 mm verwendet. Für den gesamten Prozess wurden insgesamt 163 Meter Furnierkantenbänder verwendet. Für die Herstellung des Furniergitters wurde das endgültige Gitterdesign in drei gleich große (80 x 80 cm) Stücke unterteilt, welche in den Arbeitsbereich des Roboters passten und diese Stücke wurden nach Fertigstellung mit einer Handschweißpistole miteinander verbunden.

Das 2D-Grundraster wurde durch das Verlegen von Furnierstreifen realisiert, die sich über die gesamte Länge des 80 x 80 cm großen Rasters erstrecken. Sobald das Grundlayout des Gitters erreicht war, wurden die kürzeren Furniere zwischen die zuvor verlegten durchgehenden Furniere platziert. Dies geschah vor allem deshalb, weil unsere additive Fertigungsmethode nicht wie bei herkömmlichen FDM-Verfahren auf das Verkleben des Materials mit der Grundplatte setzt, sondern nur dann wirksam ist, wenn das neu verlegte Material mit der vorherigen Schicht in Wechselwirkung steht. Ähnlich wie bei der Herstellung der Furniergitter für den Pop-up-Campus-Demonstrator wurde zunächst das 2D-Gitter auf der Unterseite fertiggestellt (Abbildung 66).



Quelle: FG Experimentelles und Digitales Entwerfen, Universität Kassel

Abbildung 66

Oben: Ultraschallschweißen während der additiven Fertigung des Furniergitters, Unten: fertiges Furniergitter auf dem Holzrahmen.

Anschließend wurden die wellenförmigen, mittleren Schichten hinzugefügt, und dann wurde das obere 2D-Gitter separat hergestellt und mit dem Rest der Platte verschweißt.

Herstellungparameter des Furniergitters

Erste zwei Schichten:

- Extrusion bei 45 U/min
- Schweißen: 120 J, Annäherung an den Punkt mit 1 Bar, Schweißen mit 2 Bar
- Dauer:
 - Durchgang 1: 6 Minuten
 - Durchgang 2: 16 Min.
 - Durchgang 3: 17 Min.

„Wellenrichtung“ 1 (insg. drei Schichten):

- Extrusion bei 45 RPM
- Schweißen: 165 J, Annäherung an die Spitze mit 1 Bar, Schweißen mit 2 Bar
- Dauer: 23 Min.

„Wellenrichtung“ 2 (vier Schichten):

- Extrusion bei 45 RPM
- Schweißen: 180 J, Annäherung an den Punkt mit 1 Bar, Schweißen mit 2 Bar
- Dauer: 25 Min.

Letzte zwei Lagen:

- Extrusion bei 45 RPM
- Schweißen: 120 J, Annäherung an den Punkt mit 1 Bar, Schweißen mit 2 Bar
- Dauer:
 - Durchgang 1: 14 Min.
 - Durchgang 2: 35 Min.
 - Durchgang 3: 9,5 Min.

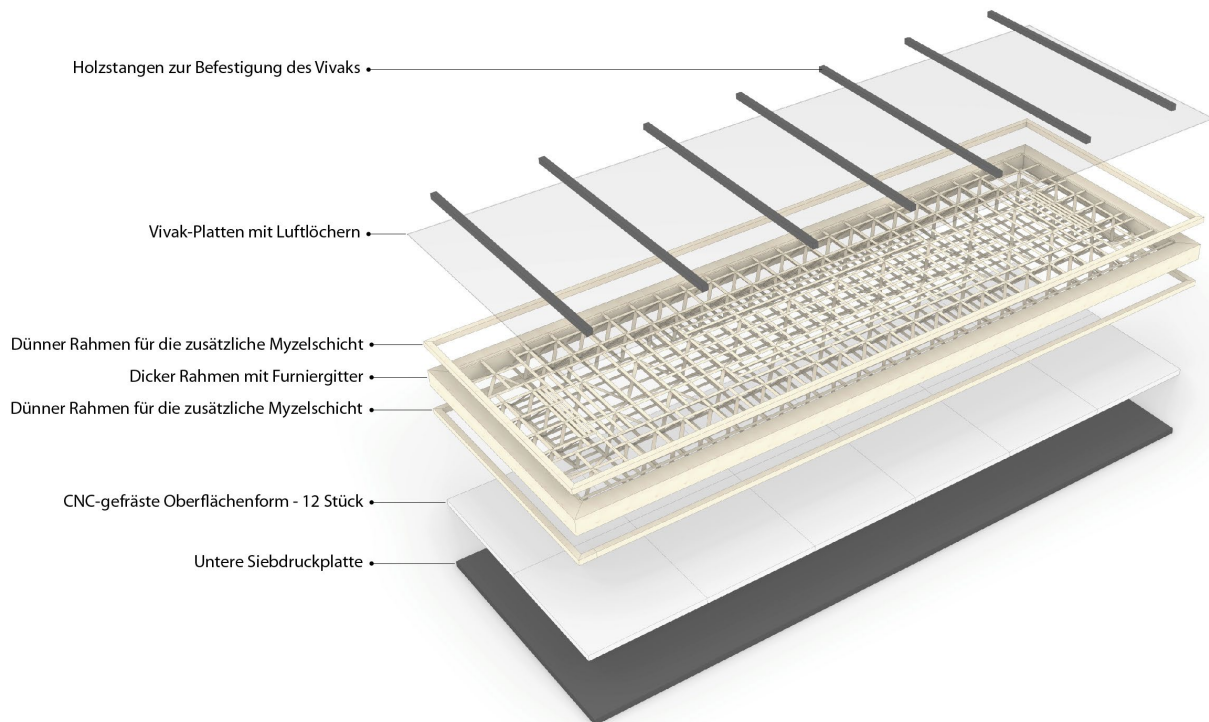
Verschweißung der letzten beiden Lagen mit dem Rest (4 Lagen):

- Schweißen: 200 J, manuell geschweißt mit der Handschweißpistole

GESAMTE PRODUKTIONSZEIT DES FURNIERGITTERS: 145,5 Min.

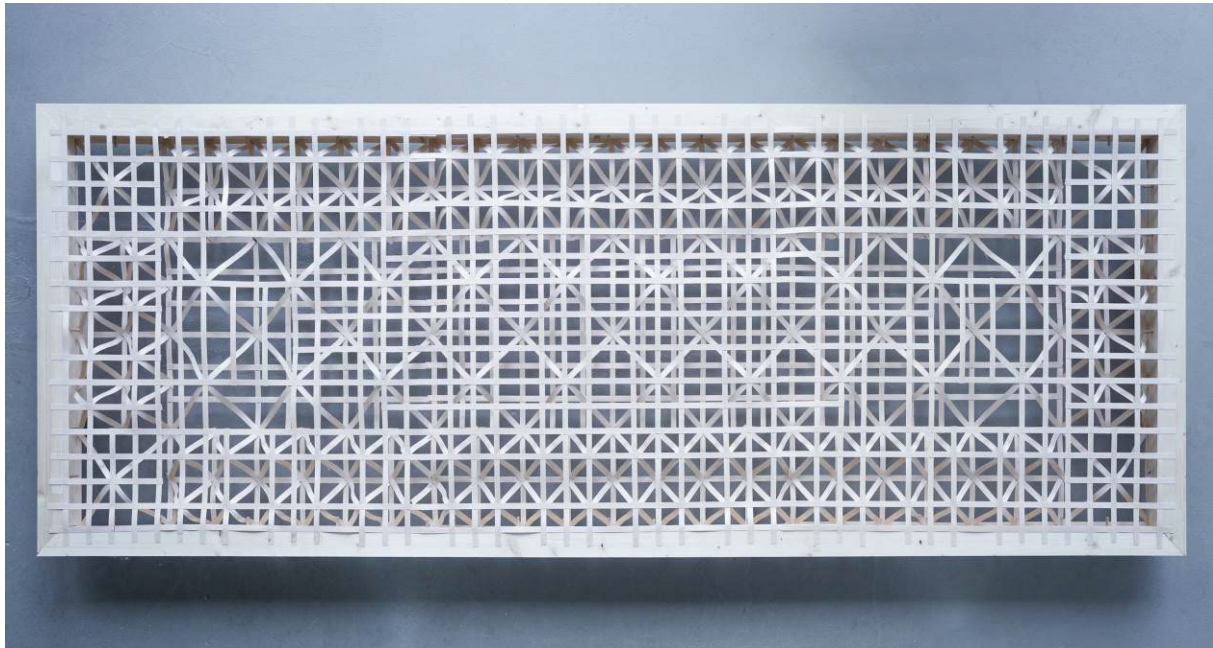
Herstellung des Rahmens für den finalen Demonstrator

Der Rahmen besteht aus einem inneren Rahmen mit einem Profil von 6 cm x 6 cm und zwei äußeren, schmalen Rahmen (Profil 2 cm x 2 cm) (Abbildung 67). Bevor die Rahmen zusammengesetzt wurden, wurde das robotergefertigte Furniergitter mit Holzleim am inneren Rahmen befestigt (Abbildung 68). Ungefähr 200 Holzdübel (5 mm x 30 mm) wurden auf der Innenseite der Rahmenteile angebracht. Dadurch soll die Verbindung zwischen dem Myzel und dem Außenrahmen verstärkt und eine Trennung während des Trocknungsprozesses vermieden werden (Dieses Problem wurde bei der Herstellung des 80 x 80cm großen Testmusters festgestellt).



Quelle: FG Experimentelles und Digitales Entwerfen, Universität Kassel

Abbildung 67
Schematische Übersicht über das Set-Up zum Befüllen des Rahmens inkl. Furniergitter mit Myzelmaterial.



Quelle: FG Experimentelles und Digitales Entwerfen, Universität Kassel

Abbildung 68

Das robotergefertigte Furniergitter, mit Holzleim am inneren Rahmen befestigt, links im Bild zu erkennen: einer der zwei äußeren Rahmen inklusive angebrachter Holzdübel.

Herstellung der Negativ-Form für die Oberflächengestaltung des finalen Prototyps

Zwei 2500 x 920 x 21mm große Siebdruckplatten wurden von der Holzhandlung Rogowski erworben. Während eine auf die Maße 2500 x 80mm gefräst wurde, wurde die andere verwendet, um die Negativ-Form für die Oberflächengestaltung des Prototyps zu erstellen. Wir verwendeten eine 5-Achsen-CNC-Fräsmaschine und teilten die Form in insg. 12 Einzelformen auf (Abbildung 69). Nachdem die Oberfläche der Negativ-Form gefräst wurde, wurden die Platten mit einer Kreissäge von Hand auf ihre endgültigen Abmessungen zugeschnitten. Am Ende des Fräsprozesses waren 12 Formteile mit den Abmessungen 460 x 413,3 oder 460 x 433,3 mm entstanden, je nach ihrer Lage in der geplanten Fläche. Die Unterteilung der Form in 12 separate Platten war notwendig, um eine leichtere Trennung von der Myzelmatrix zu gewährleisten und um verschiedene Teile der Form zu unterschiedlichen Zeitpunkten entfernen zu können, um Unterschiede in der Wachstumsrate in verschiedenen Bereichen der Platte auszugleichen.



Quelle: FG Experimentelles und Digitales Entwerfen, Universität Kassel

Abbildung 69

Links: 5-Achsen-CNC-Fräsen der Formen, Rechts: Oberflächenqualität der fertigen und montierten Formen.

Die gefrästen Formen wurden mit Klarlack beschichtet. Nach den ersten beiden Anstrichen wurden die Formen von Hand leicht abgeschliffen, um die rauen Holzpartikel auf der Oberfläche zu entfernen, anschließend wurden noch zwei zusätzliche Schichten aufgetragen. Die beschichteten 12 Formteile wurden auf eine unterliegende Siebdruckplatte geschraubt (Abbildung 70).



Quelle: FG Experimentelles und Digitales Entwerfen, Universität Kassel

Abbildung 70

Die Negativ-Form für die Oberflächengestaltung des Prototyps, alle 12 Einzelplatten zusammengelegt zur finalen Negativ-Form.

Großmaßstäbliche Produktion von Myzel

Die Berechnung der Materialmenge für den finalen Demonstrator erfolgte auf der Grundlage der gewünschten endgültigen Dichte des Verbundmaterials, welche etwa 120 kg/m³ beträgt. Auf der Grundlage des endgültigen Volumens des Prototyps (2,4 x 0,8 x 0,1 m) und des Wassergehalts des Substrats (60%) vor dem Trocknen des Verbundstoffs wurde die Menge des Myzelmaterials auf etwa 60 kg berechnet. Um jedoch mögliche Verunreinigungen und den Verlust von Material während des Befüllens der Form zu berücksichtigen, wurden 20% mehr Material vorbereitet und am KIT Mycolab hergestellt (Abbildung 71).



Quelle: KIT

Abbildung 71

Von links nach rechts: Halb angewachsener beimpfter Substratbeutel, voll angewachsener beimpfter Substratbeutel, temperatur- und feuchtigkeitskontrollierter Wachstums- und Lagerraum.

Die Produktion von Myzelmaterial in großem Maßstab am KIT war aufgrund des Personalmangels und der Größe der Ausrüstung eine große Herausforderung. Daher war die Produktion auf 5-7 kg Material pro Tag beschränkt, und das gesamte Material wurde im Laufe von 3 Wochen hergestellt. Am Ende des Produktionszyklus wurde das gezüchtete Myzel in Filterbeuteln und Plastikfolien eingewickelt und per DHL-Express verschickt. Eine Reihe von Zeitrafferaufnahmen, die den Prozess der Materialverarbeitung zeigen, sind im Anhang zu finden. 66 kg vorgezuchtetes Myzelmaterial wurde vom KIT (Karlsruhe) zu EDEK (Kassel) verschickt. Von den 66 kg wurden nur ca. 4 kg nicht verwendet.

Befüllung der Form, Wachstums- und Trocknungsphase

Die Befüllung der vorbereiteten Form

Um die vorbereitete Form bestehend aus Holzrahmen, Furniergitter und Negativ-Form zu befüllen, musste das Myzelmaterial sehr gut zerkleinert werden, da sich das Material sonst nicht gut in das Furniergitter füllen ließe, was zu ungleichmäßigen Oberflächen und zu einem Endergebnis mit geringer Dichte führen würde (also zu strukturell ungünstigen Elementen). Daher wurde das von KIT gelieferte Myzelmaterial vorbereitet, indem wir es zunächst von Hand in kleinere Stücke zerkleinerten und dann mit einem Handrührer (Scheppach PM1800D) aufbereiteten (Abbildung 72).



Quelle: FG Experimentelles und Digitales Entwerfen, Universität Kassel

Abbildung 72

Links: Zerkleinern des Myzelmaterials von Hand, Mitte: Zerkleinerung des Materials in feinere Stücke mit dem Handmixer, Rechts: Fein beimpftes Material, bereit zur Verwendung.

Während des Füllvorgangs wurden Gesichtsmasken, Schutzanzüge und Handschuhe verwendet, außerdem wurden Oberflächen von Werkzeugen und Händen desinfiziert, um das Risiko einer Kontamination zu minimieren. Das zerkleinerte Myzelmaterial wurde sorgfältig per Hand im Furniergitter platziert, wobei darauf geachtet wurde, dass keine Löcher entstehen (Abbildung 73). Nachdem die Form mit Myzel gefüllt war, wurde sie mit der Vivak-Platte abgedeckt, die über Atmungslöcher verfügt.



Quelle: FG Experimentelles und Digitales Entwerfen, Universität Kassel

Abbildung 73

Von oben nach unten: Auflegen des mit Myzel geimpften Substrats, das das Oberflächendesign bilden wird; sorgfältiges Auffüllen der Form zwischen dem Furniergitter, um überall eine gleichmäßige Dichte zu gewährleisten; Auflegen der letzten Materialsicht, die das Furniergitter bedeckt und die Rückseite des Prototyps bildet.

Die Wachstumsphase des finalen Demonstrators

Die finale Wachstumsphase des finalen Demonstrators fand in einer Wachstumskammer statt (Abbildung 74). Die allgemeinen Wachstumsbedingungen waren $80\% \pm 2$ RH und $20\text{--}23^\circ\text{C}$.



Quelle: FG Experimentelles und Digitales Entwerfen, Universität Kassel

Abbildung 74

Der finale Demonstrator während der Wachstumsphase mit den Forschern in der Wachstumskammer, bedeckt mit Vivak-Platten mit Löchern und Holzbalken, um eine ebene Fläche zu erhalten.

Die Beobachtungen zum Wachstumsprozess waren die folgenden:

Tag 1-3: Am Ende des dritten Tages waren erste Myzelbindungen zwischen den Substratpartikeln zu erkennen. Während das Wachstum an den äußeren Rändern der gesamten Oberfläche weiter fortgeschritten zu sein schien, wiesen einige Abschnitte in der Mitte noch kein Wachstum auf. Es wurde vermutet, dass dies auf den Mangel an Sauerstoff zurückzuführen war. Daher wurden die Vivak-Folie und die Holzstäbe entfernt und die Oberfläche locker mit Schrumpffolie mit winzigen Löchern zur besseren Belüftung abgedeckt.

Tag 4-9: Die einsehbare Seite des Demonstrators (später die Rückseite) war vollständig mit Myzelium bedeckt. Der Prototyp wurde deshalb aus seiner waagerechten Position um 90° auf die Seite aufgestellt und auf seiner langen Kante stehen gelassen, um die untenliegende Seite (später Oberfläche) überprüfen zu können, die mit den einzelnen Formteilen bedeckt war. Da nur wenig Sauerstoff an die Oberfläche gelangte, war auch die Wachstumsgeschwindigkeit auf dieser Seite geringer. Beim Entfernen der Form-Teile wurde außerdem festgestellt, dass einiges Myzelmaterial an der Form festklebte. Die Oberseite des Gitters war sichtbar und die inneren Substratpartikel waren noch nicht zusammengewachsen. Es wurde etwas Mehl hinzugefügt, um das Wachstum des Myzels zu fördern, die Formteile wurden wieder installiert und der finale Demonstrator wurde noch weiter wachsen gelassen (Abbildung 75).



Quelle: FG Experimentelles und Digitales Entwerfen, Universität Kassel

Abbildung 75

Links: Ein Stück der Myzeloberfläche tritt aus und legt das Furniergitter frei, weil Sauerstoffmangel das Myzelwachstum verhindert: Selbstreparierte Platte nach Zugabe von Mehl zu den nicht angewachsenen Teilen und längerem Wachstum in der Feuchtigkeitskammer, rechts: Die vollständig gewachsene Platte.

Tag 10-12: Zunächst ließen sich die Formteile an der Unter- und Oberseite des Demonstrators (die Teile in der Nähe der kurzen Kanten) leicht entfernen, und es wurde ein zufriedenstellendes Myzelwachstum beobachtet. In der Mitte der Wand gab es jedoch immer noch Wachstumsprobleme. Daher wurden zunächst die zufriedenstellend gewachsenen Abschnitte entformt, und der mittlere Abschnitt wurde länger in der Form wachsen gelassen. Zwei Tage später wurden dann auch die übrigen Teile der Form entfernt. Dieser Unterschied in der Wachstumsgeschwindigkeit der verschiedenen Abschnitte des Prototyps führte dazu, dass die Oberfläche des Prototyps Unterschiede in Farbe, Textur und Haptik aufwies. Die Teile des Prototyps, die länger der hohen Luftfeuchtigkeit ausgesetzt waren, haben ein dunkleres, gelbliches und stärker gemustertes Aussehen, während die später entformten Teile weißer und homogener sind (Abbildung 76).



Quelle: FG Experimentelles und Digitales Entwerfen, Universität Kassel

Abbildung 76

Unterschiede in der Oberflächenqualität, Farbe und Textur aufgrund unterschiedlicher Wachstumsgeschwindigkeiten in verschiedenen Bereichen des Prototyps.

Die Trocknung des finalen Demonstrators

Der finale Demonstrator wurde über einen Zeitraum von einer Woche mithilfe eines Heizlüfters und zwei Infrarotpaneelen getrocknet. Durch das Set-Up konnte eine Temperatur von 40°C in der Wachstumskammer erreicht werden. Pro Tag liefen die Heizelemente nicht länger als 5-7 Stunden, um zu vermeiden, dass der Demonstrator zu schnell trocknen und schrumpfen würde.

Ausblick und Schlussfolgerungen aus der Herstellung des letzten Demonstrators

Anmerkungen zur Herstellung von Furniergittern

Das Design des Endeffektors wurde verbessert, um einige kritische Herstellungsprobleme zu überwinden, die bei früheren großformatigen Prototypen aufgetreten waren. Der für die Herstellung dieses Prototyps entwickelte Endeffektor wurde an ein früheres Projekt angepasst, bei dem Kontaktklebstoffe als Befestigungsmethode verwendet wurden. Aus diesem Grund befindet sich die Ultraschallschweißsonotrode im vorderen Teil des Endeffektors. Erfahrungen bei der Herstellung der Prototypen für dieses Projekt haben

gezeigt, dass ein besserer Fertigungsprozess erreicht werden kann, wenn die Schweißsonotrode im Inneren des Furnierextrusionsteils angebracht wird. Auf diese Weise könnte das Material unmittelbar nach dem Extrudieren verschweißt werden und das übermäßige Extrudieren von Material aufgrund des Abstands zwischen der Schweißsonotrode und der Extrusionsspitze reduziert werden.

Da es sich bei dem für dieses Produktionssystem entwickelten Werkzeug nur um einen Prototyp handelt, können im Prozess Verzögerungen auftreten, die dazu führen, dass das Material überdehnt wird oder schlaff bleibt. Mit einem nach Industriestandards konstruierten und gefertigten Endeffektor könnten diese Probleme leicht überwunden werden, um die Fertigungsgenauigkeit zu erhöhen.

Ein Gitter mit unterschiedlichen Zellgrößen führt zu Spannungszonen im Gitter, insbesondere wenn Wellen hinzugefügt werden. Dies stellt eine zusätzliche Herausforderung für die Herstellung eines präzisen Gitters dar, da es schwieriger ist, das zuletzt hinzugefügte Gitter mit dem Rest der Struktur präzise zu verschweißen.

Anmerkungen zum Myzelwachstum

Da für die Realisierung des endgültigen Demonstrators eigens gezüchtetes Myzelmaterial verwendet wurde, änderte sich der Zeitplan des Wachstums und es wurde ein etwas anderes Materialverhalten beobachtet. Das Material der Firma Grownbio, das für die POP-UP-Campus-Demonstratoren verwendet wurde, wies eine Wachstumszeit von etwa einer Woche auf. Das Material benötigte wenig Sauerstoff, eine sterile Umgebung oder streng sterile Arbeitsbedingungen waren nicht erforderlich. Das eigens entwickelte Material hingegen benötigte in der Wachstumsphase mehr Sauerstoff, da sonst die Vermehrung anderer Mikroorganismen auf der Oberfläche zu beobachten war. Aus diesem Grund und wegen der Gesamtgröße der finalen Wandkonstruktion musste eine längere Gesamtwachstumszeit von ca. zwei Wochen in Kauf genommen werden.

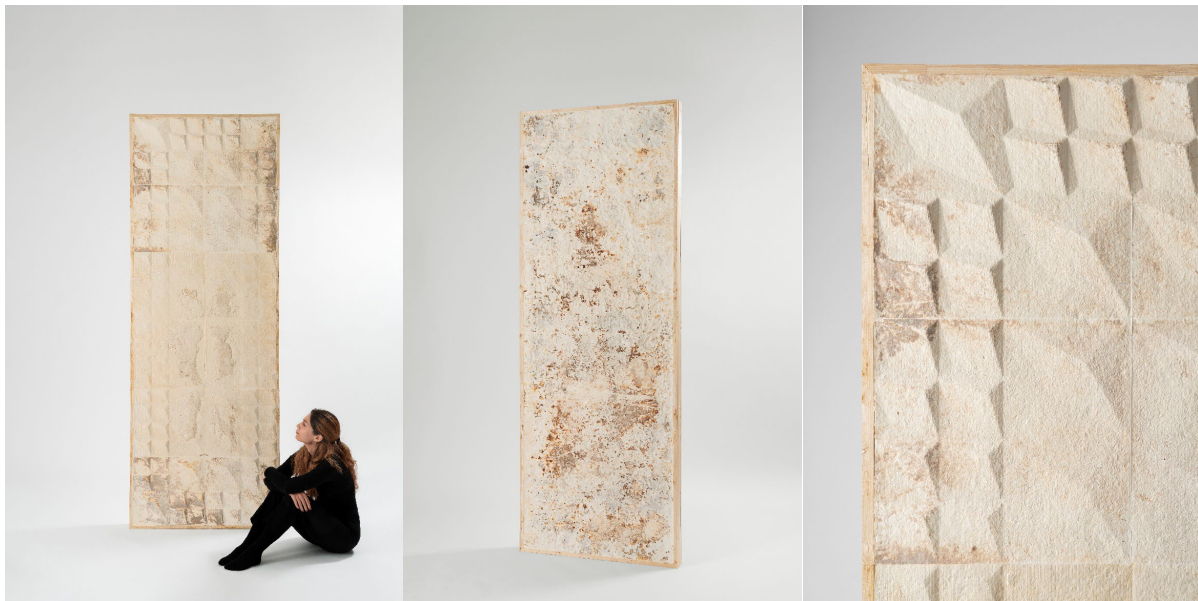
Andererseits zeigte das Material die vielversprechende Fähigkeit, sich nach Zugabe von etwas Mehl und mehr Zeit selbst zu regenerieren. Um eine perfekt ausgebesserte Oberfläche zu erhalten, muss das Material mit der Negativform ausreichend lange in Position gehalten werden. Beim endgültigen Demonstrator weisen die mittleren Bereiche der Wand sichtbare Ausbesserungsstellen auf, da die Formen früher als nötig entfernt werden mussten. Die kurzen Kanten der Wand wuchsen schneller, so dass die Form an diesen Stellen früher entfernt wurde, was zu sichtbaren Flecken führte (Abbildung 77).



Quelle: FG Experimentelles und Digitales Entwerfen, Universität Kassel

Abbildung 77

Oben: Ein gebrochener Fleck auf der Myzeloberfläche, der das Furniergitter freilegt, weil Sauerstoffmangel das Wachstum des Myzels verhindert, unten: Selbst regeneriertes Paneel, das immer noch die Spuren der gebrochenen Stelle zeigt.



Quelle: FG Experimentelles und Digitales Entwerfen, Universität Kassel, Nicolas Wefers

Abbildung 78

Von links nach rechts: Die Vorderseite, die Rückseite und die Nahaufnahme des fertigen Demonstrators.

AP 4.3 Charakterisierung Bauteil(e) (ARUP, UK)

Akustische Versuche an 1:1 Bauteilen (Pop-Up Campus Wand und finaler Prototyp)

Der finale Demonstrator wurde messtechnisch nach seiner Wirksamkeit als eine mobile, schallschirmende bzw. schallabsorbierende Maßnahme zur raumakustischen Optimierung untersucht. Die akustische Bemessung des Demonstrators fand am 25 April 2023 in einem Seminarraum im ASL-Gebäude der Kassel Universität statt. Ziel der akustischen Untersuchung war, schalltechnisch die Einsatzfähigkeit des Demonstrators als eine schallschirmende Stellwand zu bewerten, und im Laufe der Untersuchung die Optimierungspotenziale für weitere Anwendungsfälle (wie z.B. als eine fest eingebaute Trennwand) zu identifizieren. Ergänzende Messungen mit der Pop-Up-Campus-Stellwand wurden zum Zweck einer Gegenüberstellung ihrer jeweiligen akustischen Eigenschaften durchgeführt.

Untersuchte raumakustische Eigenschaften

Im Raum freistehende Gegenstände wie Stellwände wirken sich auf die Raumakustik durch deren unterschiedlichen Eigenschaften aus. Inwieweit eine Stellwand zu einer bestimmten Nutzung geeignet ist, kommt auf das genaue Nutzungsszenario und die bestehende Raumgestaltung an. Stellwände leisten gleichzeitig einen Einfluss auf die direkte Schallausbreitung sowie auf die Nachhallzeiten im Raum. Die beiden Einsatzauskommen können positiv oder negativ zur gewünschten Lärminderung bzw. Privatsphäre beitragen, in Abhängigkeit der bestehenden Raumeigenschaften. Ziel der vorliegenden Untersuchung war, beispielhaft die Auswirkung des Demonstrators auf die direkte Schallausbreitung und die Nachhallzeiten in einem Seminarraum zu dokumentieren, damit eine messtechnisch informierte Aussage zur allgemeinen Einsatzfähigkeit und Optimierungspotenzial erreicht werden konnte.

Grundsätzlich unterscheiden sich die direkte Schallausbreitung und die diffuse Schallfeldentwicklung in einem Raum. Direkte Schallausbreitung entsteht aus akustischen Signalen, die sich direkt von einer Schallquelle zu einem Empfänger ohne Unterbrechung durch Gegenstände oder Bauteile übertragen. Für Sprachsignale zählen weiterhin alle ankommende Signalanteile, die innerhalb von 50 Millisekunden durch Reflexion auf schallharte Raumboflächen zum Empfänger geleitet werden, zum Direktsignalanteil. Solche Schallreflexionen, die eine ausreichend kurze Verzögerung im Vergleich zur direkten Ausbreitung aufweisen, verbessern die Verständlichkeit eines Sprachsignales. Für Räume, die zur sprachlichen Kommunikation genutzt werden, tragen solche Anfangsreflexionen positiv zum raumakustischen Gestaltungskonzept bei.

Diffuse Signalanteile entstehen aus der Gesamtheit aller langverzögerte Reflexionen (d.h. aus dem Nachhall) eines Raumes. Die diffusen Sprachsignalanteile enthalten keine für das Verstehen von Sprache nutzbaren Informationen. Der direkte Signalanteil sowie alle vor 50ms am Empfänger ankommenden Anfangsreflexionen sind für die Verständlichkeit nutzbar, sofern sie ausreichend laut im Vergleich zum diffusen Signalanteil sind. Durch Verkürzen der Nachhallzeit kann man den Schalldruckpegel des Diffusfelds absenken und erhält dadurch auch bei größeren Abständen von einem Sprecher noch ein ausreichendes Direktschall-Diffusschall-Verhältnis.

Ein wesentliches technisches Kriterium zur raumakustischen Gestaltung von Räumen für sprachliche Kommunikation ist der Sprachübertragungsindex (STI). STI beschreibt als Maß zwischen 0 und 1 die Übertragungsqualität von Sprache im Hinblick auf die Verständlichkeit eines Sprachübertragungskanales. STI wird unter Berücksichtigung der Lautstärke des direkten Signalanteils, des diffusen Signalanteils, und des fremden Signalanteils sowie die Nachhallzeiten ermittelt.

Um den Einfluss des Demonstrators messtechnisch zu dokumentieren, wurden Messungen im Seminarraum mit und ohne den Demonstrator durchgeführt, und die Unterschiede zwischen gemessenen Schallpegel, Nachhallzeit und STI-Werten in beiden Fällen dienen zur Grundlage der vorliegenden Analyse. Dem Messverfahren wurden die folgenden Fragen zu Grunde gelegt:

- Wie wirksam ist der Demonstrator als eine schallschirmende Maßnahme?
- Wie wirksam ist der Demonstrator als eine schallabsorbierende Maßnahme?
- Wie trägt der Demonstrator zur Schallpegelverteilung im Raum bei?
- Wie trägt der Demonstrator zur Verteilung der Sprachverständlichkeit im Raum bei?
- Welche Optimierungspotenziale sind in den Messergebnissen erkennbar?

Durchgeführte Messungen

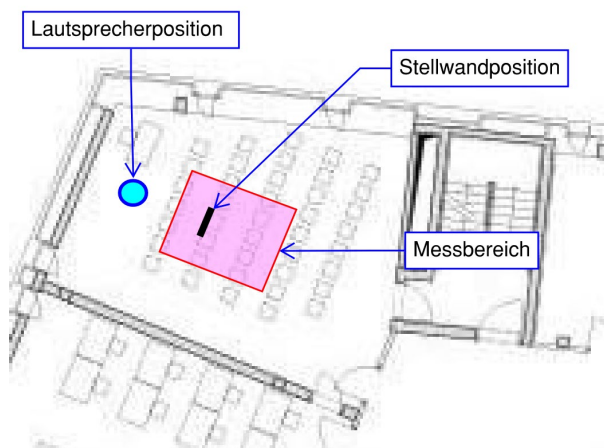
Die Untersuchung zu den akustischen Eigenschaften des Demonstrators wurde im Wesentlichen mit raumakustischen Messungen in Anlehnung an DIN EN ISO 3382-2:2008-09 „Akustik - Messung von Parametern der Raumakustik - Teil 2: Nachhallzeit in gewöhnlichen Räumen" durchgeführt. Diese Norm wurde zur messtechnischen Ermittlung der akustischen Verhältnisse zwischen Empfängerpositionen ausgewählt, um die in DIN 18041:2016-03 „Hörsamkeit in Räumen - Anforderungen, Empfehlungen und Hinweise für die Planung" genannten Nachhallzeit-Parameter T, den Sprachverständlichkeitsindex STI und die räumlichen Schallpegelverteilung zu untersuchen.

Das Messsystem besteht aus einem omnidirektionalen Lautsprecher, einem kalibrierten Mikrofon und einem Schallpegelaufnehmer entsprechend der Schallpegelmesser Klasse 1. Alle Fremdschallquellen wurden weitestmöglich abgeschaltet bzw. ausgeschlossen, um eine möglichst ruhige akustische Umgebung für die Messungen zu schaffen. Der Grundgeräuschpegel im Raum wurde um 30 dB(A) gemessen. Ein breitbandiges, kurzzeitiges Impuls-Messsignal mit einer Lautstärke von ca. 98 dB(A) bei 1 Meter wurde vom Lautsprecher in den Raum abgespielt. Dieses Impuls-Messsignal wurde an 30 Empfängerpositionen aufgenommen, und die frequenzabhängigen Spitzenpegel sowie Abklingrate der Schallpegel bildeten die Grundlagen für die Analyse zur räumlichen Verteilung der direkten Schallausbreitung und diffusen Schallfeldentwicklung bei den verschiedenen Ausstattungsszenarien. Die Empfängerpositionen wurden in einem regelmäßigen Raster mit fünf Spalten und sechs Reihen in einem zentralen Messbereich angeordnet, und die in einer Reihe oder Spalte nebenliegenden Empfängerpositionen wurden jeweils 50 cm voneinander entfernt. Alle Messungen in allen Szenarien wurden zur Messsicherheit einmal wiederholt. Das gesamte Messverfahren wurde unter den folgenden vier (4) Ausstattungsszenarien durchgeführt:

- Raum ohne Stellwand-Demonstrator, alle Gegenstände möglichst weit vom Messbereich entfernt
- Stellwand-Demonstrator im Messbereich aufgestellt, Oberflächenstruktur vorwärts
- Stellwand-Demonstrator im Messbereich aufgestellt, Oberflächenstruktur rückwärts
- Pop-Up Campus Stellwand im Messbereich aufgestellt.

