



Abbildung 1: livMatS Pavillon, Botanischer Garten Freiburg im Breisgau
Die tragende Struktur des Pavillons besteht ausschließlich aus robotisch gewickelten Flachsfasern, einem Material, das natürlich, erneuerbar, biologisch abbaubar und regional verfügbar ist
© ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart, Rob Faulkner

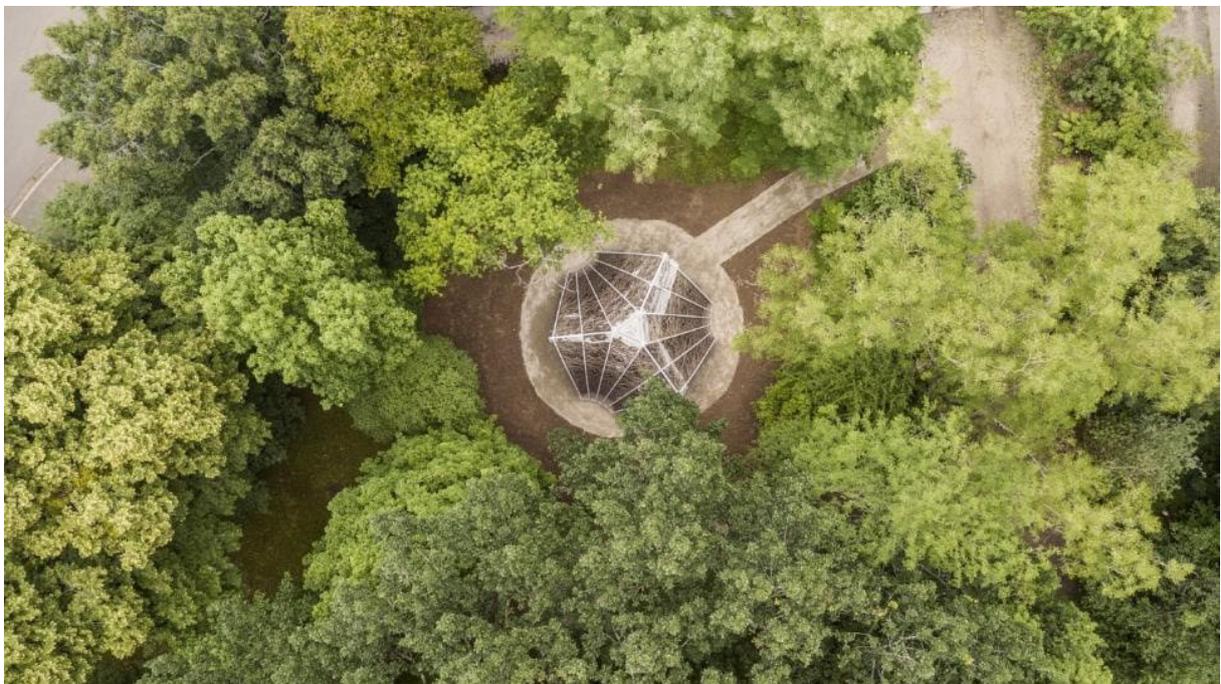


Abbildung 2: livMatS Pavillon, Botanischer Garten, Freiburg im Breisgau
© ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart, Rob Faulkner

Institut für Computerbasiertes Entwerfen und Baufertigung (ICD)
Institut für Tragkonstruktionen und konstruktives Entwerfen (ITKE)
Universität Stuttgart

Planungs-, Fertigungs- und Monitoring-Methoden für die Anwendung neuartiger, tragender Bauteile aus Naturfasern für ressourceneffiziente, digital hergestellte Faserverbundbauweisen: Projekt livMatS Pavillon

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem **AZ: 37101/01-25** von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Institut für Computerbasiertes Entwerfen und Baufertigung (ICD)
Universität Stuttgart, Keplerstraße 11, 70174 Stuttgart
Prof. Achim Menges
Christoph Schlopschnat, Katja Rinderspacher, Christoph Zechmeister

&

Institut für Tragkonstruktionen und konstruktives Entwerfen (ITKE)
Universität Stuttgart, Keplerstraße 11, 70174 Stuttgart
Prof. Jan Knippers
Marta Gil Pérez, Tzu-Ying Chen, Yanan Guo

Stuttgart
Dezember 2023

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	4
Verzeichnis von Bildern und Tabellen.....	6
Verzeichnis von Begriffen und Definitionen	10
Zusammenfassung	11
Einleitung	13
Hauptteil.....	18
Darstellung der einzelnen Arbeitsschritte	18
AP 1: Anpassung der Planungsmethoden und Fertigungsprozesse.....	18
AP 2: Erforderliche konstruktive Entwicklungen für großmaßstäbliche Anwendungen	20
Entwicklung der Pavillongeometrie	20
Bauteil-Verbindungen	20
Mehrstufige Planung und Entwicklung des Tragwerks.....	21
Das Materialsystem und seine mechanischen Eigenschaften	22
Herstellung der Probekörper	23
Entwicklung der Faserkomponente	24
AP 3: Prototypenentwicklung und Tests von tragenden Bauteilen.....	26
Vorgehen zur Untersuchung geeigneter Naturfaser-Verbundwerkstoffe.....	26
Vergleich Naturfaser-Systeme mit konventionellen Systemen	26
Druck- und Zugversuche mit schlaufenförmigen Probekörpern	27
Großmaßstäbliche Testprototypen.....	28
AP 4: Wissenschaftliche Begleitung der Umsetzung des livMatS Pavillons.....	29
AP 5. Monitoring des Demonstrators	30
Messung der Umweltfaktoren	32
Monitoring Ergebnisse: Materialfeuchte und Gewicht	36
Vergleich biobasierte und erdölbasierte Harzsysteme.....	38
Test-Ergebnisse der Materialversuche	39
Maximale Zug- und Druckkraft-Entwicklung.....	40
Auswertung des Faser-Volumenverhältnis (FVR)	41
Visuelle Inspektion	41
Diskussion der Ergebnisse.....	45
Detaillierte ökologische, technologische und wirtschaftliche Bewertung der Projektergebnisse ...	45
Präsentation der Umsetzung der Projektergebnisse	47
Begutachtete Publikationen.....	47

Printmedien (Auswahl)	48
TV/Dokumentationen	49
Online-Medien (Auswahl)	49
Auszeichnungen/Preise.....	50
Nominierungen	50
Standort des Demonstratorbaus	50
Fazit.....	51
Literaturverzeichnis	52

Verzeichnis von Bildern und Tabellen

Abbildung 1S. 02

livMatS Pavillon, Botanischer Garten Freiburg im Breisgau

Die tragende Struktur des Pavillons besteht ausschließlich aus robotisch gewickelten Flachsfasern, einem Material, das natürlich, erneuerbar, biologisch abbaubar und regional verfügbar ist. © ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart, Rob Faulkner

Abbildung 2S. 02

livMatS Pavillon, Botanischer Garten, Freiburg im Breisgau. © ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart, Rob Faulkner

Abbildung 3S. 14

Beispielhafte Darstellung des Wickelverfahrens für Faserverbundsysteme für die realisierten Projekte Elytra Filament Pavillon, V&A Engineering Season 2016 am Victoria and Albert Museum London (links) und BUGA Faserpavillon 2019 für die Bundesgartenschau Heilbronn (rechts). © ICD/ITKE Universität Stuttgart

Abbildung 4S. 14

Realisierte Projekte aus Faserverbundstrukturen. BUGA Faserpavillon 2019 (oben links), Elytra Filament Pavillon am Victoria and Albert Museum in London (oben rechts, Bild: Roland Halbe), ICD/ITKE Forschungspavillon 2016-17 (Bild: Burggraf/Reichert), 2014-15, 2013-14 und 2012 (unten, von links nach rechts). © ICD/ITKE Universität Stuttgart

Abbildung 5S. 15

Flachfaserspule (links), Wickeldetail eines Naturfaser-Bauteils (rechts). © ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart

Abbildung 6S. 16

Aufbau der Faserstruktur im Botanischen Garten in Freiburg. © ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart, Rob Faulkner

Abbildung 7S. 17

Außenansicht des livMatS Pavillons (oben links und rechts, Bild: Christoph Zechmeister), Innenansicht des livMatS Pavillons (unten Bild: Rob Faulkner), Detail Naturfaserstruktur (unten rechts, Bild: Christoph Zechmeister). © ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart

Abbildung 8S. 20

Integratives Modell des livMatS Pavillons, Draufsicht mit Faserlayup. © ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart

Abbildung 9S. 21

Verbindungen der einzelnen Faserbauteile. © ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart

Abbildung 10S. 22

Integrative Material- und Strukturplanungsmethoden als Überblick. © ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart

Abbildung 11S. 24

Übersicht der beiden Prüfkörper-Typen. Schlaufenprüfkörper für die Druck- und Zugfestigkeits-Untersuchungen (links), sowie der sternenförmige Prüfkörper zur Untersuchung der Faserinteraktionen. © ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart

Abbildung 12S. 25

Finaler Entwurf der Fasersyntax des livMatS Pavillons, Rückseite (oben links), Vorderseite (unten links) und fachwerkartigen Auflagerungen (rechts). © ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart

Abbildung 13S. 26

Probekörper für Vorversuche zur Tragfähigkeit in verschiedenen Faser-/Harz-Kombinationen: Flachsfasern mit biobasiertem Epoxidharz (links), Flachsfasern mit erdölbasiertem Epoxidharz (drei Probekörper in der Mitte), Kohlenstofffasern mit erdölbasiertem Epoxidharz (rechts). © ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart

Abbildung 14S. 27

Kohlenstofffasern (Teijin Tenax) und Flachsfasern (Safilin) + Epoxidharz auf Erdölbasis (Hexion) und Epoxidharz auf Biobasis (Greenpoxy). Sternförmige Probekörper, die die Versagensarten, die Steifigkeit der Probekörper, die Versagenskraft, die geschätzte Kraft pro kg Material und die äquivalente Energieintensität bei der Herstellung und den Vergleich des globalen Erwärmungspotenzials auf der Grundlage der proportionalen strukturellen Kapazität der Probekörper pro kg prüfen (Kohlenstoff + Epoxidharz auf Ölbasis = 1, Flachs + Epoxidharz auf Ölbasis = 1,8, Flachs + Epoxidharz auf Ölbasis = 2,6) [GK22]. © ITKE Universität Stuttgart

Abbildung 15S. 28

Versuchsanordnung für die kleinmaßstäblichen Versuche (links). Schlaufenförmige Probekörper, die auf Zug beansprucht (rechts oben) oder auf Druck belastet werden (rechts unten). © ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart

Abbildung 16S. 29

Versuchsaufbau des statischen Belastungstest mit Bauelement im Maßstab 1:1 (links), Kräftediagramm des statischen Belastungstest, Prüfkraft [kN] als maximale Kompression aus der vereinfachten globalen FEM (rechts). © ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart

Abbildung 17S. 31

Auswertung der Deformation der Außenseite des livMatS Pavillons (inklusive Polykarbonatdach) anhand zwei sich überlagernder C2C-Scans, aufgenommen direkt nach Fertigstellung des Pavillons und nach 18 Monaten. © IIGS Universität Stuttgart

Abbildung 18S. 31

Auswertung der Deformation der Innenseite des livMatS Pavillons anhand zwei sich überlagernder C2C-Scans, aufgenommen direkt nach Fertigstellung des Pavillons und nach 18 Monaten. © IIGS Universität Stuttgart

Abbildung 19S. 32

Robotisches Setup für die Fertigung der Probekörper. © ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart

Abbildung 20S. 34

Einzelner Probekörper (links) und Specimen-Bündel (rechts). 5 Probekörper derselben Baureihe wurden jeweils zu einem Bündel zusammengefasst, hier Hexion Epikote (EPIK), nach 6 Monaten aus dem Prüfstand entnommen und in der Prüfmaschine einzeln auf Zugbelastung getestet (TB = Tension – Batch B). © ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart

Abbildung 21S. 34

Position der Probekörper-Bündel am livMatS Pavillon in Freiburg im Breisgau. © ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart

Abbildung 22S. 35

Die Probekörper-Bündel wurden unter der Dachkonstruktion des livMatS Pavillons für die Dauer der Messungen fixiert. © ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart

Abbildung 23S. 36

Position der Messgeräte und Probekörper am livMatS Pavillon in Freiburg im Breisgau. © ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart

Abbildung 24 **S. 37**

Lokale Luftfeuchtigkeit [in %] (grau) in Freiburg im Breisgau, Messzeitraum: 01.08.21 - 31.07.22, durchschnittliche Luftfeuchtigkeit aufgeteilt in zwei Messperioden, 01.08.21-25.01.22 und 26.01.22-31.07.22 (orange). © ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart

Abbildung 25 **S. 38**

Lokaler max. UV-Index in Freiburg im Breisgau, Messzeitraum: 01.08.21 - 31.07.22, Interpolierte Daten basierend auf UVI-Messwerten von WeatherOnline (links). Temperatur-Messwerte im livMatS Pavillon (blau), regionale Wetterstation-Werte (orange), durchschnittliche lokale Lufttemperatur (grau) (rechts). © ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart

Abbildung 26 **S. 39**

Testprobekörper für Druckbeanspruchung (links), Testprobekörper für Zugbeanspruchung (Mitte), Prüfaufbau auf Zwick Roel Z100 (rechts). © ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart

Abbildung 27 **S. 39**

Entwicklung der Zug- und Druck-Steifigkeit im Verlauf der Messzeit. © ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart

Abbildung 28 **S. 40**

Entwicklung der maximal einwirkenden Zug- und Druckkräfte im Verlauf der Messzeit. © ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart

Abbildung 29 **S. 40**

Typische Versagensart bei Zugbelastung (Greenpoxy , 6 Monate, links) und Delaminierung des auf Druck beanspruchten Probekörpers an der Hülse (Hexion Epikur, 12 Monate, rechts). © ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart

Abbildung 30 **S. 42**

livMatS Pavillon bei Besichtigung im September 2021, keine Delaminierung der Schalenhaut, intakte Faserstruktur. © ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart

Abbildung 31 **S. 42**

livMatS Pavillon bei Besichtigung im Februar 2022, keine Delaminierung der Schalenhaut, intakte Faserstruktur © ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart

Abbildung 32 **S. 43**

livMatS Pavillon bei Besichtigung im August 2022, keine Delaminierung der Schalenhaut, intakte Faserstruktur, unbeschädigte Probekörper. © ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart

Abbildung 33 **S. 43**

Beschädigung der gummierten Unterlegscheiben, August 2022. © ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart

Abbildung 34 **S. 44**

Ausbleichen der Faserprobekörper nach 0, 6 und 12 Monaten am Beispiel der Probekörperreihe Greenpoxy Tension. © ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart

Tabelle 1 **S. 23**

Mechanische Eigenschaften von Flachfasern (Depestele) auf der Grundlage ihrer Produktdatenblätter.

Tabelle 2 **S. 23**

Mechanische Eigenschaften von Epoxidharzen auf Ölbasis, die auf der Grundlage ihrer Produktdatenblätter getestet wurden.

Tabelle 3 **S. 33**

Probekörper-Matrix – für die Messgruppen wurden Prüfkörper aus drei biobasierten Harzsysteme und einen erdölbasierten Epoxid-Harzsystem als Referenzsystem hergestellt und unterschiedlich lange (6 und 12 Monate) den Umweltbedingungen ausgesetzt, die während dieser Zeitspanne am livMatS Pavillon auftraten.

Tabelle 4 **S. 38**

Mechanische Eigenschaften der Öl- und bio-basierten Epoxidharze, entnommen aus den Produktdatenblättern

Verzeichnis von Begriffen und Definitionen

CFW	Coreless Filament Winding, Kernloses Faserwickelverfahren
FEM	Finite Elemente Methode
FVR	Fibre-Volume-Ratio, Faser-Volumenverhältnis
ULS	Ultimate Limit State, Grenzzustand der Tragfähigkeit
E_d	Bemessungswert der Einwirkung (Schnittgröße, Spannung, Verformung), errechnet sich aus den charakteristischen Werten der Einwirkungen bzw. Einwirkungskombinationen und den dazugehörigen Teilsicherheitsbeiwerten [EN90]
F	Gesamtheit der Kräfte, die auf das Bauwerk einwirken oder auch Menge der aufgezwungenen Verformungen oder Beschleunigungen, die z. B. durch Temperatur, Temperaturänderungen, Feuchtigkeitsschwankungen, ungleichmäßige Setzungen oder Erdbeben einwirken [EN90]
γ	Sicherheitsbeiwert [EN90]
$N_x = \gamma * N_d$	Gleichung zur Bestimmung sämtlicher Lastfälle in der FEM. Wird zur Evaluation des im strukturellen Belastungstest ermittelten Sicherheitsbeiwertes genutzt [GGK22]
N_x	Teilchenzahl N, absolute Anzahl eines Teilchens in einem System, proportional zur Stoffmenge. Bezieht sich auf Stoff x
N_d	Bemessungswert der Einwirkung in Bezug zur Teilchenzahl

Zusammenfassung

Dieser Bericht behandelt die Zielsetzungen und Ergebnisse des Projekts: **Planungs-, Fertigungs- und Monitoring-Methoden für die Anwendung neuartiger, tragender Bauteile aus Naturfasern für ressourceneffiziente, digital hergestellte Faserverbundbauweisen: Projekt livMatS Pavillon** (gefördert unter dem AZ: 37101/01-25 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt).

Die Hauptzielsetzungen des Vorhabens waren die **Entwicklung geeigneter Planungs-, Fertigungs- und Monitoring-Methoden für den erstmaligen Einsatz von Naturfaserverbundwerkstoffen im robotischen kernlosen Wickelverfahren zur Herstellung tragender Bauteile**. Der Schwerpunkt des Projekts lag zum einen auf der **Integration der Naturfaserverbundwerkstoffe** und ihrer heterogenen, biologisch variablen Materialeigenschaften in die Entwurfs-, Simulations- und Fertigungsmethoden, die ursprünglich am ICD und ITKE für synthetische, homogene Materialien entwickelt wurden und schon bei mehreren Versuchsbauten zum Einsatz kamen. Diese neu entwickelten Co-Design Methoden [KW21] für den Einsatz von Naturfasern wurden anschließend **im Kontext eines großmaßstäblichen Versuchsbauprojekts erstmalig angewandt– dem livMatS Pavillon** im Botanischen Garten in Freiburg. Die tragende Struktur des livMatS Pavillons besteht aus 15 Modulen, die ausschließlich aus endlos gesponnenen Flachfasern robotisch hergestellt wurden. Mit seinem filigranen und charakteristischen Erscheinungsbild zeigt der livMatS Pavillon eindrucksvoll, dass natürliche Werkstoffe in Verbindung mit modernsten computerbasierten Entwurfs- und Fertigungsmethoden als vielversprechende Alternative zu synthetisch hergestellten Fasern im Bauwesen eingesetzt werden können.

Die **Herausforderungen** bei der Umsetzung des Projekts waren zum einen die Anpassung der Spannkkräfte und Prozessgeschwindigkeiten des robotischen Wickelverfahrens als auch die Methoden zur Auslegung des Tragwerks, vor allem in Hinblick auf das neue Materialsystem. Um die optimale Tragfähigkeit der Module zu erzielen, wurden Prototypen im Maßstab 1:1 mit unterschiedlicher Faserauslegungen und unterschiedlichen Naturfaser-Harz-Kombinationen hergestellt und mit strukturellen Belastungstests validiert.

