



Abbildung 1. Der Turm Urbach, eine hochleistungsfähige Holzkonstruktion aus nachhaltiger und ressourcenschonender Herstellung von gekrümmtem Brettsperrholz (ICD / ITKE - Universität Stuttgart)

**Planungs-, Fertigungs- und Auslegungsmethoden
für die Anwendung gekrümmter Holzbauteile
für hochtragfähige und ressourceneffiziente Holzbauweisen:
Projekt Turm Urbach, Remstal Gartenschau 2019**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem **Az: 34714/07** von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Von

Institut für Computerbasiertes Entwerfen und Baufertigung (ICD)
Universität Stuttgart, Keplerstraße 11, 70174 Stuttgart
Prof. Achim Menges, achim.menges@icd.uni-stuttgart.de
MSc. BArch. Dylan Wood

&

Institut für Tragkonstruktionen und konstruktives Entwerfen (ITKE)
Universität Stuttgart, Keplerstraße 11, 70174 Stuttgart
Prof. Jan Knippers, jan.knippers@itke.uni-stuttgart.de
MSc. Simon Bechert

Stuttgart

April 2020

PROJEKTKENNBLETT

PROJEKTKENNBLETT

INHALTSVERZEICHNIS

PROJEKTKENNBLETT	4
PROJEKTKENNBLETT	5
ABBILDUNGEN UND TABELLEN	7
ABKÜRZUNGEN UND DEFINITIONEN	8
ZUSAMMENFASSUNG	9
EINLEITUNG.....	10
DARSTELLUNG DER EINZELNEN ARBEITSSCHRITTE.....	17
Methoden Und Ergebnisse	17
Analyse und Modellierung von Bausystemen (AP1)	17
Erforderliche Entwicklungen für großmaßstäbliche Anwendungen (AP2)	31
Prototypentwicklung und Tests von tragenden Bauteilen (AP3).....	46
Wissenschaftliche Begleitung der Umsetzung des Demonstratorprojekts (AP 4).....	46
Langzeitüberwachung von gekrümmtem Brettsper Holz (AP 5)	49
Diskussion der Ergebnisse.....	53
Selbstformende Herstellung von gekrümmtem Brettsper Holz	53
Digitale Planung und Produktion für Strukturen aus stark gekrümmtem Brettsper Holz.....	55
Der Turm Urbach - ein Demonstrationsprojekt für hochleistungsfähige Holzarchitektur	56
Abweichungen vom Projektantrag	60
Präsentation der Umsetzung der Projektergebnisse	61
Gebäudedemonstrator	61
Begutachtete Publikationen	62
Präsentationen des Projekts	62
Printmedien	64
Online-Medien (ausgewählt)	65
Relevante Websites und Links zu sozialen Medien	65
Auszeichnungen und Nominierungen.....	65
Standort des Demonstratorgebäudes.....	65
FAZIT (KRITISCHE ZUSAMMENFASSUNG)	66
BIBLIOGRAPHIE	67
ANERKENNUNG.....	69
Projektteam	69
Projektfinanzierung.....	69

ABBILDUNGEN UND TABELLEN

Abbildung 1. Der Turm Urbach.....	2
Abbildung 2. Standardisierte quadratische Konstruktionen aus Brettspertholz.....	12
Abbildung 3. Große anpassungsfähige Schalung für die Standardproduktion.....	12
Abbildung 4: Beispiele für zylindrische Schalenkonstruktionen aus Stahlbeton.....	13
Abbildung 5: Innovativer, hygroskopisch-aktivierter Herstellungsprozess.....	14
Abbildung 6. Probekörper aus hygroskopisch selbstgeformtem Brettspertholz.....	15
Abbildung 7. Gekrümmte Holzstrukturen.....	17
Abbildung 8. Co-Design: Ein Ansatz zur Erforschung neuer Möglichkeiten in Entwurf.....	19
Abbildung 9. Geometrieerzeugung.....	20
Abbildung 10. Integrative Entwurfsumgebung mit Geometriegenerierung.....	21
Abbildung 11. Schematische Darstellung des digitalen Planungs- und Entwurfsprozesses.....	23
Abbildung 12. Visualisierung der Verformungen.....	24
Abbildung 13. Entwurfsprozess der anpassungsfähigen Lastaufbringung.....	26
Abbildung 14. Post-Processing der Ausnutzung der Kreuzschraubenverbindung.....	27
Abbildung 15: Einfluss der Konstruktionsparameter Zylinderradius.....	28
Abbildung 16. Einfluss des Krümmungsradius.....	29
Abbildung 17. Einfluss der Verdrehung der Verbindungsfugen.....	29
Abbildung 18. Anwendung des selbstformenden gekrümmten Brettspertholzes.....	30
Abbildung 19. Anwendung des selbstformenden gekrümmtes Brettspertholzes.....	31
Abbildung 20. Selbstformende Bilayer aus Holz und Simulationsmodell.....	32
Abbildung 21. Trockenkammertrocknung der Bilayer aus Fichtenholz.....	34
Abbildung 22. Selbstgeformte, gekrümmte Bilayer nach dem Trocknen.....	35
Abbildung 23. Weiterverarbeitung der selbstgeformten, gekrümmten Bilayer.....	35
Abbildung 24. Querschnitte des fertiggestellten, selbstgeformten.....	36
Abbildung 25. Darstellung der Arbeitsschritte für die Anwendung von selbstgeformten.....	38
Abbildung 26. Bauteilkonstruktion einschließlich BSPH-Aufbau.....	39
Abbildung 27. Digitaler Entwurfsprozess für die Anordnung.....	40
Abbildung 28. Auftreten von Verbindungswinkeln zwischen den Bauteilen.....	41
Abbildung 29. CNC-Bearbeitung der Bauteilkanten und Detaillierung.....	43
Abbildung 30. Fertiges selbstgeformtes gekrümmtes Bauteil.....	43
Abbildung 31. Fertiggestellte, zu Transportgruppen vormontierte Komponenten.....	44
Abbildung 32. Lärchenholzfassade mit transparenter UWood [®] Oberflächenbehandlung.....	45
Abbildung 33. Lärchenholzfassade mit transparenter UV-Holz-Oberflächenbehandlung.....	45
Abbildung 34. Transparente Dachkonstruktion und Ausrichtungsring aus Stahl.....	46
Abbildung 35. Halbautomatische Sortierung von Brettern.....	49
Abbildung 36. Messung von Krümmung und des WMC in den Bilayern.....	49
Abbildung 37. Überwachung der selbstformenden Herstellung.....	50
Abbildung 38. Installation eines WMC-Überwachungssystems.....	51
Abbildung 39. Erste Ergebnisse des 3D-Laserscans der fertigen Turmstruktur.....	52
Abbildung 40. Datenerhebung und Stichprobe aus dem längerfristigen Monitoring.....	53
Abbildung 41. Montage der gekrümmten Turmkomponenten.....	58
Abbildung 42. Der Urbach Turm.....	59
Abbildung 43. Innenraum des Turm Urbach mit weichen konvexen Oberflächen.....	60
Abbildung 44. Außenansicht des Turm Urbach mit klaren Konturlinien und konkaven Flächen.....	60
Abbildung 45. Der Turm Urbach in der natürlichen Landschaft.....	61
Abbildung 46. Die Besucher kommen mit dem Fahrrad und zu Fuß zum Turm Urbach.....	62

ABKÜRZUNGEN UND DEFINITIONEN

BSPH	Brettsperrholz
R	Radialebene in Bezug auf die orthographischen Richtungen des Holzmaterials
T	Tangentialebene in Bezug auf die orthographischen Richtungen des Holzmaterials
L	Längsebene in Bezug auf die orthographischen Richtungen des Holzmaterials
WMC	Holzfeuchtegehalt (Wood Moisture Content)
RH	Relative Luftfeuchte (Relative Humidity)
FEM	Finite Elemente Methode
FEA	Finite Element Analysis
NURBS	Non-uniform rational basis spline
CNC	Computer numerical control
Radius / Krümmung	Bei gekrümmten Brettsperrholz wird die Krümmung als Radius des Innenbogens des Bauteils gemessen

ZUSAMMENFASSUNG

Dieser Bericht behandelt die Zielsetzungen und Ergebnisse des 12-monatigen Projekts: Planungs-, Fertigungs- und Auslegungsmethode für die Anwendung gekrümmter Holzbauteile für hochtragfähige und ressourceneffiziente Holzbauweisen: Projekt Turm Urbach, Remstal Gartenschau 2019 (Az: 34714/07 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt). Die Hauptzielsetzungen des Projekts waren die Entwicklung von Planungs- und Konstruktionsmethoden für die Verwendung von hoch gekrümmtem Brettsperrholz für den Einsatz in materialeffizienten Gebäudestrukturen. Der Schwerpunkt lag dabei auf der Integration und Anpassung einer experimentellen selbstformenden Herstellungsmethode für gekrümmtes Brettsperrholz und der Entwicklung einer digitalen Planungsmethode speziell für gekrümmte Oberflächenstrukturen, die in der Ausführung eines Gebäudedemonstrators getestet werden sollte.

Das Projekt zeigte, dass das selbstformende Herstellungsverfahren erfolgreich für die Produktion in größerem Maßstab und in größeren Mengen angewendet werden kann. Die Selbstformung kann genutzt werden, um im Vergleich zu typischen Umformverfahren qualitativ hochwertigere und stärker gekrümmte Bauteile zu erhalten, und dies auf eine materialeffiziente Weise. Durch die digitalen Planungsmethoden wird eine neue Art von flächenaktiver, wellenförmiger Schalentypologie definiert, die sowohl die Krümmung der Komponenten als auch die Materialaufbauten nutzt, um die statische Tragfähigkeit zu erhöhen. Die Planung wird dazu verwendet, Strategien zur Verbindungsdetailierung und Montage zu entwickeln, die die Schwierigkeiten bei der Arbeit mit gekrümmter Geometrie überwinden. Die Entwicklungen wurden bei der Fertigstellung des Gebäudedemonstrators Turm Urbach angewendet und verifiziert, einer einzigartigen Holzstruktur, die sowohl die Effizienz des Baustoffs Holz zeigt als auch die Potenziale des neuen Bausystems hervorhebt. Über die Fertigstellung hinaus dient das Gebäude als öffentliche Demonstration sowohl der Effizienz als auch der Eleganz eines nachhaltigen Bausystems und wird langfristig technisch überwacht, um die Funktionsfähigkeit des Systems weiter zu beweisen.

Zukünftige Forschungsansätze könnten Folgendes umfassen: weitere Anpassung für die automatische Produktion des selbstformenden Brettsperrholzes in einer BSPH-spezifischen Fertigungslinie; Erprobung der Planungsmethode für ein breiteres Spektrum von Bausystemen wie leichte Dachkonstruktionen mittlerer Spannweite, tragende und aussteifende Wände sowie Maststrukturen. Dies würde auch Anpassungen der Planung für zusätzliche Gebäudeanforderungen wie Feuerwiderstand und Schalldämmung umfassen.

Das Projekt wurde mit folgenden wissenschaftlichen assoziierten Partnern abgeschlossen: Angewandte Holzforschung Eidgenössische Materialprüfungsanstalt Empa, Überlandstraße 129, 8600 Dübendorf, Schweiz, und Kooperationspartner aus der Industrie: Blumer-Lehmann AG Erlenhof, 9200 Gossau, Schweiz. Das Projekt wurde parallel zu folgendem Forschungsprojekt durchgeführt: KTI Projekt: Intelligente, innovative Herstellung von gekrümmten Holzbauteilen für Architektur mit komplexer Geometrie, Eidgenössische Kommission für Technologie und Innovation, KTI 25114.2 (Innosuisse) und die Finanzierung des Demonstrationsgebäudes wurde bereitgestellt von: Remstal Gartenschau, Gemeinde Urbach und Universität Stuttgart.

EINLEITUNG

Holz ist einer der nachhaltigsten Baustoffe. Seine regionale Verfügbarkeit, die günstige Energie- und CO₂-Bilanz, die hohe gesellschaftliche Akzeptanz und das Potenzial zur Stärkung regionaler Wertschöpfungsketten bieten eine hervorragende Basis für die Entwicklung innovativer, ressourcenschonender Bauweisen. Der Markt für vorgefertigte Holzbauteile, insbesondere BSPH-Systeme, wächst derzeit rasant. Diese Systeme bieten eine hochpräzise Produktion mit kurzen Bauzeiten auf der Baustelle und reduzieren die negativen Umweltauswirkungen von Baustellen und Bauschutt erheblich. Im Holzbau sind die Bauteile jedoch typischerweise flach, linear oder leicht gekrümmt.



Abbildung 2. Standardisierte quadratische Konstruktionen aus Brettsperrholz (links) (Bild: ZÜBLIN Timber GmbH). Anwendung einer schweren kastenförmigen BSPH-Konstruktion in einer Aussichtsturmkonstruktion (mitte) (Der Aussichtsturm Himmelstürmer. Bild: Schwäbisch-Gmünd: Schwäbisch Gmünd, Anwendung einer gekrümmten BSPH-Konstruktion mit geringer Krümmung (34 m Radius) im Boden einer Pavillonstruktur (rechts) (Der Smile-Pavillon - Alison Brooks Architects, 2016. Bild: Alison Brooks Architekten).



Abbildung 3. Große anpassungsfähige Schalung für die Standardproduktion gekrümmter Bretttschichtholzträger. Der Radius ist begrenzt und die Lamellendicke muss für eine engere Krümmung (links) reduziert werden. Ein Beispiel für eine Schalenkonstruktion mit BSPH-Paneelen mit geringer Krümmung (links) (Poly Pres. Bild: Ledinek Engineering d.o.o.). Obwohl sie sehr leicht sind, begrenzt die Komplexität der Krümmung großer Platten auf einer massiven Schalung sowohl die Krümmung als auch die Geometrie, Elefantenhäuser, Zoo Zürich, (Markus Schietsch Architekten, 2015. Bild: Jean-Luc Grossmann).

Nur ein kleiner Teil wird gekrümmt in einem Verfahren hergestellt, das mit hohen Kosten verbunden ist und eine aufwendige Holzverarbeitung, große Mengen an Materialabfällen und einen hohen Grad an mechanischer Bearbeitung erfordert. Mit gekrümmten Bauteilen kann die Tragfähigkeit von Tragwerken deutlich erhöht und gleichzeitig der Materialbedarf deutlich reduziert werden. Die oben genannten Faktoren schlossen jedoch bisher die Verwendung von Holz für hoch belastbare, gekrümmte Baukonstruktionen zugunsten von weniger umweltfreundlichen Materialien wie Beton, Stahl oder Kunststoffen aus. Der innovative Charakter dieses Projekts besteht in der Entwicklung und Anwendung neuer, stark gekrümmter BSPH-Bausysteme. Die statischen Vorteile dieses Bausystems werden für effiziente Tragkonstruktionen genutzt und es wird ein vollständig nachhaltiger Baustoff verwendet.



Abbildung 4: Beispiele für zylindrische Schalenkonstruktionen aus Stahlbeton. Trotz ihrer leistungsfähigen gekrümmten Geometrie sind sie schwer und erfordern umfangreiche Schalungen, die oft aus Holz für den Fertigteil- oder Ortbetonbau hergestellt werden. Das Kimbell Art Museum, Fort Worth, Texas (links) (Luis Kahn, 1972. Bild: Kimbell Art Museum). Das Oceanogràfic in Valencia, Spanien (rechts) (Felix Candela, 2001. Bild A. Tomás).

Im Projekt "Intelligente, innovative Herstellung von gekrümmten Holzbauteilen für die Architektur mit komplexer Geometrie" (Eidgenössische Kommission für Technologie und Innovation, KTI 25114.2), das vom Antragsteller ICD und dem Forschungspartner EMPA durchgeführt wird, werden die neuesten Entwicklungen bei der Herstellung von selbstformenden gekrümmten BSPH-Bauteilen aufgegriffen und in die Grossanwendung überführt (Grönquist et al. 2019; Wood et al. 2016; Wood et al. 2018). Der Herstellungsprozess nutzt die inhärente hygroskopische Schwindfähigkeit des Holzes, um während des bereits erforderlichen Holzrocknungsprozesses passiv zweischichtige Platten von flach bis gekrümmt herzustellen (Abbildung 2). Mit diesem Verfahren können durch nachträgliches Verleimen der Zweischichtplatten stark gekrümmte BSPH-Bauteile mit stärkeren Innenlamellen und minimalen Außenlamellen im Vergleich zu anderen Herstellungsverfahren hergestellt werden. Der sonst übliche Aufwand für die Herstellung einer Schalung oder eines Schalungswerkzeuges entfällt. Daraus resultieren Holzbauelemente mit höherer Tragfähigkeit, die mit weniger Gesamtmaterial-, Infrastruktur- und Energieverbrauch hergestellt werden können.

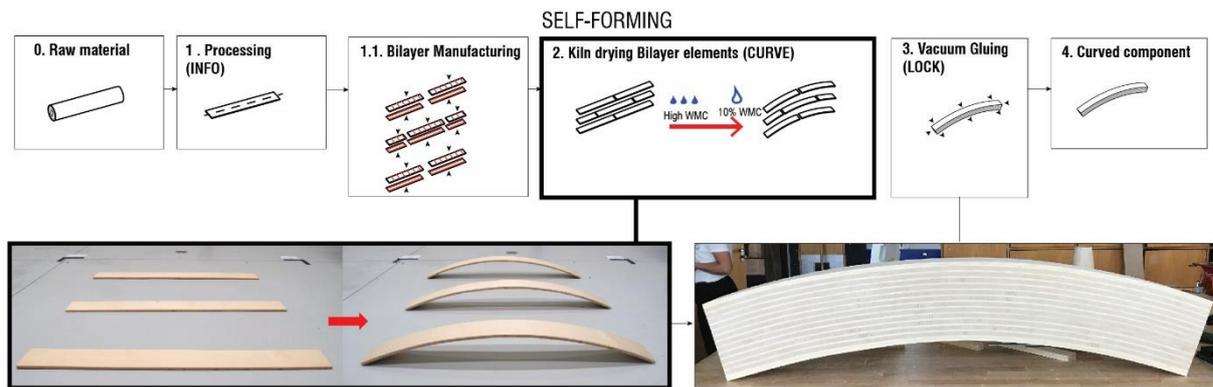


Abbildung 5: Innovativer, hygroskopisch-aktivierter Herstellungsprozess von gekrümmten Holzbauteilen, der auf der Selbst-Formungskapazität des Holzes beruht (ICD – Universität Stuttgart, Empa).

Das Projekt setzt diese Arbeit über das einfache Plattenprodukt hinaus mit der Entwicklung eines Konstruktionssystems fort, das die stark gekrümmten BSPH-Komponenten verwendet und deren statische Vorteile in einer ersten konstruktiven Anwendung demonstriert. Dazu ist es notwendig, die optimale Größe und Anordnung der einzelnen Bauteile für verschiedene Anwendungen zu untersuchen (Abbildung 4). Diese Untersuchungen berücksichtigen die architektonische Gestaltung, die Tragfähigkeit und die Materialeffizienz des Bausystems. Ebenso sind Methoden für die Bemessung von Bauwerken aus neuartigen hygroskopisch selbstformenden Holzbauteilen unter Berücksichtigung des inneren Schichtaufbaus und der Eigenspannungen zu entwickeln (Abbildung 5). Sowohl für die hygroskopisch selbstformenden Bauteile als auch für die traditionell gekrümmten BSPH-Bauteile sind Eigenspannungen innerhalb der Lamellenstruktur zu modellieren und für tragende Anwendungen zu berücksichtigen. Die Verbindung mehrerer gekrümmter Bauteile stellt sowohl statisch als auch konstruktiv und geometrisch eine Herausforderung dar. Dies erfordert die Modellierung und Entwicklung von Anschlussdetails für tragende Strukturen aus schlanken, stark gekrümmten Holzbauteilen. Um die Ergebnisse für die konstruktive Anwendung zu validieren, sind mechanische Belastungsversuche der tragenden Bauteile und ihrer Verbindungen erforderlich. Entlang der Bauteilkanten werden CNC-gefräste Details entwickelt, um die in der Ebene auftretenden Schubkräfte aufzunehmen. Aufgrund der Komplexität und der möglichen Toleranzen wird ein Verfahren zum Scannen und Digitalisieren der Bauteilgeometrie eingesetzt, um gegebenenfalls die Fräsbahnen zu korrigieren. Abgesehen von dieser Bearbeitung der dünnen Bauteilkanten sind keine weiteren Fräsungen oder Bearbeitungen erforderlich. Der digitale Designprozess ist somit auf integrierte Weise sowohl dynamisch als auch robust, um während des gesamten Entwicklungs-, Fertigungs- und Entwurfsprozesses auf Fertigungstoleranzen reagieren zu können. Die Entwicklungen des Projekts werden auch auf die jüngste verwandte Forschung über gekrümmtes Brettsperrholz übertragbar sein.

Diese Forschung und Entwicklung soll mit dem Bau eines großflächigen Demonstrators für die Remstal Gartenschau 2019 umgesetzt werden. Das Demonstrationsgebäude (Abbildung 1) veranschaulicht den innovativen Einsatz von Holz als Baustoff. Der 13 m hohe Turm aus 12 BSPH-Bauteilen mit einem Krümmungsradius von nur 2 m und einer Dicke von nur 90 mm wird an exponierter Stelle auf einem Hügel mit Blick auf das Remstal prominent platziert. Der Standort und die Höhe des Turms stellen eine statische Herausforderung dar, da das Design und die Materialien umweltfreundlich und leicht sein müssen, aber dennoch hohen Windlasten standhalten müssen. Im Rahmen der Gartenschau wird das Projekt vor allem im Architektur- und Ingenieurbereich eine hohe Öffentlichkeitswirkung haben. Der Demonstrator wird während der ersten 5 Jahre seiner Lebensdauer regelmäßig überwacht und inspiziert, um die Dauerhaftigkeit des Bausystems zu testen. Sein Erfolg wird neue Möglichkeiten für die nachhaltige Nutzung von Holz in gekrümmten Strukturen eröffnen und möglicherweise andere, weniger nachhaltige Baumaterialien ersetzen. Der Einsatz gekrümmter Konstruktionen ist ein weiterer

Schritt in der Expansion des rasch zunehmenden Holzfertigbaus in Deutschland. Die Forschung zu gekrümmten BSPH kann auf neue Anwendungen im Holzbau angewandt werden, darunter gekrümmte BSPH-Wände für Holzhochhäuser, gekrümmte Dachkonstruktionen mittlerer Spannweite für Produktionshallen oder dünne gekrümmte Platten für segmentierte Schalenkonstruktionen.

Das Projekt basiert auf grundlegenden Erkenntnissen aus dem KTI-Projekt "Intelligente, innovative Herstellung von gekrümmten Holzbauteilen für die Architektur mit komplexer Geometrie" (KTI 25114.2). Im Zentrum dieses Projekts stehen die materialwissenschaftlichen Grundlagen (Abbildung 3) und die industriellen Prozesse zur Herstellung von selbstformend gekrümmten BSPH-Bauteilen. Das Projekt zeigt das Potenzial für die Herstellung von stark gekrümmten BSPH-Platten mit kleinem Radius (0,5 - 6,0 m Radius) bei gleichzeitiger Verwendung von Massivholzplatten, die weniger aufwändig bearbeitet und verleimt werden müssen als Furnier- oder Brettschichtholz (Abbildung 6).



Abbildung 6. Probekörper aus hygroskopisch selbstgeformtem Brettsperrholz im Rahmen des KTI-Projekts "Intelligente, innovative Herstellung von gekrümmten Holzbauteilen für die Architektur mit komplexer Geometrie" (ICD- Universität Stuttgart, Empa)

Die Beurteilung der Tragfähigkeit und die Weiterentwicklung von tragenden Komponenten und spezifischen Bausystemen ist im KTI-Projekt nicht vorgesehen. In bisher realisierten Projekten wurden gekrümmte BSPH entweder mit geringen Krümmungen, aus dünnen Schichten oder mit kleinem Querschnitt mit zeit- und kostenintensiven mechanischen Verfahren hergestellt. Schwach gekrümmte BSPH-Komponenten wurden kürzlich für statische Anwendungen untersucht, um ihre Tragfähigkeit und die Vorteile der Krümmung nachzuweisen. Am relevantesten ist die Produktionshalle des Bauunternehmens "Holzbau Unterrainer", wo gekrümmtes Brettsperrholz bei hohen Schneelasten in einer Spannweite von 20 m und einer Gesamtdicke von nur 160 mm eingesetzt wird. Die Tragfähigkeit und Materialeffizienz des Systems ist jedoch durch den begrenzten Biegeradius des dickeren Brettsperrholzes und die gleichmäßige rasterartige Segmentierung der kleineren BSPH-Bauteile begrenzt (Abbildung 7). Darüber hinaus wurden komplexere robotergestützte Füge- und Montagetechniken für das Verbinden von BSPH-Platten mit geringer Krümmung (5,9 m Radius) und entgegengesetzter Krümmungsrichtung entwickelt, wodurch die Tragfähigkeit des Systems weiter erhöht wird. Solche Methoden können für die Verwendung von stärker gekrümmten BSPH-Platten mit komplexeren Anordnungen weiterentwickelt werden.

Neueste Entwicklungen in der Planung und Konstruktion im Ingenieurwesen, im computergestützten Entwurf und in der digitalen Fertigung sowie ein wachsendes Bewusstsein für nachhaltiges Bauen haben zu einer Renaissance des Bauholzes in der Architektur geführt. Seine vorteilhaften elastischen Eigenschaften ermöglichen das Biegen von Holz für die Verwendung in gekrümmte Freiformstrukturen aus Balken. Derart komplexe Geometrien erfordern einen hohen Vorfertigungsgrad, der durch die Bearbeitbarkeit von Holz und die etablierten digitalen Fertigungsmethoden ermöglicht wird. Parallel

dazu bietet Brettsperrholz (BPSH) eine hohe Formstabilität und ein biaxiales Tragverhalten, hat aber vorwiegend in standardisierten, geradlinigen Geometrien Verwendung gefunden.

Erst in jüngster Zeit hat gekrümmtes Brettsperrholz in der Bauindustrie Interesse geweckt, da es aufgrund seiner inhärenten Krümmung in Kombination mit flächenaktiven Typologien eine vorteilhafte statische Leistungsfähigkeit bietet. Diese Eigenschaften erweitern das formale und strukturelle Potenzial für den Entwurf schlanker und leichter Strukturen. Darüber hinaus bieten gekrümmte Plattenstrukturen aus Brettsperrholz eine hohe statische Tragfähigkeit und stellen eine Alternative für Freiformstrukturen dar, die typischerweise aus weniger nachhaltigen Baumaterialien hergestellt werden. Diese Forschung stellt einen integrierten Entwurfs- und Modellierungsrahmen für die Verwendung einzelner gekrümmte BSPH-Bauteile in mehrkomponentigen, oberflächenaktiven Strukturen vor. Die inhärente geometrische Komplexität von gekrümmten Teilen führt zu einer Herausforderung auf drei voneinander abhängigen Ebenen: 1. globaler Entwurf und Zusammenspiel der Komponenten. 2. Krümmung und Materialaufbau von Komponenten. 3. Adaptive Verbindungsstrategien für konstruktive Verbindungen von mehreren gekrümmten Bauteilen. Architektonische Anforderungen, strukturelle Rückkopplung und fertigungstechnische Randbedingungen bestimmen diese Abhängigkeiten. Auf diese Weise wird ein ausgeklügelter Prozess gezeigt, der die parametrische Anpassung der Entwurfsparameter integriert. Der Modellierungsansatz und das Konstruktionssystem wurden durch den Entwurf und die Konstruktion einer 14 m hohen Turmstruktur, die als Landmarke und Wanderhütte dient, validiert.

