

BBSR-
Online-Publikation
25/2026

Living Prototypes

Digitale Fertigung mit Biomaterialien

von

Dunya Bouchi
Tzu-Ying Chen
Alexandre Dubor
Áine Ryan
Martin Tamke

Living Prototypes

Digitale Fertigung mit Biomaterialien

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wohnen, Stadtentwicklung
und Bauwesen

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ZUKUNFT BAU
F O R S C H U N G S F Ö R D E R U N G

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-21.02

Projektlaufzeit: 07.2021 bis 03.2023

IMPRESSUM

Herausgeber

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

Fachbetreuer

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
Referat WB 3 „Forschung und Innovation im Bauwesen“
Dr. Arnd Rose
arnd.rose@bbr.bund.de

Autorinnen und Autoren

ANCB The Aedes Metropolitan Laboratory, Berlin (Projektleitung)
Dunya Bouchi
db@ancb.de
Áine Ryan
ar@aedes-network-campus.de

CITA – Centre for Information Technology and Architecture, Kopenhagen (Forschungskoordination)
Martin Tamke
martin.tamke@kglakademi.dk

IAAC – Institute for Advanced Architecture of Catalonia, Barcelona
Alexandre Dubor
alex@iaac.net

Universität Stuttgart
ITKE – Institut für Tragkonstruktionen und konstruktives Entwerfen
Tzu-Ying Chen
y.chen@itke.uni-stuttgart.de

Redaktion

ANCB The Aedes Metropolitan Laboratory, Berlin
Dunya Bouchi
Áine Ryan

Stand

März 2023

Gestaltung

ANCB The Aedes Metropolitan Laboratory, Berlin

Bildnachweis

Titelbild: Erik-Jan Ouwerkerk
S. 7, 17, 22, 23, 24, 37, 38, 45: Erik-Jan Ouwerkerk
S. 28: IAAC
S. 29: ITKE
S. 31: CITA
S. 32: IAAC/ITKE/CITA

Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten

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

Zitierweise

Bouchi, D.; Chen, T.-Y.; Dubor, A.; Ryan, A.; Tamke, M., 2026: Living Prototypes: Digitale Fertigung mit Biomaterialien.
BBSR-Online-Publikation 25/2026. Bonn. <https://doi.org/10.58007/4y01-7r34>

DOI 10.58007/4y01-7r34
ISSN 1868-0097

Bonn 2026

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	6
Abstract	9
Forschungsfrage	11
Kontext	12
<i>Biomaterialien und digitale Fertigung im Bauwesen vor dem Hintergrund der Klimakrise</i>	12
<i>Forschungskontext</i>	12
Zielstellungen	14
Methode	15
<i>Research-by-Design</i>	15
<i>Diskurs-Schleife</i>	15
Planung und Ablauf	16
<i>Projektstart: Juli 2021 – September 2021</i>	16
<i>Phase 1: Forschung und Prototypenentwicklung. September 2021 – Februar 2022</i>	18
<i>Halbzeit-Workshop</i>	19
<i>Phase 2: Forschung und Prototypenentwicklung. Februar – November 2022</i>	20
<i>Phase 3: Veröffentlichung, Ausstellung und Diskussion der Projektergebnisse</i>	21
Zusammenarbeit mit anderen Stellen	26
<i>Das Beratungsgremium</i>	26
<i>Die Projektpartner: Kollaboration und Erweiterung bestehender Netzwerke</i>	26
Ergebnisse	28
<i>Entwurf und Anfertigung von Prototypen</i>	28
<i>Demonstration von Spitzenforschung</i>	34
Voraussichtlicher Mehrwert und Verwertbarkeit der Ergebnisse	42
Erfolge und geplante Veröffentlichungen	44
<i>Erfolgt</i>	44
<i>Geplant</i>	44
<i>Presse, Internet</i>	45
Mitwirkende	46
Profile der Projektpartner:innen	49
Literaturverzeichnis	50

Kurzfassung

Das Forschungsprojekt *Living Prototypes* war eine Zusammenarbeit zwischen ANCB The Aedes Metropolitan Laboratory in Berlin und drei europäischen Forschungsteams. Das Projekt konzipierte, entwarf, fertigte und präsentierte ressourcenschonende Prototypen für Wohnräume auf der Grundlage von digitalen Fertigungstechniken und biobasierten Materialien. Diese Prototypen demonstrieren konkrete räumliche Vorschläge mit dem Ziel, Impulse zu setzen, Machbarkeit zu demonstrieren, Vertrauen und Erfahrung in der Bauindustrie aufzubauen und das Interesse der Öffentlichkeit zu wecken.

Die Entwicklung der digital gefertigten Prototypen aus den biobasierten Materialien Erde, Flachs und Biokunststoff erfolgte über einen Zeitraum von anderthalb Jahren.

Drei Universitätsinstitute arbeiteten mit drei Industriepartnern zusammen. Die Forschungsteams und ihre Projekte waren:

3D-PRINTED EARTH

Universitäts-Partner: IAAC – Institute for Advanced Architecture of Catalonia, Barcelona

Industriepartner: WASP, Massa Lombarda

Erde ist ein traditionelles und kostengünstiges Baumaterial, für das bereits umfangreiche Kenntnisse vorliegen. IAAC und WASP setzen 3D-Druck und computergestütztes Design ein, um die strukturelle und klimaregulierende Leistung von Erdhäusern zu verbessern. Dies ermöglicht auch eine höhere Flexibilität der mit diesem Biomaterial geschaffenen Architektur, verbessert deren ästhetische Eigenschaften und macht den Bauprozess effizienter und praktikabler für Nachverdichtungen der gebauten Umwelt.

Der entwickelte Prototyp einer Erdwand für den Innenbereich demonstrierte die feine Detaillierung, die mit 3D-Druck möglich ist und die neben der strukturellen auch eine hohe ästhetische Qualität sowie eine funktionale Leistung bei der Klimakontrolle aufweist.

FLAX FIBRE-WINDING

Universitäts-Partner: ITKE – Institut für Tragkonstruktionen und konstruktives Entwerfen, Universität Stuttgart

Industriepartner: FibR GmbH, Kernen

Das robotische Freiformwickelverfahren zielt darauf ab, die Materialeffizienz bei Baukomponenten zu optimieren, indem Schalungen und Materialverschnitt vermieden werden. Dabei entspricht der Materialeinsatz exakt den strukturellen Anforderungen der jeweiligen Bauteile. ITKE und FibR untersuchen das robotische Freiformwickeln unter Verwendung von Flachsfasern und biobasierten Matrixwerkstoffen. Durch den intermateriellen Dialog mit anderen Prototypen der Aedes Ausstellung vermittelt das Projekt die Relevanz nachhaltiger Materialsysteme für die Gestaltung künftiger Gebäude.

Ein Prototyp für ein leichtes hybrides Deckenplattensystem wurde entwickelt, das mit biobasiertem Harz imprägnierte Flachsfasern mit einer integrierten Schichtholzplatte kombiniert. Zwei Versionen der Platte demonstrierten die Anpassungsfähigkeit der Fasersyntax an unterschiedliche Tragbedingungen.

BIOPLASTIC PRINTS

Universitäts-Partner: CITA – Centre for Information Technology and Architecture, RoyalDanish Academy, Kopenhagen (Forschungskordinator)

Industriepartner: COBOD International A/S, Kopenhagen

Biokunststoffe sind erneuerbar, kostengünstig, biologisch abbaubar und vielfältig in ihrer chemischen Zusammensetzung. Digitale Datenanalysetechnologien, wie beispielsweise maschinelles Lernen, ermöglichen es, das Verhalten dieser komplexen Materialien während und nach dem Druckprozess vorherzusagen und zu kontrollieren. CITA und COBOD entwickeln prototypische Baukomponenten für Innenräume aus zwei komplementären biobasierten Materialien (Cellulose und Knochenleim). Diese verweisen auf eine zukünftige zirkuläre Lebensdauer von Materialien in Gebäuden, die dieses adaptive Herstellungsverfahren ermöglicht.

Zwei Biokunststoffe wurden entwickelt und in zwei verschiedenen Prototypen eingesetzt, deren Leistung mithilfe von Strategien zur Materialabstufung kontinuierlich an die jeweiligen Anforderungen angepasst werden kann. Eine raumhohe Trennwand wurde aus einem Cellulose-Xanthan basiertem Slurry und ein sechs Meter großes Paneelsystem mit Biokunststoffen aus Knochenleim 3D-gedruckt. Letzteres wurde mit verschiedenen organischen Additiven abgestuft.

Die drei Teams kombinierten dabei erstmals ihre unterschiedlichen Forschungsansätze. Ihre Zusammenarbeit war gewissermaßen selbst ein Prototyp: eine Kette ineinandergreifender Prozesse vom digitalen Entwurf bis zur digitalen Fertigung, die das Wissen dieser europäischen Expert:innen verbindet.

Das Ergebnis war ein visionärer Ansatz für ressourcenbewusstes Bauen und Wohnen in naher Zukunft. Drei prototypische Baukomponenten, die miteinander zu einer Wohnrauminstallation verbunden wurden, konnten erlebt und diskutiert werden. Sie demonstrierten den aktuellen Stand angewandter wissenschaftlicher Erkenntnisse und experimenteller Praxis, veranschaulichten neue Konzepte und ermöglichten es, deren Eignung und Akzeptanz für die Baubranche zu prüfen.

Die abschließende Präsentation dieses Forschungsvorhabens im Rahmen einer Ausstellung im Berliner Aedes Architekturforum wie auch der projektbegleitende öffentliche Diskurs brachten ein hochaktuelles Themenfeld anhand von Prototypen für den Wohnungsbau einer breiteren Öffentlichkeit auf anschauliche Weise näher.



Die Ausstellung *Living Prototypes* im Aedes Architekturforum in Berlin

Foto: Erik-Jan Ouwerkerk

Abstract

The *Living Prototypes* research project was a collaboration between ANCB The Aedes Metropolitan Laboratory in Berlin and three European research teams. The project conceived, designed, manufactured and presented resource-efficient prototypes for living spaces, using digital fabrication techniques and bio-based materials. These prototypes demonstrate real spatial proposals with the aim of creating momentum, demonstrating feasibility, building confidence and experience in the construction industry and stimulating public interest.

The development of the digitally manufactured prototypes from the bio-based materials earth, flax and bioplastic took place over a period of one and a half years.

Three university institutes worked together with three industrial partners. The research teams and their projects were:

3D-PRINTED EARTH

University Partner: IAAC – Institute for Advanced Architecture of Catalonia, Barcelona

Industry Partner: WASP, Massa Lombarda

Earth is a traditional and inexpensive building material, for which extensive knowledge exists. IAAC and WASP employ 3D printing and computational design to improve the structural and climate-regulation performance of earth constructions. This also enables a new flexibility in the architecture achievable with this biomaterial, advances its aesthetic capacity and makes the construction process more efficient and feasible for infill and other forms of built environment densification.

FLAX FIBRE-WINDING

University Partner: ITKE – Institut für Tragkonstruktionen und konstruktives Entwerfen, Universität Stuttgart

Industry Partner: FibR GmbH, Kernen

Robotic coreless fibre winding aims to optimise material efficiency in architectural components by avoiding formwork and material cutoffs. Material use corresponds to structural demands. ITKE and FibR investigated robotic coreless fibre winding using natural flax fibres. Through the inter-material dialogue with other living prototypes at the Aedes exhibition, the project communicates the relevance of such material systems in future living spaces.

BIOPLASTIC PRINTS

University Partner: CITA – Centre for Information Technology and Architecture, RoyalDanish Academy, Copenhagen (Forschungskordinator)

Industry Partner: COBOD International A/S, Copenhagen

Bioplastics are renewable, inexpensive, biodegradable and chemically diverse. Digital data analysis technologies, such as machine learning, make it possible to predict and control the behaviour of these complex materials during and after the printing process. CITA and COBOD prototype components for interior spaces using two complementary bio-based materials. These suggest future circular material life cycles in buildings that are made possible by this adaptive manufacturing process.

The three teams brought together their different research approaches for the first time. In a sense, their collaboration was itself a prototype: a chain of interlocking processes from digital design to digital production, combining the knowledge of these European experts.

The result was a visionary approach to resource-conscious building and living in the near future. Three prototypical building components were connected to each other in an installation of a living space, that could be experienced and discussed. They demonstrated the state-of-the-art in applied scientific knowledge and experimental practice in biomaterials, illustrated new concepts and made it possible to test their suitability and acceptance for the building industry.

The final presentation of this research project in an exhibition at the Aedes Architecture Forum in Berlin, as well as the public discourse paralleling the project, brought a highly current topic closer to a wider public in a tangible way using prototypes for residential construction.

Forschungsfrage

Die Grundlagenforschung zu nachhaltigen Baumaterialien bringt zahlreiche vielversprechende Ansätze hervor. Diese wissenschaftlichen Ergebnisse und ihre Umsetzungs-Potenziale erreichen jedoch die Baupraxis und die Öffentlichkeit nur sehr langsam, wenn überhaupt. Die daraus folgende Forschungsfrage von *Living Prototypes* war es, in drei Forschungsteams zu untersuchen, wie ihre bisherige Laborforschung zur Entwicklung von Biomaterialien und digitalen Fertigungstechniken weiter vorangebracht und angewandt werden kann, um im Resultat jeweils einen Prototypen im Maßstab 1:1 für ein Gebäudeelement herzustellen. Hierbei sollte die Forschung den Nutzen von Prototypen demonstrieren, um die Potenziale der neuen biobasierten Materialien in Kombination mit den neuesten Techniken der digitalen Fertigung fassbar und verständlich zu machen.

Die drei Forschungsteams bestanden aus je einem Universitätsinstitut, das mit je einem Industriepartner zusammenarbeitete. Die Projekte waren:

3D-PRINTED EARTH

- Universitäts-Partner: IAAC – Institute for Advanced Architecture of Catalonia, Barcelona
- Industriepartner: WASP, Massa Lombarda

FLAX FIBRE-WINDING

- Universitäts-Partner: ITKE – Institut für Tragkonstruktionen und konstruktives Entwerfen, Universität Stuttgart
- Industriepartner: FibR GmbH, Kernen

BIOPLASTIC PRINTS

- Universitäts-Partner: CITA – Centre for Information Technology and Architecture, RoyalDanish Academy, Kopenhagen (Forschungskordinator)
- Industriepartner: COBOD International A/S, Kopenhagen

IAAC und WASP konzentrieren ihre Forschung auf eine neue Flexibilität in der Architektur, die mit dem Biomaterial Erde erreicht werden kann. Der Prototyp für eine Innenwand aus Lehm demonstrierte die mit dem 3D-Druck möglichen feinen Details, die neben der strukturellen auch eine hohe ästhetische Qualität und eine funktionale Leistung bei der Klimaregulierung aufweisen.

Aufbauend auf früheren Forschungsarbeiten zu kernlosen faserverstärkten Verbundstrukturen optimierten ITKE und FibR die Materialeffizienz eines leichten Hybriddeckensystems. Es wurde ein Prototyp für ein leichtes hybrides Deckenplattensystem entwickelt, das mit biobasiertem Harz imprägnierte Flachsfasern mit einer integrierten Schichtholzplatte kombiniert. Zwei Versionen der Platte demonstrierten die Anpassungsfähigkeit der Fasersyntax an unterschiedliche Tragbedingungen.

CITA und COBOD nutzen adaptive Fertigungsverfahren mit Biokunststoffen, um komponentenbasierte Baueinheiten für Innenräume zu erforschen. Im Rahmen der Forschung wurden zwei Biokunststoffe entwickelt und in zwei verschiedenen Prototypen eingesetzt, deren Leistung mithilfe von Strategien zur Materialabstufung kontinuierlich an die jeweiligen Anforderungen angepasst werden kann. Raumhohe Trennwände wurden aus Papiercellulose/Xanthan und ein sechs Meter langes Paneelsystem aus Knochenleim 3D-gedruckt. Letzteres wurde mit verschiedenen organischen Additiven abgestuft.

Darüber hinaus ging das Projekt das Desiderat des fehlenden industrie-übergreifenden Diskurses über die Neudefinition gemeinsamer Leitwerte im Kontext des Klimaschutzes an. *Living Prototypes* stellte einen sowohl physischen als auch konzeptionellen Experimentierraum zur Verfügung, der die Forschung mit dringenden Fragen und Herausforderungen der Praxiswirklichkeit verknüpft.

Kontext

Biomaterialien und digitale Fertigung im Bauwesen vor dem Hintergrund der Klimakrise

Die Notwendigkeit, Kohlendioxidemissionen, Ressourcenverbrauch und Abfallerzeugung drastisch zu reduzieren, ist mittlerweile unbestreitbar. Bedenkt man, dass gegenwärtig rund 40 Prozent der gesamten CO₂-Emissionen in Deutschland auf Bau, Nutzung bzw. Abriss von Gebäuden zurückzuführen sind, wird deutlich, dass es bis zum Erreichen des gesetzlich festgelegten Ziels – ein klimaneutraler Gebäudebestand bis 2045 – noch ein weiter Weg ist.