Ein weiterer Schwerpunkt des Projekts lag auf der **Untersuchung, inwieweit das im livMatS Pavillon verwendete erdölbasierte Harz durch ein biobasiertes Harz ersetzt werden kann**. Biobasierte Harze besitzen ähnliche mechanische Eigenschaften wie konventionelle fossile Harzsysteme. Jedoch stellt Dauerhaftigkeit bei Umwelteinwirkungen, insbesondere bei Feuchtigkeit und UV-Strahlung eine zentrale Herausforderung dar. Im Rahmen des Projekts wurden über einen Zeitraum von 12 Monaten Probekörper aus Naturfasern mit verschiedenen biobasierten Harzsystemen im livMatS Pavillon angebracht und somit denselben Umwelteinflüssen ausgesetzt. Sensoren zeichneten in diesem Zeitraum die wesentlichen Umwelteinflüsse, Temperatur, Luftfeuchtigkeit und UV-Strahlung auf. In regelmäßigen Abständen wurden Probekörpergruppen entnommen, mechanisch auf Alterungseffekte geprüft und die Ergebnisse sowohl mit den aufgenommenen Umweltdaten korreliert als auch mit einer Kontrollgruppe aus Naturfasern mit erdölbasierten Harzsystem verglichen. Die untersuchten biobasierten Harzsysteme wiesen im Vergleich zu den bisher verwendeten erdölbasierten Systemen geringere strukturelle Leistungsfähigkeit auf, ihr Verwitterungsgrad durch Umwelteinflüsse war im direkten Vergleich jedoch nicht signifikant höher. Die bisher erhältlichen biobasierten Harzsysteme sind nur bis zu einem bestimmten Anteil (maximal 50%) aus biobasierten Bestandteilen zusammengesetzt. Ein weiterer wichtiger Schritt für die Nachhaltigkeit biobasierter Faserverbundsysteme in der Architektur wäre die Entwicklung vollständig biogener und damit biologisch abbaubarer Harzsysteme.

Das Projekt wurde mit folgenden Partnern abgeschlossen:

Exzellenzcluster livMatS, Universität Freiburg, Freiburg Center for Interactive Materials and Bioinspired Technologies (FIT), Georges-Köhler-Allee 105, 79110 Freiburg
Exzellenzcluster IntCDC, Universität Stuttgart, Keplerstrasse 11, 70174 Stuttgart

Kooperationspartner aus der Industrie:

FibR GmbH, Stuttgart, Auf der Höhe 3, 71394 Kernen im Remstal

Das Projekt wurde unterstützt durch:

Deutsche Bundesstiftung Umwelt
Exolon Group GmbH

Einleitung

Eine nachhaltig gebaute Umwelt erfordert nicht nur die Entwicklung **neuer Lösungsansätze für das Planen und Bauen**, sondern auch die **Erforschung eines innovativen Einsatzes von ressourcenschonenden Materialien**. Digitale Planungs- und Fertigungstechnologien eröffnen uns heute die Möglichkeit, viel spezifischer, differenzierter und ökonomischer als dies bisher möglich war, auf die unterschiedlichen lokalen, funktionalen, statischen und baukonstruktiven Anforderungen eines Projekts einzugehen. Dabei ermöglichen computerbasierte Entwurfswerkzeuge bereits in einer sehr frühen Projektphase die Integration von Materialeigenschaften, Herstellungsanforderungen und konstruktiver Umsetzungsmöglichkeiten. Ein **integrativer und interdisziplinärer Ansatz** ist hierbei erforderlich.

Das Projekt „Planungs-, Fertigungs- und Monitoring-Methoden für die Anwendung neuartiger, tragender Bauteile aus Naturfasern für ressourceneffiziente, digital hergestellte Faserverbundbauweisen: Projekt livMatS Pavillon“ untersucht das **Potential von Naturfasern als vielversprechende und nachhaltige Alternative zu synthetisch hergestellten Fasern im Bauwesen**. Das Projekt verfolgte das Ziel, die bisherigen Entwicklungen in der Herstellung innovativer und materialeffizienter Leichtbaukonstruktionen aus Faserverbundsystemen auf den erstmaligen Einsatz von Naturfasern, insbesondere Flachfasern, in der Architektur auszuweiten und zu einer erstmaligen großmaßstäblichen baulichen Anwendung zu überführen – dem livMatS Pavillon im Botanischen Garten der Universität Freiburg.

Faserverbundwerkstoffe besitzen ausgezeichnete Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften und sind gleichzeitig extrem leicht. Diese Eigenschaften bieten eine solide Grundlage für die Entwicklung von innovativen, materialeffizienten Leichtbaukonstruktionen. Die Herstellung von Bauteilen aus Faserverbundwerkstoffen ist bereits in Branchen wie z.B. der Luft- und Raumfahrttechnik, dem Maschinenbau oder der Autoindustrie schon weit fortgeschritten. In den letzten Jahren haben auch Naturfasern als nachhaltige Alternative in diesen Bereichen zunehmend an Bedeutung gewonnen. In der Bauindustrie werden diese Materialien jedoch bisher nur sehr selten eingesetzt.

Der livMatS Pavillon setzt eine Reihe hochinnovativer und erfolgreicher Versuchsbauten der Institute „Institut für Computerbasiertes Entwerfen und Baufertigung“ (ICD) und „Institut für Tragkonstruktionen und konstruktives Entwerfen“ (ITKE) an der Universität Stuttgart fort, in denen Faserverbundwerkstoffe zum Einsatz in der Architektur kommen. Diese bisherigen Versuchsbauten waren experimentelle Leichtbauten aus synthetisch hergestellten Faserverbundwerkstoffen, die vollständig computerbasiert entworfen und robotergestützt gefertigt sind. Damit demonstrieren sie die Möglichkeiten digitaler Technologien für die Zukunft des Bauens.

Das hierfür entwickelte robotische Vorfertigungsverfahren ermöglicht das **kernlose Wickeln von Faserverbundstrukturen**. In Kombination mit digitalen Entwurfs- und Planungswerkzeugen erlaubt die gezielte Anpassung von Faserorientierung, -ausrichtung und -dichte an die strukturellen Gegebenheiten des Bauteils. Material wird dabei nur dort platziert, wo es auch tatsächlich benötigt wird. Dies führt im Vergleich zu konventionellen Baumaterialien zu einer sehr hohen Materialeffizienz in der Herstellung der Bauteile. Dies wiederum resultiert in Komponenten mit hoher Tragfähigkeit, die mit weniger Gesamtmaterial, Infrastruktur und Energieverbrauch produziert werden können. Außerdem entfällt der bei der Herstellung von Faserverbundkonstruktionen anfallende ökologisch bedenkliche Abfall aus dem Verschnitt von Fasermatten oder dem Bau von Formen. Die daraus resultierenden Strukturen sind nicht nur hocheffizient und außergewöhnlich leicht, sondern erzeugen auch einen eigenständigen architektonischen Ausdruck.



Abbildung 3: Beispielhafte Darstellung des Wickelverfahrens für Faserverbundsysteme für die realisierten Projekte Elytra Filament Pavillon, V&A Engineering Season 2016 am Victoria and Albert Museum London (links) und BUGA Faserpavillon 2019 für die Bundesgartenschau Heilbronn (rechts)
© ICD/ITKE Universität Stuttgart

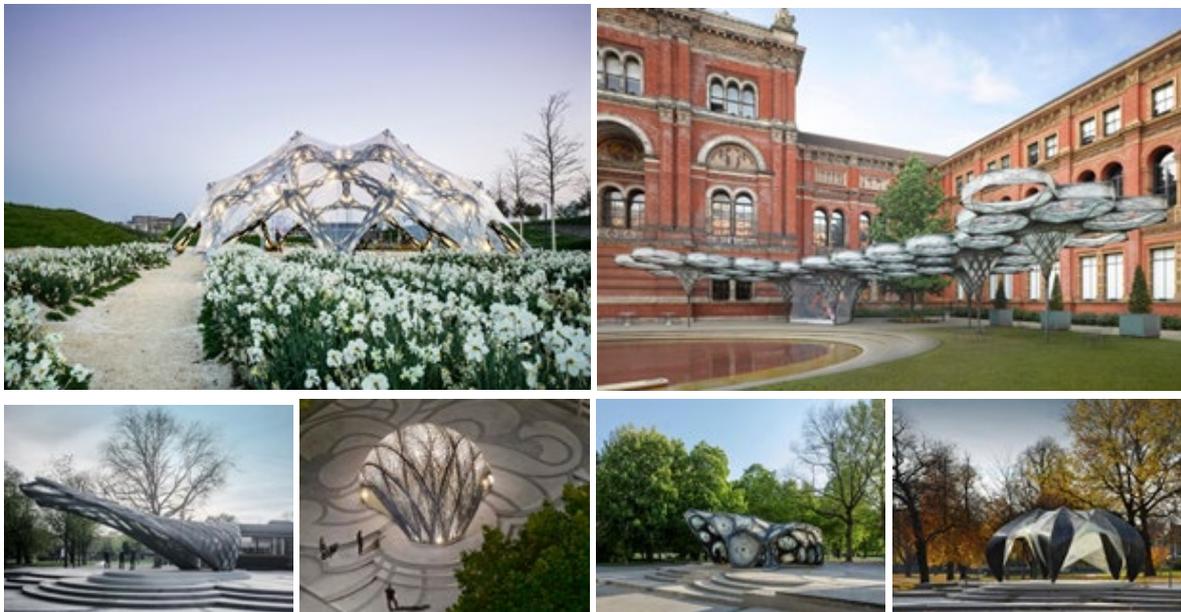


Abbildung 4: Realisierte Projekte aus Faserverbundstrukturen. BUGA Faserpavillon 2019 (oben links), Elytra Filament Pavillon am Victoria and Albert Museum in London (oben rechts, Bild: Roland Halbe), ICD/ITKE Forschungspavillon 2016-17 (Bild: Burggraf/Reichert), 2014-15, 2013-14 und 2012 (unten, von links nach rechts)
© ICD/ITKE Universität Stuttgart

Die **bisherige Forschung konzentrierte sich auf den Einsatz von synthetisch hergestellten Faserverbundwerkstoffen** (Glas- und Kohlenstofffasern) und deren Einsatz als neuartiges Material im Bauwesen. Der Schwerpunkt des Projekts liegt darauf, dieses **Verfahren für das Bauen mit natürlichen Fasern aus nachwachsenden Rohstoffen (endlos gesponnenen Flachfasern)**, zu übertragen und somit nicht nur eine differenzierte und anpassungsfähige, sondern auch ressourcenschonende und nachhaltige Bauweise zu ermöglichen.

Technische Naturfasern stellen eine vielversprechende und nachwachsende Alternative mit günstiger Energie- und CO₂-Bilanz zu den bisher verwendeten Fasertypen dar. Flachfasern wurden seit Jahrtausenden für die Herstellung von Leinengeweben und Kleidungsstücken genutzt, bis sie ab dem 18. Jahrhundert durch Baumwolle ersetzt wurden. Sie sind in ihren mechanischen Eigenschaften mit synthetischen Glasfasern vergleichbar, bieten eine ähnliche spezifische Steifigkeit, jedoch mit einer deutlich geringeren grauen Energie. Im Gegensatz zu Glas- oder Kohlenstofffasern, sowie vielen anderen Naturfasern sind Flachfasern in Mitteleuropa regional verfügbar, aus nachwachsenden

Rohstoffen, biologisch abbaubar und stehen nicht in Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion. Sie bieten eine ausgezeichnete Grundlage für die Entwicklung innovativer und ressourcenschonender Bauanwendungen. **Insbesondere in Kombination mit effizientem Leichtbau haben sie das Potential, den ökologischen Fußabdruck von Gebäuden zu reduzieren.**



Abbildung 5: Flachsfaserspule (links), Wickeldetail eines Naturfaser-Bauteils (rechts)
© ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart

Die tragende Struktur des livMatS Pavillons besteht aus 15 Flachfaser-elementen, die in einem robotischen, kernlosen Faserwickelverfahren ausschließlich aus endlos gesponnenen Flachsfasern vorgefertigt wurden. Die Gesamtlänge der einzelnen Elemente variiert zwischen 4,50 bis 5,50 m und sie wiegen im Durchschnitt lediglich 105 kg. Die gesamte Faserkonstruktion wiegt bei einer Gesamtfläche von 46 m² nur ca. 1.5 t und ist für umfangreiche Schnee- und Windlasten gemäß den gültigen Bauvorschriften ausgelegt.

Die Anpassung der Planungsmethoden und Fertigungsprozesse an die Naturfasern und ihre Materialeigenschaften (z.B. biologische Variabilität) stellten neue Herausforderungen insbesondere in Hinblick auf den computerbasierten Entwurf, die Arbeitsabläufe der robotischen Fertigung und Maschinensteuerung sowie die konstruktive Auslegung der Tragstrukturen dar. Diese **Co-Design Prozesse** waren ursprünglich für synthetische, homogene Materialien konzipiert und **mussten nun für die Materialeigenschaften der Flachsfasern (z.B. ihre biologische Variabilität) ausgelegt werden**. Die Anpassung des integrativen computerbasierten Modells ermöglichte es, die heterogenen Materialeigenschaften von Naturwerkstoffen in Entwurf und Planung der einzelnen Komponenten sowie der Gesamtstruktur einzubeziehen – nur so kann die komplexe Wechselwirkung von Form, Material, Struktur und Herstellung optimal genutzt werden.

Die **Anpassung des Herstellungsverfahrens konzentrierte sich vorwiegend auf den Austausch der synthetischen Faserrovings** durch endlose Flachsfasern und den damit verbundenen grundsätzlichen Herausforderungen an Entwurf, Auslegung des Tragwerks und Fertigungsprozess. **Der livMatS Pavillon wurde mit erdölbasiertem Epoxidharz umgesetzt**, da der Ersatz der synthetischen Fasern durch natürliche Fasern aus Sicht des Entwurfes, der Konstruktion, der Statik und des Fertigungsprozesses eine primäre und entscheidende Herausforderung auf dem Weg zu Faserverbundkonstruktionen aus nachwachsenden Rohstoffen darstellt. Um die optimale Belastbarkeit der Module zu erreichen, wurde die Tragfähigkeit und Materialeffizienz des neuen Materialsystems mit mehreren 1:1 Prototypen getestet und die daraus resultierenden architektonischen Gestaltungsmöglichkeiten abgeleitet.



Abbildung 6: Aufbau der Faserstruktur im Botanischen Garten in Freiburg
 © ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart, Rob Faulkner

In einem Folgeschritt wurde die Möglichkeit untersucht, bei künftigen Projekten die **erdölbasierten Harze durch biobasierte Harze zu ersetzen**. Diese besitzen ähnliche mechanische Eigenschaften wie konventionelle fossile Harzsysteme; eine zentrale Herausforderung bei der Verwendung von Naturfasern und biobasierten Harzen stellt deren Dauerhaftigkeit bei Umwelteinwirkungen, vor allem bei Feuchtigkeit und UV-Strahlung, dar. In vorgelagerten Forschungsprojekten (vor allem IntCDC und Zukunft Bau) wurden hierzu in der Klimakammer erste Versuche unter Verwendung diverser Additive (UV-Schutz) durchgeführt, die die Auswahl der im Projekt verwendeten Materialkombinationen unterstützen. Versuche in der Klimakammer können Erfahrungswerte unter realen Umwelteinwirkungen aber nur sehr bedingt ersetzen.

Daher wurden **Proben aus Flachfasern mit unterschiedlichen erdöl- und biobasierten Harzsystemen denselben Umwelteinwirkungen ausgesetzt wie der livMatS Pavillon und Sensoren zur Aufnahme der wesentlichen Umwelteinwirkungen** (Temperatur, Luftfeuchtigkeit und UV-Strahlung) am Pavillon angebracht. Über die Zeitspanne von einem Jahr wurden in regelmäßigen Abständen Materialproben entnommen, hinsichtlich Alterungseffekten mechanisch geprüft und mit den Umweltdaten korreliert. Somit konnten **Vergleiche zur Verwendung biobasierter Epoxidharze als Alternative zu erdölbasierten Harzen und ein Katalog der Materialkombinationen und ihrer Eigenschaften** erstellt werden. Dies ist von zentraler Bedeutung für die künftige Anwendung und Verbreitung dieser Bauweise.

Zum Abschluss des Projekts wurde an der Universität Stuttgart eine **Tagung mit dem Thema "Natural Fibre Architecture – Towards Bio-Based Construction"** veranstaltet. Führende ExpertInnen aus den Bereichen Architektur, Design, Bauingenieurwesen, Biologie und Wissenschaftsförderung diskutierten wegweisende Forschungsergebnisse und stellten realisierte Projekte vor, die den innovativen Einsatz von Naturfasern im Bauwesen hervorheben.

Zu den Vortragenden gehörten: Sabine Djahanschah (Deutsche Bundesstiftung Umwelt), Prof. Dr. Thomas Speck (Universität Freiburg), Prof. Dr. Ferdinand Ludwig (TUM School of Engineering and Design), DI Valentine Troi (Standortagentur Tirol, troi.composite components), Assoc. Prof. Dr.-Ing. Hanaa Dahy (Aalborg University / University of Stuttgart), Assist. Prof. Arjan Habraken (Eindhoven University of Technology, SIDstudio), Prof. Dr.-Ing. Jan Knippers und Prof. Achim Menges (ITKE/ICD/IntCDC University of Stuttgart).



Abbildung 7: Außenansicht des livMatS Pavillons (Bilder oben links und rechts: Christoph Zechmeister), Innenansicht des livMatS Pavillons (Bild unten links: Rob Faulkner), Detail Naturfaserstruktur (Bild unten rechts: Christoph Zechmeister)
© ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart

Hauptteil

Darstellung der einzelnen Arbeitsschritte

Das Forschungsprojekt wurde in drei aufeinanderfolgende Projektphasen mit fünf sich überschneidenden Arbeitspaketen unterteilt.

Die erste Phase (AP 1, AP 2, AP 3) konzentrierte sich auf die **Anpassung der Entwurfs- und Konstruktionsmethoden sowie der Herstellungsverfahren an die Verwendung von endlos gesponnenen natürlichen Flachfasern** und auf die für eine großmaßstäbliche Anwendung **erforderlichen material- und fabrikationstechnischen Entwicklungen**. Erste kleinere Wickel- und Belastungstests unterstützten die Materialauswahl und lieferten erste Richtwerte über die mechanischen Eigenschaften, das konstruktive Verhalten des Materials und mögliche Versagensarten.

Am Ende dieser Phase wurden **strukturelle Belastungstests an 2-3 prototypischen Bauteilen** durchgeführt, um diese Entwicklungen für die strukturelle Anwendung von Naturfasersystemen zu validieren.

Die zweite Phase (AP 4) konkretisierte die Forschungsarbeiten mit Unterstützung des Industriepartners im Zusammenhang mit **dem Bau des großmaßstäblichen Projekts "livMatS Pavillon"** im Botanischen Garten der Universität Freiburg.

In der dritten Phase (AP 5) wurde das Projekt **langfristig begleitet**. Es wurden **verschiedene Materialkombinationen (auch Naturfasern und biobasierten Harzsysteme) hinsichtlich ihres Alterungsverhaltens getestet**, mit einer Kontrollgruppe (aus Naturfasern und erdölbasiertem Harzsystem), um die Dauerhaftigkeit von Naturfasern als zentrale Herausforderung beim Einsatz im Bauwesen zu verifizieren.