Gekrümmte Holzkonstruktionen aus Massivholz oder Brettschichtholz haben in der Architektur und im Hochbau zunehmend an Bedeutung gewonnen. Holz ist ein sehr nachhaltiger Baustoff, der aufgrund seiner Elastizität und Festigkeit gekrümmt werden kann, ohne dass seine Tragfähigkeit beeinträchtigt wird. Diese günstigen Materialeigenschaften und die leichte Bearbeitbarkeit machen es ideal für den Einsatz in gekrümmten, flächenaktiven Freiform-Strukturen. Historisch gesehen wurden gekrümmte Balken vorwiegend als Gerüst für Mauerwerksbögen und Gewölbe und in weniger Fällen als Tragwerke für Dach- oder Kuppelkonstruktionen verwendet (Hahmann 2006). Fortschritte in der Ingenieurtechnik, im computergestützten Entwurf und in der digitalen Fertigung haben zur Realisierung geometrisch komplexer Holzkonstruktionen mit doppelt gekrümmten und torsionalen Formen geführt, die aus dünnen linearen Holzelementen geformt werden (Stehling et al. 2017). Selten haben gekrümmte Holzplattenelemente für Schalenkonstruktionen Verwendung gefunden. In den letzten Jahrzehnten hat sich Brettsperrholz (BSPH) aufgrund seiner biaxialen Tragfähigkeit und Formstabilität zu einem wertvollen Baustoff entwickelt. Darüber hinaus bietet es eine wirtschaftlichere Verarbeitung und Verklebung im Vergleich zu anderen Holzwerkstoffplattenprodukten. Der hohe Vorfertigungsgrad hat die rationelle Produktion von standardisierten, geradlinigen BSPH-Bauteilen gefördert, die vor allem als Tafel- und Plattentypologien Anwendung finden. Erst seit kurzem ist gekrümmtes Brettsperrholz als Baumaterial für flächenaktive Typologien erhältlich (Engel 2013); die Eigenkrümmung ermöglicht sehr schlanke und leichte Strukturen. In der Praxis wurde dies an der nicht kontinuierlichen Schalenstruktur des Elefantenhaus-Zoo Zürich mit sich wiederholenden gekrümmten Bauteilen gezeigt (Stecher et al. 2016). In Wissenschaft und Forschung wurde dies bisher mit gefalteten und gekrümmt dünnen Schalenstrukturen (Robeller et al. 2014).



Abbildung 7. - Gekrümmte Holzstrukturen. Links: Komplex geformte Holzbalken für gekrümmte Lamellenkonstruktion (links), (Haesley - Nine Bridges Golf Club House, Shigeru Ban Architects, 2010, Bild: Blumer Lehmann AG). Gekrümmte BSPH-Dachkonstruktion (rechts) (Holzbau Unterrainer, 2017, Bild: Holzbau Unterrainer).

Die konstruktive Komplexität von Strukturen aus gekrümmten Brettsperrholz entsteht aus den gewünschten kontinuierlichen Verbindungsstrategien für solch schlanke und insbesondere nicht-planare Strukturen mit variierenden Verbindungswinkeln. Die globale Strukturintegrität solcher flächenaktiven Strukturen korreliert stark mit der Verbindungssteifigkeit. Des Weiteren müssen die Verbindungsstrategien einen einfachen und kostengünstigen Aufbau auf der Baustelle ermöglichen. Zimmermannsmäßige Verbindungen haben sich als eine geeignete kontinuierliche Verbindungsart für gekrümmte Brettsperrholzstrukturen erwiesen (Robeller et al. 2015). Verbindungen aus kreuzweise angeordneten Schrauben bieten eine Lösung für gekrümmte Verbindungsfugen variierender Winkel aufgrund ihres linearen Verbindungsvektors und der daraus resultierenden geometrischen Flexibilität (Li and Knippers 2015).

Die fortschreitende Entwicklung von computergestützten Entwurfsmethoden und robotischer Fertigung eröffnet die Möglichkeit, geometrische Komplexität zur Steigerung der statischen Leistungsfähigkeit flächenaktiver Holzstrukturen einzusetzen. Diese Komplexität bringt gegenseitige Abhängigkeiten der Modellierung auf globaler struktureller und lokaler verbindungstechnischer Ebene mit sich (Svilans et al.). Integrative Entwurfsverfahren mit struktureller und fertigungstechnischer Rückkopplung sind daher wesentlicher Bestandteil von Forschung und Wissenschaft in der Architektur (Krieg et al. 2015; Robeller et al. 2014). Auch in der Industrie werden solche fertigungstechnischen Verfahren für Freiformstrukturen aus Holz eingesetzt (Scheurer et al.).

Das Ziel dieser Forschungsarbeit ist es, die architektonischen und strukturmechanischen Potenziale eines integrierten Entwurfsansatzes für flächenaktive Strukturen aus Brettsperrholz zu untersuchen. Ihre komplexe Geometrie wird durch ein Zusammenspiel von einfach gekrümmten Brettsperrholzkomponenten beschrieben, die torsionsartig angeordnet sind. Auf Bauteilebene hängt der Materialaufbau des gekrümmten Brettsperrholzes von dieser globalen geometrischen Komplexität ab. Die daraus resultierenden gekrümmten Verbindungsfugen stellen das wesentliche

Konstruktionsmerkmal dar, sowie die kritische Herausforderung auf der Verbindungsebene. Daher liegt der Schwerpunkt auf der Integration dieser gegenseitig abhängigen Parameter in eine rechnerische Entwurfsumgebung, die von architektonische, statische und fertigungstechnische Anforderungen informiert ist. Diese Strategien ermöglichen eine Alternative zu weniger nachhaltigen Baumaterialien für die Herstellung von Freiformstrukturen aus gekrümmten Holz.

Der beschriebene integrative Entwurfsansatz und das entwickelte Konstruktionssystem wird als Fallstudie mit dem Entwurf und der Herstellung des 14 m hohen Urbach Turms validiert. Der Turm besteht aus 12 einfach gekrümmten Brettsperrholzkomponenten, die mit kreuzweise angeordneten Vollgewindeschrauben verbunden sind. Das Projekt wurde in der Gemeinde Urbach anlässlich der Remstal Gartenschau 2019, einer Landesgartenschau in Deutschland, realisiert. Der Demonstrator akzentuiert den Blick über das Remstal und dient als identitätsstiftende Landmarke und Wanderhütte.

DARSTELLUNG DER EINZELNEN ARBEITSSCHRITTE

Methoden Und Ergebnisse

Analyse und Modellierung von Bausystemen (AP1)

Integrative Entwurfsumgebung

Die inhärente geometrische Komplexität gekrümmter Bauwerke, die durch eine wechselseitige Abhängigkeit von globalen und lokalen Entwurfsparametern gekennzeichnet ist, erfordert einen integrativen Entwurfsprozess: Ein integratives Informationsmodell, das bereits in einem frühen Entwurfsstadium zur Verfügung steht und einen einfachen und direkten Austausch aller prozessrelevanten Daten zwischen Architekt, Ingenieur, Konstrukteur und Hersteller auf einem hohen Detaillierungsgrad ermöglicht.

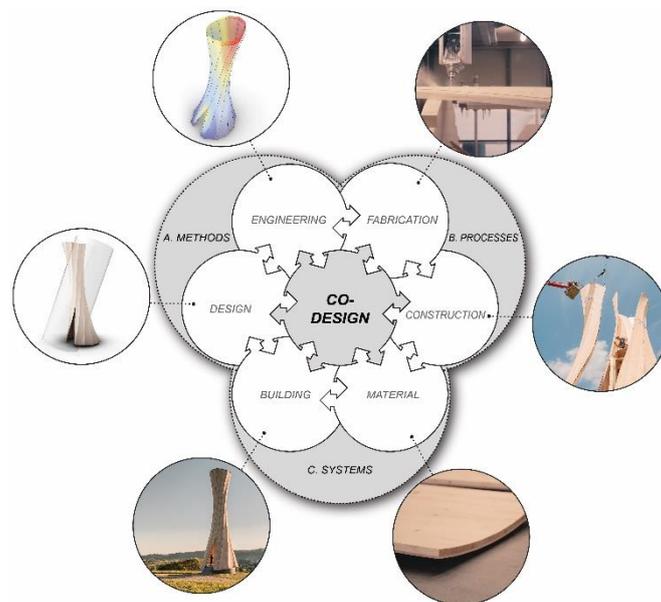


Abbildung 8. Co-Design: Ein Ansatz zur Erforschung neuer Möglichkeiten in Entwurf, Ingenieurtechnik, Konstruktion und Fertigung.

Dieser methodische Forschungsansatz wurde unter dem Leitgedanken des Co-Designs konzipiert: Ein Wandel im Entwurfsprozess, der die Wechselbeziehung zwischen Entwurf, Ingenieurtechnik, Konstruktion und Fertigung durch kontinuierliches, computergestütztes Feedback innerhalb eines interdisziplinären Teams untersucht (Abb. 8). Dieses integrative Entwurfsmodell ist parametrisch aufgebaut, um zeitnahe und unmittelbare Anpassungen und Rückkopplungen aller Projektbereiche (Methoden, Prozesse und Systeme) in den verschiedenen Entwurfsphasen zu ermöglichen. Der hohe Grad an interdisziplinärer Integration und der daraus resultierende tiefe Detaillierungsgrad für jedes Bauelement (Geometrie und Eigenschaften) ermöglicht eine ganzheitliche Entscheidungsfindung, die während des gesamten Prozesses jederzeit von statischen, konstruktiven und fertigungstechnischen Zusammenhängen beeinflusst wird. Dieser Ansatz steigert die Effizienz und Produktivität, indem er redundante Dateneingaben eliminiert und gleichzeitig das Potenzial menschlicher Fehler durch den Datenaustausch minimiert. Das Ergebnis ist ein vollständig digitaler Arbeitsablauf, der einen sofortigen Zugang zu zuverlässigen Daten und Dokumentationen unter Verwendung eines Gebäudeinformationsmodells bietet.

Der methodische Ansatz für den Entwurf flächenaktiver gekrümmter Strukturen aus Brettsperrholz mit erhöhter konstruktiver Komplexität liegt in der Integration formaler, strukturmechanischer und fertigungstechnischer Entwurfsprozesse in einer Entwurfsumgebung. Die inhärente geometrische

Komplexität führt zu einer wechselseitigen Abhängigkeit von globalen und lokalen Entwurfparametern. Die globale Bauform ist abhängig von der Krümmung ihrer Komponenten und umgekehrt. Auf der Komponentenebene bestimmen die Krümmungsradien den Materialaufbau. Adaptive Verbindungsstrategien auf der Detailebene sind durch die Herausforderungen unterschiedlicher Verbindungswinkel gekennzeichnet. Durch statische Rückkopplung und fertigungstechnische Randbedingungen beeinflussen die lokalen und komponentenbezogenen Entwurfparameter wechselseitig die Globalgeometrie. Dieser dreigliedrige Entwurfs- und Konstruktionsprozess berücksichtigt und beeinflusst alle Parameter auf unterschiedliche Weise.

Der Entwurfsprozess ist in ein geometrisches, strukturmechanisches und konstruktives Informationsmodell implementiert, das die dynamische Anpassung der Entwurfparameter integriert. Eine dafür entwickelte Schnittstelle des geometrischen Modells zu einem kommerziellen Finite-Elemente-Solver (FE-Solver) ermöglicht die interaktive Anpassung der statischen und fertigungstechnischen Entwurfparameter. Ihre Randbedingungen erfordern vielfältige Entwurfsiterationen mit erheblichen Auswirkungen auf die globale Geometrie.

Geometrische Modellierung und Fertigungsplanung

Die zusätzliche Komplexität bei der Verwendung gekrümmter Flächen in der großmaßstäblichen Konstruktion ergibt sich aus zwei grundlegenden Problemen: Die Flächen sind geometrisch schwieriger zu beschreiben, noch anspruchsvoller ist jedoch die Berechnung ihrer Schnittpunkte und Verbindungen. Für das Forschungsprojekt wurde eine umfassende Beispielgeometrie gewählt, die die Komplexität dieser Flächen und Verbindungen verdeutlicht und gleichzeitig die größtmögliche statische und architektonische Wirkung der Krümmung erzielt. Somit können einfachere Geometrien und Kombinationen (später beschrieben) von Krümmungen anhand dieses Fallbeispiels vorgestellt und problemlos berechnet werden, was den Anwendungsbereich der Forschung erweitert.

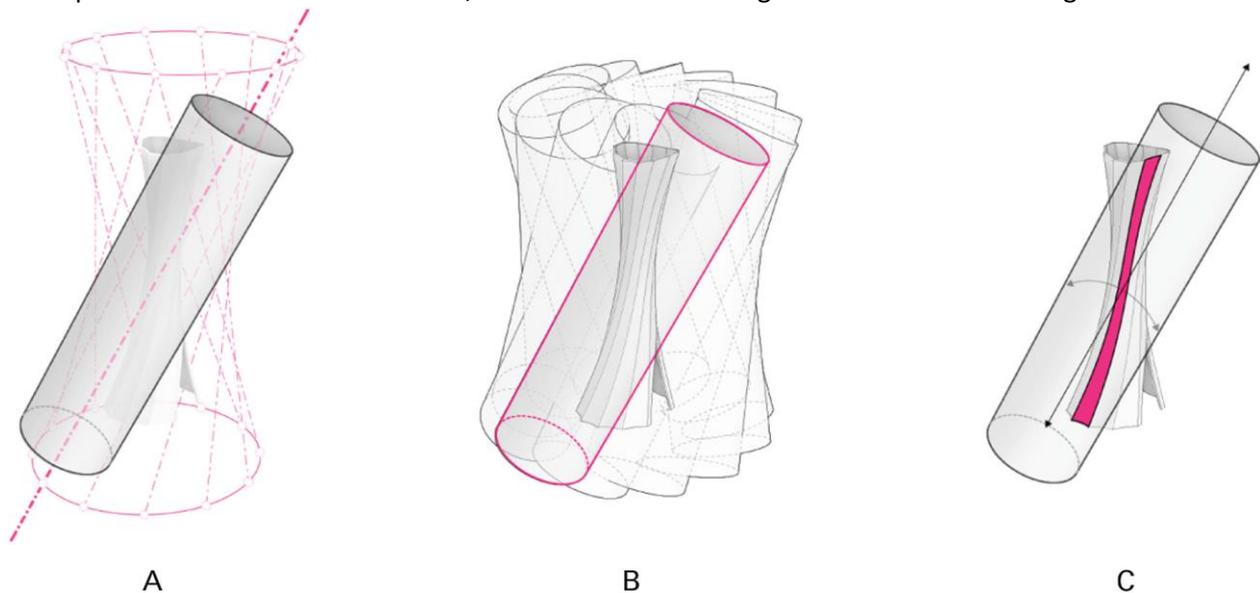


Abbildung 9. Geometrieerzeugung: a. geneigte Zylinder, die mit Punkten auf oberen und unteren Kontrollkurven eingestellt sind, b. Innenflächen, die sich aus den Schnittpunkten der Zylinder ergeben, c. einzelne gekrümmte Bauteiloberfläche mit entsprechenden Zylinder.

Der Entwurf der Beispielgeometrie wird aus dem Schnittpunkt identischer, einfach gekrümmter Zylinder erzeugt, die unter verschiedenen Winkeln zur vertikalen Achse angeordnet sind. Für die Geometrie des Aussichtsturms werden 12 Zylinder durch gleichmäßig auf einem unteren Kreis und einem oberen Oval verteilte Punkte auf vertikalen Achsen ausgerichtet. Die sich daraus ergebenden Zylinderschnittpunkte werden zum Beschneiden der Innenflächen der Zylinder verwendet, um die Konstruktionsflächen für den Turm zu erzeugen (Abb. 9). Während die Gesamtanordnung gleichmäßig

verteilt ist, führt der Unterschied zwischen der Größe des Kreises und des Ovals sowie die Positionierung zu 12 unregelmäßig geformten Bauteilen und Verbindungsfugen. Obwohl die Kontur jedes Bauteils unterschiedlich ist, können sie alle effizient aus ähnlichen einfach gekrümmten BSPH-Rohlingen geschnitten werden. Mit dieser Methode können einfach gekrümmte Komponenten verwendet werden, um eine dynamische Form mit scheinbar torsionsartiger, doppelt gekrümmter Geometrie zu erzeugen.

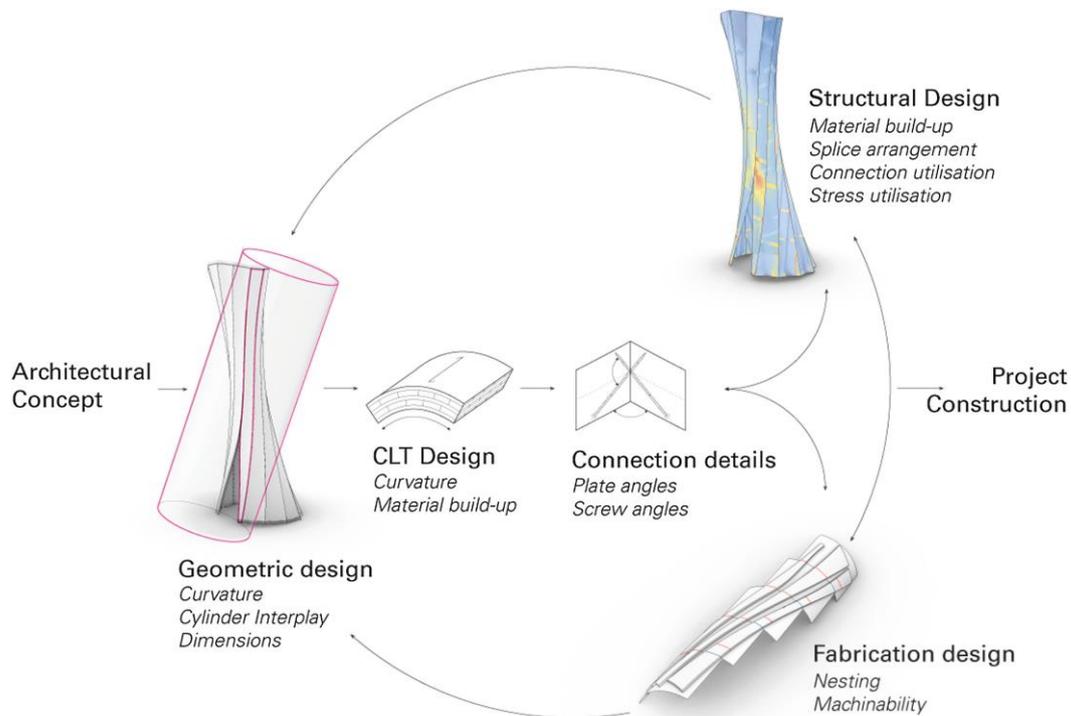


Abbildung 10. Integrative Entwurfsumgebung mit Geometriegenerierung, Entwurf des Aufbaus der BSPH-Komponenten, Verbindungsdetailierung, Fertigungsanforderungen und Tragwerksentwurf.

Ein parametrisches Entwurfsmodell wurde so ausgelegt, dass es an die Verwendung von Zylindern mit einem Radius von 1,0 bis 6,0 m angepasst werden kann, um den verfügbaren BSPH-Krümmungen, der Gesamtdicke der Komponenten, den Verbindungsdetails und den Fertigungsanforderungen gerecht zu werden. Innerhalb des parametrischen Modells wurden volumenbezogene NURBS-Geometrien von gekrümmten BSPH-Bauteilen aus den Konstruktionsflächen durch eine Reihe von iterativen Versätzen, Schnitten, Beschneidungs- und Fügevorgängen mit einer Endtoleranz von $\pm 0,0001$ m modelliert. Für die Modellierung der BSPH-Struktur ist es wichtig, die primäre Faserrichtung des BSPH einzubeziehen, die in diesem Fall durchgehend senkrecht zur Bauteilkrümmung und vertikal mit der ausragenden Struktur ausgerichtet ist (Abb. 14). Zusätzlich zur Geometrie sind die Montagevektoren als weitere geometrische Information für jedes Bauteil enthalten.

Am Schnittstellenbereich der Zylinder entsteht eine gekrümmte Fuge, die über die Gesamtlänge der Verbindung verläuft. Entlang dieser Gehrungsverbindung werden gekreuzte Schraubenpaare verwendet, um die Komponenten zu verbinden. Die Vektoren und Aussparungslöcher für jede Schraube werden mit der CNC modelliert und vorgebohrt, bevor die Kanten der Verbindungsfläche bearbeitet werden. Entlang der Verbindungsflächen werden Ausrichtungsblöcke von 15 mm x 15 mm x 150 mm im Abstand von 1,00 m in CNC-gefräste Taschen gelegt. Die Blöcke sind die einzigen hervorstehenden Teile, die zur Ausrichtung und Montage benötigt werden, und können demontiert werden. Die Verbindungsdetails sind für die werkseitige Montage der Baugruppen (bestehend aus drei Komponenten) und die Montage vor Ort adaptiv ausgelegt, um die Installation des Turms zu

erleichtern. Diese einfache Verbindungsmethode kann geometrisch so angepasst werden, dass sie den erforderlichen Änderungen und Winkeln in der komplexen Geometrie entspricht, und reduziert drastisch den Umfang der komplexen Bearbeitung und des Materialabtrags, die zur Verbindung der Teile erforderlich sind. Der Winkel der Schrauben und ihre Abstände entlang der Verbindungsnaht lassen sich auf der Grundlage der auftretenden Kräfte in verschiedenen Bereichen der Fuge problemlos ändern.

Materialentwurf und Berechnung von gekrümmten BSPH-Komponenten

Die Gestaltung der Krümmung, des Materialaufbaus und der Teilegröße für das BSPH-Bestandsmaterial ist integraler Bestandteil der Entwurfsstrategie für die globale Geometrie. Die BSPH-Platten haben eine hohe Krümmung im Verhältnis zur Größe der Teile. Verfügbares gekrümmtes BSPH-Halbzeugmaterial ist in der Größe begrenzt. Daher müssen mehrere Lagerteile zusammengefügt und/oder geschichtet werden, um die Fertigungsrohlinge zu erstellen, auf denen die Komponenten genestet werden. Die sich daraus ergebenden Unterteilungen zwischen den Rohteilen führen zu Verbindungsstößen in Krümmungsrichtung, die über die Länge der Komponenten verteilt sind. Für den Demonstrator wurden zwei Arten von Brettsperrholz identifiziert und ausgewählt: gekrümmtes Brettsperrholz, das mit mechanischem Standardpressverfahren auf Schalungen hergestellt wurde, und ein alternativ gekrümmtes Brettsperrholz, das mit einer experimentellen selbstformenden Methode hergestellt wurde, die vom Institut für Computational Design and Construction der Universität Stuttgart und dem Laboratorium für Zellulose und Holzwerkstoffe der Eidgenössischen Materialwissenschaft und -technik entwickelt wurde. Für jeden BSPH-Halbzeugtyp wird der Materialaufbau so ausgelegt, dass die primäre Faserorientierung senkrecht zur Hauptkrümmung und in der Längsachse des Bauteils verläuft.

Planung, statischer Entwurf und Modellierung von flächenaktiven Holzsegmentschalen

Flächenaktive Segmentschalen aus Holz stellen eine große Herausforderung für die Planung dar, die Anforderungen aus dem statischen Tragverhalten und der Fertigung bestimmen den Entwurf und sind bereits in frühen Entwurfsstadien zu berücksichtigen. Als dünne Schalenträgerwerke erfordern sie einen Formfindungsprozess, um Biegemomente im Tragwerk auf ein Minimum zu reduzieren. Das Leichtbausystem erfordert einen hohen Optimierungsgrad, um den Materialeinsatz auf ein Minimum zu reduzieren. Diese Optimierungsschleifen können meist nur mittels parametrischer Modelle und automatisierter Schnittstellen umgesetzt werden. Die Vorfertigung, und die daraus resultierende Unterteilung in Komponenten, hat ein Fugenbild zur Folge, welches das Tragverhalten der Schale verändert und bei der Formfindung zu beachten ist. Aus dem Herstellungsprozess ergeben sich weitere Randbedingungen, welche kontinuierlich in den Entwurf integriert werden müssen. Schließlich erfordert die Verwendung des orthotropen Werkstoffes Holz eine detaillierte Berechnung, insbesondere, weil die Steifigkeitsverhältnisse, gerade auch der Verbindungen, möglichst genau erfasst werden sollten.

Diesen Herausforderungen wird durch integrierte digitale Planung und die Entwicklung entsprechender digitaler Planungswerkzeuge begegnet. Dies wird nachfolgend an einem Beispiel erläutert: Sowohl die Abmessungen der Holzbauteile als auch Anzahl und Anordnung der Verbindungsmittel ändern die Steifigkeitsverteilung, was im hochgradig statisch unbestimmten Schalenträgerwerk Auswirkungen auf die Schnittgrößenverläufe hat. Daraus ergibt sich bereits das Erfordernis eines iterativen Planungsprozesses. Darüber hinaus wäre eine Bemessung der Holzbauteile oder der Verbindungsmittel für die maßgebende Stelle unwirtschaftlich. Daher werden diese gestaffelt, was infolge der statischen Unbestimmtheit zu weiteren Schnittgrößenumlagerungen führt. Dies kann nur über Optimierungsschleifen gelöst werden, für welche diese Anpassungen iterativ erfolgen, was wiederum einen hohen Grad an Automatisierung der Planungsprozesse erforderlich macht.

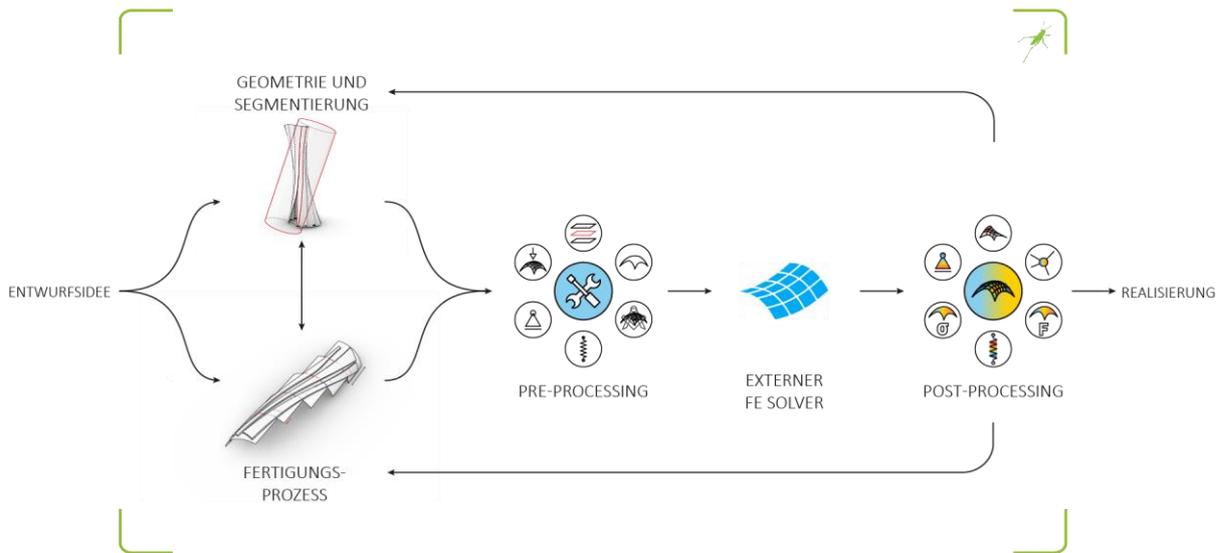


Abbildung 11. Schematische Darstellung des digitalen Planungs- und Entwurfsprozesses.

In der Praxis wird dies durch die Erzeugung eines parametrischen 3D-Modells gelöst, welches sämtliche Geometrie- und Fertigungsdaten enthält. Pre- und Postprocessing Schnittstellen werden in das parametrische 3D-Modell integriert, um Ergebnisse aus der FE-Berechnung, inklusive der materialspezifischen Spannungs- und Verbindungsnachweise, zu visualisieren und auszuwerten. Im konkreten Fall wurde dies innerhalb der Software Rhinoceros und Grasshopper gelöst, mit der FE-Software Sofistik als externem Solver. Die entsprechenden Schnittstellen wurden als allgemeine Schnittstellen entwickelt, und für die konkreten Projektbeispiele dann angepasst. Dies ermöglicht die Planung innerhalb einer integrierten Entwicklungsumgebung, bei der sämtliche Schnittgrößen und Verformungen sowie materialspezifische Spannungs- und Verbindungsnachweise visualisiert und ausgewertet werden können. Dieser integrative Ansatz unterstützt die Tragwerksplanung und Konstruktion von geometrisch und konstruktiv komplexen Leichtbaustrukturen.

