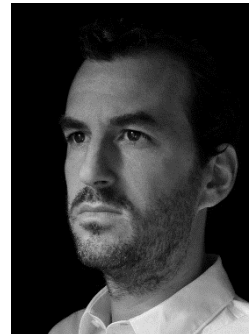


Holzbau digital denken: Integratives computerbasiertes Planen und Bauen

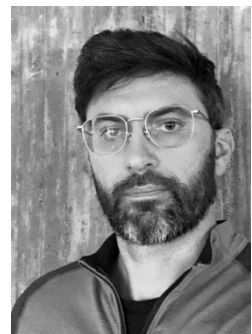
Prof. Achim Menges
Institut für Computerbasiertes
Entwerfen und Baufertigung
Stuttgart, Deutschland



Felix Amtsberg
Institut für Computerbasiertes
Entwerfen und Baufertigung
Stuttgart, Deutschland



Oliver Bucklin
Institut für Computerbasiertes
Entwerfen und Baufertigung
Stuttgart, Deutschland



Hans Jakob Wagner
Institut für Tragkonstruktionen
und Konstruktives Entwerfen
Stuttgart, Deutschland



Dylan Wood
Institut für Tragkonstruktionen
und Konstruktives Entwerfen
Stuttgart, Deutschland



Holzbau digital denken: Integratives computerbasiertes Planen und Bauen

1. Einleitung

Digitale Technologien durchdringen immer weitere Teile des Planens und Bauens im Holzbau. Dieser Prozess wird dabei allerdings zumeist als eine rein technische Entwicklung mit dem Ziel der Effizienzsteigerung und Automatisierung aufgefasst. Einen gewichtigen Hinweis gibt bereits das Schlagwort der Stunde selbst: Digitalisierung. Diese Begrifflichkeit suggeriert, dass der Einsatz digitaler Technologien im Wesentlichen darauf abzielt, vormals analoge Methoden, Prozesse und Systeme zu digitalisieren. Stattdessen bietet sich gerade im Holzbau die Möglichkeit, digitale Technologien als konstruktives Potential und soziokulturelles Phänomen zu verstehen, als tiefgreifende Veränderung anzunehmen, als Chance aufzugreifen und aktiv zu gestalten.

2. Computation statt Computerisierung im Holzbau

Einen Hinweis, welche Ansatzpunkte es hierfür gibt, kann die in diesem Falle ausdifferenziertere Terminologie des Englischen geben. Hier wird zwischen den Begriffen *Computerisation* und *Computation* unterschieden, für die es im Deutschen keine Äquivalente mit entsprechendem Bedeutungshintergrund gibt. *Computerisation*, also Computerisierung im vorgenannten Sinne, bezeichnet im Wesentlichen die Automatisierung, Mechanisierung und Konvertierung von Entitäten oder Prozessen, die in nicht-digitaler Form bereits gegeben und genau definiert sindⁱ. Und so verhält es sich ja auch weitestgehend mit den derzeit vorherrschenden Ansätzen digitaler Planung und Fertigung im Holzbau. Zunächst erfolgte mit der Einführung konventioneller CAD-Applikationen die Digitalisierung des Zeichenstifts und Zeichenbretts durch Maus und Bildschirm. Nun wird mit BIM die Planung unter Verwendung bautechnischer Standardelemente, -produkte und -details, die es selbstverständlich vorher auch schon gab, computerisiert und in eine Datenbank-basierte Modellierung überführt.

Konzeptionell betrachtet ist *Computerisation* lediglich eine Evolutionsstufe bestehender Herangehensweisen. In diesem Sinne müssen wir auch die Grundzüge von BIM als eine Übergangstechnologie verstehen. Es macht den Planungsprozess zwar effizienter und ermöglicht das schnellere Iterieren durch Entwurfsvarianten, das zügige Implementieren von Planungsänderungen, das disziplinübergreifende Arbeiten in einem Modell und das integrierte Verfolgen von Planungsinformationen über den Lebenszyklus. Aber zugleich werden bestehende Konventionen verfestigt, Standards gestärkt und herkömmliches Entwurfsdenken nicht in Frage gestellt. Technisch und konzeptionell bedingt manifestiert BIM bestehende Normierungen und erfordert zusätzlich neue. Es sind digitale Planungs-Technologien für ein prädigitales Bauen.

Auch wenn der Holzbau ein Vorreiter im Bereich der computernumerisch gesteuerten Herstellung war, verhält es sich ganz ähnlich wie in der Planung auch in der Fertigung beim Einsatz digitaler Technologien: Sie werden primär für die «Computerisierung» bestehender Prozesse und Abläufe eingesetzt, um so einen höheren Automatisierungsgrad des Vorfertigens zu erreichen, wie z.B. durch digitalen Abbund. Auch dies wird lediglich ein Übergangsschritt sein. Denn so entstehen automatisierte Fertigungsprozesse für prä-digitale Bausysteme und Bauweisen.

Das tatsächliche Potential digitaler Technologien im Holzbau wird so nicht erschlossen, denn neue Technologien werden maßgeblich für ein «altes» Bauen eingesetzt, sowohl auf Planungs- als auch auf Ausführungsseite. Die Möglichkeit, sich den im positiven Sinne disruptiven Charakter digitaler Technologien kritisch aber proaktiv zu erschließen, wird dabei nicht genutzt. Es fehlt uns häufig sogar die Vorstellungskraft, wo dieses positive Potential überhaupt liegen könnte. Aber gerade der Holzbau bietet hervorragende Voraussetzung, um dieses zu erschließen. Dies bedarf jedoch der genuin digitaler, nicht digitalisierter, Ansätze, also *Computation*ⁱⁱ.