AP 1: Anpassung der Planungsmethoden und Fertigungsprozesse

Naturfasern weisen vergleichbare mechanischen Eigenschaften wie synthetisch hergestellte Glasfasern auf. Sie besitzen eine ähnliche spezifische Steifigkeit, jedoch mit einer viel geringeren grauen Energie. Im Gegensatz zu den durch ihre synthetische Herstellung homogenen Glas- und Karbonfasern sind natürlich gewachsene Fasern heterogen. Diese biologische Variabilität stellt in Hinblick auf die Arbeitsabläufe der robotischen Fertigung sowie der Maschinensteuerung eine Herausforderung dar.

Die Anpassung des bestehenden integrativen computerbasierten Modells, das für die Vorgängerprojekte aus Glas- und Karbonfasern entwickelt wurde, ermöglichte es, die heterogenen Materialeigenschaften von Naturwerkstoffen in den Entwurf und die Planung der einzelnen Komponenten sowie der Gesamtstruktur einzubeziehen.

Die speziellen Eigenschaften der Naturfasern erforderten zudem die Neukonfiguration des robotischen Herstellungsverfahrens. Entscheidend für die Fertigung mit Naturfasern ist die benötigte Abzugsfestigkeit der Fasern während der Verarbeitung, da diese unter Zugbelastung schneller reißen als synthetisch hergestellte Fasern. Bei der Feinabstimmung des Wickelvorgangs ist es wichtig einen optimalen Punkt zu finden zwischen ausreichender Faserspannung – um keine losen, hängenden Fasern im Bauteil zu haben – und zu viel Faserspannung – wodurch die Fasern durch die Zugkraft des Roboters reißen würden. Zusätzlich muss bei einer optimalen Feinabstimmung gewährleistet werden, dass diese beständig genug ist, um dem kompletten Wickelprozess standzuhalten. Eine geringere Spannung und optimiertes Faserhandling können mit optimiertem Equipment erreicht werden, z.B.

eignet sich hierfür die Verwendung von kugelgelagerten Keramikrollen an allen Umlenkpunkten oder ein geringerer Vorschub des Roboters.

Ein zweites wichtiges Kriterium der Fertigung mit Naturfasern ist das allgemeine Anpassen der Faserspannung. Die Spannung muss gemäß der Materialeigenschaften eingestellt werden, es ist zudem eine Spannungskontrolle nötig. Bereits in frühen Versuchen wurde dies mechanisch durch eine sogenannte Dancer-Bar gewährleistet. Diese dient dem Aufrechterhalten einer kontinuierlichen Spannung und gleicht die unterschiedlichen Zugspannungen aus, welche sich durch die Bewegung des Roboters ergeben. Die jeweils korrekte Einstellung musste durch Tests ermittelt werden, sie variiert mit der Spannweite der Fasern.

Für den Beschichtungsvorgang mit Harz sind zwei Kriterien entscheidend: Zum einen muss die Topfzeit der Harze berücksichtigt werden. Die Topfzeit beschreibt die Zeitspanne des Harzgemisches bis die Trocknungs- bzw. Aushärtungsprozesse einsetzen. Hierbei lässt sich der Fertigungsprozess nur begrenzt anpassen. Beim Einsatz entsprechender Harzsysteme beläuft sich die Topfzeit auf mehrere Stunden. Sollte das Zeitfenster tangiert oder überschritten werden, muss das Harz gewechselt werden, was den Fertigungsprozess erschwert. Zum anderen spielt das Imprägnierverhalten eine wichtige Rolle. Naturfasern nehmen grundsätzlich weniger Harz auf als vergleichbare Fasersysteme. Dieser Umstand bedeutet, dass die Dimensionierung des Harzbades dementsprechend angepasst werden muss.

Bereits abgelegte Naturfasern verformen sich durch die Interaktion mit später gelegten Fasern stärker als es vergleichsweise bei Karbon- und Glasfasern üblich ist. Dieser Unterschied kann aber durch Anpassungen der Faserspannung beim Ablegen ausgeglichen werden.

Im Kontext der digitalen Modellierung bedeuten diese Parameter, dass das Syntaxdesign etwas konservativer angelegt werden sollte als bei vergleichbaren Geometrien, die auf anderen Materialsystemen wie Karbonfasern basieren. Dies bedeutet konkret, dass die Distanz zwischen Wickelpunkten tendenziell kürzer sein sollte, oder aber, dass die Faserinteraktionspunkte nah beieinander liegen sollten, um die Spannweite zu verringern.

Gedrehte Flachfasern weisen höhere Zugfestigkeiten auf, und können die in der Fertigung auftretenden Prozesskräfte daher besser aufnehmen. Durch die Verdrillung der Fasern lassen sich die Faserbündel jedoch schwerer mit Harz imprägnieren und die einzelnen Fasern sind nicht mehr präzise in Lastrichtung orientiert, wodurch es zur Reduktion der Festigkeit des Faserbauteils kommt. Daher wurde für den Bau des livMatS Pavillons auf parallellaufende, flache Rovinge zurückgegriffen, die in mehreren Vorab-Tests evaluiert wurden. Für die Fabrikation der Bauteile des livMatS Pavillons wurden die Naturfasern zusätzlich mit integrierten Sisalschnüren ergänzt, wodurch die Zugkräfte in den Bündeln besser aufgenommen werden konnten. Alternativ wäre es auch noch möglich gewesen, den Wickelvorgang so zu optimieren, dass mit geringerer Spannung gewickelt wird, was jedoch erhebliche Auswirkungen auf die Produktionszeit gehabt hätte.

AP 2: Erforderliche konstruktive Entwicklungen für großmaßstäbliche Anwendungen

Entwicklung der Pavillongeometrie

Der livMatS Pavillon ist eine kuppelförmige Struktur mit einer Spannweite von über 9,00m und einer Höhe von 4,50m, die Durchgangsbögen haben eine Höhe von 3,20m. Der Pavillon besteht aus 15 Faserbauteilen, die in jeweils 3 Gruppen unterteilt wurden, die jede ein mittleres, symmetrisches Bauteil und zwei seitlich angeordnete, auf beiden Seiten gespiegelte Bauteile enthält. In der Mitte der Pavillonstruktur wurde ein dreieckiges Bauteil hinzugefügt. Ein Polycarbonat-Dach überspannt die komplette Struktur und sorgt für den erforderlichen Witterungsschutz.

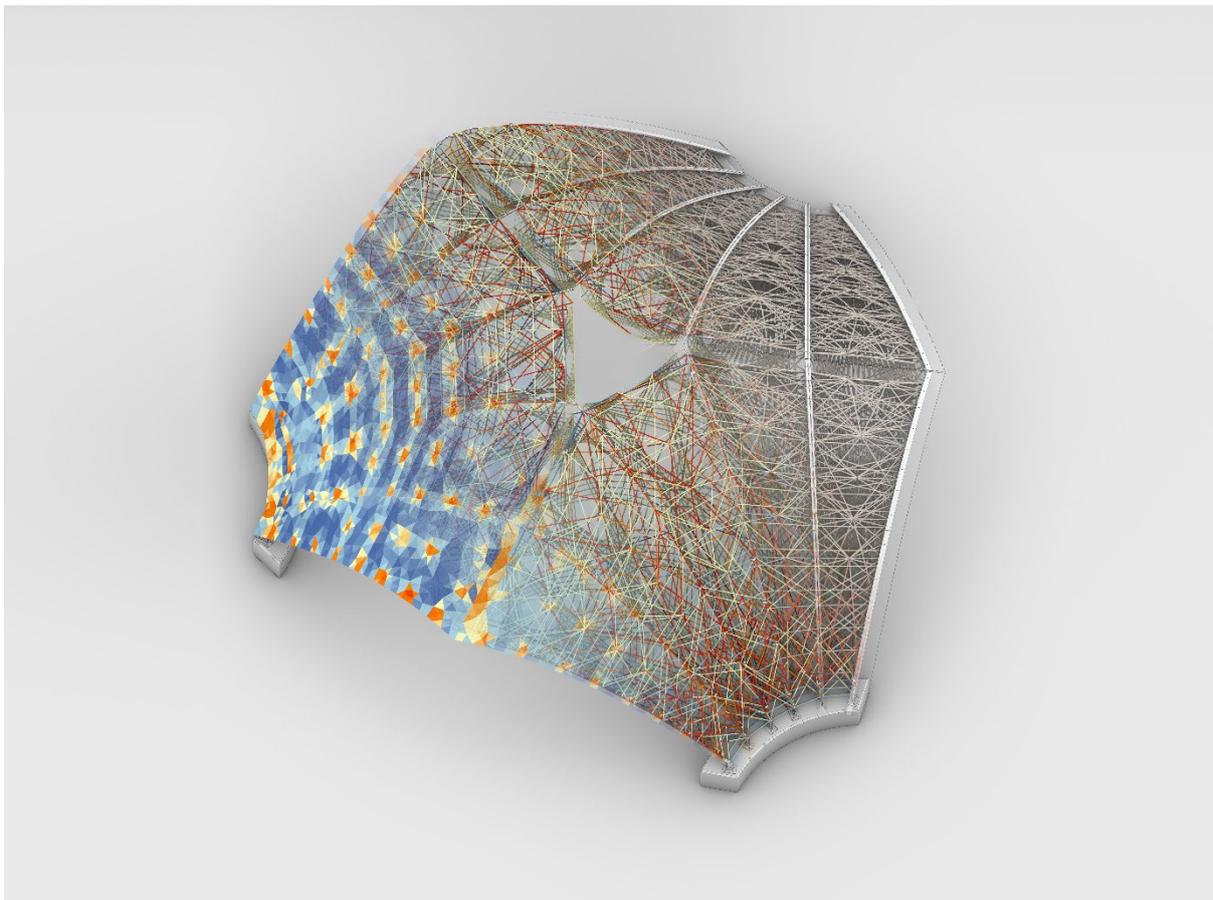


Abbildung 8: Integratives Modell des livMatS Pavillons, Draufsicht mit Faserlayup
© ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart

Bauteil-Verbindungen

Alle Bauteile sind an ihrer Oberkante mit ihren gespiegelten Gegenstücken, an der Firstseite mit dem dreiecksförmigen Sonderverbindungsbauteil und im Sockelbereich mit Stahlblechen zur Verankerung im Betonfundament verbunden. Zur Übertragung der Axialkräfte und Biegemomente sind die Stahlverbinder entsprechend bemessen und ausgelegt. Die Naturfaser-Bauteile sind seitlich durch eine Reihe von Stahlbolzen miteinander verbunden. Darüber hinaus wurden an den seitlichen Bolzenverbindern Schienen angebracht, an denen die Polycarbonat-Platten der Dachhaut verschraubt werden.

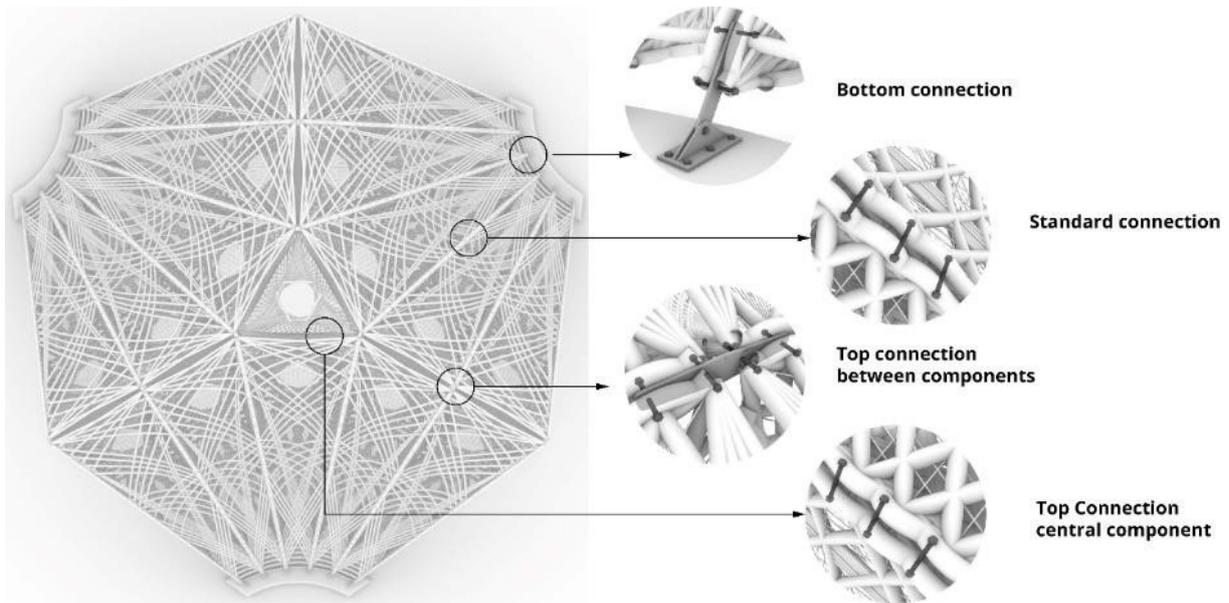


Abbildung 9: Verbindungen der einzelnen Faserbauteile
© ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart

Mehrstufige Planung und Entwicklung des Tragwerks

Beim Entwurf des Tragwerks wurde die prüfungsunterstützte Methode [GK21], die in den früheren ICD/ITKE-Faserpavillons (BUGA-Faserpavillon 2019 [BM20] [DM19], Maison Fibre [DM19] [SM23] auf der 17. Internationalen Architekturausstellung, La Biennale di Venezia 2021) entwickelt wurde, auf die Materialeigenschaften der Naturfasern erweitert.

Die Methodik umfasst drei Schritte [ZM23] [GGK22]:

- Materialauswahl und Charakterisierung des Tragsystems durch Tests im kleinen Maßstab
- Mehrstufige Finite-Elemente-Modellierung, einschließlich Prototyping
- Entwurf und Optimierung des Bauteils mit Hilfe von Versuchen im Maßstab 1:1

Im ersten Schritt wurde das Bioverbundwerkstoffsystem unter Berücksichtigung der mechanischen Eigenschaften, der Umweltauswirkungen und der Herstellungsmöglichkeiten für CFW (Coreless Filament Winding, kernloses Faserwickelverfahren) ausgewählt. Während des Entwurfsprozesses wurden zwei Arten von Probekörper (sternförmig und schlaufenförmig) in kleinem Maßstab hergestellt und auf das strukturelle Verhalten und mögliche Versagensarten in verschiedenen Entwurfsstadien getestet.

Im zweiten Schritt wurden zwei Arten von FE-Darstellungen des Bauteils modelliert, um das globale Verhalten zu untersuchen, die Lasten in die detaillierten Bauteilmodelle einzugeben und die Fundamente und Verbindungen zu entwerfen.

Im letzten Schritt wurden spezifische Entwurfsiterationen für den livMatS-Pavillon durchgeführt, um die Tests im kleinen und großen Maßstab zu koordinieren und die endgültige Fasersyntax für die Herstellung zu entwerfen.

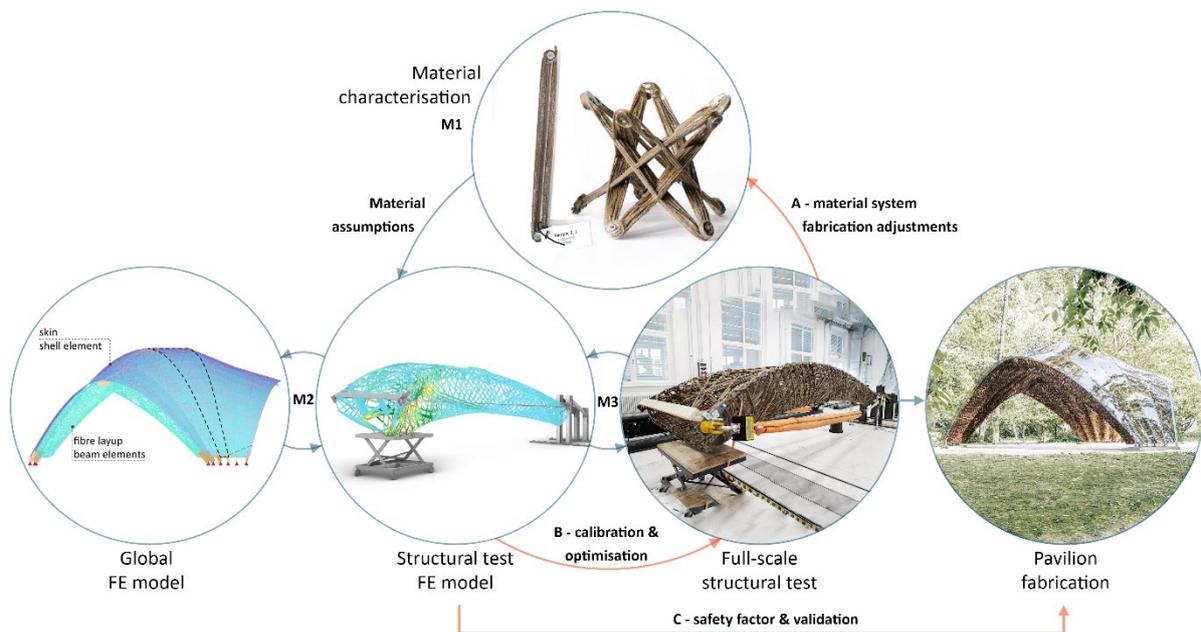


Abbildung 10: Integrative Material- und Strukturplanungsmethoden als Überblick.
 © ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart

Das Materialsystem und seine mechanischen Eigenschaften

Die Auswahl von Bioverbundwerkstoffen für ein Faserbauteil erfordert umfassende Vergleiche der mechanischen Eigenschaften mit den Umweltauswirkungen unter Berücksichtigung der Herstellbarkeit, der Transportfähigkeit und der Nutzungsbedingungen. In vielen Fällen müssen bei der Auslegung alle genannten und unerwarteten Einflüsse berücksichtigt und hohe Abminderungsfaktoren angewandt werden, um die statische Tragsicherheit zu gewährleisten.

Die mechanischen Eigenschaften von Naturfasern variieren je nach Hersteller und Lieferant teils erheblich. Unter den bisher gesammelten Daten von Naturfaserprodukten können Hanf- und Flachsfasern ein ähnliches Elastizitätsmodul erreichen wie Glasfasern, jedoch erzielt nur Flachs die untere Grenze der Zugfestigkeit von Glasfasern. Darüber hinaus hat Flachs eine kurze Wachstumszeit (ca. 100 Tage) und wird in Europa in großem Umfang angebaut.

Die Verwendung von Flachs stellt in Hinblick auf das Tragwerk eine Herausforderung dar, da die Pflanze aufgrund ihres Zellulosegehalts eine relativ geringe Feuchtigkeitsbeständigkeit aufweist. Wie in [GGK22] nachgewiesen wurde, führt eine Erhöhung der relativen Luftfeuchtigkeit auf 60 % zu einer deutlichen Verringerung des Elastizitätsmoduls der Flachsfasern um bis zu 35 %. Daher ist es unerlässlich, das Material durch eine geeignete Harzbeschichtung und externe Elemente in der Bauplanung zu schützen.

Unter Berücksichtigung der Umweltauswirkungen auf den gesamten Lebenszyklus sollte die Wahl zwischen erdölbasiertem und biobasiertem Epoxidharz durch eine vollständige Lebenszyklus-Analyse beurteilt werden. Die Durchführung einer Ökobilanz ist jedoch komplex, da sie viele Schritte beinhaltet und spezifische Systemgrenzen erfordert, um die Ergebnisse korrekt bewerten zu können. Da dies der erste Versuch ist, eine Faser-Struktur in großem Maßstab mit Naturfaser-Verbundwerkstoffen zu bauen, werden diese Daten noch untersucht.