Neben all den Herausforderungen in Planung und Entwurf, ist auch die statische Berechnung segmentierter Holzschalen kompliziert. Neben der geometrischen Komplexität einer doppelt gekrümmten, segmentierten Fläche, ergeben sich aus der variablen Anzahl der Verbindungsmittel, Kantenlängen und Winkel zwischen Segmenten, der gestaffelten Dicken und der Faserverläufe des Holzes ein hohes Ausmaß an Daten, welche im statischen Berechnungsmodell berücksichtigt werden muss.

Wie generell bei vollständig digitalen Planungsprozessen stellt sich auch die Frage nach einer vernünftigen und nachprüfaren Dokumentation der Planungsergebnisse. Der interne Planungsprozess bis hin zur Fertigung erfolgt vollständig digital, Pläne im klassischen Sinn waren daher nicht erforderlich. Lediglich zur Kommunikation mit externen Partnern in anderen Gewerken wurden Pläne erforderlich, beispielsweise für die Erstellung der Stahlbauteile für die Gründung. Zur Dokumentation wurden dann aus ursprünglich parametrischen und damit flexiblen digitalen Planungswerkzeugen digitale 3D-Modelle erzeugt, welche sämtliche geometrischen Informationen inklusive aller fertigungsrelevanten Daten enthalten, aus welchen dann das statische Berechnungsmodell generiert wurde. Durch selbstentwickelte digitale Tools wurde aus diesen Daten dann automatisch ein statisches Berechnungsmodell generiert. Aufgrund der Komplexität ist eine vollumfängliche Dokumentation aller Berechnungsergebnisse im klassischen Sinn nicht mehr möglich.

In der statischen Berechnung wurden die wesentlichen Berechnungsergebnisse dokumentiert, theoretisch sind aber im parametrischen Modell alle Ergebnisse jederzeit verfügbar und auswertbar.

Die statische Berechnung der Turmstruktur erfolgt innerhalb der beschriebenen integrativen Entwurfsumgebung. Der Turm wird gemäß den zugrundeliegenden normativen Anforderungen mittels geometrisch nichtlinearer Berechnungen untersucht. Im frühen Planungsstadium wurde eine große Anzahl von Geometrieiterationen erforderlich, die Lasten wurden daher parametrisch implementiert. Winddrücke und -söge wurden als Funktionen der variierenden Dimensionen des Turmquerschnitts und des Verhältnisses sowie der Anordnung seiner Öffnungen eingegeben und jedem Netzelement automatisch zugewiesen. Die Brettsper Holzplatten werden als Schalenelemente modelliert, das Material wird als mehrschichtiges, orthotropes Material definiert, das lokale Koordinatensystem der einzelnen Schalenelemente ist dabei entlang der Faserrichtung der äußeren Brettlagen ausgerichtet. Basierend auf der klassischen Laminattheorie wird eine äquivalente orthotrope Steifigkeitsmatrix auf Elementebene erzeugt, die Berechnung der Ersatzsteifigkeiten und die Umrechnung der Schnittgrößen in Randspannungen der einzelnen Lagen des Laminats erfolgt automatisiert innerhalb der FE-Software. Die Spannungen aus der statischen Berechnung müssen im Nachlauf mit den Eigenspannungen aus dem herstellungsbedingten Selbstformungsprozess überlagert werden.

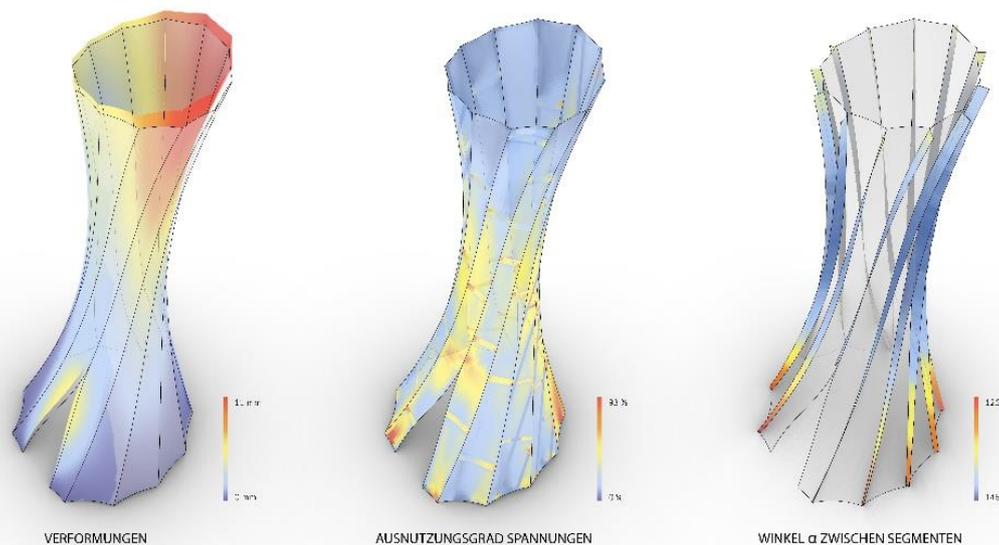


Abbildung 12. Visualisierung der Verformungen (links), der Ausnutzungsgrade (mitte) und der Geometrieparameter (rechts) innerhalb der parametrischen Entwicklungsumgebung.

Die Kreuzschraubenverbindung zwischen benachbarten Bauteilen wird durch ein Federmodell simuliert, das die Strukturknoten angrenzender Netzelemente entlang der Fuge kontinuierlich koppelt. Drei lineare Federelemente (axiale Steifigkeit, Schubsteifigkeit in und aus der Schalenebene) und eine Rotationsfeder (Biegesteifigkeit), simulieren die Freiheitsgrade der Verbindung. Jedem Federelement ist ein spezifischer Steifigkeitskoeffizient zugeordnet, der nach den normativen Regelungen und technischen Zulassungen ermittelt wird. Die Steifigkeit und Tragfähigkeit der einzelnen Schraubenpaare werden durch den Winkel α zwischen zweier benachbarten Komponenten, der von α abhängige Einschlusswinkel θ innerhalb eines Kreuzschraubenpaares sowie den relativen Abstand benachbarter Schraubenpaare definiert. Die zugrundeliegende parametrische Implementierung der Verbindungen in die Entwurfsumgebung ermöglicht somit die direkte Visualisierung und Automatisierung sämtlicher Tragfähigkeitsnachweise.

Die additive Herstellung der einzelnen Bilayer zu den 14 m langen, halbzyklindrischen Fertigungsrohlingen führt zu Längs- und Querstößen innerhalb einer Turmkomponente. Diese Stöße stellen Diskontinuitäten in den Komponenten dar und schwächen die Steifigkeit des Turms. Diese Stöße müssen in der flächenaktiven Turmstruktur sowohl Membrankräfte als auch Plattenbiegung übertragen. Daher wurde die Anordnung der aus den Stößen resultierenden (reduzierten) Steifigkeit innerhalb der Turmstruktur optimiert. Die Tragfähigkeit der Stöße wurde durch ergänzende Studien detaillierter FE-Modelle simuliert und verifiziert, welche des Weiteren durch (analytische) Stabwerksmodelle validiert wurden. Dies wird in den folgenden Abschnitten genauer beschrieben.

Material

Brettsperholz bietet ein biaxiales Tragverhalten, da sein Aufbau aus mehreren Schichten mit transversaler Faserisotropie besteht. Für die Strukturanalyse wird das Brettsperholz mittels Schalenelementen in ein FE-Modell implementiert. Das FE-Programm überführt das mehrschichtige Material in eine äquivalente orthotrope Steifigkeitsmatrix, basierend auf der klassischen Laminattheorie und berücksichtigt Schubverformungen mit der Reissner-Mindlin-Theorie. Die Faserrichtungen sind jedem Element des FE-Netzes parametrisch zugewiesen in Richtung der Hauptkrümmungen innerhalb des Entwurfs Umgebung und sind somit während der zahlreichen Entwurfsiterationen adaptiv modelliert.

Lastaufbringung

Die Lasteinwirkungen sind nach den normativen Vorschriften definiert, die europäischen Regelwerke (Eurocodes) decken jedoch nur standardisierte Typologien ab. Geometrisch komplexe Strukturen erfordern daher einen Prozess der geometrischen Rationalisierung und der Interpretation der Regelwerke. Darüber hinaus erfordern viele Entwurfsiterationen die Implementierung einer adaptiven Lastaufbringung in den digitalen Entwurfsprozess (Abb. 13). Die primären Lasteinwirkungen auf die Struktur sind Windlastszenarien. Sie verursachen globale Biegemomente des Kragarms sowie eine Ovalisierung des zwölfkantigen, annähernd kreisförmigen Querschnitts. Diese äußeren und inneren Winddrücke sind Funktionen der unterschiedlichen Dimensionen der Strukturumrisse sowie des Anteils und der Anordnung der Öffnungen. Daher werden aus den Eurocodes Regeln abgeleitet und in den digitalen Arbeitsablauf integriert. Zusammen mit rationalisierten Geometrieparametern ermöglichen sie die Berechnung der parametrischen Anpassung der Druckbeiwerte, die jedem Schalenelement als Eingabe in das FE-Modell zugewiesen werden.

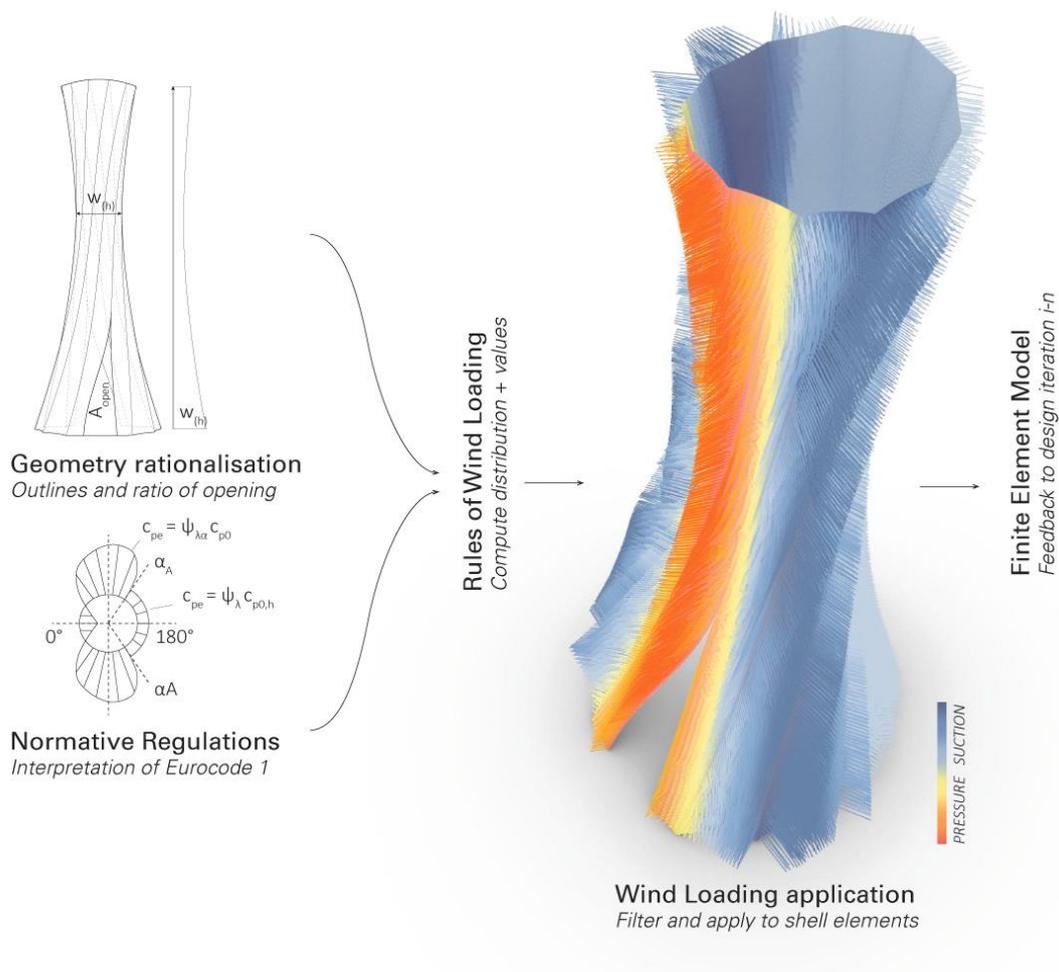


Abbildung 13. Entwurfsprozess der anpassungsfähigen Lastaufbringung unter Berücksichtigung geometrischer Parameter und in Übereinstimmung mit normativen Regelwerken, als Teil der integrativen Entwurfsumgebung.

Statisches Post-Processing.

Die flächenaktive Brettsperrholzstruktur wird einer Membran- und Plattenwirkung ausgesetzt. Diese verursachen Spannungen in den einzelnen Schichten und zahlreiche potentielle Versagensmodi, die von deren Faserrichtung abhängen. Die Spannungen aus Einwirkung werden mit den durch den Biegeprozess verursachten Eigenspannungen überlagert. Die Integration des statischen Post-Processings in die integrative Entwurfsumgebung ermöglicht es, die Ausnutzung der einzelnen Schichten und den Spannungszustand gemäß den Normen und Richtlinien zu bewerten. Sowohl die Visualisierung der Spannungszustände als auch der Verbindungsergebnisse ermöglichen ein intuitives Feedback während den gesamten Entwurfsiterationen (Abb. 14).

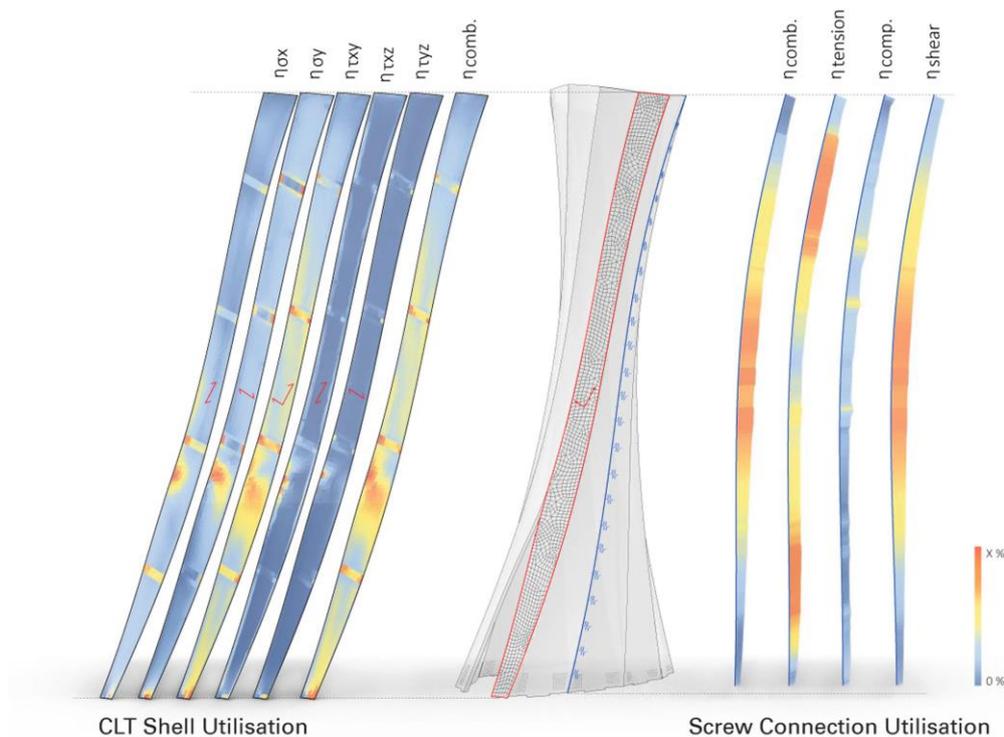


Abbildung 14. Post-Processing der Ausnutzung der Kreuzschraubenverbindung und Ausnutzung der Spannungen in den finiten Schalenelementen mit schichtweisem Materialaufbau und Kornrichtungen.

Strukturmechanische Experimente zur Verwendung von gekrümmten BSPH-Geometrien

Aus dem Grundsatz "Kräfte folgen der Form" folgt, dass die Geometrie einen großen Einfluss auf die Stabilität und das Tragfähigkeit von flächenaktiven Strukturen hat. Deshalb werden verschiedene geometrische und strukturmechanische Parameter des Turm Urbach in einer Studie untersucht. Eine Matrix von Typologien wird generiert und unter Verwendung des beschriebenen statischen Entwurfsprozesses analysiert. Die durchgeführten Studien vernachlässigen die beiden markanten Öffnungen und die Dachstruktur des gebauten Turms. Angesichts des oben erwähnten Konstruktionssystem aus selbstgeformten gekrümmten BSPH-Bauteilen wird der Einfluss des Krümmungsradius untersucht (vergleiche Abb. 15, oben). Die statische Leistungsfähigkeit der Verbindung ist ein entscheidender Parameter für die Machbarkeit von dünnen, segmentierten Plattenstrukturen. Geradlinige Verbindungen, die keine ausreichende Biegesteifigkeit bieten, können zu lokaler Instabilität in der Struktur führen. Aus diesem Grund wurde des Weiteren der Einfluss der Verdrehung der Verbindungsfugen auf die globale Tragfähigkeit der Struktur untersucht (vergleiche Abb. 15, unten). Es sei anzumerken, dass die Ergebnisse der zugrundeliegenden Untersuchungen des geometrischen Einflusses als qualitative Betrachtung angesehen werden darf und nur für die gegebenen Geometrien und statischen Rand- und Kopplungsbedingungen validiert werden dürfen.

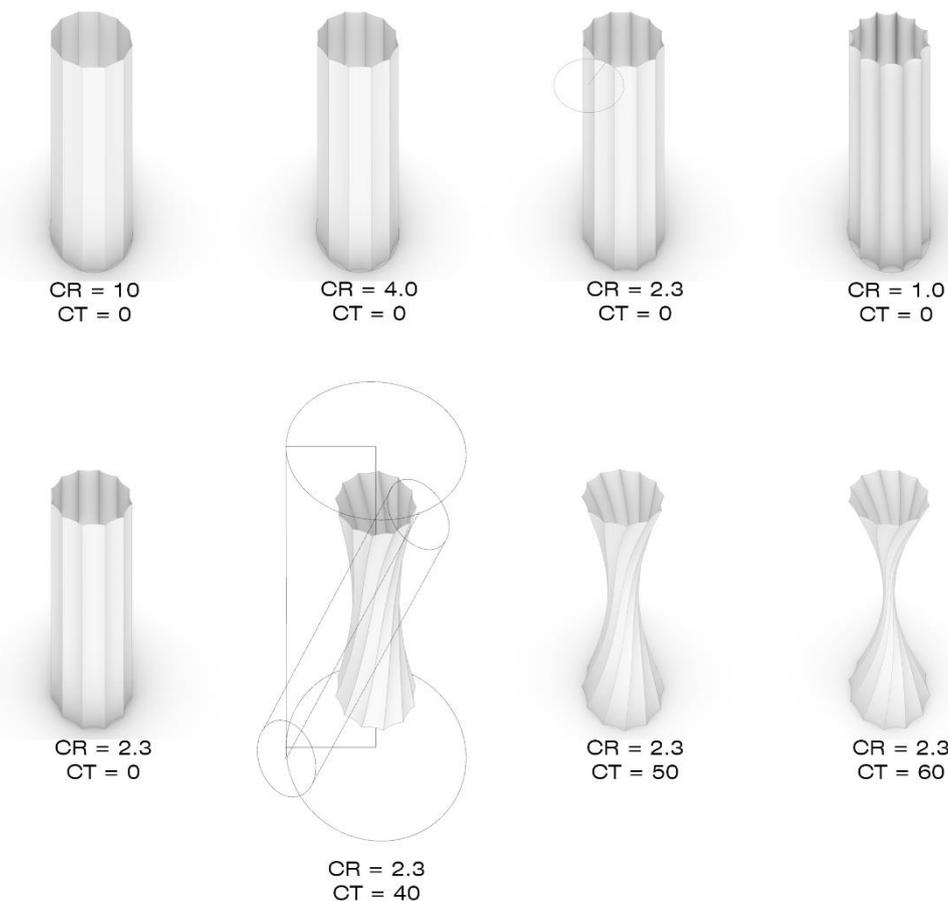


Abbildung 15: Einfluss der Konstruktionsparameter Zylinderradius und Zylinderverdrehung (durch Rotation) auf die prüfende Gesamtgeometrie im FE-Modell.

Einfluss des Krümmungsradius

Die Krümmungsradien der identischen, einfach gekrümmten Zylinder werden ohne Verdrehung in einem Bereich von 0,5m – 10,0m variiert. Hierbei werden die Radien des oberen und unteren Kreises gleichlaufend angepasst werden, um die globale Turmgeometrie der Geometrievarianten nicht zu verändern (siehe Geometrische Modellierung und Fertigungsplanung, S. 18 ff.). Der Bereich der untersuchten Zylinderradien ist bewusst sehr groß gewählt, um ihren Einfluss auf flächenaktive Strukturen aus gekrümmtem Brettsperrholz richtig zu verstehen.

Das Material ist das 90 mm starke, selbstgeformte Brettsperrholz, die Verbindungen sind durch entlang der Fuge gleichmäßig verteilte Feder Elemente simuliert (Herstellung von Prototypen aus gekrümmten BSPH-Komponenten, vergleiche S. 46 ff.; Verbindungen von BSPH-Komponenten, vergleiche S. 39 ff.). Die drei axialen Federsteifigkeiten sind auf einen Wert von 10000 kN/m eingestellt, während die Drehfedersteifigkeit auf 100 kNm/rad gewählt wird. Der vorherrschende Lastfall ist ein horizontales Windlastszenario, für das die äußeren und inneren Winddrücke als Funktion der unterschiedlichen Abmessungen der Strukturkonturen berechnet werden. Der Turm wird auf einer horizontalen Ebene mit gelenkigen Auflagern gehalten, die in allen drei lateralen Richtungen festgehalten sind. In den zugrundeliegenden Studien werden die absoluten Summen der Verbindungskräfte sowie das Verformungsverhalten der Struktur bei Änderung der Bauteilkrümmung untersucht.

Die Untersuchungen zeigen, dass die Verformungen der Struktur mit Zunahme der Krümmung qualitativ abnehmen. Vor allem im Bereich sehr hoher Krümmung, sprich in Bereich kleiner Krümmungsradien (Krümmung: $K = 1/R_1 \cdot 1/R_2 = \kappa_1 \cdot \kappa_2$, mit $R_2 \rightarrow \infty$) weisen die Verformungen ein exponentielles Verhalten auf, welches gemäß der Kontinuumsmechanik mit dem Trägheitsmoment invers korreliert. Für die absolute Summe der Verbindungskräfte in der Struktur ist folgendes Verhalten zu beobachten: Die Schubkräfte in der Ebene nehmen mit Abnahme der Krümmung exponentiell zu, die Schubkräfte aus der Ebene nehmen invers ab. Die Druck- und Zugkräfte weisen leichte Schwankungen auf, bleiben qualitativ gesehen jedoch für die gegebenen Versuchparameter bei einer Änderung der Krümmung konstant.

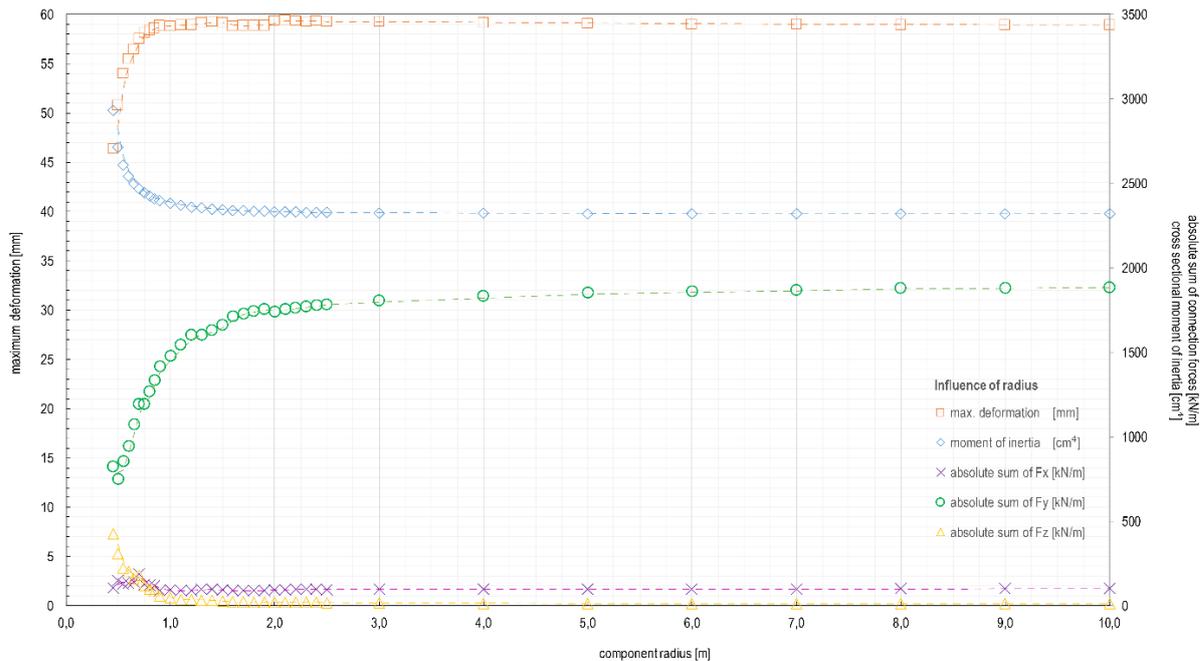


Abbildung 16. Einfluss des Krümmungsradius. (unveröffentlichte Daten: ICD / ITKE– Universität Stuttgart).

Einfluss der Rotation der Verbindungsfugen

Die Rotation des oberen Kontrollkreises, der die Verdrehung der Zylinder steuert, wird in einem Bereich von $0^\circ - 120^\circ$ in 5° -Schritten variiert. Hierbei bleibt der Wert des Krümmungsradius der einzelnen Zylinder konstant auf 1,0m. Die globale Turmgeometrie schnürt sich entsprechend Abbildung 15 (unten) im Bereich der halben Höhe der Struktur spiegelsymmetrisch zu, sprich der Radius des Querschnitts der Globalstruktur nimmt von den beiden Endpunkten zur Mitte linear ab, vergleiche Abbildung 15.

Material- und Verbindungsparameter sind identisch mit derer, die bei den Untersuchungen zum Einfluss des Krümmungsradius gewählt wurden: Als Material das 90 mm starke, gekrümmte BSPH; für die Verbindungssteifigkeiten drei axiale Federsteifigkeiten mit einem Wert von 10000 kN/m und einer Drehfedersteifigkeit von 100 kNm/rad. Der vorherrschende Lastfall ist erneut das horizontale Windlastszenario, für das die äußeren und inneren Winddrücke als Funktion der unterschiedlichen Abmessungen der Strukturkonturen berechnet werden. Die Lagerungsbedingungen wurden ebenfalls beibehalten.

Die Untersuchungen zeigen, dass die Verformungen der Struktur mit Zunahme der Rotation der Verbindungsfugen über den gesamten Parameterbereich qualitativ konstant bleiben. Es lässt sich jedoch erkennen, dass trotz einer (wenn auch nur leichten) Abnahme des Trägheitsmoments im Rotationsbereich von $0^\circ - 95^\circ$, die Verformungen ebenfalls abnehmen. Dies entspricht nicht der in der

Kontinuumsmechanik allgemeinen gültigen Annahme des inversen Verhaltens von Trägheitsmoment (Steifigkeit) und Verformung. Dies bedeutet, dass eine Rotation der Verbindungsfugen für dieses Rotationspektrum einen positiven Einfluss auf die Verformungen hat. Die Autoren können mit den gegenwärtigen Studien jedoch nicht eindeutig den Grund dieses Tragverhaltens erklären und stellen diese Ergebnisse somit nur beobachtend dar. Im Bereich der Rotation des Kontrollkreises $\geq 100^\circ$ (größerer Einschnürung des Querschnitts der Globalstruktur) nehmen die Verformungen drastisch zu. Dies lässt sich über eine lokale Instabilität aufgrund des geringen Querschnitts des Einschnürungsbereichs in der Mitte der Strukturhöhe erklären. Aufgrund der starken, lokalen Querschnittsabnahme (Trägheitsmoment in Feldmitte $<$ als globales Trägheitsmoment der Struktur) tritt ein lokaler Steifigkeitsverlust auf und die Verformungen nehmen dementsprechend zu.