Im Gegensatz zu reinen Computerisierung steht bei *Computation* die Erschließung noch unbestimmter, vager oder nicht ausreichend definierter Möglichkeits- und Lösungsräume im Vordergrund. Der Computer kann hierbei anhand algorithmischer und logischer Methoden explorativ und zugleich integrativ eingesetzt werden. Mit Hinblick auf den Holzbau stellt *Computation*, also *Computational Design* und *Computational Construction*ⁱⁱⁱ, eine Vielzahl tradierter Ansätze, etablierter Abläufe, Konventionen und Normierungen in Frage. Denn die Logik und spezifische Eigenheit eines originär digitalen Bauschaffens wird sich nicht linear aus prädigitalen Konzepten ableiten lassen. *Computation*, nicht als Ersatz, sondern als Ergänzung handwerklicher Ansätze, ermöglicht es, Entwurfsmethoden, Bauprozesse und Bausysteme in Wechselwirkung miteinander integrativ und digital neu zu denken. So können digitale Technologien zum Wegbereiter für die Exploration genuin digitaler Möglichkeiten im Holzbau werden^{iv}.

3. Von Beginn an digital gedacht: Co-Design im Holzbau

Ein Ansatz, um das volle Potenzial digitaler Technologien für Integration und Zukunftsfähigkeit für das Planen, Fertigen und Bauen im Holzbau zu nutzen, ist eine übergreifende Methodik des Co-Designs von Entwurfs- und Ingenieursmethoden, Fertigungs- und Bauprozessen sowie Material- und Bausystemen, wie sie an der Universität Stuttgart im Rahmen des 2019 eingerichteten Exzellenzclusters «Integrativer, Computerbasiertes Planen und Bauen für die Architektur (IntCDC)» erforscht wird [1]. Im Gegensatz zur derzeit vorherrschenden sequentiellen Integration in Form einer digitalen Kette erforscht das Cluster Co-Design als eine Methodik für die gleichzeitige und rückgekoppelte Integration von geometrischen, konstruktiven, mechanischen, hygrothermischen, akustischen Eigenschaften, ökologischen, wirtschaftlichen und sozialen Faktoren, ästhetischen und räumlichen Qualitäten, sowie den Eigenheiten und Möglichkeiten cyberphysikalischer Fertigungs- und Bauprozesse.

Die Definition von Co-Design ist die gleichzeitige und rückgekoppelte Entwicklung von generativen Methoden zur Exploration, analytischen Methoden zur Optimierung, cyberphysikalischen Prozessen der digitalen Vorfertigung und des robotischen Bauens vor Ort, sowie den dazugehörigen Material- und Konstruktionssystemen, wobei auch soziale Anforderungen und Erwartungen, Umweltauswirkungen, regulative Einschränkungen sowie Lehren aus der Geschichte berücksichtigt werden.

Dieses umfassende Ziel erfordert interdisziplinäre Forschung in mehreren Bereichen, die von Architektur, Bauingenieurwesen, Bauphysik und Geodäsie, Fertigungs- und Systemtechnik, Informatik und Robotik bis hin zu den Geistes- und Sozialwissenschaften reichen. Ebenso wird das Industriekonsortium des Clusters für einen direkten und zweiseitigen Wissensaustausch und -transfer direkt in die Entwicklungen einbezogen.

3.1. Co-Design Fallbeispiel 1: IBA Prototyphaus

Das IBA Timber Prototype House (Abb. 1) demonstriert die Möglichkeiten des Co-Designs, die Potenziale der traditionellen, kostengünstigen, und nachhaltigen Massivholzbauweise mittels digitaler Werkzeuge signifikant zu erweitern und gemäß der heute geltenden bauphysikalischen Maßstäbe auszuführen [2].

Massivholz ist bis zu 50% günstiger als vergleichbare Holzbaustoffe wie CLT und LVL. Außerdem lässt sich das Material aufgrund des Nichtvorhandenseins von Klebstoffen und Füllstoffen leichter trennen und am Ende der Lebensdauer direkt wiederverwenden oder recyceln. Die Herausforderung des IBA Prototyphauses bestand darin, ein Gebäudehüllensystem zu entwickeln, das die Anforderungen einer zeitgemäßen Konstruktion erfüllt und gleichzeitig die zusätzlichen Materialsichten, die in modernen Gebäuden üblich sind, minimiert. Im Rahmen des Projekts ist es gelungen, eine selbsttragende Gebäudehülle zu entwickeln, die Wärmedämmung, Luftdichtheit und strukturelle Tragfähigkeit unter ausschließlicher Verwendung von Holz und ohne zusätzliche Klebstoffe oder Metallverbindungselemente bietet.



Abbildung 1: Das IBA: Timber Prototype House wurde in Apolda in 2019 erbaut.

Der Schlüssel der Entwicklung liegt in der digitalen Bearbeitung der Querschnittsprofile und Fugendetails eines Kantvollholzes. Der Querschnitt von großdimensionierten Kantvollhölzern wurde in Funktionszonen unterteilt, welche auf unterschiedlichen Anforderungen individuell reagieren können. Ein dämmende Funktionszone wird durch Einsägen tiefer Schlitzte erstellt. Die entstehenden Hohlräume reduzieren die Wärmeleitfähigkeit der Hülle um die erforderlichen Dämmwerte zu erzielen. Diese Schlitzte dienen auch dazu, die natürlichen inneren Spannungen abzubauen, die sich beim Quellen und Schwinden des Holzes ergeben. Im Profil verbleibt ein Rückgrat aus massivem Material, das aufgrund der Materialstärke eine strukturelle Verbindung ermöglicht (Abb. 2). Außen- und Innenflächen werden mit einer Schwalbenschwanzzinkenverbindung versehen, die eine luftdichte Verbindung erzeugt [3].

