

BBSR Research Prototype 2022

3DWoodWind
Endbericht

Forschungsprogramm

BBSR Research Prototype digital Bau 2022, BBSR

Projektlaufzeit

01. Oktober 2021 bis 01. Oktober 2022

Aktenzeichen

SWD – 10.08.17.7-21.10

im Auftrag

des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)

bearbeitet von

Prof. Philipp Eversmann | Andreas Göbert M.Sc. | Julian Ochs M.Sc. | Ole Weyhe
FG Experimentelles und Digitales Entwerfen und Konstruieren, FB 06 ASL, Universität Kassel

Prof. Dr.-Ing. Julian Lienhard | Georgia Margariti M.Sc.
FG Tragwerksentwurf, FB 06 ASL, Universität Kassel

Prof. Dr. Philipp Geyer | Felita Felita | Ueli Saluz
Nachhaltige Gebäudetechnik, Fakultät für Architektur und Landschaft, Leibniz Universität Hannover

BBSR

RESEARCH
PROTOTYPE

2022

ENDBERICHT

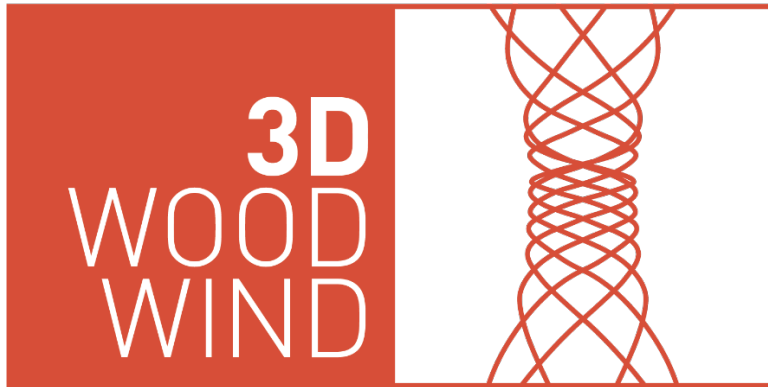
Kassel, 13.09.2022

Prof. Philipp Eversmann | Andreas Göbert M.Sc. | Julian Ochs M.Sc. | Ole Weyhe

Prof. Dr.-Ing. Julian Lienhard | Georgia Margariti M.Sc.

Prof. Dr. Philipp Geyer | Felita Felita | Ueli Saluz

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert. (Aktenzeichen: SWD – 10.08.17.7-21.10)
Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.



ZUSAMMENFASSUNG

Problemstellung

Additive Herstellungsprozesse sind für die Bauindustrie sehr vielversprechende und ressourceneffiziente Bauprozesse, die eine Herstellung von Bauteilen direkt aus der 3D-Planung möglich machen. Für den Beton- sowie den Stahlbau werden aktuell eine Vielzahl von additiven Verfahren entwickelt, die bereits in ersten Pilotprojekten ihre Anwendung finden.

Im Holzbau finden additive Verfahren trotz der sehr hohen Digitalisierung und technischen Entwicklung noch kaum Anwendung. Aktuell bekannte Verfahren verwenden Holz in Verbund mit Polymeren in pulverisierter Form, wodurch die inhärenten Materialeigenschaften allerdings Durch dreidimensionale Wickelprozesse können Hohlbauteile aus Furnierholz mit minimalen Materialaufwand und angepassten strukturellen Eigenschaften entwickelt werden.

In der Baubranche sind zunehmend ressourceneffiziente Bauweisen gefragt. Additive Fertigungsprozesse ermöglichen, das Material nur dort aufzutragen, wo es tatsächlich notwendig ist. Diese Prozesse sind im Holzbau noch kaum erforscht.

Das von Zukunft Bau geförderte Forschungsvorhaben 3DWoodWind untersucht additive Auftragsmethoden von Furnierholz-Endlosbändern, um neuartige Leichtbaukonstruktionen zu ermöglichen. Diese dreidimensionalen Wickelprozesse haben ein hohes Innovationspotenzial, da Hohlbauteile aus Furnierholz mit angepassten strukturellen Eigenschaften entwickelt werden können. Hierzu wird die natürliche Faserrichtung des Holzes ausgenutzt und strukturell optimiert, woraus nicht nur hoch performante Bauteile resultieren, sondern gleichzeitig auch äußerst materialeffizient und nachhaltig mit der aktuell immer knapper werdenden Ressource Holz umgegangen wird.

Der BBSR Research Prototype 2022 ist ein experimenteller Forschungsdemonstrator in der Schnittstelle aus KI-Algorithmen, digitalen Konstruktionsprinzipien und automatisierten Fertigungsprozessen. Das Verbundforschungsprojekt 3DWoodWind Research Prototype von der Universität Kassel wurde beauftragt, eine Holzdachstruktur zu entwickeln und als Messestand für die digitalBAU 2022 zu realisieren. Die experimentelle Holzdachstruktur soll zeigen, wie sich die Prozessketten über den gesamten Lebenszyklus – von der Ideenfindung über Gestaltung, Entwicklung, Konstruktion, Montage bis zum Rückbau – durch intelligente und innovative Planungs- und Fertigungswerkzeuge verändern können und welche Potenziale dadurch entstehen.

Untersuchungsmethoden

Durch experimentelle Voruntersuchungen an kleinmaßstäblichen Probekörpern wurden die Bauteileigenschaften des Materialsystems überprüft und optimiert. Die Ergebnisse wurden in das FE-Modell überführt und bildeten die Basis für strukturelle Berechnungen und eine Vordimensionierung des Tragwerks. Parallel wurden computerbasierte Entwurfsmethoden für die Filamentauslegung und robotergestützte Fertigungsverfahren über digitale Prozesssimulation entwickelt und Prozessparameter über physische Versuche definiert. Durch die Fabrikation von vollmaßstäblichen Prototypen, konnte die Herstellungstechnik evaluiert und optimiert werden. Darüber hinaus fanden strukturelle Belastungstests anhand der hergestellten Prototypen statt, um die Annahmen, die für das experimentelle Materialsystem im FE-Modell getroffen wurden, zu überprüfen.

Simultan zu den Untersuchungen der Fertigungstechnik und dem Tragverhalten der entwickelten Struktur, wurde ein Machine-Learning-Algorithmus trainiert, um Entwurfsiterationen und zukünftige Planungen mit dem komponentenbasierten Bausystem zu erleichtern. Hierfür wurden die zuvor untersuchten Prozessparameter

aufbereitet, um daraus Trainingsdaten für eine KI-Optimierung zu entwickeln. Mithilfe der gewonnenen Daten wurde ein Empfehlungssystem zur Konfigurations- und Prozessoptimierung trainiert, um dieses für den Forschungspavillon und weitere Testfälle anwenden zu können.

Ergebnisse

Der 3DWoodWind Research Prototype hat eine neue Generation von additiven Technologien für den Holzbau entwickelt. Das modulare Bausystem wurde mit einem dreidimensionalen robotergestützten Wickelverfahren für materialeffiziente hohle Leichtbauteile realisiert. Eine KI-gesteuerte Konstruktionslogik ermöglicht die intelligente Kombination und Gestaltung von modularen Komponenten zu mehrstöckigen Strukturen, die in Zukunft Massivholzplatten und -träger sowie Betonplatten und Stahlprofile ersetzen könnten.

Mit dem Einsatz von Holzfurnier stellt die entwickelte Herstellungstechnik eine Alternative zu synthetischen Fasern wie Kohlenstoff- oder Glasfasern dar, die üblicherweise beim Wickeln verwendet werden, sowie zu den im Bauwesen bekannten Massivholzprodukten. Hierdurch weist die Herstellungstechnik für materialeffiziente Leichtbauteile aus Furnierholz ein hohes Potenzial im Hinblick auf Ressourcenschonung auf. Innerhalb des Forschungsprojekts wurden insbesondere der Umgang mit Ressourcen und die Entwicklung neuer Bauprozesse sowie die Etablierung klima- und umweltfreundlicher Bauweisen adressiert. Mit der Herstellung eines modularen Säulen- und Deckensystems, das auf großflächige Anwendungen in mehrgeschossigen Strukturen abzielt, wurden im BBSR Research Prototype neue Verfahren und Techniken für eine zukunftsweisende und nachhaltige Entwicklung demonstriert.

Weiterer Forschungsbedarf liegt insbesondere in der Weiterentwicklung der computerbasierten Entwurfsmethoden und einer ingenieurbautechnischen Untersuchung der Bauteile optimierte Geometrien mit angepassten strukturellen Eigenschaften. Darüber hinaus kann in Zukunft durch die Integration alternativer, biobasierter Klebstoffsysteme der ökologische Fußabdruck verbessert werden.

ABSTRACT

Problem definition

Additive manufacturing processes are very promising and resource-efficient construction processes for the construction industry, which make it possible to manufacture components directly from 3D planning. A variety of additive processes are currently being developed for concrete and steel construction and are already being used in initial pilot projects. Despite the very high level of digitalization and technical development, additive processes are still hardly used in timber construction. Currently known processes use wood in combination with polymers in pulverized form, whereby the inherent material properties are largely lost. Three-dimensional winding processes can be used to develop hollow components from veneered wood with minimal material input and adapted structural properties.

Resource-efficient construction methods are increasingly in demand in the construction industry. Additive manufacturing processes allow material to be applied only where it is actually needed. These processes have hardly been researched yet in wood construction.

The 3DWoodWind research project, funded by Zukunft Bau, is investigating additive application methods of continuous wood strips to enable new types of lightweight construction. These three-dimensional winding processes have a high innovation potential, as hollow components made of veneer wood with adapted structural properties can be developed. For this purpose, the natural fiber direction of the wood is exploited and structurally optimized, resulting not only in high-performance components, but also in extremely material-efficient and sustainable use of the currently increasingly scarce resource wood.

The BBSR Research Prototype 2022 is an experimental research demonstrator in the interface of AI algorithms, digital design principles and automated manufacturing processes. The collaborative research project 3DWoodWind Research Prototype from the University of Kassel

was commissioned to develop a wooden roof structure and implement it as an exhibition stand for digitalBAU 2022. The experimental wooden roof structure is to show how the process chains over the entire life cycle - from idea generation to design, development, construction, assembly and dismantling - can be changed by intelligent and innovative planning and manufacturing tools and what potentials arise as a result.

Research methods

The component properties of the material system were tested and optimized by means of preliminary experimental investigations on small-scale test specimens. The results were transferred to the FE model and formed the basis for structural calculations and pre-dimensioning of the structure. In parallel, computational design methods for filament layout and robotic manufacturing processes were developed via digital process simulation, and process parameters were defined via physical tests. By fabricating full-scale prototypes, the manufacturing technique could be evaluated and optimized. In addition, structural loading tests were performed on the fabricated prototypes to verify the assumptions made for the experimental material system in the FE model.

Simultaneously to the investigations of the fabrication technique and the load bearing behavior of the developed structure, a machine learning algorithm was trained to facilitate design iterations and future planning with the component-based building system. For this purpose, the previously gained process parameters were prepared to develop training data for AI optimization. With the help of the obtained data, a recommendation system for configuration and process optimization was trained in order to be able to apply it to the research pavilion and further test cases.

Results

The 3DWoodWind research prototype has developed a new generation of additive technologies for wood construction. The modular building system was realized using a three-dimensional robotic winding process for material-efficient hollow lightweight components. An AI-driven design logic enables the intelligent combination and design of modular components into multi-story structures that could replace solid wood panels and beams as well as concrete panels and steel profiles in the future.

With the use of wood veneer, the developed manufacturing technology represents an alternative to synthetic fibers such as carbon or glass fibers, which are commonly used in winding, as well as to the solid wood products known in the construction industry. As a result, the manufacturing technology for material-efficient lightweight components made of wood veneer has a high potential in terms of resource conservation. Within the research project, particular attention was paid to the handling of resources and the development of new construction processes as well as the establishment of climate- and environmentally-friendly construction methods.

There is a particular need for further research into the development of computational design methods and an engineering investigation of the components for optimized geometries with adapted structural properties. In addition, the integration of alternative, bio-based adhesive systems can improve the ecological footprint.

INHALT

1	EINLEITUNG	9
1.1	Zusammenfassung und Problemstellung	9
1.2	Fragestellung und Methodik	9
1.3	Ziele	10
1.4	Prozesserläuterung	10
2	GESAMTPROZESSDARSTELLUNG	11
2.1	Gestaltungsprozess	11
2.2	Lebenszyklus	12
2.3	Wickelprozess	13
2.4	Materialsystem	14
3	KONSTRUKTIONSSTRUKTUR	15
3.1	Tragwerkskonzept	15
3.2	Analyse	15
3.3	Konstruktionsdetails	19
4	KI-OPTIMIERUNG	21
4.1	Optimierungsstrategien	21
4.2	Parametrisches Modell	21
4.3	Synthetische Trainingsdaten	22
4.4	Training der Machine Learning Modelle	23
4.5	Multifaktorenoptimierung	23
4.6	KI-BIM	24
5	FERTIGUNGSPROZESS	25
5.1	Aufbau der Roboteranlage	25
5.2	Schalungssystem	26
5.3	Bauteilgeometrien, Faserverlauf & Lagenaufbau	28
5.4	Robotische Fabrikation	31
5.5	Montageprozess	36
6	AUSSTELLUNG & NACHNUTZUNG	38
6.1	Ausstellungskonzept	38
6.2	digitalBAU 2022	38
6.3	Nachnutzung	41
7	FAZIT	42
7.1	Resümee	42
7.2	Ausblick	43
8	ANHANG	44
8.1	Abbildungsverzeichnis	44
8.2	Danksagung	44

1 EINLEITUNG

1.1 Zusammenfassung und Problemstellung

In der Baubranche sind zunehmend ressourceneffiziente Bauweisen gefragt. Das von Zukunft Bau geförderte Forschungsvorhaben 3DWoodWind untersucht additive Auftragsmethoden von Furnierholz-Endlosbändern, um neuartige Leichtbaukonstruktionen zu ermöglichen. Diese dreidimensionalen Wickelprozesse haben ein hohes Innovationspotenzial, da Hohlbauteile aus Furnierholz mit angepassten strukturellen Eigenschaften entwickelt werden können. Hierzu wird die natürliche Faserrichtung des Holzes ausgenutzt und strukturell optimiert, woraus nicht nur hoch performante Bauteile resultieren, sondern gleichzeitig auch äußerst materialeffizient und nachhaltig mit der aktuell immer knapper werdenden Ressource Holz umgegangen wird.

1.2 Fragestellung und Methodik

Innerhalb des Forschungsprojekts wurden Fragestellungen zu einem geeigneten Materialsystem im Bezug zur automatisierten Prozesstechnik, resultierender Oberflächenqualität, Skalierbarkeit und Bauteilpräzision, möglichen Bauteilformen, sowie generellen Möglichkeiten und Grenzen dieser Herstellungstechnik untersucht.

Das erste Arbeitspaket diente der Überprüfung der Bauteileigenschaften durch experimentelle Voruntersuchungen, um in einem evolutionären Prozess aus Prototypen, Messungen und Belastungsproben optimierte Ergebnisse zu erlangen. Über eine Reihe an Prozessversuchen wurden die robotischen Bewegungen über digitale Prozesssimulation entwickelt, und die Prozessparameter über physische Versuche definiert. Diese konnten dann über Analyse des Schichtenzusammenhaltes, Genauigkeit des Klebstoffauftrages und der Präzision der entstehenden Bauteile in einem iterativen Prozess optimiert werden.

Im zweiten Arbeitspaket wurde eine Anpassung der Prozessparameter infolge einer KI-Optimierung vorgenommen. Hierfür wurden die in AP01 untersuchten Prozessparameter aufbereitet, um daraus Trainingsdaten für eine KI-

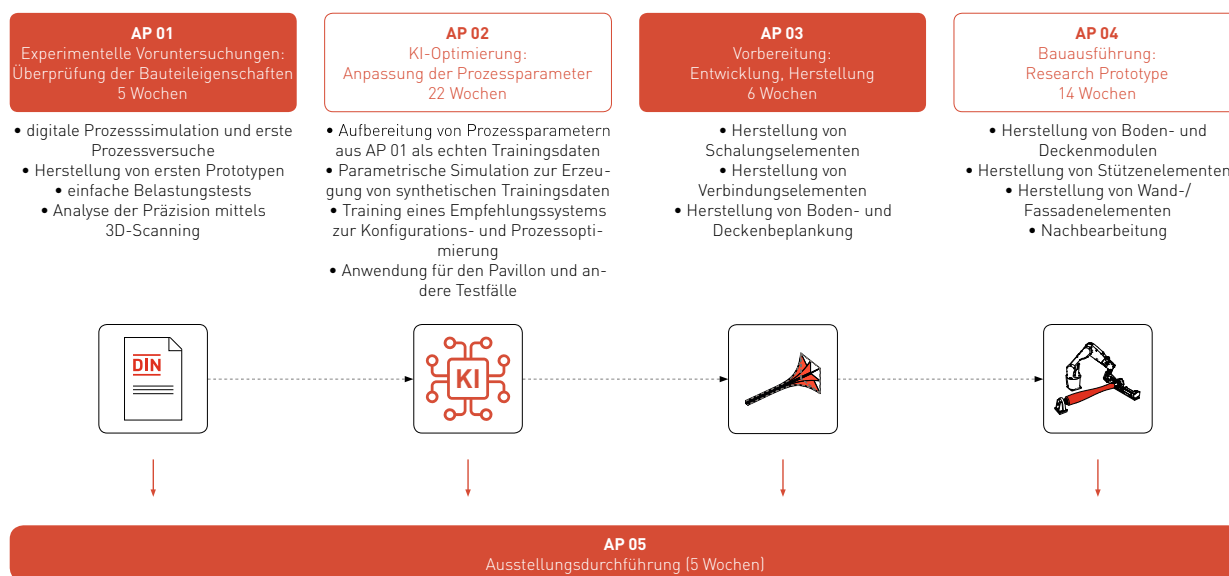


Abb. 1 Arbeitspakete

Optimierung zu entwickeln. Mithilfe der gewonnenen Daten wurde ein Empfehlungssystem zur Konfigurations- und Prozessoptimierung trainiert, um dieses für den Forschungspavillon und weitere Testfälle anwenden zu können. AP03 diente der Vorbereitung der darauffolgenden Bauausführung. Hierfür wurden die nötigen Schalungselemente entwickelt, präzise hergestellt und montiert. Darüber hinaus wurden die Verbindungselemente, sowie die Decken- und Bodenbeplankung gefertigt.