Für den livMatS-Pavillon wurde unter Berücksichtigung aller oben genannten Faktoren ein Materialsystem aus Depestele-Flachsfasern und Hexion-Epoxidharz ausgewählt. In Tabelle 1 und 2

sind deren mechanischen Eigenschaften auf der Grundlage der Produktionsdatenblätter aufgeführt. Die Berechnung der Verbundsteifigkeit erfolgte anhand der Herstellerangaben.

Fasern	Feinheit [tex]	Dichte [g/cm ³]	Torsion [tpm]	Zugfestigkeit trockener Fasern bei Bruch [N]	E-Modulus trockener Fasern [Gpa]	E-Modulus Verbundwerkstoff ¹ [Gpa]	E-Modulus der Fasern im Verbund ² [Gpa]	Verbundsteifigkeit ² [Mpa]
Flachs (Depestele)	2400	1.45	0	30-50	-	28	55.1	875

¹: Herstellerangaben zu in Epoxidharz-getränkten Flaxfasern (Depestele mit 40% Faservolumenverhältnis, Safilin mit 57%)

²: Die Werte der Flachsfasern (E-Modulus, Verbundsteifigkeit) sind basierend auf den Materialeigenschaften der Herstellerangaben berechnet worden

Tabelle 1: Mechanische Eigenschaften von Flachsfasern (Depestele) auf der Grundlage ihrer Produktdatenblätter.

Matrix - Name	Bio-basiert [%]	Harz	Härter	Mischverhältnis	Topfzeit ¹ [min]	Dichte (g/cm ³)	Harz-Visosität ¹ [mPa.s]	Tg [°C]	E modulus [Gpa]	Zugfestigkeit [Mpa]
Hexion Epikote	0	LR135	LH137 + LH287	100:23:12	240	1.127	2300 - 3000	120	3.15	68

¹: Werte erfasst bei 20°C - 25°C

Tabelle 2: Mechanische Eigenschaften von Epoxidharzen auf Ölbasis, die auf der Grundlage ihrer Produktdatenblätter getestet wurden.

Herstellung der Probekörper

Zur genaueren Untersuchung und Bewertung der mechanischen Eigenschaften sowie des Materialverhaltens der Flachsfasern wurden spezielle Probekörper im kleinen Maßstab entwickelt und hergestellt. Die Prüfergebnisse dieser kleinmaßstäblichen Probekörper quantifizieren nicht in vollem Umfang die tatsächlichen Werte der Materialeigenschaften, die für die Simulation der Struktursteifigkeit und die Auslegung der Bauteile verwendet werden. Sie liefern jedoch sehr wichtige erste Richtwerte für das Materialverhalten der Flachsfasern unter Belastung und sind aufgrund ihrer schnellen und einfachen Herstellung ein geeignetes Werkzeug, die mechanischen Eigenschaften und das Materialverhalten der Flachsfasern zu testen, bevor die Bauelemente im vollen Maßstab hergestellt werden.

Ausgangspunkt der kleinmaßstäblichen Tests für den livMatS Pavillons war die Untersuchung von zwei geometrischen Variationen von Probekörpern. Ein sternförmiger Probekörper reproduziert die Interaktion der Fasern des kernlos gewickelten Faserverbundsystems und wird dazu verwendet, um zum einen die Weiterleitung der Kräfte durch das Faserverbundsystem zu untersuchen, als auch den Faserbruch an den Verbindungsstellen, an denen das Material bei Belastung versagt. Der zweite Geometriety ist ein Probekörper in Schlaufenform, der planar von einem Wickelpunkt zum anderen gewickelt wird. Dieser Typ bildet zwar nicht wie der sternförmige Typ die Faserinteraktion in den Bauteilen des Pavillons ab, kann jedoch Informationen über den Materialverbund, die grundlegende Verarbeitbarkeit sowie die Zug- und Druckfestigkeit liefern.

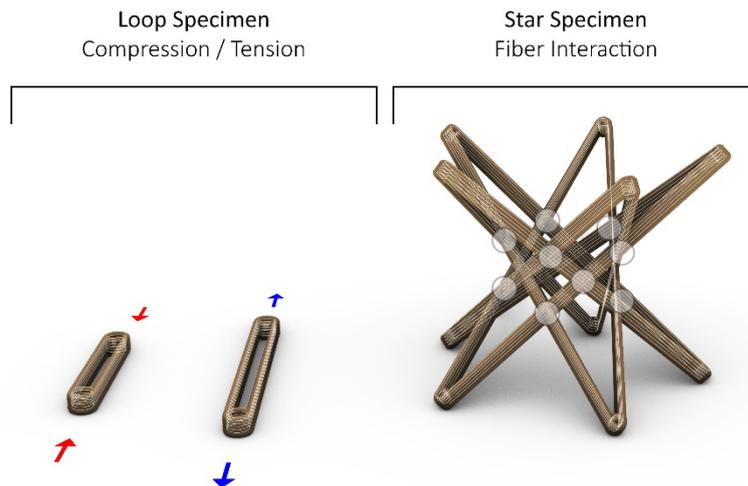


Abbildung 11: Übersicht der beiden Prüfkörper-Typen. Schlaufenprüfkörper für die Druck- und Zugfestigkeits-Untersuchungen (links), sowie der sternförmige Prüfkörper zur Untersuchung der Faserinteraktionen
© ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart

Entwicklung der Faserkomponente

Für die Berechnung der Traglast werden die Faserkomponenten bei der Modellierung der globalen Geometrie des livMatS Pavillons vereinfacht als Balkenelemente mit einem sich in Längsrichtung verjüngenden Trapezhohlprofil dargestellt. Dadurch kann die zu erwartende Bauteilgeometrie unter allen möglichen Lastfällen und ungünstigen Lastkombinationen abgebildet werden, einschließlich der Wind- und Schneelasten, gemäß den Vorgaben von Eurocode 0 [EN90] und Eurocode 1 [EN91]. Auch die Grenzzustände der Tragfähigkeit (ULS, Ultimate Limit State) kann in dieses Modell übertragen werden.

Die Eigenlasten des Bauteils werden in Anlehnung an die bisherigen Projekte mit zwei Werten berücksichtigt: mit einem minimalen Bauteilgewicht von 70kg und einem maximalen Bauteilgewicht von 130kg.

Jedes Bauteil enthält mehrere Faserschichten, die in unterschiedlicher Reihenfolge und Fasermenge gewickelt sind. Dies bezeichnet man als Faseraufbau.

Im Idealfall liefert die computerbasierte Simulation Ansätze zur Optimierung der einzelnen Bauteile, sowie der Faserstruktur, um das Bauteilgewicht durch lokale Anpassungen zu reduzieren und gleichzeitig die Effizienz des Tragwerks zu erhöhen.

Zusätzlich werden maßstäbliche Modelle von Hand angefertigt, um den Wickelvorgang zu überprüfen. Die neuen Optionen für die Fasersyntax, die aus diesen Modelltests entstehen, werden dann erneut simuliert und in die konstruktiven Berechnungen einbezogen. So können sowohl der Anteil der Naturfasern optimiert als auch Schnittgrößen und Knickfaktoren reduziert werden, bevor Bauteile in Originalgröße robotisch gewickelt werden.

Die Entwurfsschleifen von der Gestaltungsintention bis hin zum Prototyping im Originalmaßstab dienen dazu, den Entwurf der Bauteilkomponenten zu verfeinern und durch die im globalen Modell ermittelten Entwurfslasten zu verifizieren.

Als Ergebnis dieses Evaluations- und Verifizierungsprozesses folgen die fünfzehn Bauteile des konzentrisch ausgerichteten Bauwerks dem gleichen statischen Prinzip (Abbildung 8 und 12).

An der Vorderseite des Bauteils bildet die Fasersyntax Bereiche zur Stützung, Stabilisierung und Aussteifung aus; die gekrümmte Form dieser Bereiche prägt das markante Erscheinungsbild des Pavillon-Innenraums. Auf der Vorderseite des Bauteils werden zudem Eckverstärkungen hinzugefügt, die die Bereiche entlang der oberen und unteren Verbindungsmittel zusätzlich aussteifen.

Die Rückseite des Bauteils besteht aus zwei Lagen von in einer Ebene liegenden Fachtragwerken und einer zusätzlichen Lage an Verstreben.

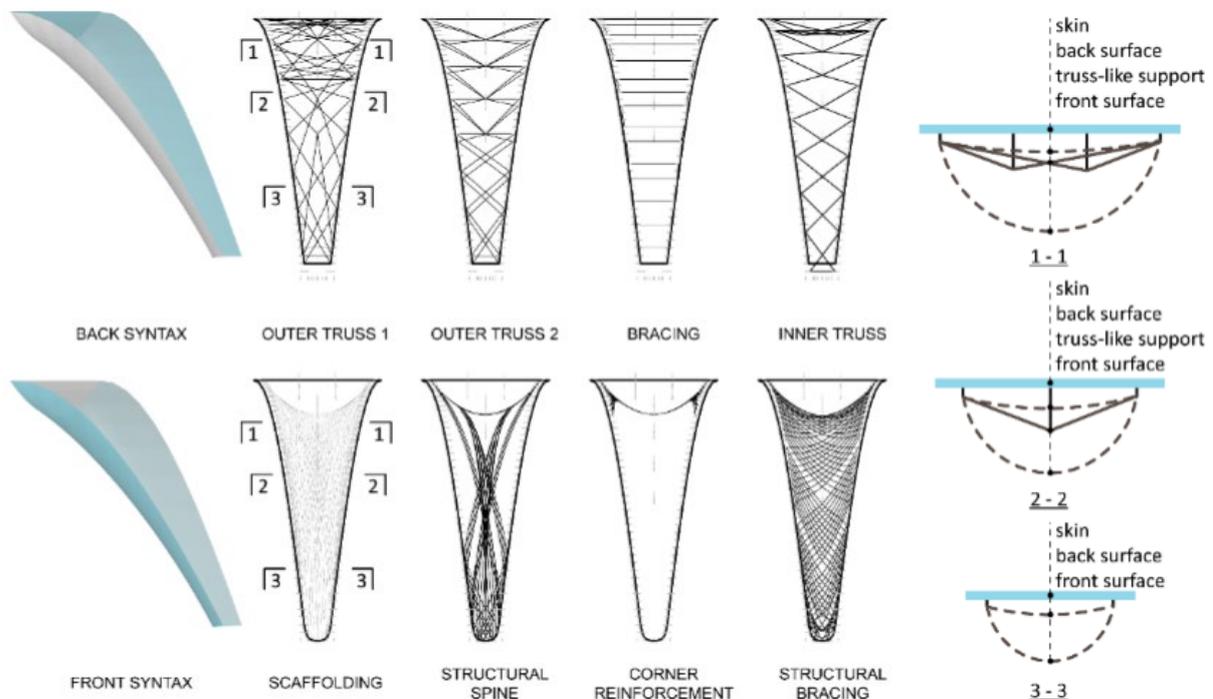


Abbildung 12: Finaler Entwurf der Fasersyntax des livMatS Pavillons, Rückseite (oben links), Vorderseite (unten links) und fachwerkartigen Auflagerungen (rechts)
© ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart

An der inneren Fachwerklage sind Verbindungsstifte angebracht (Abbildung 12), die zum einen als Wickelpunkte für die Rückseite des Bauelements dienen und auch als Anschlusspunkt, an dem später das Polycarbonatdach mit der Faserstruktur verbunden werden kann. Im oberen Bereich der Rückseite des Bauteils befinden sich außerdem zwei zusätzliche Innenstifte, die dafür sorgen, dass die maximale Spannweite der Polycarbonatplatten von 600mm nicht überschritten wird und es folglich auch zu keinem Durchhängen der Platten kommt.

AP 3: Prototypenentwicklung und Tests von tragenden Bauteilen

Vorgehen zur Untersuchung geeigneter Naturfaser-Verbundwerkstoffe

Um potentiell geeignete Naturfaser-Verbundwerkstoffe für großmaßstäbliche Anwendungen zu finden, wurden mehrere Materialversuche unternommen, die in Hinblick auf Material-Skalierbarkeit, Fertigungstauglichkeit und Dauerhaftigkeit entwickelt wurden. Zunächst sollen anhand von kleinmaßstäblichen Probekörpern Aussagen über die Eignung von Naturfasern, speziell Flachsfasern, im Kontext des kernlosen Wickelverfahrens getroffen werden. Des Weiteren erfolgten Tests mit schlaufenförmigen Probekörpern, die auf Druck und Zug belastet werden und über deren statische Eigenschaften Auskunft geben.

Anschließend erfolgte die Herstellung eines Prototyps im Originalmaßstab, welcher zur Bewertung der Fertigungsprozesse und der statischen Belastung diente. Obwohl die kleinmaßstäblichen Prüfkörper bereits recht genaue Versuchsergebnisse liefern, aus denen Annahmen über das Materialverhalten für ein größeres Bauteil abgeleitet werden können, ist es wichtig, weitere Belastungstests an Bauteilen im Originalmaßstab durchzuführen, um die Skalierbarkeit der kleinmaßstäblichen Versuche zu verifizieren. Abschließend wurden weitere Versuche auf Basis von Materialproben durchgeführt, um die Dauerhaftigkeit des Materials zu untersuchen.

Vergleich Naturfaser-Systeme mit konventionellen Systemen

Die sternförmigen Probekörper (Abbildung 13) spiegeln diese Faserinteraktion im kleinen Maßstab sehr genau wider und wurden daher zunächst eingesetzt, um die Verarbeitbarkeit des Materials zu testen und einen Überblick über das Strukturverhalten und die Faserinteraktion in Druckversuchen zu erhalten [GK19] [GGK22]. Zwei Materialsysteme, Flachsfaser zusammen mit biobasiertem und erdölbasiertem Harz, wurden anhand der sternförmigen Probekörper getestet und mit den Testergebnissen des BUGA-Faserpavillon [ZM23] [GGK22] verglichen, bei dem als Materialsystem Kohlefasern und erdölbasiertes Harz zum Einsatz kam.



Abbildung 13: Probekörper für Vorversuche zur Tragfähigkeit in verschiedenen Faser-/Harz-Kombinationen: Flachsfasern mit biobasiertem Epoxidharz (links), Flachsfasern mit erdölbasiertem Epoxidharz (drei Probekörper in der Mitte), Kohlenstofffasern mit erdölbasiertem Epoxidharz (rechts)

© ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart

Bei der Flachsfaser sank die allgemeine Tragfähigkeit auf ein Drittel der Versagenslast des sternförmigen Probekörpers aus Kohlenstofffasern (Abbildung 14). Sowohl das Knicken entlang des

Faserbündels als auch der Faserbruch innerhalb der Faserbündel konnten bei den Tests auf Druckbelastung beobachtet werden.

Im Vergleich zum Probekörper aus Kohlenfasern (Abbildung 14) sind Steifigkeit und Versagenskräfte der Flachsfasern sowohl in Kombination mit erdölbasiertem Epoxidharz als auch mit biobasiertem Harz etwa dreimal geringer. Untereinander, also zwischen dem erdölbasierten und dem biobasierten Harz, sind die Unterschiede in der Steifigkeit und den Versagenskräften bei etwa gleicher Fasermenge kaum vorhanden. Aufgrund der geringeren Steifigkeit versagten die Proben aus Flachsfasern durch Knicken, während die Proben aus Kohlenstofffasern durch Faserbruch versagten (Abbildung 14, Mitte).

Da jeder sternförmige Probekörper produktionsbedingt ein anderes Gewicht hat, werden die Versagenskräfte der Tests in Kräfte pro Kilogramm Material umgerechnet, um so die Energieintensität und das Treibhauspotenzial bewerten zu können. Diese Umrechnung Die Diagramme auf der rechten Seite von Abbildung 14 zeigen den Vergleich der Ökobilanz-Indizes, die für die anteilige strukturelle Kapazität der Kohlenfaser-Probe als Verbundwerkstoff berechnet wurden.

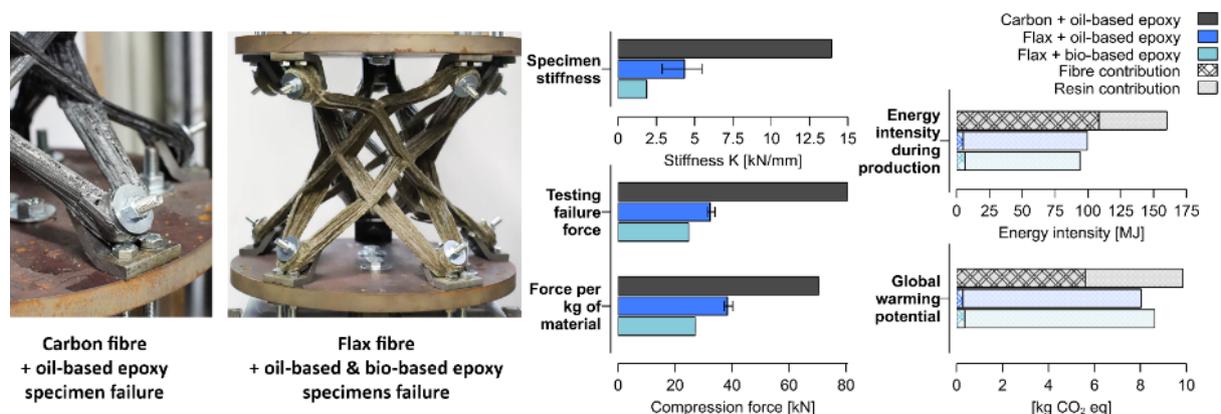


Abbildung 14: Kohlenstofffasern und Flachsfasern + Epoxidharz auf Erdölbasis und Epoxidharz auf Biobasis. Sternförmige Probekörper, die die Versagensarten, Steifigkeit, die Versagenskraft, die geschätzte Kraft pro kg Material, die Energieintensität bei der Herstellung und den Vergleich des globalen Erwärmungspotenzials auf der Grundlage der strukturellen Kapazität der Probekörper pro kg prüfen (Kohlenstoff + Epoxidharz auf Ölbasis = 1, Flachs + Epoxidharz auf Ölbasis = 1,8, Flachs + Epoxidharz auf Biobasis = 2,6) [GK22].

© ITKE Universität Stuttgart

Druck- und Zugversuche mit schlaufenförmigen Probekörpern

Für die Druck- und Zugversuche wurden zwei Arten der schlaufenförmigen Probekörper hergestellt. Für die Zugversuche wurden Schlaufen auf dem "einfachsten Wickelweg" hergestellt, in dem die Flachsfasern einen Loop an den jeweiligen Außenseiten der Anker entlang gewickelt wurden. Zur Positionssicherung der Fasern wurde eine einzelne, volle Schlaufe um die Anker gewickelt. Diese Probekörper wurden dann in einer Universal-Prüfmaschine nur auf Zug belastet (Abbildung 15).

Für die Druckversuche wurden die Proben wie in der vorherigen Variante zwischen den Ankern und zusätzlich um jeden Anker herum verwunden. Diese Vorversuche geben Aufschluss darüber, ob Systeme aus Flachsfasern und erdölbasiertem Harz grundsätzlich als Materialsystem für den livMatS Pavillon geeignet sind, oder ob bereits im kleinmaßstäblichen Bereich Materialversagen auftritt.

Bei den Zugversuchen traten Brüche in Bereichen erhöhter Axial- und Schubspannungen auf, während bei den Druckversuchen genau dort Brüche auftraten, wo tendenziell erhöhtes Knickverhalten zu erwarten war. Bei der Prüfung der auf Druck belasteten Probekörper wurde auf der Rückseite der

Verbindungen eine transversale Delaminierung beobachtet, bevor es zum Ausknicken entlang der Schlaufe kam. Dies lässt den Rückschluss zu, dass die Flachfasern bei der Herstellung der Schlaufen nicht genügend Harz aufnehmen konnten, so dass die durch das Harz erzeugten Faserverbindungen zwischen den einzelnen gewickelten Bahnen nicht ausreichten.