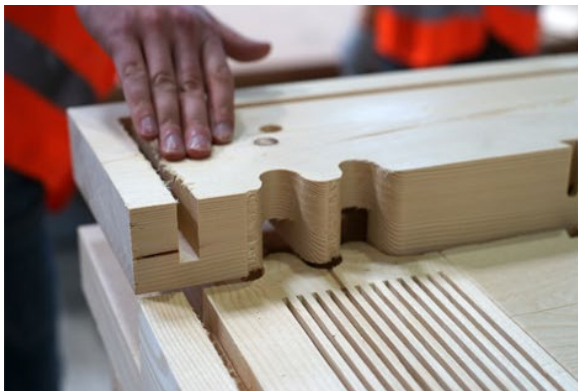


Abbildung 2: CNC-Verbindungen ermöglichen eine isolierende, luftdichte, strukturelle Gebäudehülle aus reinem Holz

Diese ist mit einer neuartigen Überlappungsverbindung mit tiefen Kanälen gekoppelt, die ebenfalls dazu beiträgt, die Luftdurchlässigkeit zu verringern und eine beigesteifte Verbindung zu erzeugen. Die sich daraus ergebenden Elemente werden zu einer sehr präzisen Art von Blockhaus-Konstruktion zusammengefügt, die in vertikal ausgerichtete Rahmen gekippt wird, wodurch das Holz die Last effizient abtragen kann, da die Holzfasern entsprechend den Hauptspannungen ausgerichtet werden.

Durch die Zusammenarbeit mit Bauphysikern, Statikern und Holz-Verarbeitern in der frühen Phase der Systementwicklung konnte das Team gleichzeitig alle grundlegenden Anforderungen berücksichtigen. Bauphysiker halfen bei der Optimierung der Dämmschlitzabmessungen und -ausrichtung. Sie testeten auch physikalische Prototypen, um Lösungsvorschläge zu bewerten und Verbesserungen einzubringen. Tragwerksplaner halfen

bei der Entwicklung von Anschlussdetails, die entsprechend den erforderlichen baurechtlichen Vorgaben dimensioniert wurden und gleichzeitig den thermischen Anforderungen gerecht werden. Holz-Verarbeiter stellten sicher, dass die vorgeschlagenen Konstruktionselemente herstellbar waren, und berieten bei der Automatisierung von Fertigungsprozessen (Abb. 3).

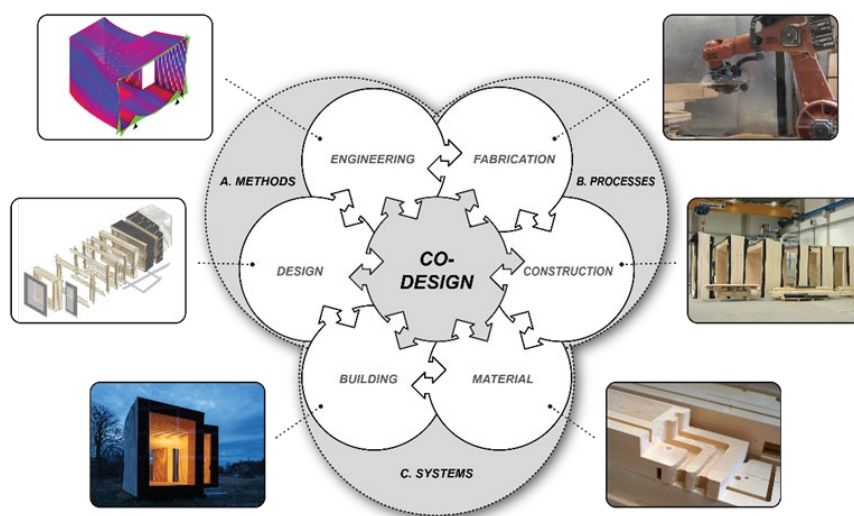


Abbildung 3: Co-Design integriert das Fachwissen von Designern, Ingenieuren und Herstellern, um den Architekturprozess zu optimieren.