Das Bauwesen ist weltweit von billiger Massenproduktion geprägt, die fast vollständig von kohlenstoffintensiven Materialien und Prozessen abhängig ist. Die Veredelung von Rohstoffen in den homogenen Zustand, der für diese globale Baupraxis erforderlich ist, benötigt große Mengen an Energie und produziert Berge von Abfall. Diese Praxis beruht auf der 'Einbahnstraßenlogik' von Gewinnung, Veredelung, Bau, Betrieb und einem End-of-Use-Szenario, in dem Materialien als Abfall betrachtet werden, deren Wiederverwendung oder -verwertung eine enorme Herausforderung darstellt. Es ist offensichtlich, dass sich das Bauen prinzipiell ändern muss: von einer linearen Praxis des Verbrauchs begrenzter Rohstoffe zu einer zirkulären Praxis mit regenerativen Materialien.

Der Paradigmenwechsel hin zu biobasierten Materialien in der Bauindustrie muss grundlegend sein, ein bloßer Austausch von einem Material gegen ein anderes ändert nichts an der Logik des endlosen Wachstums. Stattdessen ist ein Bewusstsein für die Grenzen der Bauindustrie vonnöten. Biobasierte Materialien sind schlichtweg durch die Menge an Sonnenlicht, Phosphor, Kohlendioxid usw. begrenzt. Die praktischen Konsequenzen dieser realen Grenzen sind radikal und müssen jede zukünftige Baupraxis prägen.

Digitale Prozesse sind untrennbar mit Handarbeit und handwerklichem Können verbunden. Die computergestützte Architekturcommunity, der die *Living Prototypes*-Teams angehören, untersucht, wie diese traditionell manuellen Prozesse in digitale Techniken übertragen werden können. Architektonischer Entwurf und Fertigung mit Biomaterialien sollten der Logik des Materials folgen und nicht vorwiegend formalen oder geometrischen Zwängen. Biomaterialien sind außerdem von Natur aus heterogen und haben oft ein sehr starkes Materialverhalten. Wie lässt sich der Übergang von einer Baupraxis mit standardisierten, homogenen und hochfesten Materialien zu einer Baupraxis mit potenziell schwächeren und idealerweise unbearbeiteten Materialien gestalten?

Forschungskontext

Der Ausgangspunkt des Forschungsvorhaben war die erfolgreiche Forschung zu digitalen Fertigungsprozessen, -techniken und -materialien, die vom CITA-geführten Netzwerk europäischer Forschungsinstitute *Innochain* (2015-2019, EU Horizon2020), durchgeführt wurde. Aktuelle Spitzenforschung zu digitalen Fertigungsprozessen, -techniken und -materialien kombiniert das Konzept der digitalen Kette mit natürlichen und recycelten Materialsystemen. Während die erste Phase der o. g. Forschung sich auf Präzision und Adaption der Fertigung durch parametrische Systeme, CNC-Maschinen und minimaler Verwendung von hochwertigen, homogenen Materialien konzentrierte, liegt gegenwärtig der Fokus auf materialgerechten, feedbackgestützten Design- und Fertigungsprozessen in einem zirkulären Stoffkreislauf für die Bauwirtschaft, wie der Verarbeitung von lokalen, biobasierten und recycelten Baustoffen und deren Lebenszyklen¹. Schlüsseltechnologien in Entwicklung sind hier

¹ Zum Beispiel: National Centre of Competence in Research (NCCR) Digital Fabrication <https://dfab.ch/#>; Royal Danish Academy <https://royaldanishacademy.com/case/eco-metabolistic-architecture>; University of Stuttgart, Cluster of Excellence Integrative Computational Design and Construction for Architecture (IntCDC) <https://www.intcdc.uni-stuttgart.de/>

Sensorik und maschinelles Lernen, welche kontinuierliches Feedback zwischen Design und Herstellung erlauben. Aktuelle Forschungsvorhaben untersuchen, wie etwa die Fertigung laufend an sich ändernde Material-, Prozess- und Designparameter angepasst werden kann und wie die Pflege und Adaption aus vergänglichen Biowerkstoffen gebauter und bewohnter Objekte durch Cyber-Physical-Systeme unterstützt werden kann.

Living Prototypes baut darüber hinaus auf der durch Zukunft Bau geförderten ANCB-Diskussionsreihe *Craftsmanship in the Digital Age. Architecture, Values and Digital Fabrication* aus dem Jahr 2017 auf, indem es drei Schlüsselanforderungen aufgreift, die sich aus dem Vorgängerprojekt ergaben:

- Es braucht Experimentierräume und Ressourcen, um die Forschung zu digitaler Fertigung aus dem Labor in die Praxis zu übertragen.
- Es muss ein kritischer Diskurs über eine 'digitale Baukultur' sowie über Architektur als Untersuchungsform und Methode zur Generierung von Lösungen für dringende gesellschaftspolitische Fragen initiiert und begleitet werden.
- Es muss veranschaulicht werden, wie digitale Technologien die Bauwirtschaft in die Lage versetzen können, bei Bau, Nutzung und Instandhaltung von Gebäuden den Forderungen nach natürlichen, biologisch abbaubaren und wiederverwertbaren Materialien in einer Kreislaufwirtschaft zu entsprechen, insbesondere wenn der Schwerpunkt auf dem Prozess liegt.

Zielstellungen

Das Hauptziel des *Living Prototypes*-Projekts war es, den Mehrwert neuer Biomaterialien und digitaler Fertigung für die Architekturpraxis im Hinblick auf Gestaltung und ressourcenschonendes Bauen zu verdeutlichen, zu vermitteln sowie erleb- und greifbar zu machen. Dies geschah durch Entwurf und Fertigung von Prototypen, die die Potenziale von neuen bzw. wiederentdeckten biobasierten Baumaterialien sowie digitalen Planungs- und Fertigungsprozessen nutzen und illustrieren.

Zwei weitere Ziele für die Forschungsteams waren die Veranschaulichung von fortgeschrittener Forschung zu biobasierten, lokalen und recycelten Materialien durch die Prototypen sowie die Schaffung von Erkenntnissen darüber, wie digitale Prozesse für das Bauen im Bestand adaptiert und mit existierenden Material- und Konstruktionssystemen integriert werden können.

Die beiden Workshops, die parallel zur Entwicklung der Prototypen stattfanden sowie das Abschluss Symposium am Tag der Ausstellungseröffnung zielten darüber hinaus darauf ab, eine öffentliche und praxisnahe Debatte darüber zu ermöglichen, wie digitale Fertigung mit Biomaterialien im konventionellen Bauprozess eingesetzt werden könnte.

Die Ausstellung und der Ausstellungskatalog stellten sowohl den Entwurfsprozess der gefertigten Prototypen wie auch die angestoßene kritische Diskussion über die Bauindustrie dar, mit dem Ziel, Anregungen für weitere interdisziplinäre Forschung und experimentelle Entwicklung in der Architektur- und Baupraxis zu liefern.

Methode

Research-by-Design

Für die Entwicklung der Prototypen nutzte das Projekt die iterative und entwurfsbasierte Research-by-Design Methode. Anhand von physischen Experimenten wurden die zugrundeliegenden Konzepte und Technologien in Bezug auf architektonische Parameter – wie Integration in den Entwurfsprozess, strukturelle Eigenschaften und Nutzbarkeit – getestet und evaluiert. Im Lauf des Projektes kam ein weiterer Parameter hinzu: die physische Integration aller drei Prototypen zu einem Mini-Bausystem.

Die erste Phase der Prototypenentwicklung fand in den Laboren der drei Universitätspartner statt und wurde in monatlichen Videokonferenzen mit dem Gesamtteam diskutiert. In der zweiten Phase wurden einige physische Experimente in Tests mit großformatigen 3D-Druckern bzw. Freiform-Wickelrobotern der Industriepartner hochskaliert. Videokonferenzen mit dem ganzen Team fanden alle zwei Wochen statt, technische Details wurden in zusätzlichen Videokonferenzen wie auch anhand der gemeinsamen Arbeit an digitalen Modellen auf verschiedenen Online-Plattformen diskutiert. In der letzten Projektphase wurde der Entwurf der Prototypen finalisiert und diese mit großformatigen Maschinen hergestellt. Auch in dieser Phase wurden die Prototypen noch während der Fertigung iterativ angepasst. Die Videokonferenzen fanden ab Mitte August wöchentlich statt, um den Entwurf der Prototypen sowie die komplexe Logistik der Ausstellungsplanung im Detail zu koordinieren. Weiterhin gab es zusätzlichen Austausch nach Bedarf in Videokonferenzen und anhand der gemeinsamen Arbeit an digitalen Modellen auf Online-Plattformen.

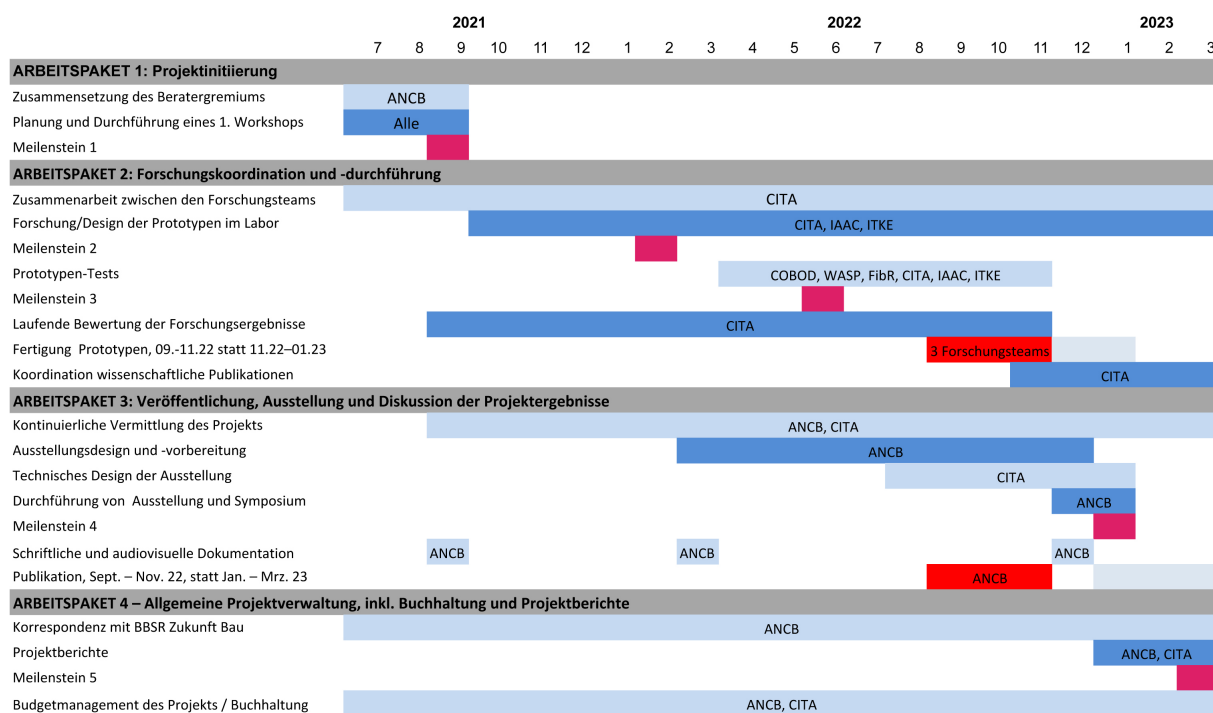
Diskurs-Schleife

Zur Etablierung eines gezielten, praxisnahen Diskurses wurde eine Feedback-Schleife methodisch in den Projektablauf eingebaut.

- Während des Auftaktworkshops am 27. und 28. September 2021 beim ANCB zu Anfang der Entwicklungsphase der Prototypen gab das aus geladenen Expert:innen bestehende Beratungsgremium Feedback sowohl in Form von Impulsvorträgen, die das Projekt in globale wie lokale, sozialpolitische und praxisbezogene Kontexte einordneten wie auch individuell zu technischen und konzeptionellen Aspekten der von den Forschungsteams vorgelegten ersten Vorschläge für die Prototypen. Der öffentliche Veranstaltungsteil verschaffte den Forschungsteams die Gelegenheit, weiteres Feedback vom lokalen Fachpublikum in Berlin einzuholen.
- Ein zweiter Workshop bei IAAC in Barcelona am 28. Februar und 1. März 2022 diente insbesondere dazu, Feedback von den Industriepartnern einzuholen. Erste Entwurfsideen für die drei Prototypen wurden präsentiert. Die Industriepartner betonten die Notwendigkeit, dass die Prototypen eine praktische Anwendbarkeit dieser Materialien und Fertigungstechniken in naher Zukunft demonstrieren müssen. Dieses Feedback beeinflusste die Entscheidung, die drei Prototypen in der Ausstellungsinstallation physisch miteinander zu verbinden, auch wenn dies den Forschungsprozess komplexer machen sollte.
- Eine Feedbackschleife wurde auch in die Konzeptualisierung der Ausstellung eingebaut, um sicherzustellen, dass die Prototypen einen praxisnahen – im Gegensatz zu einem rein technisch-abstrakten – Diskurs stimulieren würden. Ein vorläufiges Ausstellungskonzept wurde dem BBSR-Projektberater Arnd Rose im April 2022, das ausgearbeitete Konzept schließlich im Juni 2022 präsentiert. Die eingeladene Keynote-Sprecherin für das Abschluss Symposium, Ingrid Halland, nahm ebenfalls an dem Juni-Termin teil, was eine fließende und ergänzende Integration der praxisnahen Kontextualisierung der Prototypen in die Ausstellung und das Symposium ermöglichte.

Planung und Ablauf

Das Projekt war in vier Arbeitspakete unterteilt, wobei fünf Meilensteine definiert und erreicht wurden. Das Projekt wurde gemäß Arbeitsplan umgesetzt. Beim Auftaktworkshop im September 2021 wurde gemeinsam mit den Forschungsteams und dem Projektbetreuer des BBSR, Arnd Rose, die Entscheidung getroffen, die Prototypen nicht während der Ausstellungsdauer digital zu fertigen, sondern zuvor bei den jeweiligen Partnern, um aus den fertigen Prototypen eine Ausstellungsinstallation zu generieren. Außerdem wurde sich darauf verständigt, dass die Projektpublikation bereits bei Ausstellungseröffnung und nicht erst am Ende des Projekts veröffentlicht werden sollte.



Projektablauf: Arbeitsplan

Projektstart: Juli 2021 – September 2021

Zu Beginn des Projekts wurde ein Beratungsgremium aufgestellt und ein halböffentlicher Workshop zusammen mit den Projektpartnern durchgeführt. In diesem wurden die Anforderungen an die Prototypen spezifiziert und die unterschiedlichen Herangehensweisen der drei Teams abgestimmt.

Zusammensetzung des Beratergremiums

Die Expert:innen für das Beratungsgremium wurden aus vier Themenbereichen ausgewählt, zu denen Vertreter:innen vom ANCB in Absprache mit den Forschungsteams eingeladen wurden.

Als *fiktive Auftraggeber* wurden die Projektbetreuer:innen des BBSR eingeladen sowie Vertreter:innen von politischen Initiativen zum klimafreundlichen Bauen und privaten und öffentlichen Wohnungsbaugesellschaften gesucht. Auffallend war das mangelnde Interesse seitens der Berliner Wohnungsbaugesellschaften wie auch der privaten Wohnungsunternehmen, auch nur eine passive Rolle zu übernehmen.

Dieser Themenbereich wurde vertreten durch:

- Arnd Rose, stellvertretender Referatsleiter, Forschung und Innovation im Bauwesen, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), Bonn
- Philipp Misselwitz, Managing Director, Bauhaus Erde, Berlin
- Stine Kolbert, Wissenschaftliche Mitarbeiterin, Lehrstuhl für Planungs- und Bauökonomie, TU Berlin
- Bernd Wegener, em. Professor, Sozialwissenschaften, Humboldt-Universität zu Berlin

Die Expertise von *Fachkolleg:innen* aus der Architekturpraxis und -forschung war zu den Aspekten Materialität, Prototypenentwicklung und Innovation auf den Markt bringen erwünscht.

- Eike Roswag-Klinge, Professor für Constructive Design & Climate Adaptive Architecture, Natural Building Lab, TU Berlin
- Jana Revedin, Professorin für Architektur und Stadtplanung, Ecole Spéciale d'Architecture, Paris
- Ingrid Halland, Professorin für Architekturgeschichte und -theorie, Oslo School of Architecture and Design

Um von den Erfahrungen der *Bauindustrie* hinsichtlich CO₂-Reduzierung und Ressourceneffizienz zu lernen, wurden die folgende Berater eingeladen:

- Davide Zampini, Head of Global R&D, CEMEX, Brugg
- Reto Grolimund, BKW Innovation Center, Bern
- Harald Kloft, Professor und Leiter des Digital Building Fabrication Laboratory (DBFL), TU Braunschweig.