Abbildung 15: Versuchsordnung für die kleinmaßstäblichen Versuche (links). Schlaufenförmige Probekörper, die auf Zug beansprucht (rechts oben) oder auf Druck belastet werden (rechts unten)
© ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart

Großmaßstäbliche Testprototypen

Die Ergebnisse der Tests wurden in das digitale Entwurfs- und Simulationsmodell zurückgeführt, in dem die Zusammensetzung und Wickelfolge der Fasern kontinuierlich aktualisiert wird. Hierfür wurde im Rahmen einer Finite-Elemente-Analyse (FEM-Analyse) die Fasersyntax, sowie die statischen und geometrischen Randbedingungen (wie z.B. die Hüllkurvenbelastung) aktualisiert und überprüft.

Die maximale Druckkraft in der vereinfachten globalen Finiten-Elemente-Analyse wird unter dem Lastfall $E_d = 1.35DL + 1.5W5 + 0.75S2$ gefunden, wobei DL das berechnete Eigengewicht einschließlich des Faserbauteils, des Polycarbonatdachs und der Anschlüsse ist, W5 und S2 sind Wind- und Schneelasten, die sich zur ungünstigen Kombination addieren. Der Wert E_d beträgt 14 kN auf Druck für ein einzelnes Bauteil (F in Abbildung 16).

Als letzte Entwurfsschleife wurde ein Prototyp eines Bauteils in Originalgröße hergestellt und einer statischen Belastungsprüfung unterzogen. Diese Tests können aufgrund der Größe des Bauteils nicht an den Maschinen ausgeführt werden, die für die Prüfung der kleinmaßstäblichen Probekörper genutzt wurden. Ein Versuchsstand für die physischen Belastungstests musste daher individuell aufgebaut werden. Hierfür wurde das Naturfaserbauteil horizontal ausgerichtet, so dass an beiden

Bauteilenden über Kettenzüge die gleiche Zugkraft aufgebracht werden konnte. Diese Kräfte wurden von Kraftmesszellen überwacht, die mit den Kettenzügen verbunden waren. Die resultierende Kraft (F) wurde als Summe aus den beiden Lasteinleitungspunkten mit dem Bemessungswert der Einwirkung (E_d) verglichen, um den ungefähren Sicherheitsfaktor (γ) $F = \gamma * E_d$ folgender Gleichung zu berechnen. E_d ist jedoch nur ein Referenzwert, der von einer konservativen globalen Modellannahme stammt. Außerdem erzeugt die Lasteinleitung F zusätzliche Biegemomente im Bauteil, die zu einer anderen Kraftverteilung führen können.

Zur abschließenden Bewertung des erreichten Sicherheitsfaktors wurden nach Durchführung der Prüfung die Schnittgrößen der konstruktiven Test-FEM unter der erreichten Kraft F aus der Prüfung mit den Schnittgrößen desselben Faseraufbaus unter allen Lastkombinationen (unter Verwendung der vollständigen globalen FEM, Abbildung 16) mit folgender Gleichung verglichen: $N_x = \gamma * N_d$

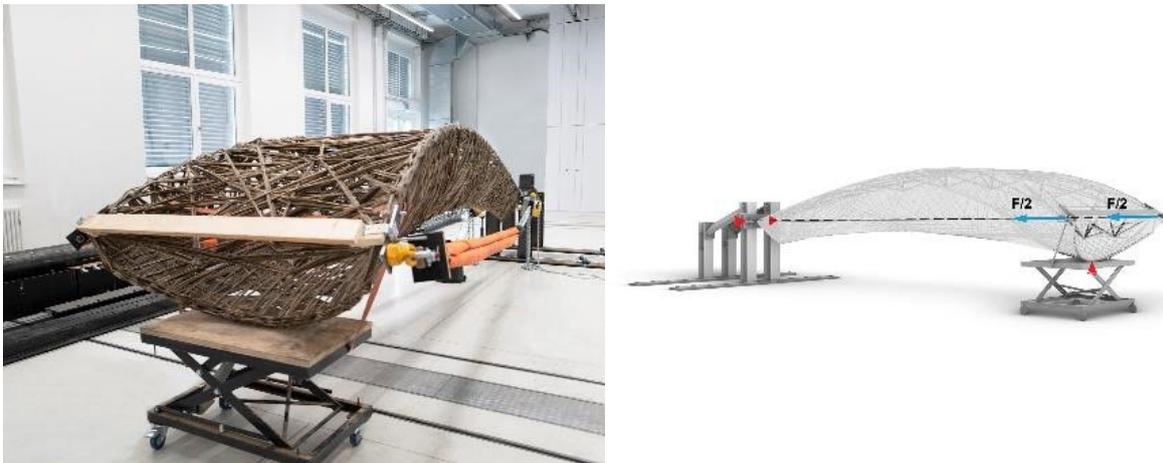


Abbildung 16: Versuchsaufbau des statischen Belastungstest mit Bauelement im Maßstab 1:1 (links), Kräfte- und Momentendiagramm des statischen Belastungstest, Prüfkraft [kN] als maximale Kompression aus der vereinfachten globalen FEM (rechts)
© ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart

AP 4: Wissenschaftliche Begleitung der Umsetzung des livMatS Pavillons

Die robotische Herstellung und Errichtung des livMatS Pavillons erfolgte in einer Kooperation zwischen der Universität Stuttgart und der Firma FibR GmbH Stuttgart. Durch die modulare Bauweise konnten die Bauteile reibungslos vor Ort montiert werden.

Bereits im frühen Planungsstadium der globalen Geometrie wurde berücksichtigt, dass die Fasermodule durch eine zusätzliche Gebäudehülle vor Umwelteinflüssen geschützt werden sollen.

Für die Dachhaut wurden lichtdurchlässige Polykarbonat-Platten gewählt, ein leichtes und beständiges Material, das zusätzlich den Vorteil bietet, dass es sich um einen biegbaren Werkstoff handelt und sich dadurch gut an die gekrümmte Oberfläche der Naturfaserstruktur anpassen ließ. Anfangs war geplant, die Dachhaut in gleichmäßigem Abstand zur Faserstruktur in mehrere Schindeln pro Faserbauteil zu unterteilen - diese Schindeln sollten sich dem Gefälle der Konstruktion folgend überlappen, sodass die Entwässerung kaskadenartig erfolgt.

Probleme, die sich in der Entwicklung dieses Konzepts ergeben haben, waren konstruktiver und bauphysikalischer Natur: Durch die punktuellen Auflager konnte sich das Polykarbonat mehr durchbiegen als erwartet. Kleinste Toleranzen in der Oberkante der Pins führten zu unerwünschten Biegungen in den Schindeln, die das Eindringen von Wasser begünstigten. Feuchtigkeit generell wäre

nicht weiter problematisch gewesen, Staunässe durch Tau- oder Regenwasser jedoch schon, z.B. auf den Oberkanten der innenliegenden Bauteile.

Die Dachhaut wurde dahingehend verändert, dass pro Faserbauteil eine durchgehende Polykarbonatplatte verbaut wurde.

Bei der robotischen Herstellung der Naturfaser-Bauteile wurden an jedem Wickelpunkt des Rahmens Hülsen angebracht, um die die Fasern gewickelt wurden. Diese Hülsen verbleiben normalerweise im Bauteil und können genutzt werden, um sowohl die Bauteile untereinander als auch mit der Dachhaut zu verbinden (über Verbindungsschienen an den Kanten der Naturfaserbauteile). Diese "Back"-Syntax dient als Teil des statischen Gesamtsystems zum einen der Lastübertragung zwischen Dachhaut und Tragstruktur, als auch der Aussteifung der Tragstruktur.

Die Schraubpunkte und Kantenstöße der Platten wurden nach Fertigstellung des Pavillons mit Silikonabdichtungen versiegelt, um die darunterliegenden Naturfaserbauteile vor eindringender Feuchtigkeit zu schützen.

Die Installation der Polykarbonatplatten lief reibungslos ab, jedoch wurde bauseits ersichtlich, dass die innenliegenden Verbindungspunkte für die Montage tendenziell eher schwer zu justieren sind, kleinste Abweichungen im Abstand sorgen für zusätzliche Durchbiegungen der Polykarbonatplatten. Die Abweichungen zwischen den Platten, den Stahlbauteilen und der Faserstruktur hielt sich jedoch im Rahmen üblicher geringfügiger Bautoleranzen.

AP 5. Monitoring des Demonstrators

Der Monitoring-Plan sah vor, dass der livMatS Pavillon nach seiner Fertigstellung in regelmäßigen Abständen inspiziert und die Verformung der Gesamtstruktur über einen Zeitraum von 18 Monaten mit Hilfe mehrerer 3D-Scans kontrolliert wurde. Zusätzlich wurde die tragende Struktur des Pavillons zwei Mal im Jahr visuell auf Brüche, Risse, Faserablösungen und Verformungen untersucht.

Der livMatS Pavillon wurde im Frühjahr 2021, direkt nach dem Aufbau der tragenden Faserstruktur, aber noch vor der Installation der Polykarbonatplatten der Dachhaut 3D gescannt. Dieser erste Scan ermöglichte die präzise Anpassung der CNC-gefrästen Polykarbonatplatten des Pavillondachs an die Realgeometrie der fertig installierten Bauteilkomponenten. Nach Fertigstellung des Pavillons wurde er erneut, mit Dachhaut, gescannt.

Durch einen weiteren Scan nach 18 Monaten konnten im direkten Vergleich Veränderungen der Gesamtgeometrie, wie z.B. Setzung der Gesamtkonstruktion, Verschiebungen oder Bewegungen der einzelnen Naturfaserbauteile oder Anzeichen von Verformung oder Materialversagen durch Verschleiß, Alterungseffekte oder Umwelteinflüsse dokumentiert werden. Zu beiden Zeitpunkten wurde sowohl die Außenseite des Pavillons als auch der Untersicht des Pavillons, d.h. die tragende Naturfaserstruktur ohne Polykarbonatdach, gescannt.

Der direkte Vergleich des 3D Scans unmittelbar nach Fertigstellung des Pavillons im Frühjahr 2021 mit dem 3D Scan nach 18 Monaten im Herbst 2022 ist in Abbildungen 17 und 18 dargestellt.

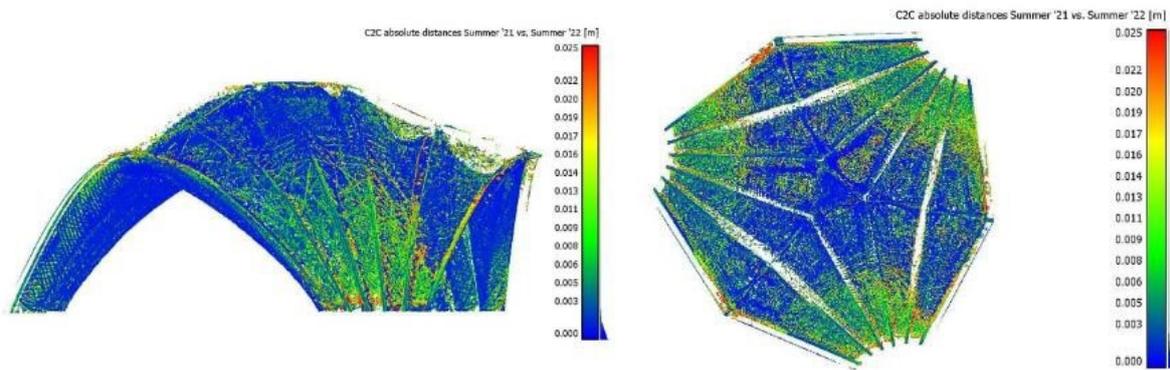


Abbildung 17: Auswertung der Deformation der Außenseite des livMatS Pavillons (inklusive Polycarbonatdach) anhand zwei sich überlagernder C2C-Scans, aufgenommen direkt nach Fertigstellung des Pavillons und nach 18 Monaten
© IIGS Universität Stuttgart

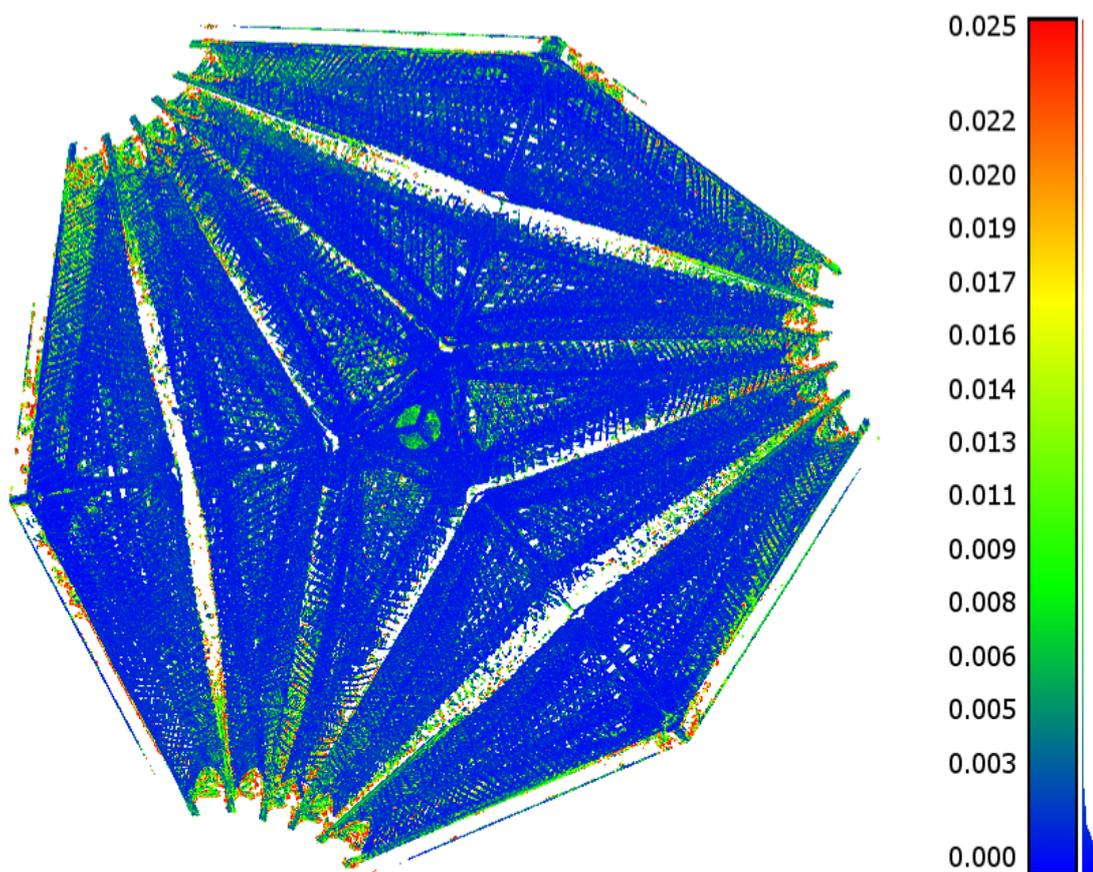


Abbildung 18: Auswertung der Deformation der Innenseite des livMatS Pavillons anhand zwei sich überlagernder C2C-Scans, aufgenommen direkt nach Fertigstellung des Pavillons und nach 18 Monaten
© IIGS Universität Stuttgart

Im Vergleich der Scans der Außenseite (Abbildung 17) sind im unteren Bereich des Fundamentabschlusses sowohl in der Seiten- als auch in der Draufsicht Abweichungen im Zentimeterbereich zu erkennen. Diese Diskrepanz ergibt sich aus der Reflexion der Polycarbonat-Hülle, die den Laserstrahl des Scanners beim Erfassen der Oberfläche an den verschiedenen Scantagen vermutlich unterschiedlich gebrochen hat. Im Vergleich der Scans der Untersicht des Pavillons (Abbildung 18), sind ausschließlich Deformationen unter 3mm festzustellen. Zwischen der Fertigstellung des Pavillons und dem Scan 18 Monate später konnten daher nahezu keine relevanten Deformationen oder Veränderungen festgestellt werden.

Messung der Umweltfaktoren

Um nähere Aussagen über den Einfluss der Dauerhaftigkeit und statischen Eigenschaften der Naturfaser-Bauteile unter Umwelteinflüssen treffen zu können, wurden über einen Zeitraum von 12 Monaten im Pavillon folgende Umweltfaktoren gemessen und sowohl nach 6 als auch nach 12 Monaten ausgewertet:

- Materialfeuchte und Gewicht
- Lokale Temperatur innerhalb des Pavillons
- UV-Strahlung (UV-Index)

Zum Langzeit-Monitoring der Materialeigenschaften unter realen Umweltbedingungen wurden 240 robotisch gefertigte Flachsfaser-Probekörper in verschiedenen Harzkombinationen hergestellt. 160 davon wurden für die Langzeittests am Pavillon angebracht und den dort einwirkenden natürlichen Umwelteinflüssen ausgesetzt. Die Probekörper-Testreihen wurden nach jeweils 6 und 12 Monaten entnommen und auf Veränderungen der mechanischen Eigenschaften durch die Umwelteinflüsse untersucht. Die restlichen 80 Probekörper wurden schon direkt nach der Herstellung als Kontroll-Messgruppe getestet. Durch den Vergleich der am Pavillon angebrachten Testgruppen mit der Kontroll-Messgruppe konnten später Rückschlüsse auf das Materialverhalten und die Beständigkeit bei natürlicher Witterung der den Umweltbedingungen ausgesetzten Probekörper gezogen werden.

Am livMatS Pavillon angebrachte Sensoren erfassten während dieser Zeit die auf den Pavillon als Prüfstand einwirkenden Umweltfaktoren wie Feuchtigkeit und Temperatur. Die Informationen über lokale Feuchte, Sonneneintrag, Regenschauerstunden, tägliche Sonnenstunden, die örtliche maximale Temperatur, sowie Angaben zum örtlichen UV-Index wurden mithilfe der von WeatherOnline.com, sowie Weather.Uni-Freiburg.de zur Verfügung gestellten Daten erfasst. Die Mess-Stationen wurden nach ihrer Nähe zum livMatS Pavillon ausgesucht (< 2,5 km), um so möglichst präzise lokale Daten bewerten zu können.

Die bei den Materialtests erhobenen Daten konnten anschließend mit den Sensorinformationen am Pavillon und den lokal gemessenen UV-Werten verglichen werden.