Für die absolute Summe der Verbindungskräfte in der Struktur ist folgendes Verhalten zu beobachten: Die Schubkräfte in der Ebene und die Druck- und Zugkräfte nehmen mit Zunahme der Rotation der Verbindungsfugen quasi-linear zu, die Schubkräfte aus der Ebene weisen über den gewählten Parameterbereich nur eine sehr geringe Zunahme auf.

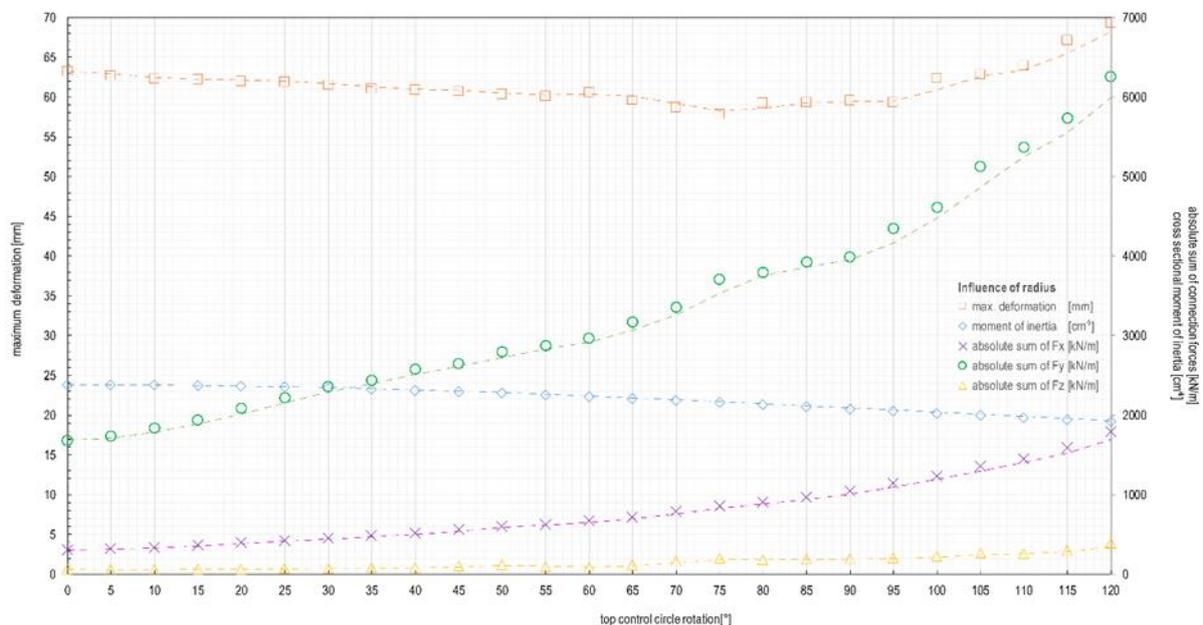


Abbildung 17. Einfluss der Verdrehung der Verbindungsfugen. (unveröffentlichte Daten: ICD / ITKE– Universität Stuttgart).

Weitere architektonische und statische Anwendungen von gekrümmtem Brettsperrholz

Die Untersuchung der Geometrie des Demonstrators beschreibt die außergewöhnlichen statischen und architektonischen Möglichkeiten von hoch gekrümmten Brettsperrholz. Basierend auf dieser Untersuchung wurde ein breiteres Spektrum möglicher Bauanwendungen beschrieben, bei denen aufgrund der Krümmung und der Holzwerkstoffeigenschaften ein baulich konstruktiver Mehrwert identifiziert werden kann. Für jedes der folgenden Szenarien wäre die beschriebene Modellierung und Produktionsplanung für die weitere Entwicklung und Anwendung besonders nützlich.

Zylindrische Schalendachkonstruktionen mit mittlerer Spannweite

Zylindrische oder bogenförmige Geometrien finden sich häufig in Dachkonstruktionen mit mittlerer Spannweite, die für Industrie- und Kulturgebäude verwendet werden. Die gekrümmte Oberflächengeometrie ermöglicht längere Spannweiten im Vergleich zu flachen Platten, wodurch die Anzahl der erforderlichen Stützen und Wände reduziert und die Flexibilität des Raumes erhöht wird. Diese Schalenstrukturen werden typischerweise aus Stahlbeton oder historisch aus Mauerwerk

gebaut. Die gekrümmte BSPH-Bauweise wäre für diese Art von Konstruktion besonders geeignet, da große gekrümmte Teilzylinder aus nur zwei Plattenlagen hergestellt werden könnten und die höhere Krümmung die erforderliche Gesamtdicke und das Material reduzieren würde. Da die primäre Faserorientierung des gekrümmten BSPH senkrecht zur Hauptkrümmung verläuft, würde sich diese mit der Richtung der Hauptspannweite des Bauteils ausrichten. Diese weitgespannten BSPH-Dachkomponenten könnten als leichtere und nachhaltigere Alternative zu Stahlbeton einfach und flexibel vorgefertigt werden. Änderungen und Anschlüsse wären aufgrund der Bearbeitbarkeit von Holz und der Reduzierung der Schalung in den Fertigungs- und Montageschritten ebenfalls leichter zu erreichen.

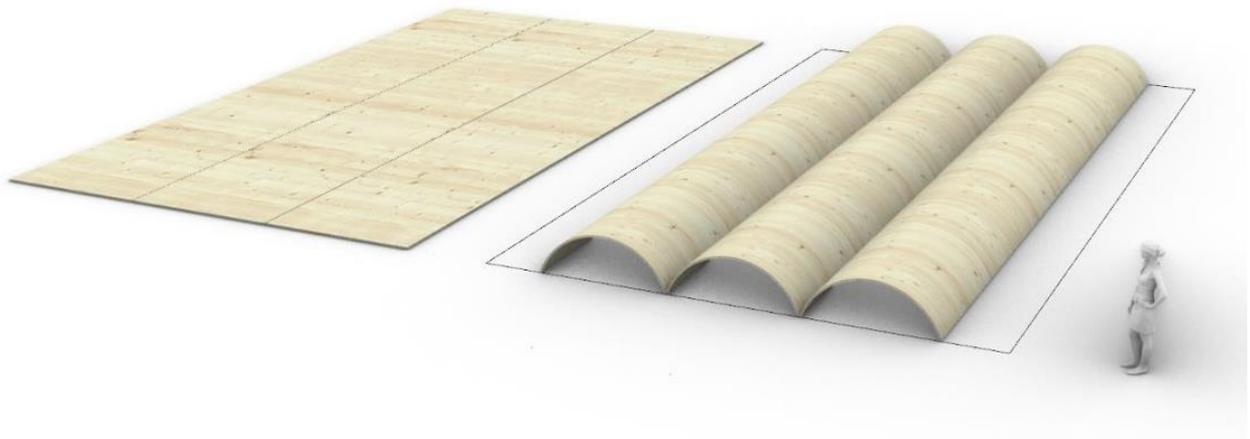


Abbildung 18. Anwendung des selbstformenden gekrümmten Brettsperrholzes für zylindrische Schalendachkonstruktionen mit mittlerer Spannweite. (ICD- Universität Stuttgart, Empa).

Gekrümmte Wandscheiben für den mehrgeschossigen Holzbau

Holz und insbesondere Brettsperrholz entwickelt sich rasch zu einer leistungsfähigen Alternative für den mehrstöckigen Bau von Wohn- und Geschäftsgebäuden, um den steigenden Raumbedarf in vielen städtischen Gebieten zu decken. Während es sinnvoll ist, die Bodenplatten eines Gebäudes aus flachen BSPH-Platten herzustellen, können vertikale Wände, insbesondere solche, die für die Aufnahme von horizontalen Kräften ausgelegt sind, statisch und räumlich von der Krümmung profitieren. Aus statischer Sicht verhindert die Krümmung in der X-Y-Ebene ein Umkippen der Wand und verringert somit die Beanspruchung der Verbindungen zwischen Wand und Boden. Bei höheren Gebäuden nimmt der Gebäudekern eine erhebliche Last auf und ist zur Stabilisierung der Struktur erforderlich. Hier würden gekrümmte Geometrie und Holzkonstruktion der Gebäudestruktur zugutekommen, da sie anstelle von Stahlbeton und/oder kastenförmig geradlinig Kernen leichter

ausgeführt werden könnte. Die gekrümmten BSPH-Wände könnten als tragende und aussteifende Wände dienen, die mit flachen BSPH-Bodenplatten verbunden sind.



Abbildung 19. Anwendung des selbstformenden gekrümmten Brettsperrholzes für vertikale Aussteifungs- oder Trennwände in mehrgeschossiger Holzbauweise. (ICD- Universität Stuttgart, Empa).

Zylindrische Strukturen für Masten und Silos

In der technischen Infrastruktur und insbesondere bei Masten von Windturbinen oder Silos, die Mineralien und landwirtschaftliche Produkte aufnehmen, sind zylindrische Geometrien wegen ihrer statischen Effizienz bereits weit verbreitet. In diesen Fällen würden sich gekrümmtes Brettsperrholz besonders gut für eine vorwiegend holzbasierte Bauweise eignen. Stark gekrümmte zylindrische Rohrformen könnten in Segmenten oder als vollständig selbstformende Rohre hergestellt werden. Da bei diesen Konstruktionen komplette Zylinder verwendet werden, sind die dünneren einschränkenden Schichten des gekrümmten BSPH ideal ausgerichtet, um die Zugkräfte an der Außenseite des Zylinders aufzunehmen. In diesem Zusammenhang stellt die Kontinuität und gleichmäßige Verteilung der Holzfasern über die gesamte Oberfläche einen Vorteil gegenüber Konstruktionsmethoden dar, die auf diskrete Bereiche mittels Verstärkung durch Bewehrungsstahl oder Stahlseile setzen. Darüber hinaus hätte die BSPH-Konstruktion ein niedrigeres Verhältnis von Gewicht zu Volumen, das umso wertvoller wird, je größer und höher Strukturen werden.

Erforderliche Entwicklungen für großmaßstäbliche Anwendungen (AP2)

Anpassung des Entwurfs und der Herstellung von selbstformenden Bilayer aus Brettsperrholz

Die Herstellung der für das Demonstrator-Projekt erforderlichen Größe und Menge an selbstformendem BSPH erforderte eine Reihe von Anpassungen des Herstellungsprozesses. Die Machbarkeit der Bilayer-Produktion und der Selbstverformung durch Ofentrocknung wurde im Labor und in industriellen Versuchen mit mehreren 10-teiligen Serien von 60 cm x 60 cm mit einer Bilayer-Dicke von 20-60 mm (KTI 25114.2) nachgewiesen. Zu den wichtigsten Herausforderungen für die Produktion im industriellen Maßstab gehören: Anpassung des Entwurfs der Bilayer aus Holz auf der Grundlage von Holzart, Plattendicke, Qualität, Sortiergenauigkeit, Klebstoffen und verfügbaren Trocknungszyklen des Industriepartners. Darüber hinaus musste die Verleimung von BSPH auf einer grundlegenden Ebene nachgewiesen werden, um die Tragfähigkeit herkömmlicher tragenden BSPH-Platten in flacher Konfiguration zu gewährleisten.

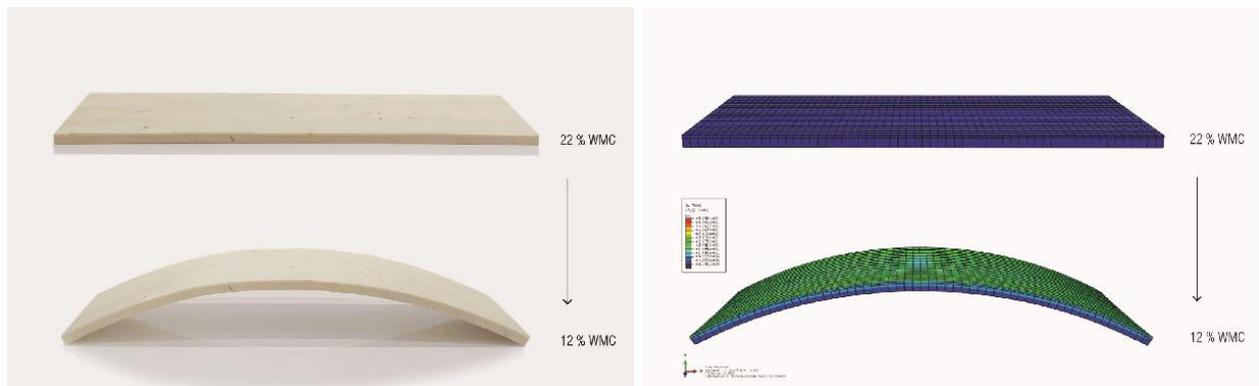


Abbildung 20. Selbstformende Bilayer aus Holz und Simulationsmodell. (ICD- Universität Stuttgart, Empa).

Art, Qualität und Vorhersehbarkeit

Die Produktion der Bilayer wurde zunächst auf die Verwendung von Fichtenholz umgestellt, das die primäre Holzart ist, die vom Industriepartner verarbeitet wird. Unter Verwendung des im Rahmen von (KTI 25114.2) entwickelten Holz-Bilayer-Modells war bekannt, dass die Vorhersagbarkeit der Krümmung bei Fichtenholz im Vergleich zu Buchenholz geringer war (Grönquist et al. 2019). Fichte war jedoch leichter verfügbar und Brettsperrholz aus Fichte wurde für das Demonstratorprojekt bevorzugt, da die für die Verbindungen erforderliche Mindestdicke des Brettsperrholzes erreicht war, so dass eine weitere Materialreduktion durch die Verwendung eines Hartholzes wie Buche nicht möglich war. Um die Variabilität in der Krümmungsvorhersage zu reduzieren, musste der Bereich der zulässigen Hirnholzabweichung auf +/- 10 Grad von der Senkrechten begrenzt werden. Auf Wunsch des Industriepartners wurde eine kleine Reihe von Bilayer-Versuchen durchgeführt, um praktisch festzustellen, ob das Auftreten von Ästen, sowohl lebenden als auch toten, die Krümmung beeinflussen. Aus dieser kleinen Reihe von Versuchen wurde qualitativ festgestellt, dass Holz mit Ästen beider Arten für beide Lagen verwendet werden kann, aber, wenn möglich sollte der Schwerpunkt auf eine höhere Qualität und weniger Äste in der aktiven Lage gelegt werden. Für die aktive Schicht konnte das halbautomatische Standardsortiersystem für Bauholz der Sortierklasse C24 verwendet werden.

Platten- und Schichtdicke

Die Dicke der Platten in der aktiven und passiven Schicht hat einen großen Einfluss auf die Effizienz der industriellen Produktion. Im Rahmen der Standard-Sägewerksproduktion werden Platten in einem Dickenbereich von 15 - 60 mm hergestellt. Jeder Schnitt im Sägewerk kostet Zeit und Material. Für jede Seite jedes Brettes gehen aufgrund der Breite des Sägeblattes 3 mm verloren (obwohl dieses Material

nachgeschaltet wird). Daher werden vom Sägewerk fast immer dickere Schichten und weniger Bretter bevorzugt. Für die Zweischichtproduktion musste die Dicke beider Schichten optimiert und standardisiert werden, um sie an das Sägewerk und das Simulationsmodell für die gewünschte Krümmung von 2,4 m Radius für den Demonstrator anzupassen. Für die aktive Schicht wurde eine 30 mm dicke Platte gewählt, die bei einer Standarddicke grob geschnitten und kurz vor der Bilayer-Produktion gehobelt wurde. Diese standardisierte Rohschnittgröße bedeutete, dass die spezialisierte Auswahl für Hirnholz und WMC während der Zeit, in der dieses Produkt auf der Sägewerkslinie produziert wurde, innerhalb eines breiteren Brettesortiments erfolgen konnte. Für die Passivschicht konnte eine Standardproduktplatte mit einer Dicke von 10 mm verwendet werden, die keine besondere Sortierung oder Maschinen erforderte.

Herstellung der Bilayer

Für die experimentelle Produktion wurden die Bilayer mit einer Größe von 1,2 x 4,9 m konzipiert. Dadurch konnten sie von den Arbeitern bewegt und in bestehenden Flachpressen in standardisierten Transportmagazinen im Werk produziert werden. Nach der Sortierung der Bretter wird die aktive Schicht durch 4-seitiges Planen und Kantenverleimung mit einer handelsüblichen Flachpresse hergestellt. Die fertige Aktivlage wird auf beiden Seiten mit einer großformatigen Bandschleifmaschine geschliffen. Auf die eine Seite der Aktivschicht wird PUR-Kleber aufgetragen und die Platten für die Passivschicht werden manuell aufgelegt. Sobald fünf der flachen Bilayer fertiggestellt sind, wird eine Presskraft gemäß den Normen für die Verleimung von Holzbauteilen aufgebracht. Zuletzt werden die noch flachen Bilayer mit einer Brettsäge auf das exakte Maß zugeschnitten.

Ofentrocknung, Aktivierung der Krümmung und Änderung des Feuchtegehalts des Holzes

Die Ofentrocknung dient dazu, den Feuchtegehalt der Bilayer zu senken und sie gleichzeitig auf die gekrümmte Geometrie zu bringen. Die flachen Bilayer werden in spezielle Holzmagazine geladen, die es ihnen erlauben, sich ungehindert zu wölben und dennoch dicht nebeneinander zu stapeln. Die Gestelle werden in eine handelsübliche Trockenkammer gestellt und mit einem standardisierten Trocknungsprogramm über mehrere Tage hinweg getrocknet.



Abbildung 21. Trockenkammertrocknung der Bilayer aus Fichtenholz. Die Bilayer werden zusammen mit anderen Stapeln und einem Sensor zur Überwachung des WMC (Wood Moisture Content) während der Trocknung in die Trockenkammer geladen (T). Detail der flachen Bilayer mit einem hohen WMC vor dem Trocknen (links) und der gekrümmten Bilayer mit einem niedrigen WMC nach dem Trocknen (rechts).

Obwohl die künstliche Trocknung einer der kostspieligsten und energieintensivsten Prozesse in der Holzproduktion ist, muss sichergestellt werden, dass sich das Holz für eine langfristige Nutzung eignet, insbesondere für konstruktive Anwendungen. Damit die selbstformende Herstellung industriell funktionieren kann, musste sie so angepasst werden, dass die Trocknung ohne große Änderungen der Programmierung der Trockenkammer für Bretter ähnlicher Dicke erfolgen kann. Dies bedeutet, dass die anderen Bretterstapel in der gleichen Charge getrocknet werden können, die Trockenkammer bis zur vollen Kapazität gefüllt werden kann und während des Trocknungsprozesses nicht geöffnet werden muss. Die Tests wurden durchgeführt, indem zunächst Bilayer zusammen mit anderen Holzstapeln in die Trockenkammer gelegt wurden, um sicherzustellen, dass der Trocknungsprozess nicht zu abrupt verlief und keine Risse auftraten. Das gewählte Programm trocknete die Bilayers von 22% WMC auf 12% WMC über 4-5 Tage, abhängig von den äußeren Wetterbedingungen. Alle Bilayer, die für das Demonstrator-Projekt bestimmt waren, wurden in einer Charge getrocknet, wobei der Rest des Ofens mit Stapeln von 40 mm dicken Fichtenholzplatten mit variablem Holzfeuchtegehalt (WMC) gefüllt wurde. Nach dem Öffnen der Trockenkammer waren die Bilayer gekrümmt und zur Messung in eine klimatisierte Produktionshalle transportiert.

Alternativ zeigten Labortests, dass auch die Lufttrocknung der dickeren Bilayer eine geeignete Methode zur Aktivierung der selbstformenden Krümmung war. Der Zeitaufwand würde jedoch im Bereich von Wochen im Vergleich zu Tagen liegen, was dies als industrielle Lösung ausschließt. Wenn kleinere Änderungen des Holzfeuchtegehalts erforderlich sind, wurde auch eine Methode der belüfteten Trocknung mit geringer Hitze in Betracht gezogen, aber nicht zugunsten eines allgemein bekannten Trockenkammerverfahrens gewählt.



Abbildung 22. Selbstgeformte, gekrümmte Bilayer nach dem Trocknen.



Abbildung 23. Weiterverarbeitung der selbstgeformten, gekrümmten Bilayer nach dem Trocknen.

Herstellung von gekrümmtem Brettsperrholz

Nach der Vermessung wurden die gekrümmten Bilayer nebeneinander und paarweise in bestimmten Mustern angeordnet, um ein größeres Bauteil zu bilden. Zwei Lagen von Bilayern wurden dann gestapelt und mit einer Reihe von Holzbalken senkrecht zur Krümmungsrichtung verschraubt und presslaminiert. Eine einzelne dünne Sperrschicht aus den gleichen 10 mm dicken Standardplatten

wurde manuell elastisch gebogen und auf die Innenseite des gekrümmten BSPH laminiert, um eine weitere hygroskopische Verformung zu verhindern. Die Verleimung wurde in einem Pressvorgang pro größerem Rohling durchgeführt. Eine geringe Anzahl gebogener Holzleisten wurde zur einfachen Positionierung der Bilayer während des Laminiervorgangs verwendet, während der Druck nur von den geraden Holzbalken und Schrauben aufgebracht werden konnte. Da die Bilayer vorgekrümmt sind, brauchen sie nur noch zusammengepresst zu werden, und es ist keine zusätzliche Kraft oder Arbeit für die Formgebung erforderlich. Alle für das Pressen verwendeten Holzführungen und -balken könnten für mehrere Laminiervorgänge wiederverwendet und in der Werkhalle erneut eingesetzt werden.

Da die gekrümmten Bilayer nach dem Glätten und Planen der Oberflächen getrocknet wurden, können Defekte wie lokale Schüsselungen oder Risse auftreten, die ein Problem für den Laminierungsprozess darstellen. Um dieses Problem zu beheben, wurden zwei Arten von Klebstoffen für die Verleimung der Bilayer zum fertigen BSPH-Bauteil getestet, ein Standard-PUR-Klebstoff für Konstruktionsholz und ein experimenteller 2K-PUR-Klebstoff, der Vorteile bei der Verklebung von Bauteilen mit ungleichmäßigen Oberflächen und größeren Leimfugen aufweist. Im Rahmen eines angrenzenden Forschungsprojektes wurden von den Projektpartnern an der ETH Zürich/Empa destruktive 3-Punkt-Biegeversuche mit Probekörpern durchgeführt, um die Delamination durch Rollschub mit den beiden Klebstofftypen zu untersuchen. Die Versuche zeigten keinen nennenswerten Unterschied in der Leistungsfähigkeit der beiden Klebstofftypen in dieser Belastungssituation, so dass der Standard 1K-PUR für die Produktion gewählt wurde. Zusätzlich wurden Musterblöcke, die aus der eigentlichen BSPH-Produktion entnommen wurden, mittels Blockscherversuch auf ihre Delaminationsfestigkeit geprüft, um die Produktion zu validieren. Für eine weitere Zertifizierung und Produkthanwendung wären zusätzliche Untersuchungen erforderlich, um Delaminationsprobleme im Langzeitverlauf und bei verschiedenem Holzfeuchtegehalt (WMC) zu prüfen.

Das so entstandene gekrümmte Brettsperrholz ist 90 mm dick und besteht aus 5 kreuzweise angeordneten Brettlagen aus Fichtenholz der Stärke 10 - 30 -10 - 30 -10 mm mit einem Innenradius von 2,30 m. Die 30 mm Lagen verlaufen senkrecht zur Krümmung. Die Grundplattengröße für die Versuchsproduktion beträgt 1,20 x 4,90 m, während für die Bauteile des Demonstrators gezeigt wird, dass trotz der Größenbeschränkung der einzelnen Bilayer durch die Anordnung in der Produktionsphase des Brettsperrholzes wesentlich größere Platten von bis zu 6,0 x 15,0 m hergestellt werden können.



Abbildung 24. Querschnitte des fertiggestellten, selbstgeformten gekrümmten Brettsperrholzes. Querschnitt (links). Längsschnitt (rechts) zeigt den 10-30-10-30-10 Schichtaufbau.

Auf dem Weg zur automatisierten Herstellung von gekrümmten Brettsperrholz

Der selbstformende Herstellungsprozess wurde so konzipiert, dass er für eine zukünftige Anpassung an die automatisierte BSPH-Produktion kompatibel ist. Auf diese Weise wird das Verfahren für die Produktion von gekrümmten Brettsperrholz in größerem Maßstab geeignet. Die Produktion der Bilayer kann leicht angepasst werden, um mit großen automatischen Holzpressanlagen hergestellt zu werden, in denen die Platten für die aktive Schicht mit einer hohen Holzfeuchtegehalt vorbereitet werden. Die Maschine könnte die Bilayer-Platten in größeren Formaten mit einer Länge von bis zu 13 m herstellen, und nach dem Trocknen könnten die gekrümmten Platten unter Verwendung von Vakuum laminierung, die sowohl für die Produktion von flachen als auch gekrümmten Brettsperrholz bekannt ist, miteinander verleimt werden. Die Herstellung der Bilayer würde einen zusätzlichen anfänglichen Aufwand einschließlich der Trocknungsschritte erfordern, aber die Anzahl der benötigten Schichten sowie der Arbeits- und Zeitaufwand für das Verkleben der großen Platten zu Brettsperrholz erheblich reduzieren. Der Prozess der Selbstformung ist in Breite und Länge skalierbar, wobei die Trockenkammer und die Transportfähigkeit (typischerweise 10 - 13 m) begrenzt sind. Die Herausforderungen bei der automatisierten Produktion bestehen darin, dass die Fertigungslinie des Brettsperrholzes und das Sägewerk nahe beieinanderliegen müssen, um sicherzustellen, dass der WMC aufrechterhalten wird und ein Bestand an sortiertem Material zur Verfügung steht. Eine Einrichtung, bei der sich die BSPH-Fertigungslinie an einem gesonderten Ort befindet, wäre zwar möglich, würde aber zusätzliche Transport- und Lageranforderungen erfordern.

Übertragung von gekrümmtem Brettsperrholz auf ein Konstruktionssystem und eine globale Geometrie

Die Verwendung von stark gekrümmten Brettsperrholz in einem größeren Bausystem erfordert einen integrierten materialspezifischen Konstruktionsansatz. Um möglichst effektiv zu gestalten und konstruieren, dient das Brettsperrholz sowohl als tragende Struktur als auch als primäre Umschließung oder Wände der Struktur. Die Bauteile müssen jedoch so konstruiert sein, dass sie kontinuierlich Lasten innerhalb ihrer Struktur, von Bauteil zu Bauteil und von der Struktur zu angrenzenden Bauteilen übertragen. Das gekrümmte Brettsperrholz wurde aus großformatigen

Rohlingen hergestellt, die speziell für die gekrümmten Bauteile des Demonstratorprojekts entworfen und hergestellt wurden.