Der Auftaktworkshop

- Termin: Montag, 27. September 2021 – Dienstag, 28. September 2021
- Veranstaltungsort: ANCB The Aedes Metropolitan Laboratory, Christinenstr. 18–19, 10119 Berlin
- Zuschauer:innen vor Ort: 30, Eintritt: frei

Die Teilnehmer:innen des anderthalbtägigen Auftaktworkshops beim ANCB waren die Forschungsteams, das Beratungsgremium sowie – aufgrund der Corona-Maßnahmen – die interessierte Öffentlichkeit in begrenzter Anzahl. Der Workshop hatte folgende Ziele:

- die Präsentation der Herstellungsmöglichkeiten durch die drei Forschungsteams
- Abstimmung und Festlegung der Leistungsanforderungen an die zu fertigenden Prototypen mit dem Beratungsgremium (Meilenstein 1)

Am ersten Workshoptag, Montag, 27. September 2021, stellten die Forschungsteams ihre Ansätze vor und Mitglieder des Beratungsgremiums kontextualisierten die gesellschaftspolitischen Herausforderungen bei der Anwendung dieser innovativen Ideen in der Bauwirtschaft. Weitere Mitglieder des Gremiums und die Öffentlichkeit brachten sich in die Diskussion ein. Am Nachmittag fand eine interne Arbeitssitzung statt, bei der die Fachkolleg:innen des Beratergremiums den einzelnen Forschungsteams 1:1-Feedback gaben. Während der Arbeitssitzung am zweiten Workshoptag, Dienstag, 28. September 2021, konnten die Forschungsteams ihre Prototypideen weiter verfeinern, um diese dann den Gremiumsmitgliedern zu präsentieren und von ihnen weiteres Feedback einzuholen.



Fotos: Erik-Jan Ouwerkerk

Zusammenarbeit zwischen den Forschungsteams und dem Beratungsgremium beim Auftaktworkshop

Prototypenentwicklung: Vorbereitung der Forschung

Zwischen Juli und September 2021 arbeiten die drei Teams individuell im jeweiligen Dreigespann aus Forschenden, Lehrenden und Industriepartnern, um sich ein Bild davon zu machen, welche Methodik und Technologie während der 18 Monate des Projekts am besten umgesetzt und realistischerweise für die Ausstellung im Dezember 2022 gebaut werden könnte. Der Workshop im September 2021 ermöglichte es dem gesamten Team erstmals, sich zu treffen und die verschiedenen Standpunkte, Forschungsmethoden, Technologieentwicklung und Prototyping-Kapazitäten zu diskutieren. Gemeinsam wurde eine erste Idee für die Ausstellung definiert, die angestrebten Ziele und Narrative geklärt, die logistischen und methodischen Grenzen klarer definiert und die große Chance für eine Zusammenarbeit erkannt. Diese Phase wurde also mit einem ersten Entwurf des Ausstellungs- und Publikationskonzepts abgeschlossen, das mit dem Beratungsgremium diskutiert wurde.

Phase 1: Forschung und Prototypenentwicklung. September 2021 – Februar 2022

Forschungsteam IAAC – WASP

Folgende Aspekte 3D-gedruckter Erdarchitektur wurden von acht IAAC-Forscher:innen zusammen mit 20 Studierenden des IAAC-3DPA-Masterprogramms mithilfe der Research-by-Design-Methode erforscht:

- strukturelle Stabilität (Wände),
- Verbindungen zwischen Erd- und Holzelementen (Dach),
- Wasserschutz (Fassade),
- Geopolymerverstärkung (Fundament),
- Luftströmung (Belüftung),

- Wärmedämmung (Wände),
- thermische Verbindung (Fenster und Türen) und
- Ergonomie (integrierte Möbel).

Der für jeden Aspekt erstellte Katalog von Entwurfslösungen wurde in virtuellen Simulationen und mit physischen Prototypen und vermaßten Aufbauten getestet. Am Ende des Semesters, im Januar und Februar 2022, wurden die Lösungen im Entwurf eines 40 m² großen Hauses im Maßstab 1:1 kombiniert, das als Demonstrationsprototyp *TOVA* für das Forschungsprojekt *Living Prototypes* diente. Dieser wurde mit dem 3D-Drucker von WASP auf dem IAAC-Campus Valladaura in einem Naturpark am Stadtrand von Barcelona gedruckt.

Forschungsteam ITKE – FibR

Nach der Entscheidung, einen Prototyp für eine Flachs-Holz-Verbunddecke herzustellen, lag der Schwerpunkt in der ersten Phase der Forschung auf der Untersuchung des Materialsystems und der damit verbundenen Entwicklung der Fasersyntax für Naturfasern. Die Erkenntnisse und Erfahrungen aus den früheren ITKE-Projekten *Maison Fibre* und *LivMatS Pavilion*, die mit synthetischen bzw. natürlichen Fasern realisiert wurden, bildeten hierfür den Ausgangspunkt. Die Zusammensetzung von Naturfasern, die in biobasierte Harze eingebettet sind, wurde erforscht und getestet. Relevante Herstellungsparameter wie Viskosität, Klebeverhalten, Harz imprägnierung und Lebensdauer sowie mechanische Parameter wie Elastizitätsmodul, Festigkeit und Bruchverhalten wurden berücksichtigt und bewertet.

Forschungsteam CITA – COBOD

In der ersten Phase des Projekts ging es darum, das 3D-Druckverfahren vom Roboterdruck in kleinem Maßstab bei CITA auf eine großangelegte, gantry-basierte Produktion bei COBOD hochzuskalieren sowie Sensor- und Datenprotokolle für die Beobachtung des Materialverhaltens während der Aushärtung einzurichten. Um diese Entwicklungen zu testen, wurde zwischen Dezember 2021 und Januar 2022 die erste Demonstrator-"Wand" aus 3D-gedruckten Cellulose-Paneelen hergestellt und evaluiert. Das Design der Wand wurde tektonisch erforscht, um einen neuen Materialausdruck mit einer erstaunlich feinen Struktur zu erreichen. Alle Teile der Wand wurden während der Herstellung und Aushärtung genau überwacht, und verschiedene Strategien des maschinellen Lernens wurden an den Daten getestet und in einer wissenschaftlichen Publikation vorgestellt. Die Ergebnisse hatten über die wissenschaftlichen Erkenntnisse hinaus Auswirkungen, da die Cellulosewand seitdem in Kopenhagen, Sydney und Eindhoven ausgestellt wurde.

Halbzeit-Workshop

- Termin: Montag, 28. Februar 2022 – Dienstag, 1. März 2022
- Veranstaltungsort: IAAC – Institute for Advanced Architecture of Catalonia, Barcelona
- Zuschauer:innen: 30 über Livestream

Der Zeitpunkt des Halbzeit-Workshops fiel mit der Fertigstellung des IAAC-WASP-Demonstrators (*TOVA-Erdhaus*, das erste 3D-gedruckte Erdhaus Spaniens) zusammen. Dies gab dem gesamten Projektteam die Möglichkeit, die Ergebnisse vor Ort zu sehen und zu diskutieren, weswegen beschlossen wurde, den zweiten Projektworkshop bei IAAC in Barcelona durchzuführen.

Neben der Exkursion zum IAAC Valladaura-Campus am Stadtrand von Barcelona, um dort den *TOVA*-Demonstrator vor Ort zu besichtigen, umfasste der Workshop eine öffentliche, livegestreamte

Veranstaltung, bei der die Forschungsteams die im Wintersemester erzielten Forschungsergebnisse präsentierten und diskutierten, sowie zwei intensive Arbeitssitzungen, um die Gestaltung aller drei Prototypen zu präzisieren und ein erstes Konzept für die Ausstellungsinstallation im Aedes Architekturforum vorzubereiten.

Eine wichtige Entscheidung, die während dieses Workshops getroffen wurde, war es, die drei Prototypen physisch miteinander zu verbinden, um zu zeigen, dass Biomaterialien in Bausysteme integriert werden können. Die Industriepartner trugen entscheidend dazu bei, dieses Ziel voranzutreiben, auch wenn dies eine zusätzliche Komplexität bei der Gestaltung der Prototypen mit sich brachte.

Phase 2: Forschung und Prototypenentwicklung. Februar – November 2022

Forschungsteam IAAC – WASP

Nach der Ausarbeitung des Ausstellungskonzepts während des Halbzeitworkshops in Barcelona konzentrierten sich IAAC und WASP auf den Entwurf von vier Erdwänden in Größe und Gewicht, die für den Transport von Barcelona nach Berlin und einen überwiegend manuellen Aufbau vor Ort geeignet sind. Der Ausstellungsentwurf sah vor, dass diese vier Wände den architektonischen Raum seitlich mit einem Minimum an Material einrahmen sollten. Die Wände wogen insgesamt 3,2 Tonnen und waren etwa 1 m x 1,2 m groß, um die Handhabung zu erleichtern. Sie konnten gestapelt werden, um so höhere Wände zu schaffen.

Da die Erdwände mit den Cellulose-Paneelen von CITA-COBOD sowie den Verbunddecken aus Flachs von ITKE-FibR verbunden werden sollten, wurden die Verbindungsdetails in einem intensiven Dialog zwischen diesen Forschungsteams geklärt. Die endgültige Produktion in vollem Maßstab fand bei IAAC statt und erforderte 36 Druckstunden über einen Zeitraum von drei Wochen, wobei der großformatige WASP-Roboter und die von WASP bereitgestellte Extrusionstechnologie zum Einsatz kamen. Die Wandstücke wurden 17 Tage lang getrocknet, bevor sie per LKW nach Berlin transportiert wurden, wo sie während der Ausstellungszeit weiter trockneten.

Parallel zur Herstellung der Wandprototypen untersuchten IAAC-Studierende und -Forschende in einer Reihe von Visualisierungen für die *Living Prototypes*-Ausstellung und -Publikation die Architektur, die mit dieser Technologie in größerem Maßstab möglich ist und veranschaulichten so das Potenzial der 3D-Druck-Architektur, sich an unterschiedliche programmatische, klimatische und kulturelle Kontexte anzupassen.

Forschungsteam ITKE – FibR

In der zweiten Forschungsphase entwickelten ITKE und FibR eine strukturelle Morphologie auf Grundlage der in der ersten Phase durchgeführten Materialuntersuchungen. Die weitere Entwicklung fand an einem Flachs-Holz-Hybridsystem statt, einschließlich der Auswirkungen auf die Materialschnittstellen. Verschiedene Kombinationen von Faserverbundwerkstoffen und Holzwerkstoffplatten wurden sowohl numerisch als auch experimentell untersucht, wobei die strukturelle Leistung, die Verarbeitbarkeit und die wirtschaftliche Machbarkeit berücksichtigt wurden.

Ein Prototyp im Maßstab 1:2 mit den Maßen 2 m x 1 m wurde entworfen und gebaut, um verschiedene Syntaxlogiken und Materialisierungsproblematiken zu untersuchen. Dies ermöglichte es dem Forschungsteam, die Systemoptionen auf der Grundlage der Windbarkeit der Syntax, der Faserqualität und der Machbarkeit der Verbindungselemente zu bewerten. Dieser Prototyp diente auch als erster Test für das Säulendetail, das mit dem 3D-gedruckten Erdsystem verbunden werden sollte. Studierende des ITECH Integrative Technologies & Architectural Design Research M.Sc. Programms

waren an der Entwicklung des Systemdetaildesigns sowie an den damit verbundenen Diskussionen beteiligt, als Teil ihrer Ausbildung in *Computational Design to Fabrication Thinking*.

Forschungsteam CITA– COBOD

In der zweiten Forschungsphase wurde das forschungsbasierte 3D-Druckverfahren mit einem COBOD BOD2 542 Gantry 3D-Drucksystem getestet, das über eine druckbare Fläche von 12,1 m x 9,0 m x 3,5 m verfügt. Dies geschah unter anderem, um zu bestätigen, dass der auf Cellulose-Xanthan basierende Slurry mit diesem für Betonmischungen konzipierten System gedruckt werden kann. Dieser Prozess wurde von intensiven Diskussionen sowie Testdrucken im kleinen Maßstab begleitet. Ein abschließender Druckdurchgang ergab vier gedruckte Platten, die mit etwa 260 cm x 90 cm x 15 cm größer waren als die in der ersten Phase gedruckten Platten für die Cellulosewand.

Darüber hinaus wurde die Grundrezeptur des Druckmaterials auf verschiedene Eigenschaften sowohl des Slurrys wie auch der Druckergebnisse getestet, wie z. B. Druckfähigkeit, Materialausdruck und Materialverhalten. Außerdem wurde geprüft, ob diese Eigenschaften innerhalb der gedruckten Platten abgestuft werden können. Diese Art der Materialabstufung wurde in einem Workshop mit Studierenden an der Royal Danish Academy im Jahr 2021 und – unabhängig vom *Living Prototypes*-Projekt – auf der ACADIA-Konferenz 2022 an der University of Pennsylvania erforscht. Die Ergebnisse flossen in die *Living Prototypes*-Ausstellung ein. Auf der Grundlage dieser Tests und der damit verbundenen Forschungsarbeiten wurde beschlossen, einen weiteren Prototyp für eine Wandpaneelsystem zu entwickeln, um die Fähigkeit zu demonstrieren, Biokunststoffe aus Knochenleim zu skalieren und auf spezifische Bedürfnisse abzustimmen. Dieser Prototyp mit dem Namen *Radicant* bestand aus 24 einzelnen Platten, die auf einer Fläche von 5 m x 7 m an der Wand des Ausstellungsraums bei Aedes angebracht wurden.

Phase 3: Veröffentlichung, Ausstellung und Diskussion der Projektergebnisse

Publikation

Während des Auftaktworkshops im September 2021 wurde die Entscheidung getroffen, die Projektpublikation bereits zur Eröffnung der Ausstellung und nicht, wie zunächst geplant, erst zum Ende der Projektlaufzeit zu veröffentlichen. Somit sollte eine größere Reichweite und eine größere Vermittlungswirkung innerhalb der Architekturpraxis sichergestellt werden. Aus denselben Gründen wurde auch entschieden, dass die Publikationssprache Englisch sein soll. Die Publikation hatte zum Ziel, sowohl die Ausstellung als auch den Forschungsprozess und das Potenzial der Forschung für die Architektur zu dokumentieren.

Die Struktur für Publikation und Ausstellung wurde dem BBSR-Ansprechpartner Arnd Rose im April 2022 vom Projektteam vorgeschlagen. Dieses Konzept wurde in einem vom Grafikbüro Hanzer Liccini erstellten Gestaltungskonzept grafisch interpretiert und dem Projektteam im Juni 2022 vorgestellt.

Die Vorbereitung erfolgte im August und September, wobei die redaktionelle Rolle vom ANCB (Dunya Bouchi und Áine Ryan) übernommen wurde. Ende September 2022, während einer Arbeitssitzung bei CITA in Kopenhagen, wurden alle noch ausstehenden Entscheidungen getroffen. Die Fertigstellung des Materials erfolgte im Oktober, gefolgt von Schlusslektorat und Layout, um die Übergabe der Druckdatei Mitte November und somit eine termingerechte Auslieferung der Publikation zur Ausstellungseröffnung sicherzustellen.

Symposium, 9. Dezember 2022

Das Abschluss-symposium fand beim ANCB am Nachmittag der Ausstellungseröffnung statt und beschäftigte sich mit der Frage, welche Auswirkungen das Entwerfen mit Biomaterialien und digitaler Fertigung für die Architektur haben könnte. Nach einer Projektvorstellung durch die Forschungsteams, stellte die Keynote-Sprecherin Prof. Ingrid Halland von der Oslo School of Architecture theoretische Überlegungen zu *Living Prototypes* an und diskutierte gemeinsam mit Arnd Rose vom BBSR, den Forschungsteams und dem Publikum über diese zukunftsweisende Art des Bauens.

Zum Symposium wurde über den Newsletter, die Webseite und die Social Media-Kanäle des ANCB eingeladen, ca. 22.000 internationale Abonnent:innen erhalten den Newsletter des ANCB, die Social-Media Kanäle haben ca. 20.000 Follower.

Ausstellung, 10. Dezember 2022 – 25. Januar 2023

Entwicklung des kuratorischen Konzepts

Die Hauptschritte in der Entwicklung des kuratorischen Konzepts waren wie folgt:

- Auftaktworkshop, September 2021: Entscheidung, fertige Prototypen statt der 3D-Drucker bzw. Roboter im Prozess der Fertigung auszustellen
- Halbzeitworkshop in Barcelona, Feb./Mrz. 2022: Entscheidung, die drei Prototypen miteinander zu einem 'Mini-Bausystem' zu verbinden
- Vorstellung des Ausstellungskonzeptentwurfs gegenüber dem Fördergeber: 26. April 2022
- Vorstellung und Abnahme des überarbeiteten Ausstellungskonzepts gegenüber dem Fördergeber: 28. Juni 2022
- Die Feinabstimmung und die logistische Planung der Ausstellung erfolgte in wöchentlichen Videokonferenzen mit dem Gesamtteam: August bis Dezember 2022

Das ursprüngliche Ausstellungskonzept sah vor, die Prototypen während der Laufzeit der Ausstellung vor den Augen der Zuschauer:innen herzustellen. In diesem Szenario wären die Maschinen der Industriepartner – 3D-Drucker bzw. Roboter – sowie gegebenenfalls das Rohmaterial aus Massa Lombarda in Italien, Stuttgart und Kopenhagen nach Berlin transportiert und in den Ausstellungsräumen installiert worden. Während der siebenwöchigen Dauer der Ausstellung wären die Prototypen somit nach und nach digital gefertigt worden, mit dem Ziel, vom Rohmaterial am ersten Tag der Ausstellung zum fertigen Prototyp am letzten Tag den gesamten Prozess der digitalen Fertigung sichtbar zu machen. Während des Auftaktworkshops des Projekts im September 2021 wurde als Ergebnis der Diskussionen zwischen Projektpartnern, Fördergeber und Beratungsgremium die Entscheidung getroffen, statt dieses Produktionsprozesses die fertigen Prototypen auszustellen. Von Forschungsinhärenten Überlegungen abgesehen war die kuratorische Grundlage für diese Entscheidung die Überlegung, dass dem Hauptzweck der Ausstellung – Wissenstransfer und Evaluation der Konzepte – besser durch eine konkrete Veranschaulichung der Architektur, die mit diesen Materialien und Fertigungsprozessen möglich ist, gedient sei. Die schlussendlich realisierte zentrale Installation wurde mit dem Ziel konzipiert, einen sehr vertrauten Raum – das Zuhause, die eigene Wohnung – so konkret wie möglich anzudeuten, um die Vorstellungskraft der Besucher anzuregen: diese wurden ermutigt, die Ausstellung mit allen Sinnen wahrzunehmen, die Prototypen zu befühlen und an ihnen zu riechen. Über die um den zentralen Prototyp herum installierten ergänzenden Exponate wurden die Materialforschung und die Herstellungsprozesse detaillierter und in größerer Tiefe verdeutlicht.