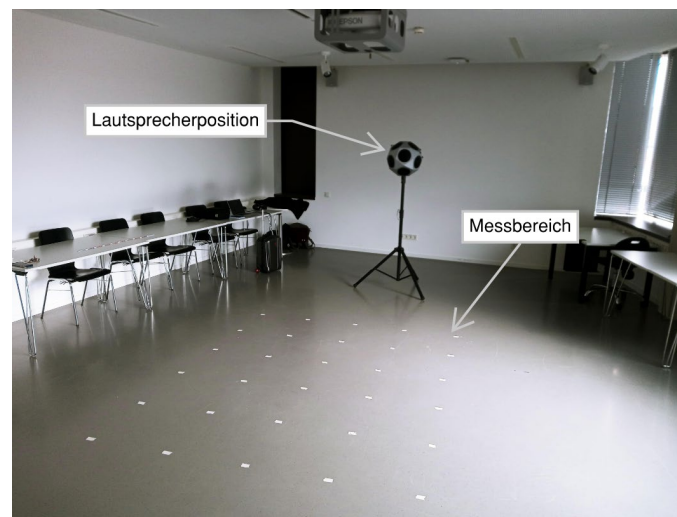
Die Unterschiede zur gemessenen Spitzenpegel, Abklingrate, Nachhallzeiten und daraus ermittelten STI-Werte unter diesen vier Ausstattungsszenarien wurden dafür verwendet, eine Analyse zur Einfügungsdämmung, schallschirmende und -streuende Charakteristiken sowie Schallabsorption des Demonstrators durchzuführen.

Der Untersuchungsraum war ein Seminarraum mit schallharten Boden- und Wandoberflächen, und einer schallabsorbierenden Unterdecke aus abgehängten gelochten Gipskartonplatten. Alle vier raumumschließenden Wände waren in Massivbauweise errichtet, aber Außenfenster aus Isolierverglasung bildeten die in der nordöstlichen Wand vorwiegende Oberfläche. Der Untersuchungsraum hat eine unregelmäßige Geometrie, die zu einem diffuseren Schallfeld und dadurch zu günstigeren akustischen Messbedingungen im Raum führt. Eine visuelle Darstellung des Untersuchungsraumes, Messbereiches mit Empfängerpositionen auf dem Boden markiert sowie der Lautsprecher- und Stellwandposition ist in den nachfolgenden Abbildungen ersichtlich.



Quelle: ARUP

Abbildung 79
Grundriss des Seminarraums mit Lautsprecherposition, Messbereich und Stellwandposition.



Quelle: ARUP

Abbildung 80
Messaufbau im Ausstattungsszenario 1, Raum ohne Stellwand.



Quelle: ARUP

Abbildung 81
Messaufbau im Ausstattungsszenario 2, Demonstrator vorwärts.

Die nachfolgend gelisteten Messgeräte wurden für die messtechnische Untersuchung verwendet:

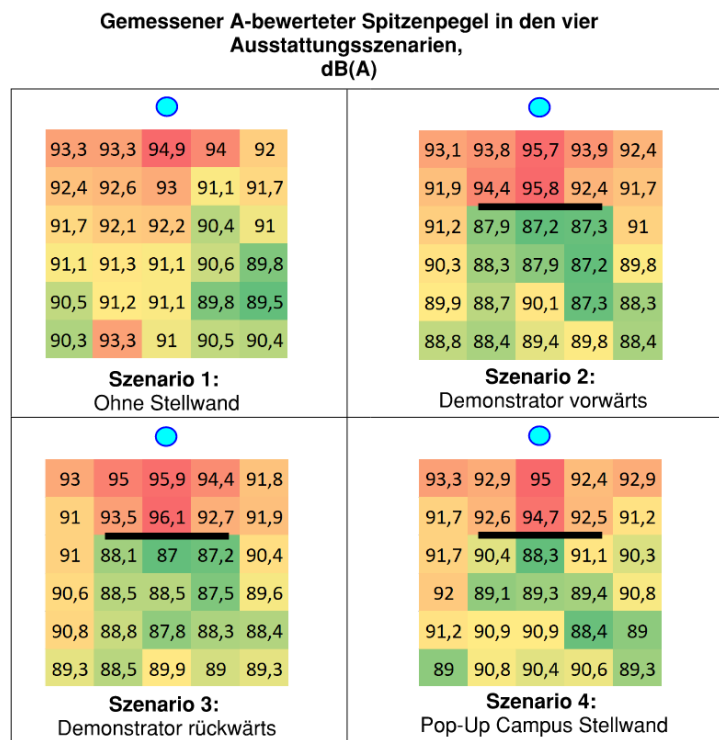
- | | |
|--------------------------------------|---------------------------|
| ■ Norsonic Schallpegelmesser Typ 145 | [Seriennummer: 14529699] |
| ■ Norsonic Mikrofon Typ 1227 | [Seriennummer: 452323] |
| ■ Norsonic Kalibrator Typ 1256 | [Seriennummer: 125626705] |
| ■ Norsonic Vorverstärker Typ 1209 | [Seriennummer: 23141] |
| ■ B&K Dodekaeder Typ 4292-L | [Seriennummer: 068007] |
| ■ B&K Verstärker Typ 2734-A | [Seriennummer: 084003] |

Vor Beginn und am Ende jeder Messreihe ist das gesamte Messsystem mit einem Kalibrator der Geräteklasse 1 kalibriert worden. Es ergaben sich keine Abweichungen vom Sollwert.

Schallpegelverteilung im Raum

Der Einfluss der raumakustischen Eigenschaften des Untersuchungsraumes selbst lässt sich in der Analyse zur Schallpegelverteilung im Raum nicht ausschließen, insbesondere bei den Empfängerpositionen, die weiter vom Demonstrator entfernt liegen. Die gemessene Schallpegelverteilung wird in den nachfolgenden Abbildungen über den gesamten Messbereich dargestellt, aber der Einfluss des Demonstrators auf die Raumakustik ist in bestimmten Fällen nur in seiner unmittelbaren Nähe leicht erkennbar.

Die räumliche Verteilung der A-bewerteten Impulsspitzenpegel in den vier Ausstattungsszenarien ist in der nachfolgenden Abbildung zu ersehen. Die Lautsprecherposition ist in allen vier Grafiken mit einem blauen Kreis gekennzeichnet, und die Stellwandposition ist in Szenarien 2 bis 4 mit einer fetten schwarzen Linie markiert. Szenarien 2 und 3 unterscheiden sich bei der Ausrichtung der strukturierten Oberfläche des Demonstrators, wobei in Szenario 2 die strukturierte Oberfläche zum Lautsprecher hinschaut. Die Empfängerpositionen sind anhand ihrer relativen Lautstärken im eigenen Ausstattungsszenario gefärbt, wobei die höheren Schallpegel auf rotmarkierten Empfängerpositionen gemessen wurden. Die Messergebnisse sind in den jeweiligen Empfängerpositionen numerisch dargestellt.



Quelle: ARUP

Abbildung 82

Gemessener A-bewerteter Impulsspitzenpegel in den vier Ausstattungsszenarien, dB(A).

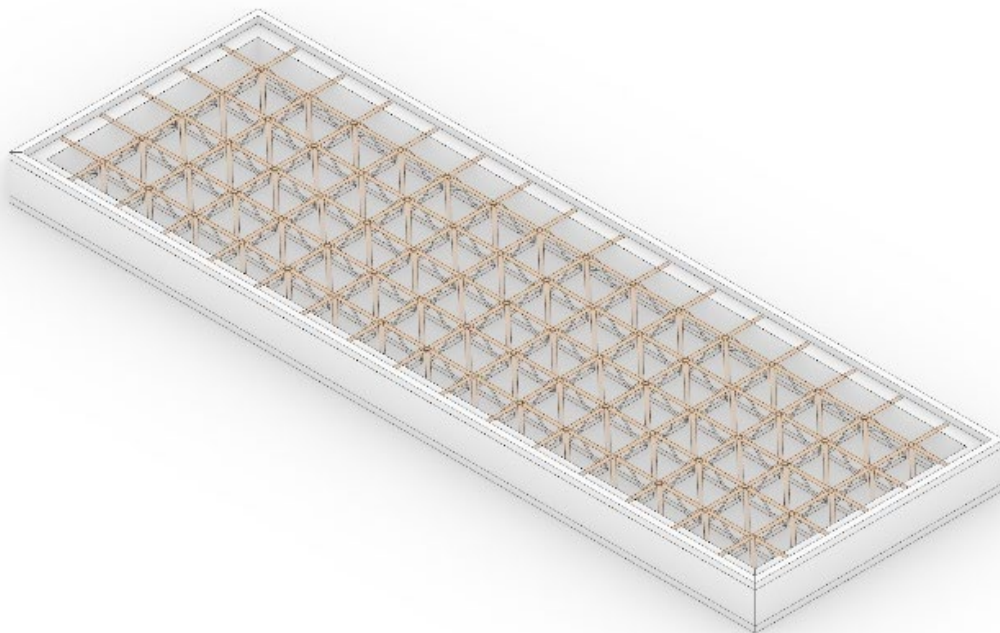
Die Verteilung der A-bewerteten Impulsspitzenpegel in den vier Ausstattungsszenarien lässt die folgenden Erkenntnisse sofort feststellen:

1. Das Aufstellen einer Stellwand in Holz-Myzelium-Verbundbauweise führt zu einer gewissen Schallschirmung, was die in den Szenarien 2 bis 4 ersichtlichen grünen Schattenzonen hinter der Stellwand erklärt.
2. Beide Stellwände in Holz-Myzelium-Verbundbauweise (Demonstrator und Pop-Up-Campus) wirken zum Teil als schallreflektierende Oberfläche. Die Schallreflexion ist bei der leichten Erhöhung der Schallpegel zwischen Stellwand und Lautsprecher in Szenarien 2 bis 4 erkennbar.
3. Die gesamte Einfügungsdämmung einer solchen Stellwand liegt in allen Fällen unter 10 dB(A).
4. Der Demonstrator (Szenarien 2 und 3) weist gegenüber der Pop-Up-Campus-Stellwand (Szenario 4) eine deutlich höhere Einfügungsdämmung am Rand der Schattenzone. Die Pop-Up-Campus-Stellwand wirkt wie ein punktförmiges schallschirmendes Element und bildet eine dreieckige Schattenzone hinter sich, während der Demonstrator (Szenarien 2 und 3) wie ein lineares schallabschirmendes Element wirkt und dahinter eine quadratische Schattenzone bildet.
5. Die leichten Unterschiede zwischen Schallpegelverteilungen in Szenarien 2 und 3 zeigen, dass der Demonstrator richtungsabhängige akustische Eigenschaften hat. Sowohl die Pegelerhöhung vor der Stellwand sowie die Pegelreduzierung hinter der Stellwand sind in der zentralen Wandachse (zum Lautsprecher hin) stärker, wenn die unstrukturierte Rückseite der Wand zum Lautsprecher hinschaut (Szenario 3). In Szenario 2 ist die strukturierte Oberfläche des Demonstrators zum Lautsprecher orientiert und die reflektierte akustische Energie wird zu mehreren Empfängerpositionen vor der

Stellwand gestreut. Die Randpositionen in der Schattenzone weisen in Szenario 2 auch einen höheren Unterschied zu den entsprechenden Empfängerpositionen vor der Wand auf.

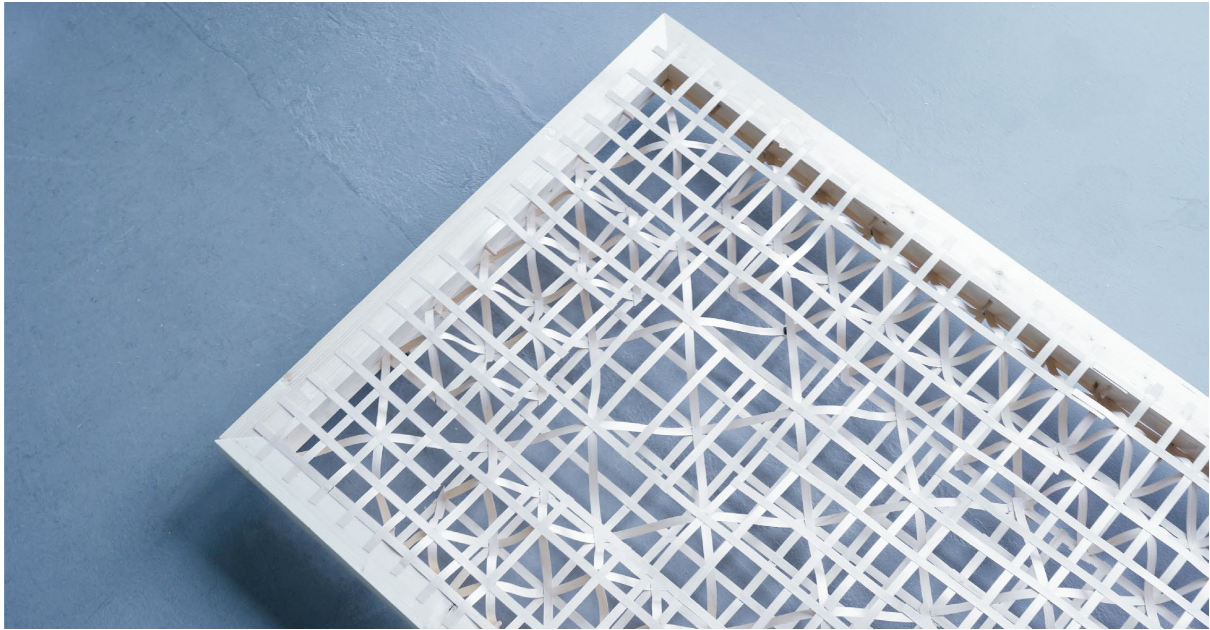
Das relativ niedrige Einfügungsdämm-Maß ist aufgrund der Porosität des Materials sowie die Abwesenheit von massiveren Verkleidungsmaterialien wie zusammengepresste Myzelium-Paneele zurückzuführen. Die vorhandene Schalldämmung resultiert aus der Materialmasse sowie von der Kombination aus Oberflächenstruktur, Luftdurchlässigkeit der Myzelhaut und der integrierten Holzfurniergitter. Die räumliche Verteilung von Schallreflexionen und Pegelminderungen ist auch vom räumlichen Verhältnis zwischen der strukturierten Stellwandoberfläche und der Schallquelle leicht abhängig.

Die Verbesserung zur Schallpegelreduzierung am Rand der Schattenzone könnte **eine Auswirkung der integralen Holzfurnierstruktur** sein. Die Pop-Up-Campus-Stellwand (Szenario 4) hat ein regelmäßiges Raster von Holzfurnierstreifen als Bewährungsstruktur, während der Demonstrator (Szenarien 2 und 3) eine dichtere Struktur am Rand des Paneels im Vergleich zum zentralen Bereich im Paneel hat. Die dichtere Holzfurnierstruktur am Rand des Demonstrator-Paneels könnte eine zusätzliche Schalldämmung bringen, die die Pegelreduzierungen am Rand der Schattenzone im Vergleich zur Pop-Up-Campus-Stellwand erhöhen.



Quelle: FG Experimentelles und Digitales Entwerfen, Universität Kassel

Abbildung 83
Regelmäßige Holzfurnierstruktur, Pop-Up-Campus-Wand (Szenario 4)

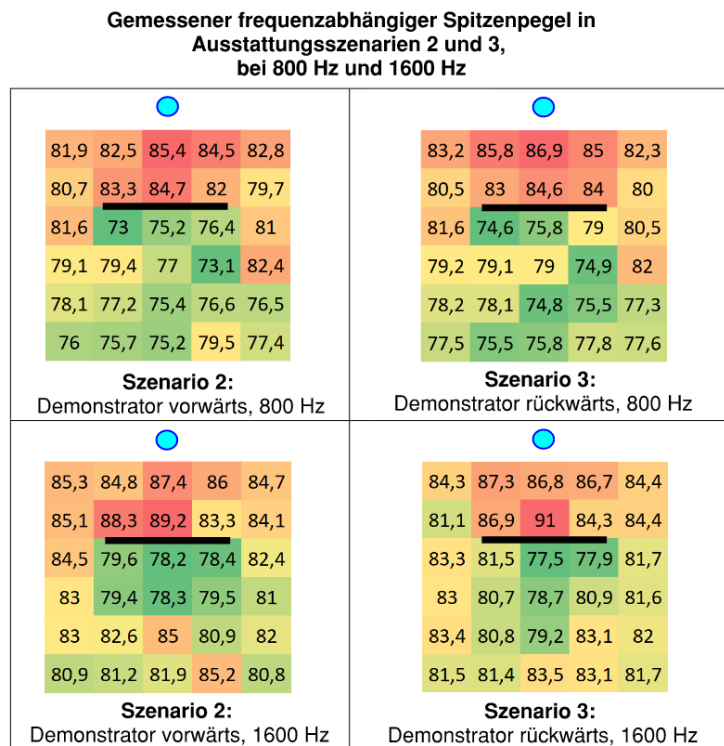


Quelle: FG Experimentelles und Digitales Entwerfen, Universität Kassel

Abbildung 84
Unregelmäßige Holzfurnierstruktur, Demonstrator-Stellwand (Szenarien 2 und 3)

Die Bögen in der Holzfurnierstruktur im Demonstrator, sowie die Abstände zwischen glatten Holzfurnierstreifen, entsprechen räumlich den Wellenlängen für Schallwellen mit einer Frequenz von 3200 Hz, sowie den Halbwellenlängen für Schallwellen mit einer Frequenz von 1600 Hz, und den Viertelwellenlängen für Schallwellen mit einer Frequenz von 800 Hz. Die Oberflächenstruktur an der Außenseite des Demonstrators besteht aus kleinen Gipfeln und Tälern mit ähnlichen Größen.

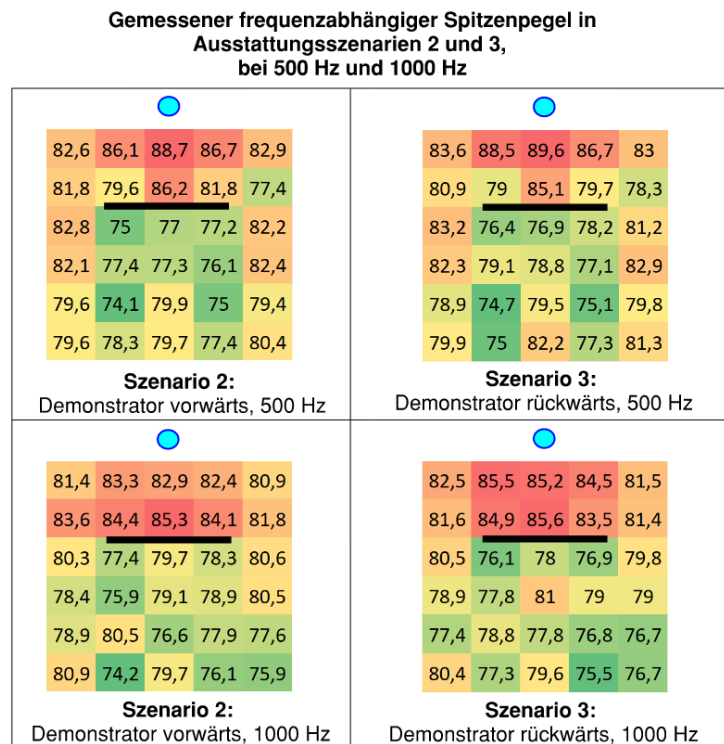
Die Verteilung der gemessenen Impulsspitzenpegel in Szenarien 2 und 3 weist eine kaum feststellbare Richtungsabhängigkeit bei den Frequenzen, die der Halbwellenlänge und Viertelwellenlänge der Holzfurnierstruktur entsprechen, nämlich bei 800 Hz und 1600 Hz. Die Pegelverteilung bei 800 Hz und 1600 Hz unter Szenarien 2 und 3 sind in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.



Quelle: ARUP

Abbildung 85
Räumliche Verteilung der Impulsspitzenpegel bei 800 und 1600 Hz, Szenarien 2 und 3.

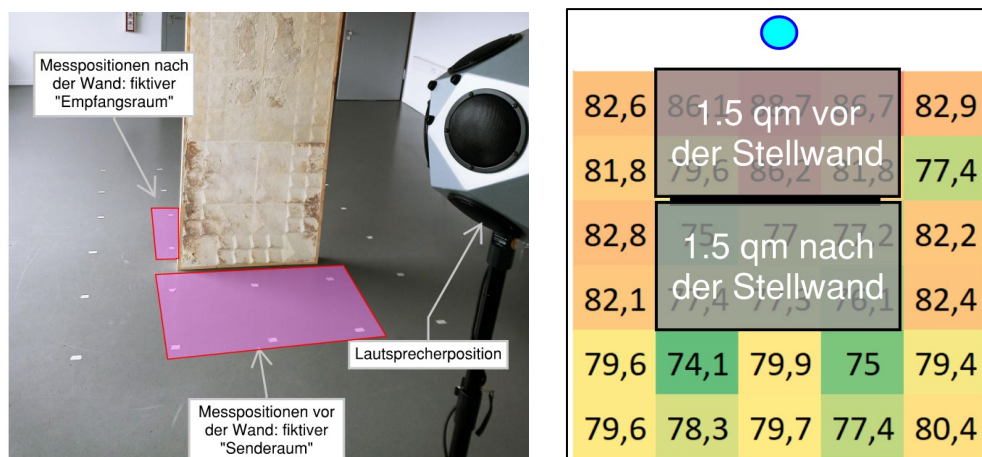
Ein anderes Verteilungsmuster ist in den gemessenen Impulsspitzenpegeln außerhalb von den der Holzfurniergeometrie entsprechenden Frequenzbänder ersichtlich. Während bei 800 Hz und 1600 Hz das Pegelverteilungsmuster nur sehr leicht von der Stellwandausrichtung abhängig ist, bei 500 Hz und 1000 Hz verändert sich der Pegelverteilungsmuster mehr im Bereich hinter der Stellwand zwischen Szenario 2 und Szenario 3. Dies könnte bedeuten, dass bei den Frequenzen, die den geometrischen Größen der Holzfurnierstruktur entsprechen, die schalldämmenden Eigenschaften der Stellwand nicht von der Aufstellausrichtung der Stellwand abhängig sind, dass jedoch andere Eigenschaften der Stellwand bei 500 Hz und 1000 Hz für den Einfluss auf die Schallpegelverteilung im Raum eine stärkere Rolle spielen, die stärker von der Aufstellausrichtung der Stellwand abhängig sind.



Quelle: ARUP

Abbildung 86
Räumliche Verteilung der Impulsspitzenpegel bei 500 und 1000 Hz, Szenarien 2 und 3.

Die Richtungsabhängigkeit der Einfügungsdämmung des Demonstrators ist auch im Frequenzverlauf erkennbar. Für die Analyse zur Einfügungsdämmung wurden die durchschnittliche Impulsspitzenpegel in Terzoktavfrequenzbänder über die sechs Empfängerpositionen im 1,5 Quadratmeter-Messbereich unmittelbar nach der Stellwand gemittelt. Diese durchschnittlichen „fiktiven Empfangsraumpegel“ wurden von den durchschnittlichen Impulsspitzenpegeln über die sechs Empfängerpositionen im 1,5 Quadratmeter-Messbereich unmittelbar vor der Stellwand („fiktiven Senderraumpegel“) abgezogen, um eine Einschätzung zur Schallpegeldifferenz zu erreichen.

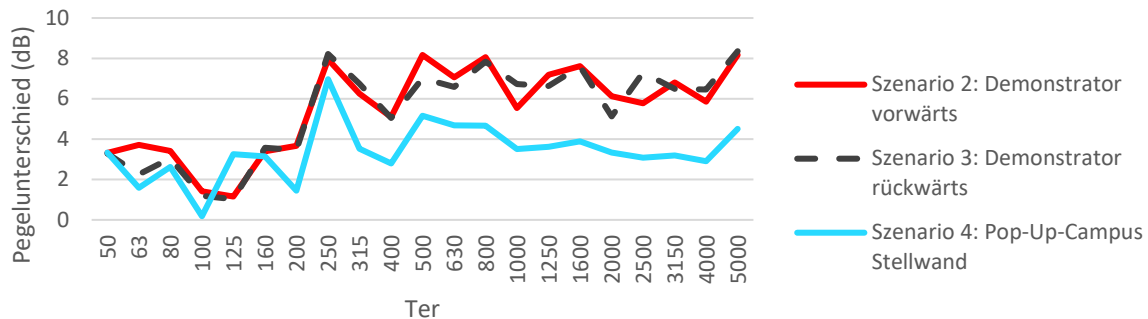


Quelle: ARUP

Abbildung 87
Untersuchte fiktive Sende- und Empfangsbereiche für Ermittlung einer Schallpegeldifferenz.

Die dadurch ermittelte Schallpegeldifferenz von fiktivem Senderbereich zu fiktivem Empfängerbereich ist in der nachfolgenden Abbildung in Terzoktavbänder für die Szenarien 2, 3 und 4 dargestellt.

Durchschnittlicher frequenzabhängiger Pegelunterschied des gemessenen Spitzenpegels zwischen den jeweils 1.5 qm Messflächen unmittelbar vor und hinter der Stellwand



Quelle: ARUP

Abbildung 88
Schallpegeldifferenz zwischen Messbereich vor und nach der Stellwand in Terzoktavnähen unter Szenarien 2, 3 und 4.

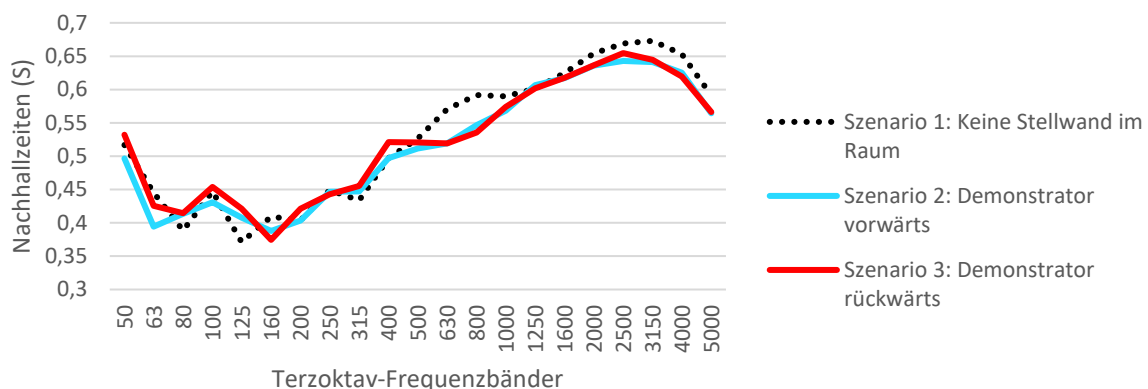
Dem Frequenzverlauf der Schallpegeldifferenz sind zwei Schlussfolgerungen zu entnehmen:

- Der Demonstrator (Szenarien 2 und 3) hat eine höhere Einfügungsdämmung als die Pop-Up-Campus-Stellwand (Szenario 4), und weist eine Verbesserung um ungefähr 3 dB auf. Dies könnte eine Auswirkung der dichteren Holzurnierstruktur sein.
- Die Einfügungsdämmung des Demonstrators (Szenarien 2 und 3) ist nur bei bestimmten Frequenzen aufstellungsabhängig. Es besteht keine Richtungsabhängigkeit bei 800 Hz und 1600 Hz, und deutliche Unterschiede zwischen Szenarien 2 und 3 sind bei 500 Hz und 1000 Hz zu sehen.

Nachhallzeiten

Im Gegensatz zu den Impedanzrohr-Messungen, können unter den vorhandenen Umständen im Untersuchungsraum keine zuverlässigen Absorptionsgrade ermittelt werden, jedoch die Schallabsorption des Demonstrators ist in den gemessenen Nachhallzeiten erkennbar. Die durchschnittlichen, über alle Messpositionen gemittelten Nachhallzeiten in den Szenarien 1, 2 und 3 sind in der nachfolgenden Abbildung zu sehen.

Durchschnittliche, über alle Messpositionen gemittelte Nachhallzeiten in Szenarien 1, 2 und 3



Quelle: ARUP

Abbildung 89
Gesamte gemessene Nachhallzeiten im Raum, Szenarien 1, 2 und 3.

Die gemessenen Nachhallzeiten unter Szenarien 2 und 3 sind sehr ähnlich zueinander. Als Ergebnis ist die Ähnlichkeit zwischen Szenarien zu erwarten, weil die Schallabsorption des Materials kaum eine Richtungsabhängigkeit in einem diffusen Schallfeld aufweisen soll.

Die größten Unterschiede zwischen Szenario 1 (ohne Stellwand) und die beiden Szenarien mit dem Demonstrator (2 und 3) liegen bei 800 Hz, wo eine gewisse Schallabsorption deutlich vorhanden ist, und ab 1600 Hz, wo eine Schallabsorption bei höheren Frequenzen klar zu sehen ist. Interessanterweise besteht kaum eine spürbare Schallabsorption bei 1000 Hz oder 500 Hz.

Frequenz- und Richtungsabhängige Auswirkung auf die Raumakustik

Die Analyse zur Schallpegelverteilung im Raum, zur Schallpegeldifferenz vor und nach der Stellwand, und zu den Nachhallzeiten im Raum unter die Szenarien 1 bis 3 zeigen, dass der Demonstrator sowohl frequenzabhängige als auch richtungsabhängige raumakustische Eigenschaften hat. Die folgenden Schlussfolgerungen können den Ergebnissen entnommen werden:

800 Hz und 1600 Hz

- Bei 800 Hz und 1600 Hz, dessen Wellenlänge geometrisch die Oberflächenstruktur und Holzfurnierstruktur entsprechen, verfügt der Demonstrator über ein gewisses Schallabsorptionsvermögen.
- Bei 800 Hz und 1600 Hz bleibt der Schallpegeldifferenz vor und nach der Wand gleich, unabhängig davon, in welcher Richtung die strukturierte Oberfläche schaut.
- Bei 800 Hz und 1600 Hz bleibt der räumliche Verteilungsmuster der Impulsspitzenpegel im Raum ungefähr gleich, unabhängig davon, in welcher Richtung die strukturierte Oberfläche hinschaut.

500 Hz und 1000 Hz

- Bei 500 Hz und 1000 Hz verfügt der Demonstrator über kein in den Nachhallzeiten spürbares Schallabsorptionsvermögen.
- Bei 500 Hz und 1000 Hz verändert sich leicht das räumliche Verteilungsmuster zwischen Szenarien 2 und 3. Es kann sein, dass die Richtcharakteristiken der vom Demonstrator abgestrahlten Schallreflektionen zusammen mit den Holzfurnier- und Oberflächenstrukturen hängt, wobei die Ausrichtung der Oberflächenstruktur die räumliche Verteilung abgegebener akustischer Energie verändert.
- Bei 500 Hz und 1000 Hz verändert sich die Schallpegeldifferenz vor und hinter der Wand in Abhängigkeit von der Aufstellrichtung (Szenarien 2 und 3). Es kann sein, dass die Abgabe von auf die Stellwand reflektierter und durch die Stellwand übertragener Schallenergie in diesen Frequenzbereichen von den Holzfurnier- und Oberflächenstrukturen beeinflusst wird.

Auslegung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der messtechnischen Untersuchung zeigen, dass Stellwände in Holz-Myzelium-Verbundbauweise sowohl über nutzbare raumakustische Eigenschaften als auch vielversprechende Optimierungspotenziale verfügen. Die sehr kleine Oberflächengröße des Demonstrators (ca. 4 qm) im Vergleich zur gesamten Flächengröße aller raumumschließenden Oberflächen im Untersuchungsraum (ca. 300 qm) hat zur Folge, dass ihr Einsatz als Schallabsorber im Raum nur eine sehr niedrige Reduzierung der durchschnittlichen Nachhallzeiten verursacht. Die 0,05-Sekunden Reduzierung der durchschnittlichen Nachhallzeiten im Raum bei 800 Hz über so eine kleine Absorptionsfläche könnte bedeuten, dass Absorptionsmechanismen wie Wellenstreuung im Inneren des Paneels von Reflektionen auf die Holzfurnierstruktur die Absorptionsfähigkeit über das hinaus erhöhen, was aufgrund der Porosität des Mediums zu erwarten ist.

Zur anderen Seite zeigen die Schallpegeldifferenzen und Nachhallzeiten, dass in den Frequenzbereichen zwischen den der Geometrie entsprechenden Wellenlängen (wie z.B. 500 Hz und 1000 Hz), das Paneel eher als eine schallreflektierende Oberfläche mit spürbaren richtungsabhängigen Abstrahlcharakteristiken wirkt. Die Oberflächenstruktur und Holzfurnierstruktur könnte bei diesen „nicht-harmonischen“ Frequenzen einen dominierenden Schallstreuungseffekt aufweisen, statt der in den „harmonischen“ Frequenzen dokumentierten Absorptionsfähigkeit.

Die Frequenzabhängigkeit der Schallstreuung gegenüber der Schallabsorption stellt zwei mögliche Optimierungspotenziale bzw. zukünftige Forschungsthemen dar. Erstens, eine Variierung in der geometrischen Größe der Holzfurnierbögen könnte zu einer breitbandigen Erhöhung der Absorptionsfähigkeit führen. Zweitens, eine genauere Untersuchung zum Einfluss des geometrischen Verhältnisses zwischen Oberflächenstruktur und Holzfurnierstruktur könnte die Ursachen des Streuungseffektes verdeutlichen, sodass Schallstreuung als ein Designparameter in den Entwurf solcher Stellwände integriert werden kann.

Die Schallstreuung wäre nur in bestimmten Fällen eine nützliche Eigenschaft der Trennwand, z. B. bei der Streuung ungünstiger Flatterechos. Die Stabilität der Schallpegeldifferenz und des Schallpegelverteilungsmusters bei den „harmonischen“ Frequenzen 800 Hz und 1600 Hz deutet darauf hin, dass derselbe Mechanismus für die erhöhte Schallabsorption und die stabilere bzw. zuverlässigere Einfügungsdämmung verantwortlich ist.

Anwendbarkeit als Stellwand & mögliche Weiterentwicklung in eine eingebaute Trennwand

Stellwände werden häufig als schallschirmende Elemente in größeren Räumen verwendet, zur Unterteilung des Raumes und Reduzierung der Ausbreitung störender Akustiksignale wie Sprache. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sprechen dafür, dass Verbesserungen zur Einfügungsdämmung einer Stellwand in Holz-Myzelium-Verbundbauweise durch Optimierung der inneren Holzfurnierstruktur möglich sind. Die gesamte Einfügungsdämmung liegt allerdings noch bei einer relativ niedrigen Pegeldifferenz.

Eine klare Verbesserungsmöglichkeit ist, dass das Holz-Myzelium-Paneel mit massiveren Materialien ein- oder beidseitig verkleidet werden kann. Zusammengepresste Paneele aus Myzelium weisen eine ähnliche flächenbezogene Masse wie Gipskarton auf, und können zur Außenseite montiert werden. Eine Verkleidung mit massiveren Materialien würde die Einfügungsdämmung deutlich erhöhen, auch wenn die andere Seite offen zur Schallabsorption beibehalten wird. Darin besteht die weitere Möglichkeit, Stellwände mit einem massiveren Verkleidungsmaterial zu einer Seite und eine für Schallabsorption optimierte strukturierte Holz-Myzelium-Verbundoberfläche zur anderen Seite herzustellen, die für Schallschutz in Arbeitsstätten oder Großraumbüros verwendet werden kann.