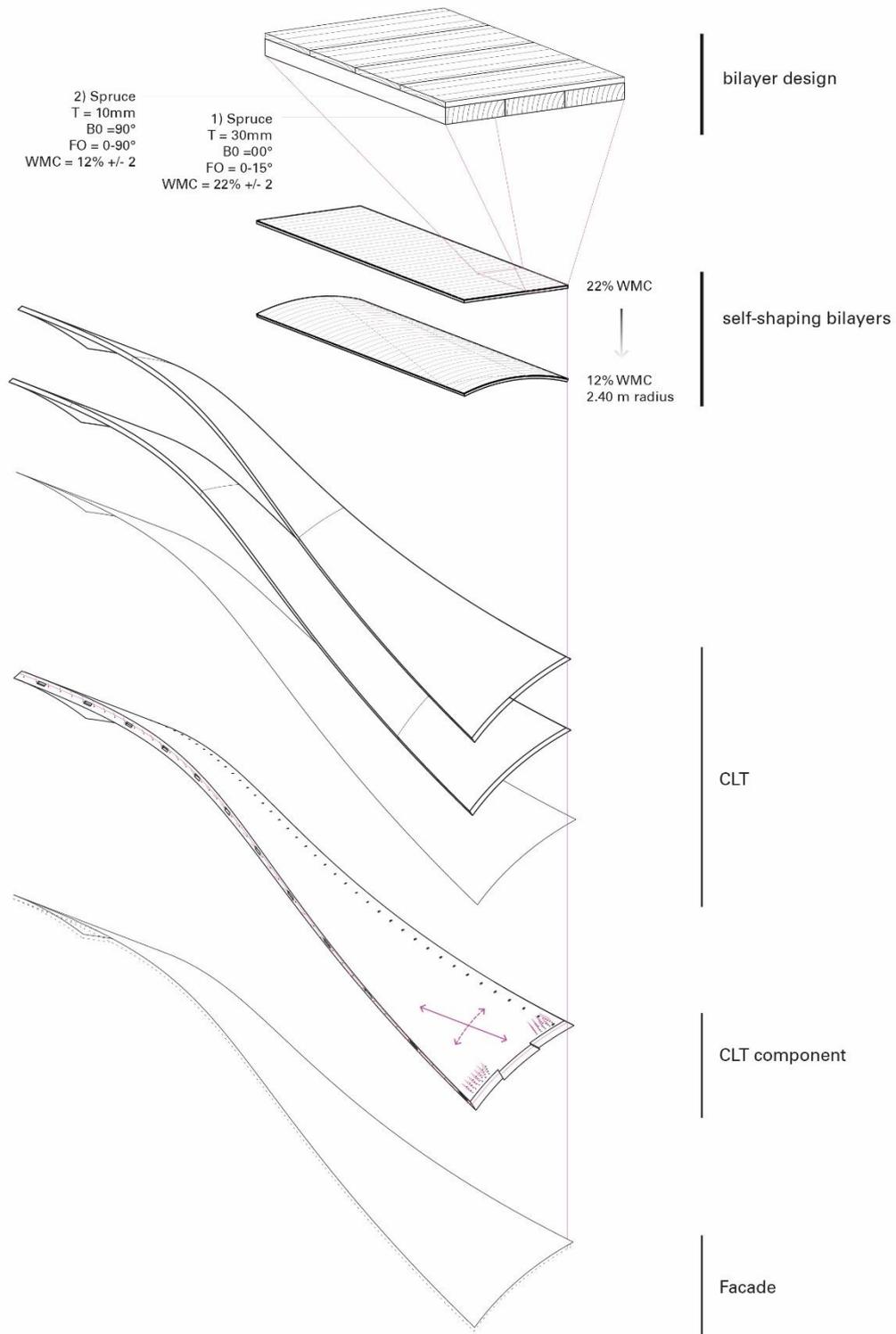


Abbildung 25. Darstellung der Arbeitsschritte für die Anwendung von selbstgeformten Brettsperrholz für die großformatigen Brettsperrholzkomponenten für das Demonstratorprojekt.

Entwicklung der mechanischen Modellierung und Verbindungsdetailierung von gekrümmtem Brettsperrholz

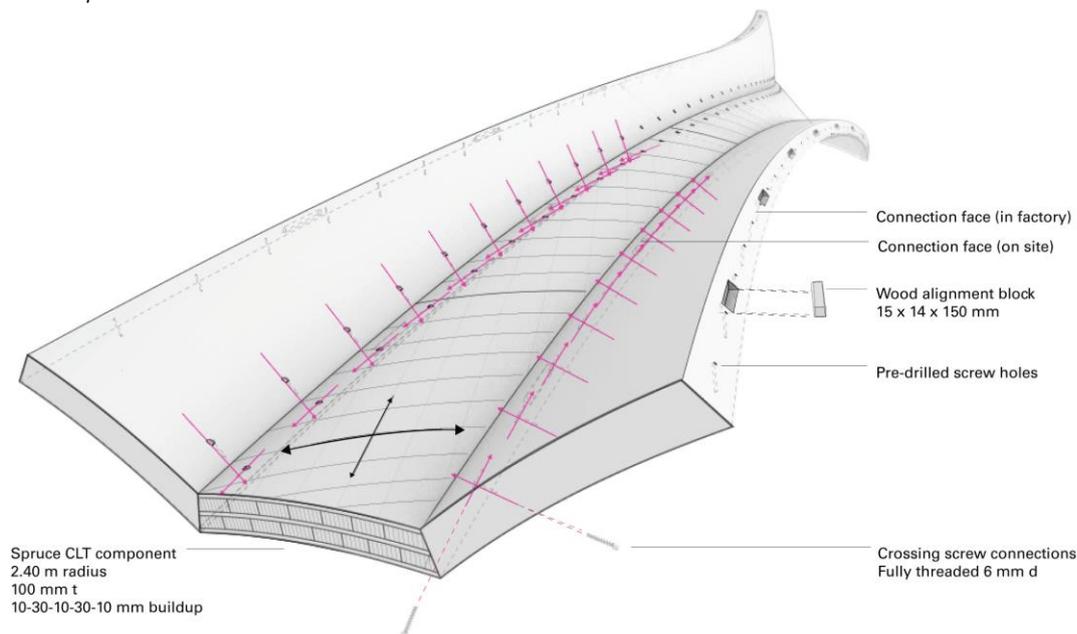


Abbildung 26. Bauteilkonstruktion einschließlich BSPH-Aufbau, integrierte Kreuz-Schraubenverbindungen (rosa), Ausrichtungsböcke und Krümmungsrichtungen.

Kontinuität der Kräfte in BSPH-Komponenten

Verbindungsstöße, die durch die begrenzten Dimensionen des Bestandmaterials verursacht werden, stellen Diskontinuitäten in den Komponenten dar und schwächen die Steifigkeit der globalen Struktur. In konventionellen Brettsperrholzkonstruktion sind die Verbindungsstöße entsprechend der Logik geradliniger Typologien angeordnet; sie sind nicht vorwiegend für die Übertragung von Biegemomenten ausgelegt. In dieser flächenaktiven Struktur müssen die Verbindungsstöße jedoch Schalen- und Plattenschnittgrößen übertragen. Um ihre reduzierte Steifigkeit und Tragfähigkeit im FE-Modell zu simulieren, werden die Schalenelemente entlang der Diskontinuitäten mit einem reduzierten Materialaufbau der Verbindungsstöße versehen. Ihre Tragfähigkeit wird durch ergänzende Studien detaillierter FE-Modelle verifiziert, validiert durch Stabwerksmodelle.

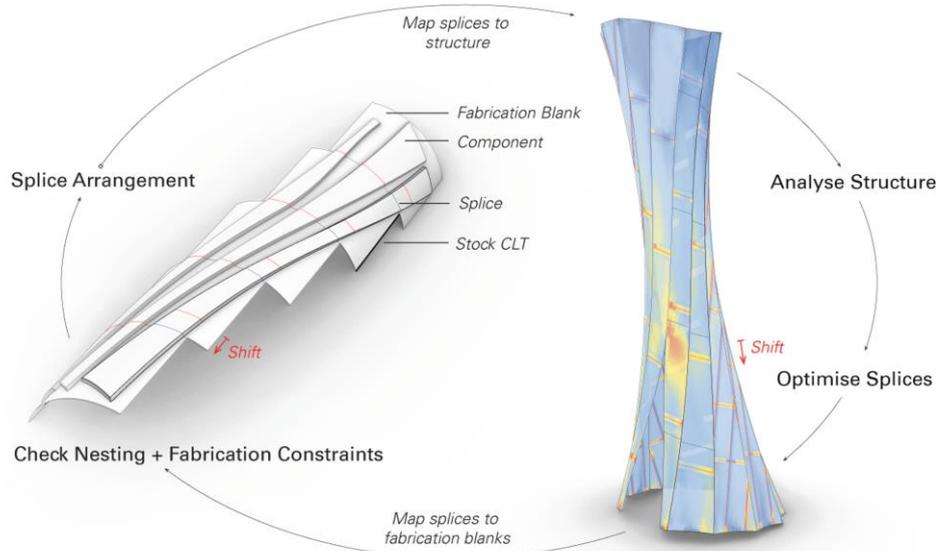


Abbildung 27. Digitaler Entwurfsprozess für die Anordnung von Bauteilstößen: Nesting von Komponenten auf Fertigungsrohlingen, die aus Bestandsbauteilen aus Brettspertholz zusammgebaut werden; Anordnung von Bauteilstößen in Bezug auf die Spannungsverteilung in der

Die Anordnung dieser Stöße ist so optimiert, dass ihre Auswirkungen auf das globale Tragverhalten reduziert werden, indem der Kraftfluss zwischen benachbarten Komponenten sichergestellt wird. Darüber hinaus integriert die Optimierung Fertigungsbeschränkungen, wie z.B. verfügbare Abmessungen von Bestandsmaterial und mögliche Nestingstrategien. Dieser Ansatz wird in den integrativen Entwurfsprozess implementiert (Abb. 6): Es wird eine mögliche Nestingstrategie der Komponenten auf den Fertigungsrohlingen erzeugt. Die daraus resultierende Anordnung der Bauteilstöße wird auf die entworfene, dreidimensionale Turmgeometrie abgebildet, wo sie statisch bewertet und für minimale Spannungen optimiert wird. Die maßgebenden Anforderungen sind hierbei die Einhaltung des Abstands zur Verzweigung an den Öffnungen sowie der Abstand zu den Stößen benachbarter Bauteilkomponenten. In einem weiteren Schritt wird das optimierte Layout auf die Fertigungsrohlinge zurück abgebildet, wo die Komponenten unter Einhaltung der fertigungstechnischen Randbedingungen neu genestet werden.

Verbindungen von BSPH-Komponenten

Im FE-Modell sind die Verbindungen mittels Federelementen zwischen zwei benachbarte FE-Knoten entlang der Verbindungsfuge implementiert. Die Freiheitsgrade der Kreuzschrauben werden durch drei lineare Federn und eine Rotationsfeder simuliert, die die Axialsteifigkeit (Zug und Druck), die Schubsteifigkeit in der Ebene und die Schubsteifigkeit aus der Ebene sowie die Biegesteifigkeit darstellen. Jeder Feder sind ein bestimmter Steifigkeitskoeffizient und eine bestimmte Tragfähigkeit zugeordnet, die nach den normativen Vorschriften und technischen Zulassungen bestimmt wird. Der jeweilige Winkel α zwischen zwei benachbarten Bauteilen, der davon abhängige Umschließungswinkel θ innerhalb eines sich kreuzenden Schraubenpaares sowie der relative Abstand zu benachbarten Schraubenpaaren definiert die Steifigkeit und Tragfähigkeit des Kreuzschraubenpaares (Abb. 27, rechts).

In der geometrisch komplexen Struktur variiert der Winkel α zwischen benachbarten Komponenten kontinuierlich entlang der Nahtkurve in einem Bereich von 126° bis 146° (Abb. 27, links). Um diesem Bereich gerecht zu werden, muss sich der eingeschlossene Winkel θ innerhalb von sich kreuzenden Schraubenpaaren entsprechend ändern (Abb. 27, rechts). Da die Steifigkeit der Verbindung stark vom Winkel h abhängt, wird dieser in der gesamten Struktur optimiert, um möglichst große Steifigkeitswerte zu erreichen und gleichzeitig konstruktive Randbedingungen zu erfüllen. Dazu

gehören die erforderlichen Mindestrandabstände und die minimale Schraubeneindringtiefe, sowie herstellungsbedingte Anforderungen.

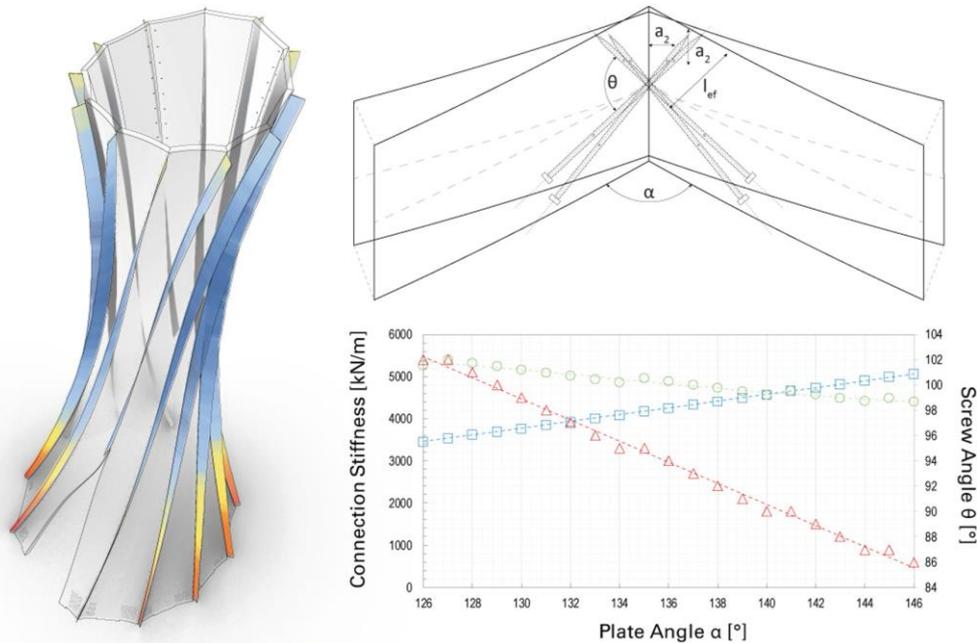


Abbildung 28. Auftreten von Verbindungswinkeln zwischen den Bauteilen entlang der Fugen der gekrümmten Brettsperrholzstruktur. Rechts: Parametrischer Entwurf von Verbindungsstrategien. Kreuzschraubenverbindung mit dem Bereich die auftretenden Winkel zwischen den Bau

Kreuzschraubenverbindung: Bei sich kreuzenden Schraubenpaaren werden Zug- und Schubkräfte aus der Ebene als eine axial belastete Fachwerkstruktur analysiert, während in der Ebene wirkende Schubkräfte durch den Dübelwiderstand des Schraubenpaares aufgenommen werden. Biegemomente können unter Berücksichtigung einer zu erwartenden Null-Konstruktionstoleranz entlang der Fugen übertragen werden. Das Biegemoment wird durch eine Hebelwirkung zwischen den Zugkräften im Kreuzungspunkt des Schraubenpaares und den Kontaktkräften entlang der Verbindungskante der Brettsperrholzkomponenten aufgenommen.

Es wurden zwei Varianten des Verbindungsdetails entwickelt: In der ersten Variante wurden die Kreuzschraubenpaare von der Außenseite der Struktur eingebracht. In diesem Fall werden die Schrauben während der Vorfertigung der Baugruppen im Werk eingesetzt, bevor der Witterungsschutz und Fassade angebracht werden. Bei der zweiten Variante der bauseitigen Anschlüsse werden die Schrauben von der Innenseite der Struktur eingefügt, nachdem die Montagegruppen in Position gebracht wurden. Die bauseitigen Anschlüsse erfolgen oberhalb der beiden Öffnungen und an zwei vollen Verbindungsfugen. In den unteren Bereichen wurden Querholzplättchen (Holzstopfen) eingesetzt, um die Schraubenköpfe zu

Diese Umstände erfordern eine parametrische und adaptive Implementierung der Verbindungen im computergestützten Entwurfsmodell. Somit kann die Anordnung der Federelemente in der gesamten Struktur in Bezug auf ihre Nutzung optimiert werden (Abb. 14), wobei eine kontinuierliche Verbindungsanordnung entlang der Fuge für eine homogene Lastübertragung gewährleistet werden sollte.

Digitaler Entwurfstransfer für die Herstellung des Demonstratorprojekts

Zur Umsetzung des vorgeschriebenen genauen statischen Entwurfs und der erforderlichen Detaillierung wurde der in AP 1 beschriebene digitale Entwurfsansatz für die Herstellung der

Demonstratorkomponenten angewandt. Anders als bei typischen digitalen Planungsmethoden umfasst der Ansatz Anweisungen von der spezifischen Herstellungstechnik auf Materialebene bis zur Sequenzierung der Endmontage. Für Schritte, die Schulung und manuelle Arbeit erforderten, wurde das digitale Design in einfache gedruckte Anweisungen umgewandelt. Für Präzisionsarbeiten wurde ein direkter digital zu digital Ansatz unter Verwendung vorhandener Maschinen gewählt. Die Informationen sind so weit wie möglich direkt im Material und in der Geometrie der Komponenten kodiert, was die Präzision erhöht und die Notwendigkeit von Zeichnungen oder Anleitungen zur Vermessung verringert.

Herstellung von selbstformendem, gekrümmtem Brettsperrholz

Auf der Grundlage der Beratung des Industriepartners wurden einfache Richtlinien und Arbeitsanweisungen für die Herstellung des selbstformenden Brettsperrholzes entwickelt. Aus den digitalen Planungsmodellen wurde eine einseitige Zeichnung entwickelt, in der die Größe der Bilayer-Platten, die Dicke der Platten, die Anforderungen an den Holzfeuchtegehalts und den Bereich der zulässigen Hirnholzwinkel sowie die spezifische Anordnung der Platten in den Bilayern angegeben sind. Die Anweisungen wurden sowohl in schriftlicher Form als auch in Form von zwei visuellen Zeichnungen übermittelt, die dem an der Produktion beteiligten Personal zugänglich waren. Dabei wurde die Krümmung durch einfache Materialparameter kommuniziert und nicht durch Geometrie, Berechnung oder spezifische Maschinencodes, die sie sehr gut beurteilbar machten. Die Anordnung der vorgekrümmten Bilayer zum fertigen Brettsperrholz wurde digital abgestimmt und durch eine standardisierte Zeichnung für Form und Position jedes Teils im Brettsperrholz kommuniziert. Die Zeichnungen wurden parametrisch aus dem digitalen Gesamtmodell generiert und lieferten leicht aktualisierbare Produktionsinformationen für die innere Zusammensetzung des Brettsperrholzes, basierend auf den Beschränkungen der Anzahl der produzierten Bilayer. Dieser digitale Ansatz ermöglichte eine Anpassung in letzter Minute auf der Grundlage von statischen Berechnungen und verringerte die Anzahl der Bilayer im Vergleich zu den ursprünglichen Schätzungen um 20%.

CNC-Bearbeitung und -Detaillierung

Die Verbindungen der Komponenten beruhen auf der präzisen Bearbeitung der Kontaktflächen und der Lage der Verbindungsschrauben. Aus dem digitalen Modell wurde die Geometrie der Kontaktflächen mit einer Genauigkeit von 0,01 mm definiert und als spezifische NURBS-Geometrien auf die kundenspezifische großformatige 5-Achsen-CNC-Maschine des Industriepartners übertragen. Vorgeschlagene Fräsebenen entlang der Oberfläche wurden definiert und vom Team basierend auf den spezifischen Fertigungsbedingungen der Maschine angepasst. In ähnlicher Weise wurden Vektoren für jede sich kreuzende Schraubverbindung definiert, um vorgebohrte Löcher für die Schrauben zu erzeugen. Hier sorgte eine Strategie des Vorbohrens eines stirnseitigen Lochs von 12 mm für eine ebene Oberfläche, auf der die Vorbohrlöcher von 4 mm Durchmesser für die sich kreuzenden Schrauben optimal gebohrt werden konnten. Die Vorbohrungen für die bauseitigen Verbindungen wurden von der Innenfläche aus gebohrt, die während der Bearbeitung nach oben zeigt. Die vorgefertigten Anschlussbohrungen müssen von den Kontaktflächen aus gebohrt werden, da die Außenflächen während der Bearbeitung nach unten zeigen. Die Verbindungsdetails wurden im Zuge der vorbereitenden Bearbeitungsschritte der Anschlussflächen hergestellt. Die abschließende Bearbeitung der Verbindungsflächen erfolgte im Anschluss, um die Auswirkungen der elastischen Rückstellkraft des Holzes auf die Position der Verbindungsschrauben zu minimieren. Ähnliche Verbindungslöcher wurden definiert und mit der CNC für die unteren Anschlüsse und die Dachdetails gebohrt. Durch diesen Arbeitsablauf konnte die Bearbeitungszeit auf 60-90 Minuten reduziert werden. Die sorgfältige digitale Definition und Herstellung der Anschlussdetails ermöglichte es, die

Standarddetails von den konventionellen Einschränkungen abzukoppeln und ohne spezielle mechanische Versuche zu implementieren.

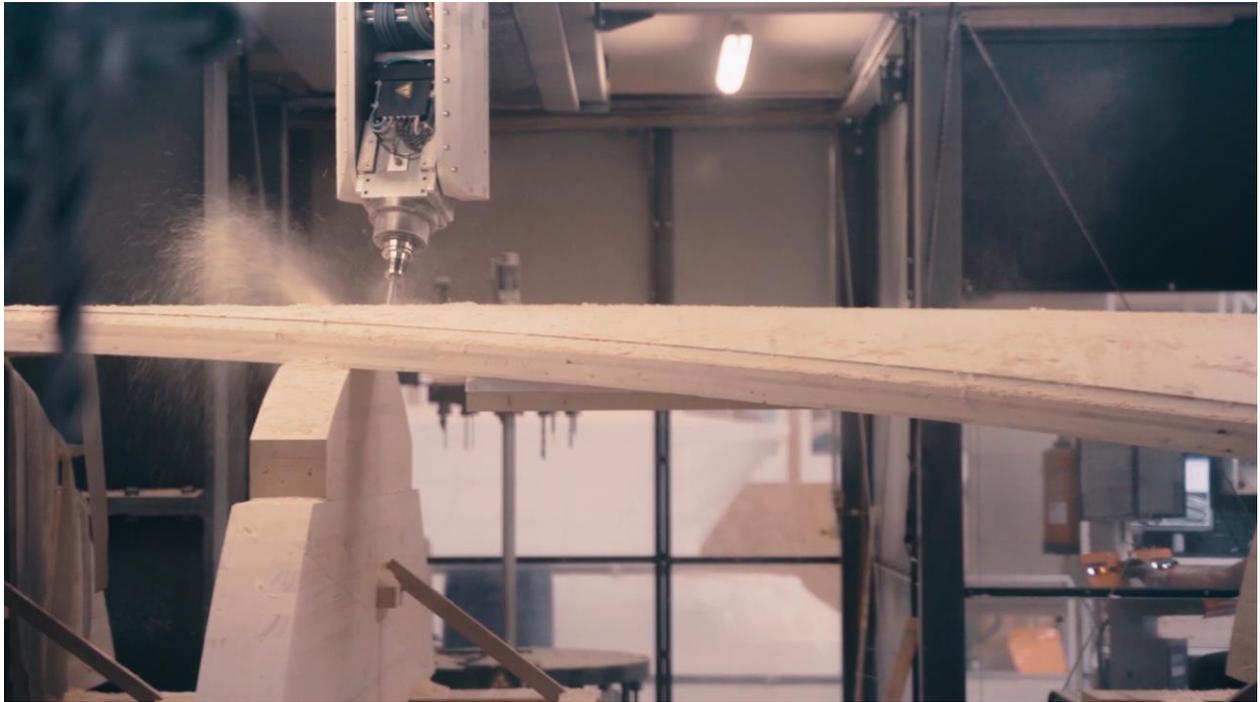


Abbildung 29. CNC-Bearbeitung der Bauteilkanten und Detaillierung.

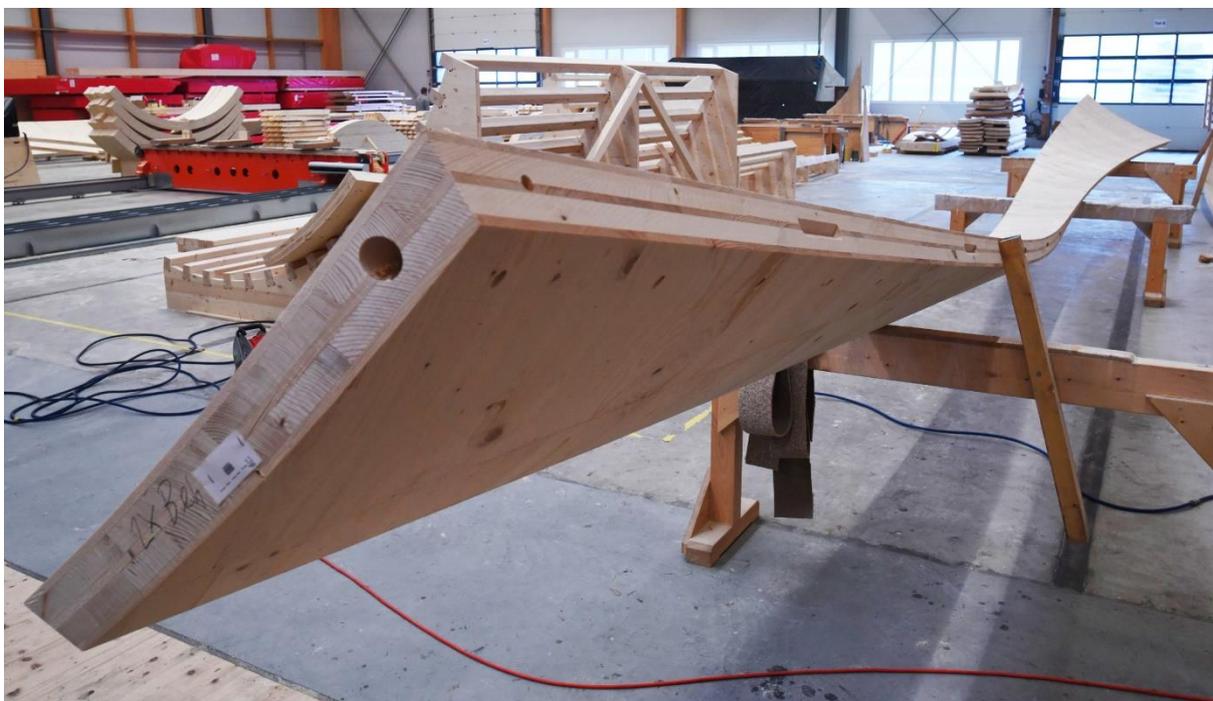


Abbildung 30. Fertiges selbstgeformtes gekrümmtes Bauteil. Verbindungsdetails vor der Montage und die gekrümmte Verbindungsfläche sind sichtbar. (ICD- Universität Stuttgart, Empa)



Abbildung 31. Fertigestellte, zu Transportgruppen vormontierte Komponenten, an denen die schützende Lärchenholzfassade angebracht ist.

Integration an angrenzende Gebäudesysteme

Während das gekrümmte Brettspertholz die primäre Struktur und Einhausung bildet, muss die Holzkonstruktion vor Witterungseinflüssen geschützt und mit anderen Bauteilen verbunden werden.