Eine weitere wichtige Entscheidung wurde während des Halbzeit-Projektworkshops in Barcelona getroffen, und zwar die drei Prototypen physisch miteinander zu verbinden, um zu zeigen, dass

Biomaterialien in Bausysteme integriert werden können. Die Industriepartner trugen entscheidend dazu bei, dieses Ziel voranzutreiben, auch wenn dies eine zusätzliche Komplexität bei der Gestaltung der Prototypen und der Ausstellungsinstitution mit sich brachte.

Auf der Basis dieser Entscheidungen wurden die Leitfragen formuliert, die den Ausstellungsbesuch prägen sollten: Wie könnte unser Zuhause aussehen und sich anfühlen, wenn es ohne den Einsatz fossiler Brennstoffe gebaut würde? Was wäre, wenn die Forschung zu biobasierten Baumaterialien einen tiefgreifenden Wandel in der Art und Weise, wie Architektur entworfen und gebaut wird, bewirken könnte? Welches Wissen können architektonische Prototypen über ressourcenschonende Design- und Bauprozesse vermitteln?



Fotos: Erik-Jan Ouwerkerk

Die Ausstellung *Living Prototypes* im Aedes Architekturforum am Eröffnungstag, 9.12.2022

Ausstellungsinstallation

- Aufbau: 3. – 8. Dezember 2022
- Abbau: 25. – 27. Januar 2023

In einer für die Ausstellung gefertigten 1:1 Wohnrauminstallation, die in den Grundriss einer typischen 2-Zimmer-Wohnung integriert war, wurden die drei Prototypen aus Erde, Flachs und Biokunststoff zusammengeführt. Visualisierungen der Architektur, die mit diesen Biomaterialien und digitalen Fertigungsmethoden möglich ist, sowie eine Auswahl von Rohmaterialproben und Testmodellen aus weitergehenden Untersuchungen der einzelnen Forschungsteams boten zusätzliche Informationen und betteten das Projekt in einen größeren Kontext ein. Die Entwicklung der Biomaterialien und Prototypen während der Projektlaufzeit wurde anhand von Video- und Fotomaterial illustriert.

Zum Auf- und Abbau kamen Mitglieder der Forschungsteams aus Barcelona, Stuttgart und Kopenhagen nach Berlin, um die Ausstellung zu installieren bzw. zu deinstallieren. Die beiden oben beschriebenen kuratorisch-konzeptionellen Entscheidungen – fertige Prototypen, statt Maschinen im Prozess des Herstellens auszustellen und die drei Prototypen zu einem Mini-Bausystem zu verbinden – hatten weitreichende logistische Konsequenzen für die Ausstellungsinstallation, verbunden mit erheblichen Herausforderungen, die gelöst werden mussten.

- Das Gewicht des Prototypen aus 3D-gedruckter Erde überschreitet die maximale Tragfähigkeit des Galeriebodens von 4,0 kN/m² deutlich. Zum Zweck der Lastenverteilung wurde ein Podest gebaut, auf dem die zentrale Prototypen-Installation platziert wurde.
- Die Verbindung der drei Prototypen zu einem Bausystem machte den Aufbau erheblich komplexer und langwieriger als ursprünglich geplant.

- Der Transport des fragilen Materials, insbesondere aus Barcelona (Erdprototyp) war aufgrund der erhöhten Energiepreise signifikant teurer als ursprünglich für den Transport des 3D-Druckers kalkuliert.
- Die Forschung lief auch während der eigentlichen Ausstellungsdauer weiter, indem insbesondere CITA über Sensoren Daten zu Temperaturschwankungen, Luftfeuchtigkeit und Materialverhalten sammelte, um diese Informationen auszuwerten und in zukünftige Forschungen einfließen zu lassen.

Eröffnung und Finissage

Die Ausstellung wurde am 9. Dezember 2022 um 18:30 Uhr mit Redebeiträgen u.a. von Dirk Scheinemann, Abteilungsleiter Bauen und Wohnen im Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen eröffnet.



Fotos Erik-Jan Ouwerkerk

Eröffnungsrede von Dirk Scheinemann, BMWSB (links) und die Ausstellung am Eröffnungsabend (rechts).

Am letzten Tag der Ausstellung, 25. Januar 2023, wurden die Schnittmengen mit der Buchpräsentation *Architectures of Weaving. From Fibers and Yarns to Scaffolds and Skins* für eine Finissage genutzt. *Architectures of Weaving* entstand im Rahmen des Excellence-Clusters *Matters of Activity* und verbindet Architektur und Textilität aus der Perspektive von Design, Kulturwissenschaft, Mikrobiologie sowie Materialwissenschaft und Textiltechnologie. Die Ausstellung blieb über die üblichen Öffnungszeiten hinaus bis 22 Uhr geöffnet und die Zuschauer:innen der Buchpräsentation wurden eingeladen, diese im Anschluss an die Veranstaltung zu besuchen. Die Projektvertreter:innen aus Barcelona, Stuttgart und Kopenhagen waren bereits vor Ort für den Abbau und beantworteten Fragen der Besucher:innen.

Öffentlichkeitsarbeit

Die Ausstellung wurde über folgende Kanäle angekündigt und zur Eröffnungszeremonie eingeladen:

- 1. Presseversand der Pressemitteilung am 16. November 2022 an 1.100 Journalist:innen weltweit
- 2. Presseversand mit der Ankündigung des Erscheinens der Publikation am 12. Dezember 2022, dem Montag nach der Eröffnung an 1.100 Journalist:innen weltweit
- Ausgewählten Pressevertreter:innen wurde in der Woche nach der Eröffnung ein Rezensionsexemplar der Publikation mit der Post zugeschickt
- Einladungskarte: Versand der gedruckten Einladungskarte am 25. November 2022 an 1.400 Empfänger:innen

- Newsletter: Versand am 1. Dezember 2022 auf Deutsch und Englisch an ca. 22.000 internationale Abonnent:innen
- Social Media: Diverse Postings vor und während der Ausstellung auf Instagram, LinkedIn, Facebook, ca. 25.000 Follower



Fotos: Erik-Jan Ouwerkerk

Bereiche in der Ausstellung, die den Rohzustand der Biomaterialien zeigen

Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das *Living Prototype*-Konsortium basierte auf einem bewährten Kooperations-Netzwerk der akademischen Partner innerhalb des *INNOCHAIN EU Marie Curie* Netzwerks (www.innochain.net), langjähriger enger Zusammenarbeit der akademischen Partner mit ihren jeweiligen Industriepartnern und einem intellektuellen Diskurs mit dem ANCB im Rahmen der von Zukunft Bau kofinanzierten Diskussionsreihe *Craftsmanship in the Digital Age*.

Diese Grundlage erwies sich als entscheidend für das Projekt. Die Partner konnten auf guten Arbeitsbeziehungen aufbauen, mit Kommunikationskanälen auf allen Ebenen, basierend auf Vertrauen und Offenheit, was es ermöglichte, Fragen kritisch und konstruktiv zu diskutieren. Dies war vor allem in den späteren Phasen des Projekts hilfreich, als Entscheidungen über technische Fragen von eher persönlichen und weniger objektiven Entscheidungen über Design, Stil und Ausdruck begleitet wurden.

Ein weiterer wichtiger Aspekt der Zusammenarbeit war die gemeinsame Forschungs- und Entwicklungsmethodik aller akademischen und Industriepartner. Diese Methodik wurde in der Forschungscommunity entwickelt, in der die akademischen Partner:innen² vertreten sind und wird nun in der Praxis weitgehend übernommen. Sie basiert auf Material- und Designproben und gipfelt in entwurfsgeliteten Demonstratoren, wie den Prototypen, die für die Ausstellung *Living Prototypes* im Aedes Architekturforum entwickelt wurden.

Das Beratungsgremium

Das Beratungsgremium wurde in das *Living Prototypes*-Projekt methodisch eingebaut, mit dem Ziel, einen praxisnahen Projektfokus und -diskurs zu etablieren. Im Auftaktworkshop beim ANCB gab das Beratungsgremium Feedback sowohl in Form von Impulsvorträgen, die das Projekt in globale wie lokale, sozialpolitische und praxisbezogene Kontexte einordneten wie auch individuelles Feedback zu den technischen und konzeptionellen Aspekten der von den Forschungsteams vorgelegten ersten Vorschläge für die Prototypen. Zur Zusammensetzung des Beratungsgremiums siehe Seite 16 und Seite 47.

Das geringe Interesse an dem *Living Prototypes*-Projekt aus der Wohnungswirtschaft deutet auf eine große strukturelle Lücke zwischen der Material- und Fertigungstechnologie und deren Anwendung in der Immobilienentwicklung hin.

Die Projektpartner: Kollaboration und Erweiterung bestehender Netzwerke

Das Projekt bot die Möglichkeit, lokale Netzwerke auf Teamebene zu erweitern. Durch die öffentlichen Teile des Auftakt- und Halbzeitworkshops sowie durch das Symposium und die Ausstellung konnten die Teams mit anderen Akteuren aus diesem Bereich der Forschung und der Architekturpraxis sowie sonstigen Interessierten in Kontakt treten. So wurde beispielsweise nach der Begegnung mit dem Bauhaus Erde während des Auftaktworkshops die bestehende Beziehung³ durch die Spende der IAAC-Lehmwände an das Labor des Bauhaus Erde in Berlin zur weiteren Erprobung und Ausstellung nach Ende der Ausstellung gestärkt.

² Ramsgaard Thomsen, M., Tamke, M., 2009. Narratives of making: thinking practice led research in architecture. In: Verbeke, J. (Hrsg.), *Communicating (by) Design 2009*. TU Leuven, S. 1–8.

³ Siehe <https://iaac.net/mass-is-more/> zur Zusammenarbeit zwischen IAAC und Bauhaus der Erde im Oktober 2022

Das Forschungsprojekt selbst ermöglichte es den Partnern, die wissenschaftliche Zusammenarbeit durch die gemeinsame Erforschung inhaltlicher Aspekte zu stärken, und zwar nicht nur zwischen den *Living Prototypes*-Partnern, sondern auch durch das Einbringen der erarbeiteten wissenschaftlichen Kenntnisse und Fragen in andere Kooperationen. CITA, zum Beispiel, kooperierte mit:

- dem Fachbereich Bioengineering der Dänischen Technischen Universität in Bezug auf die Skalierung, die Entwicklung von Materialrezepten und die Demonstration von tektonischen Systemen für Biokomposite und
- mit der University of Reading im Hinblick auf maschinelles Lernen aus physischen Artefakten.

Die prototypischen Ergebnisse des Projekts *Living Prototypes* ermöglichten es den Partnern auch, ihre Präsenz in ihren Forschungsbereichen zu erhöhen. So konnte das CITA-COBOD-Forschungsteam mit der im Dezember 2021 am Ende der ersten Forschungsphase hergestellten Cellulosewand zu einem internationalen Diskurs über additive Fertigung mit Biomaterialien beitragen. Dies führte zu neuen Kontakten und einer Einladung zur Teilnahme an der Ausstellung und dem internationalen Symposium *Robots That Build* an der TU Eindhoven, parallel zur *Dutch Design Week 2022*. Weitere Kontakte konnten mit der University of Pennsylvania geknüpft werden, wo im Rahmen der ACADIA-Konferenz 2022⁴ ein Workshop zum 3D-Druck mit Biopolymeren auf Cellulosebasis stattfand.

Für ANCB The Aedes Metropolitan Laboratory bot das *Living Prototypes*-Projekt die Gelegenheit, seine Expertise im Bereich der Architekturkommunikation im Rahmen eines wissenschaftlichen Forschungsprojekts anzuwenden, und zwar sowohl in Bezug auf den methodischen Prozess als auch auf die Ergebnisse. Es war das erste Mal, dass ANCB als Koordinator eines Forschungsprojekts und Teil der Echtzeitforschung fungierte. Über die zentrale Netzwerk- und Vermittlungsarbeit des ANCB innerhalb des eigentlichen Projekts hinaus, nutzte der ANCB sein bestehendes Netzwerk wie auch thematische Synergien mit der Buchpräsentation *Architectures of Weaving. From Fibers and Yarns to Scaffolds and Skins*, die am 25. Januar 2023, dem letzten Tag der Ausstellung, stattfand, um eine Finissage für *Living Prototypes* zu organisieren.

⁴ Bio-polymer Printing: strategies for material grading of bio-based material <https://2022.acadia.org/workshops22/>

Ergebnisse

Entwurf und Anfertigung von Prototypen

Das Hauptziel des *Living Prototypes*-Projekts war es, den Mehrwert von Biomaterialien und digitaler Fertigung für die Architekturpraxis im Hinblick auf die Gestaltung und das ressourcenschonende Bauen zu verdeutlichen, zu vermitteln sowie erleb- und greifbar zu machen. Dies geschah durch den Entwurf und die Anfertigung von Prototypen, die die Potenziale von neuen bzw. wiederentdeckten biobasierten Baumaterialien sowie digitalen Planungs- und Fertigungsprozessen nutzten und veranschaulichten.

Die Prototypen

Zusammenfassung des Forschungsprozesses für den Prototyp: 3D-gedruckte Erdwand

Das Ziel des IAAC-WASP-Teilprojekts war es, den 3D-Druck von Erdarchitektur weiter zu erforschen. Erde ist ein traditionelles und kostengünstiges Baumaterial, für das in vielen lokalen Kontexten umfangreiches technisches Wissen vorhanden ist. IAAC und WASP setzen 3D-Druck und computergestütztes Design ein, um die strukturelle und klimaregulierende Leistung von Erdbauten zu verbessern, ihre ästhetischen Fähigkeiten zu steigern und den Bauprozess effizienter und praktikabler für u.a. Verdichtungen der gebauten Umwelt zu machen.

Die erste Phase des Projekts wurde am IAAC im Rahmen des Programms *3D Printing Architecture (3DPA)* durchgeführt und umfasste vier Unterphasen:

- **TECHNE:** Aus den Erfahrungen der Vergangenheit und von interdisziplinären Experten:innen lernend, definierte und testete das Team die am besten geeigneten Maschinen-, Material- und Designansätze zur Entwicklung einer 3D-gedruckten Architektur aus Erde.
- **FORSCHUNG:** Mithilfe von kurzen Iterationszyklen, algorithmischem Design und Rapid Prototyping untersuchte das Team sechs verschiedene Forschungsbereiche, durch die der 3D-Druck einen neuen Leistungsvorteil gegenüber traditioneller Architektur bieten kann: Tageslicht, Struktur, Isolierung, Wasser, Faserverstärkung und Belüftung.
- **KONSTRUKTION:** Am Ende dieser Phase wurde ein Prototyp eines kleinen Hauses entworfen und gebaut, um die Ergebnisse der vorherigen Forschungsschritte umzusetzen und zu testen. Einhergehend mit der Maßstabsvergrößerung wurde insbesondere darauf geachtet, die Baustellenlogistik zwischen digitalen und manuellen Prozessen zu definieren. Als Ergebnis wurde ein 9 m² großer Prototyp namens *TOVA* auf dem Campus des IAAC Valldaura Labs in der Nähe von Barcelona im 3D-Druckverfahren hergestellt.
- **VISION:** Auf der Grundlage des *TOVA*-Prototyps im Maßstab 1:1 wurde eine Reihe von architektonischen Visionen entwickelt, um zu untersuchen, wie die Technologie für die zahlreichen Wohnbedürfnisse auf der ganzen Welt eingesetzt und angepasst werden könnte. Insbesondere wurden die folgenden klimatischen und kulturellen Kontexte untersucht: eine Hütte in Burundi, ein Wohnheim in Ägypten, ein Familienhaus in Marokko, ein Wohnhaus in China sowie ein Apartmentgebäude in Deutschland.