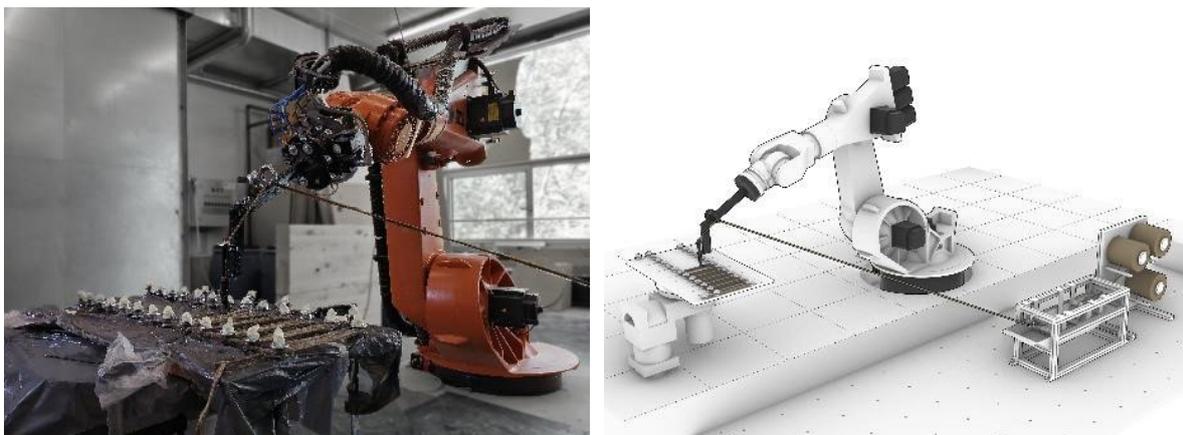


Abbildung 19: Robotisches Setup für die Fertigung der Probekörper
© ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart

Die 240 Probekörper wurden wie die ersten Probekörper in AP3 zur Bestimmung der ersten Zug- und Druckversuche als Schlaufen unter konstanter Zugspannung mit dem 6-achsigen Industrieroboter auf

einem Wickelrahmen gefertigt. Das Fertigungssetup bestand aus einer Spulenhaltung, an der mehrere Naturfaserspulen zur Abwicklung angebracht wurden und einem Harzbecken mit mehreren Umlenkungen, um einen möglichst konstanten Tränkungsgrad der Naturfasern mit Harz zu ermöglichen. Für jeden schlaufenförmigen Probekörper wurden die Fasern mit dem maßgefertigten Endeffektor des 6-achsigen Industrieroboters jeweils 7-mal um die zwei Ankerpunkte der Schlaufe abgelegt. Da durch die oben erwähnte Spulenhaltung in jedem Wickelvorgang Fasern von insgesamt 3 Faserspulen parallel abgelegt werden konnten, besteht jeder Probekörper aus 21 applizierten Schlaufen.

Der Wickelrahmen, der für die Herstellung der Proben entworfen wurde, bestand aus einer Platte mit gleichmäßiger Lochung, an der insgesamt 24 Gewindestangen angebracht waren, so dass in einem Vorgang 12 Probekörper hergestellt werden konnten. Auf die Gewindestangen wurden Hülsen angebracht, um die die Naturfasern gewickelt wurden. Nach Aushärtung der Faser-Probekörper konnten diese mit den Hülsen vom Wickelrahmen entfernt werden, der Wickelrahmen konnte dadurch für die Herstellung der nächsten Probekörper wiederverwendet werden.

Gruppe	Matrix Name	Probekörper Stückzahl [gesamt]	Messgruppe	Probekörper Stückzahl [gruppiert]	Exposition Umwelteinflüsse [Monate]	Statische Prüfung (Druck (C) / Zug (T))	Materialfeuchte-Messungen
1.0 Epoxidharz-System [Referenzsystem ¹]	Hexion Epikote	60	1	20	0	X	
			2	20	6	X	X
			3	20	12	X	X
2.1 Bio-basiertes Harzsystem	Entropy	60	1	20	0	X	
			2	20	6	X	X
			3	20	12	X	X
2.2 Bio-basiertes Harzsystem	Resoltech	60	1	20	0	X	
			2	20	6	X	X
			3	20	12	X	X
2.3 Bio-basiertes Harzsystem	Greenpoxy	60	1	20	0	X	
			2	20	6	X	X
			3	20	12	X	X

¹: Begriff bezieht sich auf den Vergleich zu bio-basierten Harzsystemen.

Tabelle 3: Probekörper-Matrix – für die Messgruppen wurden Prüfkörper aus drei biobasierten Harzsysteme und einen erdölbasierten Epoxid-Harzsystem als Referenzsystem hergestellt und unterschiedlich lange (6 und 12 Monate) den Umweltbedingungen ausgesetzt, die während dieser Zeitspanne am livMatS Pavillon auftraten.

Für die Versuchsreihe wurden insgesamt vier Harzsysteme verwendet, darunter drei bio-basierte sowie als Referenzsystem das erdölbasierte Epoxidharz, das auch für die Herstellung des livMatS Pavillons verwendet wurde. Für jedes der vier Harzsysteme wurden 60 Probekörper hergestellt, die in drei Messgruppen (0, 6 und 12 Monate) zu je 20 Probekörper unterteilt wurden.

Die erste Messgruppe wurde als Kontroll-Messgruppe einige Tage nach der robotischen Herstellung, (d.h. ohne Einwirkung von Umwelteinflüssen) in einer Universal-Prüfmaschine im Material-Prüflabor der Universität Stuttgart auf ihre statischen Eigenschaften hin untersucht.

Parallel dazu wurden die Proben gewogen. Dieses Ausgangsgewicht konnte dann mit den Proben verglichen werden, die im Pavillon angebracht wurden. Sind diese schwerer als die Probekörper der Kontroll-Messgruppe, bedeutet dies, dass die Probekörper durch die Umwelteinflüsse beschädigt wurden und Wasser eindringen konnte.

Die Probekörper wurden entsprechend dem Testzeitraum und ihrem Materialsystem sortiert und gebündelt und vor Ort gleichmäßig entlang der Zugangsbögen des Pavillons im Bereich zwischen der Faserstruktur und der Dachhaut des Pavillons aus 10mm starken, transparenten Polykarbonat-Platten angebracht. Die Polykarbonatplatten sind mit einem UV-Schutz versehen, der jedoch für die Dauerhaftigkeit des Polykarbonatgemisches bemessen ist und keinen zusätzlichen UV-Schutz für darunterliegende Bauteile bietet. Der Lichttransmissionsgrad beträgt 82%, was dem Transmissionsgrad von Isolierglas (ca. 82%) entspricht und lediglich geringfügig UVA-C Strahlungen absorbiert.



Abbildung 20: Einzelner Probekörper (links) und Specimen-Bündel (rechts). 5 Probekörper derselben Baureihe wurden jeweils zu einem Bündel zusammengefasst, hier Hexion Epikote (EPIK), nach 6 Monaten aus dem Prüfstand entnommen und in der Prüfmaschine einzeln auf Zugbelastung getestet (TB = Tension – Batch B)

© ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart

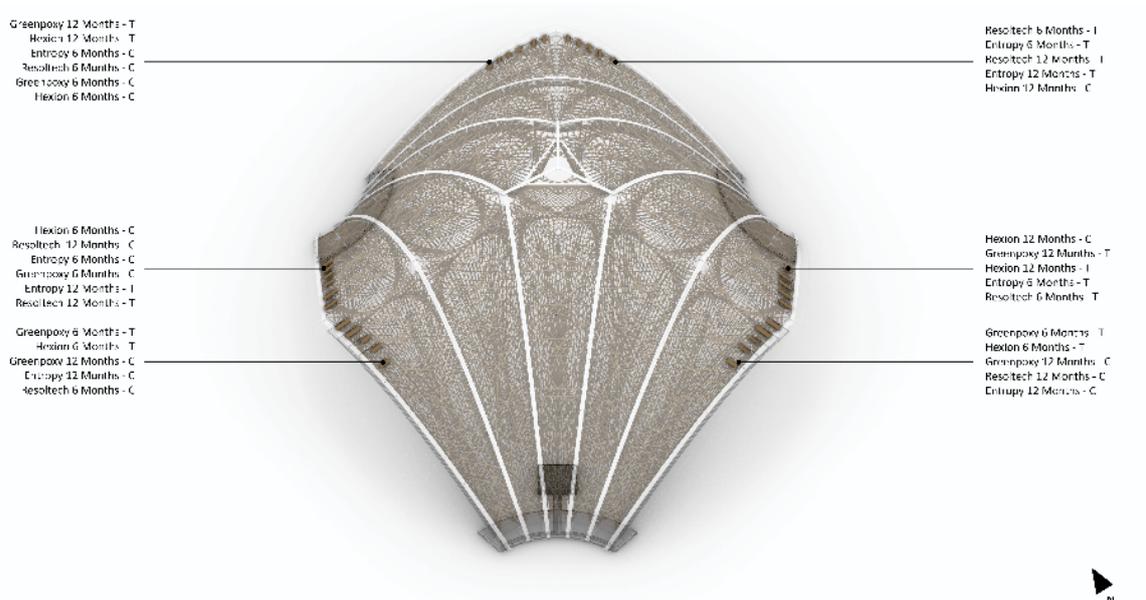


Abbildung 21: Position der Probekörper-Bündel am livMatS Pavillon in Freiburg im Breisgau

© ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart

Die Lage über den Zugangsbögen, zwischen Dachhaut und Tragstruktur, bot wesentliche Vorteile für den Messvorgang: Zum einen schützte das Polykarbonat-Dach die Mess-Sensorik und die Probekörper

vor Nässe, zum anderen ermöglichte die erhöhte Lage eine für die UV-Einwirkungen wichtige verschattungsarme Messposition der Probekörper. Die Lage an der Kante der Zugangsbögen sorgte zudem für ausreichende Belüftung, um einen Hitzestau und dadurch künstliche Temperaturspitzen zu vermeiden. Es wurde außerdem darauf geachtet, dass die erhöhte Position der Probekörper nur durch Steighilfen erreicht werden konnte, um Beschädigungen, Vandalismus und zusätzliche Beeinflussungen der Messkörper vermeiden zu können.



Abbildung 22: Die Probekörper-Bündel wurden unter der Dachkonstruktion des livMatS Pavillons für die Dauer der Messungen fixiert
© ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart

Für die Datenerfassung wurde ein speziell für die Messung der Bauteilfeuchte konzipiertes vollautomatisiertes Setup verwendet, das neben der Feuchtigkeit auch die Umgebungstemperatur erfasste. Die Bauteilfeuchte wurde durch den elektrischen Widerstand bzw. die Leitfähigkeit des Naturfaser-Materialsystems erfasst: Es wurden spezifische Koaxialkabel verwendet, deren Enden mit einer elektrisch leitfähigen Spule auf gegenüberliegenden Seiten eines Probekörpers befestigt wurden. Dabei wurde eine geringe elektrische Spannung erzeugt und der Widerstand innerhalb des Bauteils gemessen. Es handelt sich um ein Verfahren, das in der Materialprüfung, insbesondere beim Messen von Feuchte in Holz breite Anwendung findet und ohne weitere Modifikationen auch für Messungen in Faserbauteilen genutzt werden kann.

Sämtliche Messinstrumente, sowie die Computerelektronik wurden wettergeschützt innerhalb des Versuchsstands platziert. Die stündlich erzeugten Messwerte wurden im Datenlogger aufgezeichnet und einmal täglich über ein DFÜ-System mobil an einen extra hierfür eingerichteten Mailclient-Server gesendet, auf den die am Projekt beteiligten Forschungsinstitute während der Projektlaufzeit Zugriff hatten.

Das Mess-Setup umfasste acht Feuchtigkeits-Sensoren, die an Probekörperbündeln oberhalb der Südost- und Südwestzugänge des Pavillons angebracht wurden. Die Sensoren waren mit Probekörpern jedes Harzsystems und einem Temperatursensor verbunden, der die Umgebungstemperatur innerhalb der Pavillonstruktur gemessen hat.

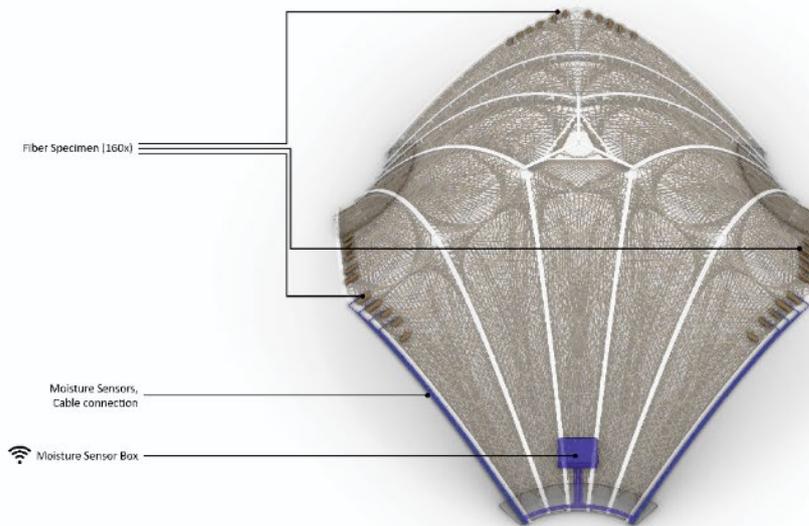


Abbildung 23: Position der Messgeräte und Probekörper am livMatS Pavillon in Freiburg im Breisgau
 © ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart

Monitoring Ergebnisse: Materialfeuchte und Gewicht

Die Materialfeuchte der vor Ort platzierten Probekörper wurde mit den Monitoring-Geräten zwischen dem 26. Januar 2022 und dem 31. Juli 2022 erfasst. Obwohl die Fasern der Probekörper durch den robotischen Fertigungsverfahren mit den Harzsystemen benetzt sind, kann es jedoch vorkommen, dass an manchen Stellen der Probekörper die darunterliegenden Fasern nicht vollständig bedeckt sind und so Feuchtigkeit eindringen kann. Daher wurde das Eigengewicht der einzelnen Probekörper unmittelbar nach Entnahme gemessen und mit dem Gewicht direkt nach ihrer Herstellung verglichen, um so Rückschlüsse darüber ziehen zu können, wie viel Feuchtigkeit während des Messzeitraums in die Fasern eindringen konnte. Die Probekörperbündel waren über den gesamten Messzeitraum im Durchschnitt schwerer geworden.

Bei den Probekörperbündeln aus der 6-Monats-Serie wurde ein durchschnittlicher Zugewinn an Masse von ca. 4,4g festgestellt, bei der 12-Monats-Serie betrug die Gewichtszunahme hingegen nur ca. 1,18g. Ein Indiz für diese unterschiedlichen Werte könnte sein, dass die Probenentnahme nach 6 Monaten im Winter bei hoher Umgebungs-Luftfeuchtigkeit erfolgt ist. Im Gegensatz dazu steht die Probenentnahme nach 12 Monaten – hier wurden die Proben unter niedriger, lokaler Luftfeuchtigkeit entnommen.

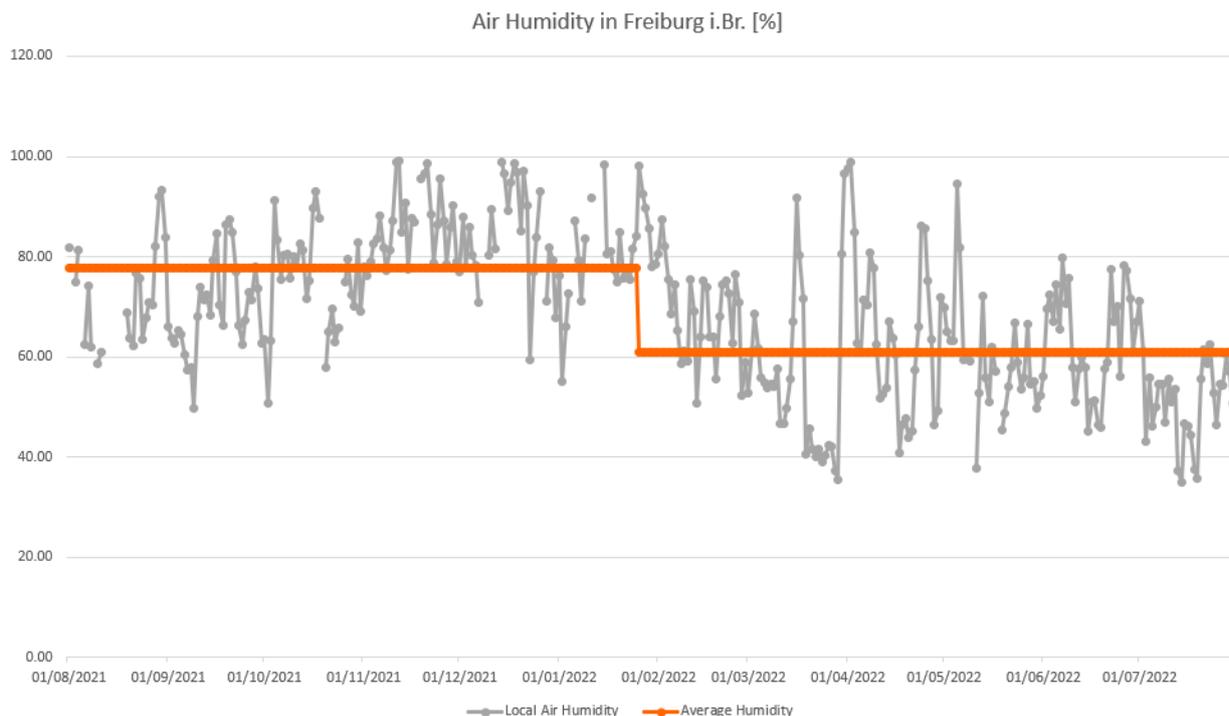


Abbildung 24: Lokale Luftfeuchtigkeit [in %] (grau) in Freiburg im Breisgau, Messzeitraum: 01.08.21 - 31.07.22, durchschnittliche Luftfeuchtigkeit aufgeteilt in zwei Messperioden, 01.08.21-25.01.22 und 26.01.22-31.07.22 (orange)
© ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart

Betrachtet man die Ergebnisse im Zusammenhang mit den über den Messzeitraum aufgezeichneten Luftfeuchtigkeitswerten, wird deutlich, dass insbesondere in der ersten Messperiode von August 2021 bis Januar 2022 (6-Monats-Serie) ein erhöhter Luftfeuchtigkeitswert zu verzeichnen war - der durchschnittliche Feuchtigkeitswert in diesem Messzeitraum betrug 78%. Im zweiten Messzeitraum von Februar bis Juli 2022 (12-Monats-Serie) hingegen betrug der Durchschnittswert nur 61%.

Sowohl die Luftfeuchtigkeit und die höheren Lufttemperaturen im ersten Messzeitraum als auch ein höherer UV-Index mit gleichzeitig niedrigerer Luftfeuchtigkeit im zweiten Messzeitraum könnten als Faktoren dienen, welche die unterschiedlichen Veränderungen des Eigengewichts der Probekörper bewirken. Im Verlauf der gesamten 12 Monate ließen sich außerdem Mess-Spitzen des UV-Index über 6 (= hoch) vor allem in den Sommermonaten während des zweiten Messzeitraums (Juni, Juli und August) beobachten. Während die 6-Monats-Serie in deutlich feuchteren Umweltbedingungen entnommen worden, konnte die 12-Monats-Serie in der darauffolgenden trockeneren Phase wieder Feuchtigkeit abgeben.



Abbildung 25: Lokaler max. UV-Index in Freiburg im Breisgau, Messzeitraum: 01.08.21 - 31.07.22, Interpolierte Daten basierend auf UVI-Messwerten von WeatherOnline (links). Temperatur-Messwerte im livMatS Pavillon (blau), regionale Wetterstation-Werte (orange), durchschnittliche lokale Lufttemperatur (grau) (rechts)
© ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart

Vergleich biobasierte und erdölbasierte Harzsysteme

Die verwendeten biobasierten Harzsysteme weisen einen gewissen Prozentsatz an molekularen Bestandteilen pflanzlichen Ursprungs auf. Ein vollständig bio-basiertes und damit recyclefähiges Harzsystem ist derzeit nicht auf dem Markt erhältlich. Für die Testreihen wurden Harzsysteme mit unterschiedlich hohen pflanzlichen Bestandteilen von 21% (Entropy), 33% (Resoltech) und 51% (Greenpoxy) untersucht.