Witterungsschutz und Fassade

Das Demonstratorprojekt ist eine teilweise geschlossene Struktur, aber kein witterungsgeschütztes Gebäude. Daher wurde ein Konzept für den Witterungsschutz entwickelt, um den direkten Kontakt vor Regenwasser auf die BSPH-Bauteile zu verhindern und gleichzeitig eine angemessene Belüftung zu ermöglichen, so dass sich im Inneren der Struktur keine Feuchtigkeit in der Luft aufbauen kann. Auf den Außenflächen wurde im Werk eine dünne wasserdichte Membran angebracht, um das Eindringen von Wasser in die Struktur zu verhindern. Die Membran kann am Ende der Nutzung der Struktur leicht entfernt werden. Auf der Außenseite wurde eine dünne 15 mm dicke Holzfassade aus Lärchenholz an der Oberfläche jedes Bauteils angebracht. Die Fassadenpaneele wurden aus Lärchenholz hergestellt, da es für seine gute Beständigkeit gegen Witterungseinflüsse bekannt ist und oftmals an der Außenseite von Gebäuden verwendet wird. Um das Risiko der Rissbildung zu verringern, wurde die Fassade zunächst aus 100 mm dicken Brettern hergestellt. Hierfür wurde zuerst ein Brettschichtholzträger mit den Abmessungen 15,0 m x 1,2 m x 0,30 m (Länge x Höhe x Breite) hergestellt und mit einer Bandsäge so zugeschnitten, dass 15 mm dicke Platten mit nur 100 mm breiten Brettern und einer durchgehenden Oberfläche entlang der 15 m Länge entstanden. Jedes Fassadenteil wurde dann genester und 5-achsig CNC-gesteuert gesägt. Auch bei Lärchenholz wird ein Schutzanstrich vorgeschlagen, um Farbveränderungen und Rissbildung im Laufe der Zeit zu verhindern. Eine experimentelle Metalloxid-Oberflächenbehandlung (jetzt als Produkt UWood[®] erhältlich) wurde vom Industriepartner als Option vorgeschlagen, um die Lebensdauer der Lärchenholzfassade zu verlängern, ohne dass sie erneut aufgetragen werden muss, und um Verformungen in der Fassade zu verringern. Die Oberflächenbehandlung wirkt wie eine Sonnencreme für Holz, indem sie die Oberfläche des Holzes modifiziert. Die unsichtbare Behandlung schützt das Holz vor UV-Licht, das die Hauptursache für Verfärbungen im Laufe der Zeit ist. Für den Demonstrator wurde die Behandlung zum ersten Mal in großem Maßstab mit Lärchenholz und einer höheren Struktur mit mehreren Ausrichtungen und Krümmungen getestet, die die Belastung durch Regen und Wetter beeinflusst. Anstatt die Oberfläche des Holzes abzudunkeln, wurde die Farbe des Holzes im

Laufe der Zeit aufgehellt und nahm eine hellweiße Farbe an. Die Fassade ist der erste Einsatz von UVood® in Deutschland.



Abbildung 32. Lärchenholzfassade mit transparenter UVood® Oberflächenbehandlung. Die Farbe ist repräsentativ für den Zeitpunkt der Installation.



Abbildung 33. Lärchenholzfassade mit transparenter UV-Holz-Oberflächenbehandlung nach 9 Monaten Bewitterung. Die Bewitterung ist an den unteren Bereichen der Konstruktion sichtbar, wo die Oberfläche weniger stark vertikal wird (links).

Detail der Fassadenoberfläche, nachdem sie aufgehell und gebleicht wurde, wobei die Textur des Holzes noch sichtbar ist.

Auf der Spitze wird der Holzturm durch einen 12 mm dicken Stahlring geschützt, der für die Ausrichtung sorgt und die Ovalisierung der BSPH-Struktur verhindert. Dieser Stahlring schützt zudem das Hirnholz des BSPH vor Wasser, wo es am anfälligsten ist. Darüber befindet sich ein gekrümmtes Dach aus Polycarbonat, das durch Kaltbiegen von 12 mm dicken Platten in Verbindung mit einer vorgekrümmten Stahltragkonstruktion entsteht. Abstandshalter zwischen der Struktur und dem Dach ermöglichen es den Bauteilen, sich unabhängig voneinander zu bewegen und schaffen einen Belüftungsspalt, so dass Feuchtigkeit aus dem Innenraum entweichen kann. Das gewölbte Dach leitet das Wasser zu den Seitenflächen der Struktur ab und verhindert das Eindringen von Wasser in den Innenraum.



Abbildung 34. Transparente Dachkonstruktion und Ausrichtungsring aus Stahl

Verbindung zu den Fundamenten

Um eine Exposition mit Wasser zu verhindern, müssen Holzkonstruktionen auch vom Kontakt zum Erdreich getrennt werden, typischerweise in einem Abstand von 20 - 30 cm. Speziell angefertigte Anschlusskonsolen aus Stahl wurden entworfen, um die BSPH-Struktur mit dem Fundament zu verbinden. Obwohl diese Halterungen nur für das Demonstratorprojekt entworfen wurden und aufwändig in der Herstellung sind, stellen sie sicher, dass die Struktur nicht mit dem Erdreich in Berührung kommt und dass für den Fall, dass Wasser in die Struktur eindringt, eine ausreichende Belüftung und Drainage aus dem Inneren vorhanden ist. Die Geometrie der Konsolen ist in die Entwurfsumgebung der BSPH-Komponenten integriert, um die Montagevektoren der Komponenten zu berücksichtigen. Vor Ort werden die Komponenten direkt auf die vorinstallierten Halterungen abgesenkt und mit den vorgebohrten Löchern ausgerichtet. Im gleichen Zuge kann die Brettsperrholzkonstruktion nach Ablauf der Lebensdauer der Struktur wieder rückstandslos vom Fundament entfernt werden.

Prototypentwicklung und Tests von tragenden Bauteilen (AP3)

Herstellung von Prototypen aus gekrümmten BSPH-Komponenten

Während des gesamten Entwicklungsprozesses wurden Prototypen des selbstgeformten Brettsperholzes hergestellt. Zur Verifizierung der Belastbarkeit wurde eine Serie von Prototypen in Originalgröße von mechanischen Belastungsversuchen getestet. Bilayer für zwei BSPH-Platten der Größe 1,2 x 4,9 m wurden mit einem Zielradius von 2,3 m Radius hergestellt, um den genauen Herstellungsprozess für den Demonstrator zu testen. Die Beobachtung zeigte, dass die Herstellung der Bilayer eine sorgfältige Beobachtung erforderte, um die richtige Verteilung des Klebstoffs und den korrekten Ausgangswert des Holzfeuchtegehalts zu gewährleisten. Nach dem Trocknen hatten die Bilayer eine durchschnittliche Krümmung von 3,0 m Radius, wiesen kaum Risse oder Oberflächenprobleme, keine sichtbare Delaminierung und eine gleichmäßige Krümmung der Oberflächen auf. Der Unterschied zu der vorhergesagten Krümmung wurde auf eine Inkonsistenz bei der Verklebung zurückgeführt.

Bearbeitung und Verbindung von gekrümmten Bauteilen (revidiert)

Die Bearbeitung und Montage der Verbindungsdetails wurde digital getestet, um die Kosten und den Zeitaufwand für die Herstellung zu reduzieren. Ein vollständiges 3D-Volumenmodell der Verbindungsdetaillierung wurde zusammen mit einer Datenbank der relevanten Winkel und Längen für die Schrauben generiert. Das Volumenmodell wurde verwendet, um die Schrauben und Montagevektoren auf Kollisionen zu überprüfen, während die Datenbank dazu diente, bei jeder Überarbeitung der Geometrie zu überprüfen, ob alle Verbindungen den Planungsstandards entsprachen. Anhand des Volumenmodells wurden die Bearbeitungspfade mehrfach von den Forschern und dem Industriepartner auf Probleme überprüft und vor Beginn der Herstellung modifiziert. Die erste zu bearbeitende Komponente diente als Prototyp und wurde stichprobenartig durch Vermessung der Längen der vorgebohrten Löcher an den Rändern überprüft. Anhand dieser Modelle wurden eine Montagereihenfolge und ungefähre Vektoren festgelegt und den Industriepartner als Animationen zur Verfügung gestellt.

Statische Bewertung der Tragfähigkeit (überarbeitet)

Parallel zur Studie wurde von den wissenschaftlichen Partnern an der ETH/Empa eine separate Studie durchgeführt, um die mechanische Integrität des gekrümmten Brettsperholzes, welches durch Selbstformung hergestellt wurde, zu überprüfen. Wie bereits beschrieben, zeigten die Ergebnisse dieser Versuche, dass das Brettsperholz in seiner Tragfähigkeit mit BSPH aus Fichte vergleichbar ist, das in flachen Elementen hergestellt wird. Die Ergebnisse wurden mit Literaturwerten für BSPH aus Fichte kombiniert und zur Feinabstimmung des Tragwerksmodells verwendet. Basierend auf diesen Ergebnissen war eine zusätzliche statische Überprüfung durch mechanische Versuche nicht erforderlich. In ähnlicher Weise wurden die Anschlussdetails so entworfen und angepasst, dass sie mit den bestehenden Normen und Planungsrichtlinien übereinstimmen, so dass keine weiteren mechanischen Versuche erforderlich waren. Infolgedessen wurde besonders darauf geachtet, dass die digitale Modellierung jeder Verbindung innerhalb der festgelegten geometrischen Anforderungen liegt.

Wissenschaftliche Begleitung der Umsetzung des Demonstratorprojekts (AP 4)

Implementierungsansatz und Weiterbildung

Das Ziel der Versuche der Industrieimplementierung für das Demonstratorprojekt war es, die Nutzung der vorhandenen Maschinen und Methoden am Standort des Industriepartners zu maximieren und die spezialisierten Fachausbildungen zu minimieren. Nachdem das Konzept und die Methode auf der Grundlage von Erkenntnissen aus der Industrie (gemäß AP 2) angepasst worden waren, identifizierten die Projektpartner die spezifischen Aspekte der Feuchtigkeitskontrolle und des Zeitplans als einen

wesentlichen Punkt, den es während der Implementierung zu bewältigen galt. Vor Beginn der Produktion des Demonstrators wurde das gesamte Arbeitsteam vom Projektleiter bis zum Auszubildenden über die Bedeutung der Überwachung und Steuerung des Holzfeuchtegehalts (WMC) während des gesamten Produktionsprozesses informiert. Dieser Schritt war von entscheidender Bedeutung, da die Anweisungen zur Aufrechterhaltung eines hohen WMC während der Verarbeitung und Verklebung den Standardmethoden und -schulungen widersprechen. Ein offenes Gespräch zwischen den Wissenschaftlern und dem Produktionsteam wurde aufrechterhalten, um sicherzustellen, dass Fehler reduziert wurden, da die Produktion auf vielen Ebenen konventionelles Know-How durchkreuzte. Kleinere Bilayer Prüfkörper wurden ausschließlich vom Industriepartner auf der Grundlage der gemeinsamen Richtlinien hergestellt, um eventuelle Fehler zu identifizieren und dem Team zu demonstrieren, dass der Prozess in ihrem Kontext physisch funktionierte. Dieser Ansatz erwies sich für die Arbeiter als wertvoll, um die Durchführbarkeit des wissenschaftlich validierten Prozesses aus erster Hand zu sehen.

Wissenschaftliche Messungen und Materialwahl für die industrielle Herstellung

Wie beschrieben, stellen die Auswirkungen von Feuchtigkeit eine große Herausforderung für die Verwendung von Holz als Baumaterial dar. Dies gilt insbesondere für tragende Bauteile, die ihre Geometrie und Steifigkeit über viele Jahre hinweg beibehalten müssen. Ohne Verständnis und Kontrolle der Beziehung zwischen dem Holz und den Feuchtigkeitsänderungen aus der Umgebung können Teile nach kurzer Zeit beschädigt werden, wodurch die nachhaltigen Vorteile des Materials zunichtegemacht werden. Ebenso wichtig wie die digitale Planung ist die Messung und Sortierung des Materials, da es mit natürlicher Variabilität in Struktur und Feuchtegehalt vorkommt. Um die Wirksamkeit der selbstformenden Herstellung nachzuweisen, mussten die Funktionsfähigkeit und Dimensionsstabilität der Teile während der gesamten Produktion und Implementierung des Demonstrators überwacht werden. Auf der Grundlage der Parameter für jede Phase wurden zwei verschiedene Methoden angewandt, wobei der Holzfeuchtegehalt als primärer messbarer Materialparameter und die Krümmung als Maß für die Geometrie verwendet wurden.

Während der Herstellung wurde der Holzfeuchtegehalt (WMC) bei jedem Verarbeitungs- und Produktionsschritt gemessen und aufgezeichnet. Zunächst wurden die Bretter von der Produktionslinie des Sägewerks auf der Grundlage des WMC sortiert, um einen angestrebten WMC von 22 % zu gewährleisten. Basierend auf dem Input der Industriepartner wurde eine Variabilität von +/- 2 % vereinbart und eingehalten.

Der Industriepartner setzte ein WMC-Messgerät innerhalb der Produktionslinie ein, um dem Sortierpersonal geeignete Bretter mitzuteilen, die dann halbautomatisch aus der Linie sortiert, gestapelt und verpackt und 2-5 Tage vor der Bilayer-Produktion in der Produktionshalle gelagert wurden. Ein Bereich von +/-15 Grad von der radialen Jahresringorientierung wurde festgelegt, um konstante mechanische Eigenschaften des Holzes zu gewährleisten. Diese Beschränkung wurde manuell auf der Grundlage der visuellen Sortierung auf Basis aktueller Industriestandards für die Klassifizierung sortiert.

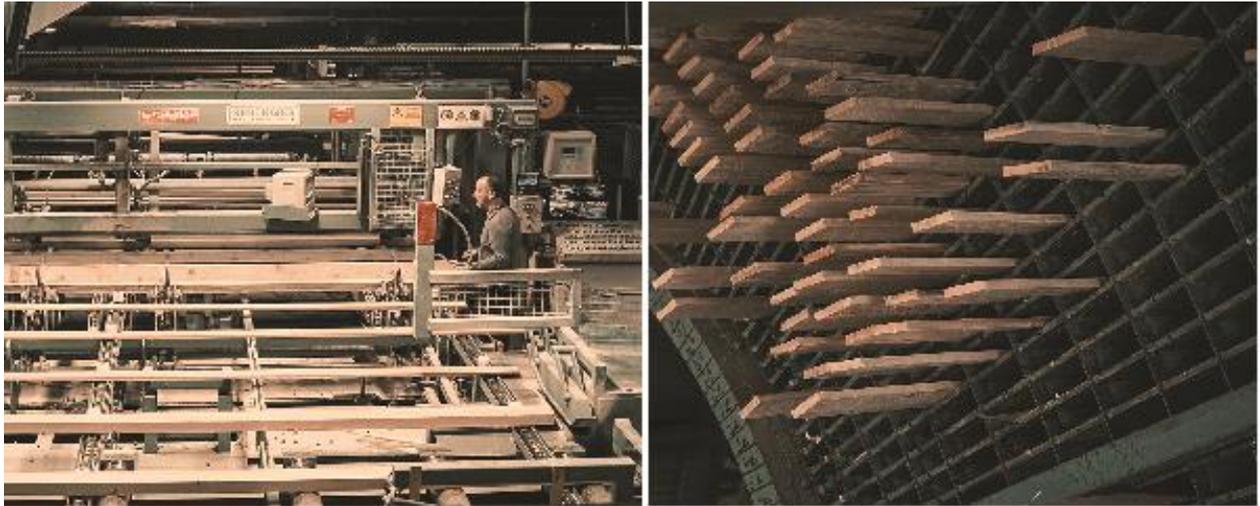


Abbildung 35. Halbautomatische Sortierung von Brettern. Visuelle Sortierung von Brettern mit Inline-Messung des WMC (links). Automatische Sortierung und Sammlung der Bretter im Sortierrad (rechts).

Im Anschluss an die Sortierung nahm das Forschungsteam WMC-Messungen an drei Stellen (20 cm von den Enden und in der Mitte) und zwei Tiefen (10 mm und 15 mm) in jeder Platte, die in den aktiven Bilayer-Teilen verwendet wird, unter Verwendung eines nicht-intrusiven Widerstandsfeuchtemessgeräts vor (TABELLE X). Vor dem Hobeln wurden Stichprobenmessungen in den Materialstapeln vorgenommen, dann wurde jede Platte der aktiven Schicht in der flachen Phase gemessen, bevor sie mit der passiven Schicht verklebt wurde. In diesem Stadium wird die Geometrie per Definition als flach mit null Krümmung betrachtet und durch beidseitiges Schleifen und Hobeln der fertigen Zweischichtplatte sichergestellt. Nach dem Trocknen werden die Bilayer aus den Gestellen entnommen und das Feuchtemessverfahren wiederholt, wobei die Krümmung zunächst durch manuelle Messung des Bogens und anschließend mit einem Laserscanner gemessen wird. Der Einfluss des Eigengewichts ist marginal und wurde durch Vergleichsmessungen der Krümmung in den tragenden Regalen und selbsttragend entlang einer einzigen Mittelachse überprüft. Die Ergebnisse des Laserscannens wurden analysiert, indem die Gaußsche Krümmung gemessen wurde, um zu prüfen, ob Bereiche mit antiklastischer Krümmung vorhanden sind, und indem Abschnitte an 10 Punkten entlang jeder Doppelschicht eingeschnitten wurden, um die Konsistenz der Krümmung in jedem Abschnitt und in der gesamten Platte zu messen.



Abbildung 36. Messung von Krümmung und des WMC in den Bilayern. 3D-Laserabtastung zur Überprüfung der Konsistenz der Krümmung in den größeren Platten (links). Manuelle Messung des endgültigen WMC-Werts pro Platte (rechts).

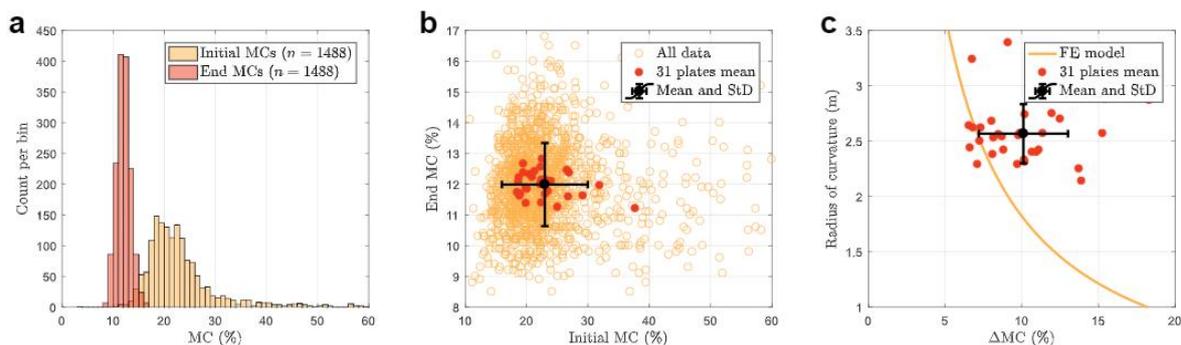


Abbildung 37. Überwachung der selbstformenden Herstellung. (a) Verteilung der WMC pro Bilyer-Initial (manuell sortierte Platten) gegenüber den WMC nach der technischen Kammertrocknung unter 70°C. (b) Integrierte Daten der Platten-WMC und die der 31 Bilyer. (mitte) WMC-Differenz aufgrund der Trocknung im Vergleich zum erreichten Krümmungsradius pro Bilyer. (unveröffentlichte Daten: ICD – Universität Stuttgart, Empa).

Die Ergebnisse der detaillierten Messungen zeigen Folgendes: Sogar in einem industriellen Kontext und bei der Produktion von Bilyer in größerem Maßstab kann die Gesamtkrümmung der Bilyer mit einer Genauigkeit von 10-15% beibehalten werden, was durch das Sortieren der Bilyer-Platten vor der Weiterverarbeitung zu Brettsperrholz weiter berücksichtigt werden kann. Basierend auf den Ergebnissen würde eine verstärkte Sortierung der Eingangsplatten die Genauigkeit noch weiter erhöhen. Der Holzfeuchtegehalt wird bereits in vielen Einrichtungen mit hoher Genauigkeit gemessen, obwohl er nicht zur sorgfältigen Sortierung der Bretter verwendet wird. Die prädikativen Modelle zeigen, dass speziell bei Fichtenholz die Jahrringorientierung einen großen Einfluss auf die Krümmung der Doppelschichten hat. Dieser Einfluss könnte kontrolliert und sogar als Vorteil genutzt werden, indem eine detailliertere automatische Sortierung der Bretter aus dem Sägewerk und/oder eine Inline-Röntgentomographie, die zum Industriestandard avanciert, integriert wird. Eine spezifische Sortierung der Bretter für eine Kombination aus Schwinden/Quellen und Materialstruktur würde die Verwendung einer breiteren Bandbreite von Bretttypen über die höherwertigen Holzsorten hinaus ermöglichen.

Insgesamt verifizieren die Messungen, dass eine konsistente Krümmung in jedem einzelnen Bilyer erreicht werden kann, trotz der Schwankungen in des Ausgangswert des WMC und den Faserorientierungen der Jahresringe. Die antiklastische Krümmung ist minimal und tritt nur geringfügig entlang der Kanten der Platten auf, die in einigen Fällen in einem abschließenden Verarbeitungsschritt entfernt werden müssen. Die gesammelten Daten können auch zur Information und Korrektur zukünftiger Materialmodelle und Sortierverfahren verwendet werden und sind der einzige bekannte Datensatz für großflächige selbstformende Bilyer.

Langzeitüberwachung von gekrümmtem Brettsperrholz (AP 5)

Das Langzeitverhalten des gekrümmten Brettsperrholzes unter realen Bedingungen ist die zweite große Herausforderung für das neue Herstellungsverfahren und den Gebäudedemonstrator. Es ist bekannt, dass bei großen Holzkonstruktionen tägliche und jahreszeitliche Änderungen der relativen Feuchte und der Strahlungswärme Veränderungen des WMC verursachen, die im Laufe der Zeit zu großflächigen geometrischen Veränderungen führen können (Häsler and Baumann 1931). Obwohl diese Verformungen oft ästhetisch ansprechend sind, verursachen Zwängungen und geben im allgemeinen Bedenken hinsichtlich der statischen Tragfähigkeit des Gebäudes. In vorliegenden Fallbeispiel wird das Brettsperrholz als tragendes Bauteil im Außenbereich mit einer nur auf der Außenfläche aufgetragenen Schutzfolie und Fassade verwendet. Das Brettsperrholz (der

Turmstruktur) ist an der Spitze und an der Außenseite vor direktem Kontakt mit Wasser geschützt, ist jedoch den Veränderungen der Luftfeuchtigkeit und dem Schlagregen auf der Innenseite ausgesetzt.

Messung der Holzfeuchte

Zur Erfassung des Holzfeuchtegehalts (WMC) der Bauteile wurde während der Vorfertigung ein widerstandsbasiertes Feuchteüberwachungssystem mit Elektrodenpaaren in die selbstgeformten BSPH-Komponenten eingebaut. Acht Sensoren wurden in zwei verschiedenen Höhen (ca. 4 m und ca. 10 m) auf gegenüberliegenden Seiten (Südost und Nordwest, Komponenten 3 und 9) des Turms in Tiefen von 20 mm und 50 mm von der Außenseite des Brettsperrholzes angebracht (Abbildung 37 - Lage der Sensoren). Dadurch wird der Erfassungsbereich der Elektroden in den 30 mm dicken Aktivschichtplatten platziert, in denen Feuchtigkeitsänderungen den größten Einfluss auf die Geometrie haben würden. Die Sensoren und Drähte wurden in das Brettsperrholz eingelassen und zum Schutz mit der Abdichtungsfolie und der Fassade abgedeckt. Die Messungen werden in einem Intervall von 15 Minuten auf einem lokalen Datenlogger aufgezeichnet, der die Daten wöchentlich an einen Online-Server überträgt. Dies ermöglicht eine autonome Aufzeichnung der Messungen über die nächsten 5-10 Jahre.



Abbildung 38. Installation eines WMC-Überwachungssystems. Sensorprüfung nach der Installation im Werk (oben). Fertige und CNC-detaillierte gekrümmte BSPH-Komponenten (links unten). Detaillierte Darstellung der Sensorelektroden in den BSPH-Komponenten (rechts unten).

Wetter- und Umgebungsmessung

Zusätzlich zum Holzfeuchtegehalt werden die Materialtemperatur, relative Feuchte und die Lufttemperatur aufgezeichnet, um die Bedingungen zu messen, denen die Holzstruktur im Laufe der Zeit ausgesetzt ist. Es sind drei Sensoren zur Messung der relativen Feuchte und der Temperatur auf der Außenseite in 10 m Höhe, auf der Innenseite in 10 m Höhe und in 1 m Höhe zwischen dem Inneren der Struktur und dem Fundament installiert.

Vermessung der Geometrie

Die Gesamtgeometrie der Struktur wird von den Projektpartnern des Instituts für Ingenieurgeodäsie der Universität Stuttgart iterativ alle 3 Monate gemessen. Mit einem 360-Grad-Laserscanner wird eine Punktwolke der Außenstruktur mit einer Genauigkeit von +/- 1 mm erfasst. Die untere Innenseite der Struktur wird ebenfalls mit ähnlicher Genauigkeit vermessen. Eine Reihe von Ortungspunkten wurde im Fundament und um den Standort herum installiert, um die Kalibrierung der Scans zwischen den Langzeit-Messintervallen zu gewährleisten. In diesem Bericht wurden die Scans zwischen November 2019 und März 2020 verglichen, einem Zeitraum, in dem sich die anfänglichen Verformungen der Konstruktion gelegt haben und in dem die Klimaveränderungen extrem sind.

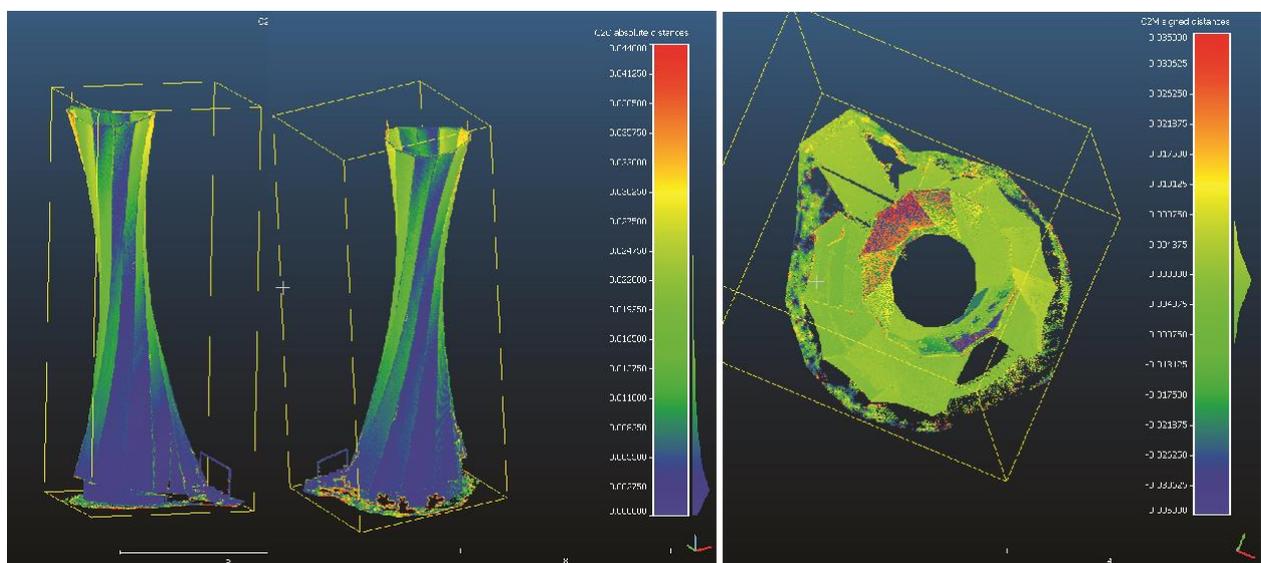


Abbildung 39. Erste Ergebnisse des 3D-Laserscans der fertigen Turmstruktur. Vergleich und Messung der absoluten Unterschiede zwischen den Scans der Außenseite zwischen September (Ende Sommer) 2019 und März 2020 (Ende Winter), die mehr Verformung in den Bauteilen über den Öffnungen und weniger Verformung in den selbstgeformten BSPH-Bauteilen (lins) zeigen. Versenkte Messungen der Verformungen in der Draufsicht aus dem gleichen Zeitraum zeigen eine leichte Ovalisierung der Turmspitze (rechts). (unveröffentlichte Daten: ICD / ITKE / IIGS – Universität Stuttgart)

Erste Ergebnisse und kontinuierliche Überwachung

Erste Ergebnisse der WMC-Messungen zeigen normale tägliche und jahreszeitliche Veränderungen des WMC für exponierte Holzkonstruktionen. Die Spitze des Turms stellt eine halb geschlossene Struktur dar, in der das Holz vor direkter Wassereinwirkung geschützt ist, aber zwischen Innen- und Außenumgebung vermitteln muss. Der untere Teil, in dem sich die Öffnungen befinden, stellt eine exponiertere Holzstruktur dar, bei der eine Seite vor Wasser geschützt ist, während die andere Seite der Umwelt ausgesetzt ist. Am wichtigsten ist, dass die Daten aus den ersten 10 Monaten der Messung für eine teilweise exponierte Holzkonstruktion vernünftige Bereiche der WMC-Veränderungen (zwischen 9 - 18 %) zeigen. Die Scans zeigen, dass nur kleine Verformungen an der Spitze des Turms auftreten, wo die WMC-Veränderungen am geringsten sind, was bedeuten könnte, dass die Verformung auf statische Belastungen und nicht auf feuchtigkeitsbedingte Bewegungen zurückzuführen ist.