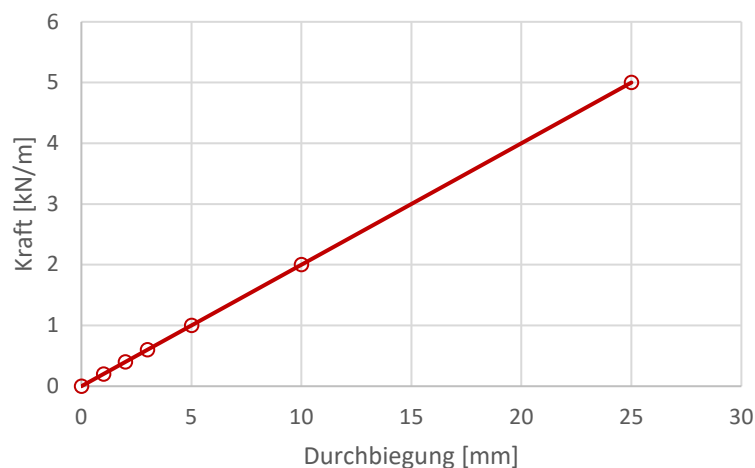
Eine beidseitige Verkleidung mit zusammengepressten Myzeliumpaneelen könnte das Herstellen von eingebauten Trennwänden ermöglichen. Eine Verbesserung zur Bau-Schalldämmung einer solchen Trennwand würde wahrscheinlich durch das Errichten zwei paralleler, einseitig verkleideter Holz-Myzelium-Paneele möglich sein. Solche Wandaufbauten würden keine Metall- oder Holzständer erfordern, und könnten Doppelständerwände als akustisch wirksame Trennwände ersetzen.

Optimierungspotenziale und weitere Forschungsthemen

Die akustischen Untersuchungen haben ergeben, dass die Schallabsorptionsfähigkeit, Einfügungsdämmung und Schallstreuung von Stellwänden in Holz-Myzelium-Verbundbauweise von der Geometrie der Holzfurnier- und Oberflächenstruktur abhängig sein können. Die Holzfurnierstruktur könnte zu einer Verbesserung der Schallabsorption beitragen, und ihr Zusammenhang mit der Oberflächenstruktur könnte Schallstreuungseffekte auslösen. Zukünftige Forschungsprojekte können die genauen Beziehungen zwischen geometrischen Parameter und akustischen Auswirkung präzisieren. Der Einfluss von Verkleidung mit massiveren Elementen wie zusammengepressten Myzeliumpaneelen ist noch nicht messtechnisch untersucht, und stellt eine wesentliche Forschungsfrage für die Weiterentwicklung in einer Trennwand dar.

Strukturelle Versuche an 1:1 Bauteilen

Um die strukturellen Eigenschaften der endgültigen Prototypen zu bewerten, wurde ein Belastungstest an einem ebenen Wandelement durchgeführt, das für die Ausstellung PopUp Campus hergestellt wurde. Der Test wurde mittels horizontaler Belastung der Wand mit Sandsäcken entlang der Mittellinie und Messung der Durchbiegung an der Unterseite durchgeführt. Vor dem Test wurde eine FE-Berechnung durchgeführt, um die erwartete Durchbiegung (U_z [mm]) bei den gegebenen Lasten (kg/m) zu berechnen (Abbildung 90). Das Material ist im Strukturmodell „elastisch isotrop“. Das bedeutet, dass für das Material ein lineares Verhalten angenommen wird (bis zum Bruch).



Quelle: ARUP

Abbildung 90

FE-Berechnung der Durchbiegung unter Belastung von einem Trennwand-Bauteil, bestehend aus einem 8x8 cm Holzrahmen und einem Holzverstärkungsgitter pro Seite.

Der vereinfachte physikalische Test wurde durchgeführt, indem die Wand zwischen zwei Stahltischen mit einer Höhe von 765 mm eingespannt wurde (Abbildung 91). Der Überlappungsabstand zwischen der Tischkante und der Wandkante betrug auf beiden Seiten 6 cm und entsprach der Dicke des inneren Holzrahmens. Um das Gewicht möglichst gleichmäßig entlang der Mittellinie zu verteilen, wurde eine 2 mm dicke Copolyesterplatte mit einer Breite von 330 mm entlang der Mittellinie der Platte als Auflage für die Gewichte angebracht. Ein Leica Disto D110 Laser-Messgerät wurde in der Mitte unter der Platte auf dem Boden platziert, um die Durchbiegung während der Belastung zu messen. Die Platte wurde schrittweise mit 10 kg schweren Sandsäcken belastet. Die Säcke wurden entlang der Mittellinie angeordnet, wobei versucht wurde, die Last so konzentriert wie möglich entlang dieser Linie zu halten. Nach jedem Sack wurde die Durchbiegung mit einem Laser gemessen und aufgezeichnet. Die maximale Belastung betrug 420 kg, was 42 Sandsäcken entspricht.

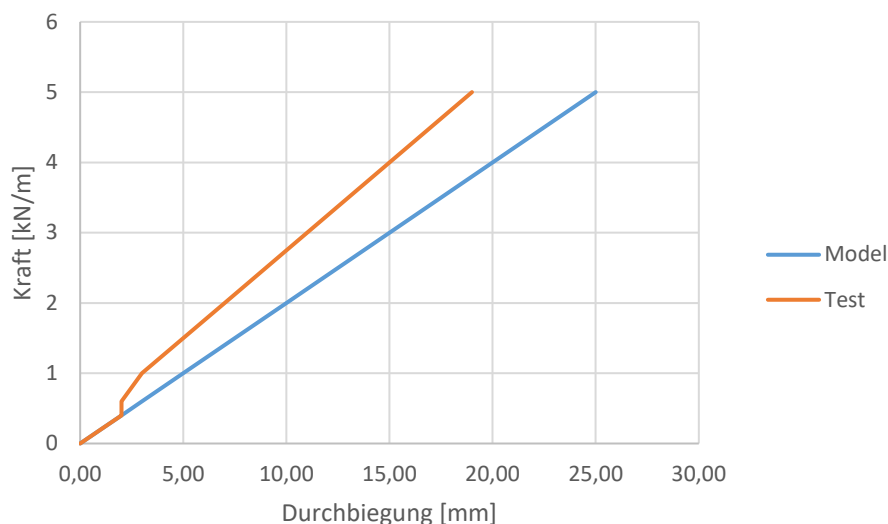


Quelle: FG Experimentelles und Digitales Entwerfen, Universität Kassel

Abbildung 91

3-Punkt Biegeversuch der Myzeliumtrennwand der POP-UP Campus Ausstellung mit Sandsäcken. Links: Aufgeständerte Wand. Rechts: Unter Belastung mit 420kg. Die Durchbiegung wurde mit einem Lasermessgerät gemessen.

Das resultierende Belastungsdiagramm zeigt eine nahezu lineare Beziehung zwischen Belastung und Durchbiegung, was die Annahme bestätigt, dass das Material ein elastisches isotropes Verhalten aufweist, wie es in der Simulation definiert wurde. Der physische Test zeigt jedoch im Vergleich zur Simulation geringere Durchbiegungswerte (ca. -30 %), mit einer Gesamtdurchbiegung von 7 mm bei 200 kg Last, gegenüber einer erwarteten Durchbiegung von 10 mm (Abbildung 92).



Quelle: FG Experimentelles und Digitales Entwerfen, Universität Kassel

Abbildung 92

Vergleich der Berechnungsergebnisse aus der Modellierung von Arup und dem 3-Punkt Biegeversuch einer Trennwand.

Bei einer Spitzenlast von 420 kg zeigte der Prototyp eine Durchbiegung von 16 mm. Dieser Unterschied in der Durchbiegung zwischen dem digitalen Modell und dem physischen Prototyp könnte auf die Verwendung einer anderen Myzelquelle zurückzuführen sein, die härtere Hanfpartikel enthielt als die, die in anderen Strukturtests verwendet wurde. Die Präzision der Modellierung könnte sich daher über die Integration weiterer Testergebnisse unterschiedlicher Myzelquellen verbessern. Nach dem Entfernen der Last kehrte das Material fast in seinen ursprünglichen Zustand zurück, mit einer Durchbiegung von nur 1 mm zwischen vor und nach der Belastung. Bei der Sichtprüfung konnten keine Risse oder signifikanten Verformungen am Prototyp festgestellt werden.

AP 5 TECHNOLOGIEBEWERTUNG (ARUP)

AP 5.1 Lebenszyklusbewertung

Zusammenfassung

Arup hat eine Lebenszyklusanalyse (LCA) der Myzel-Verbundstoffwand durchgeführt, um die gesamten Umweltauswirkungen besser zu verstehen. Die Trennwand wurde in drei Hauptkomponenten modelliert: eine hanfbasierte Myzel-Verbundplatte, ein integriertes 3D-gedrucktes Furniergitter und ein einkapselnder Holzrahmen. Die Ziele der Studie waren:

- Ein Verständnis der wichtigsten „Hot Spots“ und/oder Stellschrauben zu gewinnen, die die Umweltbelastung insgesamt beeinflussen,
- Empfehlungen für die Optimierung in den weiteren Phasen des Produktdesigns, der Materialauswahl und der Auswirkungen auf den Lebenszyklus zu geben; und
- Beiträge zu den Überlegungen für die Skalierung der Produktion des Produkts vom „Labor“ auf die „industrielle“ Ebene zu liefern.

Der gesamte Lebenszyklus („Cradle to Grave“) wurde für ein Paneel über einen Referenzlebenszyklus von 8 Jahren untersucht. Darüber hinaus wurden alternative Szenarien für das Ende des Lebenszyklus bewertet. Es wurden insgesamt elf (11) Wirkungskategorien berechnet und angegeben, um einen ganzheitlichen Überblick über die Umweltauswirkungen des Systems zu erhalten. Neun dieser Kategorien entsprechen der anerkannten Industrienorm EN15804, die auch den Klimawandel (globale Erwärmung) einschließt. Landnutzung und Wasserverbrauch wurden als zusätzliche Kategorien (10th und 11th) hinzugefügt, da dies für organische Materialprozesse als wichtig erachtet wurde. Die Ergebnisse der Studie im Hinblick auf die Gesamtziele sind wie folgt:

Was die Hotspots betrifft, so waren die Produktions- und die Endlebensphase die Lebenszyklusphasen mit den größten Umweltauswirkungen. Das Myzel-Verbundpaneel (Rohstoffe, Verpackung und Strom) und der Holzrahmen (Materialentsorgung) waren die Komponenten, die im Vergleich zu den Komponenten für die Systemmontage und dem Furnierrost am meisten dazu beitrugen. Zu den wichtigsten Empfehlungen für die Verbesserung des Systems gehören:

1. Überprüfung des Systemdesigns für die Demontage am Ende der Lebensdauer, insbesondere die Verbindungsdetails und -materialien für den Holzrahmen und die Trennung von Myzel- und Furniergitter;
2. Evaluierung erneuerbarer Energiequellen, insbesondere für das Wachstum/Trocknen des Myzels und das Schweißen des Furniers;
3. Rationalisierung der Myzelproduktionsphase zur Minimierung des Material-/Energieverbrauchs und des Abfalls.

Zu den wichtigsten Empfehlungen für künftige Studien gehören:

- Bewertung der Vorteile der Kompostierung von Myzel im Vergleich zu potenziellen Wiederverwendungsszenarien über die derzeitigen Systemgrenzen hinaus (Modul D);
- Bewertung der Annahmen über die Leistung des Systems während der Nutzung, da davon ausgegangen wurde, dass das Paneel nicht repariert werden kann (und daher im Falle einer Beschädigung ersetzt/entsorgt werden müsste); und
- Suche nach zusätzlichen quantitativen Daten über die Produktion von Furnierspulen und die nachhaltige Beschaffung für den Holzrahmen.
- Durchführung einer vollständigen zusätzlichen Ökobilanz mit der gleichen Methodik, um einen echten Vergleich mit einem Referenzprodukt zu ermöglichen. Ein einleitender Vergleich ist in dieser Studie enthalten.

Die Studie kam zu dem Schluss, dass der Myzel-Verbundwerkstoff und das Furniergitter zwar vielversprechende Ergebnisse als umweltfreundliches Material für die Verwendung als Innentrennwand

gezeigt haben, dass aber ein ganzheitlicher Ansatz für die Lebenszyklusbewertung von entscheidender Bedeutung ist, insbesondere zur Festlegung geeigneter Optimierungspotenziale. So wurden beispielsweise sekundäre Aspekte wie die Stromquelle/Effizienz für das Ultraschallschweißen und das Myzelwachstum sowie der Holzrahmen, der zur Unterstützung der Myzelplatte verwendet wird, als wichtige Bereiche für Verbesserungen hervorgehoben.

Einführung

Das Ziel der durchgeführten Lebenszyklusanalyse war es, die Umweltauswirkungen eines Prototyps in Originalgröße zu bewerten, der vom Team des Karlsruher Instituts für Technologie & EDEK an der Universität Kassel hergestellt wurde. Die Studie wurde zusätzlich zur strukturellen und akustischen Leistung durchgeführt, um es dem Designteam zu ermöglichen, die gesamten Umweltauswirkungen des entwickelten Systems zu verstehen.

Die Ergebnisse der Studie sollen in erster Linie als Grundlage für die nächsten Schritte der Produktentwicklung dienen. Die Untersuchung der Myzelkomponente wurde auch als Erweiterung einer früheren Bewertung durch das Karlsruher Institut für Technologie durchgeführt (Volk et al., 2024). Die Ökobilanz ist eine Technik zur Bewertung der Umweltaspekte und der potenziellen Auswirkungen, die mit einem Produktsystem oder Prozess verbunden sind:

4. Erstellung eines Katalogs der relevanten Inputs und Outputs eines Produktsystems;
5. Bewertung der potenziellen Umweltauswirkungen, die mit diesen Inputs und Outputs verbunden sind; und
6. Interpretation der Ergebnisse der Bestandsanalyse und der Folgenabschätzung in Bezug auf die Ziele der Studie.

Diese Studie wurde gemäß den Anforderungen der folgenden Normen durchgeführt:

- ISO 14040:2006 Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmen (ISO14040); und
- ISO 14044:2006 Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Leitlinien (ISO14044).

Auszüge aus der Norm sind in diesem Kapitel in den jeweiligen Abschnitten als Referenz enthalten.

Zielsetzung

„Das Ziel einer Ökobilanzstudie muss eindeutig die beabsichtigte Anwendung, die Gründe für die Durchführung der Studie, das beabsichtigte Publikum (d. h. die Personen, denen die Ergebnisse der Studie mitgeteilt werden sollen) und die Angabe, ob die Ergebnisse für vergleichende Aussagen verwendet werden sollen, die der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden sollen, enthalten.“

ISO 14044:2006 Abschnitt 4.2.2

Anknüpfend an eine frühere Ökobilanz des Myzel-Verbundmaterials zielt diese Studie darauf ab, die Umweltauswirkungen des Materials als Teil einer akustischen Trennwand über eine Nutzungsdauer von 8 Jahren zu bewerten.

Das System besteht aus den folgenden drei Schlüsselementen:

1. Verbundpaneel auf Myzelbasis;
2. Furniergitter; und
3. Holzrahmen

Das auf Myzel basierende Verbundpaneel ist ein Myzel-Verbundmaterial mit Hanf-Substrat. Das 3D-gedruckte und geschweißte Furniergitter ist als Strukturträger in den Myzelium-Verbund eingebettet. Das System wird durch einen Rahmen aus genormtem Brettschichtholz gekapselt.

Ziel der Ökobilanz ist es, quantitative Daten zu liefern, um das Verständnis für die folgenden Aspekte zu verbessern:

- Verstehen der Stellschrauben der gesamten Umweltauswirkungen;
- Bereitstellung von Leitlinien für die Optimierung in den weiteren Phasen des Produktdesigns, der Materialauswahl und der Auswirkungen auf den Lebenszyklus;
- Beiträge zu Überlegungen für die Skalierung der Produktion des Produkts von der „Labor“- auf die „industrielle“ Ebene liefern; und
- Bereitstellung von Daten für einen Vergleich mit den auf dem Markt befindlichen Referenz-Wänden.

Die Auswirkungen auf den Lebenszyklus werden für eine Reihe von Umweltauswirkungskategorien quantifiziert.

Grundlagen & Festlegung der Funktionseinheit

„Der Umfang einer Ökobilanz muss die Funktionen (Leistungsmerkmale) des untersuchten Systems eindeutig festlegen. Die funktionale Einheit muss mit dem Ziel und dem Umfang der Studie übereinstimmen.

Einer der Hauptzwecke einer funktionalen Einheit besteht darin, eine Referenz zu liefern, auf die die Eingabe- und Ausgabedaten (im mathematischen Sinne) normiert werden. Daher muss die funktionale Einheit klar definiert und messbar sein.

Nach der Wahl der funktionalen Einheit ist der Referenzfluss zu definieren. Vergleiche zwischen Systemen erfolgen auf der Grundlage der gleichen Funktion(en), die durch die gleiche(n) funktionale(n) Einheit(en) in Form ihrer Referenzflüsse quantifiziert wird/werden.

Wenn zusätzliche Funktionen eines der Systeme beim Vergleich der funktionalen Einheiten nicht berücksichtigt werden, sind diese Auslassungen zu erläutern und zu dokumentieren. Alternativ können Systeme, die mit der Erbringung dieser Funktion verbunden sind, der Grenze des anderen Systems hinzugefügt werden, um die Vergleichbarkeit der Systeme zu erhöhen. In diesen Fällen sind die gewählten Verfahren zu erläutern und zu dokumentieren.“

ISO 14044:2006 Abschnitt 4.2.3.2

Funktionelle Einheit: Ein Trennwandsystem mit einer akustischen Leistung von 10 dB über einen Referenzstudienzeitraum von 8 Jahren.

Referenzflüsse: Ein Trennwandsystem mit einer Fläche von 2,32 m² (2,52 m hoch, 0,92 m breit) und einer Dicke von 0,10 m

Bezugszeitraum: Daten, die während der Herstellung des Prototyps im Jahr 2023 gesammelt wurden, und vorherige Studien des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

Die funktionelle Einheit wurde auf der Grundlage der tatsächlichen Größe des entwickelten Prototyps festgelegt. Der Prototyp wurde für die beabsichtigte Verwendung als akustische Trennwand für eine interne Büroumgebung entwickelt.

Hauptkomponenten und Bauteile

Das System besteht aus den folgenden drei Bauteile bzw. Komponenten:

- Verbundplatte auf Myzel-Basis. Über das Herstellungsverfahren und die Materialeigenschaften des Mycel-Verbundmaterials wurde von Schroter (2022)/ KIT University ausführlich berichtet.
- Ein Furniergitter aus in Europa beschafftem Bergahornholz, das 3D-gedruckt und ultraschallverschweißt wird.

- Ein Holzrahmen, der aus einem inneren Rahmen mit einem Profil von 6 cm x 6 cm und zwei äußeren, schmalen Rahmen (mit einem Profil von 2 cm x 2 cm) besteht. Das für den Rahmen verwendete massive Bauholz ist Brettschichtholz aus Fichte.

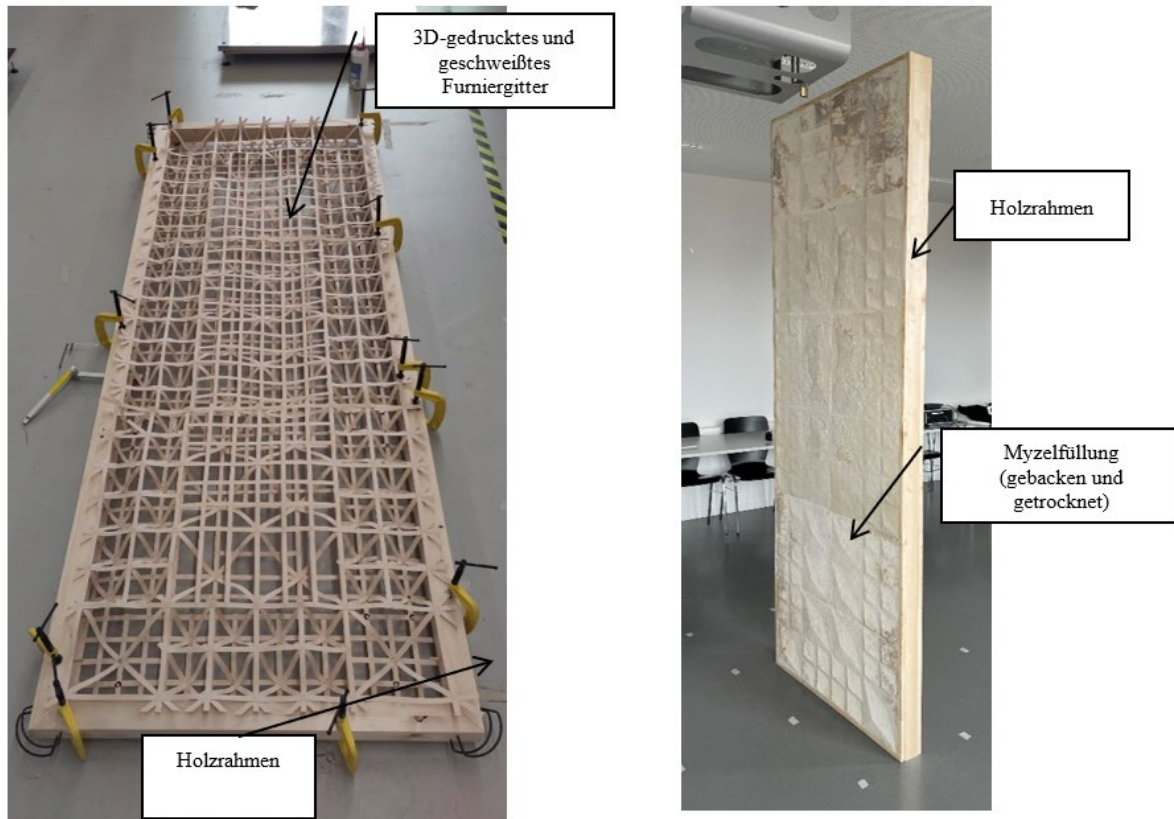
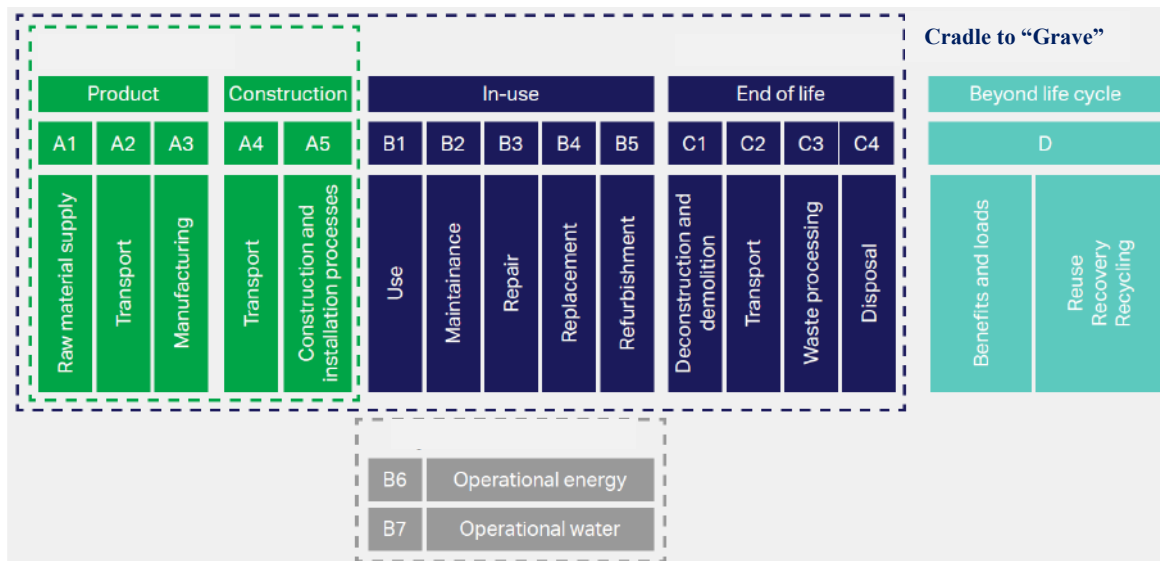


Abbildung 93
Bauteile und Hauptkomponenten des Prototyps.

Quelle: ARUP

Phasen des Lebenszyklus

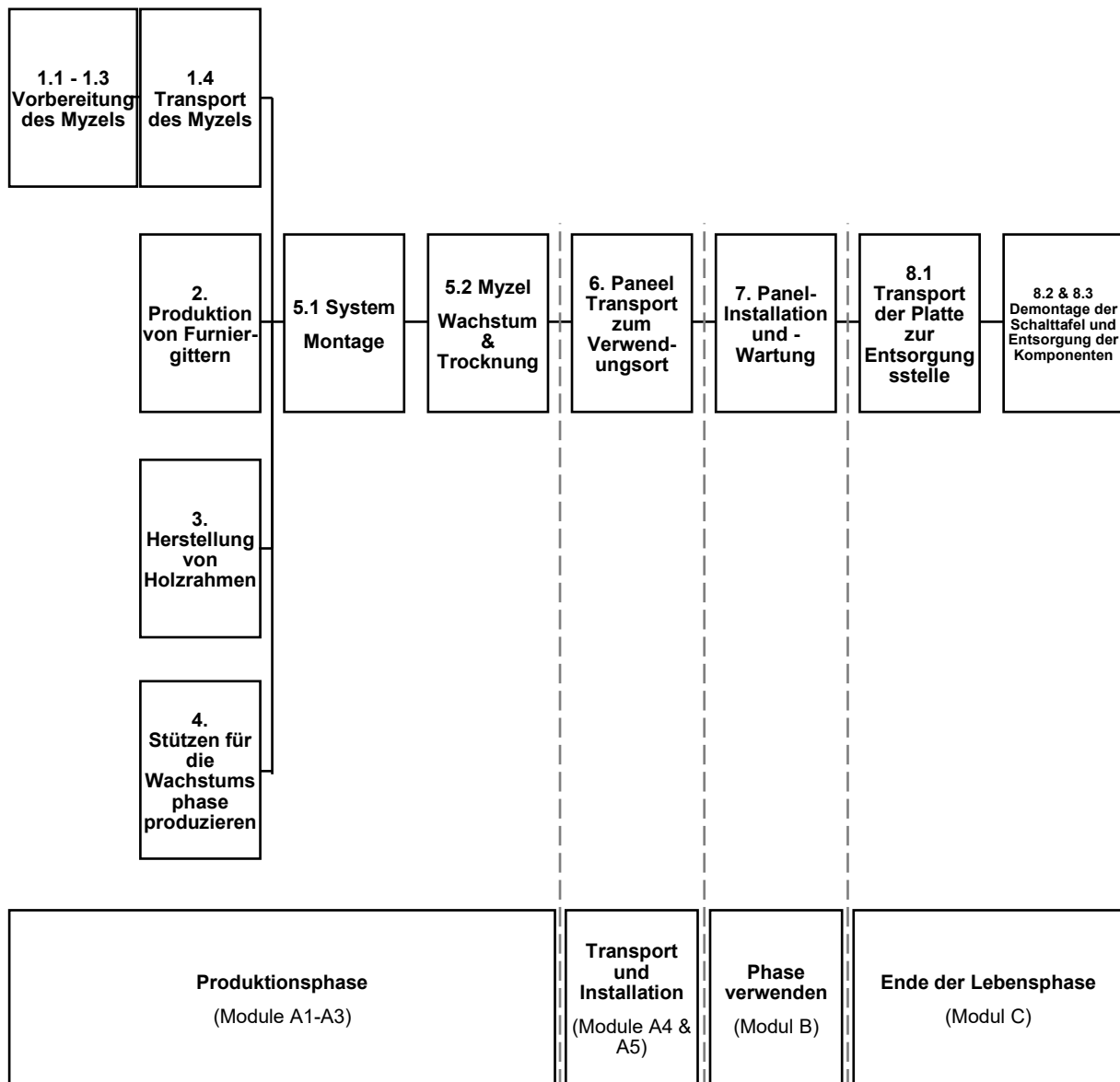
Die europäische Norm EN 15804:2012 wurde verwendet, um die Prozesse zu definieren, die in die Systemgrenze einbezogen werden sollen. Es handelt sich um die europäische Norm für „Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte“. Die Norm bietet den Rahmen für die Bewertung der Umweltauswirkungen der gebauten Umwelt. Die folgende Abbildung veranschaulicht die Definition der Lebenszyklusstadien aus dieser Norm, die für diese Bewertung übernommen wurde. Die Definition „from Cradle to Grave“ ist in der blau gestrichelten Linie in der folgenden Abbildung 94 enthalten. Es ist zu beachten, dass für die Zwecke dieser Studie die Module A4 und A5 als „Transport und Installation“ bezeichnet werden.



Quelle: ARUP

Abbildung 94
Net-Zero-Gebäude: Arup World Business Council for Sustainable Development (angepasst von ISO 4040:2006/EN15804:2012).

Die nachfolgende Abbildung 95 veranschaulicht die entsprechenden Lebenszyklusphasen, die für die vorliegende Studie verwendet wurden. Weitere Erläuterungen zu den einzelnen Phasen sind auf den folgenden Seiten zu finden, wobei die einzelnen Phasen im Anhang ausführlich beschrieben werden.



Quelle: ARUP

Abbildung 95
Lebenszyklusphasen des untersuchten Prototyps (Demonstrator).

Herstellungsprozess

Die einzelnen Stufen des Herstellungsprozesses werden in Tabelle 9 erläutert. Die Einzelheiten zum AKI-Verzeichnis sind im Anhang zu diesem Bericht beigefügt.

Tabelle 9
Herstellungsprozessphasen

Ref	Phase / Stufe	Beschreibung
Produktphase (Module A1-A3)		
1. Vorbereitung des Myzels		
1.1	Vorbereitung der Agarplatten	Das Myzel wird zunächst auf Agarplatten vermehrt und dann in eine flüssige Nährlösung gegeben, aus der die Myzelsamen nach einiger Zeit der Bebrütung entfernt werden (Elsacker et al., 2020). [Aussage aus dem Papier der MA Schroeter]
1.2	Myzelium-Samenvorbereitung	Als Hauptsubstrat wurde Hanfschäben verwendet, die von Hornbach bezogen wurden (einem deutschen Baumarkt) und die Myzelbrut wird selbst auf Roggenkornsubstrat gezüchtet. Der Verbundstoff ist für den Transport verpackt.
1.3	Myzelium Komposit Vorbereitung	
1.4. Myzelium Transport		
1.4	Transport zum Labor	Standardfrachttransport per Lkw, innerhalb Deutschlands
2. Herstellung von Furniergittern		
2.1	Das Furniergitter herstellen	Die Furniergitter werden mit Hilfe eines Roboterarms hergestellt, an dem ein Ultraschallschweißgerät montiert ist. Es werden keine Klebstoffe verwendet, und der Prozess wird durch den Roboter automatisiert.
3. Holzrahmenbau Produktion		
3.1	Herstellen des Holzrahmens	Aus Standard-Bauholz, das aus Deutschland bezogen wird, wird ein individueller Rahmen hergestellt. Die Stämme werden mit einer Hobelmaschine und einer Tischkreissäge in einen 6 cm² und zwei kleinere 2 cm² Rahmen geschnitten.
4&5. Systemaufbau & Wachstum		
4.1	Herstellung der Träger für die Wachstumsphase	Es wurde eine Struktur gebaut, die das System während der Wachstumsphase des Myzels umrahmt und stützt. Ein Schlüsselement, das in die Studie einbezogen wurde, war die Multiplexplatte, die die äußere Form und die geriffelte Oberfläche des Myzels bildet. Die Riffelungen werden mit einer elektrischen Fräsmaschine hergestellt und geschnitten. Die Platte wird mit 1700 ml Lack versiegelt. Die Herstellung der Platte wurde in die Systemgrenze einbezogen, da man davon ausging, dass sie nennenswerte Auswirkungen haben würde (dies wurde in der Analyse nachgewiesen). Das Entwicklungsteam bestätigte jedoch, dass die Platte für die künftige Produktion des Prototyps wiederverwendet werden würde. Dies wird in den Empfehlungen berücksichtigt.

5.1	Montage des Systems	An der Innenseite des Holzrahmens werden Dübel angebracht, um dem Myzel zusätzliche Befestigungsmöglichkeiten zu bieten. Der vorläufige Myzelverbund wird mit einem elektrischen Handrührer zerkleinert, bevor er in den Tragrahmen gelegt wird.
5.2	Wachstumsphase des Myzels	Das Myzel befindet sich in einer Wachstumskammer: einem mit Aluminium ausgekleideten Raum, der der Universität gehört. Alle 2-3 Tage wird dem Myzel Wasser zugeführt, und es wird ein Befeuchter verwendet. Die Trocknung des Myzels wird durch zwei Infrarotpaneele und einen kleinen Ventilator ermöglicht.

Transport und Installation (Module A4 & A5)

6. Paneel Transport zum Ort der Verwendung

6.1	Transport von Platten	Sobald das System getrocknet (und damit versiegelt) ist, wird in der Analyse davon ausgegangen, dass das System über einen Standardtransport per Lkw zu einem Einsatzort innerhalb Deutschlands transportiert wird.
-----	-----------------------	---

Verwendung (Modul B)

7. Installation und Wartung des Panels

7.1	Einbau des Panels	Es wird davon ausgegangen, dass die Platte bereits auf die richtige Größe zugeschnitten ist und von Hand montiert wird (keine Auswirkungen auf die Umwelt). Möglicherweise sind Halterungen zur Unterstützung erforderlich, die jedoch nicht zum Kern der Funktion des Systems gehören und daher nicht in die Bewertung einbezogen wurden.
7.2	Wartung	Die Pflege des Myzel-Verbundstoffs erfolgt nur durch einen Anstrich mit einem Öl auf natürlicher Basis alle zwei Jahre zum Schutz vor Insekten für die Innenanwendung. Die gesamte Nutzungsphase wird mit 8 Jahren angesetzt.