Auf Grundlage dieser Forschung lag der Schwerpunkt des endgültigen Ausstellungsprototypen auf der Demonstration der feinen Details, die mit 3D-Druck möglich sind, und der spezifischen Materialität, die bei der Umsetzung performativer und kultureller Fragen des Wohnens erreicht werden kann. Die logistischen Herausforderungen, die sich während der Konstruktion des *TOVA*-Prototypen ergaben, machten deutlich, dass die Produktion des Ausstellungsprototypen off-site erfolgen musste, so dass die gedruckten Teile auf eine von Barcelona nach Berlin transportable Größe beschränkt wurde.

Infolgedessen wurde eine 'dekonstruierte' Strategie erforscht, bei der kleinere zu größeren Elementen kombiniert werden. Parallel dazu wurden die Verbindungselemente zwischen der 3D-gedruckten Erde und den roboter-gewickelten Flachsfaserkompositen sowie den 3D-gedruckten Cellulose-Wandschirmen untersucht.



Fotos: IAAC

Nahaufnahme des Druckprozesses (links) und des fertigen Demonstrators, der im Februar 2022 auf dem IAAC-Campus in Valldaura gedruckt wurde (rechts).

Zusammenfassung des Forschungsprozesses für den Prototyp: Filament-gewickelte Flachsfaser-Deckenplatte

Der Schwerpunkt der ITKE-FibR-Forschung lag auf der Untersuchung der Morphologie von leichten Naturfaserstrukturen unter Verwendung der Technik des kernlosen Wickelns von Fäden. Im Laufe des letzten Jahrhunderts hat sich die Bauindustrie zu einer der materialintensivsten und umweltschädlichsten Tätigkeiten des Menschen entwickelt. Mit Naturfasern verstärkte, roboter gefertigte Verbundstrukturen bieten eine praktikable, ressourceneffiziente Alternative zu konventionellen Bauweisen und stellen somit einen wichtigen Schritt in Richtung Nachhaltigkeit in der Architektur dar. Faserverbundwerkstoffe zeichnen sich durch ein hervorragendes Verhältnis von Festigkeit zu Gewicht aus und bieten somit eine ausgezeichnete Grundlage für die Entwicklung innovativer, materialeffizienter Leichtbaustrukturen. Neuartige Co-Design-Prozesse, die gleichzeitig geometrische, materielle, strukturelle, produktionstechnische, ökologische und ästhetische Anforderungen berücksichtigen, sowie fortschrittliche roboter gestützte Fertigungstechniken, die auf natürliche Materialien angewandt werden, können eine einzigartige Architektur schaffen, die sowohl ökologisch als auch ausdrucksstark ist.

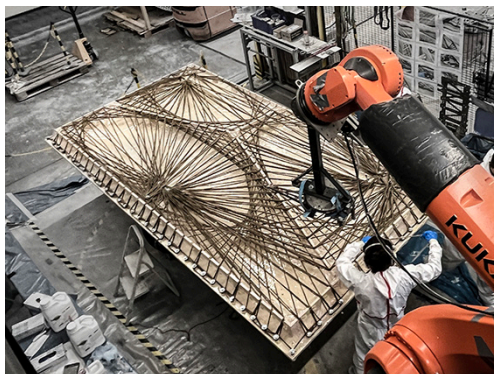
Der ITKE-FibR-Demonstrator besteht aus einem leichten Deckensystem, das aus einer Holzwerkstoffplatte in Kombination mit flachsfaserverstärkten Verbundelementen besteht. Bei einem typischen zehnstöckigen Stahlbetongebäude macht die Struktur etwa 75 Prozent des Gesamtgewichts aus, was bedeutet, dass der größte Teil des Materials lediglich zur Stützung des Eigengewichts benötigt wird. Je höher das Gebäude, desto höher der Anteil. Leichte Deckensysteme gehen dieses Problem an, indem sie das Verhältnis von Festigkeit zu Gewicht im Tragwerkssystem durch innovative Geometrie- und Materialsysteme erhöhen. Die tragenden Elemente können mit Hilfe von (natur)faserverstärkten Verbundwerkstoffen, die auf eine vormontierte Holzstruktur gewickelt werden, roboter gestützt vorgefertigt werden. Der Demonstrator zeigt die genannten Aspekte, insbesondere als Teil eines integrierten Bauelements zusammen mit 3D-gedruckten Wänden aus Lehm und Cellulose.

Durch die Integration des Konzepts der weit verbreiteten Leichtbau-Hängesysteme konnte die Hybridstruktur die Kräfte über das Fasersystem hauptsächlich auf Zug leiten, wodurch die globale

Struktureffizienz erhöht und der Materialverbrauch und die Herstellungsstunden reduziert wurden. Die Entwurfsstrategie für das gesamte Tragwerkssystem ermöglichte die Verwendung von handelsüblichen Dreischichtplatten, die nur selten als Haupttragelemente eingesetzt werden.

- Um verschiedene Wickelwinkel außerhalb der Ebene zu ermöglichen, wurde im Rahmen des Projekts eine neue Geometrie der Wickelstifte entworfen und getestet. Frühere Studien ergaben, dass die Gesamtstruktur dazu neigt, an den Verbindungsstellen zu versagen, wo das Faserbündel am Rand der Stifte geknickt wird, wenn die Richtungen der ein- und ausgehenden Fasern weniger rechtwinklig zur Stiftachse sind. Die Ergebnisse des Projekts zeigten jedoch, dass bei der neuen Stiftkonstruktion weniger Fasern geknickt werden. Weitere strukturelle Tests sind erforderlich, um die Leistungsverbesserung zu verifizieren.
- Was die Herstellung betrifft, so diente die vormontierte Holzstruktur auch als Wickelrahmen, so dass keine zusätzlichen Stahlrahmen gebaut werden mussten. Dadurch wurde die geometrische Flexibilität der Struktur erhöht und die Möglichkeit geschaffen, innerhalb eines einzigen Fertigungsaufbaus unterschiedliche Elementgrößen, Tiefen und Ankerpositionen zu wählen.

Durch die Zusammenführung von Forschungsergebnissen auf den Ebenen der Material-, Schnittstellen- und Struktursysteme mit Überlegungen zur Herstellung zielte das Projekt nicht nur darauf ab, einen Prototyp für die Ausstellung zu entwerfen, sondern auch den Arbeitsablauf zwischen Entwurf und Herstellung weiterzuentwickeln. Die Struktur besteht aus einem variablen, punktgestützten, in mehrere Richtungen überspannenden Plattensystem. Durch die Integration des Systems in vertikal stützende Erdwände und Celluloseplatten wurden Entwurfsiterationen im Rahmen des Arbeitsablaufs getestet, um den Raum für die Nutzer:innen, die strukturelle Effizienz und die Herstellbarkeit zu optimieren. Durch die Erweiterung des Verständnisses von maßgeschneiderten Aspekten in dieser laufenden Forschung ergibt sich das Potenzial, den Designraum und den strukturellen Ausdruck über bestehende Texturen und Typologien hinaus weiter zu erforschen.



Fotos: ITKE

Das ‚Filament-Winding‘ auf der Deckenplatte mit einem 6-Achsen-Roboterarm (links) und die Beschichtung von Flachsfasern mit einem Naturharz (rechts)

Zusammenfassung des Forschungsprozesses für den Prototyp: Wandschirme aus Cellulose und Knochenleim

Im Rahmen des CITA-COBOD-Teilprojekts wurden Strategien entwickelt und demonstriert, um bereits vorhandene Materialrezepte auf Cellulosebasis auf Komponenten im Architekturmaßstab zu übertragen. Darüber hinaus wurde ein völlig neues Verfahren für den 3D-Druck im Architekturmaßstab mit Materialien, die auf Abfallprodukten aus der Lebensmittelindustrie basieren, entwickelt und demonstriert.

Die Hochskalierung der 3D-Druckverfahren mit dem cellulosebasierten Biopolymer – vom Roboterdruck in kleinem Maßstab bei CITA bis zur gantry-basierten Produktion in großem Maßstab bei COBOD – wurde erfolgreich durchgeführt. Im Dezember 2021 konnte ein erster vollmaßstäblicher Prototyp gebaut werden. Hierfür wurde die bestehende Roboterdruckanlage um ein neues Pumpsystem erweitert, das auf einem Trichter aus der Zementindustrie basiert. Dies ermöglichte die Herstellung von Stücken von etwa 70 cm x 70 cm x 15 cm. Ihr Schrumpfungsverhalten wurde mit einem Monitoring-Framework und einer anschließenden Machine-Learning-Analyse beobachtet. Die Erkenntnisse aus diesem Prozess waren wie folgt:

- Der Demonstrator-Prototyp bestätigte die These, dass Daten aus der Beobachtung physikalischer Sonden (in der im Testdruck) für die Vorhersage des Materialverhaltens durch maschinelles Lernen genutzt werden können.
- Es zeigte sich jedoch, dass der Testdruck größer sein sollte als die bisher hergestellten.
- Ein Engpass wurde bei der Aushärungszeit des für den Druck verwendeten Cellulose/Xanthan-Materials festgestellt. Da dieses Material einen Wassergehalt von etwa 70 Prozent hat, dauerte die Trocknung an der Luft vier Wochen. Diese Zeit könnte durch energieintensive Ofentrocknung verkürzt werden, würde aber immer noch im Bereich von Wochen liegen.

In einer zweiten Phase des Projekts wurde das forschungsbasierte 3D-Druckverfahren erfolgreich hochskaliert und in einem COBOD BOD2 542 Gantry 3D-Drucksystem getestet, das eine bedruckbare Fläche von 12,1 m x 9,0 m x 3,5 m hat. Die CITA-COBOD-These, dass 3D-Drucksysteme für Slurrys wie Beton auch für das von CITA entwickelte Biopolymer auf Cellulose-Xanthan-Basis verwendet werden können, wurde bestätigt. Die Tests bestätigten, dass dies sogar mit dem größten derzeit möglichen System für den 3D-Druck von Beton, dem COBOD-Drucksystem, möglich ist.

- In den Tests wurde bestätigt, dass mit dem COBOD-System große Platten gedruckt werden können. Es wurden Protokolle für den Druck und die Aushärtung von großformatigen Elementen entwickelt.
- Diese Forschung führte zum Prototyp *Cellulose Screens*, der aus vier großen Teilen (90–250 cm) aus Xanthan-basiertem Cellulose-Biokunststoff (aus recyceltem Papier) bestand und im Juni 2022 mit dem COBOD-Drucksystem gedruckt wurde.
- Das für die Aushärtung mit minimalem Energieaufwand entwickelte Protokoll war erfolgreich. Dieses Protokoll basiert ausschließlich auf dem Betrieb von zwei Luftentfeuchtern in einem Raum mit den bedruckten Teilen. Diese Geräte verbrauchen weit weniger Energie als andere wärmebasierte Aushärtungsprotokolle. Allerdings verlängert sich die Aushärtungszeit auf einen Monat.

Außerdem wurden Tests mit dem Grundrezept für das Druckmaterial durchgeführt.

- Es wurde festgestellt, dass Änderungen der Art und Abstufung der Cellulosequelle (z. B. Recyclingpapier, Rinde, Leinen, Baumwolle) sowie des Bindemittels (Xanthan oder Knochenleim) zu einer Vielzahl von Materialausdrücken und -verhaltensweisen führen können.
- Die Auswertung der Drucke mit cellulosebasiertem Material hat gezeigt, dass eine Abstufung mit dieser Materialklasse schwierig ist, zumal eine Hochskalierung bedeuten würde, dass die erforderlichen Zeiträume für die Aushärtung zu lang für die Dauer des *Living Prototypes*-Projekts wären. Die Aushärtungszeiten von mehreren Monaten für größere Stücke erfordern eine besser kontrollierte und speziell beheizte Umgebung. Die Anmietung oder der Bau und Betrieb einer solchen energieintensiven Umgebung lag nicht im Rahmen des aktuellen Projekts.
- Diese Verhaltensweisen können auf bestimmte Stellen einer entworfenen Struktur abgestimmt und dort eingesetzt werden, wie die ausgestellten Proben und die *Radicant*-Struktur zeigten.

Die Forschung und Entwicklung im Bereich der Abstufung von Biokunststoffen wurde durch den bei Aedes ausgestellten Demonstrationsprototypen *Radicant* vorangetrieben. Dieser erforscht ein wichtiges Merkmal von Biokunststoffen, die Fähigkeit, die Mischung an lokale Anforderungen anzupassen. Dieser Ansatz ermöglicht die Anpassung eines einzelnen Materials während des Druckvorgangs, so dass es eine Reihe von Anforderungen abdecken kann, indem die Materialien mit modernsten Technologien gemischt werden. Allerdings sind diese Verbundwerkstoffmischungen dafür bekannt, dass sie nicht nachhaltig sind und Probleme beim Recycling und der Wiederverwendung verursachen.

Der Ersatz von Xanthan in der ursprünglichen Slurry-Rezeptur durch ein anderes Bindemittel, Knochenleim, ermöglichte eine wesentlich kürzere Aushärungszeit und eröffnete die Möglichkeit, ein Materialsystem zu entwickeln und zu demonstrieren, das je nach den lokalen Bedürfnissen abgestuft werden kann. Bei der Herstellung des *Radicant*-Prototypen wurden neue Verfahren und Technologien erfolgreich entwickelt und bewertet.

- Ein neues volumetrisches Designsystem wurde entwickelt, um das Design und die Herstellung des abgestuften Materials zu steuern.
- Es wurde ein neuartiges, beheiztes, robotergestütztes 3D-Drucksystem entwickelt, da Knochenleim nur bei einer Temperatur von 75 Grad gedruckt werden kann.
- 3D-Drucklogik für Knochenleimmaterial
- Neue Tektonik für Paneele auf Knochenleimbasis
- Auf 3D-Scan und Laserprojektion basierende Registrierungs-, Mess- und Anpassungsprozesse für mit Knochenleim gedruckte Elemente, da diese beim Aushärten stark schrumpfen.

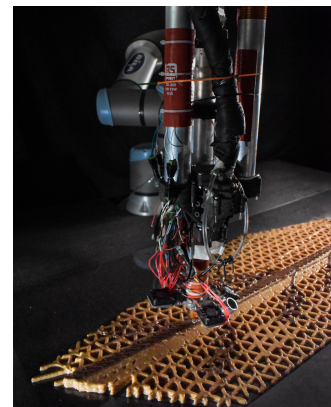
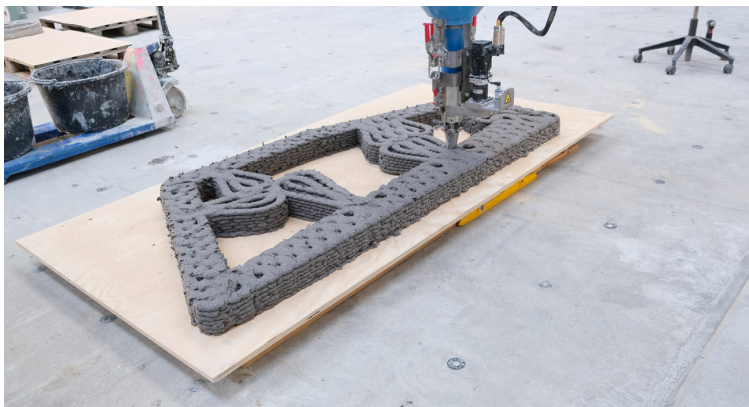


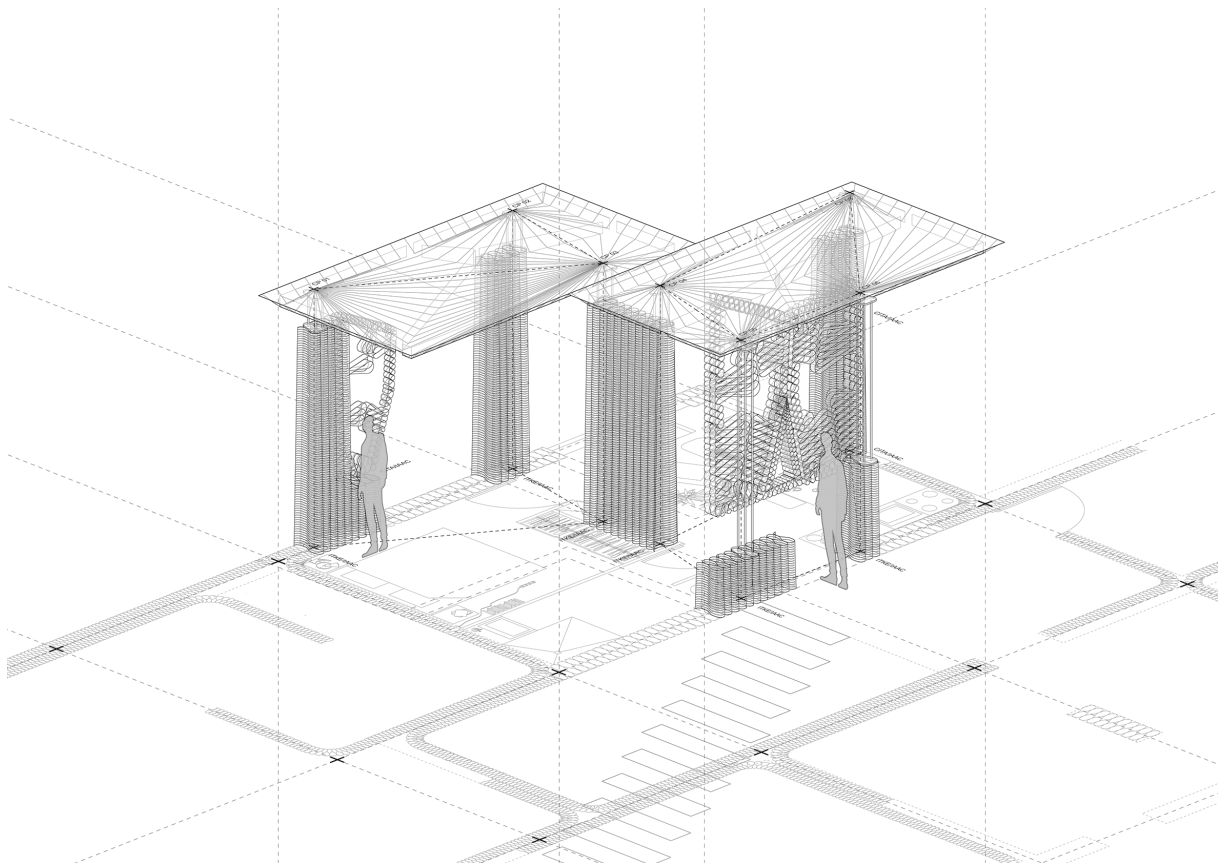
Foto: CITA

3D-Druck des *Cellulose Screens* aus Xanthan-basiertem Cellulose-Biokunststoff (aus recyceltem Papier) mit dem COBOD-Drucksystem (links). 3D-Druck eines *Radicant* Wandpanels aus Knochenleim-basiertem Cellulose-Biokunststoff (rechts).