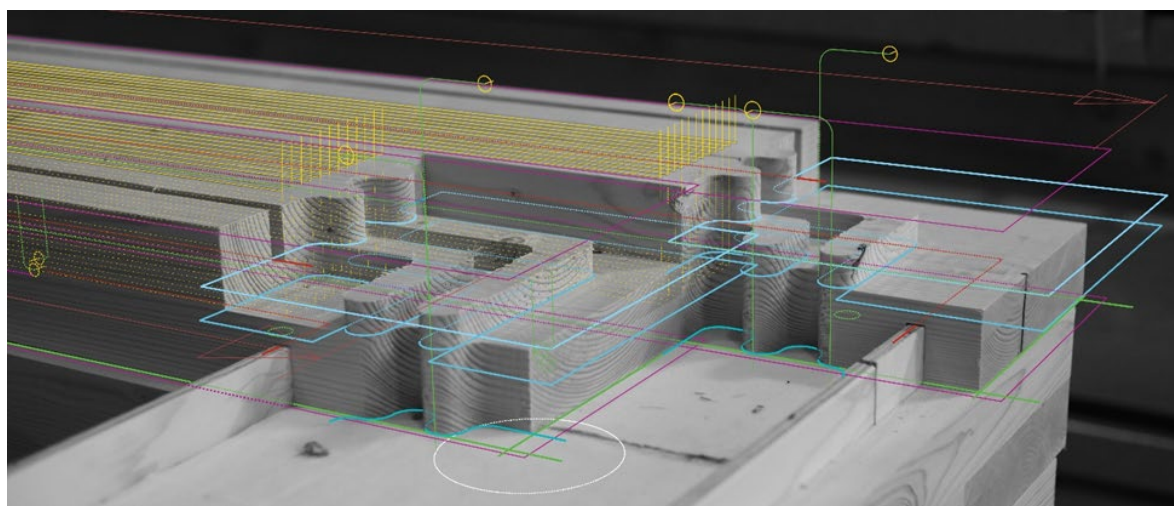


Abbildung 4: Berechnungsskripte ermöglichen eine nahezu sofortige Übersetzung von Freiformgeometrie in maschinenlesbaren Code

Die Automatisierung ermöglichte, nicht nur die Produktion effizienter zu gestalten, sondern auch den formalen Ausdruck des entstehenden Systems erheblich zu erweitern [4]. Alle robotergestützten Werkzeugbahnen, die zum Fräsen der Konstruktionselemente erforderlich waren, wurden durch rechnergestützte Algorithmen generiert (Abb. 4).

Die Verbindungen wurden mit einer gewissen Flexibilität in Bezug auf Gelenkwinkel und Platzierung entworfen. Dadurch konnten benachbarte Vollholzelemente relativ zueinander leicht versetzt und verdreht werden, was Regelflächen über die Länge eines Fassadenabschnitts ermöglicht und so gekrümmte oder wellenförmige Geometrie ohne Mehraufwand zulässt. Ein rechnergestütztes Entwurfswerkzeug ermöglichte die einfache Erstellung der Geometrie durch die Manipulation dreidimensionaler Kurven in einem digitalen Modell. Eine Fülle von Daten über die Struktur wurde automatisch generiert und ermöglichte eine sofortige Bewertung der vorgeschlagenen Architektur. Gebäude-Metriken erlaubten die Schätzung von Materialmengen und Baukosten. Die Geometrieanalyse gab Ingenieuren vereinfachte Modelle für die Strukturanalyse an die Hand. Die Ausgabe von maschinenlesbaren Werkzeugwegen ermöglichte die Erstellung von Komponenten-Prototypen und einen direkten Workflow vom Entwurf bis zur Fertigung.

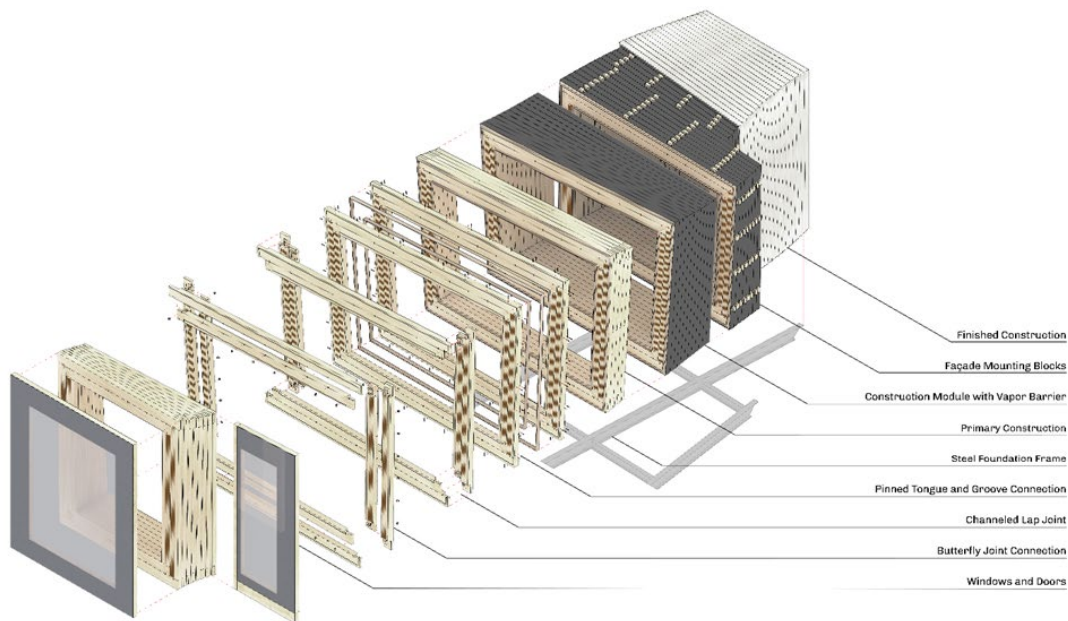


Abbildung 5: Berechnungsskripte ermöglichen eine nahezu sofortige Übersetzung von Freiformgeometrie in maschinenlesbaren Code