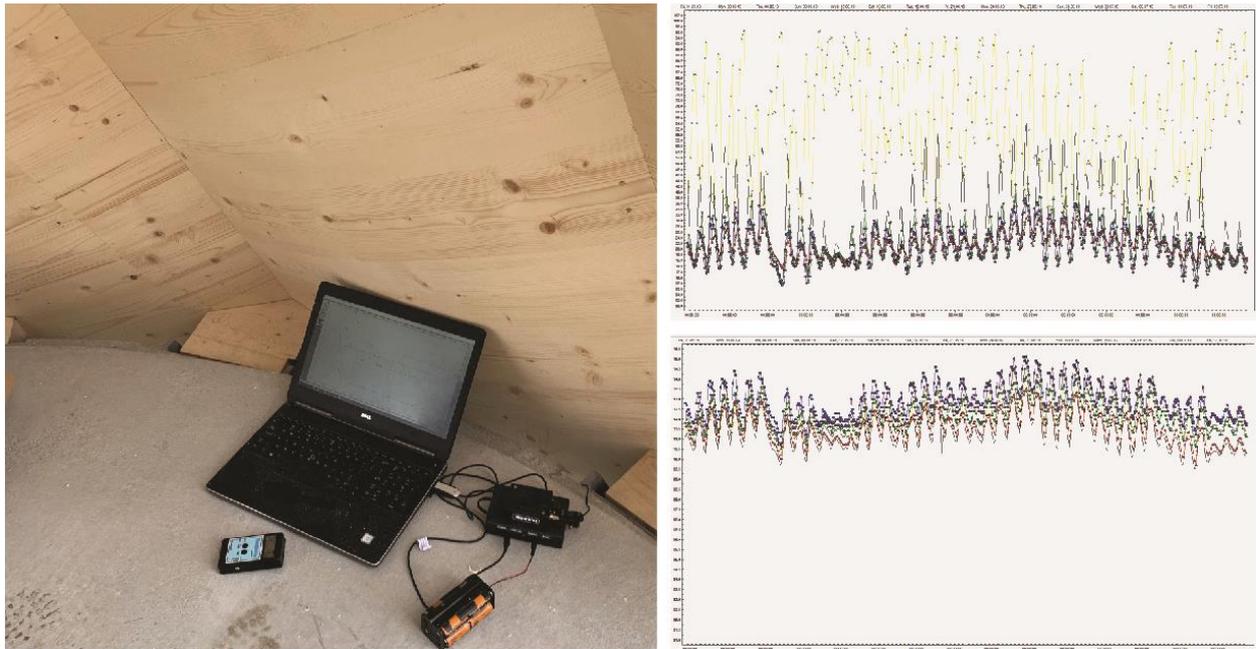


Abbildung 40. Datenerhebung und Stichprobe aus dem längerfristigen Monitoring. Kalibrierung der Sensoren nach der Montage (links). Beispieldaten, die die täglichen Schwankungen von relativer Luftfeuchte, Temperatur (rechts oben) und WMC (rechts unten) zeigen. (unveröffentlichte Daten: ICD / ITKE / IIGS – Universität Stuttgart)

Die Klimadaten zeigen, dass die äußeren Bedingungen täglich und jahreszeitlich in größeren Amplituden schwanken als das Innenklima. Im Inneren ist die Oberseite der Struktur besser geschützt und gleichzeitig gut belüftet, was dazu beiträgt, ein konstanteres Klima aufrechtzuerhalten. Sensoren im unteren Innenraum zeigen, dass die Struktur stärker exponiert ist, und spiegeln eine Verbindung zu den äußeren Bedingungen mit höheren Reichweiten und schnelleren Veränderungen der relativen Luftfeuchtigkeit wider.

Der auffälligste Trend im WMC stimmt mit den Klimadatentrends überein, der WMC, der im unteren Bereich des Turms in ca. 4 m Höhe gemessen wurde, verzeichnete im Laufe der Zeit höhere Werte (12-18% Bereich) als die Sensoren der oberen Ebene bei ca. 10 m (10-15% Bereich). Dies ist logisch, wenn man bedenkt, dass der untere Bereich der Struktur im Inneren Luft und Feuchtigkeit ausgesetzt ist, die sich durch den Turm bewegen, sowie Wasser, das in den Turm geblasen wird. Zwischen den beiden Tiefen zeigt sich im Laufe der Zeit eine etwas höhere Reichweite und ein höherer WMC-Wert in der äußeren Schicht des Brettsperrholzes, die im Vergleich zur inneren Schicht des Brettsperrholzes besser vor Witterungseinflüssen geschützt ist, als in der zweiten Schicht, die ohne direkten Witterungsschutz stärker dem Inneren des Turms ausgesetzt ist. In diesem Fall ist die exponiertere Schicht in der Lage, leichter zu lüften und sich an die äußeren Bedingungen anzupassen, während die geschützteren Schichten Feuchtigkeit oder Trockenheit mit der Zeit einschließen. Die Beziehung zwischen der Sonnenausrichtung der Sensoren lässt sich aus dem derzeitigen Aufbau nicht leicht bestimmen, da die Struktur gut vor Veränderungen durch direkte Sonneneinstrahlung geschützt ist. Es wäre eine zukünftige Studie mit mehr Sensoren erforderlich, die über weitere Ausrichtungen verteilt sind, um die Auswirkungen der Sonne jahreszeitlich und über viele Jahre hinweg zu bestimmen.

Vergleichbare 3D-Scans der Struktur zeigen normale Verformungsbereiche in einer Konstruktion dieser Größe. Der untere und mittlere Teil der Struktur zeigt wenig erkennbare Bewegungen, insbesondere an den Verbindungspunkten zum Fundament. Die größten Verformungen treten an der Oberseite der Struktur auf, wo die Struktur eine geringe Ovalisierung aufweist, wobei die SO- und NW-Seiten relativ statisch verbleiben und die SW- und NO-Seiten sich nach außen bewegen. Diese

Bewegung stimmt mit den in der Tragwerksmodellierung gezeigten Verformungen überein, da diese Bereiche durch die Öffnungen und die Gesamtausrichtung des Kragarms geschwächt werden. Insbesondere die Komponenten C 3, 4, 9, 10, die mit dem selbstformenden Herstellungsverfahren produziert werden, weisen im Vergleich zu den übrigen Komponenten deutlich geringere Verformungen auf. Wegen der komplexen Wechselwirkungen innerhalb der Struktur ist es schwierig zu bestimmen, ob dies strikt auf das Herstellungsverfahren oder auf die Lage der Komponenten in der Gesamtstruktur zurückzuführen ist. Es ist jedoch nachgewiesen, dass die selbstformende Herstellungsmethode nach 10 Monaten nicht zu einer übertriebenen Verformung geführt hat. Die komplexe Geometrie der Struktur schränkt die Sicht nach innen ein, so dass nur die Außenseite vollständig vermessen werden kann und Verformungen der Fassade losgelöst von der BSPH-Struktur nicht genau getrennt werden können.

Weitere Messungen der Struktur werden fortgesetzt. Für zukünftige Projekte würde eine Methode zur Messung von Spannung und Dehnung im Brettsperrholz unter Verwendung von Glasfaseroptikdrähten in Betracht gezogen, um ein detaillierteres Verständnis der Mechanik der Formänderung in einer gekrümmten und halb freiliegenden Holzstruktur zu erhalten.

Diskussion der Ergebnisse

Selbstformende Herstellung von gekrümmtem Brettsperrholz

Beurteilung und Vergleich zur mechanischen Umformung von Brettsperrholz

Es wurde ein Benchmarking durchgeführt, um das experimentelle selbstformende Herstellungsverfahren mit einem mechanischen Kaltbiegeverfahren zu vergleichen. Vier der zwölf Komponenten des Turms (3, 4, 9, 10) wurden aus der selbstformenden Methode hergestellt, während das Material für die restlichen 8 Komponenten von einem Hersteller für maßgefertigtes, formgekrümmtes Brettsperrholz bezogen wurde. Es ist zu beachten, dass die hohe Krümmung (2,30 m Radius) außerhalb des üblichen Herstellungsradius des Herstellers des mechanisch gekrümmten Brettsperrholzes lag. Daher musste eine kundenspezifische Lösung gefunden werden. Der Hersteller erklärte sich damit einverstanden, das Material in einer geeigneten Konfiguration mit einer maximalen Plattengröße von 4 m x 2 m mit der Krümmung in Längsrichtung zu produzieren. Wegen des engen Radius wurde der bevorzugte Aufbau mit 9 Lagen von 10 mm mit alternierend, senkrecht angeordneter Faserrichtungen gewählt. Im direkten Vergleich kann mit dem selbstformenden Herstellungsverfahren für die gleiche Krümmung ein Brettsperrholz mit nur 5 Lagen in einer 10-30-10-30-10-Konfiguration hergestellt werden.

Im Vergleich dazu war die Gesamtqualität und Genauigkeit der mechanisch geformten Teile erheblich geringer. Dies wird nicht als Ausdruck der Sorgfalt in der Produktion, sondern als Reflexion über die Schwierigkeiten des Umformprozesses beim Einsatz brachialer mechanischer Kraft bei stark gekrümmten Geometrien festgehalten. Die Gesamtkrümmung der Platten war sichtlich ungleichmäßig und zeigte über die gesamte Platte hinweg 10-20 cm lange, flache Bereiche. Infolgedessen waren die Ober- und Unterseiten unterschiedlich dick, was Korrekturmaßnahmen zur Verbindung der Platten erforderte. Daraus ergaben sich weitere Probleme bei der Sicherstellung der Genauigkeit der CNC-Bearbeitung, da die Bauteile nach dem Zuschnitt zur elastischen Rückstellung neigten. Die Fehler werden auf die Variabilität der Rückstellung während des Biegens und die allgemeine Schwierigkeit zurückgeführt, große mehrschichtige BSPH-Platten zu einer hohen Krümmung zu formen, selbst wenn die einzelnen Schichtdicken bis an die untere Grenze der Herstellung von Brettsperrholzplatten reduziert werden.

Im Vergleich dazu zeigten die selbstgeformten BSPH-Bauteile nach dem Verkleben wenig bis gar keinen Rückstelleffekt, da die Schichten primär vorgeformt waren. Dies ist ein bemerkenswertes

Merkmal, weil dadurch der Aufwand für die spanende Bearbeitung und Nachbearbeitung, der bei der Herstellung von Brettsperrholz oder Trägern durch Kaltbiegeumformung oft als Korrekturmaßnahme erforderlich ist, drastisch reduziert wird. Wie das Benchmarking der beiden Herstellungsverfahren zeigte, muss trotz bekannter Berechnungen für die Rückstellung jede kundenspezifische Krümmung in der Regel 10-15 mm größer als die endgültige Form gebaut und die Oberflächen in einem zusätzlichen Schritt korrigiert werden. Aufgrund des kundenspezifischen Charakters beider Herstellungsmethoden können die Kosten in diesem Stadium nicht direkt verglichen werden.

Der anfängliche Benchmarking und die Herstellung des Demonstrators führen zu einer Reihe von Vorteilen des selbstformenden Herstellungsverfahrens, wenn es auf die Großproduktion in einem industriellen Kontext angewandt wird:

- Brettsperrholz mit höherer Krümmung kann über den Bereich der aktuellen Herstellung von Brettsperrholz hinaus erreicht werden
- Brettsperrholz mit hoher Krümmung kann mit einer geringeren Anzahl dickerer Schichten hergestellt werden
- Das Verfahren ist vom Konzept her an andere gebräuchliche Holzarten sowohl bei Nadel- als auch bei Laubholz anpassbar
- Die Herstellung von gekrümmtem Brettsperrholz erfordert deutlich weniger gekrümmte Schalung
- Die Produktion ist flexibel und kann an verschiedene Krümmungen angepasst werden, ohne dass die Schalung erneuert werden muss.
- Die Produktion ist flexibel und kann an verschiedene Längen und Breiten angepasst werden.
- Es gibt eine Reduzierung der Rückstellkräfte.
- Aufgrund der erhöhten Fertigungsgenauigkeit sind weniger Oberflächen- und Korrekturbearbeitungen erforderlich.
- Die Herstellung kann direkt im Sägewerk / Trockenkammer erfolgen und erfordert keinen Transport an zusätzliche Standorte oder spezielle Formmaschinen

Ökologisch gesehen weisen diese Punkte eine Reihe von Vorteilen auf. Erstens gibt es erhebliche Materialeinsparungen bei der Produktion, da weniger Bretter zugeschnitten werden müssen und weniger Schalung benötigt wird, da die Krümmung durch die Schwindkräfte innerhalb des Materials angetrieben wird. Obwohl einige gekrümmte Führungsschienen noch erforderlich waren, ist ein Vollnegativ aus Holz oder anderen Materialien nicht erforderlich. Zweitens gibt es trotz der komplexen Geometrie Vereinfachungen bei den Verarbeitungsschritten. Die gekrümmten Teile werden im Sägewerk selbst hergestellt und nicht an einem separaten Standort, der auf das Formen von Komponenten spezialisiert ist. Die inhärente Natur des Umformprozesses kann durch sorgfältiges Sortieren und Erfassen des Holzbestandes erreicht werden und nicht durch die Herstellung mit massiver und schwerer Umformgeräten.

Der Selbstformungsprozess hat jedoch auch Nachteile. Obwohl er vorhersehbar ist, hängt die Genauigkeit der Vorhersage von der Charakterisierung und Sortierung des Eingangsmaterials ab. Fehler bei der Sortierung können zu fehlerhaft geformten Bauteilen führen, die durch Formbiegen korrigiert werden müssen. Die Selbstverformung ist darauf angewiesen, dass der Trocknungsprozess in der Trockenkammer rechtzeitig erreicht wird. Auch wenn dies energieintensiv ist, wird die Verformung und technische Trocknung gleichzeitig durchgeführt, ohne die Effizienz der Trocknung zu beeinträchtigen. Die größte Herausforderung für den Prozess in der Zukunft besteht darin, dass die Feuchtigkeit und der Zeitpunkt zwischen der Sortierung und der Bilayer-Produktion sorgfältig kontrolliert werden müssen. Dies ist erreichbar für Sägewerke, die sich in der Nähe von Brettsperrholz- oder größeren Holzproduktionsstätten befinden, aber problematisch für Situationen, in denen die

Produktionsschritte an getrennten Standorten und in getrennten Unternehmen durchgeführt werden. Eine Lösung dieses Problems bestünde darin, den Prozess so anzupassen, dass Bretter verwendet werden, die am oder knapp über dem Fasersättigungspunkt liegen. Da das Schwinden und Quellen durch zusätzliche Feuchtigkeit oberhalb dieses Punktes nicht beeinträchtigt wird, würde der Bereich der akzeptablen Ausgangs-WMC erweitert. Dies würde zusätzliche Schwierigkeiten bei der Verleimung mit sich bringen, jedoch könnten die anderen Parameter angepasst werden, um einen ähnlichen Krümmungsbereich zu erreichen.

Digitale Planung und Produktion für Strukturen aus stark gekrümmtem Brettsperrholz
Unter Verwendung einer integrativen digitalen Entwurfs- und Planungsansatzes zeigt das Forschungsprojekt, wie Entwurf, Ingenieurwesen, Materialwissenschaft und Fertigung kombiniert werden können, um die Herstellung effizienterer Gebäudestrukturen zu ermöglichen. Speziell für den nachhaltigen Werkstoff Holz wird eine neuartige flächenaktive zylindrische Schalentypologie definiert.

Die digitale Planung und Konstruktion ermöglicht die genaue Definition der Gestaltung des Holzmaterials des gekrümmten Brettsperrholzes und die Verbindung von gekrümmten Standardplatten zur Herstellung größerer Bauteile. Die Parametrisierung des Modells und die Erstellung einer halbautomatischen Schleife zwischen dem geometrischen Modell und der statischen Analyse minimiert die Auswirkungen von Änderungen und reduziert die zusätzliche geometrische Komplexität, die mit der Arbeit mit gekrümmten Bauteilen verbunden ist.

Am Beispiel der Konstruktion des Demonstratorprojekts wird gezeigt, dass die hohe Krümmung der einzelnen Komponenten durch die Erzeugung eines wellenartigen Effekts zur statischen Leistungsfähigkeit beiträgt. Die Gesamtstruktur ist jedoch doppelt gekrümmt und gewinnt viele der Vorteile einer flächenaktiven Schalenstruktur in ihrer Kontinuität. Dies führt zu einer insgesamt dünneren und leichteren Struktur mit einem hohen Schlankheitsverhältnis. Unter Verwendung des Konzepts von flächenaktiven Strukturen dient die Holzkonstruktion als primäre tragende Struktur. Verstärkungen mit anderen Materialien wie z.B. Stahl werden auf einen leichten Ring am oberen Ende der Struktur und Konsolen am unteren Ende minimiert, um eine Verbindung mit dem Fundament herzustellen und das Holz vor Wassereinwirkung zu schützen.

Darüber hinaus trägt die Krümmung der einzelnen Teile tatsächlich dazu bei, einen stärkeren Winkel zu schaffen, in dem die Komponenten miteinander verbunden werden können. Die Verbindung zwischen den Komponenten wird durch ein anpassungsfähiges Verbindungsdetail aus kreuzweise angeordneten Vollgewindeschrauben dargestellt, das sich auf den komplex gekrümmten Verbindungsflächen einfach herstellen und installieren lässt. Das Detail erfordert keine subtraktiven Fräsungen oder überlappende Bereiche, was die Herstellung zeiteffizient macht und die Komplexität der Montage in den letzten Schritten reduziert. Gleichzeitig bedeutet die Einfachheit des Details, dass es entlang der Verbindungsnahte in variablen Abständen verteilt werden kann, um auf die verschiedenen Kraftgrößen innerhalb der Struktur reagieren zu können. Zudem ist es in der endgültigen Konstruktion fast vollständig verborgen und reversibel. Diese Verbindungsstrategie lässt sich auf ähnliche Arten von Konstruktionen mit unterschiedlichen Schraubenlängen und Einführungswinkeln anwenden.

Die Vorteile der digitalen Planung werden wie folgt zusammengefasst:

- BSPH-Komponenten mit hoher Krümmung können zur Herstellung einer neuen Art von leichten, materialeffizienten flächenaktiven Holzstrukturen verwendet werden
- Die Krümmung trägt zur Reduzierung der erforderlichen Materialstärke und der Verbindungsstrategie bei

- Die gekrümmten BSPH-Komponenten können statisch so modelliert werden, dass ihr innerer Aufbau und ihre Verbindungen berücksichtigt werden, um die Beziehung zwischen dem BSPH und der Gesamttragfähigkeit der Struktur besser zu verstehen
- Komplizierte gekrümmte Anschlussverbindungen können mit Hilfe eines parametrisch anpassbaren Verbindungsdetails aus Kreuzschrauben gelöst werden
- Die digitale Planung und die vorgefertigte digitale Fertigung beschleunigen die Montage vor Ort und reduzieren die gesamte Umweltbelastung vor Ort
- Der digitale Planungsprozess ermöglicht neue architektonische und industrielle Anwendungen von gekrümmtem Brettsperrholz in Dach- und Wandkonstruktionen sowie in architektonischen Bereichen, in denen weniger nachhaltige Optionen ersetzt werden können

Aus ökologischer Sicht zeigt die Planungsmethode einen effizienten Weg auf, mit einem bereits nachhaltigen Material zu bauen. Noch wichtiger ist, dass die Studie eine neue, einzigartige Anwendung für Holzmaterialien in statisch leistungsfähigen Bauformen aufzeigt, die normalerweise mit weniger nachhaltigen Materialien wie Stahlbeton hergestellt würden. Die Anwendungen von gekrümmten BSPH-Strukturen reichen von Spezialgebäuden mit komplexen und differenzierten Teilen bis hin zur standardisierten Herstellung von Teilen für den Industriebau. Besonders vielversprechend ist der potentielle Einsatz in leichten Dachstrukturen mittlerer Spannweite und tragenden und aussteifenden Wänden in mehrgeschossigen Gebäuden. Bei beiden Anwendungen profitieren die Konstruktionen und die Architektur von der Gesamtkrümmung der Teile, wobei die Hauptfaserrichtungen des Holzes für die Lastfälle gut ausgelegt sind.

Während das Holzkonstruktionssystem gut geplant und ausgeführt ist, stellt die Schnittstelle zwischen dem komplex gekrümmten Brettsperrholzbauteilen und anderen Bausystemen wie dem Fundament immer noch ein Problem dar. Hier ist ein enormes Maß an geometrischem Mehraufwand und komplexen Verbindungselementen erforderlich, damit die Kräfte richtig übertragen werden und die Holzkonstruktion geschützt wird. Wie für alle größeren tragenden Holzkonstruktionen stellt auch Feuer eine kritische Einschränkung dar und erfordert oft eine erhöhte Dicke der BSPH-Komponenten, um das Holz konstruktiv zu schützen, wodurch die gewonnene geometrische Effizienz zunichte gemacht wird. Eine Lösung könnte darin bestehen, den Bauteilen Schutzschichten hinzuzufügen, nachdem das selbstformende Brettsperrholz hergestellt wurde. Auf diese Weise wird die schwer zu erreichende Krümmung zuerst erzeugt und kann als integrierte Schalung für die weitere Aufbringung von Schichten mit unterschiedlichen Funktionen wie Brand- oder Feuchteschutz dienen.

Der Turm Urbach - ein Demonstrationsprojekt für hochleistungsfähige Holzarchitektur
 Der Urbachturm ist die erste vollständige Anwendung der beschriebenen Herstellungsverfahren und digitalen Planungsmethoden. Der Turm wurde als Bezugspunkt und Zielort konzipiert, der Wanderern und Anwohnern als Schutz und Aussichtspunkt dient. Die primäre Tragstruktur und Hülle besteht aus 12 gekrümmten Bauteilen, die aus selbstformendem, stark gekrümmtem Brettsperrholz aus Fichte mit einem Radius von 2,30 m zugeschnitten wurden. Nach der Herstellung wurden die vormontierten Baugruppen mit zwei Lastwagen zur abgelegenen Baustelle transportiert, wo sie an einem einzigen Arbeitstag mit minimalem Gerüstbau platziert und montiert wurden. Nach seiner Lebensdauer ist der Turm so konzipiert, dass er in seine Einzelteile zerlegt und von der Baustelle entfernt oder nach der geplanten Lebensdauer an einen neuen Standort verlegt werden kann. Wenn eine erneute Montage oder ein neuer Standort nicht möglich ist, kann die BSPH-Struktur weiter in kleinere Ausstellungsstücke für die Innenausstellung oder im letzten Fall das Material weiter diskretisiert und zur Energiegewinnung verbrannt werden.

Tabelle 1.: Technische Informationen zum Architektur-Demonstrator „Urbach Turm“

Turmhöhe	14 m
Turmdurchmesser	4,9 m bis 1,8 m bis 3,1 m
Bauteildicke	9 cm
Krümmungsradius des Brettspertholzes	2,4 m
Volumen von Bauholz	9,54 m ³
Turmfläche	106 m ²
Gesamtgewicht der Turmstruktur	4000 kg
Länge aller Verbindungsfugen	157 m
Anzahl an Kreuzschraubenpaare	520
CNC-Bearbeitungszeit	90 min/Bauteil
Montagezeit vor Ort	8 h

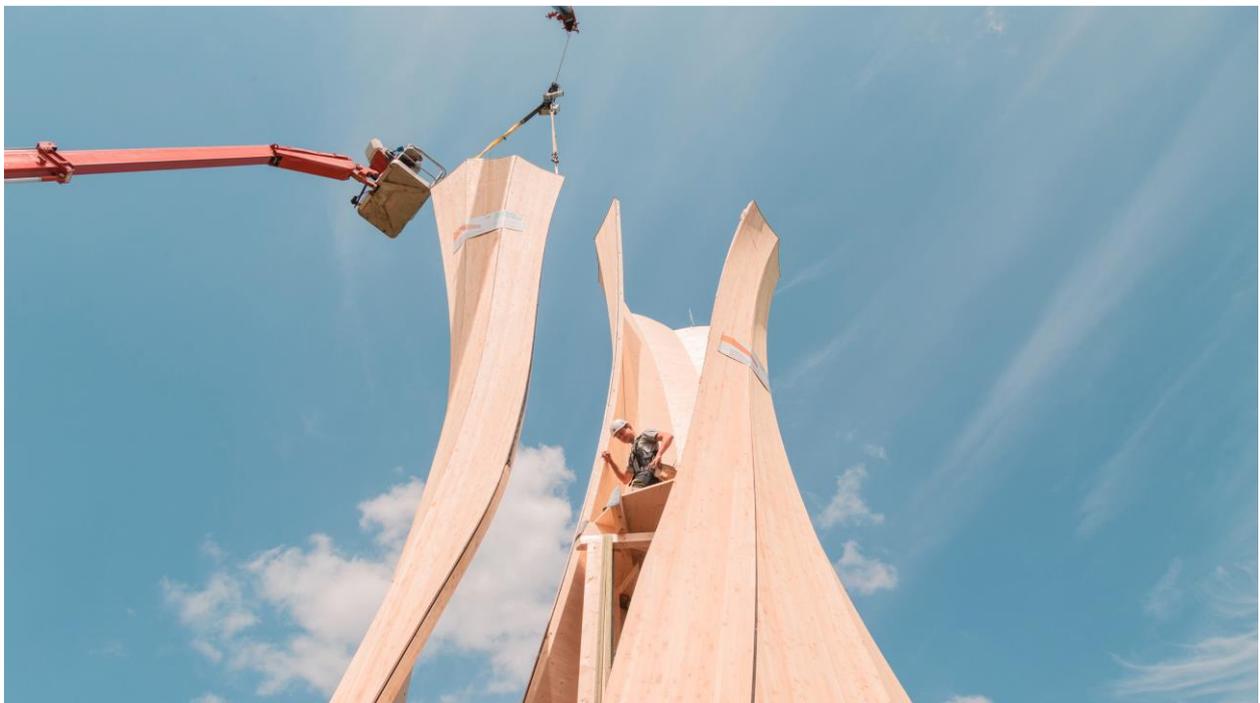


Abbildung 41. Montage der gekrümmten Turmkomponenten zur dünnen, flächenaktiven Schalenstruktur.



Abbildung 42. Der Urbach Turm: Eine 14 m hohe, leichte Turmstruktur aus gekrümmtem, selbstgeformtem Brettsper Holz.