Im vierten Arbeitspaket folgte die eigentliche Bauausführung des Forschungspavillons: Dies beinhaltete die Fabrikation von Deckenmodulen und Stützelementen sowie eine Nachbearbeitung der gefertigten Bauteile.

Im AP05 wurden die zuvor produzierten Bauteile zur Messe transportiert und vor Ort montiert.

1.3 Ziele

Der 3DWoodWind Research Prototype hat zum Ziel eine neue Generation von additiven Technologien im Holzbau aufzuzeigen: Dreidimensionale robotische Wickelverfahren für materialeffiziente Hohlprofil-Leichtbauteile. Dabei ermöglicht eine KI gesteuerte Entwurfslogik die intelligente Kombination und Auslegung modular aufgebauter Bauteile zu mehrgeschossigen Strukturen, die durch ihre hohe Leistungsfähigkeit in Zukunft als Substitution von Beton- oder Stahlstrukturen dienen können.

Der Entwurf des BBSR Research Prototype Realisierungswettbewerbes basiert auf einer roboterbasierten Bautechnik im Zusammenspiel von Nachhaltigkeit und Tragwerk mit Methoden des maschinellen Lernens. Dazu wurde ein Verbund aus drei Partnern gebildet, welcher die Kompetenzen zu Architektur und Digitaler Fabrikation (Prof. Philipp Eversmann), Maschinellen Lernen als Entwurfswerkzeug für Nachhaltigkeit (Prof. Dr.-Ing. Philipp Geyer), und Tragwerksentwurf und materialeffizienter Optimierung (Prof. Dr.-Ing. Julian Lienhard) ideal kombiniert.

1.4 Prozesserläuterung

In dem Forschungslabor für Architektur Produktion, einem DFG Großgerät des Fachgebiets von Prof. Eversmann, wurde die großmaßstäbliche Konstruktion aus Stütz- und Deckenelementen gefertigt. Begleitet wurden die fertigungstechnischen Aspekte von Fachspezialisten der Firmen Heitz Furnierkanten (Furniere), Jowat (Klebstoffe) und Oest (Dosiertechnik).

In dem direkt angrenzenden Labor von Prof. Lienhard wurde die strukturelle Leistungsfähigkeit der Bauteile im Prüfstand präzise ermittelt, um die bereits über Finite Elemente berechnete Dimensionierung des Tragwerks zu validieren und die mechanischen Kennwerte in der Berechnung zu präzisieren. In weiteren Schritten wurden dann über die Materialeexperimente das Tragwerk und seine Verbindungstechnik schrittweise auf Materialeffizienz optimiert.

Um ressourceneffizientes Bauen zu unterstützen, entwickelte die Gruppe von Prof. Geyer im Projekt 3DWoodWind eine parametrische digitale Modellierung und KI als Entwurfsassistenten. Diese Methoden bilden ein System, das den Entwurf solcher, innovativer Strukturen als Gebäudesystem unterstützt und hilft, besonders effiziente Varianten zu entwickeln. Maschinelles Lernen (ML) diente dazu, das Verhalten der Tragstruktur aber auch das energetische Verhalten in einem datengestützten Modell abzubilden, das den Entwurfsprozess in Echtzeit unterstützt. Dies war die Grundlage für ein ML-gestütztes Assistenzsystem, das direkt in die Entwurfsumgebung eingebettet entsprechend der gewählten Randbedingungen interaktiv Vorschläge lieferte, die in Bezug auf die relevanten Faktoren optimiert und effizient sind zugleich jedoch den Gestaltungswünschen gerecht wurde. Auf diese Weise wird es möglich, diese anspruchsvolle, filigrane und nachhaltige Bautechnik so wie andere Bautechniken für Büro- und Wohngebäuden einzusetzen.

2 GESAMTPROZESSDARSTELLUNG

2.1 Gestaltungsprozess

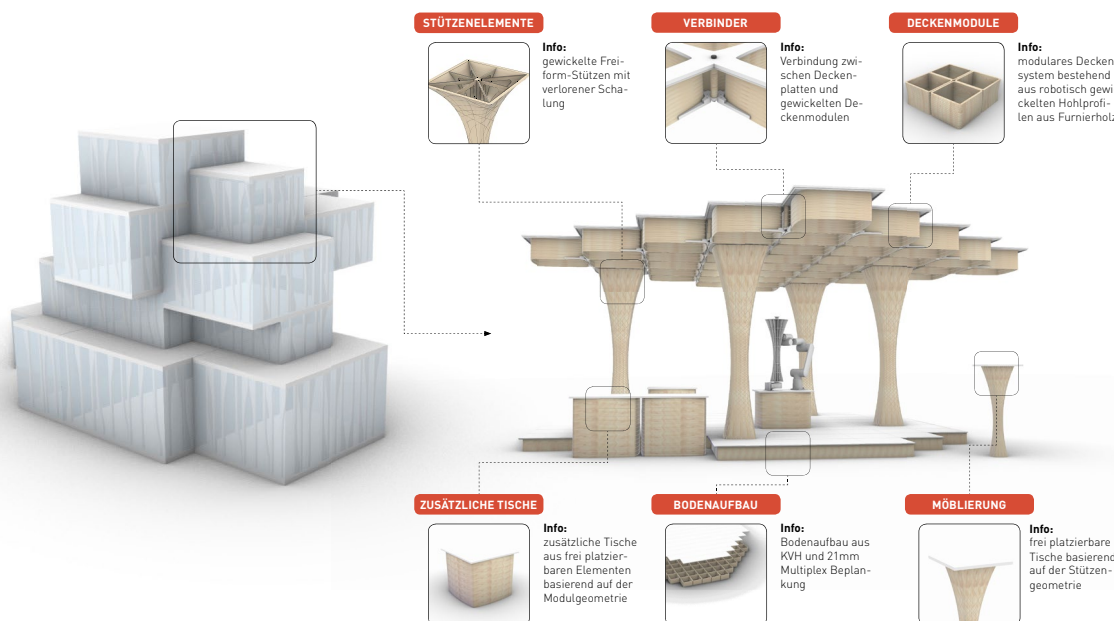


Abb. 2 Gestaltungsprozess

Der Pavillonentwurf basiert auf der Grundidee den Forschungsdemonstrator selbst als Ausschnitt aus einem mehrgeschossigen Gesamtbau zu betrachten (Abb. 2). Dieser besteht aus mehreren neben- und übereinander angeordneten räumlichen Einheiten. Eine modulare Bauweise ermöglicht dabei auf die jeweiligen bautechnischen und nutzerbezogenen Anforderungen wie räumliche Aufteilung, strukturelle Eigenschaften, thermischer Komfort und individueller Tageslichtsteuerung einzugehen.

Der Forschungspavillon besteht dafür aus mehreren gewickelten Hohlprofilbauteilen: Ein modulares Deckensystem (a) aus gleichen, rechteckigen Hohlprofilen, die von einzelnen pilzförmigen Stützelementen (b) und ggf. zusätzlichen, individuellen Wandelementen (c) getragen werden. Sitzmöglichkeiten (d) sowie Tische (e) aus frei platzierbaren Bauteilen können je nach gewünschter räumlicher Aufteilung individuell angeordnet werden. Die gesamte Struktur steht dabei auf einem Bodenaufbau, wofür die gleichen Hohlprofile wie im Deckensystem genutzt werden können.

Die Gesamtstruktur erstreckt sich über ca. 6 x 6m mit einer lichten Höhe von 2.50m (Abb. 3). Zum Einsatz kommen insgesamt ca. 41 Deckenmodule mit einer Höhe von 310mm und einer Breite von 825mm sowie vier Stützen mit einer Höhe von ca. 2.80m und variierendem Querschnitt. Analog zur Deckenstruktur wird der Bodenaufbau konstruiert.

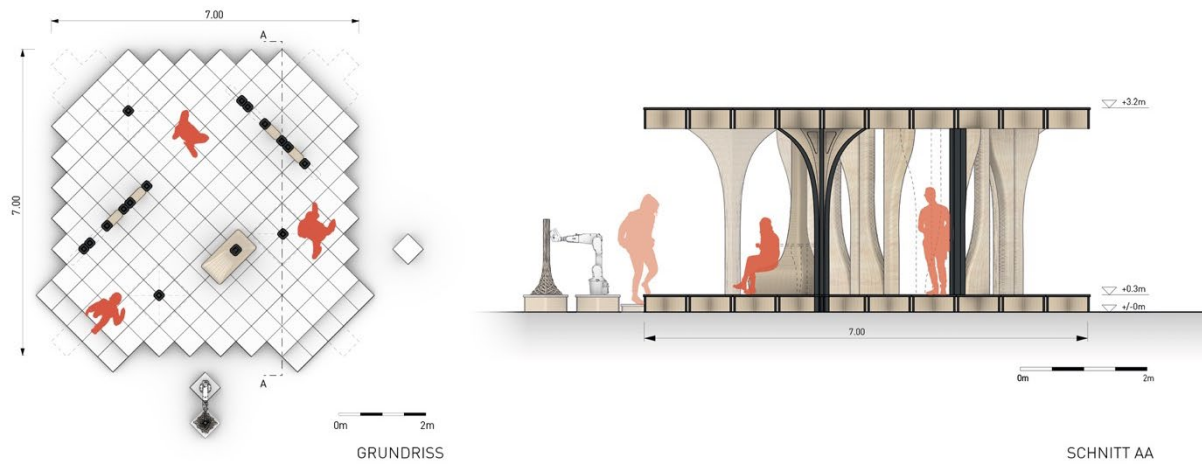


Abb. 3 Grundriss und Schnittdarstellung

2.2 Lebenszyklus

Die modulare Bauweise ermöglicht nicht nur eine freie Anordnung der Deckenelemente und Stützen, sondern sorgt gleichzeitig für eine einfache und anwenderfreundliche Montage sowie Demontage. Dies erlaubt nach der tempo-

rären Nutzung des Demonstrators eine vollständige Rekonfiguration der Gesamtstruktur. Dank des modularen Systems lässt sich der Forschungspavillon so in unterschiedlichen Konfigurationen neu zusammensetzen und nachnutzen. Dadurch entsteht ein Kreislaufprozess, der mit hoher Flexibilität auf den jeweiligen Anwendungsfall reagieren kann (Abb. 4).

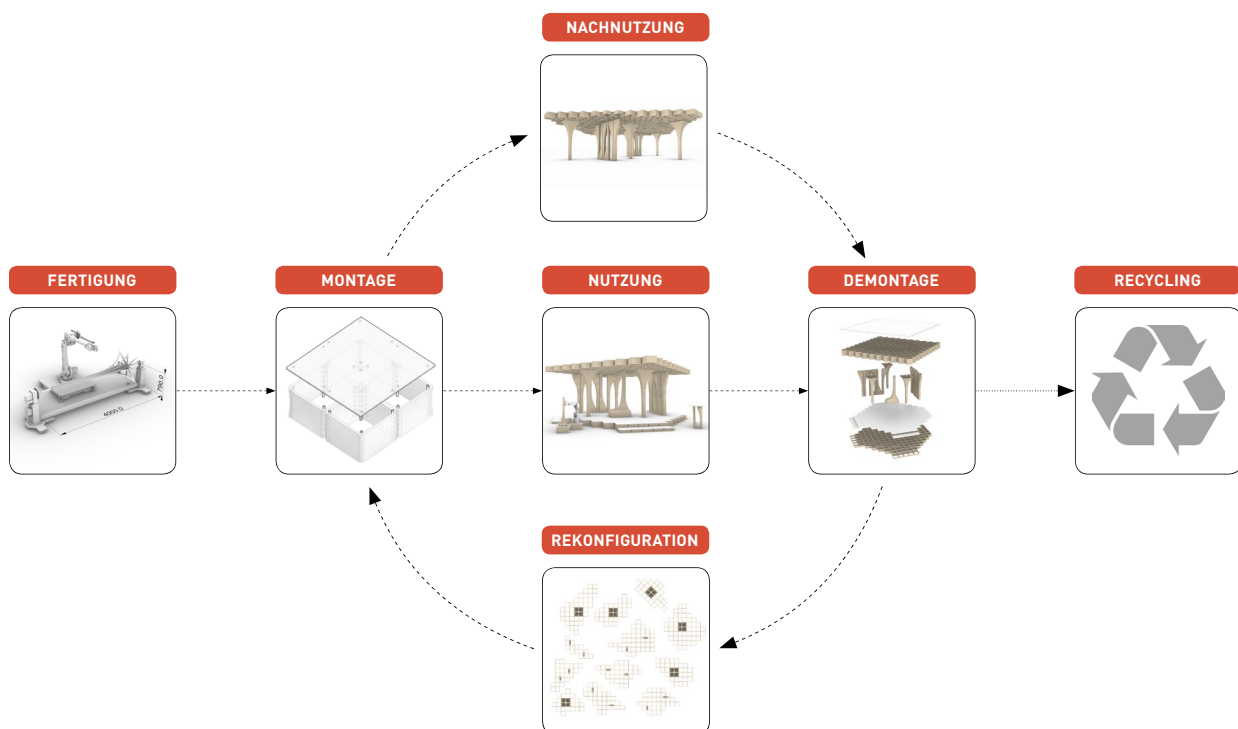


Abb. 4 Lebenszyklus

2.3 Wickelprozess

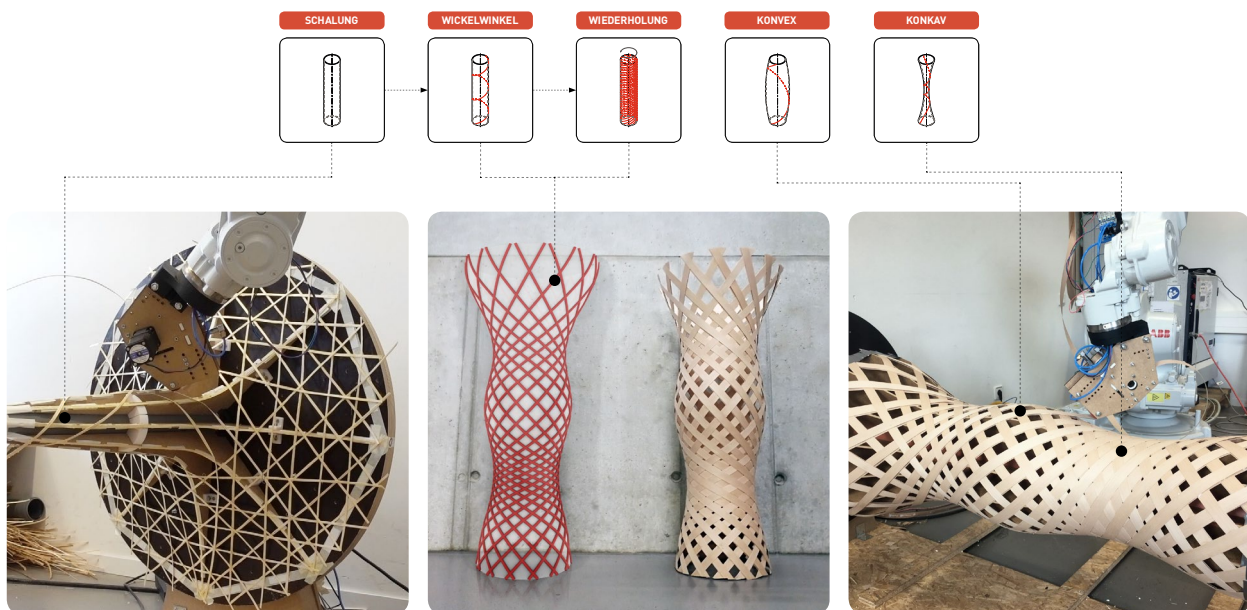


Abb. 5 Robotischer Wickelprozess mit Schalungselementen auf einer externen Rotationsachse

Um gewickelte Hohlprofilbauteile aus Furnierholz herzustellen, werden zunächst einzelne Wickellinien auf einer gewünschten Geometrie digital generiert. Diese Linien setzen sich aus lokal geodätischen Liniensegmenten zusammen. Der Startpunkt und Winkel bestimmt die jeweilige Positionierung und Ausrichtung der späteren Furnierlage. Die generierte Wickellinie kann entlang eines Schalungselements wiederholt und rotiert werden und bildet so die erste Lage aus. Durch eine entgegengesetzte Ausrichtung der Furnierstreifen erhält das Bauteil seine benötigte Stabilität. Je nach Krümmung ändert sich der Wickelwinkel entlang der Bauteilgeometrie, sodass die Wickellinien in Bereichen mit konkaver Krümmung enger beieinander liegen, wohingegen sich die Linien in konvexen Bereichen aufspreizen (Abb. 5). Hierdurch entsteht eine über die Bauteilgeometrie steuerbare Materialverteilung des Furniers. Zusätzlich können die Furnierstreifen durch Versetzen und wechselweises Wickeln miteinander verwebt werden.

Zur Herstellung der einzelnen Lagen wurden individuelle Werkzeugpfade generiert. Ein Roboterarm mit Auftragswerkzeug bewegt sich entlang dieser Werkzeugpfade. Gleichzeitig rotiert das auf einer externen Rotationsachse montierte Schalungselement.

2.4 Materialsystem

DECKPLATTE & VERBINDER

Sperrholz

- 21mm Multiplex, weiß beschichtet



ÄUSSERE TRAGSTRUKTUR

Gewickelte Hohlprofile

- gewickelte Hohlprofile aus Furnierholz
- hohe Langlebigkeit und Wiederverwendbarkeit
- sortenreine Trennung von äußeren Hohlprofilen und innenliegender Schicht
- recyclingfähig analog zu Furnierschichtholz/sperrholz (Altholz-Kategorie AII/AIII)

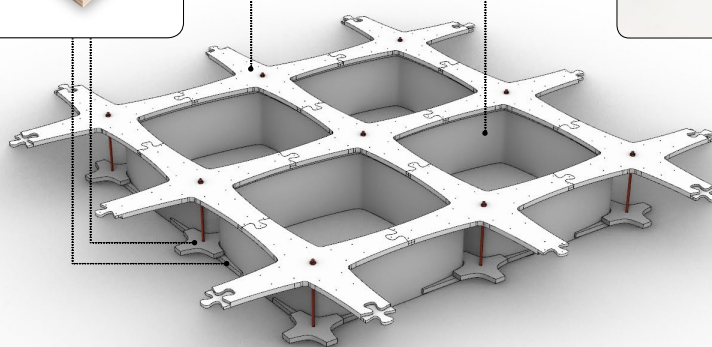
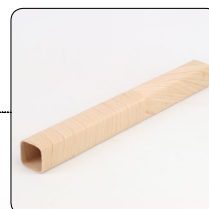


Abb. 6 Materialsystem

Furnierholz:

Als Basis für das zugrundeliegende Materialsystem von gewickelten Bauteilen kam aufgrund der hohen Festigkeitseigenschaften Furnierholz aus Buche zum Einsatz. Bei der Fertigung wurde eine Breite von 48mm und eine Materialstärke von 0,5 mm eingesetzt.