Verbindung der drei biobasierten Materialsysteme

Der Entwurfsprozess nahm während des zweiten Workshops in Barcelona eine Wendung, als die Möglichkeit erkannt wurde, über den Projektauftrag und die bestehenden Grenzen der drei Forschungsprozesse durch die Integration der drei sehr unterschiedlichen Materialsysteme in einem einzigen Prototypen hinauszugehen. Vor dem Workshop hatten die Teams das Design und die technischen Lösungen für die Herstellung ihrer Prototypen entwickelt, einschließlich der Montage und des Zusammenfügens von Teilen innerhalb ihrer jeweiligen Systeme. Die Verbindung dieser Systeme stellte eine neue Herausforderung dar, um eine gemeinsame Designsprache sowie Schnittstellen

zwischen den Systemen zu finden, die deren unterschiedliche Verhaltensweisen und Fähigkeiten respektieren.



Zeichnung: IAAC/ITKE/CITA

Konzeptzeichnung für die Integration der drei Prototypen zur räumlichen Definition eines hypothetischen Wohnraums

Während des Auftaktworkshops im September 2021 wurde jedes der drei Materialsysteme mit einem Standardbauteil in einem typischen Gebäude in Verbindung gebracht: 3D gedruckte Erde mit tragenden Wänden, der Holz-Flachsfaser-Verbundstoff mit einer Decken-/Bodenplatte und der 3D-gedruckte Biokunststoff mit Leichtbauwänden und Trennwänden. Um die Zusammenführung der drei Komponenten zu konzeptualisieren, wurde beschlossen, sie als hypothetischen Wohnraum in einem zukünftigen Wohnhaus in Berlin zu verbinden.

Materialspezifischer Designprozess

Die Ergebnisse hinsichtlich der Designprozesse und -technologien spiegeln die Herausforderungen wider, die das starke Materialverhalten von Biomaterialien sowohl in Bezug auf das Material als auch auf die Logistik mit sich bringt.

Konzeptioneller Ansatz für die Gestaltung von Verbindungen

Das Projekt generierte Wissen über funktionierende Schnittstellen zwischen biobasierten Materialsystemen. Es wurden neuartige Verbindungen erfunden, die belastbar sind, off-site hergestellt und vor Ort angepasst werden können. Während des Entwicklungsprozesses wurde deutlich, dass der traditionelle Ansatz zur Herstellung von Verbindungen zwischen Materialsystemen auf Grundlage einer vereinbarten statischen Position und erwarteter Lasten und Toleranzen nicht geeignet war. Das

Materialverhalten und die zeitlichen Beschränkungen führten zu ständig wechselnden Bedingungen. Es entstand eine zweifache Lösung:

- Während der Konstruktion und der Fertigung. Größere Änderungen wurden während der Fertigung über einen parametrischen, adaptiven Rahmen erfasst. Dieser wurde von jeder Partner:in festgelegt. Während des gesamten Prozesses spiegelten sich Änderungen in einem Materialsystem in den anderen wider.
- Während der Montage. Kleine Abweichungen konnten von den Verbindungen aufgefangen werden, die so konzipiert waren, dass sie in hohem Maße anpassungsfähig waren.

Zeitraumen und zeitliche Aspekte der Fertigung mit Biomaterialien

Die zeitlichen Aspekte biobasierter Materialien wurden insbesondere bei den Prototypen aus 3D-gedruckter Erde und Cellulose deutlich. Diese beiden Materialsysteme werden nass hergestellt und das Prozesswasser muss nach dem Druck je nach klimatischen Bedingungen, Belüftung und Materialstärke über einen Zeitraum von Wochen bis Monaten verdunsten. Infolgedessen mussten lange Vorlaufzeiten und eine frühe Fertigstellung des Designs sowie die komplexe Logistik des Drucks, der Trocknung und möglicherweise des Transports der nicht vollständig ausgehärteten Materialien berücksichtigt werden. Der Projektzeitraum von 1,5 Jahren reichte nicht aus, um diesen Anforderungen gerecht zu werden und die Herausforderungen der globalen Lieferketten verkürzten den Zeitplan noch mehr. Daher fand die abschließende Trocknung der Lehmwände während der Ausstellungszeit statt. Es traten Risse im Material auf, die jedoch die strukturelle Kapazität der Wände nicht beeinträchtigten.

Projektspezifische Beschränkungen

Die Umstellung des Projekts von Laborprototypen auf die Herstellung eines 1:1-Prototyps an einem realen Standort erforderte erhebliche Anpassungen. Dies gilt nicht nur für die offensichtlichen Beschränkungen, die sich aus den räumlichen und strukturellen Gegebenheiten des Ausstellungsraums sowie aus finanziellen und zeitlichen Zwängen ergaben, sondern auch für Fragen der Logistik und des Transports, der Lieferketten, der Herstellungszwänge und der für die Aushärtung benötigten Zeit. Im Rahmen des Projekts wurde festgestellt, dass das erforderliche Wissen über diese Bedingungen erst im Laufe des Prozesses aufgebaut werden und nicht im Voraus erlangt werden konnte.

Demonstration von Spitzenforschung

Ein weiteres Ziel war es, die fortgeschrittene Forschung zu biobasierten, lokalen und recycelten Materialien zu demonstrieren durch die Schaffung von Erkenntnissen darüber, wie digitale Prozesse für das Bauen im Bestand adaptiert und in existierende Material- und Konstruktionssysteme integriert werden können.

Entwurfsmethodik

Die Forschungsmethodik, die zur Ideenfindung, Bewertung und Skalierung der drei Materialsysteme eingesetzt wurde, hat sich auch für die gemeinsame Entwicklung der Verbindungen zwischen den Systemen bewährt, obwohl die drei Teams geografisch voneinander getrennt waren.

Methodische Research-By-Design Zyklen

Der iterative Prozess, der dieser Methodik zugrunde liegt, ist in Phasen der Spekulation und Ideenfindung, Tests in kleinem Maßstab und Prototypen in vollem Maßstab gegliedert. Das *Living Prototypes*-Projekt durchlief zwei dieser Zyklen. Der erste fand parallel in den jeweiligen Forschungsteams statt und der zweite, gemeinschaftlich für den integrierten 1:1-Ausstellungsprototypen. Die verhältnismäßig kurze Projektdauer machte es schwierig, ein Modell des integrierten Materialsystems in kleinem Maßstab zu bauen. Dies wäre ein nützlicher Schritt gewesen,

um den Produktionsprozess für die drei Materialsysteme zu testen und die Produktionsketten zu verknüpfen. Aus den Zwischenergebnissen konnten jedoch genügend Erkenntnisse gewonnen werden und mit wöchentlichen Videokonferenzen und der umfassenden Nutzung webbasierter Projektkommunikationsplattformen wurden gut funktionierende Feedback-Kanäle eingerichtet, um die rechtzeitige Entwicklung und Herstellung des endgültigen 1:1-Ausstellungsprototypen zu gewährleisten.

Umfang des Forschungsauftrags

Während des Entwurfs des 1:1-Prototypen wurde deutlich, dass Einblicke in Kriterien von Immobilienwirtschaft und Endnutzer:innen in Bezug auf Gestaltung und Bereitstellung von Wohnraum für die Entwurfsaufgabe von Vorteil gewesen wären, z. B. in Bezug auf Trends, Debatten und Vorhersagen hinsichtlich zukünftiger Bedürfnisse und Rahmenbedingungen für das Wohnen im Berliner Kontext. So spiegelt der endgültige Prototyp eher die tektonischen und fertigungstechnischen Anforderungen an Biomaterialien wider, was den Grad der erreichbaren Schlankheit und die Artikulation für einen Wohnkontext betrifft.

Denken in Szenarien

Es wurde eine Methode für Entwurfsszenarien angewandt, um die mit Biomaterialien mögliche Architektur vorstellbar zu machen. Dabei wurden architektonische Techniken für gemeinsames Denken und Visualisierungen eingesetzt, wie z. B. das Zeichnen von Grundrissen und 3D-Renderings. Die Methode ermöglichte es, einige der technischen Einschränkungen bei der Erstellung von bildbasierten Beschreibungen zukünftiger Lebenssituationen, die vom Projektteam, externen Beratern und der Öffentlichkeit bewertet werden konnten, zu überwinden. Es zeigte sich jedoch, dass komplexere Fragestellungen, z.B. zur Interaktion der Nutzer mit der Architektur, mit diesen Techniken nicht beantwortet werden konnten.

Zusammenarbeit mit Studierenden

Die Forschungsprozesse aller drei akademischen Partner sahen die Einbindung von Studierenden in Workshops, Kursen und Studios vor, die parallel zum Projekt stattfanden. Die Ergebnisse waren für das Projekt sehr aufschlussreich und steigerten seine Wirkung in allen Phasen des Projekts: bei der anfänglichen Entwicklung und Erprobung von Materialprototypen, bei der Entwicklung maßstabsgetreuer Details für Materialsysteme, bei der Erprobung maßstabsgetreuer Produktionsprozesse, bei der Kontextualisierung der Materialsysteme in der architektonischen, gebauten Umgebung und bei der Spekulation über ihre Bewohnbarkeit. Ein gemeinsamer Workshop von IAAC und ITKE war entscheidend für die Definition der Schnittstelle zwischen den Erdwänden und den fasergewickelten Deckenelementen und lieferte den Hintergrund für die Formulierung einer gemeinsamen Vision.

Herstellungsverfahren

Ursprünglich sollten die Prototypen während des Ausstellungszeitraums vor Ort und idealerweise mit lokalen Materialien hergestellt werden. Die Fertigungsroboter und insbesondere die großformatigen Druckgeräte der Industriepartner WASP und COBOD sind so konzipiert, dass sie für den 3D-Druck vor Ort transportabel sind. Die Forschungsprozesse zeigten jedoch, dass diese Faktoren nicht auf die Herstellung aller untersuchten Biomaterialien zutrafen. Weitere Überlegungen bestärkten die Entscheidung, die Prototypen off-site unter fabriklähnlichen Umwelt- und Raumbedingungen herzustellen:

- Die langen Aushärtungszeiten der Materialien (z. B. drei Monate in trockenen Innenräumen für Cellulose und zwei bis drei Monate für Erddrucke) erschwerten die Logistik und hätten eine monatelange Lagerung vor Ort im Aedes Architekturforum vor der Ausstellung erfordert.

- Mit den beiden slurrybasierten Materialien kann nur eine begrenzte Anzahl von Schichten pro Tag gedruckt werden. Der Drucker und das Bedienpersonal hätten bei der Arbeit vor Ort erhebliche Ausfallzeiten pro Tag. In fabrikähnlichen Situationen können die Teams und Maschinen an mehreren Elementen und Projekten pro Tag arbeiten.
- Transport, Aufstellung und Kalibrierung der Maschinen sind nicht trivial und erfordern Zeit und Kapital. Eine große Mannschaft ist für diese Aufgabe erforderlich. Vor allem das Wickeln der Fasern ist technisch zu anspruchsvoll, um vor Ort zu erfolgen.
- Alle drei Produktionsverfahren profitieren von einem gut kontrollierten Innenraumklima. Eine trockene und warme Umgebung ist nicht nur für Produktion und Aushärtung von Vorteil, sondern auch für Gesundheit und Sicherheit. Alle Prozesse erfordern eine strenge Prozesskontrolle. Es ist schwierig, die erforderliche Ausrüstung und die erforderlichen Bedingungen in einer rauen Außenumgebung bereitzustellen. Die Herstellung vor Ort während der Ausstellung im Berliner Klima der Monate Dezember und Januar erschien unzumutbar.
- Zwar wurden in der Vergangenheit lokale Materialien für die additive Fertigung verwendet, doch müssen diese Materialien analysiert und getestet werden, um das Herstellungsverfahren an ihre Eigenschaften anzupassen. Die für diesen Analyse- und Kalibrierungsprozess erforderliche Zeit und das Budget waren im Rahmen des Projekts nicht verfügbar.

Diese im Rahmen des Projekts gewonnenen Erkenntnisse widerlegen einige der naiven Anfangsüberlegungen zur Biomaterial- und additiven Fertigung. Sie bestätigen jedoch die laufende Entwicklung hin zu einem höheren Vorfertigungsgrad in der Bauindustrie. Ein Vergleich mit etablierten Materialien wie Beton oder Ziegeln zeigt, dass auch diese eine beträchtliche Aushärtungszeit nach der Produktion benötigen; eine Zeit, die in der Regel bei architektonischen Entwürfen nicht beachtet wird, aber bei der Kostenkalkulation und Bauplanung stets präsent ist.

Die Forschungsergebnisse zeigen ein Dilemma der additiven Fertigung auf, das sich durch die Technologie der drei Forschungsprojekte zieht. Die Effizienz dieser Technologie ergibt sich aus der Integration der Herstellung des Materials mit der Produktion der architektonischen Elemente. Diese beiden Prozesse sind in der Regel in hochgradig kontrollierte Umgebungen für die Materialherstellung (z. B. Stahl-, Glas- oder Holzprodukte) und rauere Umgebungen, in denen der Bau der architektonischen Elemente stattfindet, getrennt; z. B. Werkstätten oder sogar Baustellen, wo das Material zu Platten, Stäben usw. verarbeitet wird. Ob man daraus schließen kann, dass eine qualitativ hochwertige additive Fertigung nur in teuren, hochkontrollierten Umgebungen stattfinden kann, muss diskutiert werden. In diesem Fall jedoch erforderte die Entscheidung für eine off-site Produktion neue Ansätze in Bezug auf Technik und Logistik: Die Notwendigkeit, über drei Tonnen 3D-gedruckter Erdelemente von Barcelona nach Berlin zu transportieren, machte es erforderlich, die Wandelemente in Teilen zu produzieren, die vor Ort gestapelt werden können, da große/hohe Elemente den mechanischen Bedingungen des Transports nicht standhalten würden. Die Arbeit mit Biomaterialien und additiver Fertigung wirkt sich auf das Designdenken aus, da sie Design und Produktion miteinander verbindet: Anstatt zu denken, dass ‚neue‘ Fertigungsmethoden allgemeine Lösungen für herkömmliche Konstruktions- und Fertigungsprobleme bieten, wird die Notwendigkeit hervorgehoben, die Zeit zu berücksichtigen, die für den Übergang von der Ressource zum Endprodukt erforderlich ist.

Verbreitung und kritischer Diskurs

Die beiden Workshops, die parallel zur Entwicklung der Prototypen stattfanden sowie das Abschluss-symposium am Tag der Ausstellungseröffnung zielten darauf ab, eine öffentliche und praxisnahe Debatte darüber zu ermöglichen, wie digitale Fertigung mit Biomaterialien im konventionellen Bauprozess eingesetzt werden könnte. Die Ausstellung und der Ausstellungskatalog stellten sowohl den Entwurfsprozess der gefertigten Prototypen wie auch die angestoßene kritische

Diskussion über die Bauindustrie dar, mit dem Ziel, Anregungen für weitere interdisziplinäre Forschung und experimentelle Entwicklung in der Architektur- und Baupraxis zu liefern.