Wie bereits erwähnt wurde als Referenz zu den biobasierten Harzen das erdölbasierte Harz aus einem herkömmlichen Epoxidharzgemisch (Hexion Epikote) betrachtet, welches bereits bei den bisherigen Faserverbund-Projekten wie dem Faserpavillon der Bundesgartenschau 2019 in Heilbronn oder Maison Fibre 2021 in Venedig erfolgreich verwendet wurde.

Ein Vergleich der statischen Eigenschaften der biobasierten Systeme mit dem Referenzsystem sollte die Unterschiede der Harze aufzeigen und untersuchen, ob die biobasierten Harze als nachhaltiger Ersatz der erdölbasierten Harze für künftige Anwendungen im Faserverbundbau geeignet sind.

Gruppe	Matrix Name	Bio-basiert [%]	Harz	Härtemittel	Mixing Ratio	Topfzeit ¹ [min]	Harz-Dichte ² [g/cm ³]	Härtemittel-Dichte ² [g/cm ³]	Probekörper Stückzahl
1.0 Epoxidharz-System [Referenzsystem ¹]	Hexion Epikote	0	LR 135	LH 137+287	100:23:12	240	1.15	0.96:0.945	60
2.1 Bio-basiertes Harzsystem	Entropy	21	CLR	CLS	2:1	40	1.09	1.09	60
2.2 Bio-basiertes Harzsystem	Resoltech	33	180 ECO	1804 ECO	100:32	293	1.1	0.94	60
2.3 Bio-basiertes Harzsystem	Greenpoxy	51	56	Sicomín SD 7561	100:45	45	1.198	0.971	60

¹: Begriff bezieht sich auf den Vergleich zu bio-basierten Harzsystemen. ²: Werte gemessen bei 20°C -25°C

Tabelle 4: Mechanische Eigenschaften der Öl- und bio-basierten Epoxidharze, entnommen aus den Produktdatenblättern

Für die Untersuchung der biobasierten Harzsysteme war noch ein weiteres Kriterium von Bedeutung: die Verarbeitbarkeit des Materialsystems im Kontext robotischer Fertigung. Für die Verarbeitung von Harzsystemen in einem automatisierten Fertigungsprozess ist es wichtig zu wissen, wie lange das Materialgemisch verarbeitbar bleibt. Ein wichtiger Indikator hierfür ist die Topfzeit sowie die Viskosität bzw. das Mischverhältnis zwischen Harz und Härtemittel. In Hinblick auf die statischen Eigenschaften sind unter anderem Angaben über die Harz- und Härtemitteldichte relevant.

Test-Ergebnisse der Materialversuche

Die Prüfungen wurden mit einer Zwick Roell - Z100 Maschine durchgeführt, die eine maximale Zug- und Druckkraft von bis zu 100kN erzeugen kann. Die Probekörper wurden mit einer Maschinen-Geschwindigkeit von 2mm/min geprüft.



Abbildung 26: Testprobekörper für Druckbeanspruchung (links), Testprobekörper für Zugbeanspruchung (Mitte), Prüfaufbau auf Zwick Roel Z100 (rechts)
© ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart

Die Messung der Gesamtsteifigkeit in den Prüfungsergebnissen wird durch die K-Steifigkeit (angegeben in N/mm) quantifiziert. Die Anwendung eines einheitlichen Young-Moduls ist für die genaue Charakterisierung des kernlosen, fasergewickelten Materialsystems aufgrund der Ungleichmäßigkeit der Querschnittsfläche entlang der Proben ungeeignet. In ähnlicher Weise betrifft dies auch die Bewertung der Materialfestigkeit durch eine maximale Kraft, die als "Maximalkraft" (angegeben in kN) bezeichnet wird. Die Varianz der K-Steifigkeit und der Maximalkraft im Lauf der Zeit wird sowohl in Zug- als auch in Druckversuchen untersucht, um ihre Entwicklung zu bewerten.

In Anlehnung an die Prüfnormen wurden für jede Prüfcharge insgesamt 10 Schlaufen-Probekörper hergestellt. Aufgrund der lokalen Distribution der Probekörper auf dem Wickelrahmen erhielten jedoch zwei Probekörper aus jeder Prüfcharge versehentlich eine zusätzliche halbe Schlaufe Material, so dass diese für die Ergebnisanalyse nicht herangezogen wurden. Daher wurden die Daten pro Prüfcharge für die weiteren Analysen auf 8 Probekörper korrigiert.

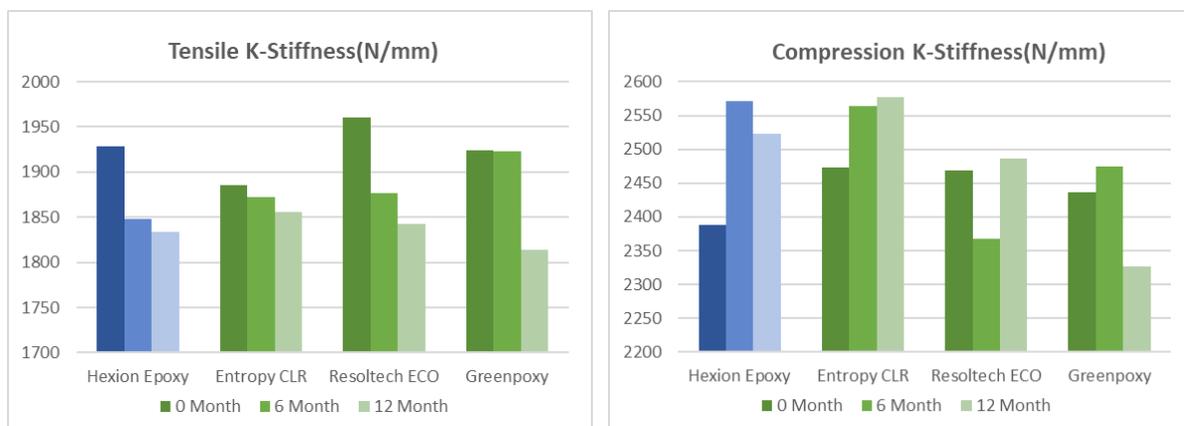


Abbildung 27: Entwicklung der Zug- und Druck-Steifigkeit im Verlauf der Messzeit
© ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart

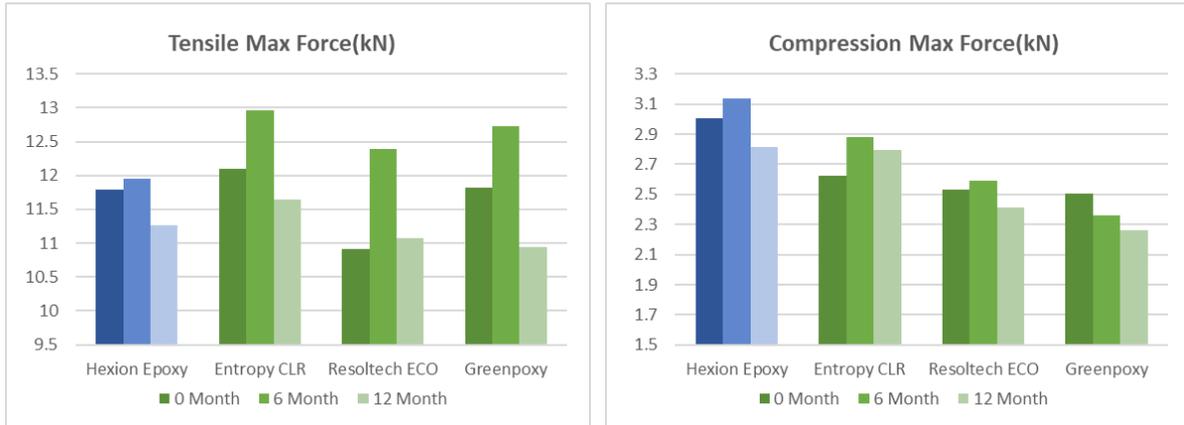


Abbildung 28: Entwicklung der maximal einwirkenden Zug- und Druckkräfte im Verlauf der Messzeit
© ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart

Bei der Mehrzahl der Proben, die auf Zugbelastung getestet wurden, tritt der Bruch der Fasern an den Verbindungsstellen auf, was in erster Linie auf eine ausgeprägte Spannungskonzentration infolge der Verringerung des Bündelquerschnitts zurückzuführen ist. Demgegenüber wird das Versagen auf Druckbelastung in erster Linie durch Delaminierung an den Außenseiten des Probekörpers bestimmt.

Die Analyse der sich verändernden Zugsteifigkeit ergab einen stetigen Rückgang im Laufe der Zeit. Von den vier untersuchten Matrizentypen wiesen Resoltech und Greenpoxy (51% biobasiert) den stärksten Rückgang auf, nämlich etwa 6% im Laufe eines Jahres. Im Gegensatz dazu zeigte die Steifigkeit von Proben mit Entropy (21% biobasiert) eine geringere Abnahme von lediglich 2%.



Abbildung 29: Typische Versagensart bei Zugbelastung (Greenpoxy, 6 Monate, links) und Delaminierung des auf Druck beanspruchten Probekörpers an der Hülse (Hexion Epikur, 12 Monate, rechts)
© ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart

Maximale Zug- und Druckkraft-Entwicklung

Die Tests zur maximalen Zugkraft, die auf die Probekörper ausgeübt werden kann, dienen dazu, Prognosen eines Leistungsabfalls der Bauteile über einen gewissen Zeitraum geben zu können - in diesem untersuchten Fall ließen sich allerdings keine eindeutigen Ergebnisse erkennen. Es fiel auf, dass die getesteten Probekörper alle nach 6 Monaten höhere Zugkräfte aufnehmen konnten als in den

Vergleichsproben nach 0 bzw. 12 Monaten. Die Ergebnisse der 12-monatigen Probekörper schwankten wiederum im Vergleich zu den Probekörpern, die nach 0 Monaten getestet wurden.

Umgekehrt zeigte die maximale Druckkraft bei den Matrizen Hexion Epikote (erdöbasiert), Resoltech (33% biobasiert) und Greenpoxy (51% biobasiert) in den getesteten Prüfkörpern (0, 6, bzw. 12 Monate) einen abnehmenden Trend, was zu einem durchschnittlichen Druckfestigkeitsverlust von etwa 6% führte. Entropy (21% biobasiert) zeigte jedoch einen anomalen Anstieg von 6% innerhalb des 12-monatigen Testzeitraums.

Es wird vermutet, dass dieses unerwartete Verhalten auf Schwankungen im Faser-Volumen-Verhältnis während des Herstellungsprozesses zurückzuführen ist. Um diese Hypothese zu bestätigen sind jedoch weitere Tests erforderlich.

Auswertung des Faser-Volumenverhältnis (FVR)

Die Schlaufen-Probekörper sind grundsätzlich in Bezug auf ihr Faservolumen, bzw. Ihren Tränkungsgrad miteinander vergleichbar, da die Produktionsschwankungen lediglich moderat ausfielen: der Durchschnittswert des Faser-Volumenverhältnisses (Fibre-Volume-Ratio, FVR) liegt bei 28-36%.

Bei den Schlaufen-Probekörpern, die auf Druckbelastung getestet wurden, liegt die durchschnittliche FVR (0-12 Monate) bei Hexion Epikote zwischen 29-31%, bei Entropy zwischen 28-32%, bei Resoltech zwischen 29-33% und bei Greenpoxy zwischen 32-33%.

Bei den auf Zugkräfte belasteten Probekörpern liegt die durchschnittliche FVR (0-12 Monate) bei Hexion Epikote zwischen 34-35%, bei Entropy zwischen 32-33%, bei Resoltech zwischen 29-30% und bei Greenpoxy zwischen 34-36%.

Visuelle Inspektion

Der livMatS Pavillon und die dort platzierten Probekörper wurden alle sechs Monate eingehend visuell auf mögliche Beschädigungen oder Materialveränderungen untersucht. Insgesamt fanden drei Besichtigungstermine statt, im September 2021, im Februar 2022, sowie im August 2022.

Am ersten Besichtigungstermin im September 2021 wurden nach eingehender Prüfung keinerlei Schäden in der Faserstruktur und der Dachkonstruktion festgestellt. Der livMatS Pavillon sowie die Probekörper waren auch beim nächsten Besuch, nach der ersten Kälteperiode seit dem Aufbau, weiterhin intakt und wiesen keine sichtbaren Beschädigungen auf.



Abbildung 30: livMatS Pavillon bei Besichtigung im September 2021, keine Delaminierung der Schalenhaut, intakte Faserstruktur
© ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart



Abbildung 31: livMatS Pavillon bei Besichtigung im Februar 2022, keine Delaminierung der Schalenhaut, intakte Faserstruktur
© ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart

Auch im August 2022 wurden keine Schäden an der Faserstruktur oder an der Polycarbonat-Dachkonstruktion festgestellt. Die zu erwartenden minimalen Verformungen entlang der Stoßfugen der Polycarbonatplatten waren im Toleranzbereich und blieben bisher intakt. Die gummierten Unterlegscheiben der Verbindungsmittel an der Dachkonstruktion dagegen wiesen zu diesem Zeitpunkt erste Abnutzungsspuren und partielle Risse am äußeren Rand auf, waren jedoch nicht zerstört, sodass die Abdichtung der Konstruktion weiterhin als intakt betrachtet werden kann. Die Faserstruktur war intakt und ohne visuelle Schäden.



Abbildung 32: livMatS Pavillon bei Besichtigung im August 2022, keine Delaminierung der Schalenhaut, intakte Faserstruktur, unbeschädigte Probekörper
© ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart



Abbildung 33: Beschädigung der gummierten Unterlegscheiben, August 2022
© ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart

Auch nach Rücksprache mit der Gärtnerischen Leitung des botanischen Gartens der Universität Freiburg konnten keine undichten Stellen der Dachkonstruktion oder Schäden in der Struktur bei deren ganzjähriger Beobachtung festgestellt werden. Die Probekörper waren bei Entnahme intakt und unbeschädigt.

Im Zuge einer visuellen Überprüfung der Bauteile wurde ersichtlich, dass die Probekörper an den am stärksten exponiertesten Stellen sichtbar durch die Sonneneinstrahlung verblasst sind. Dabei sind

insbesondere die Bauteile entlang der Südseite des Pavillons betroffen. Insgesamt betrug die solare Exposition der Bauteile während des gesamten Messzeitraums von 12 Monaten ca. 2027 Stunden.



Abbildung 34: Ausbleichen der Faserprobekörper nach 0, 6 und 12 Monaten am Beispiel der Probekörperreihe Greenpoxy Tension

© ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart

Dieses "Ausbleichen" der Flachsfasern durch die Sonneneinstrahlung war zu erwarten. Die Tests der Probekörper haben jedoch wie schon beschrieben ergeben, dass dies bisher keine Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften der Naturfaserstruktur hat. Es macht allerdings Sinn diesen Ausbleichprozess zu unterbinden, um eine dauerhafte optische Qualität der Bauteile zu garantieren. Daher wäre ein zusätzlicher UV-Schutz für die Fasern eine adäquate Methode zur Lösung dieses Problems.

Diskussion der Ergebnisse

Die genaue Zusammensetzung des Faserverbundwerkstoffes spielt eine wichtige Rolle bei der Bestimmung des Kompressionsverhaltens. In dieser hier präsentierten Studie wurden vier Varianten von Epoxidharzen untersucht, die jeweils unterschiedliche Anteile an biologischem Material aufweisen. Das Epoxidharz Hexion Epikote ist vollständig erdölbasiert, während Entropy CLR einen biobasierten Anteil von 21% beinhaltet. Resoltech enthält 33% biobasiertes Material, während Greenpoxy mit 51% den höchsten Anteil an biobasiertem Material unter den getesteten Harzen aufweist.

Die Analyse der Ergebnisse für die maximale Druckkraft ergab eine auffällige Beziehung zwischen der Leistung des Bauteils und dem biobasierten Anteil des Harzes: Es wurde eine umgekehrte Korrelation beobachtet, wobei ein höherer biologischer Anteil mit einer geringeren Leistung, Druckbelastung aufzunehmen, einherging.

Die Integrität der Naturfasern hat einen signifikanten Einfluss auf die Zugfestigkeit des Verbundsystems. Die Testergebnisse zeigten eine Tendenz zur Abnahme der maximalen Zugkraft über einen Zeitraum von 12 Monaten sowie eine deutlichere Abnahme der K-Steifigkeit. Der Gesamtverlust an Leistung lag zwischen 2 % und 6 %. Die im Verbundsystem verwendete Matrix spielt eine entscheidende Rolle bei der Bestimmung der Druckfestigkeit. Die Ergebnisse zeigten jedoch, dass die Druckfestigkeit mit der Zeit deutlich um ca. 5 bis 10 % abnimmt, während bei der Steifigkeit kein eindeutiger Trend erkennbar ist.

Allgemein gilt, dass die Zug- und Druckbeanspruchung und auch die Steifigkeit der Probekörper abnehmen, wenn der Anteil an Harz geringer ausfällt. Es gibt kein eindeutiges Indiz dafür, dass die höhere Zug- und Druckbelastbarkeit nach 6 Monaten in direktem Zusammenhang mit dem Faservolumengehalt der Probekörper steht.

Die durchgeführte Untersuchung konzentrierte sich auf die Bewertung der Festigkeit und Steifigkeit des Materialsystems über einen Zeitraum von einem Jahr. Die vorläufigen Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Festigkeit bzw. Steifigkeit im Laufe der Zeit um durchschnittlich 5-6 % abnimmt, wenn die Materialien UV-Strahlung ausgesetzt werden. Diese Ergebnisse unterstreichen, wie wichtig es ist, die Testdauer zu verlängern, um eine umfassendere Entwicklungskurve der Festigkeit und Steifigkeit zu erhalten, insbesondere für die Planung von Bausystemen, die langfristig zum Einsatz kommen sollen.

Detaillierte ökologische, technologische und wirtschaftliche Bewertung der Projektergebnisse

Das Forschungsprojekt setzt die bestehenden Forschungsbestrebungen zur Schaffung nachhaltigerer und wirtschaftlicher Faserverbundstrukturen fort. Der Einsatz konventioneller Faserverbundsysteme aus Karbon- oder Glasfasern ist aktuell zwar weit verbreitet und insbesondere Karbonfasern sind in Verbindung mit erdölbasierten Harzen erwiesenermaßen besonders leistungsstarke Systeme. Bei allen Faserverbundstoffen bleibt jedoch die Frage nach deren Nachhaltigkeit bestehen, solange nicht abschließend geklärt ist, wie eine möglichst biogene Zusammensetzung und schadstoffarme Wiederverwertung des Verbundmaterials erreicht werden kann. Zudem geht ihre Produktion mit einem hohen Maß an Emissionen einher.

Die hier gezeigten Untersuchungen zeigen auf, dass Naturfasersysteme, wie aus Flachfasern in Kombination mit biobasierten Harzen, die aus einem reduzierten Anteil aus Epoxidharzen bestehen,

nicht nur erfolgreich als Tragstrukturen in Leichtbauweise eingesetzt werden können, sondern auch einen bedeutenden ersten Schritt hin zu umweltverträglicheren Faserverbundsystemen in der Architektur darstellen.

Das hier gezeigte Fertigungsverfahren in Kombination mit einem Materialsystem aus freigespannten Flachfasern im Verbund mit den angeführten Harzen ermöglicht einen effizienten Materialeinsatz, und kann grundsätzlich als Beitrag für nachhaltigere Strukturen verstanden werden. Jedoch muss berücksichtigt werden, dass die getesteten, biobasierten Harze im Vergleich zu rein fossilen Epoxid-Harzen teils signifikante Leistungseinbußen aufweisen, wie u.a. aus den Untersuchungen zur maximalen Druck- und Zugbelastung der Probekörper hervorgeht.