In Abhängigkeit der Furnierstärke wurden zulässige Biege­radien ermittelt und die Bauteilgeometrien darauf ab­ge­stimmt. Somit ließ sich eine Faltenbildung bzw. Stauchung des Furniers vermeiden, sodass die natürliche Holzstruktur intakt bleibt.

Der Mindestbiegeradius wird mithilfe einer einseitigen Vlieskaschierung (z.B. Cellulosevlies) als Verstärkungslage weiterhin verringert. Durch den Einsatz des Vlies bekommt das Furnier eine zusätzliche Stabilisierung und wird somit biegsamer, wodurch die geometrischen Möglichkeiten für den Bauteilentwurf erhöht werden.

Klebstoffsystem:

Zur Fügung der einzelnen Schichten untereinander wurde nach jeder Lage eine definierte Menge Klebstoff aufgetragen. Für die Untersuchungen wurde in Kooperation mit dem Industriepartner Jowat SE ein 1-komponentiges Klebstoffsystem auf Basis von Polyurethan ausgewählt und getestet.

Ausschlaggebend für die Auswahl des Klebstoffsystems war dabei insbesondere die offene Zeit, die je nach Fabrikationsstrategie entweder sehr kurz oder sehr lang sein sollte. Die ausgewählte Klebstoffreihe Jowapur® 686.10 – 686.60 bietet unterschiedliche offene Zeiten – von 10min bis zu 45min. Für die Umsetzung der großmaßstäblichen Forschungsstruktur war ein System mit einer langen offenen Zeit nötig, um zu garantieren, dass der Klebstoff nicht aufschäumt bevor jede Lage fertig gewickelt wurde. Daher fiel die Wahl des Klebstoffs auf Jowapur® 686.60 mit einer offenen Zeit von 45min.

3 KONSTRUKTIONSSTRUKTUR

3.1 Tragwerkskonzept

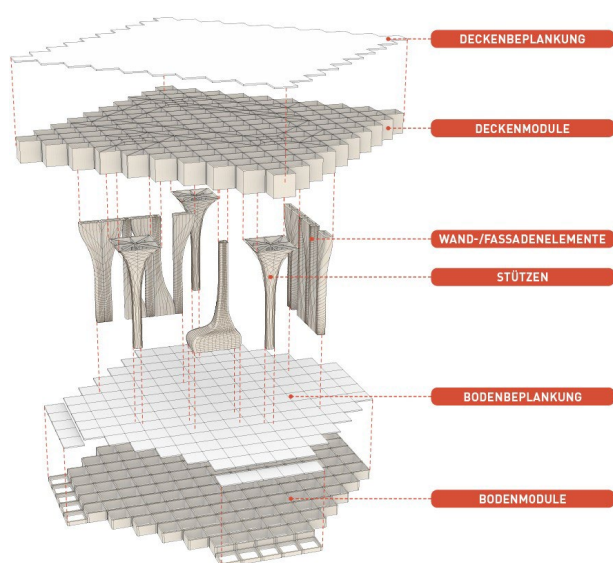


Abb. 7 Darstellung der Konstruktionsstruktur

Die $6 \times 6 \text{ m}^2$ große Struktur des Pavillons ist eine Kombination aus einem innovativen Deckensystem, das von Holzsäulen getragen wird (Abb. 7). Die horizontale Stabilität des Systems wird durch biegesteife Verbindungen zwischen der Säule und der Decke, sowie zwischen der Säule und dem Boden erreicht. Die Form der Säule ist auf ihr statisches Verhalten abgestimmt und optimiert.

Das Deckensystem besteht aus quadratischen, modularen Elementen von ca. $0,80 \text{ m}$, die oben durch ein darüber liegendes Holzdeck und unten durch eine Querverbindung in den Ecken, wo sich die Module treffen, verbunden sind.

3.2 Analyse

Das Bauwerk wurde als temporär betrachtet und die Lastannahmen gemäß den Eurocodes EN 1991-1-1.3, EN 1991-1-1.4 und dem nationalen Anhang DIN EN 13782, 6.4.3.3, DIN EN 13814, 5.3.3.5 getroffen.

Schneelasten:

Eurocode: EN 1991-1-3
DIN EN 13782, 6.4.3.3
DIN EN 13814, 5.3.3.5

$$s_{k, \text{reduced}} = 0.30 \text{ kN/m}^2$$

$$s = 0.28 \text{ kN/m}^2$$

Windlast:

Eurocode: EN 1991-1-4
Nationaler Anhang: DIN EN 1991-1-4, NA.B.5

$$\text{fundamentl}V_{b,0} = 22.5 \text{ m/s}^2,$$

$$q_b = 0.7 \times 0.32 \text{ kN/m}^2$$

$$w = -0.40 \text{ kN/m}^2$$

Für den Innenraum der Ausstellung wurde der Windauftrieb gemäß den technischen Richtlinien mit $12,5 \text{ kg/m}^2$ angenommen.

Um die richtige Konfiguration der Verbindung zwischen den Modulen zu finden, wurden verschiedene Varianten getestet. Die gewählte Variante konnte eine ausreichende Steifigkeit bieten und die Herstellung erleichtern. Wie folgt die Ergebnisse für verschiedene Varianten dargestellt:

1. Durchgehende Verbindung der Module:

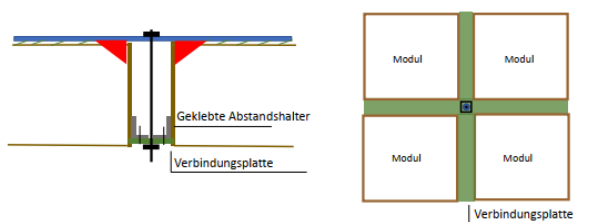


Abb. 8 Verbindungsprinzip 1 - im Schnitt und Grundriss

2. Verbindung in der Ecke (ohne Aussteifung):

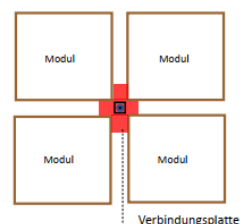


Abb. 11 Verbindungsprinzip 2 - im Grundriss

LF: G + S Modulhöhe 30cm

LC 1000 230X-0.06X 232Y-0.06X 232Z-46.56X
 Utilization (sigma/fc)
 max.: (sigma/SICM) approx. 54.305Pa (sigma/fc = 3.94)
 reliable values only via AQB
 min.: (sigma/SIGAD) approx. 140.228Pa (sigma/fc = 5.70)
 compression
 sigma/fc = -5.696

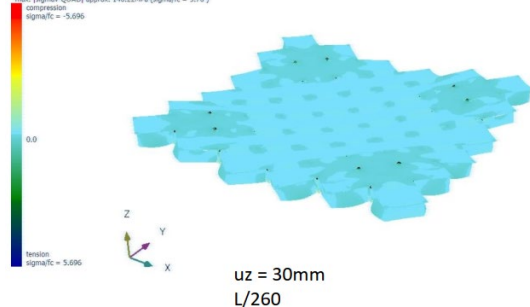


Abb. 9 Durchbiegung (mm) - Variante 1

LF: G + S

compression
 sigma/fc = -14.721
 0.0
 tension
 sigma/fc = 14.721

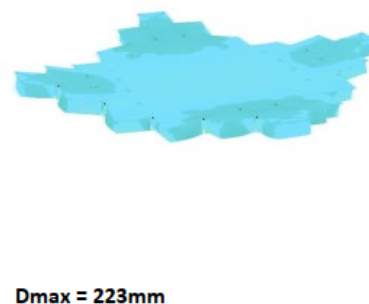


Abb. 12 Durchbiegung (mm) - Variante 2

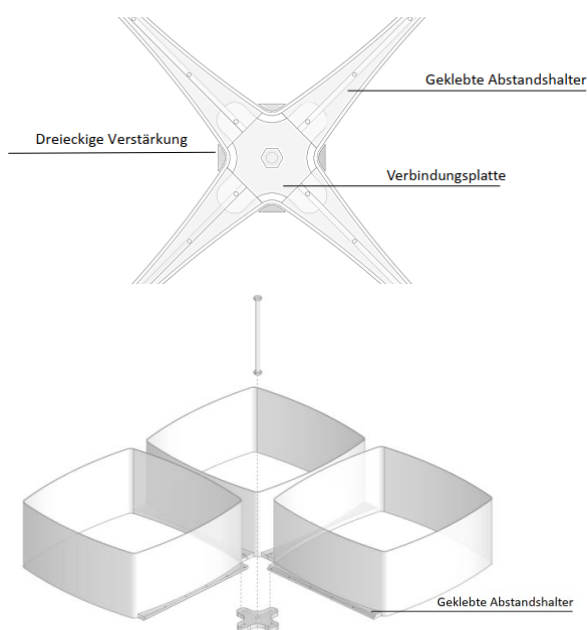


Abb. 10 Verbindungsprinzip 1

Das endgültige Konzept für die Verbindung der Module sieht nur eine Verbindung in den Ecken vor, die mit Bumerang-förmigen Verstärkungen verschraubt wird. Dieses Querelement ist dann über eine vertikale Stahlstange mit der oberen Platte verbunden. Auf diese Weise wird die strukturelle Rolle der Module hervorgehoben und der Materialeinsatz optimiert.

3. Verbindung in der Ecke (mit Verstärkung):

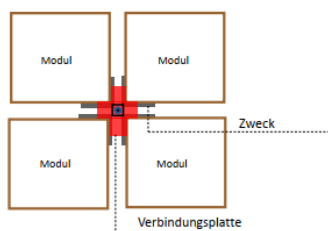
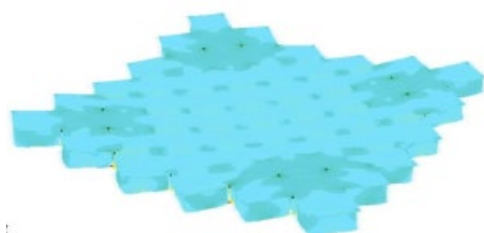


Abb. 13 Verbindungsprinzip 3 - im Grundriss

Die Verformung wird durch $L/600$ für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit begrenzt, wie in Abb. 14 unten dargestellt:

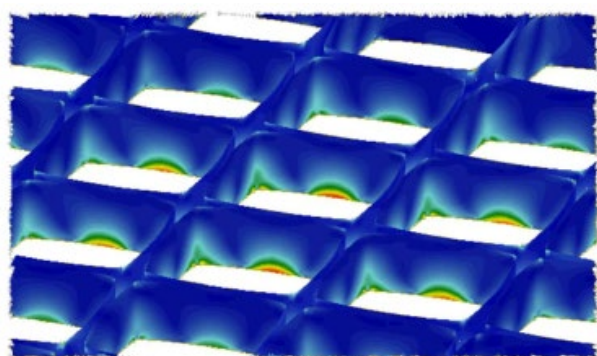
TEMPORÄRE STRUKTUREN:



15mm, $L/600$

Abb. 14 Durchbiegung (mm) – Variante 3

Die Spannungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit sind mit einer maximalen Tragfähigkeit der Holzmodule von 15 MPa begrenzt, die sich auf die mittlere Spannweite der Module konzentriert (Abb. 15):



$\sigma < 15 \text{ MPa}$

Abb. 15 Spannungen der Deckenmodule für die ULS Lastkombination

Die nachfolgenden Abbildungen 16/17 zeigen die globalen Resultate aus den Tragwerksanalysen. In Abb. 16 sind die globalen Spannungen der Deckenmodule für die ULS Lastkombination dargestellt; Abb. 17 zeigt die globale Deformation der Struktur für die SLS Lastkombination.

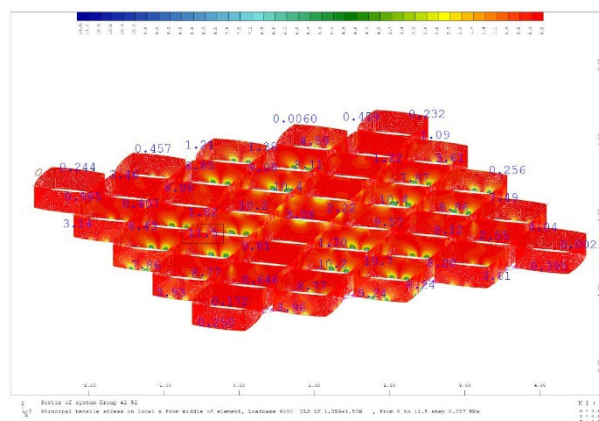


Abb. 16 Globale Spannungen der Deckenmodule für die ULS Lastkombination

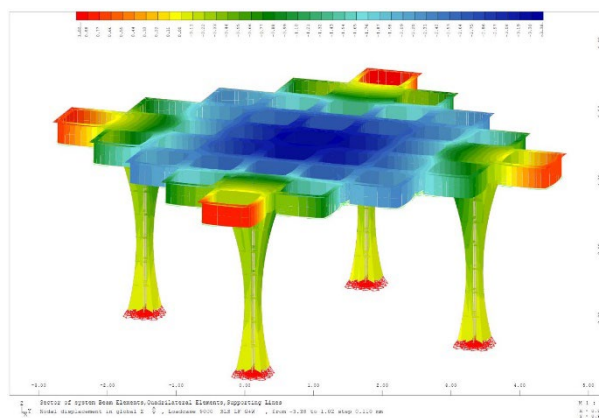


Abb. 17 Globale Deformation der Struktur für die SLS Lastkombination

Voruntersuchungen des Materialsystems:

Um die Kapazität des Lagenaufbaus der Module zu überprüfen, wurden Materialzugversuche durchgeführt. Es wurden zwei Arten von Lagenstrukturen konstruiert, eine mit 3 vertikalen Lagen (Abb. 18) und eine mit 4 Lagen im 45-Grad-Winkel, kreuzweise 2 im und 2 gegen den Uhrzeigersinn. Die horizontalen Lagen sind jeweils um die halbe Furnierbreite (24mm) zueinander versetzt angeordnet.

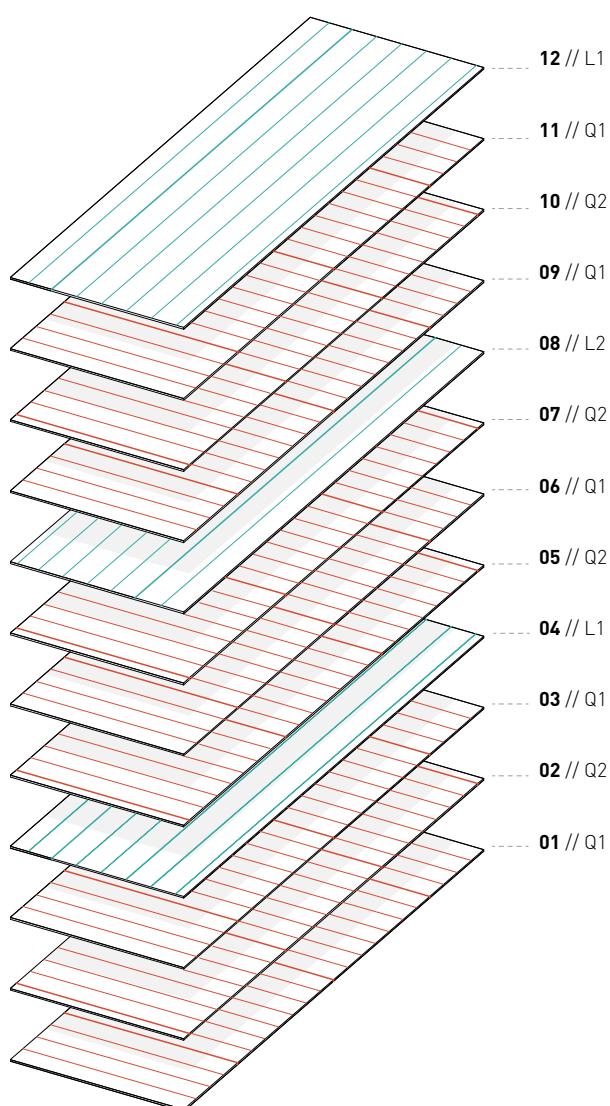


Abb. 18 Lagenaufbau der Test-Samples für Voruntersuchungen des Materialsystems



Abb. 19 Zugversuch und Versagensarten der Probekörper

Die Ergebnisse zeigten, dass die Proben in der Nähe des Greifers sowohl parallel als auch senkrecht zur Faserrichtung versagten (Abb. 19). Die Mindestbruchkraft der Probekörper beträgt 9897,58 kN, was 33,27 N/mm² entspricht (Abb. 20).

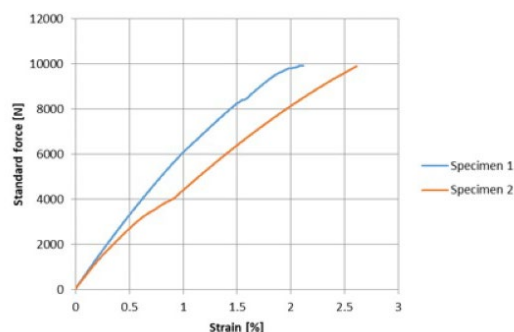


Abb. 20 Zug-Dehnungs-Kurve der beiden Probekörper

Die Materialtests bestätigten unsere Annahmen für die Widerstandsfähigkeit der Deckenmodule, was uns zu dem endgültigen Entwurf führte, der im nächsten Kapitel dargestellt wird.

3.3 Konstruktionsdetails

Fundamentierung:

Das Fundament des Pavillons besteht aus Holzfüßen, die unter dem Bodenniveau liegen. Eine Verankerung oder sonstige Befestigung am Boden ist nicht erforderlich. Biegemomente und Horizontalkräfte werden durch zusätzliches Ballastgewicht stabilisiert.