Ende des Lebens (Modul C)

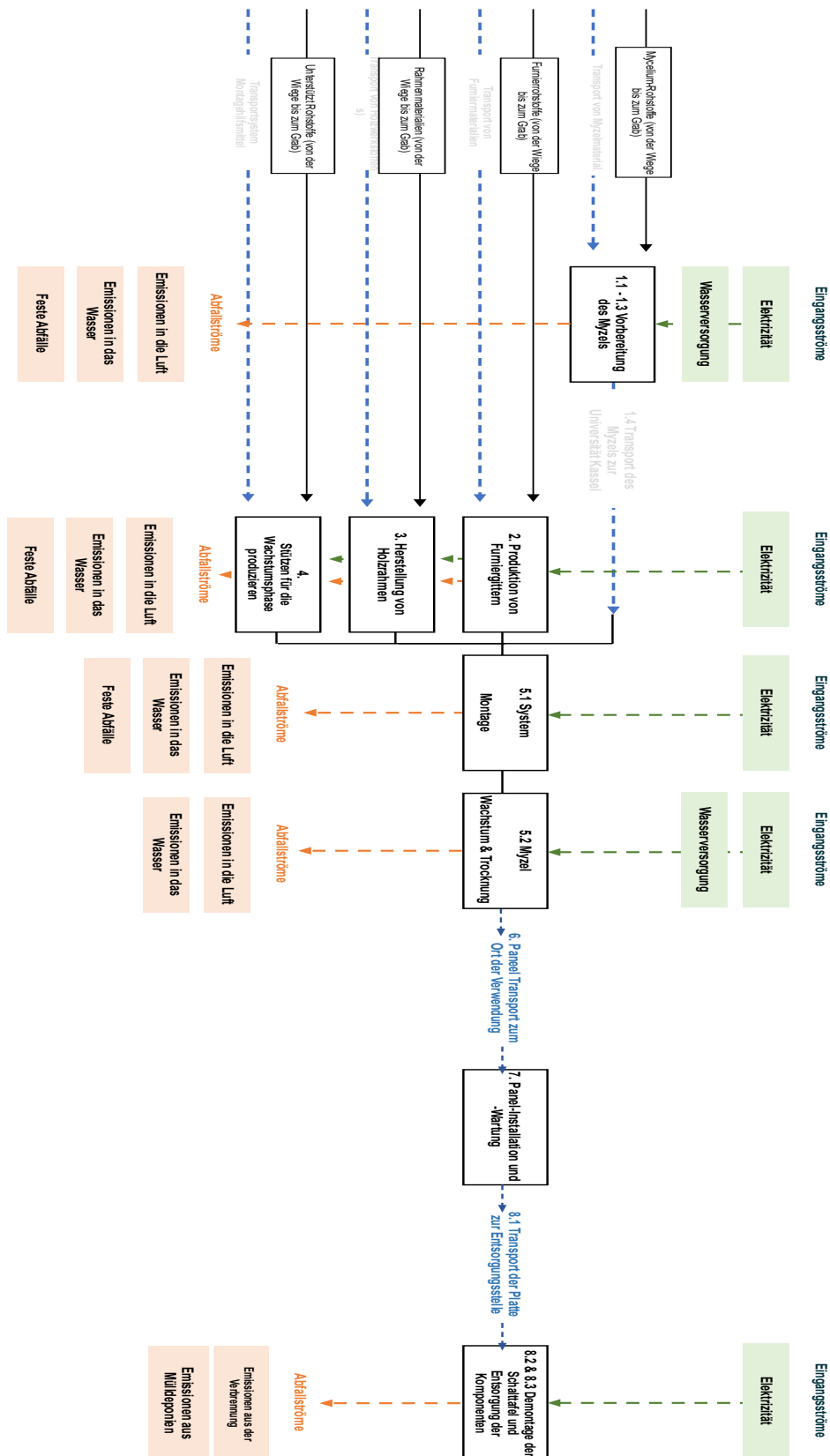
8.1	Paneel für den Transport am Lebensende	Am Ende der Lebensdauer des Systems wird in der Analyse davon ausgegangen, dass das System per Standard-LKW-Transport zu einem Ort in Deutschland transportiert wird, an dem es demontiert und entsorgt wird. Es wird darauf hingewiesen, dass je nach Ablauf der Demontage und der individuellen Verarbeitung der Komponenten zusätzliche Transporte erforderlich sein können, die jedoch über den Lebenszyklus des Systems als vernachlässigbar angesehen wurden (unter der Annahme, dass die Entsorgung innerhalb Deutschlands erfolgt).
8.2	Demontage und Entsorgung des Rahmens	Da der Holzrahmen mit Leim zusammengebaut wird, gilt der Rahmen als nicht wiederverwertbar und wird daher entsorgt. Die Systemgrenze umfasst die Altholzprozesse (Zerkleinerung und Behandlung), um das Material in ein Abfallnebenprodukt zu verwandeln.

8.3	Myzel- und Furnierentsorgung	Im Basisszenario wird davon ausgegangen, dass das Myzel auf einer Deponie kompostiert wird. Diesem Punkt wurde ein für biologisch abbaubare Abfälle typischer Entsorgungsprozess zugeordnet, der Zerkleinerung, anaerobe Vergärung und Zersetzung umfasst. Das Planungsteam ist der Ansicht, dass der Furnier-Myzel-Verbundstoff geschreddert und für den Anbau neuer Myzel-Verbundstoffe verwendet werden kann. Dazu müsste jedoch das Furnier abgetrennt werden, so dass die Entsorgung als Basisszenario festgelegt wurde. Alternative End-of-Life-Szenarien werden in einem späteren Abschnitt untersucht.
-----	---------------------------------	--

Quelle: ARUP

Randbedingungen des untersuchten Systems

Diese Ökobilanz für die Trennwand untersucht die Auswirkungen über den gesamten Lebenszyklus hinweg und stellt eine Bewertung von „Cradle to Grave“ dar. Die Auswirkungen der Materialproduktion und -verarbeitung sind in der Systemgrenze enthalten. Die Systemgrenze und die wichtigsten Verarbeitungsschritte für die Trennwand sind im folgenden Diagramm dargestellt.



Quelle: ARUP

Abbildung 96
Systemgrenze und die wichtigsten Verarbeitungsschritte für die Trennwand.

Ausschlüsse

Nachfolgend ist eine Liste der wichtigsten Ausnahmen mit Begründung zu finden:

1. Materialien mit vermeintlich minimalen/vernachlässigbaren Auswirkungen
 - a. Leim für den Holzrahmenbau/Schalungsplatte
 - b. Kartonverpackung der Furnierspule
 - c. Nebenabfälle, die dadurch entstehen, dass das System als Prototyp hergestellt wird, z. B. Plastikhandschuhe (schätzungsweise 15 Paar pro Prototyp) und Papierhandtücher
 - d. Manuelle Prozesse
2. Vorhandene Ausrüstung oder Infrastruktur, die von der Universität mehrfach genutzt wird
 - a. Herstellung von Geräten für die Fertigung, die sich zuvor im Besitz der Universität befanden bzw. von dieser für andere Zwecke wiederverwendet werden sollen. Zum Beispiel: der 3D-Drucker, der Roboter, der Schweißisch, die Plexiglas-Plastikformschicht
 - b. Die Herstellung der Myzelwachstumschamber

Berechnungsansatz

LCA-Modellierungssoftware

Ökobilanzen werden mit computergestützter Software durchgeführt, die eine Reihe von Eingaben auf der Grundlage der Systemgrenzen analysiert und ein quantitatives Ergebnis liefert, das überprüft und interpretiert wird. Diese LCA wurde mit der LCA-Software SimaPro 9.5 modelliert. SimaPro steht für „System zur integrierten Umweltbewertung von Produkten“. Aufgrund seines generischen Aufbaus hat sich seine Anwendung von der Produktanalyse auf die Analyse von Prozessen und Dienstleistungen ausgeweitet. SimaPro 9.5 bietet ein Werkzeug zur Erfassung, Analyse und Überwachung der Umweltleistung von Produkten und Dienstleistungen. Komplexe Lebenszyklen können auf systematische und transparente Weise modelliert werden in Anlehnung an die Empfehlungen der ISO 14040 Serie.

Datenbanken

In den Fällen, in denen keine Primärdaten zur Verfügung standen, wurden die Sekundärdaten überwiegend aus der Datenbank Ecoinvent v3.8 unter Verwendung des APOS-Modells („at the point of substitution“) entnommen. Die Datenbank enthält Lebenszyklusinventardaten (LCI) aus verschiedenen Sektoren wie Energieversorgung, Verkehr, Biokraftstoffe und Biowerkstoffe, Massen- und Spezialchemikalien, Baumaterialien, Holz und Abfallbehandlung. Sie besteht aus über 17.000 AKI-Datensätzen, von denen jeder einen AKI auf der Ebene eines Prozesses beschreibt. Wenn weder Primärdaten noch Daten aus der ecoinvent-Datenbank für ökologische Produkte verfügbar waren, wurde Agribalyse verwendet. Obwohl die Datenbank hauptsächlich Daten für in Frankreich hergestellte Produkte enthält, widmet sich die Agribalyse-Datenbank der Erstellung von Lebenszyklusinventaren (LCI) für landwirtschaftliche Produkte. Die öffentliche AKI-Datenbank mit mehr als 100 Produkten und ein detaillierter Bericht über die Methodik wurden im Jahr 2014 veröffentlicht. Die Substitutionen und Annahmen sind nachfolgend erklärt.

Lebenszyklus-Inventarisierung

„Die für eine Ökobilanz ausgewählten Daten hängen von Ziel und Umfang der Studie ab. Diese Daten können an den Produktionsstandorten erhoben werden, die mit den einzelnen Prozessen innerhalb der Systemgrenze verbunden sind, oder sie können aus anderen Quellen gewonnen oder berechnet werden. In der Praxis können alle Daten eine Mischung aus gemessenen, berechneten oder geschätzten Daten enthalten.“ (ISO 14044:2006 Abschnitt 4.2.3.5). Die detaillierte Sachbilanz einschließlich der Materialmengen und Prozesse ist im Anhang 2 zu finden.

Verfahren der Datenerhebung

Die Daten wurden vom Designteam mithilfe einer Vorlage zur Erfassung von Ökobilanzdaten gesammelt. Diese wurde ständig ergänzt, um sicherzustellen, dass die genauesten und präzise Daten erfasst und dann in das Modell eingegeben wurden. Dieser Prozess umfasste Überprüfungen sowie mehrere Treffen zwischen dem Planungsteam und Arup. Die Vorlage für die Erfassung von Ökobilanzdaten umfasste die folgende Tabelle.

Tabelle 10
Erfassung der Ökobilanzdaten. Kopien der LCA-Inventardaten sind im Anhang enthalten.

Parameter	Erläuterung erforderlich
Art der Verwendung	Was sind die Endprodukte?
Montageelemente	Welche Elemente werden für die Herstellung des Endprodukts verwendet?
Funktionelle Einheit	In welcher Einheit würden wir die Umweltauswirkungen aufzeigen?
Verwendete Materialien	Welche Materialien werden für den Zusammenbau der einzelnen Elemente benötigt?
Verwendete Menge der einzelnen Materialien	Wie viele m ³ , kg, m ² + Dicke [m] werden benötigt?
Technische Informationen	Geben Sie einige Informationen zu den technischen Merkmalen, wie z. B: • Thermisch • Akustisch • Strukturell • Abmessungen
Standort der Produktion	Wesentlich für die Umrechnung des Energieverbrauchs in Kohlenstoffemissionen. Basierend auf dem Energiemix pro Land.
Lebenserwartung	Erforderlich für die Bewertung der Auswirkungen des Austauschs von Produkten innerhalb eines Gebäudes
Herstellungsverfahren	Allgemeine Beschreibung des Prozesses.
Ende des Lebens	Was wird mit den Komponenten am Ende ihrer Lebensdauer geschehen? Prüfen Sie Optionen wie die Möglichkeit der Demontage, Wiederverwertbarkeit, Wiederverwendung oder Entsorgung auf einer Deponie.
Für jede Lebenszyklusphase (A1, A2, ... bis Modul C)	Kurze Beschreibung der erforderlichen Prozesse, und Energieverbrauch im Zusammenhang mit den beschriebenen Prozessen in kWh

Quelle: ARUP

Beschränkungen und Annahmen

Das LCA-Modell wurde unter Verwendung der verfügbaren Daten entwickelt, die entweder von der Universität KIT/Kassel, der Datenbank Ecoinvent v3.8 und/oder Agribalyse bereitgestellt wurden. Datenlücken wurden mit

den bestmöglichen Schätzungen von Chemikalien und Prozessen gefüllt, um bei Unbekannten indikative Beiträge zu den Auswirkungen zu liefern. In Fällen, in denen die zur Verfügung gestellten Daten nur begrenzt aussagekräftig sind, wurden entsprechende Annahmen getroffen, die im Folgenden zusammengefasst werden:

1. **Die genauen Materialmengen sind nicht bekannt:** Bei der Furnierspule war es für das Konstruktionsteam trotz aller Bemühungen eine große Herausforderung, die genaue Menge des Produkts und der Prozesse pro Spule zu ermitteln. Außerdem konnten zum Zeitpunkt dieser Studie keine EPDs gefunden werden. Daher ist ein Verständnis des Produktionsprozesses, wie er in Abschnitt 3.5 beschrieben wurde wichtig, um die am besten geeignete Datenquelle aus der Ecoinvent 3.8-Datenbank zu finden.
2. **Bestimmte Werkstofftypen sind in der Ecoinvent-Datenbank v3.8 nicht verfügbar.** Wenn ein Material nicht genau in der Datenbank enthalten war, wurde ein ähnliches Material als Ersatz verwendet.
3. **Transport:** angenommene 500 km in Deutschland im Durchschnitt, Gütertransport. Dies basiert auf einer Annahme, die frühere Studien in Europa vergleicht, sowie auf dem Referenzwert von 300 km für das Vereinigte Königreich von der Royal Institution of Chartered Surveyors (einem weltweiten Berufsverband für die gebaute Umwelt). Die daraus resultierenden Auswirkungen auf den Verkehr waren in dieser Studie minimal.

Die folgende Tabelle zeigt die wichtigsten Ersatzmaterialien, die nach einer Überprüfung als Stellvertreter ausgewählt wurden:

Tabelle 11
Ersatzmaterialien

Komponente	Material	Ausgewählter Stellvertreter	Quelle
Mycelium	Agar	Gelatine (wie vom KIT empfohlen)	Agrybalyse
Furnierspule	Verfahren zur Herstellung von Ahorn-/Saftholzfurnieren	Sägeholz (Hartholz) mit ähnlichen Produktionsverfahren wie bei der Herstellung von Sperrholz und Ersatz von Leim durch Vinylacetat, ähnlich wie bei PVA.	Ecoinvent 3.8

Quelle: ARUP

Bewertung der Auswirkungen auf den Lebenszyklus

Modell der Folgenabschätzung

Wie bereits erwähnt, wurde die Bewertung der Auswirkungen auf den Lebenszyklus mit der LCA-Software SimaPro 9.5 modelliert, einem Werkzeug zur Erfassung, Analyse und Überwachung der Umweltleistung von Produkten und Dienstleistungen. Das Modell folgt den Richtlinien ISO 14040 und ISO 14044. Die ausgewählten Wirkungskategorien stammen aus der Methode ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.08 / World (2010) H. Diese Methode wurde verwendet, da sie ein international anerkannter Rahmen für die Folgenabschätzung von Produkt-LCAs ist.

Kategorien der Folgenabschätzung

„Die Auswahl der Wirkungskategorien, der Kategorieindikatoren und der Charakterisierungsmodelle muss sowohl begründet als auch mit dem Ziel und dem Umfang der Ökobilanz vereinbar sein. Die Auswahl der Wirkungskategorien muss eine umfassende Reihe von Umweltaspekten im Zusammenhang mit dem untersuchten

Produktsystem widerspiegeln, wobei Ziel und Umfang zu berücksichtigen sind.“ (ISO 14044:2006 Abschnitt 4.4.2.2.1)

Der Sonderbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC) über die globale Erwärmung hebt die Klimaauswirkungen bei der derzeitigen globalen Erwärmung von ca. 1°C sowie die Risiken einer Erwärmung um 1,5°C und die irreversiblen Schäden bei einer Erwärmung um 2°C oder mehr als eine wichtige globale Priorität hervor. Um jedoch einen ganzheitlichen Überblick über die Umweltauswirkungen des Systems zu erhalten, wurden zusätzliche Wirkungskategorien berücksichtigt (insgesamt elf). Neun dieser Kategorien entsprechen der anerkannten Industrienorm EN15804, die auch den Klimawandel (globale Erwärmung) einschließt. Landnutzung und Wasserverbrauch wurden als zusätzliche Kategorien (10. und 11.) hinzugefügt, da dies für die Verarbeitung organischer Materialien als wichtig erachtet wurde. Die folgende Tabelle fasst die in die Analyse einbezogenen Wirkungskategorien zusammen.

Tabelle 12
Zusammenfassung der in die Analyse einbezogenen Wirkungskategorien

Kategorie "Auswirkungen"	Methode	Einheiten	Beschreibung ¹
Globale Erwärmung	ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.08 / World (2010) H	kg CO ₂ eq	Globales Erwärmungspotenzial (Global Warming Potential), das den Anstieg der Infrarotstrahlung eines Treibhausgases über einen Zeithorizont von 100 Jahren berechnet.
Abbau der Ozonschicht in der Stratosphäre	ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.08 / Welt (2010) H	kg CFC11-Äq	Er bezieht sich auf die Verringerung der stratosphärischen Ozonkonzentration, berechnet über einen unendlichen Zeitraum.
Ozonbildung, Menschliche Gesundheit	ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.08 / Welt (2010) H	kg NO _x eq	Sie misst die Auswirkungen der Ozonbelastung auf die menschliche Gesundheit, die auf Veränderungen der Emissionen von Ozonvorläufern (NO _x und NMVOC) zurückzuführen sind.
Ozonbildung, Terrestrische Ökosysteme	ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.08 / Welt (2010) H	kg NO _x eq	Es misst die Auswirkungen der bodennahen Ozonbelastung auf Wald- und Grünlandökosysteme, die auf Veränderungen der Emissionen von Ozonvorläufern (NO _x und NMVOC) zurückzuführen sind.
Terrestrische Versauerung	ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.08 / Welt (2010) H	kg SO ₂ eq	Es misst die säurebildenden Emissionen in der Luft und im Boden und berücksichtigt dabei die Veränderungen der Säureablagerungen in diesen beiden Kompartimenten.

¹ Kategoriebeschreibung aus: Huijbregts, M. et al. (2017) ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. Int J Life Cycle Assess 22:138-147. DOI 10.1007/s11367-016-1246-y und PRé Sustainability B.V. (2023) SimaPro database manual. Methodenbibliothek. Verfügbar unter: <https://simapro.com/wp-content/uploads/2023/04/DatabaseManualMethods.pdf>

Kategorie "Auswirkungen"	Methode		Einheiten	Beschreibung ¹
Süßwasser-Eutrophierung	ReCiPe Midpoint V1.08 / (2010) H	2016 (H) Welt	kg P eq	Sie bezieht sich auf den Verbleib von Phosphor-Schadstoffen, die in Süßwasser abgegeben werden
Eutrophierung der Meere	ReCiPe Midpoint V1.08 / (2010) H	2016 (H) Welt	kg N eq	Sie bezieht sich auf den Verbleib von Stickstoffschadstoffen, die in marine Ökosysteme gelangen.
Landnutzung	ReCiPe Midpoint V1.08 / (2010) H	2016 (H) Welt	m2a Ernteäquiva lent	Bezieht sich auf die Umwandlung und Nutzung von Land über einen bestimmten Zeitraum.
Knaptheit der Bodenschätze	ReCiPe Midpoint V1.08 / (2010) H	2016 (H) Welt	kg Cu-Äq	Misst die Erschöpfung der mineralischen Ressourcen anhand des Überschusserzpotenzials (SUP), das davon ausgeht, dass die Menge an abgebautem Erz pro Kilogramm wertvoller Mineralien steigt, je mehr mineralische Ressourcen abgebaut werden, da der Erzgehalt im Laufe der Zeit abnimmt.
Verknappung fossiler Ressourcen	ReCiPe Midpoint V1.08 / (2010) H	2016 (H) Welt	kg Öläquivalen t	Wird auf der Grundlage des höheren Heizwerts (HHL) einer fossilen Ressource geteilt durch den HHL von Rohöl berechnet.
Wasserverbrauch	ReCiPe Midpoint V1.08 / (2010) H	2016 (H) Welt	m3	Er berücksichtigt den Süßwasserverbrauch in der Landwirtschaft, der Industrie und den Haushalten.

Quelle: ARUP

Ergebnisse

Die Ergebnisse werden sowohl für die Kategorie Klimawandel als auch für die zusätzlichen Umweltauswirkungen des Systems dargestellt. Um die Prozesse mit dem höchsten Anteil an Auswirkungen pro Auswirkungskategorie hervorzuheben, wird in der Regel in jedem Abschnitt ein Diagramm mit normierten Ergebnissen in Prozent dargestellt. Die einzelnen Wirkungskategorien sind im obigen Abschnitt definiert.

Ergebnisse pro Lebenszyklusphase

Die nachfolgende Abbildung 97 zeigt die Ergebnisse pro Lebenszyklusphase aufgeschlüsselt nach Lebenszyklusphasen. Aspekte dieser Ergebnisse werden im nächsten Abschnitt ausführlicher bewertet. Es wurde deutlich, dass die Produktionsphase (Module A1-A3) und das Endstadium (Modul C) den größten Teil der Gesamtauswirkungen ausmachen. Die Auswirkungen der Produktionsphase tragen zu mehr als 40 % der Auswirkungskategorie globale Erwärmung und zu mehr als 60 % der beiden Auswirkungskategorien Eutrophierung (Meer und Süßwasser) bei. Die Auswirkungen am Ende des Lebenszyklus tragen zu mehr als 50 % zur Kategorie der Auswirkungen auf die globale Erwärmung und zu mehr als 90 % zur Kategorie der

Auswirkungen auf die Landnutzung bei. Im Durchschnitt aller gemeldeten Auswirkungskategorien tragen die Auswirkungen am Ende des Lebenszyklus zu mehr als 55 % und die Produktionsphase zu mehr als 40 % bei. Die Auswirkungen der Produktionsphase werden im nächsten Abschnitt ausführlicher bewertet, und die Auswirkungen am Ende der Lebensdauer sowie ein alternatives Szenario für das Ende der Lebensdauer werden danach gegeben.

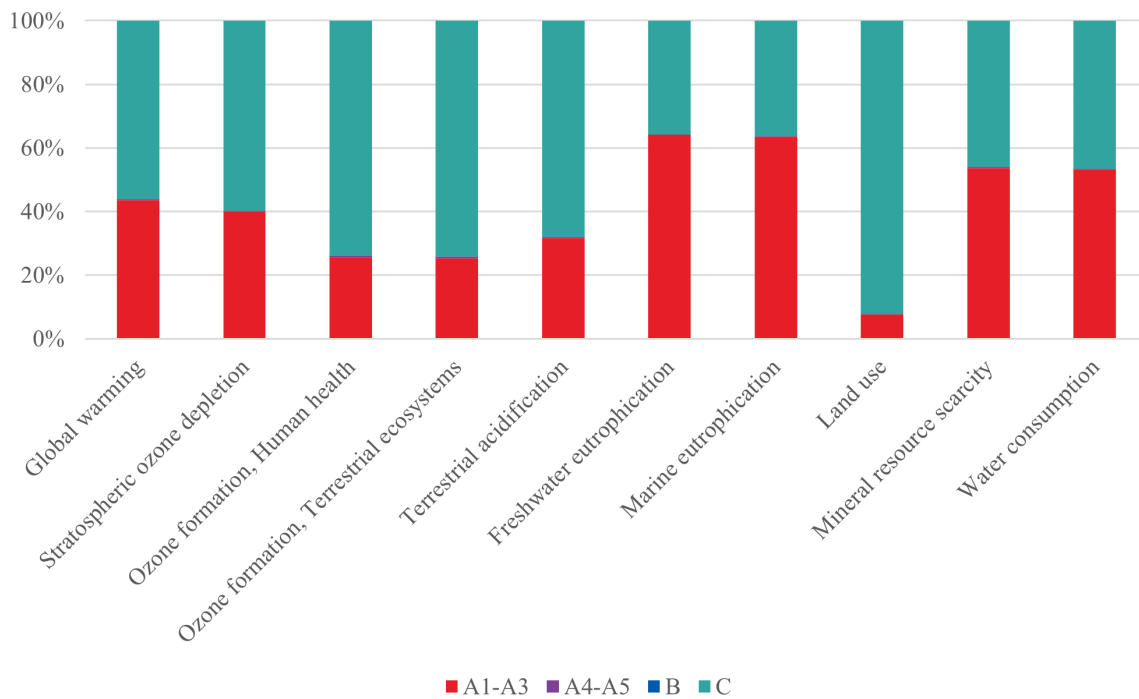


Abbildung 97
Aufschlüsselung der Umweltauswirkungskategorien nach Lebenszyklusphase.

Quelle: ARUP

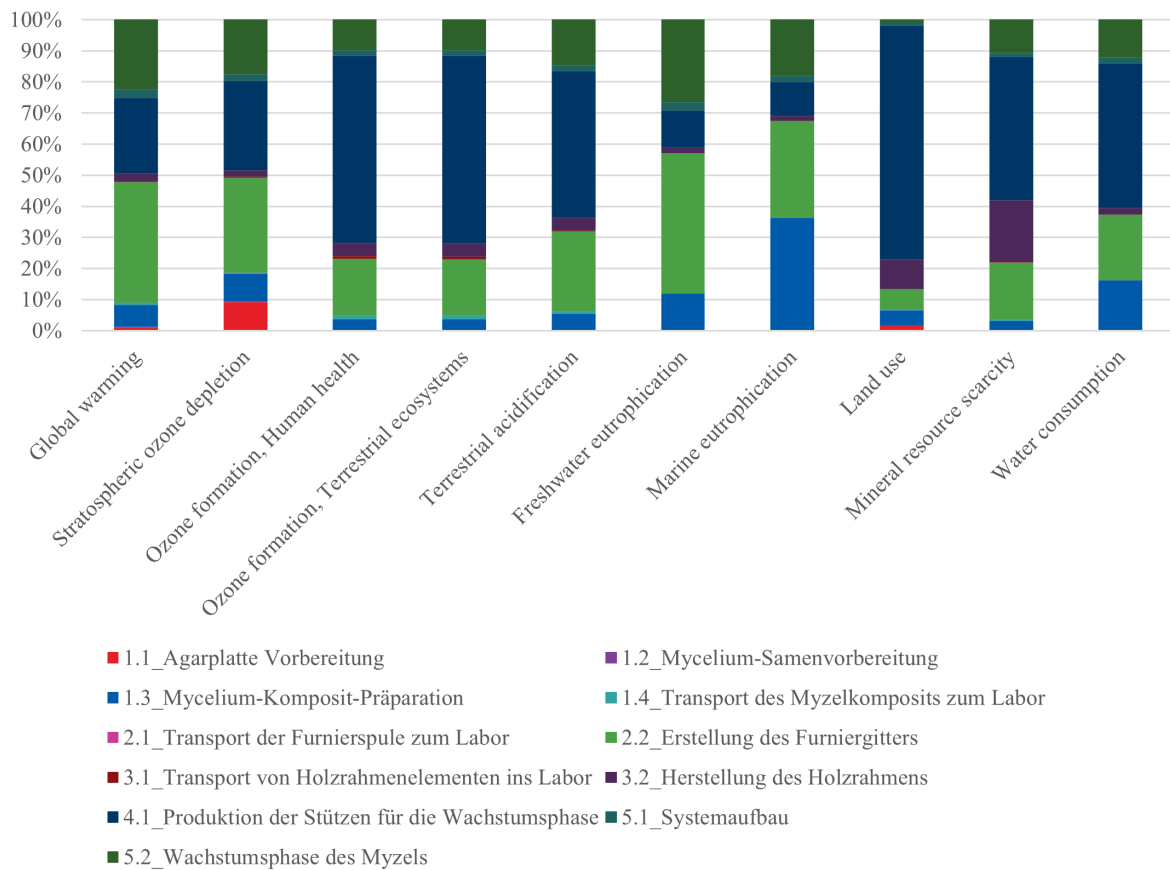
Cradle-to-Gate (Module A1-A3)

Quelle: ARUP

Abbildung 98 schlüsselt die obigen Ergebnisse auf und zeigt nur den prozentualen Beitrag zur Produktionsphase. Die Ergebnisse zeigen, dass die wichtigsten Beiträge zu den Produktionsprozessen die Phase der Furnierherstellung (Stufe 2.2), die Systemmontageprozesse (Stufe 4.1) und die Myzelwachstumsphase (Stufe 5.2) sind.

Die Auswirkungen der Phase der Herstellung des Furniergitters und des Myzelwachstums ergeben sich vor allem aus dem Stromverbrauch für das Ultraschallschweißen und die Befeuchtung/Heizung zum Trocknen des Myzels. Die Auswirkungen der Phase der Systemträger ergeben sich in erster Linie aus dem Materialabfall und dem Stromverbrauch für die Herstellung der Form für die Außenseite des Myzels. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass die für die Systemmontage hergestellten Träger wiederverwendet werden können.

Es ist auch anzumerken, dass die Herstellung des Myzel-Verbundstoffs aufgrund des Rohstoffverbrauchs (Agar, Hanf und Gerste), des Abfalls und des Wasserverbrauchs erhebliche Auswirkungen auf die Wirkungskategorie marine Eutrophierung hat. Darüber hinaus trägt die Verwendung von neuem Holzmaterial für den Holzrahmen und die Form für das Myzel zu mehr als zwei Dritteln der Auswirkungskategorie Knappheit der materiellen Ressourcen während der Produktionsphase bei.



Quelle: ARUP

Abbildung 98
Module A1-A3, Alle Prozesse.

Ende des Lebens

Die Auswirkungen am Ende der Lebensdauer sowie alternative Szenarien werden im Subkapitel „Vergleich der End-of-Life-Szenarien“ beschreiben.

Pro Komponente / Bauteil

Übersicht

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Ergebnisse der einzelnen Komponentenprozesse. In diesem Fall bezieht sich „System“ auf die Prozesse, die für den Zusammenbau der Trennwand verwendet werden, einschließlich der Herstellung der Formen für die Formung des Myzels und die Wartung der Trennwand während der Nutzung. Es ist klar, dass der Holzrahmen über alle Kategorien hinweg die meisten Auswirkungen hat. Danach folgt die Verbundplatte auf Myzelbasis.

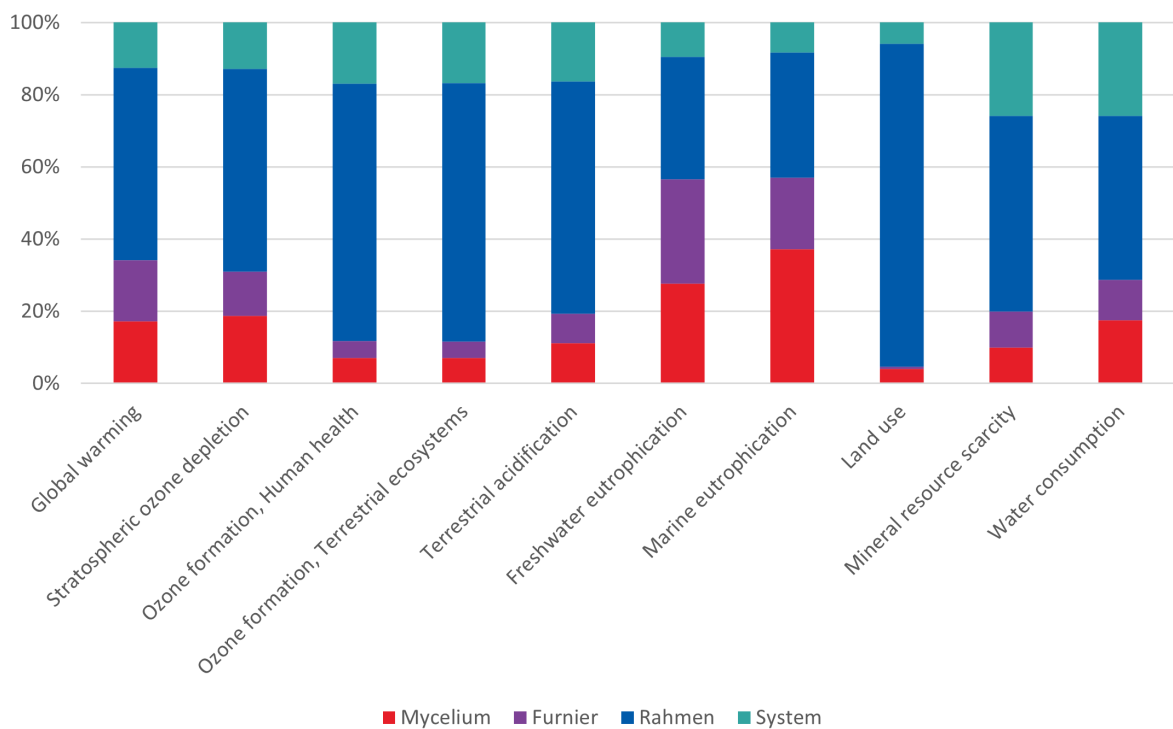


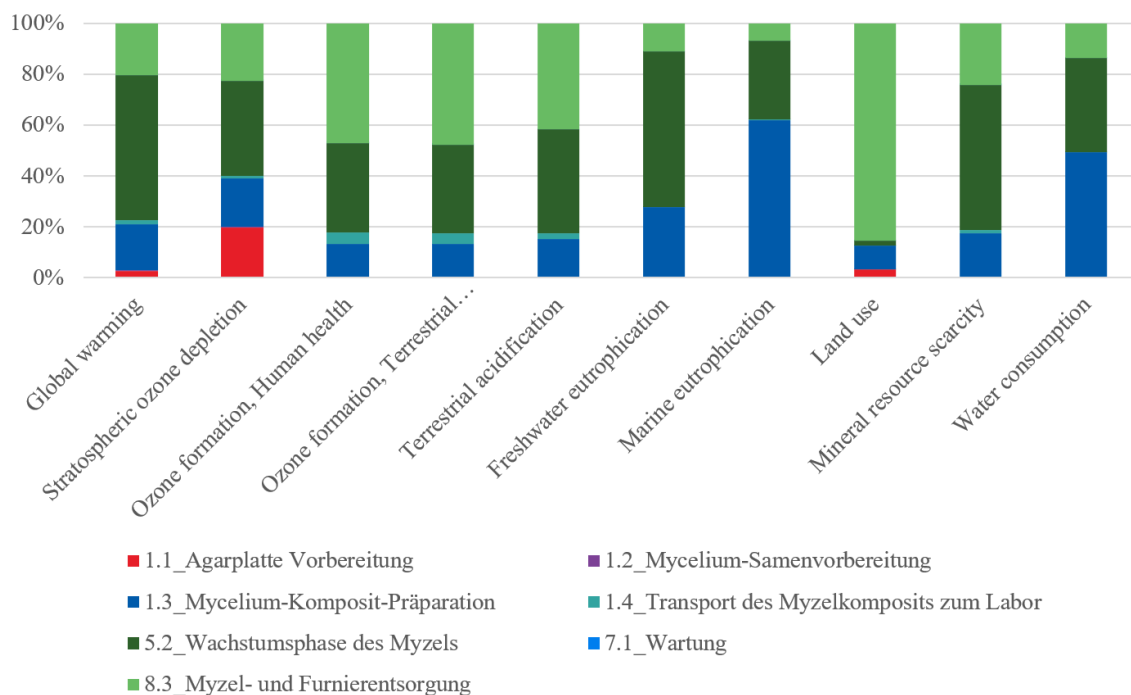
Abbildung 99
Aufschlüsselung der Umweltauswirkungskategorien nach Komponentenprozessen.

Quelle: ARUP

Myzelium-Verbundplatte

Die nachstehende Abbildung zeigt die Aufschlüsselung der für die Myzelverbundplatte spezifischen Prozesse. Da die Myzel-Verbundkomponente einen erheblichen Anteil an den gesamten Umweltauswirkungen hat, werden die Ergebnisse für die wichtigsten Phasen der Komponenten im Folgenden zur weiteren Bewertung dargestellt (Abbildung 100). Die Ergebnisse zeigen, dass die wichtigsten Faktoren in der Produktionsphase die Wachstumsphase des Myzels, die Herstellung des Myzelverbunds und die Entsorgung des Bioabfalls der Verbundplatte sind. Die wichtigsten Faktoren lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- **Materialien und Abfälle:** Die Verwendung von Rohstoffen und die daraus resultierenden Abfälle von Agar, Gerstenkorn und Hanfsubstrat sowie der Inkubationssack (Polypropylen und Saatgut-Baumwollbeutel);
- **Elektrizität:** der Strom, der für die Inkubations- und Wachstumsphase sowie für die Zerkleinerung des Myzels (insbesondere am Ende der Lebensdauer) benötigt wird.



Quelle: ARUP

Abbildung 100
Zusammenstellung der Teilprozesse für die Herstellung des Myzeliumverbundes.