Das IBA: Timber Prototype House wurde als Mini-Haus entworfen, um die Machbarkeit und die architektonische Neuartigkeit des Konstruktionssystems zu demonstrieren. Das Haus wurde aus 464 Bauelementen hergestellt, die zu sechs Modulen vormontiert wurden, um zur Baustelle transportiert und dort innerhalb von zwei Tagen zusammengebaut zu werden. Der fertiggestellte Bau in Apolda ist ein Projekt der Internationalen Bauausstellung Thüringens. Es demonstriert die Prinzipien der IBA, die eine neue Art der Zusammenarbeit zwischen Planern, Industrie und Kommune fördern, indem sie die lokale Forstwirtschaft mit lokalen Verarbeitern und Gestaltern verbinden, um ungenutzte Land- und Stadträume zu aktivieren. Der einzigartige formale Ausdruck repräsentiert die versatile Formensprache des Systems und zeigt die Möglichkeiten des Co-Designs, eine kostengünstige Ressource in einem ansprechenden, leistungsstarken Gebäudehüllensystem zur Anwendung zu bringen. Das System wird derzeit im BBSR: ZukunftBau SWD-10.08.18.7-20 («Kostengünstige, Hochdämmende, schichtenreduzierte, sortenreine, klebstofffreie, digital gefertigte Holzmassivbauweise» weiterentwickelt, um seine Anwendung, Leistungsfähigkeit und Durchführbarkeit zu erweitern.)

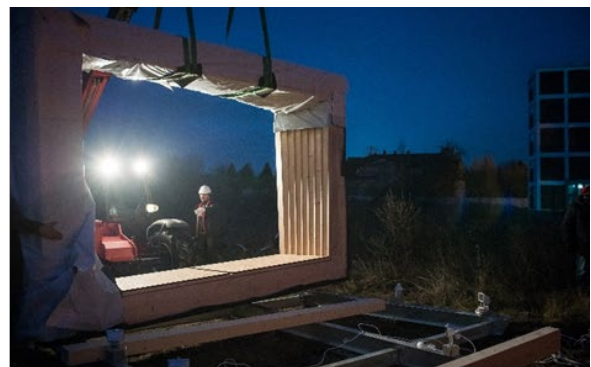


Abbildung 6: Neben den Elementverbindungen wurde auch der Transport und die Montage von Gebäudemodulen berücksichtigt

3.2. Co-Design Fallbeispiel 2: BUGA Holzpavillon

Der BUGA Holzpavillon für die Bundesgartenschau in Heilbronn 2019 (Abb. 7) demonstriert neue Leistungsspektren genuin digitaler Holzbausysteme. Die segmentierte Holzschale spannt 30m über einen flexiblen Veranstaltungsbereich. Drei bogenförmige Öffnungen leiten die Besucher in das Innere der Kuppel. Trotz der großen Spannweite benötigt die Schale durch ein neuartiges Kassetten-Bausystem nur 38kg Holz pro Schalenfläche. Zudem wurde die Schale komplett Rück- und Wiederaufbaubar konzipiert und umgesetzt [5].



Abbildung 7: Der BUGA Holzpavillon spannt 30m frei über eine flexible Veranstaltungsfläche auf der Bundesgartenschau 2019 in Heilbronn.

Die Tektonik des Pavillons wird durch eine ausdifferenzierte Materialverteilung innerhalb der Schalenstruktur bestimmt: In Regionen mit großen Lastspitzen (wie zum Beispiel an den Segment-Verbindungskanten und den Kehlbögen) ist die Schale massiv ausgebildet, während die Segmente im inneren Bereich jeweils hohl sind [6]. Ermöglicht wird dies, indem jedes Segment aus zwei Platten hergestellt wird, die jeweils einen Ring aus Randbalken einfassen. Anders als bei zuvor realisierten Segmentschalen mit massiven Plattensegmenten (z.B.: Forstpavillon Schwäbisch Gmünd) wird also nicht nur die Form der Schale und deren Segmentierung, sondern auch das Innenleben jedes Segments durch lastangepasste Materialverteilung optimiert (Abb. 8).

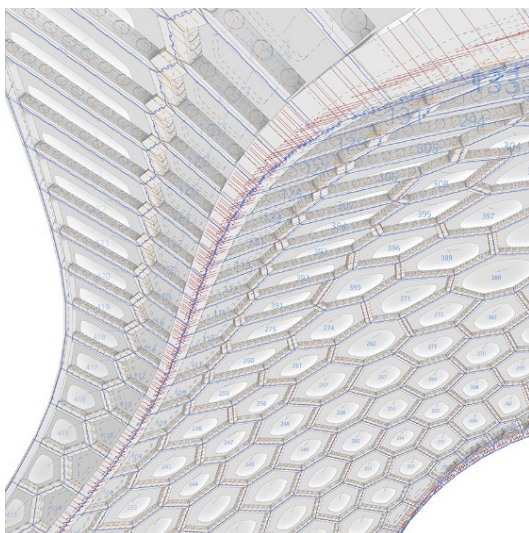


Abbildung 8: Digitales Gebäudemodell des BUGA Holzpavillons

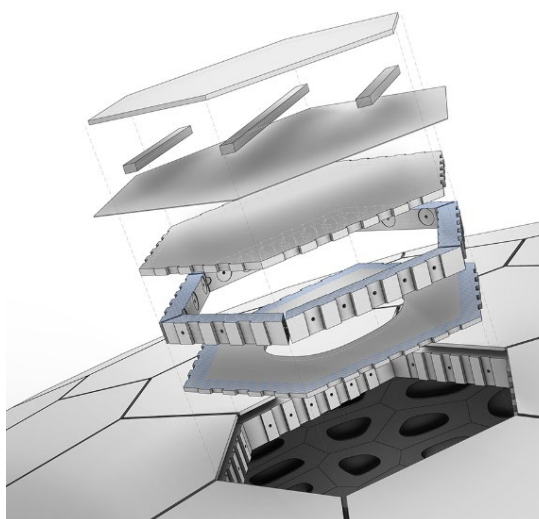


Abbildung 9: Hohlkassetten Bausystem

Der Balkenring der Kassette hat in diesem Fall nicht nur die Aufgabe Schubkräfte zwischen den Ober- und Unterplatten zu übertragen, sondern fungiert auch als Verbindungsschnittstelle zwischen den Kassetten: Die Ränder der Kassetten werden mittels gefrästen Fingerzinken form- und kraftschlüssig miteinander gekoppelt und mittels Bolzen auf Zug- bzw. Momentkräften verbunden. Hierfür werden Fingerzinken an den Rändern gefräst und Löcher im rechten Winkel zur Stoßfläche in beide Kassetten gebohrt. Erreichbar sind die Bolzen-Verbindungsunkte durch das Montageloch in der unteren Kassettenplatte, das