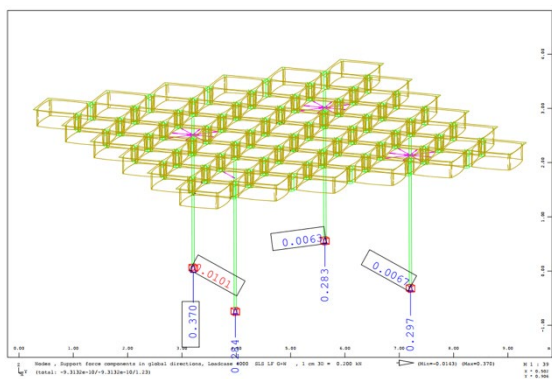


Abb. 21 Aufwärts gerichtete Reaktionskräfte

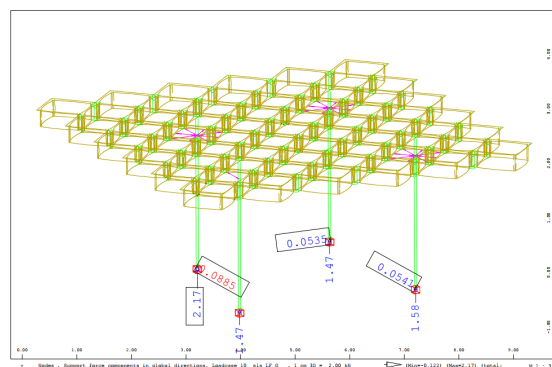


Abb. 22 Eigengewichtige Reaktionskräfte

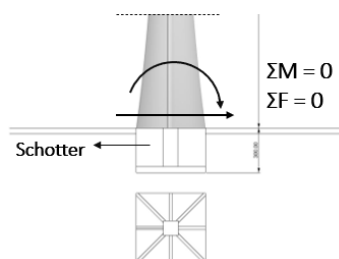


Abb. 23 Kraft- und Momentenverlauf im Fundament

Das erforderliche Ballastgewicht für das Fundament beträgt 40 kg Kies in jeder Säule (Abb. 23).

Deckenmodule:

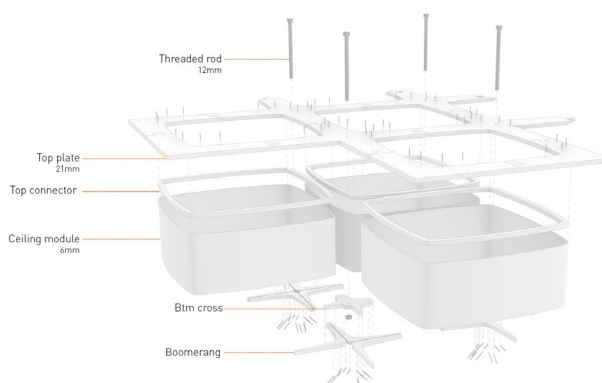


Abb. 24 Konstruktionsdetails des Deckensystems

Die erforderliche Dicke der Deckenmodule beträgt 6 mm. Das endgültige Konzept für die Verbindung der Module umfasst nur eine Verbindung in den Ecken, die mit den Boomerang-förmigen Versteifungen verschraubt wird (Abb. 24). Dieses Querelement ist dann über eine vertikale Stahlstange mit der oberen Platte verbunden. Auf diese Weise wird die strukturelle Rolle der Module hervorgehoben und der Materialeinsatz optimiert.

Stützelemente:

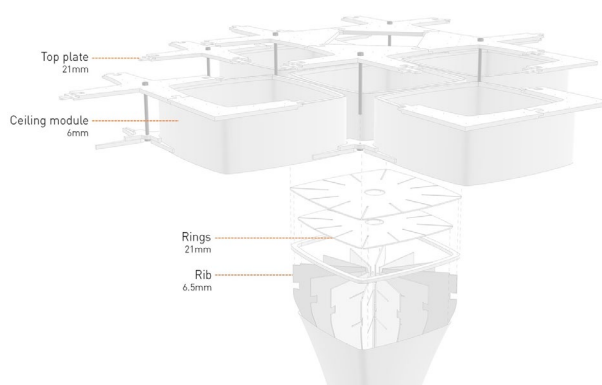


Abb. 25 Konstruktionsdetail zwischen Säulen und Decke

Die Verbindung zwischen den Säulen und der Decke wird durch die Verlängerung des inneren Kerns der Säulen und der Aussteifungen bis zur Decke erreicht (Abb. 25). Durch horizontale Platten werden die Lasten von den Modulen auf die Kanten der Säulen übertragen.

3.4 Endgültiger Entwurf und Kalibrierung

Der Pavillon wurde mit der Finite-Elemente-Software Sofistik simuliert. Für die Positionierung der Stützen wurde ein maschinelles Lernmodell verwendet, das auf akzeptablen Massen- und Verformungskriterien basiert. Die Module wurden als Schalenelemente und die Verbindungen zwischen ihnen als Federelemente simuliert.

Zur Bestimmung der Steifigkeit dieser Federn wurde ein Modell im Maßstab 1:1 hergestellt (Abb. 26) und unter Messung der Verformung belastet, um eine Last-Verschiebungs-Kurve für bestimmte Punkte der Struktur abzuleiten. Anschließend wurde ein äquivalentes Modell simuliert (Abb. 27), und die Steifigkeit der Federn wurde kalibriert, um das gleiche strukturelle Verhalten zu erreichen.



Abb. 26 Belastungstest - P_{max} : 175kg pro Punkt

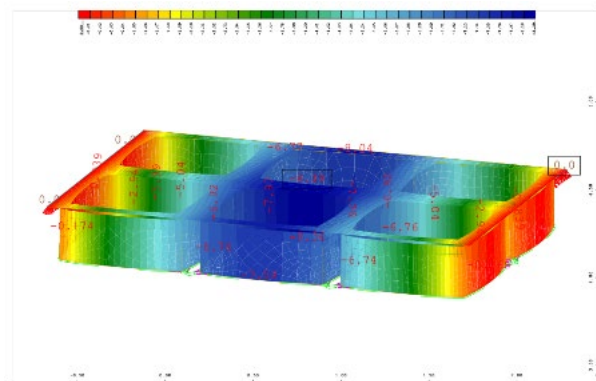


Abb. 27 Äquivalentes FEM-Modell - Maximale Verformung unter 350 kg $\delta = 8,39$ mm

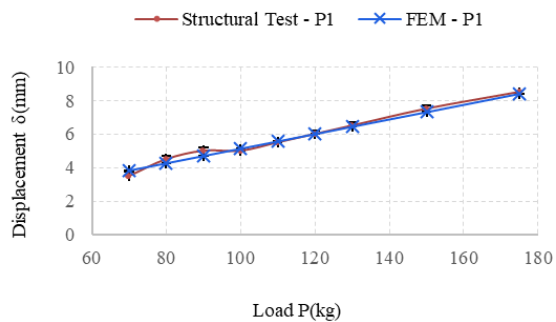


Abb. 28 Lastverschiebungskurven für Punkt P1

Das obige Diagramm (Abb. 28) zeigt die Verformung des Belastungstests und des äquivalenten FEM-Modells. Die beiden Kurven liegen sehr nahe beieinander, was auf die hohe Genauigkeit des Simulationsmodells gegenüber dem realen Verhalten des Systems hinweist.

Darüber hinaus wird das globale Strukturverhalten in hohem Maße von der äußeren gewundenen Oberfläche der Stützen beeinflusst. Abb. 29/30 zeigen die ersten Knickmodi mit und ohne Berücksichtigung der gewickelten Oberfläche.

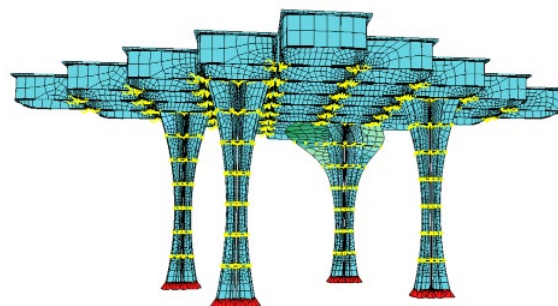


Abb. 29 Ohne gewickelte Oberfläche: Belastungsfaktor: 1,08

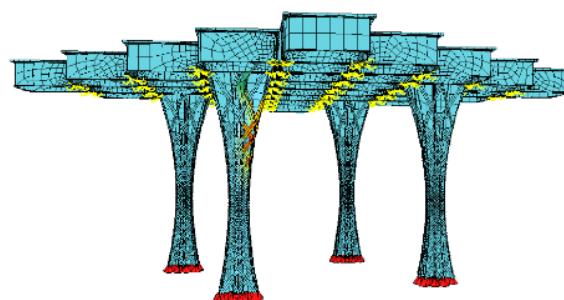


Abb. 30 Mit gewickelter Oberfläche zuerst: Belastungsfaktor: 2,28

4 KI-OPTIMIERUNG

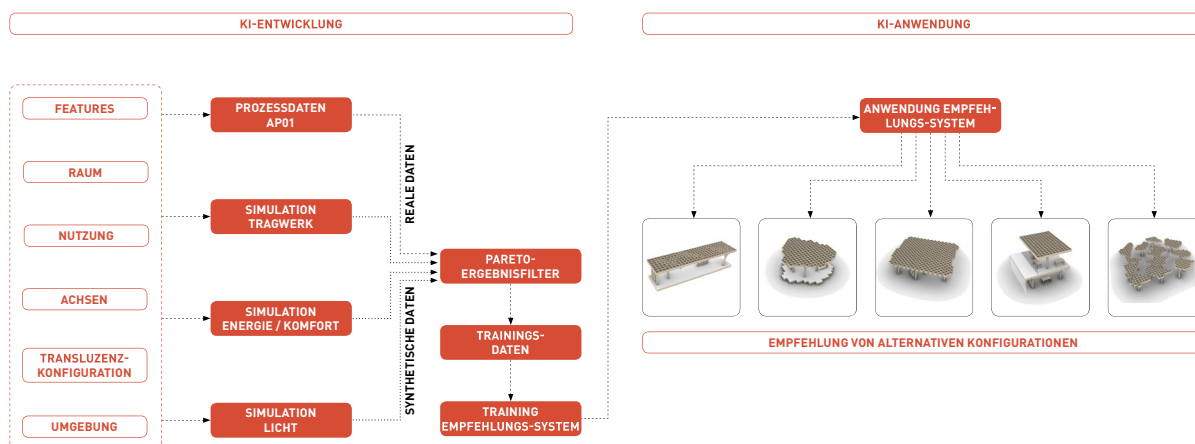


Abb. 31 Optimierungsstrategien

4.1 Optimierungsstrategien

Um die Optimierung interaktiv in den Designprozess integriert anwendbar zu machen, wird künstliche Intelligenz eingesetzt. Es wurde ein prototypisches KI-basiertes Ersatzmodell erstellt, das in der Lage ist, das Verhalten eines Entwurfs in Echtzeit ohne weiteren Modellierungsaufwand für Simulation vorherzusagen. Die Nutzung dieses Ersatzmodells ermöglicht die Integration von Optimierung in Entwurfsprozesse. Es gibt zwei verschiedene Verhaltensweisen, die das Modell vorhersagt: das Tragverhalten und den Betriebsenergiebedarf. Von einer Erzeugung eines Modells für Tageslicht und Beleuchtung wurde zugunsten der interaktiven Implementierung abgesehen. Für die Beleuchtungsanalyse stehen echtzeitfähige Lösungen am Markt zur Verfügung.

4.2 Parametrisches Modell

Systemparameter waren Länge, Breite und Höhe des Pavillons, sowie Modullänge und -höhe für das Decken/Stützensystem und Modulbreite für das Wandmodulsystem. Des Weiteren konnten die Wandlinien bestimmt werden, welche einen individuellen Überhang des Daches ermöglichten, wodurch sowohl energetische wie auch beleuchtungstechnische Interessen unterschiedlich modelliert werden konnten. Darüber hinaus gibt es für alle Fas-

sadenflächen und die Dachfläche die Möglichkeit bestimmte Module als reine Glasfläche auszuführen. So können Blickbeziehungen, Raumqualität und das energetische Profil weiter beeinflusst werden.

Als Konstruktion wurde angenommen, dass die gewickelten Elemente aus Furnier (U-Wert: 0,17 W/m²*K, Dichte: 600kg/m³, Spezifische Wärmekapazität: 1800 J/kg*K) mit einer eingespritzten Zellulosedämmung (U-Wert: 0,042 W/m²*K, Dichte: 40kg/m³, Spezifische Wärmekapazität: 2300 J/kg*K) versehen werden. Die Wandmodule werden zusätzlich zu einer Sandwichkonstruktion mit Glaspanelen erweitert. Durch die variable Dicke der Module ergeben sich unterschiedliche Verschattungs- und U-Werte. Gleiches gilt für die variable Deckenhöhe. Eine kleine Deckenhöhe bedeutet weniger Material und somit kleinere Lasten für die Stützen, aber damit auch einen größeren U-Wert.

Das abstrahierte Energiemodell besitzt nur polygonale Flächen und nur der Überstand des Daches als Verschattungsfläche entspricht der Geometrie des eigentlichen Entwurfsmodelles. Dies liegt daran, dass EnergyPlus als Simulationsengine gewählt wurde. Da der Pavillon zu diesem Zeitpunkt noch kein Konzept zu einem primären und sekundären Gebäudesystem besitzt, wurde ein idealisiertes und adiabates Luftsystem simuliert, um nur die Heiz- und Kühllasten des Entwurfes zu messen, ohne dass die Lasten durch Gewinne/Verluste der Infrastruktur verfälscht werden.

4.3 Synthetische Trainingsdaten

Der erste Schritt bei der Erstellung eines Ersatzmodells bestand darin, Trainingsdaten zu erzeugen. Um Trainingsdaten zu erstellen, wurden bestimmte Parameter als Feature ausgewählt, so dass die möglichen Entwurfsvarianten der neuen laminatbasierten Bautechnik abgebildet werden. Diese Merkmale beschreiben relevante Geometrie- und Konstruktionseigenschaften. Ein parametrisches Geometriemodell ist in der Software Rhino/Grasshopper entwickelt worden, in das über die Tools Honeybee und Karamba Energiemodell und Tragwerksmodell integriert wurden.

Aus diesem Framework wurden Trainingsdaten erzeugt, die dazu dienen werden, das KI-Modell zu trainieren. Für das Energiemodell waren ca. 750 Datenpunkte ausreichend, für das Tragwerksmodell waren wegen größerer Merkmalszahl ca. 1600 Datenpunkte notwendig. Parallel ist die Umgebung für das Training des KI-Modells vorbereitet worden. Die Parameter für das Energiemodell wurde mittels space-filling Latinhypercubeverfahren gesampelt.

Feature	ϕ	σ	Min	Max
P:O [°]	45	26	0	90
P:L [m]	7.8	2.5	3	12
P:B [m]	7.9	2.5	3	12
P:H [m]	3.2	0.4	2.5	4
D:H [cm]	68	17	40	100
D:M:B [cm]	38	7	25	50
D:Ü [m]	0.9	0.4	0.2	2.5
W:T [cm]	20	6	10	30
V:L [m³]	97	75	4	414
F:WWR:N	0.61	0.13	0.22	0.88
F:WWR:E	0.62	0.13	0.24	0.88
F:WWR:S	0.62	0.13	0.22	0.87
F:WWR:W	0.62	0.13	0.22	0.88
D:WWR	0.28	0.2	0	0.8
W:U [$\frac{W}{m^2K}$]	0.23	0.08	0.14	0.43
Fe:U [$\frac{W}{m^2K}$]	1.51	0.16	1.38	1.78
M:U [$\frac{W}{m^2K}$]	1.49	0.22	0.97	2.01
R:U [$\frac{W}{m^2K}$]	3.21	0.34	2.86	3.92
R:Wi:U [$\frac{W}{m^2K}$]	0.12	0.02	0.09	0.18
F:Fe:S	0.32	0.05	0.17	0.37
W:M:Fe:S	0.38	0.06	0.24	0.45
D:M:Fe:S	0.34	0.07	0.19	0.49
E [$\frac{kWh}{a m^2}$]	304	90	153	771
E:H [$\frac{kWh}{a m^2}$]	185	71	66	546
E:K [$\frac{kWh}{a m^2}$]	50	20	17	156

Tabelle 1: Featurerange Trainingsdaten Energiemodell

P: Pavilion, O: Orientierung, L: Länge, B: Breite, H: Höhe, D: Decke, M: Modul, Ü: Überhang, W: Wall, T: Tiefe, V: Volume, L: Luft, F: Façade, WWR: Window-to-Wall Ratio, N: North, E: East, S: South, W: West, U: U-Value, Fe: Fenster, M: Module, S: Solar Heat Gain Coefficient, E: Jährlicher Energiebedarf, H: Jährlicher Heizwärmebedarf, K: Jährlicher Kühlenergiebedarf

Orientierung beschreibt eine Rotation von 0°: Nord bis 90°: Ost. Überhang ist die Länge zwischen der Außenkante des Daches und der Mittellinie der Wand.

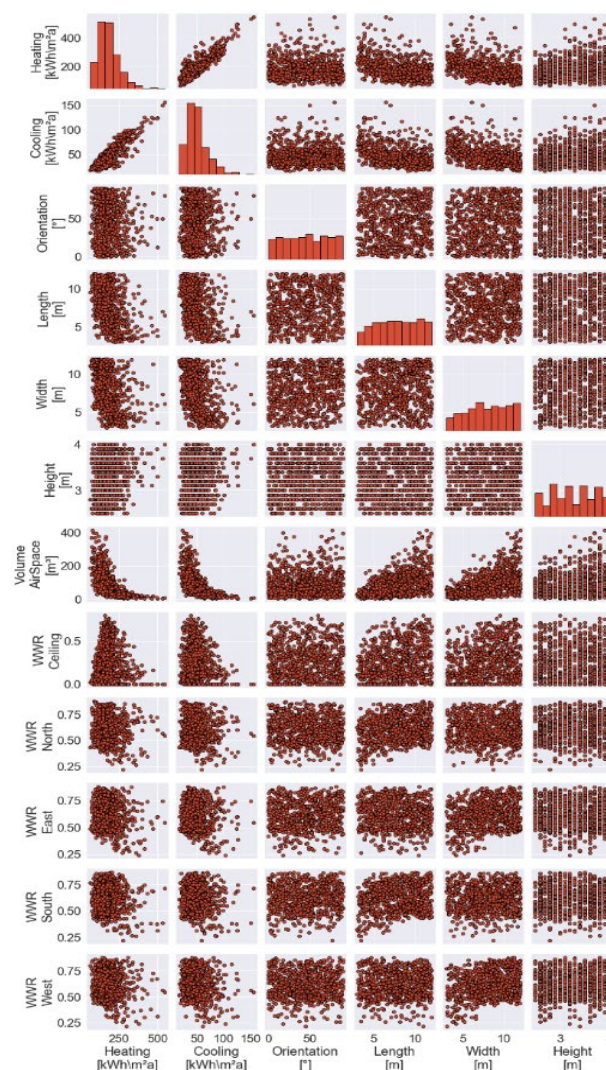


Abb. 32 Samplingschema Trainingsdaten Energiemodell

4.4 Training der Machine Learning Modelle

Die resultierenden Modelle aus dem Trainingsprozess (Abb. 33) zeigen unterschiedlich gute Qualität. Für das Heiz- und Kühlbedarfsmodell wurden je 600 unterschiedliche Deep Neural Networks (DNN) Architekturen ausprobiert von 1-20 hidden layers mit 1 – 88 Neuronen in 3er Schrittgrößen. Die beste Performance für die Heizwärmeverhersage lieferte das DNN mit 5 hidden layers je 4 Neuronen mit Root-Mean-Square-Error (RMSE) von $8,6 \frac{kWh}{a m^2}$ und einem Bestimmtheitsmaß R^2 von 0,974. Für den Kühlwärmebedarf war es ein DNN mit 9 hidden layers je 4 Neuronen mit RMSE von $2,7 \frac{kWh}{a m^2}$ und R^2 von 0,974.