In Übereinstimmung mit den Projektzielen sollte der Demonstrator nicht nur seine Leistungsfähigkeit und Effizienz unter Beweis stellen, sondern auch einen eindrucksvollen Ausdruck seines Materials und seiner Nachhaltigkeit schaffen, der den Weg für die Zukunft des Bauens ebnet. Auf diese Weise sollte die architektonische Erfahrung durch die nachhaltigen Merkmale verstärkt und nicht eingeschränkt werden. Der Turm Urbach bietet ein neuartiges Raum- und Materialerlebnis, das von einer Holzbauweise, die typischerweise quadratisch und kastenförmig ist oder aus dicken Balken besteht, nicht erwartet wird. Hier zeigt sich die sichtbare Schlankheit der Brettsper Holzstruktur, die trotz der wagemutigen Auskrägung des Bauwerks einen filigranen und leichten Ansatz widerspiegelt. Sowohl die weithin sichtbare Gesamtform der Struktur als auch die lokale Krümmung aus einer näheren Perspektive entziehen sich Geometrien, die mit formbaren Materialien wie Stahlbeton, Metall oder GFK hergestellt wurden. Die örtlich konkaven Flächen auf der Außenseite erzeugen scharfe vertikale Linien, die durch den Schatten hervorgehoben werden und das Bauwerk von der Landschaft abheben. Auf der Innenseite ist die Krümmung der Oberfläche invertiert, so dass sie lokal konvex ist, was ein weiches und für Tragwerke aus Holz ein ungewohntes visuelles und haptisches Erlebnis erzeugt. Im Gegensatz zum ikonischen Ausdruck des Äußeren schafft das Innere einen Ort der Ruhe und des inneren Aufbruchs. Die Oberflächen leiten den Blick der Besucher zunächst nach oben und rahmen den Blick in den Himmel ein und isolieren sie von der Umgebung. Weiter umschließen die Öffnungen den Blick aus dem Turm heraus auf die Gemeinde Urbach und gestalten so die umliegenden

Naturlandschaften. Bei dieser Perspektive wird die Wahrnehmung der natürlichen Umgebung verstärkt, da der Betrachter durch die vorhangartigen Öffnungen des Turms eingeschlossen wird.

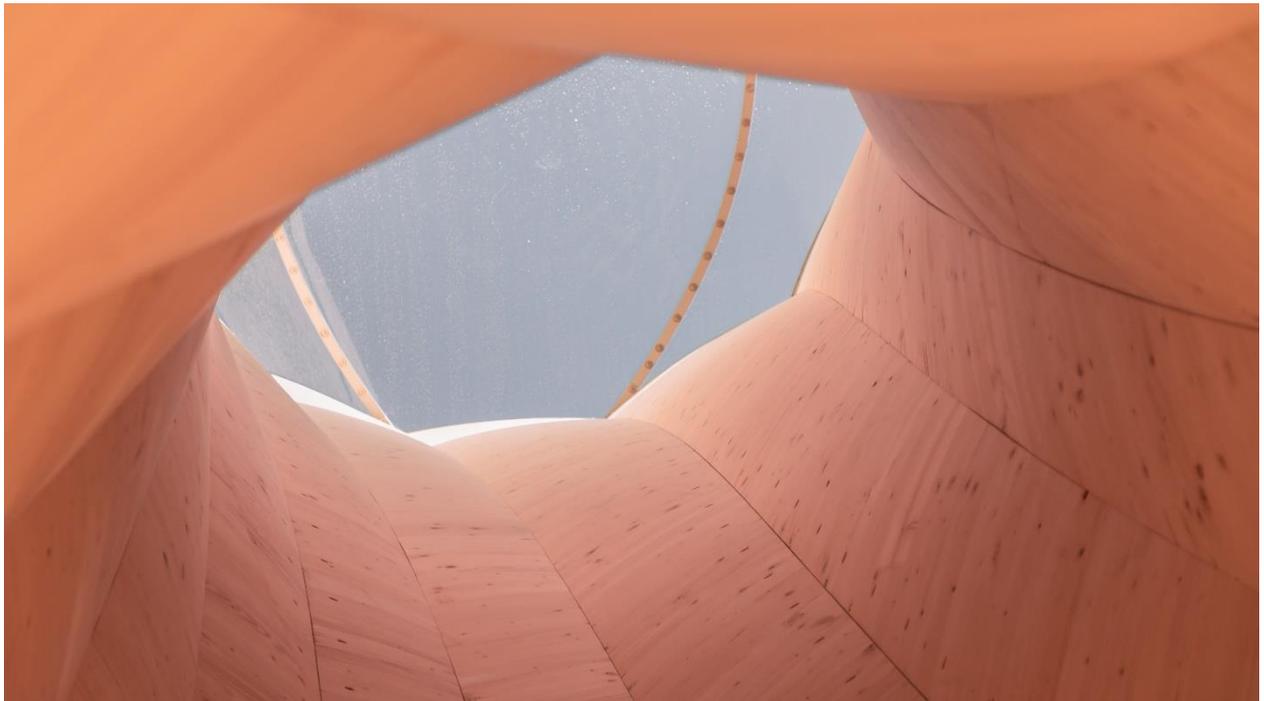


Abbildung 43. Innenraum des Turm Urbach mit weichen konvexen Oberflächen.



Abbildung 44. Außenansicht des Turm Urbach mit klaren Konturlinien und konkaven Flächen.

Ein visueller Ausdruck der verwendeten natürlichen Holzmaterialien war wichtig, um sicherzustellen, dass die Öffentlichkeit die Relevanz der Arbeit versteht. Auf der Außenseite wurde (wie zuvor technisch beschrieben) eine Holzfassade gewählt, bei der die Textur des Holzes noch sichtbar ist. Die Oberflächenbehandlung des Holzes wurde gewählt, um das Material zum Ausdruck zu bringen und gleichzeitig die übliche Verfärbung und Wartung zu eliminieren, die für die Konservierung von

exponiertem Holz erforderlich sind. Sie führt dazu, dass die Außenseite der Struktur nach nur 3 bis 4 Wochen im Außenbereich eine leicht weißliche Verfärbung aufweist. Während des ersten Jahres des Projekts haben die oberen 40 % der Fassade wie geplant funktioniert und ihre weiße Farbe beibehalten, während die unteren 30-40%, die einer stärkeren Neigung zu Niederschlägen ausgesetzt sind, sich leicht zu einem hellen Grau verfärbt haben, das häufig in exponiertem Lärchenholz vorkommt. Zwischen den beiden Bereichen hat sich die Farbe vermischt, und trotz der Verfärbung fügt sich die Konstruktion gut in die umgebende Landschaft ein. Auf der Innenseite ist die Oberfläche nur mit einer transparenten Graffitienschutzbeschichtung behandelt und behält die natürliche hellgelbe Farbe des Fichtenholzes bei. Technische Details des Turms sind sorgfältig so integriert, dass sie für den Bewohner unsichtbar bleiben und die Struktur über den Fundamenten und der Landschaft zu schweben scheint.



Abbildung 45. Der Turm Urbach in der natürlichen Landschaft. (Foto: Rolland Halbe)

Abweichungen vom Projektantrag

AP 3 wurde auf der Grundlage der Versuchsergebnisse der assoziierten wissenschaftlichen Partner überarbeitet. Daher waren mechanische Versuche nicht erforderlich. Stattdessen wurden diese Aspekte von AP3 in den initialen digitalen Planungsmethoden von AP1 in der zweiten Hälfte des Projekts neu untersucht, um das Verständnis der Beziehung zwischen statischer Leistungsfähigkeit, Material, Geometrie und konstruktive Anwendung zu erweitern. Diese weitere Untersuchung ist der erste Schritt zur Erweiterung der Methodik und Verfahren über das gegenwärtige Projekt hinaus.

Präsentation der Umsetzung der Projektergebnisse

Gebäudedemonstrator

Der Turm Urbach dient der greifbaren physikalischen Umsetzung der Projektergebnisse. Der Turm wurde im Rahmen der Remstal Gartenschau 2019 errichtet, die 16 einzigartige Bauwerke entlang des Remstals umfasst. Das Bauwerk dient als sichtbares Wahrzeichen für die Gemeinde Urbach und als nachhaltiges Beispiel für innovativen und nachhaltigen Holzbau. Nach der Fertigstellung der Gartenschau im Oktober 2019 ist geplant, dass das Bauwerk 5-10 Jahre am Standort verbleibt. Das Bauwerk ist für die Öffentlichkeit jederzeit offen und zugänglich. Es ist von der Regionalbahn und der Bundesstraße B29 sichtbar, aber nur zu Fuß oder mit dem Fahrrad direkt erreichbar und zieht die Menschen in die Natur. Bei gutem Wetter, an Wochenenden und Feiertagen ist der Turm zu einem beliebten regionalen Ausflugsziel im Freien geworden. Für Einheimische ist er ein beliebter täglicher Ruhe- und Aussichtspunkt für Besucher aller Altersgruppen. Unter den vielen baulichen Exponaten in der regionalen Landschaft stellt der Turm Urbach eine einzigartig nachhaltige und zugleich futuristische Vision des Bauens dar.

Um das Projekt digital bekannt zu machen, hat das Forschungsteam bei der Förderung des Turm Urbach geholfen, indem es die Seiten auf Wikipedia und Google Maps erstellte und pflegte sowie Routen in beliebten Outdoor-, Freizeit- und Sportapps wie Komoot und Strava erstellte. Trotz der ländlichen Umgebung ist der Turm leicht zu lokalisieren und zu besuchen.



Abbildung 46. Die Besucher kommen mit dem Fahrrad und zu Fuß zum Turm Urbach. (Foto: Rolland Halbe)

Das Demonstratorprojekt und die zugrundeliegende Forschung wurden wissenschaftlich publiziert und international in den Bereichen Hoch- und Tiefbau, Ingenieurwesen und Architektur sowie vor einem breiten Publikum präsentiert. Eine Zusammenfassung dieser Arbeiten ist unten aufgeführt:

Begutachtete Publikationen

Wood, D., Grönquist, P., Bechert, S., Aldinger, L., Riggenbach, D., Lehmann K., Rüggeberg, M., Burgert, I., Knippers, J., Menges, A.:2020. From Machine Control to Material Programming - Self-Shaping Timber Manufacturing of a High Performance Curved CLT Structure - Urbach Tower, in FABRICATE 2020 Making Resilient Architecture. pp. 50-57. (ISBN: 978178735811)

Aldinger, L., Bechert, S., Wood, D., Knippers, J., Menges, A.: 2020, Design and Structural Modelling of Surface-Active Timber Structures Made from Curved CLT – Urbach Tower, Remstal Gartenschau 2019, in Gengnagel, C., Baverel, O., Burry, J., Ramsgaard Thomsen, M., Weinzierl, S. (Eds.), Impact: Design with All Senses, Springer International Publishing, Cham, pp. 419-432. (doi: 10.1007/978-3-030-29829-6)

Grönquist, P., Wood, D., Hassani, M., Wittel, F., Menges, A., Rüggeberg, M.: 2019, Analysis of hygroscopic self-shaping wood at large scale for curved mass timber structures, *Science Advances*, Vol. 5 No. 9, pp. eaax1311. (doi:10.1126/sciadv.aax1311)

In Bearbeitung:

Wood, D., Grönquist, P., Rüggeberg, M, Menges, A.: Self-shaping manufacturing of high curvature CLT- A case study in material programming for sustainable construction. (submission June 2020)

Bechert, S., Wood, Aldinger, L, D., Knippers, J., Menges, A.: Geometry and Connection – structural design for a unique surface active curved CLT structure: World Conference of Timber Engineering (Extended abstract submitted, notification June 2020)

Präsentationen des Projekts

Programming Elegance, exposing new functions from age old construction materials, D. Wood, S. Bechert, Lecture, TEDX Stuttgart, Stuttgart Germany, September 12, 2020 (geplant).

Programming Elegance, Intersections of Materials design and Robotics, D. Wood, Lecture, Design for Manufacture, Barlett School of Architecture, University College London, June 16, 2020 (geplant)

From Machine Control to Material Programming: D. Wood, Lecture, FABRICATE 2020, University College London, London UK, October, 2020 (geplant).

Design and Structural Modelling of Surface-Active Timber Structures: S. Bechert, L. Aldinger, Lecture, International Association of Shell and Spatial Structures, Barcelona, Spain, October 9, 2020.

Design and Structural Modelling of Surface-Active Timber Structures: L. Aldinger, S. Bechert, D. Wood, Lecture, Design Modeling Symposium 2019, Berlin Germany, September 24, 2019.

Integrative Computational Design and Construction: A. Menges, Lecture, Klimahouse, Bozen Italy, January 23, 2020

Creating New Architecture Through Research: J. Knippers, Lecture, The International Research & Design Forum -Illinois Institute of Technology - Crown Hall - September 6, 2019.

Integrales Entwerfen und Bauen: J. Knippers, Lecture, Mittwochabend-Vorträge im Wintersemester 2019/20, TU Darmstadt January 15, 2020.

Material Programming for Sustainable Construction Futures: D. Wood, Presentation, DFG Young Researchers Futures Workshop, Bonn + Berlin, October, 2019

From Machine Control to Material Programming: D. Wood, Lecture, Forster + Partners, London, UK August 5, 2019, London, UK.

From Machine Control to Material Programming: D. Wood, Lecture, Design for Manufacture, Barlett School of Architecture, University College London, June 20, 2019.

Form Machine Control to Material Programming – Urbach Tower: D. Wood, Lecture, Engineering Club, London UK, June 18, 2020.

Architektur digital querdenken: A. Menges, Lecture, BDA Bund Deutscher Architekten, Frankfurt, Germany, November 18, 2019

Rethinking Architecture: Interrelations between Biology and Building: A. Menges, Lecture, Norman Foster Foundation Workshop 2019, Madrid, Spain, November 6, 2019.

Keynote: International Symposium on Conceptual Design of Structures: A. Menges, Lecture, International Symposium on Conceptual Design of Structures, Madrid, Spain, September 27, 2019.

Keynote: ECI Conference on Nature-Inspired Engineering: ECI Conference on Nature-Inspired Engineering, Cetraro, Italy, September, 9 2019.

Entwerfen und Bauen: digital anders denken: A. Menges, Lecture, Stuttgarter Wissenschaftsfestival, Rathaus Stuttgart, Germany, June 27, 2019.

Planen und Bauen: Digital anders denken: A. Menges, Lecture, Deutsche Bauindustrie, Berlin, Germany, June 18, 2019.

Integratives Forschen im 21. Jahrhundert: A. Menges, J. Knippers, Lecture, Zukunftsforum 2: Digitale Methoden ,Zukunft Bau Kongress 2019, Bonn, Germany, December 12, 2019.

Innovative Timber Construction: A. Menges, Presentation, proHolzBW and Holzbau-Offensive BW, Urbach, Germany, August, 14 2019.

Printmedien

- Isopp,A.: 2020. **Zuschnitt Zeitschrift über Holz als Werkstoff und Werke in Holz**, proHolz Austria, Nr. 77, March, pp 6-9, ISBN: 978-3-902926-35-7.
- Mayer-Grenu, A.: 2020, Programmierte Eleganz, forschung leben: **Intelligente Systeme für eine zukunftsfähige Gesellschaft Das Magazin der Universität Stuttgart - forschung leben**, Januar, pp. 28–35.
- Friedrich, J., Analysieren und exakt vorausbestimmen, in **Bauwelt – Praxis: BIM Digitalisierung**, 2.2020
- Mayer-Grenu, A.: 2020, Programmierte Eleganz, forschung leben: **Intelligente Systeme für eine zukunftsfähige Gesellschaft**, 01.2020
- Lofken, J.O., 2019, Bauen - Kontrollierte Kurven, in **Technology Review**, 12.2019
- Turm aus selbstformend hergestelltem Holz, **Die Welt der Lehmann Gruppe**, 12.2019
- Willmann, J., Think Digital - Materialverhalten im Gebäudemasstab: Neue Skalierungen digitaler Architektur, **architektur.aktuell**, 11.2019
- Jauk, G. Holz bringt sich selbst in Form in **BSF |Special, Holzkurier**, 11.2019
- Urbach Turm - Architektonische Landmarke aus selbstgeformtem Holz, **DBZ - Deutsche Bauzeitschrift**, 11.2019
- Holz, das sich selbst formt - Ausgeklügelte Modellierungstechnologie ermöglicht neue Wege im Holzbau, **Forstmaschinen Profi**, 10.2019
- MAGISCHER URBACH-TURM, **Immobilien**, 10.2019
- Barlow, W., 2019, off the beaten path: From urban ruins to rural a rural hillside, unconventional venues invite inventive installations, in **Interior Design** 09.19
- Heirbaut, J.: 2019, Uitkijpunt Met Een Twist, in **DE INGENIEUR**, 07.2019
- Turm an der Birke, in **Urbach Magazin**, 09.2019
- Urbach Tower - Landemaerke i en selvformende traekonstruktion, **BYGGERI + arkitektur**, 09.2019
- STARK WIE EIN BAUM: Das Bauen mit Holz erlebt ein erstaunliches Comeback. Sogar Hochhäuser sind für das, **Zeit Wissen**, 09.2019
- Mika, O. , Urbach Tower Vyuziti prirodneho tvarovani dreva vlivem, **materialy pro stavbu**, 9.2019
- Ryll, C.: Remstal Gartenschau- Markantes Wahrzeichen, in **mikado: Unternehmermagazin für Holzbau und Ausbau**, 9.2019
- Landmarken: 16 Architekturbüros haben 16 Wanderziele für das schwäbische Remstal entworfen. Eine Sommerparade der Kleinstarchitektur, **Bauwelt**, 08.2019
- Sigmund, B., 2019, Trocknung formt Holz, in **Structure DETAIL**, 03.19

Online-Medien (ausgewählt)

[Wie bringt Holz sich selbst in Form?](#) – **P.M Wissen - Servus TV**
[Cool New Method Curves Wood Without Machines](#) - **Popular Mechanics**
[Tall twisting tower is made from wood that shapes itself ...](#) - **New Scientist**
[These researchers invented an entirely new way of building ...](#) - **Fast Company**
[Building with wood that bends itself into shape](#) - **ETH Zurich, Empa News**
[With a new technology, wood gets itself into shape](#) - **NZZ (Switzerland)**
[University of Stuttgart makes Urbach Tower from self-shaping wood](#) - **DEZEEN**
[Self-shaping timber could rival CLT for structural use](#) - **RIBA Journal**
[This Week in Tech: Constructing with Deforming ...](#) - **ARCHITECT Magazine**

Relevante Websites und Links zu sozialen Medien

[Urbach Tower](#) – Wikipedia
[Urbach Tower](#) – ICD University of Stuttgart
[Station 7 Turm an der Birke](#) - Google Maps
[#UrbachTower](#) , [#turmanderbirke](#) , [#urbachTurm](#) –Instagram
[Science Magazine](#) – **Twitter**
[Turm an der Birke](#) , [Gartenschau TURM IN URBACH](#), [Aussichtsturm über Urbach](#) – Komoot

Auszeichnungen und Nominierungen

DAM Awards (Invited nomination 03.2020)
ArchDaily Building of the Year Awards- Small Buildings Category - Finalist, top 5 by popular vote)

Standort des Demonstratorgebäudes

Urbach, Deutschland (48°48'10.1"N 9°33'54.4"E)

FAZIT (KRITISCHE ZUSAMMENFASSUNG)

Die Entwicklung der digitalen Planung, der ingeniertechnischen Untersuchung und Analyse und die Anpassung des selbstformenden Herstellungsverfahrens wurde für die Ausführung des Demonstrationsgebäudes Turm Urbach erfolgreich abgeschlossen. Der Demonstrator dient sowohl als elegantes und einnehmendes Beispiel für die zukünftigen Potenziale von Holz als nachhaltiges Baumaterial als auch als fortlaufendes Experiment. Das Projekt beleuchtet den Holzbau aus einer neuen High-Tech-Perspektive und kommuniziert seine statische und materielle Leistungsfähigkeit durch seine einzigartige Form und architektonische Erfahrung.

Auf technischer Ebene beweist das Projekt, dass die Nutzung der natürlichen Schwind- und Quelleigenschaften des Holzes für das experimentelle selbstformende Herstellungsverfahren für stark gekrümmtes Brettsperrholz im industriellen Maßstab angewendet und für die Herstellung von gekrümmten BSPH-Bauteilen mit einem bestimmten Radius und einer bestimmten Geometrie angepasst werden kann. Das Brettsperrholz kann zuverlässig in großen Formaten und großen Mengen im Sägewerk, durch Anpassung des bestehenden Herstellungsverfahrens und ohne zusätzliche Spezialausrüstung und -maschinen hergestellt werden. Wie im Demonstratorprojekt angewandt, hat das selbstformende Brettsperrholz den Vorteil, dass durch dickere Schichten eine höhere Krümmung erreicht wird, was den Materialbedarf und den Arbeitsaufwand zur Herstellung der Bauteile weitgehend reduziert. Gleichzeitig führt die Selbstformung zu einer geringeren elastischen Rückstellverformung und einer insgesamt höheren Oberflächengüte sowie einer höheren Krümmungskontinuität. Dies reduziert die Menge an Bearbeitungsaufwand und Verschnitt in den Nachbearbeitungs- und Detaillierungsschritten.

Parallel dazu wurden die digitalen Planungs- und Konstruktionsmethoden in die Herstellungsverfahren integriert, um zu zeigen, wie gekrümmtes Brettsperrholz in größeren Strukturen effizient eingesetzt werden kann. Die parametrische Entwurfs- und Planungsschleife wird verwendet, um erstens eine neue Art von flächenaktiven, wellenartigen Schalenstrukturen speziell für gekrümmtes Brettsperrholz und seine inneren Aufbauten zu entwerfen und zweitens einfache Verbindungsdetails und Schnittstellen zu sekundären Konstruktionssystemen zu entwickeln und zu implementieren. Für das Demonstratorprojekt wird die Methode zur Bereitstellung der vollständig digitalen Daten und Geometrie für die Herstellung und Montage der gekrümmten BSPH-Bauteile sowie der zugehörigen Fassaden- und Dachkonstruktionen eingesetzt. Das Verfahren zeigt, wie statisch effiziente gekrümmte Geometrien mit nachhaltigen Materialien wie Holz hergestellt und trotz der Schwierigkeiten bei Verbindungen und Nachbearbeitung in der Konstruktion umgesetzt werden können.

Ökologisch stellt das Projekt eine neue Bauweise für ein hoch nachhaltiges Baumaterial vor, das ebenso ressourceneffizient eingesetzt wird. Neben der Steigerung der Effizienz des Materials eröffnet das Demonstratorprojekt vor allem neue Anwendungsmöglichkeiten für den Einsatz von Holz anstelle von weniger nachhaltigen Baustoffen. Die Architektur bringt diesen einzigartigen Ansatz zum Ausdruck und zeigt weitere Potenziale des Materials in einem breiten Spektrum von Anwendungen auf, von Dachkonstruktionen mit mittlerer Spannweite bis hin zu tragenden Wänden und Infrastrukturbauten wie Masten und Türmen.

BIBLIOGRAPHIE

- Engel, Heino (2013): Tragsysteme. Structure systems. 5. ed. Ostfildern: Hatje Cantz.
- Grönquist, Philippe; Wood, Dylan; Hassani, Mohammad M.; Wittel, Falk K.; Menges, Achim; Rüggeberg, Markus (2019): Analysis of hygroscopic self-shaping wood at large scale for curved mass timber structures. In *Sci. Adv.* 5 (9), eaax1311. DOI: 10.1126/sciadv.aax1311.
- Hahmann, Lydia (2006): How stiff is a timber curved plank? Historical discussions about curved plank structures. In : *Dunkeld, M. et al. (Ed.): Proceedings of the 2nd International Congress on Construction History, 1501-1516.*
- Häsler, G.; Baumann, E. F. (1931): Der gedrehte Turmhelm der alten Kirche zu St. Johann auf Davos. In *Schweizerische Bauzeitung* (97/98), pp. 31–36. DOI: 10.5169/seals-44717.
- Krieg, Oliver David; Schwinn, Tobias; Menges, Achim; Li, Jian-Min; Knippers, Jan; Schmitt, Annette; Schwieger, Volker (2015): Biomimetic Lightweight Timber Plate Shells: Computational Integration of Robotic Fabrication, Architectural Geometry and Structural Design. In Philippe Block, Jan Knippers, Niloy J. Mitra, Wenping Wang (Eds.): *Advances in Architectural Geometry 2014*, vol. 23. Cham: Springer International Publishing, pp. 109–125.
- Li, Jian-Min; Knippers, Jan (2015): Segmental Timber Plate Shell for the Landesgartenschau Exhibition Hall in Schwäbisch Gmünd—the Application of Finger Joints in Plate Structures. In *International Journal of Space Structures* 30 (2), pp. 123–139. DOI: 10.1260/0266-3511.30.2.123.
- Robeller, Christopher; Nabaei, Seyed Sina; Weinand, Yves (2014): Design and Fabrication of Robot-Manufactured Joints for a Curved-Folded Thin-Shell Structure Made from CLT. In Wes McGee, Monica Ponce de Leon (Eds.): *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2014*, vol. 27. Cham: Springer International Publishing, pp. 67–81.
- Robeller, Christopher; Stitic, Andrea; Mayencourt, Paul; Weinand, Yves (2015): Interlocking Folded Plate: Integrated Mechanical Attachment for Structural Wood Panels. In Philippe Block, Jan Knippers, Niloy J. Mitra, Wenping Wang (Eds.): *Advances in Architectural Geometry 2014*. Cham: Springer International Publishing, pp. 281–294.
- Scheurer, Fabian; Simonin, Loïc; Stehling, Hanno: “Energy for life” – the timber structure of the French Pavilion at the EXPO 2015. In *Proceedings of IASS Annual Symposia, IASS 2015 Amsterdam Symposium: Future Visions – Timber Spatial Structures 2015*, pp. 1–12.
- Stecher, Georg; Maderebner, Roland; Zingerle, Philipp; Flach, Michael; Kraller (2016): Curved Cross Laminated Timber Elements. In *World Conference of Timber Engineering (WCTE) 2016*. Available online at https://www.researchgate.net/publication/308304297_CURVED_CROSS-LAMINATED_TIMBER_ELEMENTS.
- Stehling, Hanno; Scheurer, Fabian; Roulier, Jean; Geglo, Hélori; Hofmann, Mathias (2017): From Lamination To Assembly Modelling The Seine Musicale. In Achim Menges, Bob Sheil, Ruairi Glynn, Marilena Skavara (Eds.): *Fabricate. Rethinking design and construction*. London: UCL Press, pp. 258–261.
- Svilans, Tom; Poinet, Paul; Tamke, Martin; Ramsgaard Thomsen, Mette: A Multi-scalar Approach for the Modelling and Fabrication of Free-Form Glue-Laminated Timber Structures, pp. 247–257. DOI: 10.1007/978-981-10-6611-5_22.

Wood, D.; Vailati, C.; Menges, A.; Rüggeberg, M. (2018): Hygroscopically actuated wood elements for weather responsive and self-forming building parts – Facilitating upscaling and complex shape changes. In *Construction and Building Materials* 165, pp. 782–791. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.134.

Wood, Dylan Marx; Correa, David; Krieg, Oliver David; Menges, Achim (2016): Material computation—4D timber construction: Towards building-scale hygroscopic actuated, self-constructing timber surfaces. In *International Journal of Architectural Computing* 14 (1), pp. 49–62. DOI: 10.1177/1478077115625522.

ANERKENNUNG

Projektteam

ICD - Institute for Computational Design and Construction, University of Stuttgart
Prof. Achim Menges, Dylan Wood

ITKE - Institute of Building Structures and Structural Design, University of Stuttgart
Prof. Jan Knippers, Lotte Aldinger, Simon Bechert

Mit der Unterstützung von: Ramon Weber, Robert Faulkner, Christo van der Hoven, Denista Kolvea und Monika Göbel

Wissenschaftliche Partner:

Laboratory of Cellulose and Wood Materials, Empa (Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology), Switzerland & Wood Materials Science, ETH Zurich (Swiss Federal Institute of Technology Zurich), Switzerland

Dr. Markus Rüggeberg, Philippe Grönquist, Prof. I. Burgert,

IIG - Institute of Engineering Geodesy, University of Stuttgart

Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Volker Schwieger, Urs Basalla, Gabriel Kerekes

Partner aus der Industrie:

Blumer-Lehmann AG, Gossau, Switzerland

Katharina Lehmann, David Riggerbach

Mit der Unterstützung von: Stefan Bischof, Markus Fitzi, Peter Trittenbass, Josua Preisig, Kai Strehlke, Martin Antemann, Urban Jung und Richard Jussel

Projektfinanzierung

Gemeinde Urbach

Remstal Gartenschau 2019 GmbH

University of Stuttgart

DBU - The Deutsche Bundesstiftung Umwelt

InnoSuisse - Swiss Innovation Agency