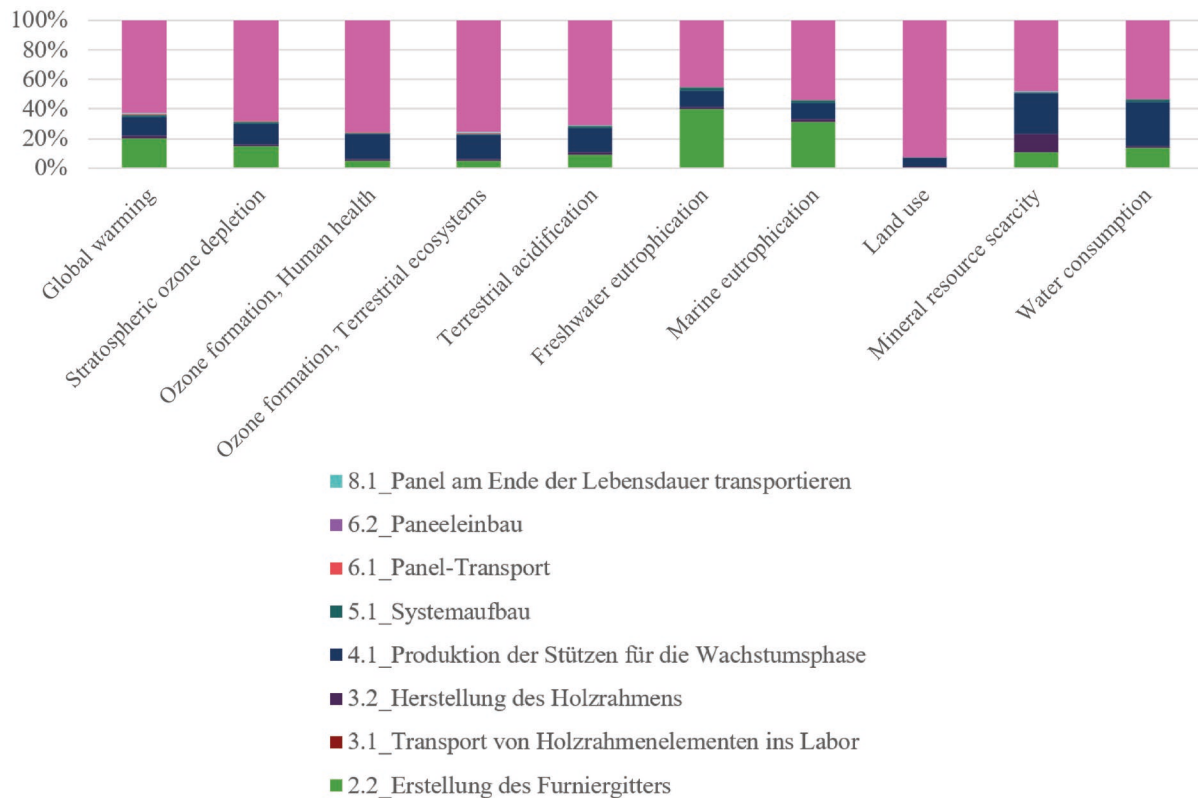
Weitere Bestandteile

Die nachfolgende Abbildung 101 zeigt die Ergebnisse für die Teilprozesse der Komponenten ohne Myzel: das Furnier, den Holzrahmen und die Stützstruktur für den Systemaufbau und das Wachstum.

Wie in den Übersichtsabschnitten erwähnt, trägt das Furnierteil im Vergleich zum Holzrahmen zu einem geringeren Anteil der Belastung bei. Die durch das Furnier verursachten Belastungen stammen hauptsächlich aus dem Ultraschallschweißverfahren (Stufe 2.2 in der Abbildung 101). Dies ist zu erwarten, da das Schweißverfahren nur einen minimalen zusätzlichen Materialeinsatz für die Verbindungen (z. B. Leim) erfordert. Das Furniermaterial ist außerdem leicht und wurde parametrisch entworfen, um die benötigte Materialmenge zu optimieren.

Der Holzrahmen trägt aufgrund des Rohstoffverbrauchs während der Produktionsphase (Stufe 3.2 in der Abbildung 101) und der Entsorgung am Ende des Lebenszyklus (Stufe 8.2 in der Abbildung 101) zu einem höheren Anteil der Gesamtauswirkungen bei. Für die Herstellung dieses Bauteils sind nur minimale Herstellungsprozesse erforderlich (Schneiden/Sägen und minimaler Leim).

Bei der Betrachtung der Systemmontageprozesse trägt die Herstellung des Formbretts, das zur Bildung der äußeren Riffelungen des Myzels verwendet wird, am meisten zur Umweltbelastung bei. Dies ist darauf zurückzuführen, dass ein hoher Anteil an Abfällen (>80 %) aus den 2x-Platten gefräst wird. Da diese jedoch wiederverwendet werden, konzentrieren sich die Empfehlungen in der Studie nicht auf diesen Bereich.



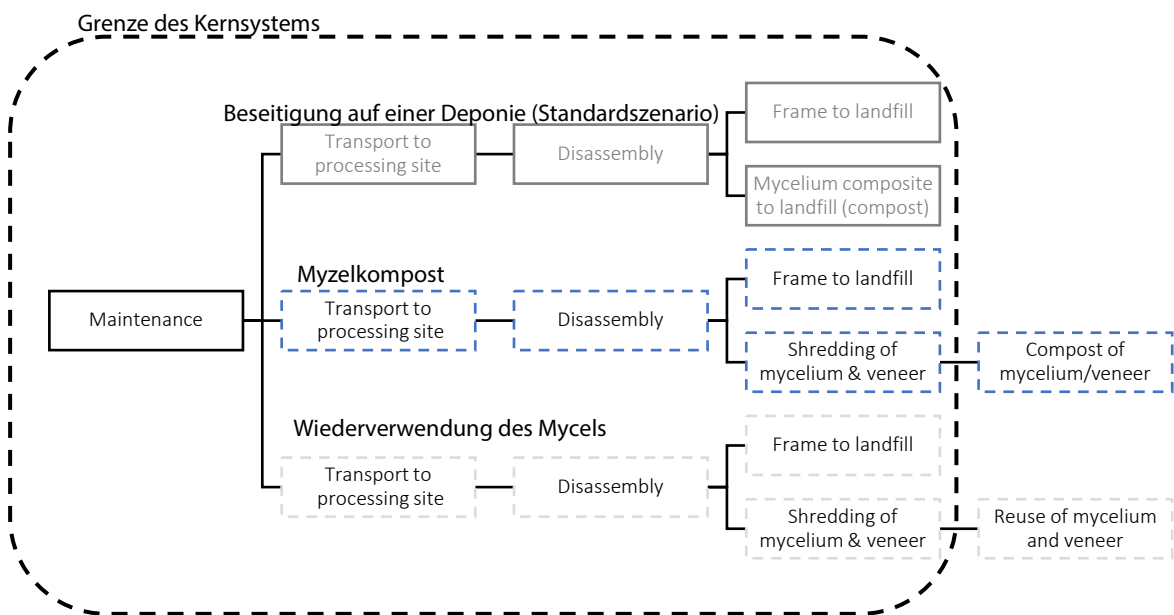
Quelle: ARUP

Abbildung 101
Teilprozesse der Komponenten ohne Myzelium.

Vergleich der Szenarien für das Lebensende

Wie bereits gezeigt, leistet die Phase „Ende des Lebenszyklus“ einen wesentlichen Beitrag zu den gesamten Umweltauswirkungen. Obwohl die Entsorgung des Holzrahmens der wichtigste Faktor ist, besteht nach Angaben des KIT-Teams auch die Möglichkeit, die Myzelverbundplatte (zusammen mit dem Furniergitter) zu zerkleinern und wiederzuverwenden. Da die Bewertung jedoch auf einem Prototyp basiert und es keine Daten gibt, die das Ergebnis nach 8 Jahren Nutzung zeigen, wurde eine Szenarioanalyse durchgeführt, um die folgenden drei Wiederverwendungsszenarien zu bewerten:

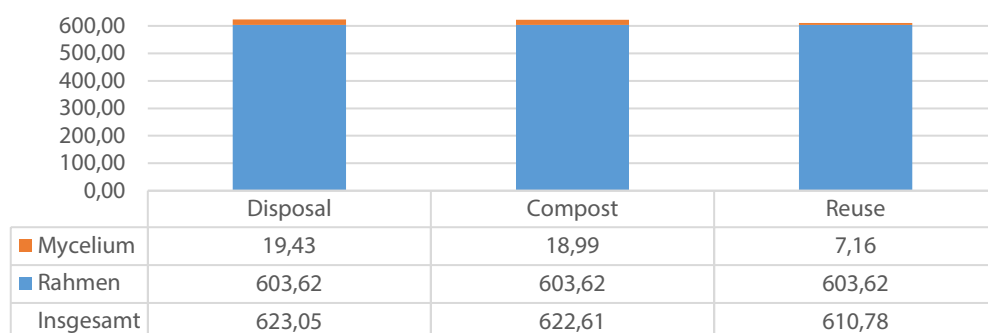
- Entsorgung des Systems auf einer Mülldeponie mit minimaler Verarbeitung (Standardszenario)
- Zusammensetzen des Myzels nach dem Zerkleinern der Platte und Trennen des Myzels/Furniers (Mycel & Furniermaterial)
- Wiederverwendung des Myzels, nachdem die Platte zerkleinert und das Mycel/Furnier getrennt wurde (Mycel und Furniermaterial)



Quelle: ARUP

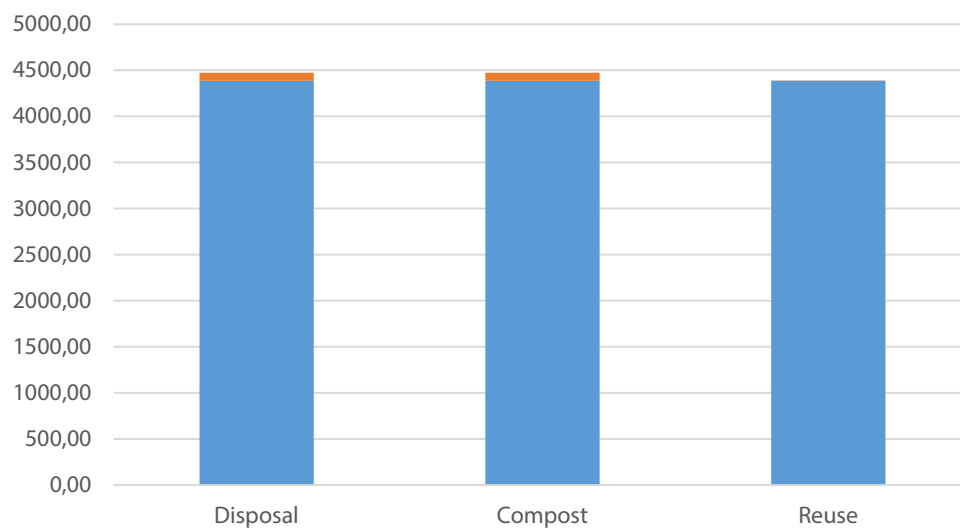
Abbildung 102
Alternative Szenarien für das Lebensende.

Da davon ausgegangen wird, dass die Mengen in beiden Szenarien gleich sind, wurde davon ausgegangen, dass der Zerkleinerungsprozess am Ende des Lebenszyklus dem in der Produktionsphase verwendeten Prozess entspricht. Dies könnte jedoch unterschätzt werden, da das Myzel im Laufe seines Lebenszyklus aushärten dürfte. Ein Hinweis, dies im Rahmen der Empfehlungen für das Ende des Lebenszyklus zu bewerten, ist im Abschnitt "Diskussion" enthalten. Da der Anwendungsbereich und die Systemgrenze dieser Ökobilanz die Prototyp-Trennwand umfasst, die aus neuen Myzelmaterialien hergestellt wird, ist der Nutzen des Recyclings in künftigen Lebenszyklen nicht in der Systemgrenze enthalten. Mit anderen Worten: Die Prozesse, die bei der Demontage und Entsorgung auftreten, werden berücksichtigt, der Nutzen nach dem Ende des Lebenszyklus jedoch nicht. Die Ergebnisse zeigten vernachlässigbare Veränderungen zwischen den drei Szenarien (+/-2 %) in allen Wirkungskategorien. Zur Veranschaulichung sind die Ergebnisse für die globale Erwärmung und die Landnutzung in den nachstehenden Abbildungen dargestellt. Daher lautet die Schlussfolgerung für diesen Abschnitt, dass trotz eines gewissen Nutzens der Großteil der Auswirkungen auf die Beseitigung des Holzrahmens und nicht auf den Verbund aus Myzel und Furnier zurückzuführen ist.



Quelle: ARUP

Abbildung 103
Vergleich der End-of-Life-Szenarien, globale Erwärmung (kg CO₂ eq).



Quelle: ARUP

Abbildung 104
Vergleich der End-of-Life-Szenarien, Flächennutzung (m²a Pflanzenäquivalent).

AP 5.2 Ressourceneffizienz und Identifikation Technologiepotentiale

Diese Lebenszyklusanalyse (LCA) der Myzel-Verbundstoff-Trennwand wurde durchgeführt, um die Umweltauswirkungen besser zu verstehen. Wie bereits erwähnt, war das Ziel der Studie wie folgt:

1. Verstehen Sie die wichtigsten „Hot Spots“ und/oder Hebel, die die Umwelt insgesamt beeinflussen;
2. Empfehlungen für die Optimierung in den weiteren Phasen des Produktdesigns, der Materialauswahl und der Auswirkungen auf den Lebenszyklus zu geben; und
3. Beiträge zu den Überlegungen für die Skalierung der Produktion des Produkts vom „Labor“ auf die „industrielle“ Ebene liefern

Die folgenden Abschnitte geben einen Überblick über jeden der oben genannten Punkte.

Übersicht der kritischen Umweltauswirkungen

Die Ergebnisse zeigen, dass die wichtigsten Lebenszyklusstadien, die zu den Auswirkungen auf den gesamten Lebenszyklus beitragen, die Produktions- (Modul A1-A3) und die End-of-Life-Phase (Modul C) sind. Dies ist zu erwarten, da in der Nutzungsphase der Trennwand nur minimale Prozesse zu erwarten sind.

Die Komponenten/Prozessschritte mit dem höchsten Anteil an Auswirkungen sind der Holzrahmen, die Systemmontageprozesse und die Myzelverbundplattenherstellung. Die meisten Auswirkungen dieser Komponenten sind auf die Entsorgung am Ende des Lebenszyklus für den Holzrahmen, die Produktionsphase für die Myzelverbundplatte und die nicht-materiellen Prozesse für die Herstellung des Furniergitters zurückzuführen. Bei den Prozessen der Systemmontage war die Herstellung der Außenschalung der Hauptverursacher. Da man davon ausgeht, dass diese wiederverwendet wird, stehen die Materialien für die Systemmontage nicht im Mittelpunkt der Verbesserungen. Die Hotspots für die einzelnen Lebenszyklusphasen werden in den folgenden Abschnitten näher erläutert.

Produktionsphase (Module A1-A3): Die Furnierproduktion, die Systemmontage und das Myzelwachstum tragen zum größten Teil zu den Auswirkungen bei. Dies ist vor allem auf den Stromverbrauch für die Herstellung des Furniergitters, die Inkubations-, Wachstums- und Trocknungsphasen (z. B. für den Klimawandel) und den Rohstoff für die Myzelproduktion (Agar, Gerste und Hanf) (z. B. für die Eutrophierung) zurückzuführen. Die Herstellung des Schimmels für die Systemunterstützung hatte den höchsten Beitrag zur

Flächennutzung, obwohl auch hier davon ausgegangen wird, dass dieser Gegenstand für die künftige Produktion wiederverwendet wird.

Nutzungsphase (Modul B): Die Nutzungsphase hat während des gesamten Lebenszyklus nur minimale Auswirkungen. Dies ist zu erwarten, wenn man davon ausgeht, dass das System nicht ersetzt werden kann und daher nur eine Wartung des Myzels (eine natürliche Ölbeschichtung alle 2 Jahre) erforderlich ist. Obwohl diese Annahme mit dem Konstruktionsteam vereinbart wurde, hängt dies von der Unversehrtheit der Platte bei Stoßbelastungen ab (Haltbarkeit während der Nutzung). Einzelheiten zu diesem Aspekt sind im bautechnischen Bericht enthalten.

Ende der Lebensdauer (Modul C): Obwohl das Myzel zerkleinert und wiederverwendet werden kann, hatte der Holzrahmen den größten Anteil an den Umweltauswirkungen in allen Kategorien. Es wurden alternative End-of-Life-Szenarien für das Myzel modelliert (Entsorgung, Kompostierung und Wiederverwendung). Zusätzlich zur Überprüfung der Verwendung des Holzrahmens während des gesamten Lebenszyklus wird empfohlen, den Strombedarf für die Zerkleinerung des Myzelverbunds zur Wiederverwendung zu überprüfen.

Optimierungsvorschläge

Überprüfung des Systemdesigns für die Demontage am Ende der Lebensdauer

Der Holzrahmen trug einen erheblichen Teil zu den Umweltauswirkungen bei, insbesondere in der Endphase der Lebensdauer. Der Rahmen wurde verleimt, so dass er nicht wiederverwendet werden konnte. Für künftige Studien könnten alternative Verbindungen wie temporäre Schrauben oder herausnehmbare Dübel in Betracht gezogen werden. Darüber hinaus könnte eine Reduzierung der Anzahl der Elemente (z. B. ein Rahmen statt drei Lagen) weitere Wiederverwendungsmöglichkeiten am Ende der Lebensdauer bieten. Obwohl davon ausgegangen wird, dass das Myzel am Ende der Lebensdauer wiederverwendet werden kann, muss das Ausmaß dieser Wiederverwendung vom Entwicklungsteam bestätigt werden. Es wurde auch davon ausgegangen, dass das Myzel und das Furnier vor der Wiederverwendung getrennt werden können. Dies sollte jedoch überprüft werden, insbesondere im Hinblick auf die für die Wiederverwendung des Myzels erforderlichen Zerkleinerungsprozesse.

Bewertung der erneubaren Energiequellen

Der Stromverbrauch trägt in allen Kategorien zu einem erheblichen Teil zu den Auswirkungen bei und macht mehr als 30 % der gesamten Treibhausgasemissionen (kg CO₂ eq) während des Lebenszyklus des Systems aus. Die meisten Auswirkungen sind auf das Ultraschallschweißen des Furniers (48 %) und die Wachstumsphase des Myzels (30 %) zurückzuführen. Erneuerbare Energiequellen könnten für den gesamten Lebenszyklus in Betracht gezogen werden, insbesondere jedoch für die Produkt- und Endphase des Myzels.

Zusätzliche Bereiche für Verbesserungen im industriellen Maßstab

Zusätzlich zu den oben genannten Überlegungen:

- Die **Effizienz der Myzelwachstumschamber**. Da die Infrastruktur für die Produktion eines Prototyps eingerichtet wurde, könnte der Anteil der Auswirkungen im Vergleich zur Produktion im großen Maßstab höher sein. Die Effizienz der Kammer, einschließlich der Größe und/oder Spezifikation der Ausrüstung, könnte im Hinblick auf eine Optimierung überprüft werden.
- Evaluieren Sie den **Produktionsprozess für die Myzel-Verbundpräparation**, um Verpackung, Transport und zusätzliche Zerkleinerung während der Produktion zu vermeiden. Es wird z. B. empfohlen zu prüfen, ob der Myzelprozess als Teil des Systems beginnen kann (und vom ersten Tag an mit dem Furniergitter verbunden werden kann). Wenn dies für das System möglich ist, besteht das Potenzial, Umweltbelastungen durch Verpackungsabfälle einzusparen. Zumindest könnte das Verpackungsmaterial für den Transport überarbeitet werden (derzeit auf Polypropylenbasis). Außerdem könnte der Stromverbrauch für die zusätzliche Zerkleinerung des Myzels, das vor dem Einbringen in das Furniergittersystem zum Wachstum benötigt wird, eingespart werden. Die Durchführbarkeit dieser Empfehlung sollte zusammen mit dem Laborteam weiter geprüft werden.

Vergleich mit einem Standardprodukt

Da das Ziel der Studie darin besteht, Informationen über den Produktionsprozess und die Materialeigenschaften der Trennwand im Hinblick auf die Umweltauswirkungen zu erhalten, stützt sich die Studie auf Daten aus der Produktion des Prototyps. Wie bereits erwähnt, lag der Schwerpunkt der Studie darauf, die wichtigsten Möglichkeiten zur Minimierung der Umweltauswirkungen einer im Labormaßstab hergestellten internen Trennwand in Deutschland aufzuzeigen. Daher wurden überwiegend Primärdaten vom Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und der Universität Kassel verwendet. Um jedoch diesen Bereich für die nächsten Projektphasen zu informieren, wurde ein Vergleich mit marktüblichen Referenztrennwänden auf hohem Niveau versucht. Zu diesem Zweck wurde die rahmenlose Stellwand EK6:Divisio von Steelcase aus den auf dem Markt verfügbaren Produkten ausgewählt. Der Paravent kann als akustische Trennwand verwendet werden und ist mit einer Standardbreite von 407 mm erhältlich, während die Länge zwischen 800 mm und 2000 mm variieren kann. Das Produkt hat einen gewichteten Schallabsorptionskoeffizienten $\alpha_w = 0,7$ (H) und besteht aus drei Materialien, nämlich Polyethylenterephthalat (PET), Gewebe und Stahl, siehe ein Beispielbild in der nachfolgenden Abbildung 105.



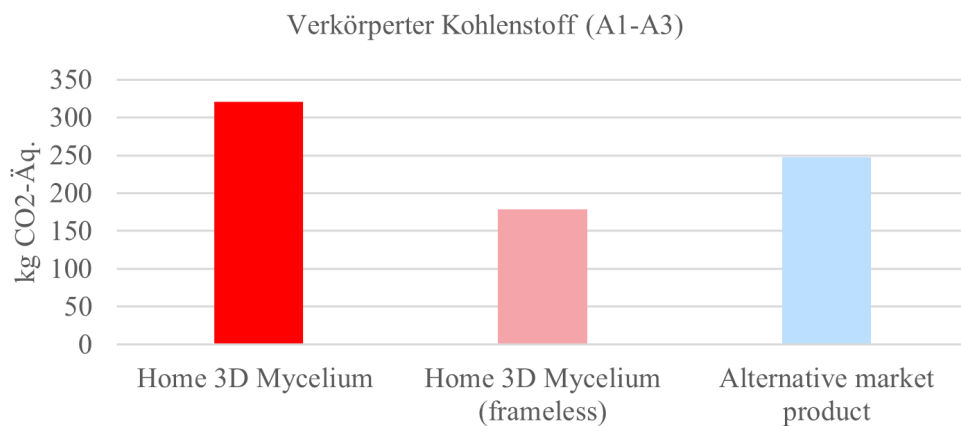
Quelle: ARUP

Abbildung 105

EK6: Divisio Rahmenloser Bildschirm2 von Steelcase, ausgewählt als alternatives Marktprodukt für den Vergleich mit Home 3D Mycelium.

Der Vergleich zwischen dem Home 3D Mycelium und dem alternativen Marktprodukt konzentriert sich auf die globale Erwärmung, da dies aus methodischer Sicht der am besten vergleichbare Indikator zwischen verschiedenen LCA-Studien ist. In den Produktspezifikationen für die rahmenlose Stellwand EK6: Divisio wird ein gebundener Kohlenstoff von 60,74 kg CO₂ eq. für die Stufen A1-A3 angegeben; die Größe der Platte, die als Referenz für die Kohlenstoffberechnung herangezogen wird, ist jedoch nicht eindeutig angegeben. Für die Zwecke des Vergleichs wird davon ausgegangen, dass sich die angegebenen Kohlenstoffauswirkungen auf eine Platte mit einer durchschnittlichen Größe von 407 mm*1400 mm beziehen. Der gebundene Kohlenstoff für das alternative Marktprodukt wird auf die für das Home 3D Mycelium berücksichtigte Paneelfläche (2,32 m²) skaliert, was zu 247,14 kg CO₂ eq. führt. Der gebundene Kohlenstoff (A1-A3) für das Home 3D Mycelium beträgt 320,79 kg CO₂ eq. und ist damit 30 % höher als der des alternativen Marktprodukts. Es ist jedoch anzumerken, dass die Referenzwand von Steelcase rahmenlos ist und daher besser mit dem gebundenen Kohlenstoff (A1-A3) des Home 3D Mycelium ohne Holzrahmen vergleichbar ist. Der CO₂-Ausstoß (A1-A3) des rahmenlosen Produkts Home 3D Mycelium wird mit 178,36 kg CO₂ eq. berechnet, was 28 % niedriger ist als der CO₂-Ausstoß, der zuvor für das alternative Marktprodukt geschätzt wurde.

Die Ergebnisse des Vergleichs zwischen dem Home 3D Mycelium und dem ausgewählten alternativen Marktprodukt (dem EK6: Divisio Frameless Screen2) zeigen die Bedeutung einer weiteren Optimierung des Holzrahmens, der bei den Auswirkungen der Mycelium-Akustikwand eine wichtige Rolle spielt. Die Ergebnisse des Vergleichs sind zusammengefasst in der nachfolgenden Abbildung 106.



Quelle: ARUP

Abbildung 106
Vergleich Home 3D Mycelium vs. ein alternatives Marktprodukt.

Obwohl diese Datenquelle für die Marktalternative genauer ist als allgemeine Wirtschaftsdaten, wird anerkannt, dass die Auswirkungen bei einer skalierten/industriellen Produktion möglicherweise nicht vergleichbar sind. Um einen echten Vergleich zu ermöglichen, wird daher eine Ökobilanz einer typischen Trennwand, die eine ähnliche Methodik wie dieser Bericht verwendet, als Empfehlung für eine künftige Studie aufgenommen.

Empfehlungen an zukünftige Forschung

Zusätzlich zu den bereits gegebenen Empfehlungen werden die folgenden Empfehlungen für künftige Untersuchungen vorgeschlagen:

- Weitere Untersuchung der möglichen Wiederverwendungsszenarien. Obwohl die Auswirkungen der Entsorgung des Holzrahmens am Ende des Lebenszyklus gegenüber den anderen Verfahren überwiegen, zeigte die Kompostierung des Myzels immer noch "positive" Umweltauswirkungen, insbesondere in den Kategorien Klimawandel, Abbau der stratosphärischen Ozonschicht und Verknappung der mineralischen Ressourcen am Ende des Lebenszyklus (Modul C). Der Großteil der Vorteile der Szenarien für das Lebensende des Myzels würde jedoch wahrscheinlich jenseits der Systemgrenze liegen (Modul D gemäß EN 15978).
- Eine weitere Empfehlung ist die Durchführung einer Sensitivitätsanalyse, um zu verstehen, wie sich die Umweltauswirkungen sowie die akustischen und leistungsbezogenen Merkmale ändern, wenn das Myzel für die Herstellung von mehr als einem System verwendet wird.
- Wartung und Reparatur des Myzelverbunds: Das Entwicklungsteam ging davon aus, dass das Myzel und das Furniergitter sowohl für die Wiederverwendung als auch für das Kompostszenario nicht getrennt werden müssen. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass es sich in diesem Stadium um eine Annahme handelt, die in zukünftigen Studien bestätigt werden sollte. Da davon ausgegangen wird, dass die Mengen gleich sind, wurde davon ausgegangen, dass der Zerkleinerungsprozess für die End-of-Life-Szenarien dem in der Produktionsphase verwendeten Prozess entspricht. Dies könnte jedoch unterschätzt werden, da davon ausgegangen wird, dass das Myzel im Laufe seines Lebenszyklus aushärtet.
- Es sollten mehr quantitative Daten über die nachhaltige Beschaffung des Holzrahmens angegeben werden. Es wurde darauf hingewiesen, dass der Rahmen aus "nachhaltigem" Holz hergestellt wurde, obwohl die Quantifizierung des Umweltnutzens auf der Grundlage von FSC-Zertifizierungen normalerweise nicht einfach ist. Obwohl es empfohlen wird, dies für die Vollständigkeit der Studie zu untersuchen, ist man dennoch der Meinung, dass die Bewertung der Wiederverwendungsszenarien für das Holz einen größeren Nutzen bringen wird ("reduzieren, wiederverwenden, entsorgen").
- Suche nach mehr quantitativen Daten über die Furnierspulen. Wie bereits erwähnt, waren nur begrenzte quantitative Daten über die Produktionsphase verfügbar. Obwohl das Furniermaterial keinen

wesentlichen Beitrag zu den Gesamtumweltauswirkungen leistete, sollten für künftige Studien weitere Details gesucht werden.

Technologiepotentiale

Diese Studie fasst die von Arup durchgeführte Lebenszyklusanalyse (LCA) der Mycelium-Verbundstoffwand zusammen. Die Studie wurde durchgeführt, um die Umweltauswirkungen besser zu verstehen. Die Trennwand wurde in drei Hauptkomponenten modelliert: eine hanfbasierte Myzel-Verbundplatte, ein tragendes 3D-gedrucktes Furniergitter und ein einkapselnder Holzrahmen. Der gesamte Lebenszyklus ("Cradle to Grave") wurde für ein komplettes Panel über einen Lebenszyklus von 8 Jahren untersucht. Die Hauptziele der Studie lauteten wie folgt:

1. Verstehen Sie die wichtigsten „Hot Spots“ und/oder Hebel, die die Umwelt insgesamt beeinflussen;
2. Empfehlungen für die Optimierung in den weiteren Phasen des Produktdesigns, der Materialauswahl und der Auswirkungen auf den Lebenszyklus zu geben; und
3. Beiträge zu den Überlegungen für die Skalierung der Produktion des Produkts vom „Labor“ auf die „industrielle“ Ebene liefern

Obwohl der Klimawandel eine der wichtigsten globalen Prioritäten ist, wurden weitere zehn Umweltauswirkungskategorien in Übereinstimmung mit den Industriestandards analysiert, um einen ganzheitlichen Überblick über die Umweltauswirkungen des Systems zu erhalten. Beispiele hierfür sind der Abbau der Ozonschicht und die Landnutzung.

Die Studie hat erfolgreich die wichtigsten Verbesserungsbereiche für die nächsten Phasen des Projekts aufgezeigt. Der Myzelverbundwerkstoff und das Furniergitter haben vielversprechende Ergebnisse als umweltfreundliches Material für die Verwendung als innere Trennwand gezeigt. Die Studie hat jedoch auch deutlich gemacht, wie wichtig ein systemübergreifender Ansatz für die Lebenszyklusbewertung ist. Obwohl beispielsweise bei der Herstellung des Furniergitters der Materialverbrauch und die Abfallmenge minimiert werden konnten, wurden sekundäre Aspekte wie die Stromquelle/Effizienz für das Ultraschallschweißen und das Myzelwachstum sowie der Holzrahmen, der zur Unterstützung der Myzelplatte verwendet wird, als Schlüsselbereiche für Verbesserungen hervorgehoben. Um einen echten Vergleich der Umweltleistung mit einem typischen Produkt zu ermöglichen, ist eine zusätzliche Ökobilanz mit denselben Verfahren eine wichtige Empfehlung.

Beschreibung von Änderungen gegenüber dem ursprünglichen Antrag

Im ursprünglichen Antrag waren die Demonstratoren für den POP-UP Campus nicht enthalten. Diese wurden aufgrund des Beitrags der Universität Kassel für den BBSR POP-UP Campus in Aachen zusätzlich in den Bericht aufgenommen.

Auswertung

Meilenstein 1: Anforderungen, Grundwerkstoffe und Bauteilkonzept definiert

Die Arbeitspakete 2 (Fertigungstechnologie und Biokultivierungsprozess) und 3 (Charakterisierung Bioverbundmaterial) wurden jeweils etwas früher gestartet, um für die Entscheidungsprozesse in AP 1 (Material- und Bauteilkonzept) Materialdaten und Herstellungsmöglichkeiten mit einzubeziehen. Der erste Meilenstein „Anforderungen, Grundwerkstoffe und Bauteilkonzept definiert“ wurde mit dem 2. Workshop abgeschlossen.

Meilenstein 2: Kombinierte Verbundherstellungsprozess im Labor realisierbar

Die additive Fertigungstechnologie der Holzgitterstrukturen konnte im Labor nachgewiesen werden. Die Fertigung erfolgt durch Platzieren des Filaments und anschließender Fügung in zwei Automatisierungsschritten. Im Verlauf des Projekts wurden diese beiden Schritte in einen kombinierten robotischen Prozess integriert. Der Biokultivierungsprozess auf Basis der Holzgitterstrukturen ist im Labor realisierbar und abgeschlossen. Dadurch wurde der Meilenstein 2 erreicht.

Meilenstein 3: Verbundmaterial charakterisiert und mit digitaler Simulation kalibriert

Die mechanische Charakterisierung des Verbundmaterials wurde abgeschlossen. Eine erste akustische Charakterisierung wurde abgeschlossen. Genauere akustische Eigenschaften wurden im AP 4 anhand der Bauteile ermittelt. Die Methoden zur Auslegung und Dimensionierung wurden abgeschlossen. Der Meilenstein 3 ist damit abgeschlossen.

Meilenstein 4: Hergestellte Testbauteile erfüllen definierte Anforderungen

Es wurde ein Bauteildesign für den Anwendungsfall Innen-Trennwand unter akustischen und strukturellen Gesichtspunkten mit allen Projektpartnern entwickelt. In einem zweiten Schritt wurden geeignete Mengen an Myzeliummaterial in den Laboren vom KIT gezüchtet. In Kassel wurde das hölzerne Bewehrungsgitter in einem robotischen additiven Prozess in vollem Maßstab hergestellt. Anschließend wurde ein akustischer Raumtest des Bauteils im Vergleich zu einem Bauteil ähnlicher Größe (Pop-Up Campus Projekt) erfolgreich durchgeführt. Ein Biegeversuch wurde mit dem Pop-Up Campus Bauteil durchgeführt, um die Simulation zu verifizieren.

Schlussfolgerungen des Gesamtprojekts

Übergeordnetes Ziel des Forschungsprojektes war die Entwicklung einer Holz-Myzelium-Verbundbauweise für CO₂-neutrale, zirkuläre Innenausbauten. Damit sollen Büroflächen im Bestand aufgewertet werden. Das Projekt umfasste die Charakterisierung der mechanischen und akustischen Eigenschaften von Holz-Myzelium-Verbundbauteilen, die Untersuchung von Fertigungstechniken, die Ermittlung von Potenzialen für den Innenausbau und die Formfindung. Konkret wurden die folgenden Ziele verfolgt:

- Entwicklung einer neuen Bioverbundbauweise aus einer additiv hergestellten Holzgitterstruktur und Myzelium.
- Ermittlung der Anforderungen für anwendungsspezifische Verbundbauteile.
- Bestimmung der Myzelium- und Holzart(en) für eine ideale Substrat- und Verbundwirkung.
- Entwicklung der Automatisierungs- und Bindertechnologien für die effiziente Erstellung von 3D-Holzgitterstrukturen.
- Charakterisierung des Verbundwerkstoffes und Bauteilen.
- Konzeptionierung von Wertschöpfungsketten und Geschäftsmodellen entlang eines Kreislaufprozesses zur Ermittlung und Bewertung der Materialströme im Modell.
- Entwicklung von Ansätzen zur mechanischen und akustischen Dimensionierung der Verbundbauteile.

- Charakterisierung von Halbzeugen, Bauteilen und Demonstratoren.
- Fertigung von 1:1 Demonstrationsobjekten.

Nach einer ersten Evaluierung verschiedener möglicher Endanwendungen, einschließlich Decken- und Wandverkleidungen, Trennwänden, Fußbodensystemen, Akustiksegeln und Möbeln, wurde festgestellt, dass Trennwände ein breites Funktionsspektrum mit einem hohen Substitutionspotenzial für nachhaltige Materialien und damit Nachhaltigkeitsvorteilen verbinden.

Aus diesem Grund wurde der Schwerpunkt des Projekts auf Trennwandkonstruktionen und die Werkzeuge und Techniken gelegt, die für ihre Herstellung unter Verwendung von Myzel-Verbundwerkstoffen erforderlich sind.