Die Vorhersage des Strukturverhaltens erreichte leider nur eine Genauigkeit von R^2 0.68 bzw. 0.48 und Mean-Average-Percentage-Error (MAPE) von 15.56% bzw. 17.08% trotz einer höheren Zahl der Datenpunkte. Als Grund hierfür sind höhere Nichtlinearitäten und die fehlende Beschränkung auf allein vollausgelastete Konfigurationen zu sehen.

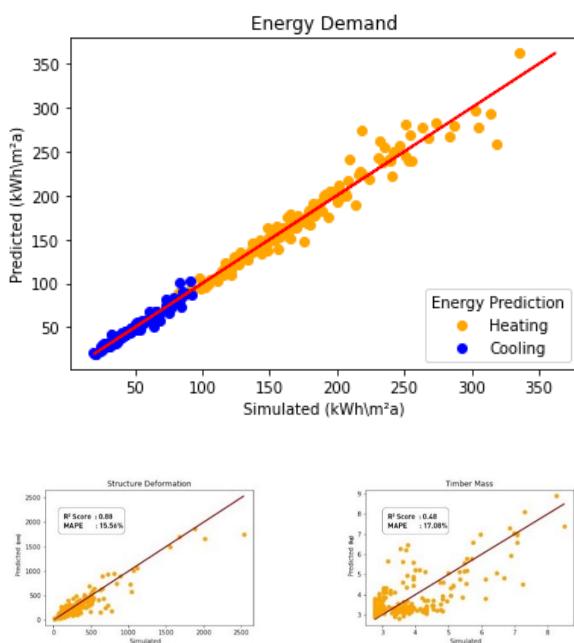


Abb. 33 Testergebnisse der trainierten KI-Modelle

4.5 Multifaktorenoptimierung

Die interaktive KI-Optimierung wird während des Entwurfs einer Pavillonstruktur auf der Grundlage mehrerer Faktoren durchgeführt. Als diese Faktoren sind Design, Struktur, Energie und Licht festgelegt worden. Bei den Konstruktionsmerkmalen hilft das KI-Modell bei der Suche nach der besten Form und Konfiguration, um effiziente Konstruktionen zu ermöglichen. Die Position und Größe der Stützen sind als strukturelle Merkmale ausgewählt worden, die das KI-Modell bei der Optimierung unterstützt. Durch die schnelle Vorhersage der Performance wird das KI-Modell im Entwerfen mit entsprechender prozessintegrierter Rückmeldung wird die Optimierung zur Senkung des Energiebedarfs, zur Verringerung der Umweltbelastung und zur Kostensenkung ermöglicht. Da der Entwurf von Bauwerken ein Prozess ist, der neben den genannten technischen Eigenschaften auch sehr auf gestalterischen Eigenschaften aufbaut, wurde diese interaktive Anwendungsstrategie der Optimierung gewählt, die das KI-Modell in der Entwurfs- und Modellierungsumgebung Rhino/Grasshopper direkt integriert, um nach guten Lösungen in Echtzeit zu suchen (Abb. 34).

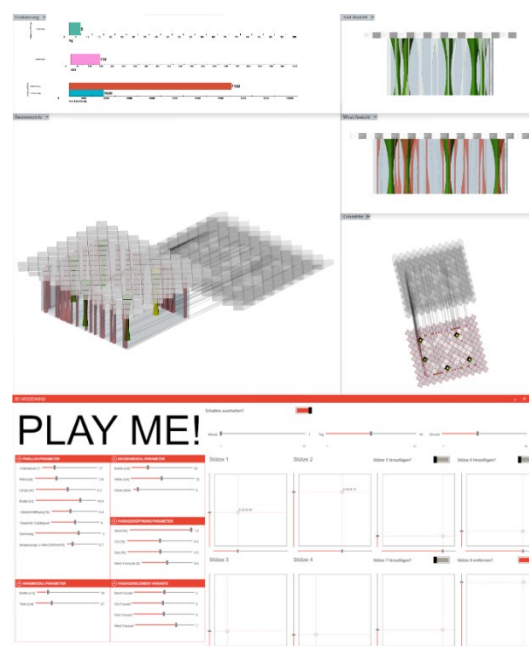


Abb. 34 Integrierte Benutzeroberfläche aus parametrischem Modell und ML-Ersatzmodellen

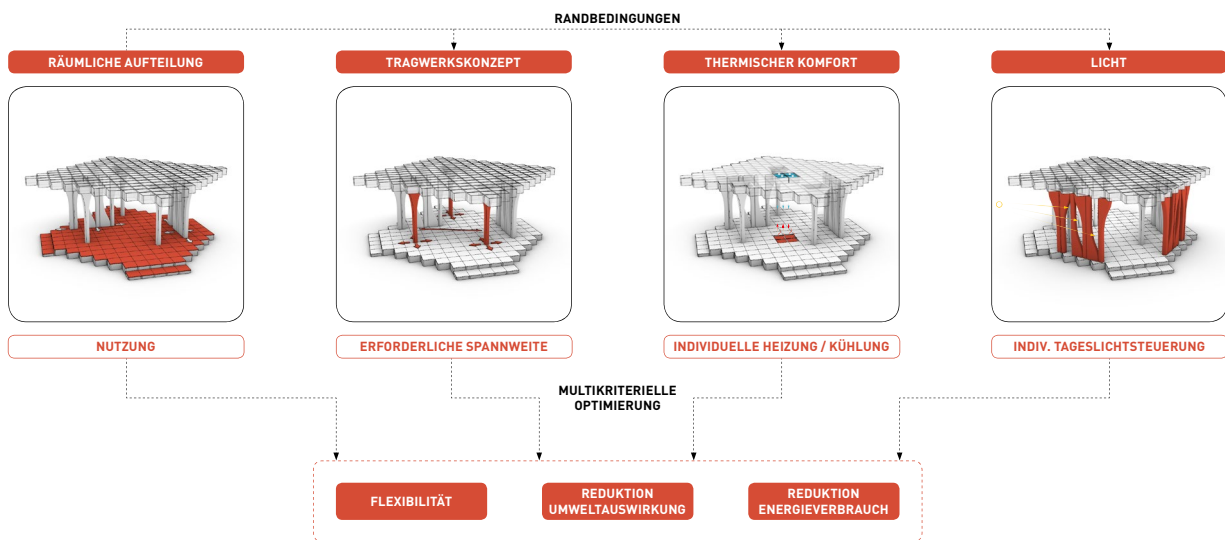


Abb. 35 Multifaktorenoptimierung

4.6 KI-BIM

Durch die hier demonstrierte Kombination von KI und BIM lassen sich Entwürfe der neuen Bautechnik effektiver erstellen und optimieren. Die Stützen, Platten und Fassadenelemente werden dazu als BIM-Komponenten modelliert und verfügen über parametrische Informationen wie Material, Größe und Dicke als Attribute. Diese Informationen werden zugleich als Eingabeparameter der KI-Modellierung verwendet werden. Die interaktive Implementierung

der KI-Prognose in den Entwurfsprozess und die digitale Modellierung des BIM ermöglicht die Einbettung der Optimierung in die Gestaltung des Bauwerks. In Entscheidungsprozesse eingebettete Rückmeldungen zu Energie- und Materialverbrauch ermöglichen die Reduktion der Umweltauswirkungen und die Erhöhung der Qualität des Bauwerks.

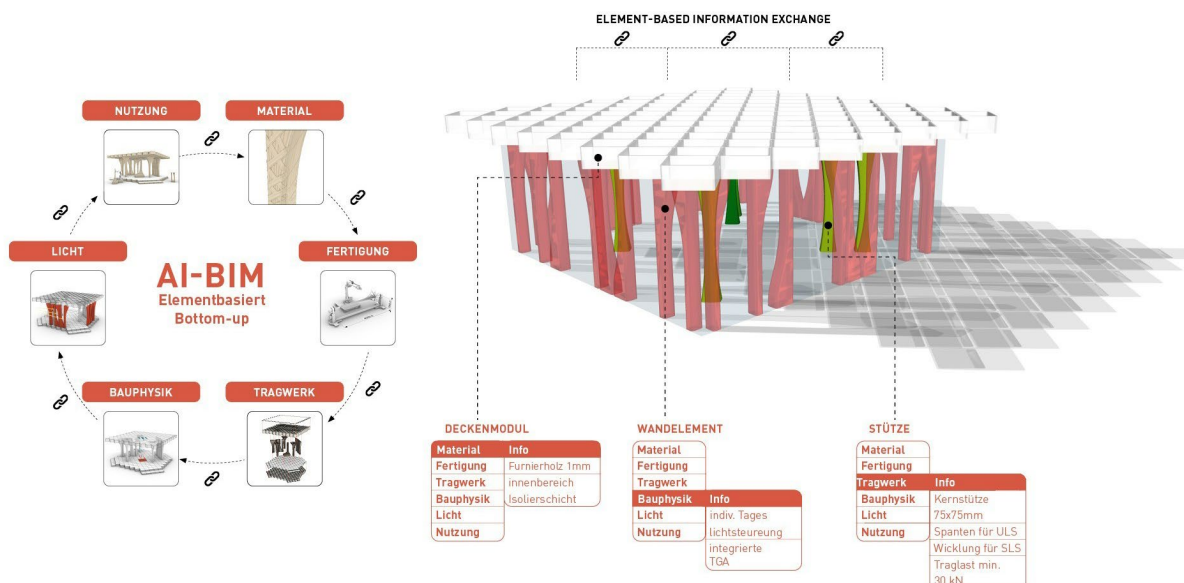


Abb. 36 KI-BIM

5 FERTIGUNGSPROZESS

5.1 Aufbau der Roboteranlage

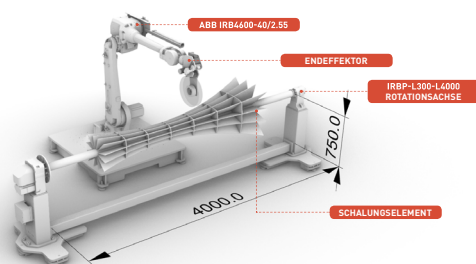


Abb. 37 Aufbau der Roboteranlage

Für die Herstellung der gewickelten Decken- und Stützelemente wurde ein ABB IRB4600-40/2.55 Roboter und einer externen ABB IRBP-L300-L4000 Drehpositioniereinheit, auf dem das Schalungselement montiert ist, verwendet (Abb. 37).

Zum Auftrag des Furniers auf dem Schalungselement wurde als Roboterwerkzeug ein spezieller Endeffektor bestehend aus folgenden Bauteilen entwickelt (Abb. 38): (a) Schnellwechselplatte, (b) Furnierrolle, (c) Filamentführung, (d) Schrittmotor, (e) Extrusionsrolle, (f) Schneidwerkzeug und (g) Andrückrolle. Dabei wird das Furnierband über eine am (d) Schrittmotor befestigte (e) Extrusionsrolle durch die (c) Filamentführung nach vorn geschoben. Mit der (g) Andrückrolle lässt sich das Furnier präzise auftragen und das pneumatisch aktuierte (f) Messer übernehmen den Zugschnitt des Furniers nach einer gewickelten Lage.

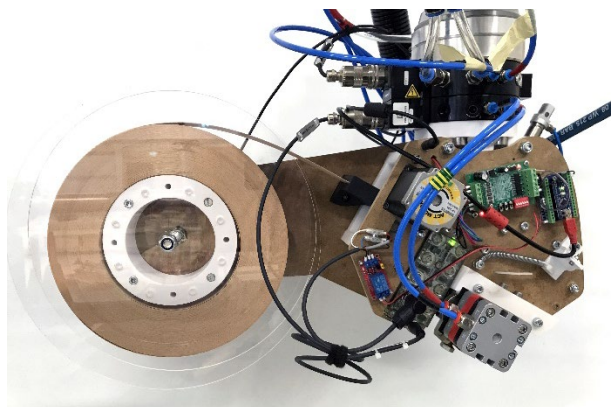


Abb. 38 Endeffektor-Design

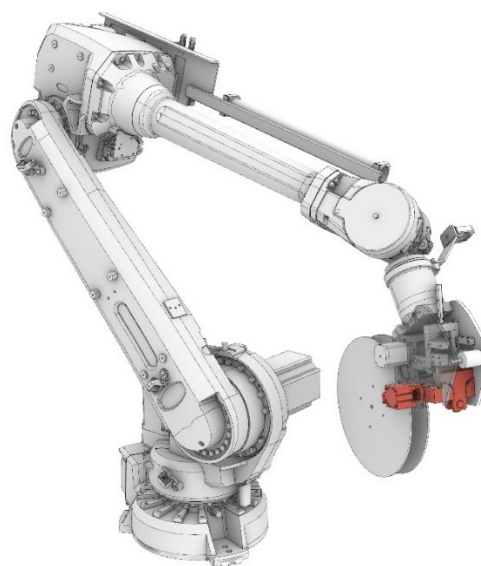


Abb. 39 Klebstoff-Auftragskopf integriert im Endeffektor

Der Auftrag einer definierten Menge Klebstoff wurde ebenfalls automatisiert in den robotischen Fertigungsprozess integriert. Zum Dosieren des Klebstoffs kam die Dosieranlage HYDROTOP 1D150M der Firma OEST GmbH & Co. Maschinenbau KG zum Einsatz. Der Klebstoffauftrag findet über den Auftragskopf FACETAC P80 statt, der für die Forschungsarbeiten ebenfalls von der Firma OEST bereitgestellt und im Zuge der Prozessentwicklung in das Auftragswerkzeug integriert wurde (Abb. 39). Dabei liegt der Auftragskopf während der Beleimung direkt am Holzfurnier an. Für die robotische Ansteuerung und folgende Fabrikation wurde aus den zuvor erzeugten Wickellinien ein Werkzeugpfad generiert. Dabei gibt es unterschiedliche Strategien zur Erzeugung des Werkzeugpfads.

Die entscheidenden Parameter, welche synchronisiert und aufeinander abgestimmt werden mussten, sind hierbei wie folgt: (a) Extrusionsgeschwindigkeit des Filaments, (b) Geschwindigkeit der Rotationsachse, (c) Geschwindigkeit des Roboters selbst und (d) Auftragsmenge des Klebstoffs.

5.2 Schalungssystem

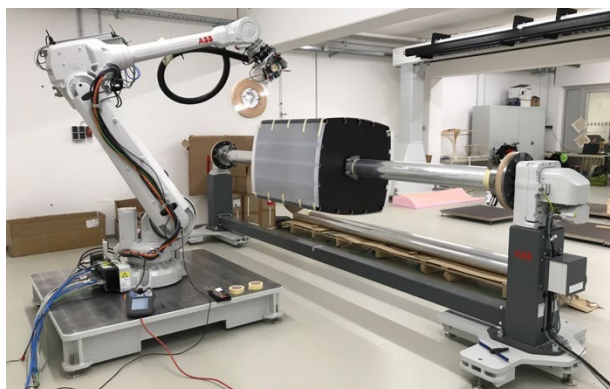


Abb. 40 Montiertes Schalungselement auf externer Rotationsachse mit Drehfutter, Aluminium-Walzenrohr und Spannringen

Um die Bauteilgeometrien herstellen zu können, wurde im Forschungsprojekt ein geeignetes Schalungssystem entwickelt, welche die jeweiligen Formen abbildet und die Grundlage für den darauffolgenden Wickelprozess schafft.

Dazu wurden Drehfutter (a) an den Enden der externen Rotationsachse befestigt, die als Aufnahme für ein Aluminium-Walzenrohr (b) mit einem Durchmesser von 200mm, 3750mm Länge und hoher Rundlaufgenauigkeit für eine hohe Präzision fungieren (Abb. 40). Auf dem Hohlprofil wurde das Schalungselement (c) mittels hierfür entwickelten Spannringen (d) verschraubt.



Abb. 41 Innere Struktur der Schalung

Deckenmodule:

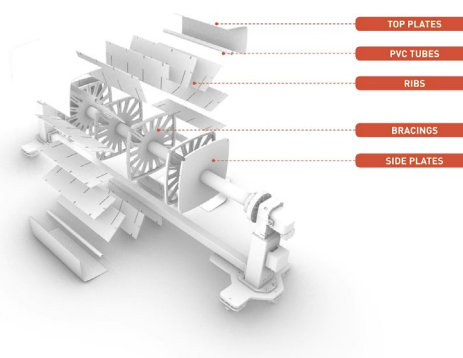


Abb. 42 Aufbau des Schalungsystems der Deckenmodule

Das Schalungselement für die Herstellung der Deckenmodule besteht aus folgenden Elementen (Abb. 42): Die Seitenplatten (a) aus 21mm Siebdruck sind am Spannring verschraubt und positionieren und sichern die Schalung gegen Verdrehen. Sie bilden die Aufnahme für 16 Spanten (b) aus 10mm MDF, sowie PVC-Rohren in den Ecken (c), um den Eckradius abzubilden. Hierauf liegen 2mm Polypropylen-Platten (d), welche eine glatte und homogene Oberfläche für den späteren Wickelprozess bilden (Abb. 43).