Die Untersuchungen der natürlichen Verwitterung ausgesetzten Proben deuten jedoch darauf hin, dass es keine verringerte Haltbarkeit von biobasierten Harzen im Vergleich zur Referenzgruppe aus fossilen Harzen gibt.

Wie bereits erwähnt bestehen die verwendeten biobasierten Systeme nur zu einem gewissen Prozentsatz aus biobasierten Zuschlagsstoffen. Das bedeutet, dass biobasierte Harzsysteme nicht per se umweltfreundlich und vollständig rezyklierbar sind. Die Reduzierung der fossilen Bestandteile kann jedoch ein wertvoller Beitrag dazu sein, diese Harzsysteme umweltverträglicher zu machen.

Die hier erfolgten Untersuchungen zeigen, dass Naturfaser-Verbundwerkstoffe mit biobasierten Zuschlagsstoffen bei Druck- und Zugversuchen weniger leistungsstark waren als vergleichbare Materialsysteme aus Karbonfasern und Epoxidharz.

In Bezug auf die robotische Fabrikation ist insbesondere die im Vergleich zu kohlenstoffhaltigen Fasersystemen geringere Abzugsfestigkeit der Naturfasern ein kritischer Punkt, der bei der Planung und Ausführung der Fertigung berücksichtigt werden muss. Diesem Problem kann allerdings mit mehreren Maßnahmen entgegengewirkt werden, insbesondere kann eine geringere Faserspannung während des Fertigungsverganges Abhilfe schaffen – oder durch das Hinzufügen von reißfesteren Fasern, wie es im Kontext des Pavillons mit Sisalfasern geschehen ist. Ebenfalls von großer Bedeutung ist der tatsächliche Durchtränkungsgrad von Naturfasern mit Epoxidharzbasierten Systemen.

Präsentation der Umsetzung der Projektergebnisse

Der livMatS Pavillon im Botanischen Garten der Universität Freiburg zeigt deutlich auf, wie eine nachhaltige, ressourceneffiziente Alternative zu konventionellen Bauweisen mit Naturfasern möglich sein kann. Er stellt das erste Gebäude dar, dessen tragende Struktur ausschließlich aus robotisch gewickelten Flachfasern besteht, einem Material, das natürlich, erneuerbar, biologisch abbaubar und regional verfügbar ist. Er ist daher ein wichtiger Meilenstein in Richtung Nachhaltigkeit in der Architektur.

Durch seine innovative Verknüpfung von Naturwerkstoffen und modernsten digitalen Technologien verdeutlicht der livMatS Pavillon anschaulich, wie integrative Co-Design-Methoden, durch die geometrische, materielle, strukturelle, produktionstechnische, ökologische und ästhetische Anforderungen schon in einem sehr frühen Stadium eines Projekts berücksichtigt werden, in Verbindung mit modernsten robotergestützten Fertigungstechniken und Untersuchungen zu natürlichen Werkstoffen eine einzigartige Architektur schaffen, die zugleich umweltfreundlich und gestalterisch ausdrucksstark ist.

Der livMatS-Pavillon ist für die Öffentlichkeit offen zugänglich und wird seit seiner Errichtung auch häufig für Veranstaltungen genutzt. Er wird zudem als Veranstaltungsort für Angebote der Universität Freiburg, insbesondere des Exzellenzclusters "Living, Adaptive and Energy-autonomous Material Systems (livMatS)", eingesetzt, die den Botanischen Garten im Rahmen des Konzepts „Learning from Nature in Nature“ als Forschungs- und Lehrereinrichtung nutzt.

Der livMatS Pavillon als Demonstrator des Projekts und die zugrundeliegende Forschung wurden wissenschaftlich publiziert und national und international in den Bereichen Hoch- und Tiefbau, Ingenieurwesen und Architektur, sowie vor einem breiten Publikum präsentiert. Eine Zusammenfassung dieser Arbeiten ist unten aufgeführt.

Begutachtete Publikationen

Zechmeister, C., Gil Pérez, M., Dambrosio, N., Knippers, J., & Menges, A. (2023). Extension of Computational Co-Design Methods for Modular, Prefabricated Composite Building Components Using Bio-Based Material Systems. *Sustainability* 15, no. 16: 12189. <https://doi.org/10.3390/su151612189>

Gil Pérez, M., Zechmeister, C., Menges, A., Knippers, J.: 2022, Coreless filament-wound structures: toward performative long-span and sustainable building systems. In: S. Xue, J. Wu and G. Sun, (Eds.), *Proceedings of IASS Annual Symposia 2022: Innovation, Sustainability and Legacy*. International Association for Shell and Spatial Structures (IASS), pp.3366–3376.

Gil Pérez, M., Guo, Y., & Knippers, J. (2022). Integrative material and structural design methods for natural fibres filament-wound composite structures: The LivMatS pavilion. *Material & Design*, 217. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110624>

Menges, A., Kannenberg, F. & Zechmeister, C. Computational co-design of fibrous architecture. *ARIN* 1, 6 (2022). <https://doi.org/10.1007/s44223-022-00004-x>

Zechmeister, C., Gil Pérez, M., Dambrosio, N., Rinderspacher, K., Dörstelmann, M. Stark, T., Knippers, J., Menges, A.: 2024, Co-design of natural fiber composite building elements – the LivMatS Pavilion, *Fabricate* 2024, noch nicht veröffentlicht

Der livMatS Pavillon wurde darüber hinaus in zahlreichen nationalen und internationalen Artikeln in der Fachpresse veröffentlicht. Ein Ausschnitt ausgewählter Print- und Online-Medien ist unten aufgeführt.

Printmedien (Auswahl)

Bauwelt – digital fertigen II

Friedrich, Jan: Flachsfasern. In: Bauwelt, 21.2022 (2022), Nr. 113, S. 28-31

Bauen +

Robotisch gewickeltes Naturfasergebäude. In: Bauen +, Jahrgang 7 (2021), Nr. Heft 5 (November) 2021

Bauen von morgen - Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)

Knippers, Jan; Menges, Achim: Für eine neue Materialkultur. In: Zukunft Bau - Bauen von Morgen (2021), S. 46-51

Freiburger Zeitung

Kritzler, Jens: Der Kaktus liefert den Bauplan. In: Freiburger Zeitung, 26.10.2021 (2021), S. 19

Stuttgarter Zeitung

Gann, Florian: Bauen wir bald mit Hanf und Pilzen?. In: Stuttgarter Zeitung, 28.09.2021 (2021), S. 10

Badische Neuste Nachrichten

Krefting, Marco: Keine überflüssige Schnörkelei - Gewickelt gebaut - Forschende aus dem Südwesten konstruieren mit Flachs. In: Badische Neueste Nachrichten (2022), Nr. 19, S. 15

CU Reports

Schurrer, Elisabeth: Kaktus Struktur schützt - Bioinspirierter livMatS Pavillon in Freiburg eröffnet. In: CU reports, 02/2021 (2021), S. 24-25

HORS SITE

Speight, Virginie: Tisser l'architecture à partir de fibres de lin. In: HORS SITE BIOMIMÉTISME, AUTOMNE 2021 (2021), Nr. #15, S. 26-27

Architektura Murator

Kowalski, Wiktor; Zmijewska, Anna: Pawilon livMatS / Fryburg. In: ARCHITEKTURA murator, 10/2021 (2021), Nr. 325, S. 054-068

av proyectos

Fernández-Galiano, Luis: University of Stuttgart - livMatS Pavilion, Friburgo de Brisgovia (Alemania). In: av proyectos, 107 2021 (2021), S. 52-53

Forschung leben

Hoffmeyer, Miriam: Flachs statt Zement. In: forschung leben, März 2022 (2022), S. 72-75

Romoer

livMatS Pavilion. In: RUMOER - A(BouT) Building Technology, 79. Bio-Based (2022), S. 6-13

ROOM 37 Diseno Magazine

Massad, Fredy; Guerrero Yeste, Alicia: Materia en Germinacion. In: ROOM - Diseno Arquitectura, 37 (2022), S. 66-75

Diskurs

Ermisch, Steffen: Was kommt nach Beton?. In: diskurs - Das Kundenmagazin der Weberbank, 38 (2022), Nr. Ausgabe 3, S. 28-30

Rat für Formgebung

Rat für Formgebung: LivMatS Pavillon. In: The whole World of Architecture - Die ganze Welt der Architektur, Iconic Awards 2022 - Innovative Architecture (2022), S. 496-497

Technoscape, Achim; Knippers, Jan: Natural Fibre Tectonics - Towards Bio-based and Bio-inspired Architecture. In: TECNOSCAPE - The architecture of engineers (2022), S. 298-299

TV/Dokumentationen

Leschs Kosmos (ZDF) [Sackgasse Beton: Die Suche nach Alternativen](#)

Twist (Arte) [Twist – Wie die Natur die Kultur inspiriert](#)

heute journal (ZDF) [Leibniz-Preis: Flachsfaser und Krebsdiagnose](#)

ZDFinfo [Wunderstoffe: Von Fasern zu lebendigen Brücken](#)

Online-Medien (Auswahl)

Architekturblatt	Robotisch gewickeltes Naturfasergebäude
Baunetz	Flachsfasern im Botanischen Garten
Baunetz Campus	„livMatS Pavillon“ aus robotisch gewickelten Flachsfasern
Archinect	livMatS Pavilion displays strength of a more sustainable material
Archello	livMatS Pavilion
Bauingenieur	Robotik: Ein Naturfasergebäude wächst automatisch
Archdaily	livMatS Pavilion / ICD/ITKE University of Stuttgart
Materialdistrict	A robotically wound flax pavilion
Azure Magazine	A Recyclable University Pavilion High in (Flax) Fibre
Parametric Architecture	Bio-Inspired Robotically Woven Structure
Detail	Innovatives Flechtwerk

Der livMatS Pavillon hat des weiteren zahlreiche renommierte Preise und Auszeichnungen erhalten:

Auszeichnungen/Preise

Materialpreis 2021 (Anerkennung Material)

Green Concept Award 2022 "Best of Architecture & Tiny Houses"

Iconic Awards 2022 "Winner (Innovative Architecture)"

Iconic Awards 2022 "Best of Best"

German Design Award 2023

Big SEE Architecture Award 2023

Houzee Award 2023

Nominierungen

ECO Design Award

ArchDaily 2022 Building of the Year Award

Standort des Demonstratorbaus

Botanischer Garten der Universität Freiburg

Schänzlestrasse 1, 79104 Freiburg im Breisgau (48°00'35.6"N 7°51'32.4"E)

Fazit

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurde die Eignung von biobasierten Faserverbundwerkstoffen für zukünftige Anwendungen im Leichtbau erfasst. Dabei wurden verschiedene biobasierte Harzsysteme im Materialverbund mit Flachfasern untersucht und mit konventionellen, ölbasierten Harzsystemen verglichen. Hierfür wurden mehrere Probekörper-Serien produziert, die über verschiedene Zeitpunkte der natürlichen Verwitterung ausgesetzt waren. Die Verwitterungsbedingungen vor Ort wurden durch digitales Monitoring erfasst und ausgewertet.

Die getesteten biobasierten Harzsysteme wiesen zwar im Vergleich zu erdölbasierten Harzsystemen leistungsärmere Eigenschaften in ihrer strukturellen Belastbarkeit auf, allerdings ist der Verwitterungsgrad der biobasierten Systeme im direkten Vergleich mit den erdölbasierten Systemen nicht signifikant höher.

Die generelle Leistungsfähigkeit der hier aufgezeigten biobasierten Harzsysteme kann grundsätzlich gewährleistet werden, was unter anderem in den Druck- und Zugbelastungstests sichtbar wird. Bei Faserverbundstrukturen in Leichtbauweise ist es üblich, die Faserstruktur lastfallangepasst entsprechend ihrer spezifischen Materialeigenschaften zu gestalten. Dieses Vorgehen gilt auch für die im Forschungsprojekt getesteten Harzsysteme. Fragen zu Größe und Skalierbarkeit biobasierter Harzsysteme müssen jedoch noch umfangreich weiterentwickelt und getestet werden.

Der livMatS Pavillon zeigt jedoch eindrucksvoll, dass Naturfasern als Alternative zu Karbon- und Glasfasern erfolgreich im Kontext von Leichtbaukonstruktionen eingesetzt werden können und demzufolge umweltverträglichere Faserverbundwerkstoffe im Bauwesen möglich sind.

Sollten biobasierte Harzsysteme zukünftig in ihrer Zusammensetzung so weiterentwickelt werden, dass sie weniger Erdöl, bzw. epoxidbasierte Bestandteile besitzen oder gar vollständig biogen sein, wäre dies ein wichtiger Schritt für die Forschung an biobasierten Faserverbundsystemen, hin zu nachhaltigeren Systemen. Der Prozess des Faserwickelns ermöglicht eine weitestgehend automatisierte Verarbeitung der Materialien zu fertigen Bauteilen. Dabei müssen materialspezifische Anpassungen vorgenommen werden, um die Abzugsfestigkeit zu erhöhen und gleichzeitig auf den jeweils individuellen Tränkungsgrad der Verbundsysteme auf Naturfaserbasis einzugehen. Wie die Versuche gezeigt haben, ist es mitentscheidend, wie groß die Spannweite der Fasern im Syntaxdesign und im realen Verarbeitungsprozess ausgelegt ist.

Die Möglichkeiten des Materialsystems sind noch lange nicht ausgeschöpft - sowohl was die Materialzusammensetzung als auch die Anwendungsmöglichkeit betrifft.

Literaturverzeichnis

- [BM20] Bodea, S., Dambrosio, N., Zechmeister, C., Gil Perez, M., Koslowski, V., Rongen, B., Doerstelmann, M., Kyjanek, O., Knippers, J., Menges, A.: *BUGA Fibre Pavilion: Towards Robotically-Fabricated Composite Building Structures*. In Burry, J., Sabin, J., Sheil, B., Skavara, M., (Herausgeber), *Fabricate 2020: Making Resilient Architecture*, UCL Press, London, (2020)
- [DM19] Dambrosio, N., Zechmeister, C., Bodea, S., Koslowski, V., Gil-Pérez, M., Rongen, B., Knippers, J., Menges, A.: *Towards an architectural application of novel fiber composite building systems – The BUGA Fibre Pavilion*. In *ACADIA – Ubiquity and Autonomy [Proceedings of the ACADIA Conference 2019]*. The University of Texas, Austin. (2019)
- [DM21] Dambrosio, N., Zechmeister, C., Duque Estrada, R., Kannenberg, F., Gil Pérez, M., Schlopschnat, C., Rinderspacher, K., Knippers, J., Menges, A.: *Design and development of an FRP-Timber hybrid building system for multi-story applications in architecture: Maison Fibre*. In *ACADIA - Realignment: Toward Critical Computation [Proceedings of the ACADIA Conference 2021]*. (2021)
- [EN90] EN 1990:2002 Eurocode 0: *Basis of structural design*. CEN European Committee for Normalization.; n.d. (2002)
- [EN91] EN 1991 Eurocode 1: *Actions on Structures*. CEN European Committee for Normalization.; n.d. (1991)
- [GGK22] Gil Pérez, M., Guo, Y. & Knippers, J.: *Integrative material and structural design methods for natural fibres filament-wound composite structures: The LivMatS pavilion*. *Materials & Design* 217. (2022).
- [GK19] Gil Pérez, M., Dambrosio, N., Rongen, B., Menges, A., Knippers, J.: *Structural optimization of coreless filament wound components connection system through orientation of anchor points in the winding frames*. In: Lazaro, C., Bletzinger, K., Onate, E. (Herausgeber). *Proceedings of IASS Annual Symposia 2019: Form and Force*, vol. 2019, International Association for Shell and Spatial Structures (IASS). (2019)
- [GK21] Gil Pérez, M., Rongen, B., Koslowski, V., & Knippers, J.: *Structural design assisted by testing for modular coreless filament-wound composites: The BUGA Fibre Pavilion*. *Construction and Building Materials*, 301. (2021)
- [KW21] Knippers, J., Kropp, C., Menges, A., Sawodny, O., Weiskopf, D.: *Integrative computational design and construction: Rethinking architecture digitally*. *Civil Engineering Design*. (2021).
- [SM23] Schlopschnat, C., Gil Pérez, M., Zechmeister, C., Duque Estrada, R., Kannenberg, F., Rinderspacher, K., Knippers, J., Menges, A.: *Co-Design of Fibrous Walls for Multi-Story Buildings*. In Dörfler, K., Knippers, J., Menges, A., Parascho, S., Pottmann, H. Wortmann, T. (Herausgeber). *Advances in Architectural Geometry 2023*. Berlin, Boston: De Gruyter. (2023)
- [ZM23] Zechmeister C, Gil Pérez M, Dambrosio N, Knippers J, Menges A.: *Extension of Computational Co-Design Methods for Modular, Prefabricated Composite Building Components Using Bio-Based Material Systems*. *Sustainability* 15(16):12189. (2023)

Projektteam

ICD Institut für Computerbasiertes Entwerfen und Baufertigung - Prof. Achim Menges
Exzellenzcluster IntCDC, Universität Stuttgart

ITKE Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen - Prof. Jan Knippers
Exzellenzcluster IntCDC, Universität Stuttgart

Wissenschaftliche Entwicklung und Projektleitung:

Marta Gil Pérez, Serban Bodea, Niccolò Dambrosio, Bas Rongen, Christoph Zechmeister

Projektleitung: Katja Rinderspacher, Marta Gil Pérez, Monika Göbel

Konzeptentwicklung, Systementwicklung, Prototypenfertigung:

2018-2020: Talal Ammouri, Vanessa Costalonga Martins, Sacha Joseph Cutajar, Edith Anahi Gonzalez San Martin, Yanan Guo, James Hayward, Silvana Herrera, Jeongwoo Jang, Nicolas Kubail Kalousdian, Simon Jacob Lut, Eda Özdemir, Gabriel Rihaczek, Anke Kristina Schramm, Lasath Ryan Siriwardena, Vaia Tsiokou, Christo van der Hoven, Shu Chuan Yao

2018-2019: Karen Andrea Antorveza Paez, Okan Basnak, Guillaume Caussarieu, Zhetao Dong, Kurt Drachenberg, Roxana Fiorella Guillen Hurtado, Ridvan Kahraman, Dilara Karademir, Laura Kiesewetter, Grzegorz Łochnicki, Francesco Milano, Yue Qi, Hooman Salyani, Nasim Sehat, Tim Stark, Zi Jie, Jake Tan, Irina Voineag

Fassadenentwicklung: Tim Stark

Mit Unterstützung von: Okan Basnak, Yanan Guo, Axel Körner

Studierende: Matthew Johnson, Daniel Locatelli, Francesca Maisto, Mahdieh Hadian Rasanani, Lorin Samija, Anand Shah, Lena Strobel, Max Zorn

FibR GmbH, Stuttgart

Moritz Dörstelmann, Ondrej Kyjanek, Philipp Essers, Philipp Gülke

mit Unterstützung von: with support of: Erik Zanetti, Elpiza Kolo, Prateek Bajpai, Hooman Salyani, Jamiel Abubaker, Julian Fial, Sergio Maggiulli, Mansour Ba, Christo van der Hoven

Ein gemeinsames Projekt der Exzellenzcluster livMatS, Universität Freiburg (Prof. Dr. Thomas Speck, Prof. Dr. Jürgen Rühle) und IntCDC, Universität Stuttgart

Projektunterstützung:

Deutsche Bundesstiftung Umwelt

Exolon Group GmbH