zugleich zur indirekten Beleuchtung dient und der Schale ihren charakteristischen, architektonischen Ausdruck verleiht. Die Höhe des Hohlraums der Kassette wurde so angepasst, dass sie ein möglichst ergonomisches Arbeiten zulässt. So kann eine reversible, biegesteife Verbindung zwischen den Kassetten hergestellt werden, welche nach der Montage des Weiteren nahezu unsichtbar ist.

Dieses Bausystem resultiert im Vergleich zu massiven Holzsegmentschalen bei gleichem Materialverbrauch in einer Verdreifachung der möglichen Spannweite. Allerdings erhöht sich auch die Komplexität der Fertigung um ein Vielfaches, z.B. durch die ca. 8-fache Anzahl an Bauteilen pro Schalensegment (Abb. 9). Die wirtschaftliche Umsetzung eines solchen Projektes ist daher nur möglich, wenn entsprechende Entwurfs- und Planungsmethoden in reziprokem Austausch mit Fertigungs- und Bauprozessen sowie Material- und Bausystemen entwickelt werden (Abb. 10). Durch diesen Co-Design Ansatz können u.a. Konstruktionsdetails in direkter Abstimmung mit der robotischen Fertigung durch einen digital vernetzten Prozess erzeugt werden. Dadurch ist mit der Definition robuster Schnittstellen zwischen den Domänen des Planungsmodells und der Robotersteuerung keine menschliche Übersetzungstätigkeit mehr erforderlich [7]. Vielmehr werden alle relevanten Informationen für die robotische Fertigung aus dem digitalen Modell automatisiert ausgelesen, die Fertigung automatisiert simuliert und die resultierenden Instruktionen in Form von Maschinencode direkt an die Fertigungsanlage geschickt. Nur durch diese direkte Anbindung von generativ interaktiv erzeugtem Gebäudemodell und robotischer Fertigung konnte die komplexen Bauelementfügungen und materielle Ausdifferenzierung des BUGA Holzpavillon effektiv umgesetzt werden.

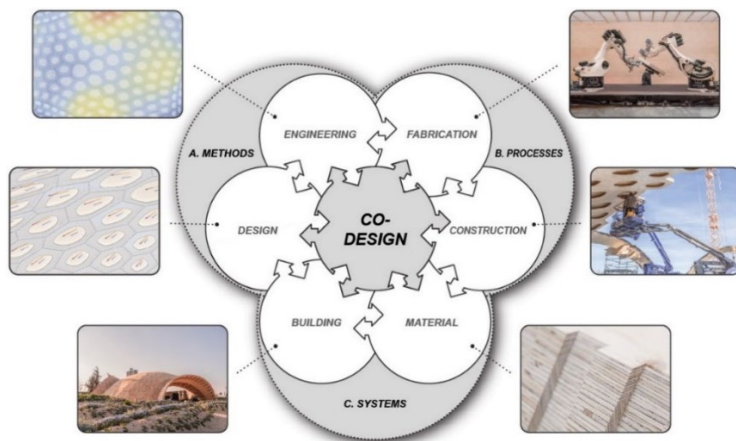


Abbildung 10: Planungsmethoden, Bauprozesse und Bausysteme werden im Rahmen von Co-Design parallel und in ständigem reziprokem Austausch entwickelt. So lassen sich von Beginn an digital gedachte Innovationen im Bauen umsetzen.