Während des robotischen Herstellungsprozesses wurde das Furnier auf der Schalung stark angepresst. Um ein Ausschalen des gewickelten Bauteils und eine Wiederverwendung der Schalung zu ermöglichen, wurde eine Zwischenschicht aus Backpapier integriert.

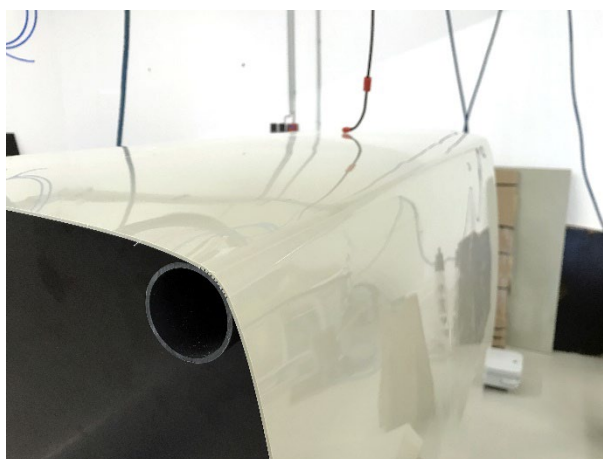
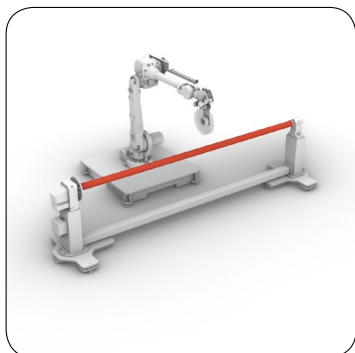


Abb. 43 Gebogene Polypropylen-Platte für eine homogene Oberfläche

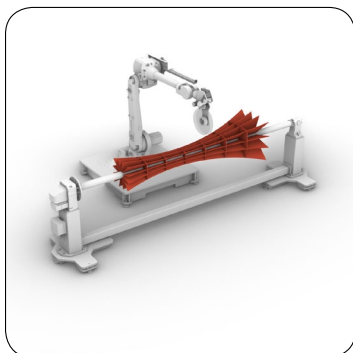
Stützelemente:

WICKELDORN



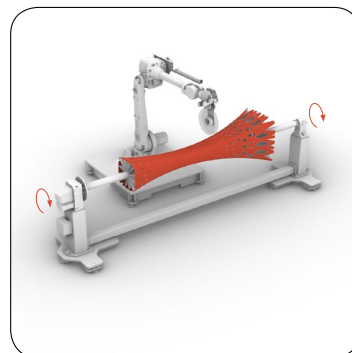
Aluminium Rohr
Ø100x3750mm

SPANTENSCHALUNG



CNC-gefräste Spanten
6.5mm Multiplex

GEWICKELTES BAUTEIL



Verleimtes Holzfurnier
Breite: 48mm, Dicke: 0.5mm

Abb. 44 Schalungssystem der Stützelemente



Abb. 45 Innerer Kern als verlorene Schalung

Das Schalungssystem der Stützelemente basiert ebenfalls auf einer Spantenschalung.

Im Gegensatz zu den 41 Deckenmodulen wurden lediglich vier Stützen benötigt, sodass der innere Kern nach dem Wickeln im Bauteil verblieb und so als verlorene Schalung fungierte. Der innere Kern gewährleistet nicht nur die Minimalanforderungen an die Standsicherheit im Brandfall, sondern erfüllt gleichzeitig als verlorene Schalung sowohl ökologische als auch ökonomische Aspekte (Abb. 45). Es resultiert ein hochleistungsfähiges Tragwerk mit minimalem Materialeinsatz.

5.3 Bauteilgeometrien, Faserverlauf & Lagenaufbau

Stützelemente:

Hinsichtlich der geometrischen Möglichkeiten der Herstellungstechnik wurde eine Vielzahl an unterschiedlichen Bauteilgeometrien untersucht. Insbesondere bei den Stützelementen wirkt sich das Prinzip der geodätischen Linie aufgrund der komplexen Geometrie unmittelbar auf die Formgebung aus. Dabei ist der Faktor zwischen dem schmalsten und breitesten Querschnitt von besonderer Bedeutung. Wie in Kap. 2.3 beschrieben, liegen die Wickellinien in konkaven Bereichen enger beieinander; in konvexen Bereichen sind sie weiter voneinander entfernt. Je größer der breiteste Durchmesser wird, umso größer werden die Lücken zwischen den Furnierstreifen. Gleichzeitig könnten zu klein gewählte Querschnitte in Relation zum größten Bauteildurchmesser zu Überlappungen führen. Bei der Gestaltung der Bauteile ist dieses Prinzip daher zu berücksichtigen.

Abb. 47 zeigt eine Voruntersuchung im Maßstab 1:2 für unterschiedliche Querschnitte. Dabei wurden sowohl rechteckige als auch runde sowie wechselnde bzw. ineinander übergehende Querschnittsgeometrien betrachtet. Die Freiformgeometrien und ihre resultierenden Faserverläufe und -muster wurden hinsichtlich ihrer realen Anwendungsmöglichkeiten sowie ihren gestalterischen Qualitäten untersucht und miteinander verglichen und bewertet. Nach einer ersten Selektion wurden ausgewählte Entwürfe weiterhin auf ihr Tragverhalten analysiert.



Abb. 47 Variierende Querschnittsgeometrien der Stützenbauteile

Der Lagenaufbau für die Stützen erfolgte kreuzweise im und gegen den Uhrzeigersinn (Abb. 48). Darüber hinaus wurden zusätzliche vertikale Fasern in Längsrichtung integriert. Für den Schichtaufbau wurde das Muster mehrfach lagenweise wiederholt.



Abb. 48 Lagenaufbau der Stützen am 1:2 Modell

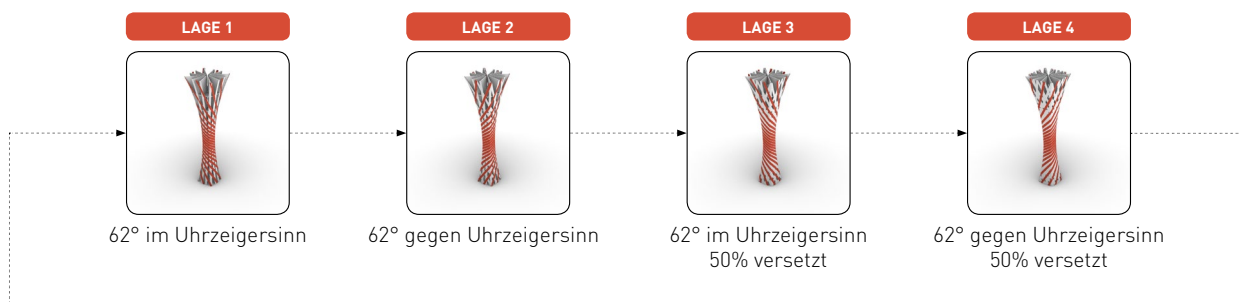


Abb. 46 Lagenaufbau Stützelemente

Deckenmodule:

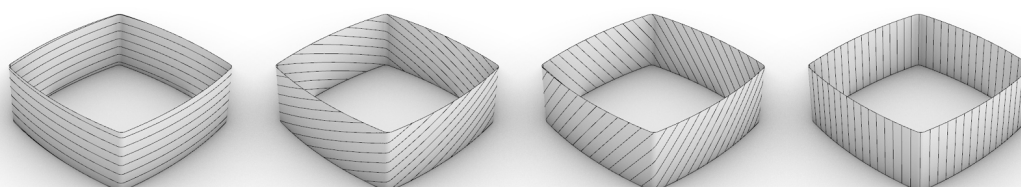


Abb. 49 Faserverlauf mit Anzahl der Furnierstreifen pro Lage bei einem Winkel von (von links nach rechts): 1° / 1 Furnier, 23° / 24 Furniere, 52° / 48 Furniere, 90° / 62 Furniere

Um den Herstellungsprozess für die insgesamt 41 Deckenmodule zu beschleunigen, wurden drei Module gleichzeitig auf einem Schalungselement hergestellt und nach dem Ausschalen auf eine Länge von 310mm auf der Kreissäge zugeschnitten. Um dabei gleichzeitig für einen ausreichenden Anpressdruck des Klebstoffs zu sorgen sowie Delaminationen durch ein Aufwölben des Furniers infolge seiner Eigenspannung zu vermeiden, wurde die Geometrie der Deckenbauteile leicht angepasst. Hierfür wurden die geraden Flächen des quadratischen Profils mit einer leichten konvexen Krümmung ausgebildet (Abb. 49). Dies wirkt sich unmittelbar auf die Herstellungsstrategie und die zu erzeugenden Werkzeugpfade aus. Infolge der konvexen Bauteilgeometrie kann das Furnierband auf Zug gehalten werden, sodass der Roboterarm einen linearen Pfad parallel zur externen Rotationsachse abfahren kann. So wurden die normalerweise komplexen Bewegungen für rechteckige Profile vollständig eliminiert. Folglich konnte die TCP-Geschwindigkeit des Roboters deutlich erhöht werden, wodurch sich der gesamte Herstellungsprozess erheblich beschleunigte. Zum Faserverlauf und Lagenaufbau fanden strukturelle Voruntersuchungen statt (Kap. 3.2), in denen der Einfluss der Ausrichtung des Furniers auf die mechanischen Eigen-

schaften des Materialsystems untersucht wurde. Die Ausrichtung und mit ihr die Anzahl der Furnierstreifen pro Lage beeinflusst unmittelbar den robotischen Herstellungsprozess (Abb. 49/50). Je steiler der Winkel des Filaments desto größer ist die Anzahl der an der Schalung zu fixierenden Furnierbänder, was wiederum deutliche Auswirkungen auf die Fertigungsdauer mit sich bringt: Bei einer Ausrichtung von 1° wird lediglich ein Furnierstreifen pro Lage gewickelt; bei 90° sind es bereits 62. Zusätzlich erhöht sich die Länge der Werkzeugpfade und das Furnier wird in Faserrichtung stärker gebogen je steiler der Wickelwinkel ist.

Der Lagenaufbau besteht aufgrund dessen aus horizontal ausgerichteten Fasern mit je einem Furnierband pro Lage. Um Schwachstellen an den Klebefugen zu vermeiden, wurden die einzelnen 48mm breiten Lagen jeweils um 24mm zueinander versetzt (siehe Kap. 3.2). Insgesamt wurden 12 Lagen mit einer Stärke von 0,5mm gewickelt und verklebt, sodass eine Wandstärke von 6mm resultierte.

Zur Überprüfung der Herstellungstechnik und Bauteilpräzision wurden Deckenmodule robotisch gefertigt und analysiert. Die folgende Bilderreihe (Abb. 51) zeigt Eindrücke und Detailaufnahmen der produzierten Prototypen.

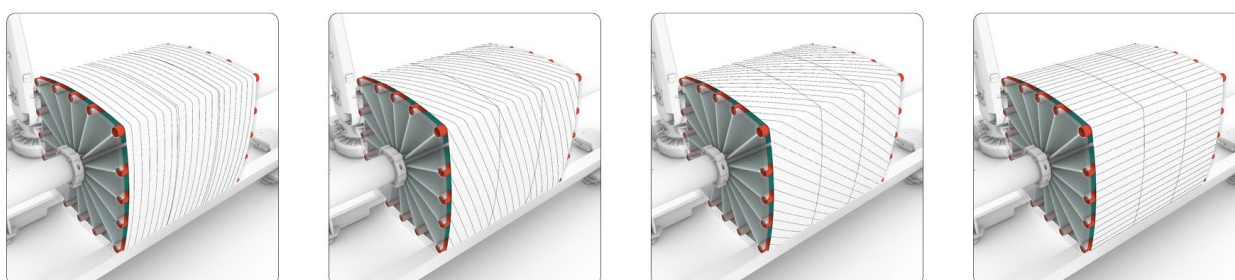


Abb. 50 Mögliche Faserverläufe bei Fabrikation der Deckenmodule

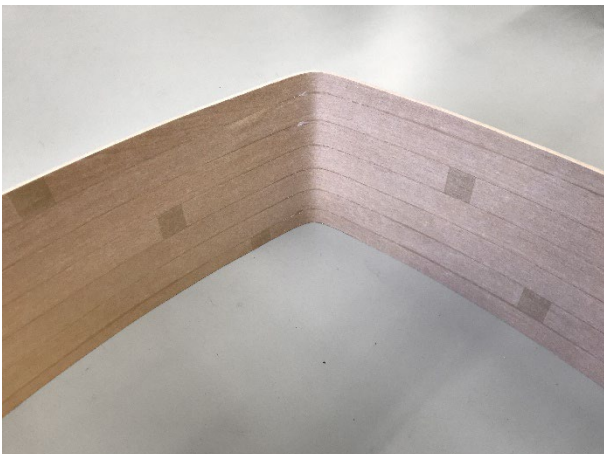


Abb. 51 Prototyp eines Deckenmoduls

5.4 Robotische Fabrikation

Die robotische Fabrikation der insgesamt 41 Deckenmodule beinhaltet folgende Prozessschritte (Abb. 52):

1. Robotischer Wickelprozess
2. Automatisierte Trennschnittmarkierung
3. Demontage des Wickeldorns
4. Ausschalen des gewickelten Bauteils
5. Montage und Ausrichtung des Wickeldorns

Nach diesen Prozessschritten wurden die gewickelten Bauteile auf der Kreissäge auseinander gesägt. Parallel wurden Deckenplatten und Verbinderelemente gefräst und die Verbinder im Anschluss mit den Modulen verklebt. Die nachfolgende Bilderreihe (Abb. 53-77) zeigt Eindrücke und Detailaufnahmen der robotischen Fabrikation der Deckenmodule und Stützelemente, als auch der Nachbearbeitung sowie der fertig produzierten Bauteile.

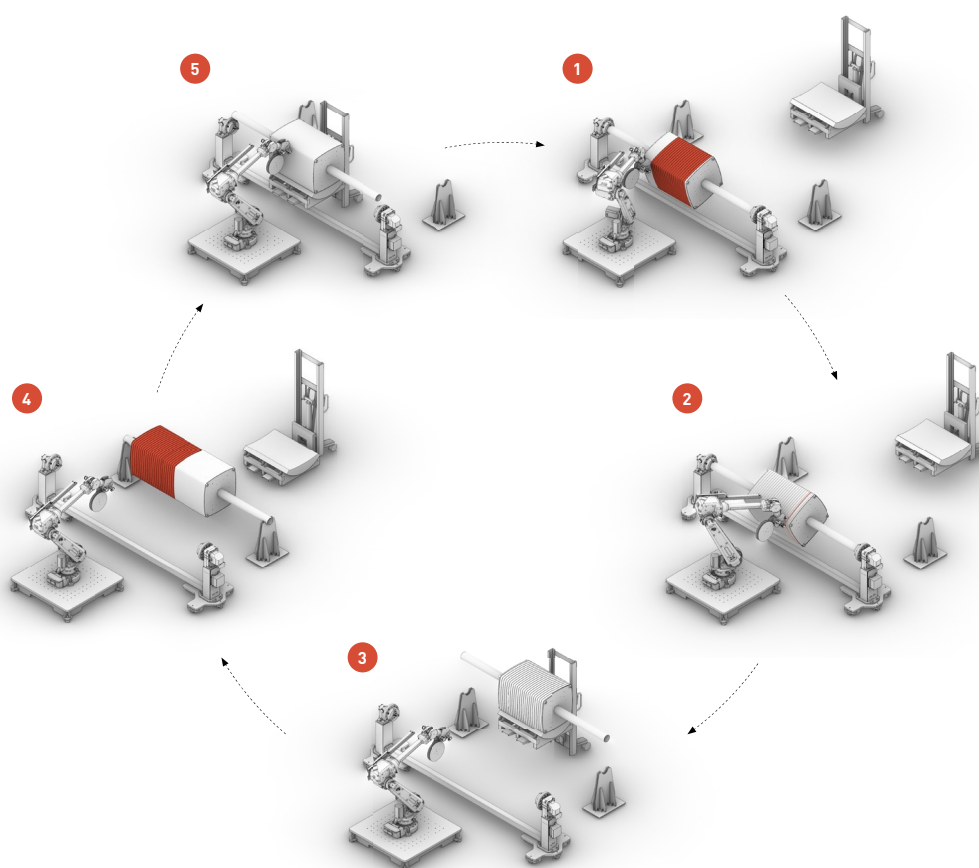


Abb. 52 Herstellungsprozess der Deckenmodule: 1. Robotischer Wickelprozess, 2. Automatisierte Trennschnittmarkierung, 3. Demontage des Wickeldorns, 4. Ausschalen des gewickelten Bauteils, 5. Montage und Ausrichtung des Wickeldorns