Die anfängliche Charakterisierung der Basismaterialien und die Untersuchung der Kompatibilität des Myzels und der Furnierverstärkungen ermöglichten die Identifizierung der am besten geeigneten Komponenten für den Verbundwerkstoff: Myzel von *Ganoderma Lucidum*, Hanfschäben als Substrat und Ahornfurnier als Verstärkungs- und Bewehrungsmaterial. Die Identifizierung dieser Basismaterialien ermöglichte eine weitere Fokussierung und Optimierung der nachfolgenden Schritte für diese spezifischen Materialien.

Es wurden Methoden für die Biokultivierung des Myzels und für die vollautomatische Herstellung von Furnierverstärkungsgittern durch robotergestützte additive Fertigung entwickelt und deren Machbarkeit im Maßstab 1:1 durch eine Reihe von Prototypen nachgewiesen. Für die Herstellung der Furnierverstärkung wurde ein neuartiges Verfahren zur klebstofffreien Verbindung der Furnierschichten entwickelt und in den robotergestützten Fertigungsprozess integriert.

Es wurden Entwurfs- und Herstellungsverfahren entwickelt, um Leistungskriterien mit dem Entwurf des Holzbewehrungsgitters und der Erzeugung von Oberflächenmustern zu verbinden, um die akustischen Eigenschaften der fertigen Elemente zu verbessern. Diese Methoden wurden mit parametrischen Werkzeugen implementiert, die einen Prozess der Leistungsanpassung innerhalb modularer Komponenten ermöglichen.

Anhand einer Reihe von großformatigen Prototypen, die sowohl im Rahmen des Projekts als auch im Kontext der Ausstellung Pop-Up Campus entwickelt wurden, wurden verschiedene Ansätze zur Skalierung von Myzelium-Verbundwerkstoffen für architektonische Anwendungen demonstriert, darunter raumhohe, holzverstärkte Myzelium-Trennwände, einfach gekrümmte Bauteile und topologisch ineinandergreifende, rekonfigurierbare Komponenten. Im Rahmen des Pop-Up-Campus konnte so ein erster Entwurfskatalog mit Strategien für die Herstellung von Architekturelementen in Originalgröße unter Verwendung von Verbundwerkstoffen auf Myzelbasis entstehen.

Die Eigenschaften des resultierenden Verbundwerkstoffs wurde während des gesamten Entwicklungsprozesses bewertet, zunächst durch eine Reihe von Tests in kleinem Maßstab, um die Materialeigenschaften zu bestimmen, und anschließend durch Versuche mit den endgültigen Prototypen in Originalgröße. Diese Versuche zeigten die effektive Fähigkeit der Furnierverstärkung, die strukturellen Eigenschaften von auf Myzelien basierenden Verbundwerkstoffen zu verbessern, was Anwendungen im architektonischen Maßstab für nicht-strukturelle Trennwände ermöglicht. Die akustische Bewertung zeigte das anfängliche Potenzial des resultierenden Demonstrators, als effektives schalldämmendes Element zu fungieren, und wies auf die Möglichkeit hin, die Oberflächenmuster und die Anordnung der Furniere zu optimieren, um die Schallstreuung bei bestimmten Frequenzen zu kontrollieren.

Eine detaillierte Analyse des gesamten Produktionszyklus des finalen Demonstrators hat die inhärente Nachhaltigkeit des derzeitigen Prozesses im Vergleich zu bestehenden kommerziellen Lösungen für Trennwände gezeigt. Obwohl die Nachhaltigkeit durch den Übergang von einem prototypischen zu einem automatisierten und optimierten Prozess stark verbessert werden könnte, zeigt die aktuelle LCA-Analyse das Potenzial für Nachhaltigkeitsgewinne sowie die Identifizierung von Prozessphasen mit Verbesserungspotenzial.

Insgesamt hat das Projekt die Machbarkeit von furnierverstärkten Myzel-Verbundwerkstoffen als nachhaltige Lösung für die Herstellung von Trennwandelementen für den Büroinnenausbau aufgezeigt und deren

Charakterisierung hinsichtlich Struktur, Akustik und Nachhaltigkeit geliefert. Diese Entwicklung kann als Grundlage für weitere Entwicklungen in Richtung nachhaltiger und kreislauffähiger Bausysteme unter Verwendung von Myzel-Verbundwerkstoffen dienen.

Anhand der Evaluation der folgenden Erfolgsindikatoren wird im Folgenden beschrieben, inwiefern die Projektziele erreicht worden sind. Die Erfolge werden den vier Bereichen (1) Holz-Myzelium Verbundleistungsfähigkeit, (2) Konzeption, (3) Kreislauffähigkeit und (4) Fertigung zugeteilt.

(1) Holz-Myzelium Verbundleistungsfähigkeit

- Die mechanische Belastbarkeit/Verbundwirkung erweist sich als besser als bei den Einzelmaterialien.
- Die Akustische Wirksamkeit des Verbunds konnte nachgewiesen werden.
- Die Oberflächen des Verbunds erweisen sich als gestalterisch attraktiv und widerstandsfähig.

Zur Erreichung der Erfolgsindikatoren: Es wurde gezeigt, dass die Zugabe von Furniergittern als Verstärkungssysteme zur Steigerung der Biegeeigenschaften des Myzel-Furnier-Verbundwerkstoffs beitragen kann, solange das Furniergitter entsprechend dimensioniert ist (siehe Tabelle 1). Die akustische Wirksamkeit des Verbundes wurde nachgewiesen. Die Ergebnisse der messtechnischen Untersuchung zeigen, dass Stellwände in Holz-Myzelium-Verbundbauweise sowohl über nutzbare raumakustische Eigenschaften als auch vielversprechende Optimierungspotenziale verfügen (siehe Abschnitt „Frequenz- und Richtungsabhängige Auswirkung auf die Raumakustik“). Parameter, welche die Schallabsorption beeinflussenden wurden definiert: Bei allen Versuchen wurde ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Wachstumsrate des Myzels und der Schallabsorption festgestellt - geringere Wachstumsraten gehen mit einer höheren Schallabsorption einher (Abbildung 33). Durch die Erstellung des Demonstrators konnte die Herstellung von ästhetisch ansprechenden Oberflächen demonstriert werden, auch hier konnten beeinflussende Parameter beschrieben werden (Abbildung 76).

(2) Konzeption

- Eine hohe Nutzerakzeptanz und positiver Einfluss auf Wohlempfinden im Innenraum konnten erfolgreich erreicht bzw. umgesetzt werden.
- Eine hohe gestalterische Vielfalt konnte gewährleistet werden.
- Leistungsfähigkeit und Tools zur Auslegung konnten qualitativ und quantitativ bestimmt werden.
- Konstruktionsregeln für Bioverbundbauweise und Füge Techniken wurden erfolgreich und nachvollziehbar erstellt.

Zur Erreichung der Erfolgsindikatoren: Anhand einer Reihe von großformatigen Prototypen, darunter raumhohe, holzverstärkte Myzelium-Trennwände, einfach gekrümmte Bauteile und topologisch ineinandergreifende, rekonfigurierbare Komponenten, kann die gestalterische Vielfalt des Ansatzes gewährleistet werden (siehe Abschnitt „AP 4.1.1 Pop-Up Campus Trennwand Demonstratoren“). Die Leistungsfähigkeit wurde anhand verschiedener Versuchsreihen überprüft (mechanisch und akustisch) (siehe vorheriger Abschnitt). Zur Auslegung der Bauteile wurde ein Berechnungssystem und FE- Simulationsmodelle entwickelt, um Bauteile in größerem Maßstab zu entwerfen und zu dimensionieren (siehe Abschnitt „AP 3.2 Ansätze zur Dimensionierung und Auslegung (ARUP)“). Konstruktionsregeln für die Fabrikation des Verbunds leiten sich aus den entwickelten technologischen Möglichkeiten in Kombination mit den Ergebnissen dieser digitalen Modellierung ab. Beispielhaft wurde so der finale Demonstrator konzipiert und entwickelt (siehe Abschnitt „Dimensionierung und Konstruktion des finalen Demonstrators“).

(3) Kreislauffähigkeit

- Die Verwendung von Rest- und Abfallstoffen aus der heimischen Landwirtschaft erwies sich als praktikabel und zielführend.
- Ein positiver ökologischer Fußabdruck des Verbundmaterials konnte nachgewiesen bzw. dargestellt werden.

- Das Potential für zirkuläre Wertschöpfungsketten und Geschäftsmodelle konnte nachvollziehbar dargestellt werden.
- Ein Netzwerk zur Stärkung von Bio-Fabrikation im Bauwesen in Deutschland konnte entwickelt werden.

Zur Erreichung der Erfolgsindikatoren: Nachdem durch eine anfängliche Charakterisierung der Basismaterialien Hanfschäben als Substrat und Ahornfurnier als Verstärkungs- und Bewehrungsmaterial identifiziert wurden, stellte sich die Auswahl auch im Laufe des Projekts als praktikabel heraus. Durch eine Lebenszyklusbewertung konnte festgestellt werden, dass der Myzel-Verbundwerkstoff und das Furniergitter vielversprechende Ergebnisse als umweltfreundliches Material für die Verwendung als Innentrennwand gezeigt haben, dass ein ganzheitlicher Ansatz für die Lebenszyklusbewertung allerdings von entscheidender Bedeutung ist, insbesondere zur Festlegung geeigneter Optimierungspotenziale (z.B. sekundäre Aspekte wie die Stromquelle/Effizienz für das Ultraschallschweißen und das Myzelwachstum, der Holzrahmen). Für die weitere Forschung werden folgende Empfehlungen ausgesprochen: eine weitere Untersuchung der möglichen Wiederverwendungsszenarien, Optimierung der End-of-Life Szenarien, Optimierung des eingewachsenen Holzrahmens. Das Netzwerk zur Stärkung der Bio-Fabrikation konnte durch die Durchführung eines Stakeholder-Workshops im März 2022 im Büro der Arup Deutschland GmbH in Berlin initiiert werden. In diesem Rahmen konnte eine Gruppe von Industriepartnern aus den Bereichen Design, Architektur und Produktherstellung Feedback zum aktuellen Forschungsstand des Holz-Myzel-Verbundwerkstoffs geben. Schlüsselthemen und -fragen zur Integration von myzelbasierten Materialien in die Praxis, Qualitäten und Herausforderungen des Materials und nutzerorientierte Fragestellungen wurden innerhalb des Workshops besprochen.

(4) Fertigung

- Eine relativ hohe Geschwindigkeit und Präzision der Herstellung konnte sichergestellt werden.
- Die für die Produktion benötigten Eigenschaften sind reproduzierbar.
- Geometrische Möglichkeiten und Beschränkungen der Bauteile konnten nachgewiesen und dargestellt werden.

Zur Erreichung der Erfolgsindikatoren: Durch die Entwicklung eines integrierten Fertigungsprozesses, bei dem Furniere in einem kontinuierlichen Prozess gelegt und geschweißt werden, ist eine effiziente und präzise Produktion der (3D) Bewehrungsstrukturen möglich (siehe Abbildung 26). So können zwei- und dreidimensionale Gitterstrukturen reproduzierbar gefertigt werden. Durch Einstellung der Wachstumsparameter (Temperatur, Feuchtigkeit, Zeit) können die durch Wachstum generierten Materialeigenschaften reproduziert werden. Durch die digitale Modellierung, als auch die Einschränkungen, die sich durch Fabrikations- und Wachstumsmöglichkeiten ergeben, können Möglichkeiten und Beschränkungen der Bauteile definiert werden.

Publikationen

Fachzeitschriften

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

Konferenzen

Rossi, A.; Javadian, A.; Acosta, I.; Özdemir, E.; Nolte, N.; Saeidi, N.; Dwan, A.; Ren, S.; Vries, L.; Hebel, D.; Wurm, J.; Eversmann, P.: HOME: Wood-Mycelium Composites for CO₂-neutral, Circular Interior Construction and Fittings. In Sustainable Built Environment D-A-CH Conference 2022, Berlin: 20-23 September 2022. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1078/1/012068>

Zeitschriften, Bücher

Eversmann, P., Rossi, A., Nolte, N., Özdemir, E., Wurm, J., Acosta, I., Dwan, A., Ren, S., Hebel, D., Javadian, A., & Saeidi, N. (2022). HOME. In C. Sauer, M. Stoll, E. Fransén Walldör & M. Schneider (Hrsg.), *Architectures of Weaving: From Fibers and Yarns to Scaffolds and Skins* (S. 196–197). Berlin: JOVIS. <https://doi.org/10.1515/9783868598315>

Özdemir, E. Is mycelium the future of construction? Building components made of mushroom roots. *Design Unlimited Magazine*. Unlimited Publications. Biodesign. 4.2023.

Schlussworte

Danksagung

Die Autoren danken Jannis Heise vom Fachgebiet *Trennende und Fügende Fertigungsverfahren (TFF)* an der Universität Kassel für die Durchführung von Zugfestigkeitsprüfungen an einzelnen Ahornfurnierstreifen und geschweißten Ahornfurnierverbindungen sowie für die Analyse und Visualisierung der Prüfergebnisse; Thomas Bierwirth und Marco Klocke vom Heitz Furnierkantenwerk, Melle, für die Bereitstellung von Holzfurnieren für die physikalischen Prototypen und Prüfungen; und Weber Ultrasonics und Hermann Ultraschall, Karlsbad, für die technische Unterstützung und die Bereitstellung von Ultraschallschweißgeräten.

Mitwirkende

Autorinnen und Autoren

Prof. Philipp Eversmann

Eda Özdemir

Andrea Rossi

Nadja Nolte

Prof. Dirk Hebel

Nazanin Saeidi

Alireza Javadian

Prof. Dr. Jan Wurm

Ivan Acosta

Albert Dwan

Shibo Ren

Carsten Hein

Jessica Watts

Simon Lut

Weitere Mitwirkende

Kaufmann, Zoe (Studentische Hilfskraft)

Shi, Longbiao (Studentische Hilfskraft)

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 roboterassistierter 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 Fertigungsverfahren unter Verwendung nachhaltiger Materialien für die Architektur. Derzeit forscht sie an verstärkten Myzelverbundwerkstoffen und führt Lehrtätigkeiten an der Universität Kassel durch.



M.A. Andrea Rossi

Andrea Rossi ist Architekturforscher und Computergestalter. Er ist Doktorand an der DDU Digital Design Unit der TU Darmstadt sowie wissenschaftlicher Mitarbeiter am EDEK der Universität Kassel. Sein derzeitiger Schwerpunkt liegt auf diskretem Design, Roboterfertigung und neuartigen Biomaterialien. Er ist der Entwickler von Wasp, einem quelloffenen Grasshopper-Plugin für kombinatorische und diskrete Modellierung. Zuvor war er wissenschaftlicher Mitarbeiter an der ETH Zürich, Spezialist für Roboterfertigung bei Coop Himmelb(l)au sowie Robotikspezialist bei IndexLab - Politecnico di Milano. Er unterrichtete Workshops zu digitalen Werkzeugen und Fabrikation in Italien (Politecnico di Milano), Deutschland (HfG Offenbach, Leibniz Universität Hannover), USA (University of Buffalo) und Israel (Technion Haifa). Er hat einen BSc in Architektur (2011) vom Politecnico di Milano und einen Master of Arts in Architektur (2013) von der Dessau International Architecture Graduate School.



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.



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.



Dr. Alireza Javadian

Dr. Alireza Javadian hat an der ETH Zürich in Architektur und Bauwesen promoviert und arbeitet derzeit als Forschungsleiter an der Fakultät für Architektur am Karlsruher Institut für Technologie in Deutschland und als Co-Principal Investigator des Urban Bio-cycle Projekts am Future Cities Laboratory in Singapur. Seine Forschung konzentriert sich auf die Entwicklung alternativer nachhaltiger Baumaterialien, die aus erneuerbaren Ressourcen wie Bambus, Holz, landwirtschaftlichen Abfällen und industriellen Nebenprodukten nach dem Prinzip der Kreislaufwirtschaft hergestellt werden.



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.



Ivan Acosta

Ivan Acosta ist Senior Sustainability Consultant bei der Arup Deutschland GmbH. Er erwarb 2010 einen MEng in Bauingenieurwesen an der Universidad de Los Andes in seiner Heimatstadt Bogota, Kolumbien, und 2015 einen MSc-Abschluss in Nachhaltiger Architektur und Planung an der HafenCity Universität in Hamburg, Deutschland. Er verfügt über umfangreiche internationale Erfahrung mit Projekten zur Umsetzung von Nachhaltigkeitsprinzipien in der gebauten Umwelt, wobei er sich auf drei Kernthemen konzentriert: Minderung des Klimawandels, Klimaanpassung und Kreislaufwirtschaft. Derzeit leitet er Arups Beratungsgeschäft für Dekarbonisierung in Deutschland und leitete kürzlich die Entwicklung des Circular Buildings Toolkit, ein gemeinsames Forschungs- und Umsetzungsprojekt zwischen Arup und der Ellen MacArthur Foundation.



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.



Shibo Ren

Shibo Ren ist ein leitender Bauingenieur von Arup Amsterdam. Er erwarb 2008 seinen Master-Abschluss mit Auszeichnung in Bauingenieurwesen an der Technischen Universität Delft in den Niederlanden und 2011 einen weiteren Master-Abschluss in Architektur an der Architectural Association School of Architecture in London. Seit 2012 hat er umfangreiche Erfahrungen in der Leitung komplexer Projekte in verschiedenen Größenordnungen in Europa gesammelt. Seine Praktiken und Forschungen konzentrieren sich auf die integrale Gestaltung anspruchsvoller Strukturen, innovativer Materialien und komplexer Geometrien, wobei er computergestützte Designstrategien und digitale Fabrikation zum Denken, Analysieren und Entwerfen einsetzt.

Literaturverzeichnis

- Adamatzky, A., Ayres, P., Belotti, G., & Wosten, H. (2019). *Fungal architecture* (arXiv:1912.13262). arXiv.
<http://arxiv.org/abs/1912.13262>
- ARUP. (o.J.). *ARUP Projects*. <https://www.arup.com/projects/all-projects/> zuletzt aufgerufen am 13.06.2025
- Arup Deutschland GmbH. (o. J.). *LCA Analysis: Database filtered for product data from Germany region*. One Click
LCA Ltd.
- Bitting, S., Derme, T., Lee, J., Van Mele, T., Dillenburger, B., & Block, P. (2022). Challenges and Opportunities in
Scaling up Architectural Applications of Mycelium-Based Materials with Digital Fabrication.
Biomimetics, 7(2), 44. <https://doi.org/10.3390/biomimetics7020044>
- Bledzki, A. K., Faruk, O., & Sperber, V. E. (2006). Cars from Bio-Fibres. *Macromolecular Materials and Engineering*,
291(5), 449–457. <https://doi.org/10.1002/mame.200600113>
- 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(1), 22112.
<https://doi.org/10.1038/s41598-021-01598-4>
- Correa, D., Papadopoulou, A., Guberan, C., Jhaveri, N., Reichert, S., Menges, A., & Tibbits, S. (2015). 3D-Printed
Wood: Programming Hygroscopic Material Transformations. *3D Printing and Additive Manufacturing*,
2(3), 106–116. <https://doi.org/10.1089/3dp.2015.0022>
- Dänzer, T. (2018). Ist Mycel das Material der Zukunft? *Chemie in unserer Zeit*, 52(2), 74–74.
<https://doi.org/10.1002/ciuz.201870204>
- 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>
- Dawod, M., Deetman, A., Akbar, Z., Heise, J., Klussmann, H., Böhm, S., & Eversmann, P. (2019). *Continuous Timber
Fibre Placement-Towards the Design and Robotic Fabrication of High-Resolution Timber Structures*.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.31569.68963>

Ecovative. (o.J.). *Ecovative*. Ecovative. www.ecovative.com zuletzt aufgerufen am 13.06.2025

Embodied Carbon and Circularity in Office Interiors.pdf. (o. J.).

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>

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>

Goles, E., Tsompanas, M.-A., Adamatzky, A., Tegelaar, M., Wosten, H. A. B., & Martínez, G. J. (2020). Computational universality of fungal sandpile automata. *Physics Letters A*, 384(22), 126541. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2020.126541>

Hinchcliffe, S. A., Hess, K. M., & Srubar, W. V. (2016). Experimental and theoretical investigation of prestressed natural fiber-reinforced polylactic acid (PLA) composite materials. *Composites Part B: Engineering*, 95, 346–354. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.03.089>

Islam, M. R., Tudryn, G., Bucinell, R., Schadler, L., & Picu, R. C. (2017). Morphology and mechanics of fungal mycelium. *Scientific Reports*, 7(1), 13070. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-13295-2>

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>

Kam, D., Layani, M., BarkaiMinerbi, S., Orbaum, D., Abrahami BenHarush, S., Shoseyov, O., & Magdassi, S. (2019). Additive Manufacturing of 3D Structures Composed of Wood Materials. *Advanced Materials Technologies*, 4(9), 1900158. <https://doi.org/10.1002/admt.201900158>

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>

- Livne, A., Wösten, H. A. B., Pearlmutter, D., & Gal, E. (2022). Fungal Mycelium Bio-Composite Acts as a CO₂-Sink Building Material with Low Embodied Energy. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 10(37), 12099–12106. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c01314>
- Makowski, Z. S. (1963). *Räumliche Tragwerke aus Stahl*.
- Matsuzaki, R., Ueda, M., Namiki, M., Jeong, T.-K., Asahara, H., Horiguchi, K., Nakamura, T., Todoroki, A., & Hirano, Y. (2016). Three-dimensional printing of continuous-fiber composites by in-nozzle impregnation. *Scientific Reports*, 6(1), 23058. <https://doi.org/10.1038/srep23058>
- Mogu Srl. (2022). Mogu Acoustic. *Mogu*. <https://mogu.bio/acoustic-collection/> zuletzt aufgerufen am 13.06.2025
- Montalvo Navarrete, J. I., Hidalgo-Salazar, M. A., Escobar Nunez, E., & Rojas Arciniegas, A. J. (2018). Thermal and mechanical behavior of biocomposites using additive manufacturing. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 12(2), 449–458. <https://doi.org/10.1007/s12008-017-0411-2>
- Moser, F., Trautz, M., Beger, A.-L., Löwer, M., Jacobs, G., Hillringhaus, F., Wormit, A., Usadel, B., & Reimer, J. (2017). Fungal mycelium as a building material. *Proceedings of IASS Annual Symposia*, 2017(1), 1–7.
- MycoWorks. (o.J.). *Mycoworks*. MycoWorks. <https://www.mycoworks.com/> zuletzt aufgerufen am 13.06.2025
- Parandoush, P., & Lin, D. (2017). A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites. *Composite Structures*, 182, 36–53. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.08.088>
- Pelletier, M. G., Holt, G. A., Wanjura, J. D., Bayer, E., & McIntyre, G. (2013). An evaluation study of mycelium based acoustic absorbers grown on agricultural by-product substrates. *Industrial Crops and Products*, 51, 480–485. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.09.008>
- Perkins, I., & Skitmore, M. (2015). Three-dimensional printing in the construction industry: A review. *International Journal of Construction Management*, 15(1), 1–9. <https://doi.org/10.1080/15623599.2015.1012136>

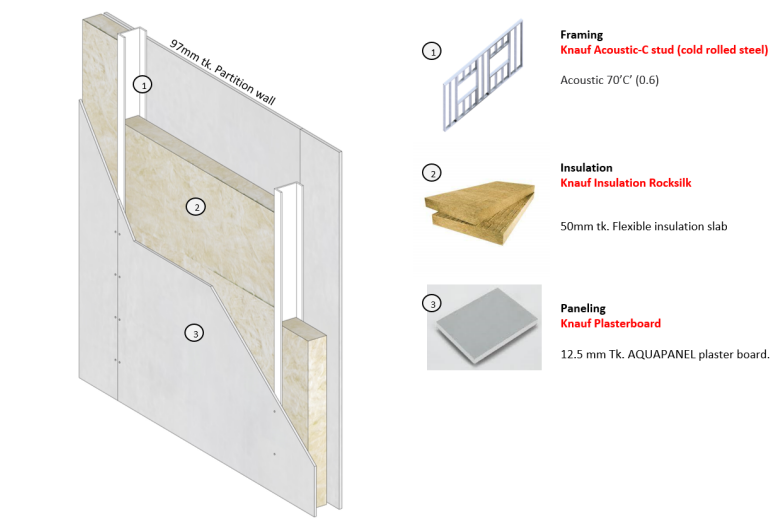
- Pickering, K. L., Efendy, M. G. A., & Le, T. M. (2016). A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. *Special Issue on Biocomposites*, 83, 98–112. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.08.038>
- Pitt, K., Lopez-Botello, O., Lafferty, A. D., Todd, I., & Mumtaz, K. (2017). Investigation into the material properties of wooden composite structures with in-situ fibre reinforcement using additive manufacturing. *Composites Science and Technology*, 138, 32–39. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2016.11.008>
- Salpriyan, P. M., Krishna, K., & Singh, T. (2024). Recent developments in natural fibre polymer composite materials for interior design applications: An overview from acoustic perspective. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*. <https://doi.org/10.1007/s12008-024-01935-7>
- Santos, I. S., Nascimento, B. L., Marino, R. H., Sussuchi, E. M., Matos, M. P., & Griza, S. (2021). Influence of drying heat treatments on the mechanical behavior and physico-chemical properties of mycelial biocomposite. *Composites Part B: Engineering*, 217, 108870. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108870>
- Sona Singh, S. S., Harsh, N., & Gupta, P. (2014). A novel method of economical cultivation of medicinally important mushroom, *Ganoderma lucidum*. *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research (IJPSR)*, 5(5), 2033–2037. CABI Databases.
- Tao, Y., Wang, H., Li, Z., Li, P., & Shi, S. Q. (2017). Development and Application of Wood Flour-Filled Polylactic Acid Composite Filament for 3D Printing. *Materials*, 10(4). <https://doi.org/10.3390/ma10040339>
- Tondi, G., Andrews, S., Pizzi, A., & Leban, J.-M. (2007). Comparative potential of alternative wood welding systems, ultrasonic and microfriction stir welding. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 21(16), 1633–1643. <https://doi.org/10.1163/156856107782793258>
- Troughton, M. J. (2009). Chapter 2-Ultrasonic Welding. *Plastics Design Library, Handbook of Plastics Joining: A Practical Guide*, 15–35.
- Vallas, T., & Courard, L. (2017). Using nature in architecture: Building a living house with mycelium and trees. *Frontiers of Architectural Research*, 6. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2017.05.003>

- Van Wylick, A., Elsacker, E., Yap, L. L., Peeters, E., & de Laet, L. (2022). *Mycelium Composites and their Biodegradability: An Exploration on the Disintegration of Mycelium-Based Materials in Soil*. 652–659. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/CTA.1.652>
- Volk, R., Schröter, M., Saeidi, N., Steffl, S., Javadian, A., Hebel, D. E., & Schultmann, F. (2024). Life cycle assessment of mycelium-based composite materials. *Resources, Conservation and Recycling*, 205, 107579. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107579>
- Wang, Z., Xu, J., Lu, Y., Hu, L., Fan, Y., Ma, J., & Zhou, X. (2017). Preparation of 3D printable micro/nanocellulose-polylactic acid (MNC/PLA) composite wire rods with high MNC constitution. *Industrial Crops and Products*, 109, 889–896. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.09.061>
- Zukunft Bau. (2021, Februar 15). *Bekanntmachung Förderaufruf der Antragsrunde 2021 zur Förderung von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben im Rahmen des Innovationsprogramms Zukunft Bau*. https://www.zukunftbau.de/fileadmin/user_upload/01_Forschungsf%C3%B6rderung/00_F%C3%B6rderaufruf/F%C3%B6rderaufruf_2021/F%C3%B6rderrichtlinie_und_-aufruf_2021/Zukunft_Bau-FoF%C3%B6_F%C3%B6Aufruf-2021_Reinschrift_gez.pdf zuletzt aufgerufen am 13.06.2025

Anhang 1

Vergleich bestehender Trennwandlösungen mit bio-basierten Lösungen

HOME Use Case Internal Partition Systems – Benchmarks
Benchmark Business-as-Usual (BAU) – Knauf Typical Drywall partition system



KU LEUVEN

HOME – Circular and net-zero mycelium and timber fit-out systems
Client: ARUP | Department of Architecture | Prof. Jan Wurm
V1 | 29/03/2022

Technical Data

Boarding specification	1 layer 12.5 Knauf Aquapanel indoor
Stud, depth & gauge	Acoustic 70" C' [0.6]
Overall width (excluding finishes)	97mm
Acoustic sound reduction (Db Rw)2	48
Fire resistance period3	60

PRODUCER

KNAUF
Head Office & Sittingbourne Plant
Kemsley Fields Business Park, Kent, ME9 8SR
Phone: 01795 424499
E-mail: info@knauf.co.uk

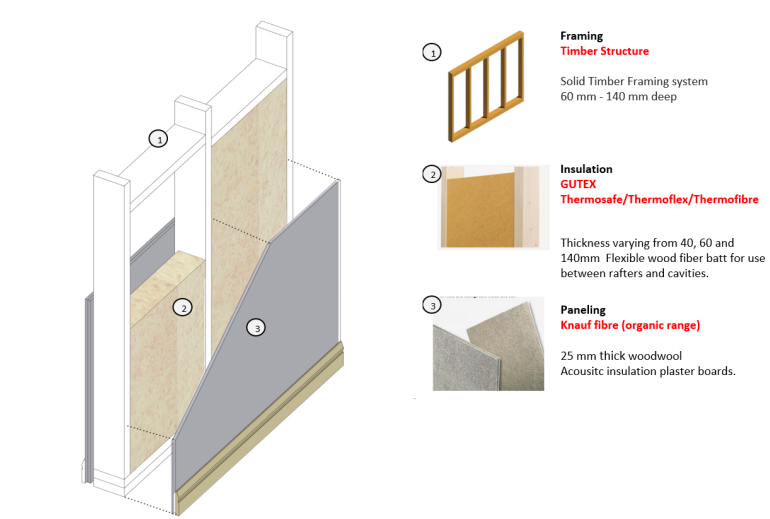
SOURCES:

<https://www.knauf.co.uk/systems-and-products/systems/drywall-systems/partition-systems/aquapanel-interior-system>
<https://www.knauf.co.uk/systems-and-products/systems/drywall-systems/partition-systems/knauf-performer>

Quelle: ARUP

Abbildung 107
Business as Usual Benchmark: Typische Trockenwandkonstruktion.

HOME Use Case Internal Partition Systems – Benchmarks
Bio-Based Benchmark 1 – Gutex light weight partition system



KU LEUVEN

HOME – Circular and net-zero mycelium and timber fit-out systems
Client: ARUP | Department of Architecture | Prof. Jan Wurm
V1 | 29/03/2022

Technical Data

	Configuration 1 Plasterboard 12.5 mm Both sides	Configuration 2 Fibre reinforced plasterboard 25 mm both sides	Configuration 3 Fibre reinforced plasterboard 25 mm both sides
timber frame (mm) E.g. spruce, fir	60	60	140
GUTEX Thermosafe* (mm)	40	60	140
U-factor (W/m2K)	0.70	0.60	0.29
Noise insulation value RW (dB)	42	47	48

PRODUCER

GUTEX Holzfaserplattenwerk
H. Henselmann GmbH + Co KG
Gutenberg 5
D-79761 Waldshut-Tiengen
Phone: +49 7741 6099-0
Fax: +49 7741 6099-57
E-mail: info@gutex.de

SOURCES:

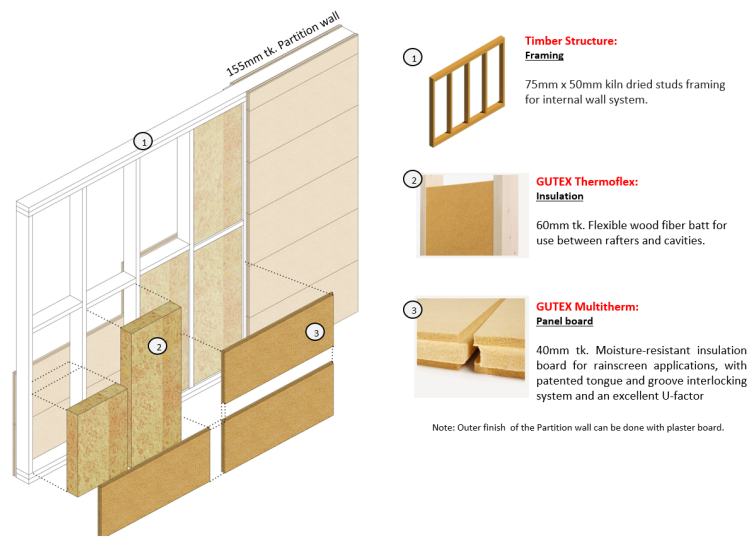
<https://gutex.de/en/product-range/products/product/gutex-thermoflex-1/>
<https://gutex.de/en/product-range/products/product/gutex-thermofibre/>
<https://gutex.de/en/product-range/products/product/gutex-thermosafe/>
<https://www.arbond.co.uk/wp-content/uploads/2018/07/KNAUF-FIBRE.pdf>

Quelle: ARUP

Abbildung 108
Bio-basierte Alternative 1: Gutex Trennwandsystem (Bio-basierter Benchmark 1).

HOME Use Case Internal Partition Systems – Benchmarks

Bio-Based Benchmark 2 – Wood fibre partition system



KU LEUVEN

HOME – Circular and net-zero mycelium and timber fit-out systems
Client: ARUP | Department of Architecture | Prof. Jan Wurm
V1 | 25/03/2022

Technical Data

	GUTEX Thermoflex	GUTEX Multitherm
Joint	Butted	tongue and groove
Thickness (mm)	60	40
Length X width (mm)	1760x600mm	1350x575 mm
Weight per board (kg)	2.33	5.91
Bulk density (kg/m3)	~50	140
Thermal conductivity λD(W/mK)	0,036	0.040
Sound insulation (RW)	-	45 dB
Air flow resistivity (kPa-s/m2)	5	-
Vapour diffusion factor (μ)	2	4

PRODUCER

GUTEX Holzfaserplattenwerk

H. Henselmann GmbH + Co KG
Gutenburg 5
D-79761 Waldshut-Tiengen

Phone:+49 7741 6099-0
Fax:+49 7741 6099-57
E-mail:info@gutex.de

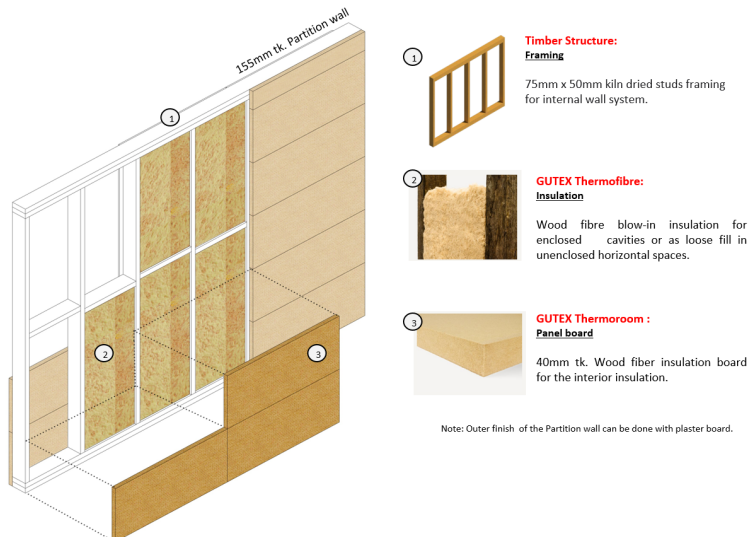
SOURCES:
<https://gutex.de/en/product-range/products/product/gutex-thermoflex-1/>
<https://gutex.de/sortiment/produkte/produkt/gutex-multitherm/>

Quelle: ARUP

Abbildung 109
Bio-basierte Alternative 2: Holzfaserplatten (Bio-basierter Benchmark 2).