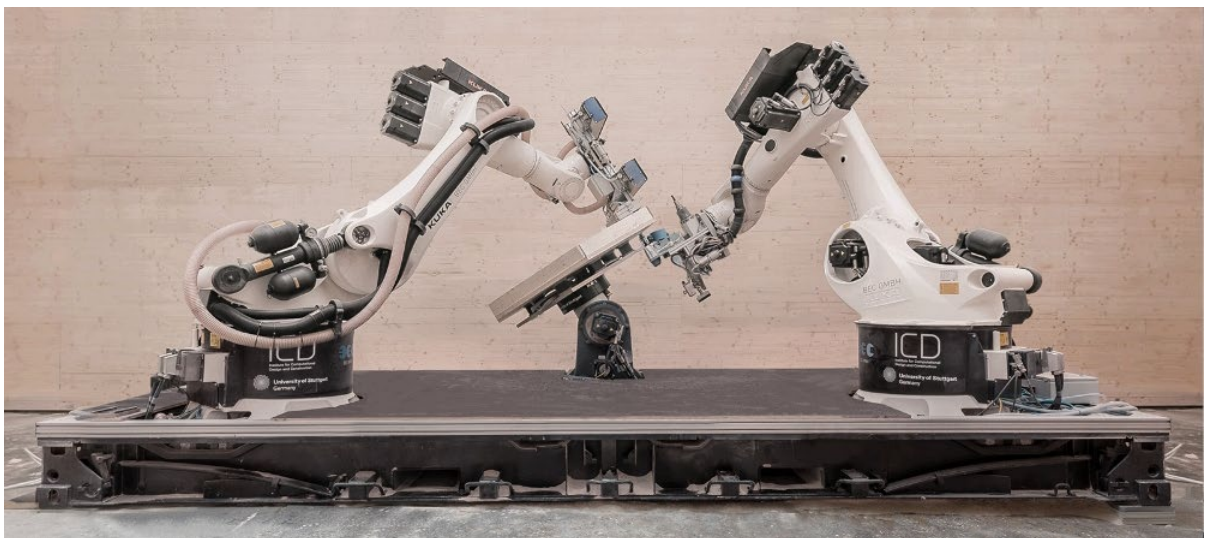


Abbildung 11: Vollautomatisierte Herstellung der Holzkassetten auf einer flexiblen, modularen und transportablen robotischen Fertigungsplattform [8].

Die robotische Fertigungsplattform [8] selbst stellt neben dem Bausystem eine weitere Innovation dar, die von dem Forschungsteam im Rahmen des BUGA Holzpavillons entwickelt wurde. Obwohl robotische bzw. maschinelle, digital gesteuerte Bearbeitungsmethoden im Holzbau keine Seltenheit sind, können vor allem additive bzw. fügende Prozesse weitgehend noch nicht digital umgesetzt werden. Dies liegt maßgeblich nicht an der Technik selbst (die dazu notwendigen Technologien sind schon seit Jahrzehnten bekannt), sondern an den heterogenen Arbeitsherausforderungen und der damit nicht trivialen, organisatorischen Rahmenbedingungen für robotische Fertigung im Betrieb von Holzbaufirmen. Nur ein kleiner Bruchteil des Bauvolumens kann durch strikt standardisierten Modul-Bau abgebildet werden. Mehr als 85% der Projekte im Hochbau werden vielmehr durch eine einzigartige Konstellation an Projektherausforderungen und Zielen definiert. Weiters fehlen in den Regionen der Betriebe oft die notwendigen Spezialkenntnisse. Dadurch konnte bisher robotische Fertigung im Holzbau nicht kommerziell betrieben werden.

Mit der für das Projekt entwickelten robotischen Fertigungsplattform TIM (Abb. 11) konnten die Projektpartner erfolgreich vorzeigen, wie eine modulare, transportable Fertigungsplattform projektbasiert in die Arbeitsumgebung eines Holzbauers integriert werden kann und dadurch Synergien sowohl mit den dort existierenden Maschinen (v.a. CNC Abbund), als auch dem traditionellen Handwerk erschlossen werden. Die Plattform wurde auf einem herkömmlichen ISO Container aufgebaut und besteht aus zwei vollständig integrierten Schwerlast-Industrierobotern. Sie ist leicht mit einem herkömmlichen LKW transportierbar.

Für etwas mehr als drei Monate wurde die Anlage bei dem Holzbaupartner MüllerBlaustein HolzBauWerke für die Fertigung der 376 einzigartigen Hohlkassetten des Pavillons betrieben. Die Kassetten wurden von der Plattform vollautomatisiert gefügt, geklebt und gefräst. Die Herstellung der Rohelemente (Platten und Balken) sowie die Endbearbeitung wurde in der existierenden Kompetenz des Holzbaupartners abgebildet.

Für die baurechtliche Konformität und den Aufbau vor Ort war vor allem die Qualität der Klebstoff-Fuge sowie der Fertigungsgenauigkeit relevant. Die Klebeverbindungen mittels 1K PUR bedurften Fugengenauigkeiten von unter 0.3mm. Die gefrästen Fingerzinken mussten so genau gefertigt sein, dass alle Kassettenstöße mittels Kontakt Druckkräfte übertragen können. Diese Qualitäten wurden konstant während des Fertigungsprozesses überwacht [9]. Die hohe Präzision und das geringe Gewicht der Elemente ermöglichten eine reibungslose, zügige Montage vor Ort im freien Vorbau (Abb. 12).



Abbildung 12: Aufbau der Hohlkassetten-Segmentschale im freien Vorbau.

3.3. Co-Design Fallbeispiel 3: Urbach Turm

Der Urbach Turm, geplant und gebaut im Sommer 2019 für die regionale Remstal Gartenschau, demonstriert einen neuartigen Ansatz zur Formgebung, in dem die natürlichen Eigenschaften des Werkstoffs Holz als Formungsmethode genutzt werden [10]. Die

markante, 14 m hohe, geschwungene Holzkonstruktion besteht aus Brettspertholzbauteilen, die durch das starke hygroskopische Schwinden der einzelnen Holzbretter in Form gebracht wurden (Abb. 13).

Unerwünschte Verformungen und Risse durch die Trocknung von Holz sind Handwerkern und Zimmerleuten schon seit Jahrhunderten bekannt. Durch den Einsatz neu entwickelter Simulationsmethoden können eben jene Kräfte vorteilhaft genutzt werden, um Bauteile von einem flachen Ausgangszustand in einen stark gekrümmten Endzustand zu formen [11]. Auf diese Weise stellt die Herstellung des Turms ein radikales Umdenken bei den Entwurfs- und Formgebungsverfahren im Holzbau dar: Weg von der Anwendung mechanischer Press- und Formungsverfahren hin zu einem Prozess, bei dem Form und Geometrie direkt aus dem Material selbst hervorgehen, was eine neuartige Kombination von Eleganz und Effizienz ermöglicht.