Das Ziel dieses Projektbestandteils war es, einen kritischen Diskurs über eine 'digitale Baukultur' anzuregen, um Architektur als Untersuchungsform und Methode zur Generierung von Lösungen für dringende gesellschaftspolitische Fragen zu stärken. Das Projekt sollte ebenfalls demonstrieren, wie digitale Technologien es der Bauwirtschaft ermöglichen können, bei Bau, Nutzung und Instandhaltung von Gebäuden den Forderungen nach natürlichen, biologisch abbaubaren und wiederverwertbaren Materialien in einer Kreislaufwirtschaft zu entsprechen. Darüber hinaus sollten die Prototypen den Mehrwert der digitalen Fertigung für die Architekturpraxis im Hinblick auf die Gestaltung und das ressourcenschonende Bauen von Wohnräumen erleb- und greifbar machen.

Die wichtigsten Maßnahmen zur Umsetzung des kritischen und praxisnahen Diskurses waren die ausführliche Präsentation des Projekts in den beiden Workshop-Veranstaltungen, dem Abschluss Symposium, der Publikation und der Ausstellung sowie der Stellungnahme des Forschungsteams.

Konzeptionelle Stellungnahme

Auf der übergreifenden konzeptionellen und ideologischen Ebene erarbeitete das Forschungsteam eine Stellungnahme dazu, inwiefern Biomaterialien einen grundlegenden Wandel in der Art und Weise herbeiführen werden, wie Architekt:innen über den Entwurf und die Herstellung von Architektur denken. Diese Stellungnahme wurde mit Unterstützung der ANCB-Lektorinnen verfasst, die die Protokolle und Notizen aller Diskussionen, die während des Projekts stattfanden, einschließlich der intensiven Workshops mit den Projektberatern, der Öffentlichkeit und dem gesamten Team der Projektpartner, zusammenstellten. Die Stellungnahme wurde in die Publikation aufgenommen, die bei der Eröffnung der Ausstellung an das Publikum verteilt wurde.

Die Stellungnahme mit dem Titel *Another Logic in Architectural Design* beginnt mit dem Argument, dass es für die Architekturdisziplin an der Zeit ist anzuerkennen, dass überkommene Werte, Prinzipien und tief verwurzelte Positionen nach wie vor die Gestaltung und den Bau von Architektur beeinflussen, obwohl sie zur Verschlimmerung der Klimakrise beitragen. Es wird beschrieben, wie Biomaterialien zu einem klimabewussteren und sozial nachhaltigeren Ansatz in der Architektur führen können, indem Architektur auf Prozesse und nicht auf Gegenstände ausgerichtet wird. Außerdem werden neue Werte für die Architektur umrissen:

- Erweiterung nachhaltiger Baupraktiken um die soziale Dimension
- Gestaltung mit Materialszenarien und Lebenszyklen
- Abkehr vom Primat der Materialoptimierung im digitalen Design hin zu anderen Idealen und Logiken
- Ein Neudenken von Standardisierungen im Bauwesen

Publikation

- Titel: Living Prototypes. Digital Fabrication With Biomaterials
- Reihe: ANCB Edition #7,
- Verlag: ANCB The Aedes Metropolitan Laboratory
- Herausgeberinnen: Dunya Bouchi, Áine Ryan
- Format: 148 x 210 mm, 64 Seiten, Sprache: Englisch, ISBN: 978-3-944083-07-0
- Erscheinungsjahr: 2022, Auflage: 450, Schutzgebühr: 10 Euro

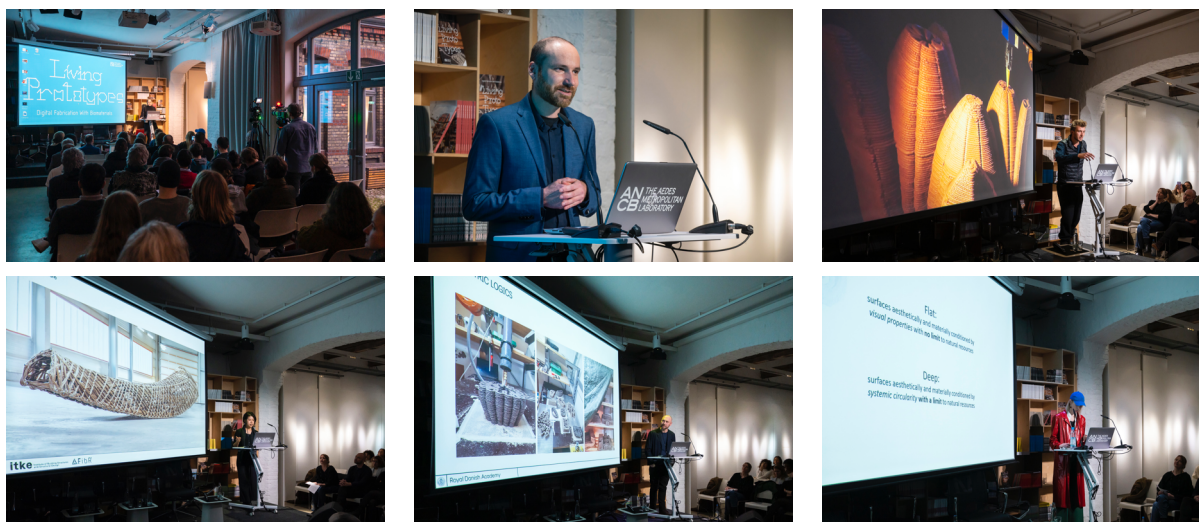
Die Publikation mit dem Titel *Living Prototypes. Digital Fabrication With Biomaterials* erschien am 9. Dezember 2022 als siebter Band der ANCB-Reihe *Editions*. Den Zuschauer:innen des Symposiums wurden insgesamt 150 Exemplare kostenlos zur Verfügung gestellt, und alle Projektpartner erhielten weitere Exemplare. Eine Online-Version kann auf der ANCB-Website eingesehen werden.

Die Publikation beginnt mit einer Beschreibung des Projektkontexts, bestehend aus Vorwörtern der ANCB-Direktoren Hans-Jürgen Commerell und Kristin Feireiss sowie des BBSR-Projektbetreuers Arnd Rose, einer Einführung in den Forschungsrahmen von Martin Tamke und einem kuratorischen Überblick der Herausgeberinnen Dunya Bouchi und Áine Ryan. Inhaltlich ist die konzeptionelle Darstellung der Forschung in der Publikation analog zu der in der Ausstellung strukturiert, nämlich anhand der Kapitel *Materialien (Materials)*, *Prototypen (Prototypes)* und *Vision (Vision)*. Im Kapitel *Materials* wird die Entwicklung der drei Prototypen von den Forschungsteams anhand von Text- und Bildmaterial dargestellt. In *Prototypes* werden diese in Form von Zeichnungen der Ausstellungsinstitution vorgestellt. Das Kapitel *Visions* enthält spekulative Visualisierungen über die Architektur und gebaute Umwelt, die mit Biomaterialien und digitaler Fertigung in Zukunft möglich sein wird sowie die oben beschriebene Stellungnahme des Forschungsteams dazu, wie sich dieser Ansatz vom heutigen Entwurfsprozess in der Architektur unterscheidet.

Symposium, 9. Dezember 2022

- Termin: Freitag, 9. Dezember 2022, 15.30–18.00 Uhr
- Veranstaltungsort: ANCB The Aedes Metropolitan Laboratory, Christinenstr. 18–19, 10119 Berlin
- Zuschauer:innen vor Ort: 100, Zuschauer:innen Livestream: 188, Eintritt: frei

Ziel des Symposiums im Rahmen des Forschungsprojekts war es, einen Diskurs über den Einsatz von Biomaterialien und digitalen Fertigungstechniken in der Architektur und im Bauwesen anzuregen. Ein robuster Diskurs befasst sich sowohl mit den Grenzen als auch mit den Stärken seiner zentralen Ideen. Diese Absicht leitete die Konzeption und Planung des Symposiums. Das Symposium war in drei Teile geteilt.



Fotos: Erik-Jan Ouwerkerk

Symposiumspräsentation von Dunya Bouchi (ANCB), Arnd Rose (BBSR), Alexandre Dubor (IAAC-WASP), Tzu-Ying Chen (ITKE-FibR), Paul Nicholas (CITA-COBOD) und Ingrid Halland (Keynote-Sprecherin)

Präsentation der Forschung

Die drei Forschungsteams präsentierten nicht nur ihren Forschungsprozess und ihre Prototyp-Ergebnisse, sondern reflektierten auch über die besonderen Herausforderungen dieser Art des Entwerfens und Bauens von Architektur.



Foto: Erik-Jan Ouverwerk

Podiumsdiskussion beim Symposium, v.l.n.r.: Ingrid Halland (Keynote-Sprecherin), Moritz Dörstelmann (FibR), Arnd Rose (BBSR), Jan Knippers (ITKE), Martin Tamke (CITA), Oriol Carrasco (IAAC).

Keynote

Die Rolle der Keynote-Sprecherin war entscheidend für den Diskursrahmen. Prof. Ingrid Halland konnte als Kunst- und Architekturtheoretikerin von einer Makro-Perspektive über den Wandel sprechen, den ein Biomaterialien-Ansatz für die Architektur mit sich bringen würde, wie auch über die Rolle von Ausstellungen bei der Vermittlung und Förderung dieses Wandels. Darüber hinaus konnte sie aufgrund ihrer besonderen Forschungsexpertise zum Einfluss von Materialien und Farben auf Architektur eine konzeptionell-analytische Stellungnahme zu den Forschungsergebnissen abgeben. Sie tat dies, indem sie eine These mit dem Titel *Towards Deep Surface* entwickelte mit vier Hauptherausforderungen, die es zu bewältigen gilt:

- Die gegenwärtige Krise ist 'unauffällig' (inconspicuous).
- Es gibt ein unbegrenztes Verlangen nach flachen Oberflächen. Biomaterialien bringen eine neue Wohnlandschaft mit sich, die nicht flach ist.
- Es gibt keine ethisch-ästhetische Theorie für Oberflächen.
- Risikomanagement

Um sicherzustellen, dass sie die Ziele des *Living Prototypes*-Projekts sowie die drei Forschungsansätze vollständig versteht, nahm Prof. Halland an einer der wöchentlichen Videokonferenzen des Teams im Juni 2022 teil, als das endgültige Ausstellungskonzept dem BBSR-Projektberater Arnd Rose vorgestellt wurde, und erneut im November 2022, um ihre Überlegungen darüber mitzuteilen, wie sie diesen Biomaterialien-Ansatz in der Architektur theoretisch zu rahmen plante.

Podiumsdiskussion

Ingrid Halland und Arnd Rose moderierten gemeinsam die Diskussion mit Vertreter:innen der Forschungsteams. Aspekte wie ein realistischer Zeitrahmen und die Bereitschaft für Biomaterialarchitektur sowie deren Kosten und Ästhetik wurden diskutiert, wie auch die Voraussetzungen für die Zusammenarbeit zwischen Industrie, Forschung und Design, von denen der Biomaterialien-Ansatz abhängt. Ebenso wurde besprochen, wie die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse in Forschung und Lehre eingesetzt werden, unter anderem auch, um den Wandel hin zu einer architektonischen Zukunft ohne fossile Brennstoffe zu beschleunigen. Auch das Publikum und weitere eingeladene Fachkolleg:innen wurden in die Diskussion einbezogen.

Ausstellung, 10. Dezember 2022 – 25. Januar 2023

- Ausstellungstitel: Living Prototypes. Digitales Bauen mit Biomaterialien
- Ausstellungszeitraum: 10. Dezember 2022 – 25. Januar 2023
- Eröffnung: Freitag, 9. Dezember 2022, 18.30 Uhr
- Ausstellungsort: Aedes Architekturforum, Christinenstr. 18-19, 10119 Berlin
- Öffnungszeiten: Mo 13–17 Uhr, Di–Fr 11–18.30 Uhr, Sonn- und Feiertag 13–17 Uhr, Samstag, 10. Dezember 2022, 13-17 Uhr
- Besucher:innen: 2.000, Eintritt: frei

In der Ausstellung wurde das ineinandergreifende Projekt der drei Teams mit ihren jeweiligen Forschungen zu biobasierten Baumaterialien sowie deren spezifischen technischen und strukturellen Eigenschaften präsentiert. In einer für die Ausstellung gefertigten 1:1 Wohnrauminstallation, die in den Grundriss einer typischen 2-Zimmer-Wohnung integriert war, wurden die drei gesonderten Prototypen aus Erde, Flachs und Biokunststoff zusammengeführt. Visualisierungen der Architektur, die mit diesen Biomaterialien und digitalen Fertigungsmethoden möglich ist, sowie eine Auswahl von Rohmaterialproben und Testmodellen aus weitergehenden Untersuchungen der einzelnen Forschungsteams boten zusätzliche Informationen und betteten das Projekt in einen größeren Kontext ein. Die Entwicklung der Biomaterialien und Prototypen während der Projektlaufzeit wurden anhand von Video- und Fotomaterial illustriert.

Das Ziel der Ausstellung und des begleitenden Symposiums war es, dem Fachpublikum und der Öffentlichkeit zu vermitteln, wie durch den Einsatz dieser Technologien in der konventionellen Bauwirtschaft den Herausforderungen der Klimakrise und des dringenden Bedarfs an bezahlbarem und qualitativem Wohnraum begegnet werden kann.

Die Ausstellung stieß sowohl beim Fachpublikum als auch bei der Öffentlichkeit auf großes Interesse (2.000 Besucher:innen). Zahlreiche Führungen wurden angefragt, unter anderem durch ein Referat des BBR, das für die Baumaßnahmen des Umweltbundesamtes in Berlin zuständig ist und sich durch die Ausstellung für dieses Projekt Anregungen holen wollte.

Die niedrigschwellige Übersetzung abstrakter Laborforschung, um die Architektur, die mit biobasierten Materialien und digitalen Fertigungstechniken möglich wird, für Öffentlichkeit, Bauindustrie und Politik zu veranschaulichen, war ein Kernanliegen der Ausstellung. Der ANCB schaffte mit dem Projekt einen physischen und intellektuellen Möglichkeitsraum für experimentelle Zusammenarbeit an

Forschungsansätzen und neuen Materialien für nachhaltiges Bauen. Darüber hinaus ging es bei *Living Prototypes* auch darum, den gesellschaftlichen Druck für eine Wende des Bauens (in) der Zukunft, zu erhöhen.

Voraussichtlicher Mehrwert und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Im Folgenden werden neue Forschungsprojekte und Ansätze in der Lehre beschrieben, die auf den Ergebnissen des *Living Prototypes*-Projekts beruhen. Auch wenn die Integration der drei Materialsysteme in der Ausstellungsinstallation ein einmaliger Fall gewesen sein mag, so weist dieses Ergebnis doch auf künftigen Forschungsbedarf hin, insbesondere im Hinblick auf die zeitlichen Aspekte von Biomaterialien, und zwar nicht nur bezüglich technischer Aspekte, sondern auch und vor allem bezüglich sozioökonomischer Aspekte. Es besteht weiterhin eine Wissenslücke im Hinblick auf die Rolle von Bewohner:innen und Geldgeber:innen bei der Instandhaltung und Pflege, den Wohnkomfort und die Auswirkungen all dieser Maßnahmen auf wirtschaftliche Modelle für den Kauf, die Anmietung und die Produktion von Gebäuden in einem biobasierten und zirkulären Paradigma.

ITKE – FibR

Das Ergebnis der Zusammenarbeit zwischen ITKE und FibR ist ein leichtes Plattensystem, das aus einer Holzwerkstoffplatte in Kombination mit flachsfaserverstärkten Verbundelementen besteht. Die Hybridität von Holz und Naturfasern wird mittlerweile in zwei weiteren Projekten vorangetrieben, die auf den Untersuchungsergebnissen der *Living Prototypes*-Forschung aufbauen, und zwar im Hinblick auf Materialschnittstellen und digitale Designmethoden mit Biomaterial. Weitere Schritte in dieser Forschung liegen in der Verfeinerung des Materialsystems unter Berücksichtigung der mechanischen Eigenschaften und Umweltauswirkungen sowie der langfristigen Haltbarkeit der Naturfaserkomponenten.

IAAC – WASP

Sowohl der *TOVA*-Prototyp in Barcelona als auch der Wandprototyp in der *Living Prototypes*-Ausstellung demonstrierten die Fähigkeit des 3D-Drucks mit Erde, eine nachhaltige Architektur für Menschen zu bauen und erregten bei Architekt:innen, Bauunternehmen und potenziellen Nutzer:innen, die an der Qualität der vorgeschlagenen Konstruktion interessiert sind, große Aufmerksamkeit. Als Fortsetzung dieser Forschungsarbeit haben sich IAAC und WASP verpflichtet, die Entwicklung dieser Technologie fortzusetzen, damit sie von Fachleuten und der breiten Öffentlichkeit stärker angenommen und die Akzeptanz im Bausektor verbessert wird. IAAC und WASP stellen sich in diesem Zusammenhang derzeit drei zentralen Herausforderungen:

- Reduzierung der Kosten und der Bauzeit durch entsprechende Geräte
- Verbesserung der Entwurfsleistung und der 3D-Modellierungssoftware
- Ausbildung von Menschen, die in der Lage sind, diese Bautechnologie kompetent einzusetzen.