HOME Use Case Internal Partition Systems – Benchmarks

Bio-Based Benchmark 3 – Wood fibre partition system



KU LEUVEN

HOME – Circular and net-zero mycelium and timber fit-out systems
Client: ARUP | Department of Architecture | Prof. Jan Wurm
V1 | 25/03/2022

Technical Data

	GUTEX Thermofibre	GUTEX Thermoroom
Joint	-	butted
Thickness (mm)	Free-form	40
Length X width (mm)	-	1200x500 mm
Weight per board (kg)	-	3.1
Bulk density (kg/m3)	25	130
Thermal conductivity λD(W/mK)	0,039	0,039
Sound insulation (RW)	-	-
Air flow resistivity (kPa-s/m2)	5	100
Vapour diffusion factor (μ)	2	3

PRODUCER

GUTEX Holzfaserplattenwerk

H. Henselmann GmbH + Co KG
Gutenburg 5
D-79761 Waldshut-Tiengen

Phone:+49 7741 6099-0
Fax:+49 7741 6099-57
E-mail:info@gutex.de

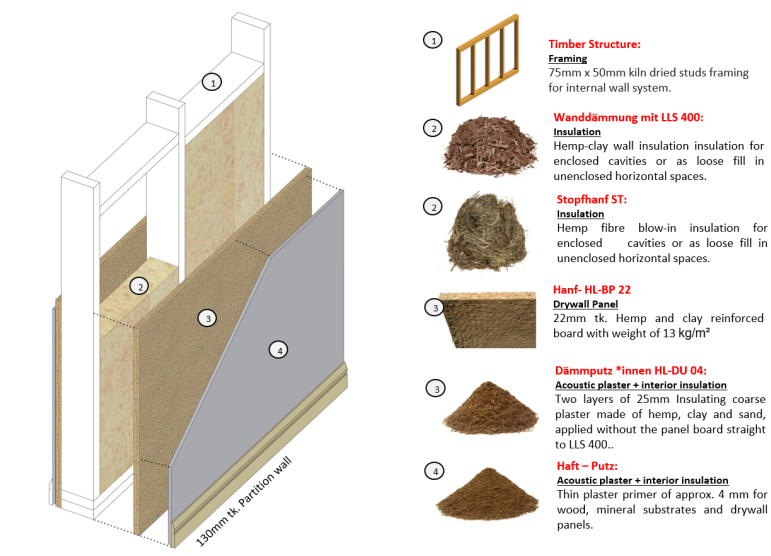
SOURCES:
<https://gutex.de/en/product-range/products/product/gutex-thermofibre/>
<https://gutex.de/en/product-range/products/product/gutex-thermoroom/>

Quelle: ARUP

Abbildung 110
Bio-basierte Alternative 3: Holzfaserplatten (Bio-basierter Benchmark 3).

HOME Use Case Internal Partition Systems – Benchmarks

Bio-Based Benchmark 4 – Hemp fibre partition system



KU LEUVEN

HOME – Circular and net-zero mycelium and timber fit-out systems
Client: ARUP | Department of Architecture | Prof. Jan Wurm
V1 | 25/03/2022

Technical Data

	LLS 400	Stophanf ST	Hanf-HL-BP 22	HL-DU 04	Haft-PUTZ
Density (kg/m³)	450	50	600	700	600
Length X width (mm)		-	1000 X 500	-	-
Thermal conductivity λ (W/mK)	0.074	0.409	0.095	0.099	0.09
specific heat capacity (kJ/kgK)		2.2	1.5	-	-
Heat transfer value (W/mK)		0.045	-	0.095	-
Fire protection class		Euroclass s C-s2,d0	E	-	-
Vapour diffusion factor (μ)		4	10	20	-

PRODUCER

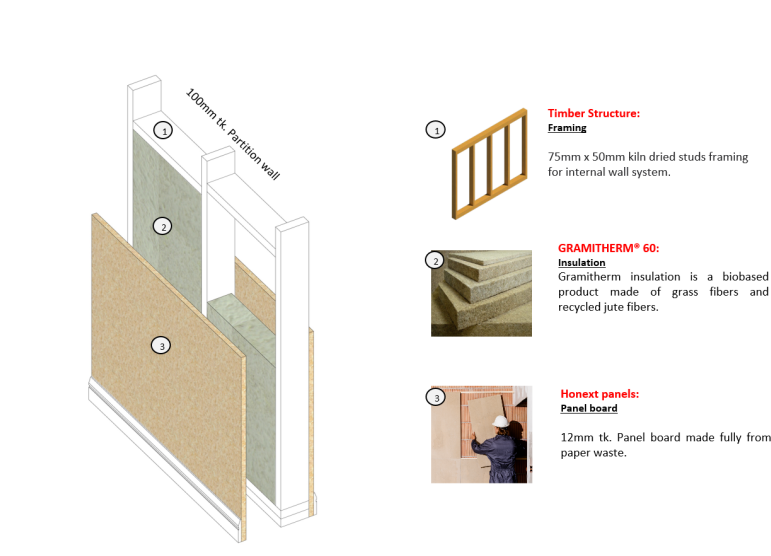
Hanffaser Uckermark eG
+4915141693494

SOURCES:
<https://www.hanffaser.de/uckermark/index.php/bauvorhaben/an-wanddaemmung>
<https://www.hanffaser.de/uckermark/index.php/stopf-hanf-daemmwoolle>
<https://www.hanffaser.de/uckermark/index.php/fehlmauplatte>
<https://www.hanffaser.de/uckermark/index.php/produkte/daemmputz>
<https://www.hanffaser.de/uckermark/index.php/produkte/haftputz>

Abbildung 111
Bio-basierte Alternative 4: Hanffaserplatten (Bio-basierter Benchmark 4).

HOME Use Case Internal Partition Systems – Benchmarks

Bio-Based Benchmark 5 – Recycled fibre partition system



KU LEUVEN

HOME – Circular and net-zero mycelium and timber fit-out systems
Client: ARUP | Department of Architecture | Prof. Jan Wurm
V1 | 25/03/2022

Technical Data

	GRAMITHERM* 60	GUTEX Multitherm
Material composition	72% grass fibers 20% recycled jute fibers 8% synthetic binder fibers	100% paper waste
Thickness (mm)	60	12
Length X width (mm)	1200x600mm	1220x2440 mm
Weight per board (kg)	-	-
Bulk density (kg/m³)	40(+/-5) kg/m³	-
Thermal conductivity λD(W/mK)	0,041	0,093
Acoustic absorption (aw)	-	0,15
Airborne sound insulation	-	24 dB
Vapour diffusion factor (μ)	1	2,7
Fire resistance	Euroclass E	Class C-s1,d0

PRODUCER

Gramitherm Europe SA
87, rue des Glacés Nationales
5060 Auvelais/Sambreville
Belgium, Office: +32 71 80 04 46
info@gramitherm.eu

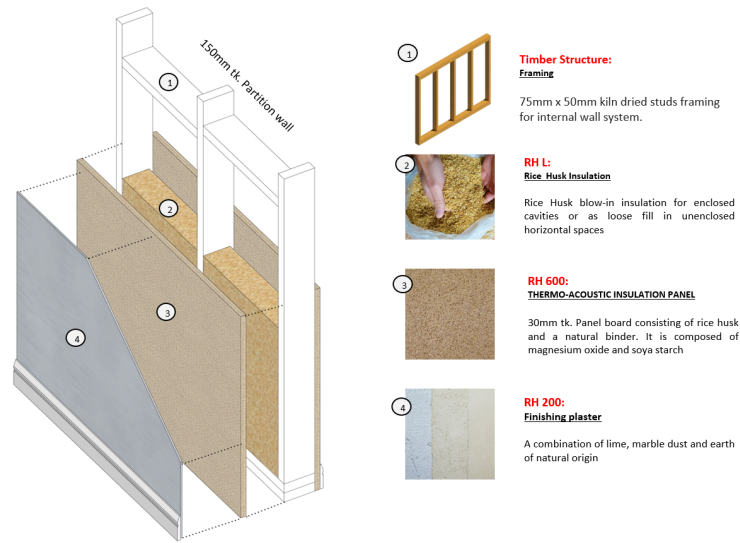
HONEXT
Barcelona, Spain
INFO@HONEXTMATERIAL.COM
+34 623 379 238

SOURCES:
<https://gramitherm.ch/products/?lang=en>
<https://gramitherm.ch/wp-content/uploads/2021/09/Technical-data-Gramitherm-21092021V2.pdf>
<https://honextmaterial.com/material>

Abbildung 112
Bio-basierte Alternative 5: Rezyklierte Zelluloseplatten (Bio-basierter Benchmark 5).

HOME Use Case Internal Partition Systems – Benchmarks

Bio-Based Benchmark 6 – Rice fibre partition system



KU LEUVEN

HOME – Circular and net-zero mycelium and timber fit-out systems
Client: ARUP | Department of Architecture | Prof. Jan Wurm
V1 | 25/03/2022

Technical Data

	RH L RICE HUSK INSULATION	RH 600 THERMO-ACOUSTIC INSULATION PANEL	RH 200 Finishing Plaster
Material composition	organic matter 73,87%	rice husk and natural binder	of lime, marble dust and earth
Thickness (mm)	-	12	2-5mm
Length X width (mm)	-	500x1250 mm	-
Density	120-140 (kg/m³)	600 kg/m³	1100 (kg/m³)
Bulk density (kg/m³)	40(+/-)5 kg/m³	-	-
Thermal conductivity λD(W/mK)	0,036	0,09	0,53
Water absorption	-	100%	W0
Fire resistance	-	B S1 - D0	-

PRODUCER

Ricehouse srl

Via G. Cantono, 23
13811 Andorno Micca (BI)
info@ricehouse.it
T +39 015 82 83 576
M +39 329 18 69 562

SOURCES:

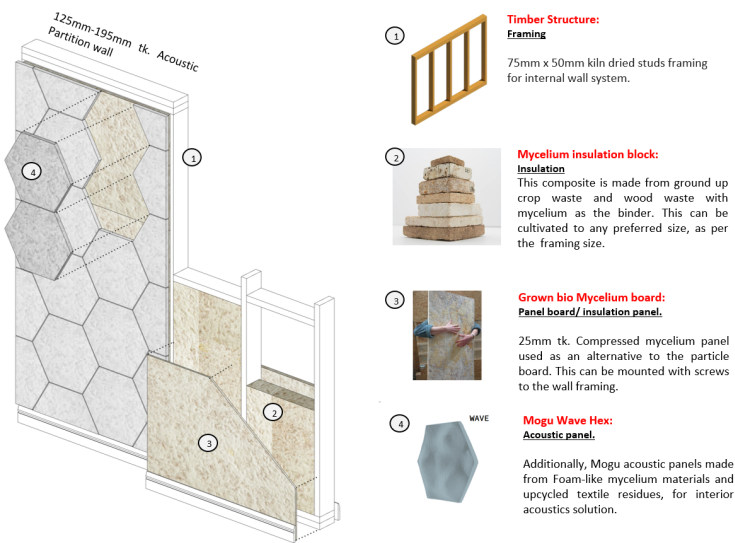
<https://www.ricehouse.it/en-rh-l>
<https://www.ricehouse.it/en-rh-600>
<https://www.ricehouse.it/en-rh-200>

Quelle: ARUP

Abbildung 113
Bio-basierte Alternative 6: Reisfaserplatten (Bio-basierter Benchmark 6).

HOME Use Case Internal Partition Systems – Benchmarks

Bio-Based Benchmark 7 – Mycelium partition system



KU LEUVEN

HOME – Circular and net-zero mycelium and timber fit-out systems
Client: ARUP | Department of Architecture | Prof. Jan Wurm
V1 | 25/03/2022

Technical Data

	MOGU Wave Hex acoustic panel	GROWN BIO Partition board
Joint	-	butted
Thickness (mm)	25-70	25
Length X width (mm)	560 X 505	1230x830mm
Weight per board (kg)	1	5
Density (kg/m³)	100	-
Compressive strength	10.72 kPa	-
Sound insulation (NRC)	0.53	-

PRODUCER

Grown bio

ian@grown.bio
+316 51 57 51 13
Postal/billing address:
Celebeslaan 47
1217 GV Hilversum

Mogu S.r.l.

Via San Francesco 62
21020 Inarzo (VA)
ITALY
enquire@mogu.bio

SOURCES:

<https://ecovative.com/mycocomposite>
<https://www.grown.bio/product/thin-insulation-panel-set-of-10/>
<https://mogu.bio/acoustic/>
<https://www.grown.bio/shop/>
https://mogu.bio/wp-content/uploads/2022/03/Acoustic-Technical-Datasheet_2022.pdf
<https://www.40-award.com/en/products/Myamo>
<https://kuerbach-design.com/myamo/>

Quelle: ARUP

Abbildung 114
Bio-basierte Alternative 7: Myzeliumplatten (Bio-basierter Benchmark 7).

Anhang 2

Beilagen und weiterführenden Daten zur Lebenszyklusanalyse

Lebenszyklus-Inventarisierung

Die folgenden Tabellen enthalten eine Zusammenfassung der Daten, die in die Sachbilanz einfließen.

Tabelle 13
Materialmengen

System					
Länge (m)	Breite (m)	Tiefe (m)	Dichte (kg/m3)	m3	kg
2,52	0,92	0,1	-	0,23	37,4

Mycelium					
Länge (m)	Breite (m)	Tiefe (m)	Dichte (kg/m3)	m3	kg
2,4	0,8	0,1	120	0,19	23,0

Furnier					
Länge (m)	Breite (m)	Mächtigkeit (m)	Dichte (kg/m3)	m3	kg
163,049	0,012	0,0005	555	9,78E-04	0,54

Rahmen					
Länge (m)	Breite (m)	Perimeter (m)	Dichte (kg/m3)	m3	kg
0,06	0,06	6,64	470	0,024	11,23
0,02	0,02	6,8	"	0,0027	1,29
0,02	0,02	6,8	"	0,0027	1,29
				0,029	13,79

Quelle: ARUP

Datenquellen

Tabelle 14
Datenquellen - Systemebene

Artikel		Modellierte Menge	Datentyp	Referenz/Quelle
Abmessungen des Systems	des	2,52 m hoch, 0,92 m breit) und einer Dicke von 0,10 m	Primäre Seite	Größe des Prototyps
Lebensdauer des Systems	des	8Jahre	Annahme	In Absprache mit dem Planungsteam, basierend auf der typischen Lebensdauer eines Einrichtungsgegenstands/einer Trennwand

Myzel-Substratdichte	und	Die Trockendichte von Myzelmaterial beträgt 120 kg/m ³ , die Nassdichte liegt jedoch bei 300 kg/m ³	Primäre Seite	KIT
Materialdichte des Rahmens		470kg/m ³	Sekundäres	Durchschnitt für Brettschichtholz (https://www.engineeringtoolbox.com/timber-mechanical-properties-d_1789.html)
Dichte des Furniers		555kg/m ³	Sekundäres	Bereich von 480-630kg/m ³ für Ahornholz (Splintholz, Hartholz) (https://www.engineeringtoolbox.com/timber-mechanical-properties-d_1789.html)
Durchschnittliche Transportentfernung		500km	Sekundäres	Annahme typisch in Deutschland
Myzel Trocknungszeit		35Stunden	Primäre Seite	Universität Kassel

Quelle: ARUP

Tabelle 15
Datenquellen und zusätzliche Annahmen - Teilprozesse

Phase	Prozess		Unterprozess/ Position	Daten typ	Kommentar	Herkunft aus
Phase der Myzelproduktion	1.1	Materialien	Materialmengen und -typen	Primäre Seite	Siehe die vom KIT bereitgestellten Daten (Anhang)	KIT
Transport der Furnierspule zum Labor	2.1.1	Transport der Spule zum Labor	Transport des Spulenkastens zum Labor	Primäre Seite	angenommen, dass 1/2 einer Schachtel für einen Prototyp verwendet wird	Ortsbesichtigung und Workshop 25.05
Furniergitter	2.2	Herstellung des Netzes	Verlegen von Spulen (Roboterarm)	Primäre Seite	Spitze = 1,62 kW, Bereitschaft 0,65 kW. Angenommen, die Leistung liegt nie über 20% der Spitze - extrem langsame Fahrt, viele Stopps. 20% von 1,62=0,324	Sitzung 11.05
			Schweißen mit Ultraschall	Primäre Seite	181,64kW Strom	EDEK_LCAinfo S. 4
			Abfälle aus Ahornfurnier	Primäre Seite	10% des Eingangsmaterials (Verschnitt)	Treffen mit dem Designteam 25.04
			Spulengehäuse aus Kunststoff auf Roboterarm, Schweiß Tisch, Infrastruktur für die Produktion	Primäre Seite	Wiederverwendet, außerhalb der Systemgrenze	Treffen mit dem Designteam 25.04

Phase	Prozess		Unterprozess/ Position	Daten typ	Kommentar	Herkunft aus
Herstellen des Holzrahmens	3.2 .1	Montage des Holzrahme ns	Rahmungsmateri al (Fichte)	Primär e Seite	Konstruktionsvollholz / Brettschichtholz aus Fichte für den Rahmenbau als 6m lange Balken von der Kasseler Holzfirma Rogowksi. Quelle unbekannt. Verarbeitung zu Brettschichtholz unbekannt.	EDEK_LCAinfo S. 5
			Holz zu Rahmen verarbeiten - Hammer	Primär e Seite	mit einer Hobelmaschine (Hammer A3 A31), die ca. 20 Minuten lang lief	EDEK_LCAinfo S. 5
			Holz zu Rahmen verarbeiten - Tischsäge	Primär e Seite	eine Tischsäge (Formatkreissäge Hammer B3), die ca. 5 Minuten lief	EDEK_LCAinfo S. 5
Herstellung der Träger für die Wachstumsp hase	4.1 .1	Produziere n Sie Formbrett	Schalungsplatte - Sperrholzplatten	Primär e Seite	"Holzhandlung Rogowski" Material	EDEK_LCAinfo S. 7
			Fräsen der Platte	Primär e Seite	5-Achsen-CNC-Fräsmaschine mit einem Verbrauch von 1,5 kW pro Stunde. Die gesamte Fräsdauer betrug 7 Stunden	EDEK_LCAinfo S. 7
	4.1 .2	Außenschi mmel produziere n	Zuschnitt auf Endmaße	Primär e Seite	Nachdem die Oberfläche mit der Maschine geformt worden war, wurden die Platten mit einer Kreissäge von Hand auf ihre endgültigen Abmessungen zugeschnitten.	EDEK_LCAinfo S. 7
			Gefrästes Material	Primär e Seite	Am Ende des Fräsprozesses entstanden 12 Formteile mit den Abmessungen 460x413,3 oder 460x433,3 mm, je nach ihrer Lage in der geplanten Fläche.	EDEK_LCAinfo S. 7
	4.1 .3	Bereiten Sie die Form vor	Papplack (4x Anstriche)	Primär e Seite	gekauft in einem örtlichen Schreibwarengeschäft namens Wikullil. Insgesamt wurden etwa 1700 ml Klarlack verwendet	EDEK_LCAinfo S. 7
			Manuelles Schleifen	Primär e Seite	Nach den ersten beiden Lackschichten wurden die Formen von Hand leicht abgeschliffen, um die rauen Holzpartikel auf der Oberfläche zu entfernen.	EDEK_LCAinfo S. 7
Montage des Systems	5.1 .1	Gitter und Rahmen vorbereite n	Dübel - Sperrholz	Primär e & Verm utung	Fläche und Anzahl der Dübel wurden angegeben. Angenommene Länge der Dübel - 3cm & Material der Dübel - Sperrholz	EDEK_LCAinfo S. 5
			Löcher für Dübel bohren	Primär e Seite	Makita Akkubohrmaschine. Angenommene 18V DC. "Der 18V LXT® Lithium-Ion 5.0Ah Akku BL1850B erreicht eine volle Ladung in 45 Minuten oder weniger".	EDEK_LCAinfo S. 5

Phase	Prozess	Unterprozess/ Position	Daten typ	Kommentar	Herkunft aus
				Quelle: https://www.makitatools.com/products/tools/cordless/18v-lxt/drills-and-fastening/hammer-drills-and-driver-drills	
	5.1 .2	Myzel vorbereite n	Zerkleinerung des Myzels	Primär e Seite 5-6 Stunden (ab Treffen). Quelle: Scheppach Handrührgerät PM1800D kaufen bei OBI	EDEK_LCAinfo S. 8 & Besichtigung & Workshop 25.05
Wachstums- und Erhaltungspha- se des Myzels	5.2 .1	Wachstum (Inkubation)	Wasserverbrauch	Primär e Seite 2L alle 3 Tage	Ortsbesichtigu- ng und Workshop 25.05
			Luftbefeuchter	Primär e Seite 10% der gesamten Wachstumszeit und verbraucht 25 Watt	Leistung bestätigt durch Kassel 11.05
	5.2 .2	Backen und Trocknen	Infrarot	Primär e Seite 2 Infrarot-Paneele (Opranic-Infrarot- Hybridheizung mit Thermostat)	EDEK_LCAinfo S. 9. Leistung bestätigt durch Kassel 11.05
			Fan	Primär e Seite kleiner Ventilator (DeLonghi). Angenommenes Produkt: 1500-2400W	EDEK_LCAinfo S. 9. Leistung bestätigt durch Kassel 11.05
	5.2 .3 & 7.1 .1	Mycelium- Beschichtu- ng (Wachstum und Pflege)	Natürliches Öl (z. B. Leinsamen)	Zweit- rangig/ Verm- utung Natürliches Öl wurde von EDEK/KIT bestätigt, aber der Typ war nicht spezifiziert. Das am besten geeignete natürliche Öl wurde aus der Ecoinvent-Datenbank ausgewählt.	KIT
Entsorgung von Rahmen	8.2 .2	Rahmen & Dübel	Kann nicht gerettet werden	Primär e Seite Entsorgung auf einer Deponie, wie mit dem Planungsteam vereinbart.	Ortsbesichtigu- ng und Workshop 25.05
Myzel- und Furnierentsor- gung	8.3 .2	Zerkleineru- ng des Myzelverb- unds	Ähnlicher Prozess wie früher, jedoch mehr Zeit - härteres Material	Anna- hme Vermutlich dasselbe wie in der Produktionsphase Zerkleinerung	-

Quelle: ARUP

Stoffströme: Die für die Material- und Produktströme erhobenen Lebenszyklusinventardaten sind in dieser Tabelle aufgeführt.

Tabelle 16
LCI Stoffströme

Ref	Bühne	Beschreibung der Etappe	Prozess	Modellierte Menge	Modellierte Einheiten	Modellierter SimaPro-Prozess	Stadium des Lebenszyklus
1.1	Vorbereitung der Agarplatten	Mittel	Gerstenkorn	3,03E-05	kg/Einheit	Gerstenkorn {GLO} Markt für APOS, U	A1-A3_Myzel
1.1	Vorbereitung der Agarplatten	Mittel	Gelatine	1,86E-05	kg/Einheit	Gelatine, getrocknet, verarbeitet in FR Umgebung (lang) Pappe bei Verpackung	A1-A3_Myzel
1.1	Vorbereitung der Agarplatten	Mittel	Wasser	0,0012	kg/Einheit	Leitungswasser {RER} Marktgruppe für APOS, U	A1-A3_Myzel
1.1	Vorbereitung der Agarplatten	Petrischale	Polystyrol	7,23E-05	kg/Einheit	Polystyrol, allgemeine Verwendung {GLO} Markt für APOS, U	A1-A3_Myzel
1.2	Mycelium-Samenvorbereitung	Malzextrakt-Brühe	Gerstenkorn	1,10E-02	kg/Einheit	Gerstenkorn {GLO} Markt für APOS, U	A1-A3_Myzel
1.2	Mycelium-Samenvorbereitung	Malzextrakt-Brühe	Wasser	4,52E-02	kg/Einheit	Leitungswasser {RER} Marktgruppe für APOS, U	A1-A3_Myzel
1.2	Mycelium-Samenvorbereitung	Reinigung	Wasser	2,71E-03	kg/Einheit	Leitungswasser {RER} Marktgruppe für APOS, U	A1-A3_Myzel
1.3	Mycelium Komposit Vorbereitung	Substrat	Sonnenhanf, geerntet	1,32E+01	kg/Einheit	Sonnenhanf, geerntet {GLO} Markt für Sonnenhanf, geerntet APOS, U	A1-A3_Myzel
1.3	Mycelium Komposit Vorbereitung	Reinigung	Wasser	4,08E-02	kg/Einheit	Leitungswasser {RER} Marktgruppe für APOS, U	A1-A3_Myzel
1.3	Mycelium Komposit Vorbereitung	Feuchtigkeitszufuhr	Wasser	2,43E+01	kg/Einheit	Leitungswasser {RER}	A1-A3_Myzel

Ref	Bühne	Beschreibung der Etappe	Prozess	Modellierte Menge	Modellierte Einheiten	Modellierter SimaPro-Prozess	Stadium des Lebenszyklus
						Marktgruppe für APOS, U	
1.3	Mycelium Komposit Vorbereitung	Reinigung	Wasser	5,99E+00	kg/Einheit	Leitungswasser {RER} Marktgruppe für APOS, U	A1-A3_Myzel
1.3	Mycelium Komposit Vorbereitung	Reinigung	Wasser	2,23E+00	kg/Einheit	Leitungswasser {RER} Marktgruppe für APOS, U	A1-A3_Myzel
1.3	Mycelium Komposit Vorbereitung	Inkubationsbeutel	Polypropylen	1,61E-01	kg/Einheit	Textil, Vliesstoff Polypropylen {GLO} Markt für Textil, Vliesstoff Polypropylen APOS, U	A1-A3_Myzel
1.3	Mycelium Komposit Vorbereitung	Inkubationsbeutel	Polypropylen-Abfall	1,61E-01	kg/Einheit	HOMECopy_Alttextilien, verschmutzt {RoW} Markt für Alttextilien, verschmutzt APOS, U	A1-A3_Myzel
1.3	Mycelium Komposit Vorbereitung	Inkubationsbeutel	Saatbaumwolle	4,61E-02	kg/Einheit	Saatbaumwolle {GLO} Markt für Saatbaumwolle APOS, U	A1-A3_Myzel
1.3	Mycelium Komposit Vorbereitung	Reinigung	Wasser	1,30E+02	kg/Einheit	Leitungswasser {RER} Marktgruppe für APOS, U	A1-A3_Myzel
1.3	Mycelium Komposit Vorbereitung	Bestimmung der Wachstumsbedingungen	Wasser	1,05E+01	kg/Einheit	Leitungswasser {RER} Marktgruppe für APOS, U	A1-A3_Myzel
2.2	Herstellen des Furniergitters	Furnierspule	Spule aus Ahornfurnier	9,78E-04	m3/Einheit	FurnierKopie_Sperrholz {RER} Markt für Sperrholz APOS, U	A1-A3_VeneerGrid
3.2	Herstellen des Holzrahmens	Montage des Holzrahmens	Rahmungsmaterial (Fichte)	0,029	m3/Einheit	Brettschichtholz, durchschnittliche Leimmix {Europa ohne	A1-A3_Rahmen

Ref	Bühne	Beschreibung der Etappe	Prozess	Modellierte Menge	Modellierte Einheiten	Modellierter SimaPro-Prozess	Stadium des Lebenszyklus
						Schweiz} Markt für Brettschichtholz, durchschnittliche r Leimmix APOS, U	
4.1	Herstellung der Träger für die Wachstumsphase	Produzieren Sie Formbrett	Schalungsplatte - Sperrholzplatten	0,095	m3/Einheit	Sperrholz {RER} Markt für Sperrholz APOS, U	A1-A3_Rahmen
4.1	Herstellung der Träger für die Wachstumsphase	Bereiten Sie die Form vor	Papplack (4x Anstriche)	1,7	kg/Einheit	Acryllack, ohne Wasser, in 87,5%igem Lösungszustand {RER} Markt für Acryllacke, ohne Wasser, in 87,5%igem Lösungszustand APOS, U	A1-A3_Form
5.1	Montage des Systems	Gitter und Rahmen vorbereiten	Dübel - Sperrholz	0,0015	m3/Einheit	Sperrholz {RER} Markt für Sperrholz APOS, U	A1-A3_Rahmen
5.2	Wachstumsphase des Myzels	Wachstum (Inkubation)	Wasser	0,006	kg/Einheit	Leitungswasser {RER} Marktgruppe für APOS, U	A1-A3_Myzel
5.2	Wachstumsphase des Myzels	Mycelium-Beschichtung	Natürliches Öl (z. B. Leinsamen)	4,64E-06	kg/Einheit	Sojabohnenöl, raffiniert {GLO} Markt für APOS, U	A1-A3_Myzel
7.1	Wartung	Mycelium-Beschichtung	Natürliches Öl (z. B. Leinsamen)	1,85E-05	kg/Einheit	Sojabohnenöl, raffiniert {GLO} Markt für APOS, U	B2_System

Quelle: ARUP

Prozesse: Die für die Prozessströme (z. B. Herstellungsverfahren, Strom) erhobenen Sachbilanzdaten sind in dieser Tabelle aufgeführt:

Tabelle 17
AKI Elektrizität und Herstellungsprozesse

Ref	Bühne	Beschreibung der Etappe	Prozess	Modellierte Menge	Modellierte Einheiten	Modellierter Prozess	SimaPro-Modell	Stadium des Lebenszyklus
1.2	A1-A3 Myzel	Sterilisation	Elektrizität	3,39E-03	kWh/ Einheit	Elektrizität, Niederspannung	{DE} Markt für APOS, U	A1-A3 Myzel
"	A1-A3 Furniergitter	Inkubation	Elektrizität	8,29E-01	kWh/ Einheit	Elektrizität, Niederspannung	{DE} Markt für APOS, U	"
"	A1-A3 Rahmen	Saatgut-Extraktion	Elektrizität	1,13E-02	kWh/ Einheit	Elektrizität, Niederspannung	{DE} Markt für APOS, U	"
1.3	A4-A5 System	Fräsen	Elektrizität	6,43E+00	kWh/ Einheit	Elektrizität, Niederspannung	{DE} Markt für APOS, U	"
"	B2-System	Sterilisation	Elektrizität	6,31E+00	kWh/ Einheit	Elektrizität, Niederspannung	{DE} Markt für APOS, U	"
"	C2-System Transport	Bestimmung der Wachstumsbedingungen	Elektrizität	1,12E+01	kWh/ Einheit	Elektrizität, Niederspannung	{DE} Markt für APOS, U	"
2.2	C3-C4 Rahmen Beseitigung	Herstellung des Netzes	Verlegen von Spulen (Roboterarm)	2,3652	kWh/ Einheit	Elektrizität, Niederspannung	{DE} Markt für APOS, U	A1-A3 Furniergestell
"	C2 Myzel-Entsorgung	Herstellung des Netzes	Schweißen mit Ultraschall	181,64	kWh/ Einheit	Elektrizität, Niederspannung	{DE} Markt für APOS, U	"
3.2	A1-A3 Myzel	Montage des Holzrahmens	Holz zu Rahmen verarbeiten - Hammer	1	kWh/ Einheit	Elektrizität, Niederspannung	{DE} Markt für APOS, U	A1-A3 Rahmen
"	A1-A3 Furniergitter	Montage des Holzrahmens	Holz zu Rahmen verarbeiten - Tischsäge	0,25	kWh/ Einheit	Elektrizität, Niederspannung	{DE} Markt für APOS, U	"
4.1	A1-A3 Rahmen	Außenschimmel produzieren	Fräsen der Platte	10,5	kWh/ Einheit	Elektrizität, Niederspannung	{DE} Markt für APOS, U	A1-A3 Form
5.1	A4-A5 System	Gitter und Rahmen vorbereiten	Löcher für Dübel bohren	0,0225	kWh/ Einheit	Elektrizität, Niederspannung	{DE} Markt für APOS, U	A1-A3 Rahmen

Ref	Bühne	Beschreibung der Etappe	Prozess	Modellierte Menge	Modellierte Einheiten	Modellierter Prozess	SimaPro-	Stadium des Lebenszyklus
"	B2-System	Myzel vorbereiten	Zerkleinerung des Myzels	10,8	kWh/ Einheit	Elektrizität, Niederspannung {DE} Markt für APOS, U		A1-A3 Myzel
5.2	C2-System Transport	Wachstum (Inkubation)	Luftbefeuchter	0,175	kWh/ Einheit	Elektrizität, Niederspannung {DE} Markt für APOS, U		"
"	C3-C4 Rahmen Beseitigung	Backen und Trocknen	Infrarot	38,5	kWh/ Einheit	Elektrizität, Niederspannung {DE} Markt für APOS, U		"
"	C2 Myzel-Entsorgung	Backen und Trocknen	Fan	70	kWh/ Einheit	Elektrizität, Niederspannung {DE} Markt für APOS, U		"
8.3	A1-A3 Mycelium & A1-A3 Furniergitter	Zerkleinerung des Myzelverbunds	Ähnlicher Prozess wie zuvor	10,8	kWh/ Einheit	Elektrizität, Niederspannung {DE} Markt für APOS, U		C3-C4 Mycelium Disp

Tabelle 18
AKI Transportprozesse

Ref	Bühne	Beschreibung der Etappe	Prozess	Modellierte Menge	Modellierte Einheiten	Modellierter Prozess	SimaPro-	Stadium des Lebenszyklus
1.4	Transport des Myzelverbunds ins Labor	Transport des Komposits zur Universität Kassel	Straßenverkehr (innerhalb Deutschlands)	11,52	tkm/Einheit	Transport, Fracht, Lastkraftwagen, nicht spezifiziert {RER} Markt für Transport, Fracht, Lastkraftwagen, nicht spezifiziert APOS, U		A1-A3_Myzel
2.1	Transport der Furnierspule zum Labor	Transport der Spule zum Labor	Transport der Spulenbox zum Labor (innerhalb Deutschlands)	0,27	tkm/Einheit	Transport, Fracht, Lastkraftwagen, nicht spezifiziert {RER} Markt für Transport, Fracht, Lastkraftwagen, nicht spezifiziert APOS, U		A1-A3_VeneerGrid
3.1	Transport von Holzrahmen elementen zum Labor	Transport von Fichtenholzstämmen zum Labor	Transport von Fichtenholzstämmen zum Labor (innerhalb Deutschlands)	6,90	tkm/Einheit	Transport, Fracht, Lastkraftwagen, nicht spezifiziert {RER} Markt für Transport, Fracht, Lastkraftwagen, nicht spezifiziert APOS, U		A1-A3_VeneerGrid
6.1	Transport von Platten	Transport der Platte zum Gebäude	Straßenverkehr (innerhalb Deutschlands)	18,69	tkm/Einheit	Transport, Fracht, Lastkraftwagen, nicht spezifiziert {RER} Markt		A4-A5_System

Ref	Bühne	Beschreibung der Etappe	Prozess	Modellierte Menge	Modellierte Einheiten	Modellierter SimaPro-Prozess	Stadium des Lebenszyklus
						für Transport, Fracht, Lastkraftwagen, nicht spezifiziert APOS, U	
8.1	Paneel für den Transport am Lebensende	Transport zum Ort der Demontage	Straßenverkehr (innerhalb Deutschlands)	18,69	tkm/Einheit	Transport, Fracht, Lastkraftwagen, nicht spezifiziert {RER} Markt für Transport, Fracht, Lastkraftwagen, nicht spezifiziert APOS, U	C2_System
8.2	Rahmenentsorgung (System wird entsorgt)	Rahmen & Dübel - Transport zur Deponie	Straßenverkehr (innerhalb Deutschlands)	7,25	tkm/Einheit	Transport, Fracht, Lastkraftwagen, nicht spezifiziert {RER} Markt für Transport, Fracht, Lastkraftwagen, nicht spezifiziert APOS, U	C3-C4_FrameDispScen
8.3	Myzel- und Furnierentsorgung	Myzelverbundstoff - Transport zur Deponie	Straßenverkehr (innerhalb Deutschlands)	11,52	tkm/Einheit	Transport, Fracht, Lastkraftwagen, nicht spezifiziert {RER} Markt für Transport, Fracht, Lastkraftwagen, nicht spezifiziert APOS, U	C2_MyceliumDisp
8.4	Entsorgung des Rahmens (Wiederverwendung des Systems)	Rahmen & Dübel - Transport zur Deponie	Straßenverkehr (innerhalb Deutschlands)	7,25	tkm/Einheit	Transport, Fracht, Lastkraftwagen, nicht spezifiziert {RER} Markt für Transport, Fracht, Lastkraftwagen, nicht spezifiziert APOS, U	C3-C4_FrameReuseScen

Quelle: ARUP

Abfallströme: Die für die Abfallströme erhobenen Lebenszyklusinventardaten (z. B. Emissionen in die Luft, feste Abfälle) sind in folgender Tabelle aufgeführt.