Abb. 53 Roboteranlage mit Schalungselement der Deckenmodule



Abb. 57 Programmierung und Ansteuerung via Robot Components

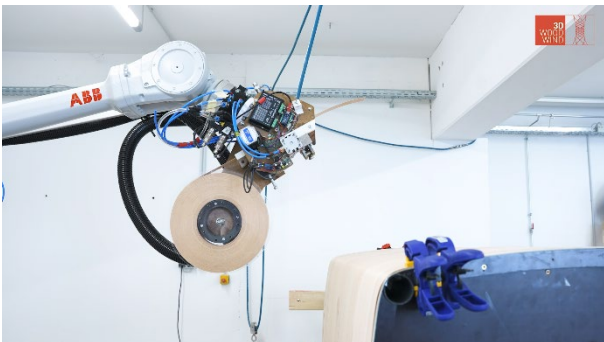


Abb. 54 Endeffektor mit 200m Furnierrolle

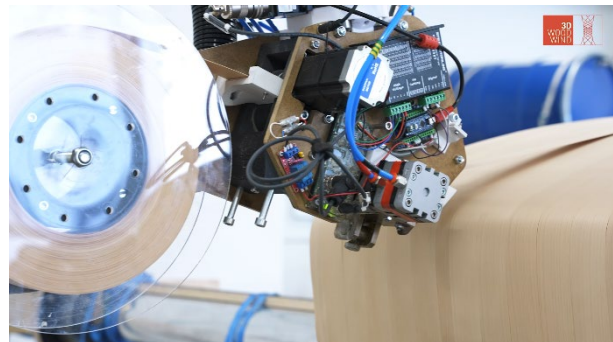


Abb. 58 Präziser robotischer Auftrag des Furniers mittels Endeffektor

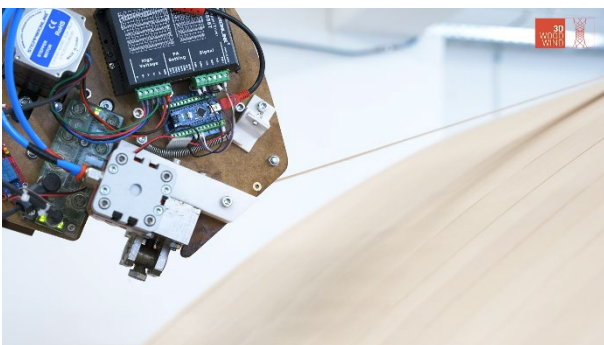


Abb. 55 Furnierband unter Zugspannung

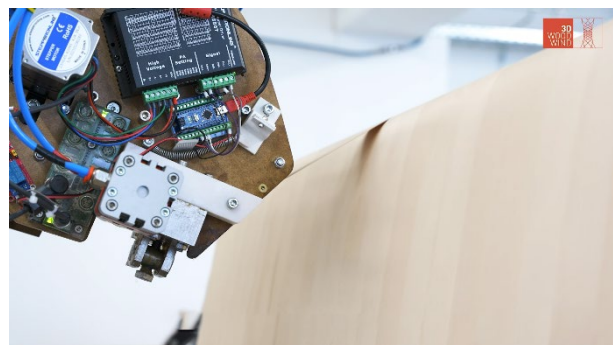


Abb. 59 Rotation des Schalungselements

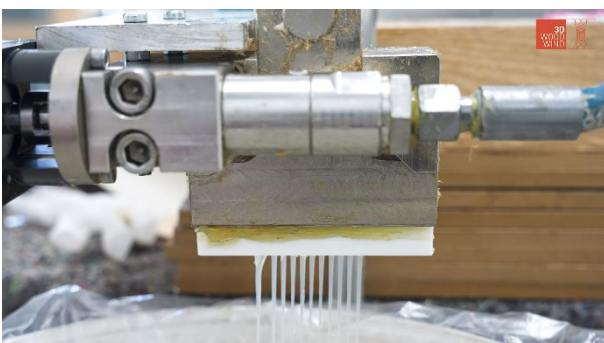


Abb. 56 Automatisierte Klebstoffapplikation mittels Auftragskopf



Abb. 60 Verleimung des Furniers von der Unterseite



Abb. 61 Auseinandersägen der gewickelten Module auf der Kreissäge

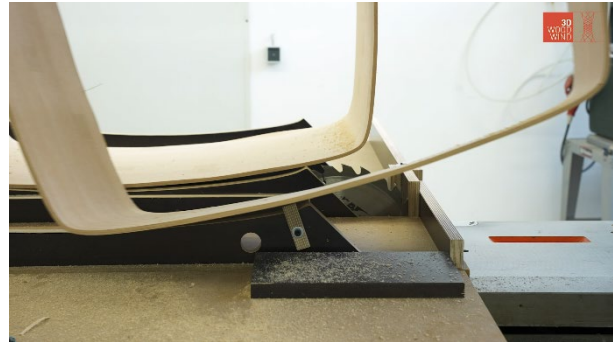


Abb. 65 3 Trennschnitte bei je 310mm



Abb. 62 Gewickelte Deckenmodule vor der Weiterverarbeitung



Abb. 66 Detailaufnahme gewickelte Deckenmodule



Abb. 63 CNC-gefräste Deckenplatten und Verbinderelemente



Abb. 67 Überprüfung der Toleranzen anhand der Puzzle-Verbindung



Abb. 64 Verleimung von Verbinderelementen an den Deckenmodulen



Abb. 68 Verleimung von Verbinderelementen an den Deckenmodulen



Abb. 69 Zusammenbau des Schalungselements für die Stützenbauteile

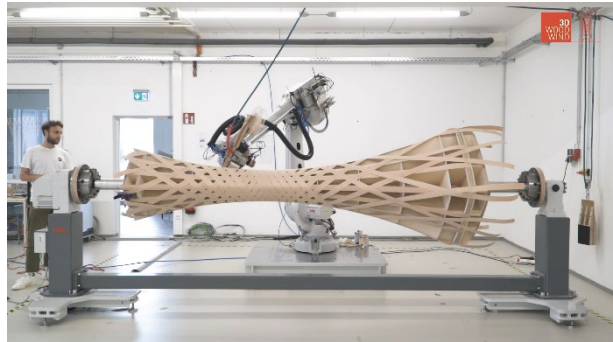


Abb. 73 Robotischer Fertigungsprozess Stützenbauteile

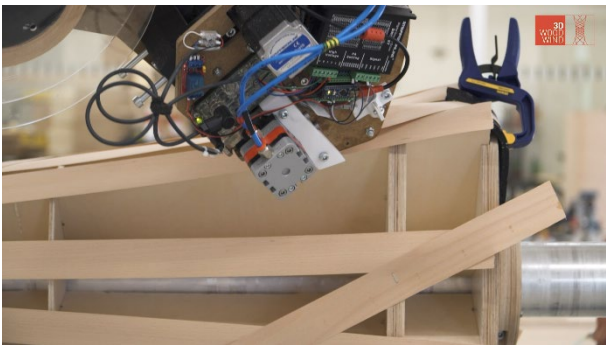


Abb. 70 Befestigung des Furniers mittels Klemme



Abb. 74 Befestigung des Furniers mittels Tacker

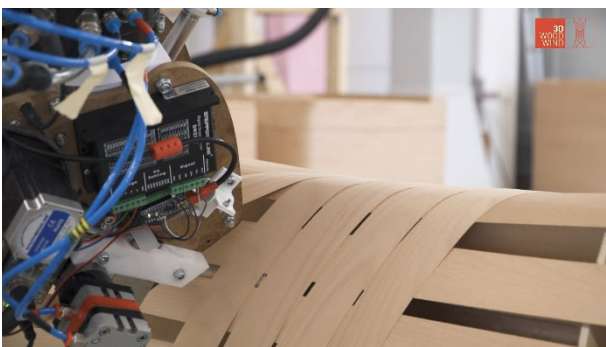


Abb. 71 1. Lage im Uhrzeigersinn



Abb. 75 Kreuzweise gewickelte Lage gegen den Uhrzeigersinn

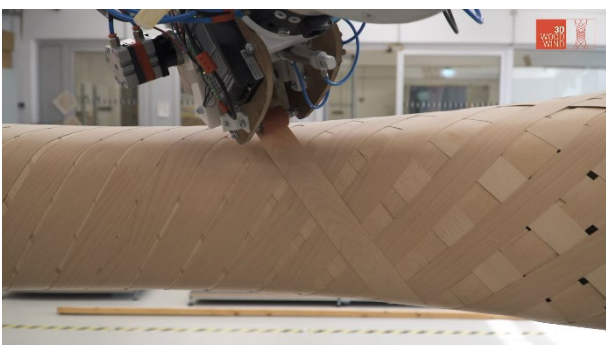


Abb. 72 Materialverdichtung im mittleren Teil der Stütze

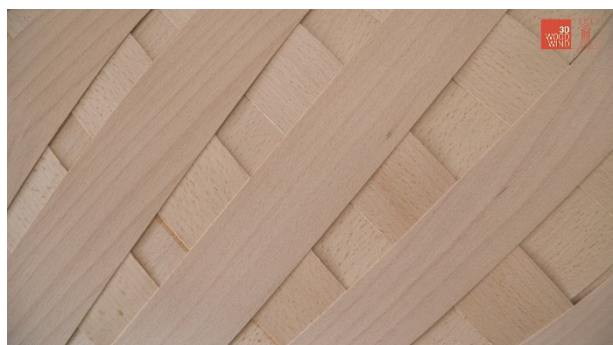


Abb. 76 Resultierendes Wickelmuster

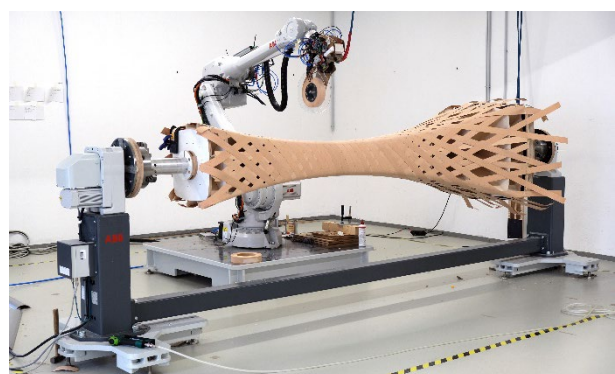
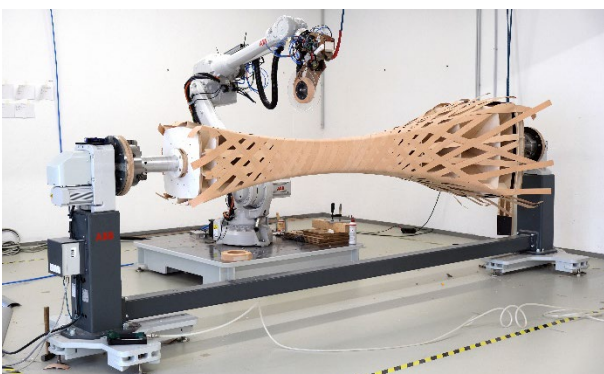
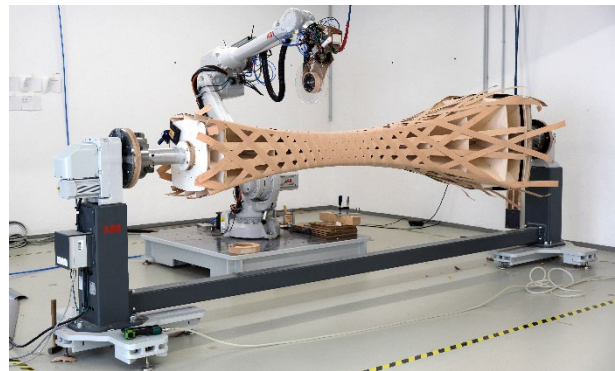
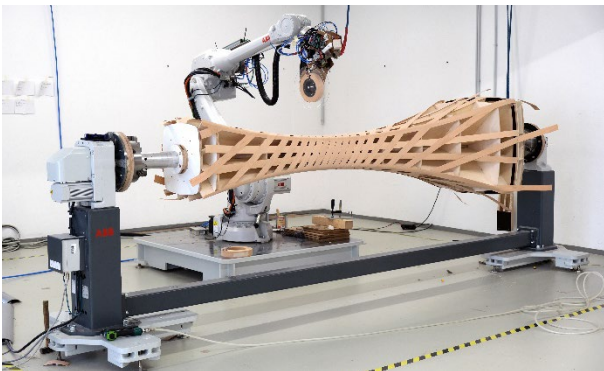
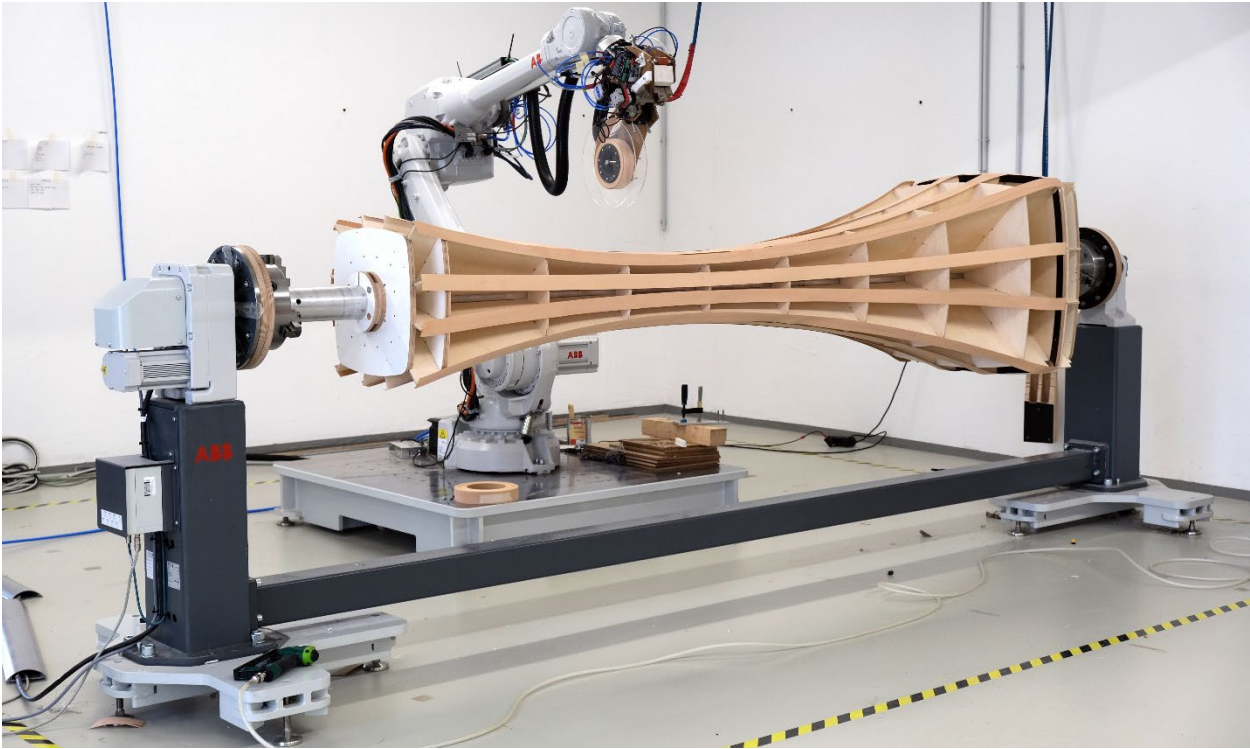


Abb. 77 Lagenaufbau der Stützenbauteile

5.5 Montageprozess

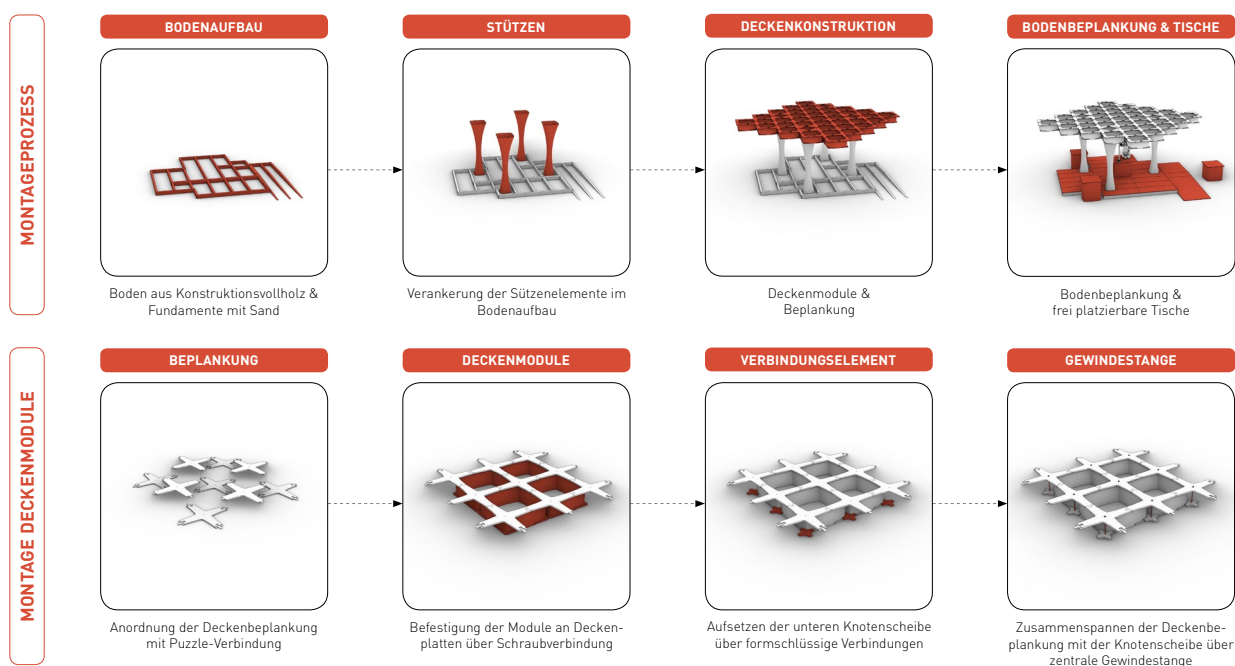


Abb. 78 Montageprozess

Für die Montage des Forschungspavillons wurde zunächst die Position der Stützen präzise ausgemessen und die Bauteile auf einem Bodenaufbau, welcher gleichzeitig als Fundament diente, positioniert (Abb. 78). Für den Bodenaufbau wurde Konstruktionsvollholz verlegt und am Ende mit einer Beplankung versehen. Für das oberhalb liegende Deckensystem wurden kreuzpuzzleförmigen Deckenplatten mit Puzzerverbindung zunächst angeordnet, in Teilen zu größeren Elementen vorverschraubt und auf den Stützen montiert. Schrittweise wurden dann die Deckenmodule mithilfe der innenseitig verklebten Verbinderelemente an den Deckenplatten befestigt. Eine Knotenscheibe positioniert und fixiert die Module über eine formschlüssige Verbindung mit den verklebten „Boomerang“-Elementen untereinander. Zum Schluss wurde die Deckenbeplankung mit der Knotenscheibe über eine zentrale Gewindestange zusammengespannt.

Die folgende Bilderreihe (Abb. 79-85) zeigt den Aufbauprozess auf der digitalBAU 2022 in seinen Einzelschritten.