CITA – COBOD

Es werden Aspekte beider Prototypen, die im Rahmen dieser Forschung gefertigt wurden, weiterentwickelt. Beim Prototypen *Radicant* war es das erste Mal, dass Biomaterialien auf Basis von Knochenleim in der additiven Fertigung eingesetzt wurden. Der Ansatz wird derzeit im Rahmen des vom Europäischen Forschungsrat finanzierten Projekts *Eco-Metabolistic Architecture* weiterentwickelt.

Der Prototyp *Cellulose Screens* hat gezeigt, dass Biomaterialien auf Cellulosebasis in großem Maßstab gedruckt werden können und dass das COBOD-3D-Drucksystem für den Druck von recycelten und natürlichen Materialien funktioniert. Die Open-Source-Rezeptur der recycelten Papiercellulose wird von anderen Forschern verwendet, zum Beispiel am KIT in Karlsruhe. Die in der Forschung entwickelten Techniken werden in der universitären Lehre weitergegeben, beispielsweise in einem Studiomodul im Advanced Research & Innovation (ARI) Lab des Architektur-Masterprogramms an der Weitzmann

School of Design, University of Pennsylvania. Auf kommerzieller Ebene wird der Prototyp von COBOD verwendet, um den zukunftssicheren Ansatz ihrer Technologieplattform zu demonstrieren, und wird in PR- und Akquisitionsprozessen eingesetzt.

Das Projekt *Living Prototypes* bestätigte, dass maschinelle Lernverfahren gut funktionieren, um die Ergebnisse von 3D-Druckverfahren vorherzusagen und ermöglichte es CITA und COBOD, die Erfordernisse abzuschätzen und zu bewerten, um dies auf den industriellen 3D-Druck anzuwenden. Es lag zwar außerhalb des Rahmens der *Living Prototypes*-Forschung, eine solche Anwendung zu demonstrieren, aber es war möglich, einen Fahrplan für eine künftige Umsetzung in einem industriellen Umfeld zu erstellen. Der Projektbeirat bewertete die Ergebnisse positiv und wies darauf hin, dass die generische Natur des entwickelten Ansatzes eine mögliche Anwendung in prinzipiell allen additiven Fertigungsverfahren ermöglicht.

Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

Erfolgt

Bouchi, D., Ryan, Á. (Hrsg.) (2022). Living Prototypes. Digital Fabrication with Biomaterials. ANCB Edition #7. ANCB The Aedes Metropolitan Laboratory

Tamke, M., Ramsgaard Thomsen, M., Nicholas, P., Chen, T.-Y., Knippers, J., Dubor, A., Carrasco, O., Cabay, E., Markopoulou, A., Dörstelmann, M., Bangsgaard Svendsen, A., Naldoni, L., Ryan, A., Bouchi, D., Another Logic in Architectural Design and Fabrication – Lessons From The Living Prototypes Project (2023) in Proceedings of CEES 2023 | 2nd International Conference on Construction, Energy, Environment & Sustainability, 27-30 June 2023, Funchal - Portugal

CITA

Rossi, G., Chiujea, R., Hohegger, L., ElHarchi, A., Harding, J., Nicholas, P., Tamke, M., & Ramsgaard Thomsen, M. (2022). Statistically modelling the curing of cellulose-based 3d printed components: Methods for material dataset composition, augmentation and encoding. Design Modelling Symposium Berlin 2022: Towards Radical Regeneration

Rech, A., Chiujea, R., Colmo, C., Rossi, G., Nicholas, P., Tamke, M., Thomsen, M. R., & Daugaard, A. E. (2022). Waste-based biopolymer slurry for 3D printing targeting construction elements. Materials Today Communications, 33, [104963]: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104963>

Rossi G., Ramsgaard Thomsen M. (2022). Cellulose Enclosures: Smart robotic manufacturing for heterogenous biomaterials. in Reindhart D., Loke L., Tillman D. SHERobots tool:toy:companion. ISBN 978-0-6455400-6-2

Geplant

IAAC

Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten des 3DPA-Programms im Rahmen des Projekts wurden in zwei Broschüren zusammengefasst, die auf der IAAC-Website veröffentlicht und mit wissenschaftlichen Artikeln verknüpft werden. Jede Broschüre präsentiert detailliert die Forschungsergebnisse, gegliedert nach den verschiedenen Phasen des Prozesses. 100+ Seiten, 60+ Abbildungen, freier Zugang

Parallel zur Veröffentlichung der Broschüre wird derzeit eine Reihe wissenschaftlicher Artikel verfasst bzw. von einem wissenschaftlichen Gremium geprüft, darunter:

- Design für 3D-gedruckte Architektur aus natürlichen Materialien
- LCA-Analyse eines 3D-gedruckten Erdhauses
- Geometrische Betrachtung der strukturellen Leistung im 3D-gedruckten Bau mit Erde
- Materialerhalt für ein Null-Kilometer 3D-gedrucktes Bauwerk aus Erde.

ITKE

Geplant sind Veröffentlichungen zu folgenden Themen:

- Verbundwerkstoff B: Werkstoffsysteme von kernlos-filamentumspinnenen Naturfaserstrukturen
- Strukturmorphologie eines Holz-Faser-Hybridplattensystems mit kernloser Filamentwicklung
- Holz-Faser-Verbindungen für leichte kernlos-filamentumwickelte Naturfaserstrukturen
- LCA-Analyse

CITA

Nicholas, P., Tamke, M., Lharchi, A., Valipour Goudarzi, H., Eppinger, C., Sonne, K., Ramsgaard Thomsen, M., Volumetric Data as design driver for large scale Biopolymer 3d Printing (2023) in Proceedings of Advances in Architectural Geometry (AAG) conference, 04-07 October 2023, Stuttgart. (Abstract eingereicht)

Lharchi, A., Tamke, M., Valipour Goudarzi, H., Eppinger, C., Sonne, K., Nicholas, P., Ramsgaard Thomsen, M., Sensing and Augmenting for Adaptive Assembly Strategies (2023) in Proceedings of the eCAADe conference 2023 Digital Design Reconsidered, 20-23 September 2023, Graz. (Abstract eingereicht)

Presse, Internet

Webseite: ancb.de/prototypes

Enthält Links zu allen Projektbestandteilen mit ausführlichen Beschreibungen

Videosammlung: vimeo.com/showcase/living-prototypes

Enthält die Videoaufzeichnungen folgender Veranstaltungen:

- Auftaktworkshop am 27.09.2021
- Halbzeit- Workshop am 28.02.2022
- Abschlussposium am 09.12.2022

Sowie die für die Ausstellung produzierten Filme:

- Introduction
- Materials: 3D-Printed Earth
- Materials: Flax Fibre-Winding
- Materials: Bioplastic Prints
- Visions

IAAC

Presse: TOVA wurde in bedeutenden spanischen und internationalen Medien sowie in der Architekturpresse veröffentlicht:

- Gedruckte Presse: Zehn Veröffentlichungen (The Times, LivingETC, Expansión, ConArquitectura, u.a.)
- Radio und Fernsehen: 5 Veröffentlichungen (RNE, TV3, Catalunya Ràdio, u.a.)
- Online-Presse: 70 Veröffentlichungen (Designboom, Archilovers, El País, Arquitectura Viva, La Vanguardia, Yahoo Finance, Arquitectura y diseño, ABC, Detail, TimeOut, u. a.).

Mitwirkende

Autorinnen und Autoren des Forschungsberichts

- Bouchi, Dunya, ANCB The Aedes Metropolitan Laboratory, Berlin
- Chen, Tsu-Ying, ITKE – Institut für Tragkonstruktionen und konstruktives Entwerfen, Universität Stuttgart
- Dubor, Alexandre, IAAC – Institute for Advanced Architecture of Catalonia, Barcelona
- Ryan, Áine, ANCB The Aedes Metropolitan Laboratory, Berlin
- Tamke, Martin, CITA – Centre for Information Technology and Architecture, Royal Danish Academy, Copenhagen

Forschungs- und Projektteam



Foto: Erik-Jan Ouwerkerk

Vertreter:innen der drei Forschungsteams bei der Eröffnung der Ausstellung

3D-Printed Earth

IAAC – Institute for Advanced Architecture of Catalonia, Barcelona

- Cabay, Edouard, 3DPA Direktor
- Dubor, Alexandre, 3DPA Direktor

- Carrasco, Oriol, DPA Senior Faculty
- Tayoun, Yara, 3DPA Koordinator
- Foroughi, Ashkan, 3DPA Computerexperte
- Afsar, Secil, 3DPA Assistentin für die Fertigung
- Eduardo Chamorro, Fertigungsexperte
- Vincent Huyghe, Fertigungsexperte
- Henrdik Benz, Assistent für die Fertigung
- und alle Studierenden und Lehrenden des 3DPA-Programms 2021/22 und 2022/23

WASP, Massa Lombarda

- Morretti, Francesca, Leiterin Kommunikation
- Naldoni, Lapo, Ingenieur und Projektmanager
- Visona, Massimo, Architekt und Maschinenbauingenieur
- Moretti, Massimo, Gründer

Flax Fibre-Winding

ITKE – Institut für Tragkonstruktionen und konstruktives Entwerfen, Universität Stuttgart

- Chen, Tzu-Ying, Wissenschaftliche Mitarbeiterin
- Früh, Nikolas, Wissenschaftliche Mitarbeiter
- Gil Pérez, Marta, Wissenschaftliche Mitarbeiterin
- Aymonod, André, studentischer Mitarbeiter
- Moutevelis, Ioannis, studentischer Mitarbeiter
- Knippers, Jan, Professor und Institutsleiter

FibR GmbH, Kernen

- Giacomini, Ilaria, Expertin für Digital Design und Herstellung
- van der Hoven, Christo, Expert für Digital Design und Herstellung
- Fial, Julian, Leiter Entwicklung und Fertigung
- Dörstelmann, Moritz, Professor, Gründer und CEO

Bioplastic Prints

CITA – Centre for Information Technology and Architecture, Kopenhagen

- Tamke, Martin, Associate Professor
- Nicholas, Paul, Associate Professor
- Ramsgaard Thomsen, Mette, Professorin

- Lharchi, Ayoub, Doktorandin
- Rossi, Gabriella, Doktorandin
- Valipour Goudarzi, Hasti, Wissenschaftliche Mitarbeiterin
- Eppinger, Carl, Wissenschaftliche Mitarbeiter
- Sonne, Konrad, Wissenschaftliche Mitarbeiter
- Marvin Bruder, Tim, Wissenschaftliche Mitarbeiter
- Rygh Bruun, Adrian, studentischer Mitarbeiter
- Rech, Arianna, Doktorandin, DTU – Technical University of Denmark
- Egede Daugaard, Anders, Associate Professor, DTU – Technical University of Denmark
- John Harding, Dozent, University of Reading

COBOD International A/S, Kopenhagen

- Bangsgaard Svendsen, Alma, Architektin und Projektmanagerin
- Ellinghausen, Ole, Leiter der Fertigung

Koordinierung und Kuratierung

ANCB The Aedes Metropolitan Laboratory, Berlin

- Bouchi, Dunya, Kuratorin und Projektmanagerin
- Ryan, Áine, Kuratorin und Projektmanagerin
- Meierhofer, Christine, Ausstellungsmanagerin
- Düspohl, Hanna, Ausstellungsmanagerin

Beratungsgremium

- Grolimund, Reto, BKW Innovation Center, Bern
- Halland, Ingrid, Professorin für Architekturgeschichte und -theorie, Oslo School of Architecture and Design
- Kloft, Harald, Professor und Leiter des Digital Building Fabrication Laboratory (DBFL), TU Braunschweig
- Kolbert, Stine, Wissenschaftliche Mitarbeiterin, Lehrstuhl für Planungs- und Bauökonomie, TU Berlin
- Misselwitz, Philipp, Managing Director, Bauhaus Erde, Berlin
- Revedin, Jana, Professorin für Architektur und Stadtplanung, Ecole Spéciale d'Architecture, Paris
- Roswag-Klinge, Eike, Professor für Constructive Design & Climate Adaptive Architecture, Natural Building Lab, TU Berlin
- Wegener, Bernd, em. Professor, Sozialwissenschaften, Humboldt-Universität zu Berlin
- Zampini, Davide, Head of Global R&D, CEMEX, Brugg

Profile der Projektpartner:innen

IAAC – Institute for Advanced Architecture of Catalonia, Barcelona

IAAC ist ein Zentrum für Forschung, Bildung, Produktion und Öffentlichkeitsarbeit, das sich zum Ziel gesetzt hat, den zukünftigen Lebensraum unserer Gesellschaft zu entwerfen und ihn in der Gegenwart zu gestalten. Das IAAC verfolgt die digitale Revolution auf allen Ebenen, um die Grenzen von Architektur und Design zu erweitern und die Herausforderungen der Menschheit zu bewältigen.

ITKE – Institut für Tragkonstruktionen und konstruktives Entwerfen, Stuttgart

ITKE beschäftigt sich mit der Integration von Tragwerksplanung und Architektur. Das Forschungsinteresse liegt auf der Herstellung von Hochleistungsstrukturen, insbesondere in der Verwendung von Naturfasern und der Erforschung nachhaltiger Materialsysteme, wobei die Entwicklung von Prototypen mit Hilfe von Computertechnik und fortschrittlichen Analysemethoden erfolgt.

CITA – Centre for Information Technology and Architecture, Copenhagen

CITA ist ein innovatives Forschungsinstitut, das sich mit den Schnittstellen zwischen Architektur und digitalen Technologien beschäftigt. CITA arbeitet in einem Biomaterial-Paradigma und untersucht computergestützte Prozesse für Entwurf, Herstellung und Nutzung von Gebäuden für eine zukünftige, vollständig zirkuläre und nachhaltige Baupraxis.

WASP, Massa Lombarda

Der 3D-Druck ist das Herzstück von WASP: vom kleinen, schnellen Drucker für Objekte aus Biokunststoff, Ton und biokompatiblen Materialien bis hin zu großen Druckern, die Wände herstellen können. Das Ziel von WASP ist der Bau von Zero-Mile-Häusern, unter Verwendung von Materialien, die in der Umgebung zu finden sind.

FibR GmbH, Kernen

FibR stellt architektonische Faserverbundkonstruktionen für tragende Strukturen, Fassaden und Innenräume her. FibRs computergestütztes Design und roboter-gestützte Fertigungsmethoden erforschen neue Designs und schaffen ressourcen-effiziente Produkte. Das interdisziplinäre Team bietet vertikal integrierte digitale Konstruktionsdienstleistungen in allen Projektphasen.

COBOD International A/S, Kopenhagen

COBOD ist der weltweit führende Anbieter von Lösungen für den 3D-Baudruck (3DCP). Durch die Zusammenarbeit mit Kunden, akademischen Einrichtungen und Lieferanten auf der ganzen Welt will COBOD die globale Bauindustrie umgestalten. Viele Innovationen im Bereich 3DCP wurden mit COBOD- Technologie realisiert, darunter die ersten zwei- und dreistöckigen Gebäude in Belgien und Deutschland, die erste Villa in Dubai und die ersten Gebäude in Afrika.

ANCB The Aedes Metropolitan Laboratory, Berlin

ANCB ist eine einmalige interdisziplinäre Plattform für den urbanen Diskurs auf internationaler Ebene, die das Zusammenspiel von gebauter Umwelt und sozialem Leben für die Zukunft unseres gemeinsamen Lebensraumes erforscht. Mit seinem Programm leistet das ANCB einen wesentlichen Beitrag zum Diskurs über die Gestaltung des Raums in seinen sich verändernden politischen, gesellschaftlichen und kulturellen Rahmenbedingungen.

Literaturverzeichnis

Dubor, A., Cabay, E., & Chronis, A. (2017). Energy efficient design for 3D printed earth architecture. In Digital Modeling Symposium. Springer.

Dubor, A., Cabay, E., Izard, J. B., Sollazzo, A. & Markopoulou, A. (2018). Negotiating design for on site robotics. ACADIA.

Gil Pérez, M., Guo, Y., & Knippers, J. (2022). Integrative material and structural design methods for natural fibres filament-wound composite structures: The LivMatS pavilion. *Materials & Design*, 217, 110624.

IAAC (2022). Open Thesis: 3D Printing Architecture. IAAC.

Mindermann, P., Gil Pérez, M., Knippers, J., & Gresser, G. T. (2022). Investigation of the Fabrication Suitability, Structural Performance, and Sustainability of Natural Fibers in Coreless Filament Winding. *Materials*, 15(9).

Ramsgaard Thomsen, M., & Tamke, M. (2009). Narratives of making: thinking practice led research in architecture. In J. Verbeke (Ed.), *Communicating (by) Design 2009* (pp. 1–8).

Rossi, G., Chiujea, R., Hohegger, L., ElHarchi, A., Nicholas, P., Tamke, M., & Ramsgaard Thomsen, M. (2022). Integrated design strategies for multi-scalar biopolymer robotic 3d printing. *Hybrids & Haecetities*. Acadia 2022, UPenn.

Rossi, G., Chiujea, R., & Colmo, C. (2022). A material monitoring framework: Tracking the curing of 3d printed cellulose-based biopolymers. *Realignments*. DMSB 2022, Springer.

Thomsen, M. R., & Tamke, M. (2022). Towards a transformational eco-metabolistic bio-based design framework in architecture. *IOP Bioinspiration & Biomimetics*.