Tabelle 19
LCI Abfallprozesse

Ref	Bühne	Beschreibung der Etappe	Modellierte Menge	Modellierte Einheiten	Modellierter SimaPro-Prozess	Beschreibung der Etappe
1.1	Vorbereitung der Agarplatten	Petrischale	7,22E-05	kg/Einheit	Polystyrolabfälle {DE} Markt für Polystyrolabfälle APOS, U	A1-A3_Myzel
1.1	Vorbereitung der Agarplatten	Schrott	0,00012	kg/Einheit	Bioabfall {RoW} Behandlung von Bioabfall, offene Deponie APOS, U	A1-A3_Myzel

Ref	Bühne	Beschreibung der Etappe	Modellierte Menge	Modellierte Einheiten	Modellierter SimaPro-Prozess	Beschreibung der Etappe
1.2	Mycelium-Samenvorbereitung	Schrott	4,10E-03	kg/Einheit	Bioabfall {RoW} Behandlung von Bioabfall, offene Deponie APOS, U	A1-A3_Myzel
1.2	Mycelium-Samenvorbereitung	Schrott	3,74E-03	kg/Einheit	Bioabfall {RoW} Behandlung von Bioabfall, offene Deponie APOS, U	A1-A3_Myzel
1.3	Mycelium Komposit Vorbereitung	Schrott	1,38E-01	kg/Einheit	Bioabfall {RoW} Behandlung von Bioabfall, offene Deponie APOS, U	A1-A3_Myzel
1.3	Mycelium Komposit Vorbereitung	Inkubationsbeutel	4,61E-02	kg/Einheit	Bioabfall {RoW} Behandlung von Bioabfall, offene Deponie APOS, U	A1-A3_Myzel
1.3	Mycelium Komposit Vorbereitung	Schrott	3,73E+00	kg/Einheit	Bioabfall {RoW} Behandlung von Bioabfall, offene Deponie APOS, U	A1-A3_Myzel
2.2	Herstellen des Furniergitters	Abfälle aus Ahornfurnier	5,43E-02	kg/Einheit	Altholz, Post-Verbraucher {RER} Markt für Altholz, Post-Verbraucher APOS, U	A1-A3_VeneerGrid
4.1	Herstellung der Träger für die Wachstumsphase	Gefrästes Material - 1 - Sperrholz	0,11	kg/Einheit	Altholz, Post-Verbraucher {RER} Markt für Altholz, Post-Verbraucher APOS, U	A1-A3_Form
4.1	Herstellung der Träger für die Wachstumsphase	Gefrästes Material - 2 - Sperrholz	0,11	kg/Einheit	Altholz, Post-Verbraucher {RER} Markt für Altholz, Post-Verbraucher APOS, U	A1-A3_Form
8.2	Rahmenentsorgung (System wird entsorgt)	Rahmen - Abfall	13,79	kg/Einheit	Altholz, Post-Verbraucher {RER} Markt für Altholz, Post-Verbraucher APOS, U	C3-C4_FrameDispScen
8.2	Rahmenentsorgung (System wird entsorgt)	Dübel - Abfall	0,0015	kg/Einheit	Altholz, Post-Verbraucher {RER} Markt für Altholz, Post-Verbraucher APOS, U	C3-C4_FrameDispScen
8.3	Myzel- und Furnierentsorgung	Entsorgung von Furnier	0,54	kg/Einheit	Altholz, Post-Verbraucher {RER} Markt für Altholz, Post-Verbraucher APOS, U	C1_MyceliumDisp
8.3	Myzel- und Furnierentsorgung	Beseitigung des Myzels	23,04	kg/Einheit	Bioabfall {RoW} Behandlung von Bioabfall, industrielle Kompostierung APOS, U	C1_MyceliumDisp

Ref	Bühne	Beschreibung der Etappe	Modellierte Menge	Modellierte Einheiten	Modellierter SimaPro-Prozess	Beschreibung der Etappe
-	Myzelium und Furnierkompost	Kompostierung von Myzelmaterial	23,04	kg/Einheit	Kompostierung {RoW} Behandlung von Bioabfall, industrielle Kompostierung APOS, U	C3-C4_Myzelium

Quelle: ARUP

Datentabellen der LCA-Ergebnisse, Ergebnis nach Prozessstufe

Tabelle 20
Aufschlüsselung der Ergebnisse nach Prozessstufen

Bühne	Globale Erwärmung	Abbau der Ozonschicht in der Stratosphäre	Ozonbildung, Menschliche Gesundheit	Ozonbildung, Terrestrische Ökosysteme	Terrestrische Versauerung	Süßwasser-Eutrophierung	Eutrophierung der Meere	Landnutzung	Knappheit der Bodenschätze	Wasserverbrauch
	kg CO ₂ eq	kg CFC11-Äq	kg NO _x eq	kg NO _x eq	kg SO ₂ eq	kg P eq	kg N eq	m ² a Ernteäquivalent	kg Cu-Äq	m ³
1.1_Agarplatte Vorbereitung	2,66	1,97E-05	6,07E-07	6,34E-07	1,22E-06	1,74E-07	2,43E-07	3,20E+00	3,51E-07	1,09E-05
1.2_Myzelium-Samenvorbereitung	0,45	3,78E-07	5,31E-04	5,39E-04	8,16E-04	6,89E-04	8,45E-05	3,39E-02	1,03E-03	7,17E-03
1.3_Myzelium-Komposit-Präparation	18,01	1,94E-05	2,42E-02	2,47E-02	3,61E-02	3,87E-02	1,21E-02	9,46E+00	3,76E-02	8,88E-01
1.4_Transport des Myzelkomposits zum Labor	1,51	7,00E-07	8,17E-03	8,33E-03	4,92E-03	1,67E-04	9,71E-06	9,86E-02	2,94E-03	2,92E-03
2.1_Transport der Furnierspule zum Labor	0,04	1,65E-08	1,92E-04	1,96E-04	1,16E-04	3,95E-06	2,29E-07	2,32E-03	6,94E-05	6,88E-05
2.2_Erstellung des Furniergitters	97,93	6,59E-05	1,22E-01	1,24E-01	1,76E-01	1,49E-01	1,04E-02	1,28E+01	2,21E-01	1,17E+00
3.1_Transport von Holzrahmenele	0,90	4,19E-07	4,89E-03	4,99E-03	2,95E-03	1,00E-04	5,81E-06	5,90E-02	1,76E-03	1,75E-03

Bühne	Globale Erwärmung	Abbau der Ozonschicht in der Stratosphäre	Ozonbildung, Menschliche Gesundheit	Ozonbildung, Terrestrische Ökosysteme	Terrestrische Versauerung	Süßwasser-Eutrophierung	Eutrophierung der Meere	Landnutzung	Knappheit der Bodenschätze	Wasserverbrauch
	kg CO ₂ eq	kg CFC11-Äq	kg NO _x eq	kg NO _x eq	kg SO ₂ eq	kg P eq	kg N eq	m ² a Ernteäquivalent	kg Cu-Äq	m ³
menten ins Labor										
3.2_Herstellung des Holzrahmens	6,27	4,83E-06	2,86E-02	2,95E-02	2,68E-02	5,81E-03	5,49E-04	1,84E+01	2,38E-01	1,22E-01
4.1_Produktion der Stützen für die Wachstumsphase	61,17	6,16E-05	4,04E-01	4,16E-01	3,22E-01	3,93E-02	3,64E-03	1,44E+02	5,52E-01	2,58E+00
5.1_Systemaufbau	6,41	4,60E-06	1,23E-02	1,25E-02	1,39E-02	9,11E-03	6,45E-04	1,88E+00	1,53E-02	1,04E-01
5.2_Wachstumsphase des Myzels	56,85	3,79E-05	6,58E-02	6,67E-02	9,90E-02	8,72E-02	6,08E-03	1,80E+00	1,28E-01	6,69E-01
6.1_Panel-Transport	2,45	1,14E-06	1,32E-02	1,35E-02	7,99E-03	2,72E-04	1,58E-05	1,60E-01	4,78E-03	4,73E-03
6.2_Paneeleinbau	0,00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
7.1_Wartung	0,00	3,25E-10	1,87E-07	1,97E-07	2,28E-07	6,36E-07	7,95E-08	1,31E-04	4,26E-07	3,55E-06
8.1_Panel am Ende der Lebensdauer transportieren	2,45	1,14E-06	1,32E-02	1,35E-02	7,99E-03	2,72E-04	1,58E-05	1,60E-01	4,78E-03	4,73E-03
8.2_Entsorgung des Rahmens (Entsorgung des Systems)	302,32	2,97E-04	1,83E+00	1,91E+00	1,36E+00	1,68E-01	1,78E-02	2,19E+03	9,68E-01	4,59E+00
8.3_Myzel- und Furnierentsorgung	20,34	2,27E-05	8,74E-02	9,11E-02	1,01E-01	1,55E-02	1,35E-03	8,66E+01	5,37E-02	2,47E-01

Bühne	Globale Erwärmung	Abbau der Ozonschicht in der Stratosphäre	Ozonbildung, Menschliche Gesundheit	Ozonbildung, Terrestrische Ökosysteme	Terrestrische Versauerung	Süßwasser-Eutrophierung	Eutrophierung der Meere	Landnutzung	Knappheit der Bodenschätze	Wasserverbrauch
	kg CO ₂ eq	kg CFC11-Äq	kg NO _x eq	kg NO _x eq	kg SO ₂ eq	kg P eq	kg N eq	m ² a Ernteäquivalent	kg Cu-Äq	m ³
GESAMT	579,77	5,37E-04	2,61E+00	2,72E+00	2,16E+00	5,14E-01	5,26E-02	2,47E+03	2,23E+00	1,04E+01

Quelle: ARUP

Aufschlüsselung der Ergebnisse nach LebenszyklusstadiumTabelle 21
Ergebnisse nach Lebenszyklusstadium

Bühne	Globale Erwärmung	Abbau der Ozonschicht in der Stratosphäre	Ozonbildung, Menschliche Gesundheit	Ozonbildung, Terrestrische Ökosysteme	Terrestrische Versauerung	Süßwasser-Eutrophierung	Eutrophierung der Meere	Landnutzung	Knappheit der Bodenschätze	Wasserbrauch
	kg CO ₂ eq	kg CFC11-Äq	kg NO _x eq	kg NO _x eq	kg SO ₂ eq	kg P eq	kg N eq	m ² a Ernteäquivalent	kg Cu-Äq	m ³
A1-A3_Myzel	79,49	7,82E-05	9,88E-02	1,00E-01	1,41E-01	1,27E-01	1,83E-02	1,46E+01	1,69E-01	1,57E+00
A1-A3_VeenerGrid	98,87	6,64E-05	1,28E-01	1,30E-01	1,79E-01	1,49E-01	1,04E-02	1,29E+01	2,23E-01	1,17E+00
A1-A3_Rahmen	73,86	7,10E-05	4,45E-01	4,58E-01	3,63E-01	5,42E-02	4,83E-03	1,64E+02	8,06E-01	2,80E+00
A4-A5_System	2,45	1,14E-06	1,32E-02	1,35E-02	7,99E-03	2,72E-04	1,58E-05	1,60E-01	4,78E-03	4,73E-03
B2_System	0,00	3,25E-10	1,87E-07	1,97E-07	2,28E-07	6,36E-07	7,95E-08	1,31E-04	4,26E-07	3,55E-06
C2_System	2,45	1,14E-06	1,32E-02	1,35E-02	7,99E-03	2,72E-04	1,58E-05	1,60E-01	4,78E-03	4,73E-03
C3-C4_FrameDisp	302,32	2,97E-04	1,83E+00	1,91E+00	1,36E+00	1,68E-01	1,78E-02	2,19E+03	9,68E-01	4,59E+00
C2_MyzeliumDisp	20,34	2,27E-05	8,74E-02	9,11E-02	1,01E-01	1,55E-02	1,35E-03	8,66E+01	5,37E-02	2,47E-01
GESAMT	579,77	5,37E-04	2,61E+00	2,72E+00	2,16E+00	5,14E-01	5,26E-02	2472,78	2,23	10,39

Quelle: ARUP

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Links: Mycotree Seoul Biennale 2017, Rechts: MycoTree Futurium Berlin, 2019.	11
Abbildung 2 Links: Plattenwerkstoffe aus Myzelium, Rechts: Testbau in Indonesien.	12
Abbildung 3 Pavilion für das MOMA PS 1 in New York aus Myzelium, The Living/ ARUP, 2014.	12
Abbildung 4 Konzepte von ARUP / Mogu zum Einsatz von vorfabrizierten Myzeliumbauteilen, beispielsweise zur Verbindung von Myzeliumpanelen in Holzrahmen	13
Abbildung 5 FORESTA – Eine gemeinsame Produktentwicklung von Arup und Mogu. Das Produkt ist seit 2021 am Markt eingeführt und besteht aus akustischen Absorbern aus Myzelium und einer unbehandelten Holzunterkonstruktion	13
Abbildung 6 Studien zu der Formfindung einer akustisch wirksamen Rauminstallation, Zusammenarbeit Jonas Edvard und Arup	14
Abbildung 7 MyxSail – eine Zusammenarbeit zwischen Jonas Edvard mit Arup / Prof. Jan Wurm. Das akustische Segel besteht aus Myzelium Matten	14
Abbildung 8 Additive Herstellung mit einem Endlosfilament aus Weidenholz, Universität Kassel.	15
Abbildung 9 Robotisches Wickeln von Freiformen mit gradueller Materialverteilung, Universität Kassel.	16
Abbildung 10 Robotisches Wickeln von Übergängen von flächigen Bauteilen zu Stützen, Universität Kassel.	16
Abbildung 11 Forschungsanlage für Robotische Architektur-Produktion (RAP-Lab): Geplanter Versuchsaufbau und Toolentwicklung zur Herstellung von 3D-Holzgitterstrukturen.	17
Abbildung 12 Konzept für Verbundbauweise: Additiv hergestellte 3D-Holzgitterstruktur (links), Biowachstum des Myzelium-Substrat-Gemischs in Holzstruktur (mitte), finales Verbundpanel (rechts)	17
Abbildung 13 Diagramm Arbeitspakete und deren Verbindung	22
Abbildung 14 Diagramm RASI Schema der Arbeitspakete	26
Abbildung 15 Vergleich des Nachhaltigkeitspotentials von Bodenbelägen, Trennwänden und Wand- und Deckenbelägen.	27
Abbildung 16 Mögliche Belastungen und innere Krafteinwirkungen für die Anwendungsbereiche Akustiksegel und Trennwände	28
Abbildung 17 Rechenmodell zur Schallübertragung, DIN EN 12354-1 (2017), angemessener Lärmschutz zwischen zwei normalen Arbeitsräumen: $R'w = 37 + 5 \text{ dB}$.	29
Abbildung 18 Schematische Darstellung von Schallausbreitung in einem Raum mit Schirm – DIN EN 17624.	29
Abbildung 19 Auswahl der Grundwerkstoffe. Substrate und Myzelarten. Hanfspäne (links). Ganoderma Lucidum (Reishi) (rechts)	31
Abbildung 20 Substrat kombiniert mit 2D- Holzarmierung.	32
Abbildung 21 Konzeptmodelle zur Entwicklung der Anordnung der Furnierstreifenstruktur im Verbund.	33
Abbildung 22 Diagramm Herstellungsprozess Holz-Myzel Verbundmaterial	34
Abbildung 23 Entwurf eines Roboter-Endeffektors für die Furnier-Extrusion, Universität Kassel.	34
Abbildung 24 Robotisches Platzieren von Holzfurnier (obere Zeile), Automatisiertes Ultraschall-Holzschweißen (untere Zeile).	35

Abbildung 25 Analyse der Zugfestigkeit von massiven Ahornstreifen und geschweißten Verbindungen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Verbindung eine ähnliche Festigkeit aufweist wie das Vollmaterial.	36
Abbildung 26 Vollautomatischer Extruder, der sowohl das Extrudieren als auch das Schweißen in einem einzigen Prozess integriert.	37
Abbildung 27 Holzgitteranordnungen für die Bewehrung, von links: 2D-Gitter, 2D-Gitter mit massiven Seiten, 3D-Gitter	37
Abbildung 28 Additiv hergestellte 2D und 3D Holzgitter, Geometrieentwicklung. Maße in mm	38
Abbildung 29 Biowachstumsprozess in sechs Arbeitsschritten.	38
Abbildung 30 Herstellungsverfahren von Myzelium-Verbundproben: (a) Würfel für die Druckfestigkeitsprüfung; (b) Würfel für die Ausreißprüfung mit einseitigem Furnier; (c) Würfel mit beidseitiger, mittlerer Furnierüberlappung mit und ohne Schweißverstärkung; (d) Myzelblock (Leichtbaustein) mit und ohne Gitter mit niedriger und hoher Dichte; (e) Gepresster Block mit und ohne Gitter mit niedriger und hoher Dichte; (f) Rohrprobe für die Schallabsorptionsprüfung mit und ohne horizontale Furnierverstärkung; (g) Rohrprobe für die Schallabsorptionsprüfung mit vertikaler Furnierverstärkung; (h) Großformatiger Block mit und ohne 3D-Gitter mit niedriger und hoher Dichte.	39
Abbildung 31 Proben während (linke Spalte) und nach der Prüfung (rechte Spalte): (a) Druckfestigkeitsprüfung; (b) Einseitiger Furnierausreißversuch; (c) Zweiseitiger Ausreißversuch für ungeschweißtes Furnier; (d) Zweiseitiger Zugversuch für verschweißtes Furnier.	44
Abbildung 32 Proben während und nach der Prüfung: (a) Leichtbaustein im Drei-Punkt-Biegeversuch (b) Leichtbaustein ohne oder mit einem geringdichten Gitter in der Mitte (c) Leichtbaustein mit einem hochdichten Gitter in der Mitte (Scherversagen) (d) Leichtbaustein mit zwei Schichten geringdichter Gitter nahe der Ober- und Unterseite des Bausteins (e) Großer Leichtbaustein im Drei-Punkt-Biegeversuch (f) Großer Leichtbaustein ohne 3D-Gitterverstärkung nach dem Versagen (g) Großer Leichtbaustein mit 3D-Gitterverstärkung nach dem Versagen (h) Gepresster Baustein im Drei-Punkt-Biegeversuch (i) Gepresster Baustein nach dem Versagen.	46
Abbildung 33 Durchschnittlich gemessene Schallabsorptionsgrade, nach Wachstumsrate.	47
Abbildung 34 Durchschnittlich gemessene Schallabsorptionsgrade, Vergleich nach Holzfurnierinhalt.	48
Abbildung 35 Konzeptnachweis des digitalen, computergestützten Dimensionierungssystems mit struktureller Auswertung.	49
Abbildung 36 Geometrischer und materieller Aufbau für Anwendungsfall 1.	49
Abbildung 37 Simulationsergebnisse von Anwendungsfall 1: Axiale Druckspannung (links) und Biegespannung (rechts) in MPa.	50
Abbildung 38 Simulationsergebnisse für Fall 1: Horizontale Durchbiegung in mm.	50
Abbildung 39 Modellaufbau und Lagerungsbedingungen für den Anwendungsfall 2.	51
Abbildung 40 Simulationsergebnisse von Anwendungsfall 2: Biegespannung (links), Scherspannung (Mitte) und horizontale Durchbiegung (rechts).	51
Abbildung 41 POP-UP HOME ausgestellt in Aachen: Furnierverstärkte flache Trennwand (links), furnierverstärkte gebogene Trennwand (mitte), topologisch verzahnte Trennwand (rechts).	52
Abbildung 42 3D-Gitterbewehrung der flachen Trennwand (links), 3D-Gitterkonstruktion und die Funktion der verschiedenen Schichten (rechts).	53
Abbildung 43 Nahaufnahme der Oberflächenqualität der flachen Trennwand (links), flache Trennwand mit einer Person als Maßstab (rechts).	54

Abbildung 44 Der physische Prototyp der gebogenen Wand.	55
Abbildung 45 Aus PETG (mit Glykol modifiziertes PET)-Platten herzustellende Formelemente (links), abgerollte Furnierstreifen von der Zielfläche zur Erzeugung von Furnierschablonen (rechts).	55
Abbildung 46 Nahaufnahme der Schnittstelle zwischen Myzel und Bewehrung.	56
Abbildung 47 Digitales Modell der Trennwand aus topologisch verzahnten Einzelmodulen (links), Bauteilklassifizierung und -beschriftung (Mitte), topologisches Verzahnungsprinzip (rechts).	57
Abbildung 48 Detailaufnahme der Schnittstellen zwischen den Modulen. In den Zwischenräumen der Blöcke sind die jungen Fruchtkörper des Pilzes zu erkennen, die zur Demonstration der Echtheit des Materials gewollt wachsen gelassen wurden.	58
Abbildung 49 Verschiedene Büroelemente, die durch den reversiblen Montageprozess von ineinandergreifenden Myzelementen möglich sind.	59
Abbildung 50 Von links nach rechts: (1) ein TIA-Element wird zunächst mit der Säge zerkleinert und anschließend geschreddert (2). Es entsteht ein faseriges Material mit einer Partikelgröße von ca. 0,5mm-2mm (3)	60
Abbildung 51 Übersicht von Trennwandsystemen zum Vergleich herkömmlicher Lösungen (BAU). Mit am Markt erhältlichen bio-basierten Lösungen (Benchmark 1-6) und konzeptioneller Lösung mit Myzeliumbauteilen (Benchmark 7).	62
Abbildung 52 Globale Dimensionierung der in den Parameterstudien verwendeten Geometrie. Hinweis: Für Fall 3 ist die Wandstärke die Entwurfsvariable und variiert zwischen 0,080 m und 0,150 m.	63
Abbildung 53 Simulationsergebnisse für Fall 1: Horizontale Durchbiegung in mm, links: reines Myzel; Mitte: 3D-verstärkter Verbundwerkstoff; rechts: verformte Form unter horizontaler Belastung.	64
Abbildung 54 Die verschiedenen in Fall 2 berücksichtigten Randbedingungen.	65
Abbildung 55 Simulationsergebnisse für Fall 2: Horizontale Durchbiegung in mm, von links nach rechts: Typ A Oben und unten abgestützt (gelenkige Verbindung); Typ B An allen Kanten abgestützt mit getrennten Platten (gebolzte Verbindung); Typ C An allen Kanten abgestützt mit einer einzigen Platte (gebolzte Verbindung); Typ D An allen Kanten abgestützt mit einer Platte (starre Verbindung).	66
Abbildung 56 Simulationsergebnisse für Fall 2: Biegespannung in MPa, von links nach rechts: Oben und unten abgestützt (gelenkige Verbindung); an allen Kanten mit getrennten Platten abgestützt (gebolzte Verbindung); an allen Kanten mit einer einzigen Platte abgestützt (gelenkige Verbindung); an allen Kanten mit einer Platte abgestützt (steife Verbindung).	66
Abbildung 57 Simulationsergebnisse für Fall 3: Horizontale Durchbiegung in mm, von links nach rechts: Dicke = 150 mm; Dicke = 120 mm; Dicke = 100 mm; Dicke = 80 mm.	67
Abbildung 58 Simulationsergebnisse für Fall 3: Biegespannung in MPa, von links nach rechts: Dicke = 150mm; Dicke = 120mm; Dicke = 100mm; Dicke = 80mm	68
Abbildung 59 Das Design und die globale Dimensionierung des finalen Demonstrators	69
Abbildung 60 Spannungsverteilung, von links nach rechts: Biegespannung X (Biegespannung in Richtung der kurzen Spannweite), Biegespannung Y (Biegespannung in Richtung der langen Spannweite), Scherspannung Z (Scherspannung außerhalb der Ebene).	70
Abbildung 61 Die Verteilung des Furniergitters: obere und untere Schicht mit unterschiedlicher Dichte für die Biegefestigkeit und mittlere Schicht für die Scherfestigkeit.	71
Abbildung 62 Simulationsergebnisse des Demonstrators: Horizontale Durchbiegung in mm.	72

- Abbildung 63 Simulationsergebnisse des Prototyps: Schwingungsmodi und Frequenzen der ersten drei Modi, von links nach rechts: erster Modus (19,3 Hz), zweiter Modus (24,4 Hz) und dritter Modus (33,1 Hz). 72
- Abbildung 64 Simulationsergebnisse des Demonstrators: Biegespannung in MPa. Links: Biegespannung X (Biegespannung in Richtung der kurzen Spannweite), Rechts: Biegespannung Y (Biegespannung in der Richtung der kurzen Spannweite). 73
- Abbildung 65 Designstudien-Matrix. 74
- Abbildung 66 Oben: Ultraschallschweißen während der additiven Fertigung des Furniergitters, Unten: fertiges Furniergitter auf dem Holzrahmen. 76
- Abbildung 67 Schematische Übersicht über das Set-Up zum Befüllen des Rahmens inkl. Furniergitter mit Myzelmaterial. 78
- Abbildung 68 Das robotergefertigte Furniergitter, mit Holzleim am inneren Rahmen befestigt, links im Bild zu erkennen: einer der zwei äußeren Rahmen inklusive angebrachter Holzdübel. 79
- Abbildung 69 Links: 5-Achsen-CNC-Fräsen der Formen, Rechts: Oberflächenqualität der fertigen und montierten Formen. 80
- Abbildung 70 Die Negativ-Form für die Oberflächengestaltung des Prototyps, alle 12 Einzelplatten zusammengelegt zur finalen Negativ-Form. 80
- Abbildung 71 Von links nach rechts: Halb angewachsener beimpfter Substratbeutel, voll angewachsener beimpfter Substratbeutel, temperatur- und feuchtigkeitskontrollierter Wachstums- und Lagerraum. 81
- Abbildung 72 Links: Zerkleinern des Myzelmaterials von Hand, Mitte: Zerkleinerung des Materials in feinere Stücke mit dem Handmixer, Rechts: Fein beimpftes Material, bereit zur Verwendung. 82
- Abbildung 73 Von oben nach unten: Auflegen des mit Myzel geimpften Substrats, das das Oberflächendesign bilden wird; sorgfältiges Auffüllen der Form zwischen dem Furniergitter, um überall eine gleichmäßige Dichte zu gewährleisten; Auflegen der letzten Materialschicht, die das Furniergitter bedeckt und die Rückseite des Prototyps bildet. 83
- Abbildung 74 Der finale Demonstrator während der Wachstumsphase mit den Forschern in der Wachstumskammer, bedeckt mit Vivak-Platten mit Löchern und Holzbalken, um eine ebene Fläche zu erhalten. 84
- Abbildung 75 Links: Ein Stück der Myzeloberfläche tritt aus und legt das Furniergitter frei, weil Sauerstoffmangel das Myzelwachstum verhindert: Selbstreparierte Platte nach Zugabe von Mehl zu den nicht angewachsenen Teilen und längerem Wachstum in der Feuchtigkeitskammer, rechts: Die vollständig gewachsene Platte. 85
- Abbildung 76 Unterschiede in der Oberflächenqualität, Farbe und Textur aufgrund unterschiedlicher Wachstumsgeschwindigkeiten in verschiedenen Bereichen des Prototyps. 86
- Abbildung 77 Oben: Ein gebrochener Fleck auf der Myzeloberfläche, der das Furniergitter freilegt, weil Sauerstoffmangel das Wachstum des Myzels verhindert, unten: Selbst regeneriertes Paneel, das immer noch die Spuren der gebrochenen Stelle zeigt. 88
- Abbildung 78 Von links nach rechts: Die Vorderseite, die Rückseite und die Nahaufnahme des fertigen Demonstrators. 89
- Abbildung 79 Grundriss des Seminarraums mit Lautsprecherposition, Messbereich und Stellwandposition. 91
- Abbildung 80 Messaufbau im Ausstattungsszenario 1, Raum ohne Stellwand. 91
- Abbildung 81 Messaufbau im Ausstattungsszenario 2, Demonstrator vorwärts. 92
- Abbildung 82 Gemessener A-bewerteter Impulsspitzenpegel in den vier Ausstattungsszenarien, dB(A). 93

Abbildung 83 Regelmäßige Holzfurnierstruktur, Pop-Up-Campus-Wand (Szenario 4)	94
Abbildung 84 Unregelmäßige Holzfurnierstruktur, Demonstrator-Stellwand (Szenarien 2 und 3)	95
Abbildung 85 Räumliche Verteilung der Impulsspitzenpegel bei 800 und 1600 Hz, Szenarien 2 und 3.	96
Abbildung 86 Räumliche Verteilung der Impulsspitzenpegel bei 500 und 1000 Hz, Szenarien 2 und 3.	97
Abbildung 87 Untersuchte fiktive Sende- und Empfangsbereiche für Ermittlung einer Schallpegeldifferenz.	97
Abbildung 88 Schallpegeldifferenz zwischen Messbereich vor und nach der Stellwand in Terzoktavbändern unter Szenarien 2, 3 und 4.	98
Abbildung 89 Gesamte gemessene Nachhallzeiten im Raum, Szenarien 1, 2 und 3.	98
Abbildung 90 FE-Berechnung der Durchbiegung unter Belastung von einem Trennwand-Bauteil, bestehend aus einem 8x8 cm Holzrahmen und einem Holzverstärkungsgitter pro Seite.	101
Abbildung 91 3-Punkt Biegeversuch der Myzeliumtrennwand der POP-UP Campus Ausstellung mit Sandsäcken. Links: Aufgeständerte Wand. Rechts: Unter Belastung mit 420kg. Die Durchbiegung wurde mit einem Lasermessgerät gemessen.	102
Abbildung 92 Vergleich der Berechnungsergebnisse aus der Modellierung von Arup und dem 3-Punkt Biegeversuch einer Trennwand.	102
Abbildung 93 Bauteile und Hauptkomponenten des Prototyps.	106
Abbildung 94 Net-Zero-Gebäude: Arup World Business Council for Sustainable Development (angepasst von ISO 4040:2006/EN15804:2012).	107
Abbildung 95 Lebenszyklusphasen des untersuchten Prototyps (Demonstrator).	108
Abbildung 96 Systemgrenze und die wichtigsten Verarbeitungsschritte für die Trennwand.	112
Abbildung 97 Aufschlüsselung der Umweltauswirkungskategorien nach Lebenszyklusphase.	118
Abbildung 98 Module A1-A3, Alle Prozesse.	119
Abbildung 99 Aufschlüsselung der Umweltauswirkungskategorien nach Komponentenprozessen.	120
Abbildung 100 Zusammenstellung der Teilprozesse für die Herstellung des Myzeliumverbundes.	121
Abbildung 101 Teilprozesse der Komponenten ohne Myzelium.	122
Abbildung 102 Alternative Szenarien für das Lebensende.	123
Abbildung 103 Vergleich der End-of-Life-Szenarien, globale Erwärmung (kg CO ₂ eq).	123
Abbildung 104 Vergleich der End-of-Life-Szenarien, Flächennutzung (m ² a Pflanzenäquivalent).	124
Abbildung 105 EK6: Divisio Rahmenloser Bildschirm2 von Steelcase, ausgewählt als alternatives Marktprodukt für den Vergleich mit Home 3D Mycelium.	126
Abbildung 106 Vergleich Home 3D Mycelium vs. ein alternatives Marktprodukt.	127
Abbildung 107 Business as Usual Benchmark: Typische Trockenwandkonstruktion.	144
Abbildung 108 Bio-basierte Alternative 1: Gutex Trennwandsystem (Bio-basierter Benchmark 1).	144
Abbildung 109 Bio-basierte Alternative 2: Holzfaserplatten (Bio-basierter Benchmark 2).	145
Abbildung 110 Bio-basierte Alternative 3: Holzfaserplatten (Bio-basierter Benchmark 3).	145
Abbildung 111 Bio-basierte Alternative 4: Hanffaserplatten (Bio-basierter Benchmark 4).	146
Abbildung 112 Bio-basierte Alternative 5: Rezyklierte Zelluloseplatten (Bio-basierter Benchmark 5).	146

Abbildung 113 Bio-basierte Alternative 6: Reisfaserplatten (Bio-basierter Benchmark 6).	147
Abbildung 114 Bio-basierte Alternative 7: Myzeliumplatten (Bio-basierter Benchmark 7).	147

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Zusammenfassende Tabelle der physikalischen und mechanischen Eigenschaften von Verbundwerkstoffen auf Myzelbasis mit und ohne Furniergitter.	42
Tabelle 2 Grundmaterialien der entwickelten Komponenten, eingeteilt nach biologischer Abbaubarkeit	60
Tabelle 3 Myzelmaterialien mit verschiedenen Anteilen an zugefügtem, geschreddertem TIA-Material. Vergleich Anteil geschreddertes Material, Frisches Substrat, Wachstumsbewertung und Kontamination durch Schimmel oder anderer Mikroorganismen.	61
Tabelle 4 Übersichtstabelle für die Analyseergebnisse von Fall 1	64
Tabelle 5 Zusammenfassende Analyseergebnisse von Fall 2	67
Tabelle 6 Zusammenfassende Analyseergebnisse von Fall 3	68
Tabelle 7 Materialspezifikationen der Verbundplatte	69
Tabelle 8 Materialspezifikationen für das Furnier	70
Tabelle 9 Herstellungsprozessphasen	109
Tabelle 10 Erfassung der Ökobilanzdaten. Kopien der LCA-Inventardaten sind im Anhang enthalten.	114
Tabelle 11 Ersatzmaterialien	115
Tabelle 12 Zusammenfassung der in die Analyse einbezogenen Wirkungskategorien	116
Tabelle 13 Materialmengen	148
Tabelle 14 Datenquellen - Systemebene	148
Tabelle 15 Datenquellen und zusätzliche Annahmen - Teilprozesse	149
Tabelle 16 LCI Stoffströme	152
Tabelle 17 AKI Elektrizität und Herstellungsprozesse	155
Tabelle 18 AKI Transportprozesse	156
Tabelle 19 LCI Abfallprozesse	157
Tabelle 20 Aufschlüsselung der Ergebnisse nach Prozessstufen	159
Tabelle 21 Ergebnisse nach Lebenszyklusstadium	162