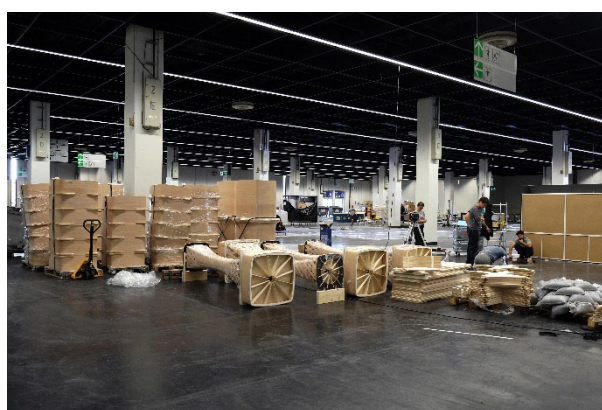


Abb. 79 Aufbau des Forschungspavillons auf der digitalBAU 2022 in Köln



Abb. 80 Ausrichten und Positionieren der Fundamentplatten der Stützen



Abb. 83 Verlegen der Bodenkonstruktion aus KVH



Abb. 81 Fundamente der Stützen (160mm hoch)

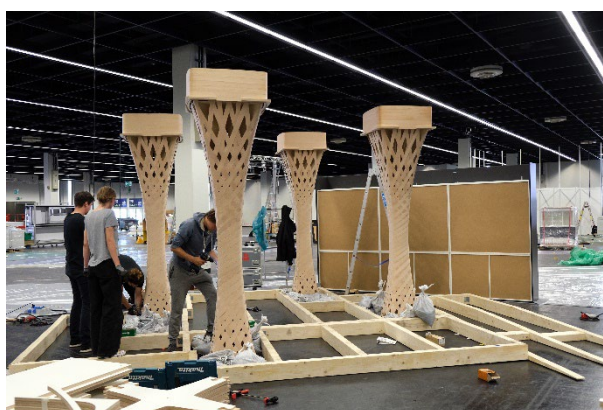


Abb. 84 Positionierung und Verankerung der Stützelemente



Abb. 82 Montage der Deckenbeplankung



Abb. 85 Verschraubung der Deckenmodule an den Deckenplatten

6 AUSSTELLUNG & NACHNUTZUNG

6.1 Ausstellungskonzept

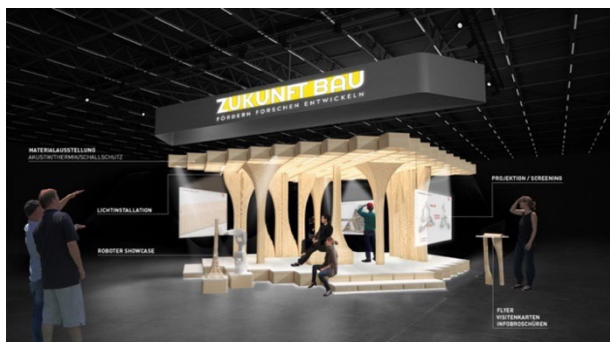


Abb. 86 Wettbewerbsvisualisierung Ausstellungskonzept

Zur Ausstellung des Forschungspavillons auf der digitalBAU 2022 akzentuiert ein Lichtkonzept aus verbundenen LED-Streifen die gewickelten Bauteile (Abb. 86/87). Ein kleinmaßstäbliches robotisches Showcase demonstrierte die innovative Herstellungstechnologie vor Ort live. Darüber hinaus wurde die Herstellungsmethode über Video- und Bildmaterial aus dem Fabrikationsprozess über platzierte Screens näher erläutert. Illustrationen und Animationen zur KI-Logik zeigten außerdem die Anwendungsmöglichkeiten von Optimierungsstrategien. Gewinkelte Tischelemente sorgten für Ausstellungsflächen von Flyern, Visitenkarten und Infobroschüren.

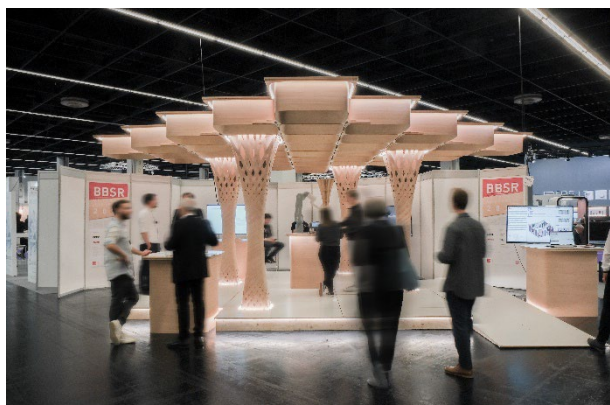


Abb. 87 BBSR Research Prototype auf der digitalBAU 2022 in Köln

6.2 digitalBAU 2022



Abb. 88 BBSR Research Prototype auf der digitalBAU 2022 in Köln

Der Forschungspavillon BBSR Research Prototype wurde vom 31.05. – 02.06.22 auf der Fachmesse digitalBAU in Köln präsentiert. Die folgenden Bilderreihen (Abb. 90/91) zeigen Eindrücke und Detailaufnahmen der entstandenen Struktur.



Abb. 89 BBSR Research Prototype auf der digitalBAU 2022 in Köln

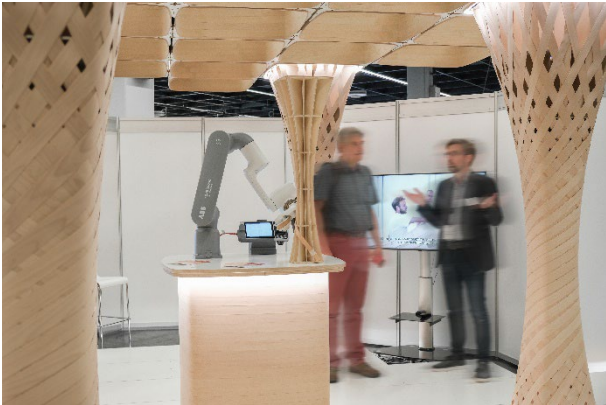


Abb. 90 Forschungspavillon BBSR Research Prototype auf der Fachmesse digitalBAU 2022 in Köln

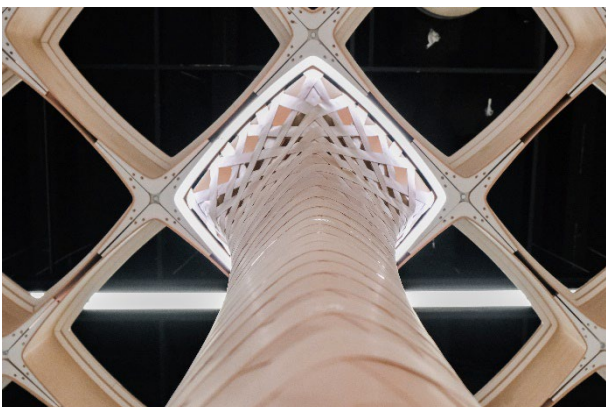
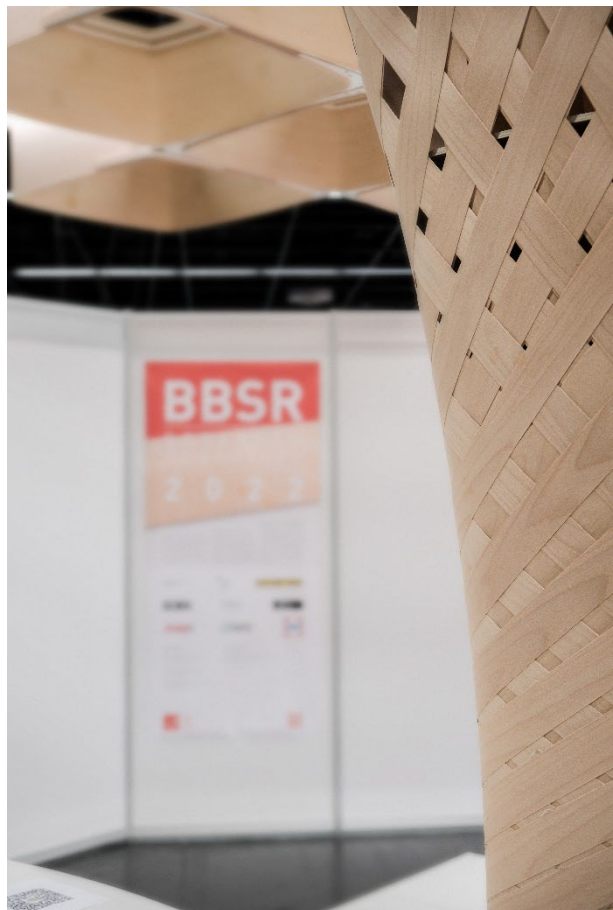


Abb. 91 Forschungspavillon BBSR Research Prototype auf der Fachmesse digitalBAU 2022 in Köln

6.3 Nachnutzung



Abb. 92 Mögliche Nachnutzung

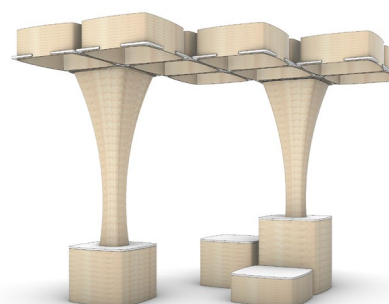


Abb. 94 Nachnutzung der Teilstruktur auf dem Pop-up Campus in Aachen

Die modulare Bauweise erlaubt es uns die Forschungsstruktur nach dem Aufbau und der Nutzung auf der Messe in ihre Einzelteile zu demontieren und in neuen Konfigurationen wieder aufzubauen. Ein Konzept für eine mögliche Nachnutzung wurde im Rahmen des Wettbewerbs erstellt (Abb. 92).

Zunächst werden Teile der Struktur zur documenta 15 in Kassel präsentiert. Zeitgleich werden Elemente auf dem Pop-up Campus in Aachen aufgestellt (Abb. 94). Nach diesen beiden Ausstellungen ist geplant, die gesamte Konstruktion zur BAU in München 2023 erneut aufzubauen.

FAHRRADÜBERDACHUNG	URBAN GARDENING	EVENT-SPACE	TEMPORÄRER WORK-SPACE	INFOSCHIRME
<p>Info:</p> <ul style="list-style-type: none"> • langer Grundriss für möglichst hohe Stellplatzanzahl 	<p>Info:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Gärtenpavillon als Urban-Gardening Fläche mit nutzbaren Beetkästen aus Decken-/Bodenmodulen 	<p>Info:</p> <ul style="list-style-type: none"> • doppelte Grundfläche durch Nutzung der ursprünglichen Bodenbauteile als Deckenmodule (erfordert Fabrikation von weiteren Stützenbauteilen) 	<p>Info:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 2-geschossiger temporärer Work-Space mit Schlafplatz-Möglichkeit 	<p>Info:</p> <ul style="list-style-type: none"> • einzelne, an unterschiedlichen Standorten verteilte Infoschirme (erneutes Zusammenwachsen/Trennen möglich)

Abb. 93 Variationsmöglichkeiten für eine Nachnutzung

7 FAZIT

7.1 Resümee

Der 3DWoodWind Research Prototype hat eine neue Generation von additiven Technologien für den Holzbau entwickelt. Das modulare Bausystem wurde mit einem dreidimensionalen robotergestützten Wickelverfahren für materialeffiziente hohle Leichtbauteile realisiert. Eine KI-gesteuerte Konstruktionslogik ermöglicht die intelligente Kombination und Gestaltung von modularen Komponenten zu mehrstöckigen Strukturen, die in Zukunft Massivholzplatten und -träger sowie Betonplatten und Stahlprofile ersetzen könnten.

Mit dem Einsatz von Holzfurnier stellt die entwickelte Herstellungstechnik eine Alternative zu synthetischen Fasern wie Kohlenstoff- oder Glasfasern dar, die üblicherweise beim Wickeln verwendet werden, sowie zu den im Bauwesen bekannten Massivholzprodukten. Hierdurch weist die Herstellungstechnik für materialeffiziente Leichtbauteile aus Furnierholz ein hohes Potenzial im Hinblick auf Ressourcenschonung auf. Innerhalb des Forschungsprojekts wurden insbesondere der Umgang mit Ressourcen und die Entwicklung neuer Bauprozesse sowie die Etablierung klima- und umweltfreundlicher Bauweisen adressiert. Mit der Herstellung eines modularen Säulen- und Deckensystems, das auf großflächige Anwendungen in mehrgeschossigen Strukturen abzielt, wurden im BBSR Research Prototype neue Verfahren und Techniken für eine zukunftsweisende und nachhaltige Entwicklung demonstriert.

Hierzu fanden im Zuge der Forschungsarbeiten experimentelle Voruntersuchungen an kleinmaßstäblichen Probekörpern statt, an denen die Bauteileigenschaften des Materialsystems überprüft und optimiert wurden. Dies beinhaltete u.a. die Auswahl geeigneter Klebstoffsysteme, die für die Fügung der einzelnen Lagen mit der Fertigungstechnik in Frage kommen sowie eine Evaluierung des Klebstoffanteils in einem Bauteil. Mithilfe der Materialuntersuchungen wurde eine Basis für strukturelle Berechnungen und eine Vordimensionierung des Tragwerks geschaffen.

Für die Herstellung von gewickelten Hohlprofilen wurden Schalungssysteme - in Abhängigkeit der unterschiedlichen Bauteilgeometrien - konzeptioniert, detailliert ausgearbeitet und präzise gefertigt. Anhand der Bauteilgeometrien wurden unterschiedliche Wickelwinkel betrachtet und verglichen, sowie Konzepte für einen optimierten Lagenaufbau erarbeitet. Computerbasierte Entwurfsmethoden für die Filamentauslegung und robotergestützte Fertigungsverfahren wurden über digitale Prozesssimulation entwickelt und Prozessparameter über physische Versuche definiert.

Für die robotische Fertigung wurden Auftragswerkzeuge entwickelt, hergestellt und im weiteren Verlauf über Prozessversuche optimiert und auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse angepasst. Dies beinhaltete die Integration einer voll automatisierten Klebstoffapplikation in den Prozess mit intensiven Untersuchungen zum Auftragsverhalten selbst, sowie dem erforderlichen Anpressdruck. Die Genauigkeit des Auftrages und die Präzision der entstehenden Bauteile konnte durch eine Reihe von Prozessversuchen optimiert werden.

Infolgedessen wurden erste vollmaßstäbliche Prototypen hergestellt und analysiert, um die Fertigungstechnik zu evaluieren und optimieren. Darüber hinaus wurden die hergestellten Prototypen einem strukturellen Belastungstest unterzogen, um die Annahmen, die für das experimentelle Materialsystem im FE-Modell getroffen wurden, zu überprüfen.

Parallel zur Entwicklung der Herstellungstechnik und dem Tragwerk des Forschungspavillons, wurde ein Machine-Learning-Algorithmus trainiert, um Entwurfsiterationen und zukünftige Planungen mit dem komponentenbasierten Bausystem zu erleichtern. Hierfür wurden die zuvor untersuchten Prozessparameter aufbereitet, um daraus Trainingsdaten für eine KI-Optimierung zu entwickeln. Mithilfe der gewonnenen Daten wurde ein Empfehlungssystem zur Konfigurations- und Prozessoptimierung trainiert, um dieses für den Forschungspavillon und weitere Testfälle anwenden zu können.

Das Forschungsprojekt zeigte die Komplexität im Umgang mit Materialsystemen im Kontext computergestützter Entwurfs-, Konstruktions- und Fertigungstechnologien (CAD, CAE, CAM). Es wurde demonstriert, wie eine auf maschinellem Lernen basierende Echtzeit-Assistenz eingerichtet wird, die es ermöglicht, den Entwurfsprozess für die neuartige Bauweise zu unterstützen. Die Modelle des maschinellen Lernens wurden auf der Grundlage von Ergebnissen aus physikalischen Struktur- und Energiesimulationsmodellen entwickelt, um die strukturelle Leistung, die Bauphysik und die Leistung der Materialressourcen parametrisch in Echtzeit für alle interaktiven Entwurfsiterationen vorherzusagen. Die Probleme bei der Anpassung der Strukturdaten, die mit der nächsten Modellgeneration verbessert werden sollen, haben gezeigt, dass die Methodik eine sorgfältige Berücksichtigung der Art der Daten und der ihnen zugrundeliegenden physikalischen Modelle in Bezug auf Nichtlinearität und Randbedingungen erfordert.

Schließlich verdeutlicht die Forschung, wie hohle Leichtbauteile große Mengen an Material im Holzbau einsparen und in Zukunft als Ersatz für Massivholz-, Beton- oder Stahlkonstruktionen dienen könnten. Die Entwurfsmethodik veranschaulicht, wie zeitaufwändige Struktur- und Klimasimulationen mit Hilfe von maschinell lernenden Regressionsmodellen in den Entwurfsprozess integriert werden können.

7.2 Ausblick

Aufgrund der kurzen Zeitspanne dieses Projekts haben alle Disziplinen gleichzeitig ihre Planungs-, Simulations- und Produktionsmethoden entwickelt. Die kontinuierliche Rückkopplung von Zwischenergebnissen in den Arbeitsablauf ermöglichte schnelle Entwurfsiterationen zur Steigerung der Gesamtleistung des Systems. Die Ergebnisse des KI-basierten Entwurfswerkzeugs konnten jedoch keinen Einfluss auf den endgültigen Entwurf des ersten Prototyps haben und zielen vielmehr auf die Weiterentwicklung des Systems ab. Die gute Anpassung insbesondere der Energieprognosemodelle unterstreicht das Potenzial von KI-trainierten Modellen und deren Designunterstützung auf der Grundlage simulierter Trainingsdaten.

Weiterer Forschungsbedarf liegt weiterhin in der Integration alternativer, biobasierter Klebstoffsysteme, die gleichzeitig eine Anwendung im Außenbereich erlauben. Darüber hinaus sollen in Zukunft durch die Weiterentwicklung der computerbasierten Entwurfsmethoden und einer ingenieurbautechnischen Untersuchung der Bauteile optimierte Geometrien mit angepassten strukturellen Eigenschaften entstehen.

8 ANHANG

8.1 Abbildungsverzeichnis

Alle verwendeten Abbildungen: Eigene Darstellungen

Abb. 1-6, 18, 37-94:

FG Experimentelles und Digitales Entwerfen und Konstruieren

FB06 | Architektur, Stadtplanung, Landschaftsplanung
Universität Kassel

Abb. 7-17, 19-30:

FG Tragwerksentwurf

FB06 | Architektur, Stadtplanung, Landschaftsplanung
Universität Kassel

Abb. 31-36:

Nachhaltige Gebäudetechnik | Institut für Entwerfen u. Konstruieren

Fakultät für Architektur und Landschaft
Leibniz Universität Hannover

8.2 Danksagung

Projektbeteiligte

Elias Arayess
Guido Brinkmann
Nils Eckhardt
Sebastian Körner
Ilija Majcen
Seyed Mobin Moussavi
Björn Raschper
Moritz Reh
Andrea Rossi
Birgit Schön

Forschungsförderung

Forschungsinitiative Zukunft Bau
Michael Lautwein
Johannes Fox

Kooperationspartner

Jowat SE
H. Heitz Furnierkantenwerk GmbH & Co. KG
Oest GmbH & Co. Maschinenbau KG