Abbildung 13: Die fertige Struktur des Urbach Turms, eine Hochleistungs-Holzkonstruktion aus selbstgeformtem, gebogenen Brettspertholz.

Der Schlüssel zu dieser Konstruktion ist die Erfindung einer neuartigen Methode zur Selbstformung von zweischichtigen Holzplatten. Bei dieser Methode wurde ein Computermodell des Holzmaterials und der Holzmechanik verwendet, um die Krümmung der zweischichtigen Platten vorherzusagen und dann die Zusammensetzung von zwei senkrecht ausgerichteten Brettschichten mit zugewiesener Dicke, Hirnholzwinkeln und Ausgangsholzfeuchte zu optimieren. Auf der Grundlage dieser digitalen Informationen wurden Fichtenholzbretter aus der regulären Produktionslinie des Sägewerks ausgewählt und so sortiert, dass sie einen hohen Feuchtigkeitsgehalt (22 %) aufwiesen.

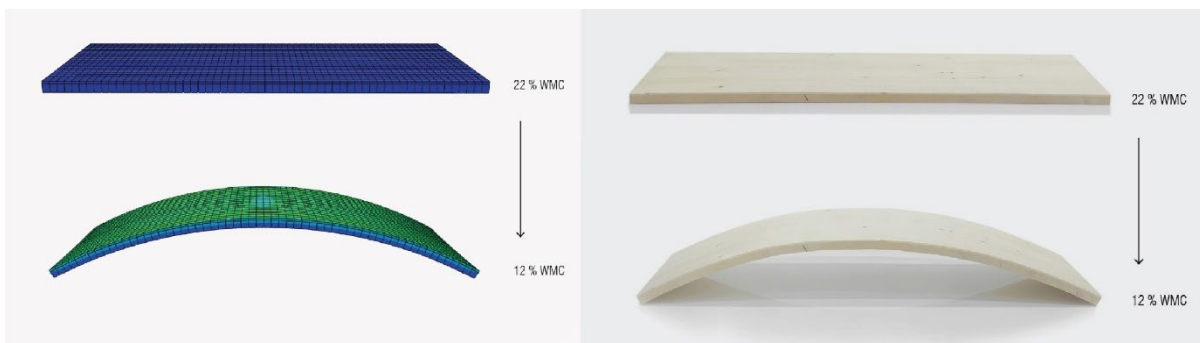


Abbildung 14: Die selbstformende Fertigung wird durch die Kombination eines digitalen Material- und Mechanikmodells mit physikalischen Tests im Labor und unter industriellen Bedingungen ermöglicht. Links - die Vorhersage der Formgebung im digitalen Modell. Rechts - Die Selbstformung einer Fichtenholz-Doppelschichtprobe von einer flachen zu einer gekrümmten Konfiguration durch Trocknen.

Die zweischichtigen Platten wurden dann aus diesen aktiven Holzbrettern und einer dünneren, passiven Sperrschicht laminiert, woraufhin die flachen Platten einem Standardtrocknungsprogramm unterzogen wurden, um den Feuchtigkeitsgehalt auf 12% zu senken. Durch die Trocknung der Platten wurde die vorhergesagte Krümmung auf autonome, aber kontrollierte Weise erzeugt (Abb. 14). Gruppen der selbstgeformten Platten wurden dann übereinander geschichtet und mit einer zusätzlichen dünnen, elastisch gebogenen Sperrschicht kombiniert, um größere, gekrümmte BSPH-Rohlinge (2,40 m Radius, 5 Schichten Fichten-CLT, 90 mm t) herzustellen. Auf einer 5-Achsen-CNC-Maschine wurden dann die individuellen Bauteile aus den Rohlingen herausgeschnitten und abgebunden. Die Bauteile wurden dann im Werk mit präzise gesetzten Kreuzschrauben zu Gruppen verbunden, bevor eine Abdichtungsschicht aufgebracht und eine Lärchenholzvorsatzschale angebracht wurde. Vor Ort wurden die vorgefertigten Gruppen an einem Arbeitstag zu dem Turmbau zusammengesetzt und ein Polycarbonatdach installiert.

Die Möglichkeit, BSPH wirtschaftlich und einfach zu stark gekrümmten Geometrien zu formen, wie auch die hochpräzise CNC-Bearbeitung der Verbindungsdetails, sind für die Entwicklung der leichten und materialeffizienten Struktur des Turms in einem integrativen Co-Design Prozess von wesentlicher Bedeutung (Abb. 15).

Die Konstruktion des Turms wird durch die Verschneidung von 12 Zylinderflächen definiert, die mit leichter Drehung und geneigter Achse angeordnet sind. Die daraus resultierende Innengeometrie bildet die gleichzeitig gekrümmte und gewellte Geometrie des Turms. Die Gesamtstruktur weist eine doppelt gekrümmte Geometrie auf, während die einzelnen Bauteile aus einfach gekrümmten Bauteilen mit vorteilhaft orientierten Primärfaserrichtungen hergestellt werden können (Abb. 16). In architektonischer Hinsicht dient die gekrümmte Holzkonstruktion zugleich als Raumabschluss und Tragwerk, und schafft so einen Ort der inneren Reflexion, in dem das Licht die sanften Krümmungen der fast textilartig wirkenden Wände entlangstreift, sowie eine markante, elegant gewundene Form, die für den Holzbau zunächst unerwartet erscheint und sich dennoch direkt aus den Eigenschaften des Materials ergibt [12].

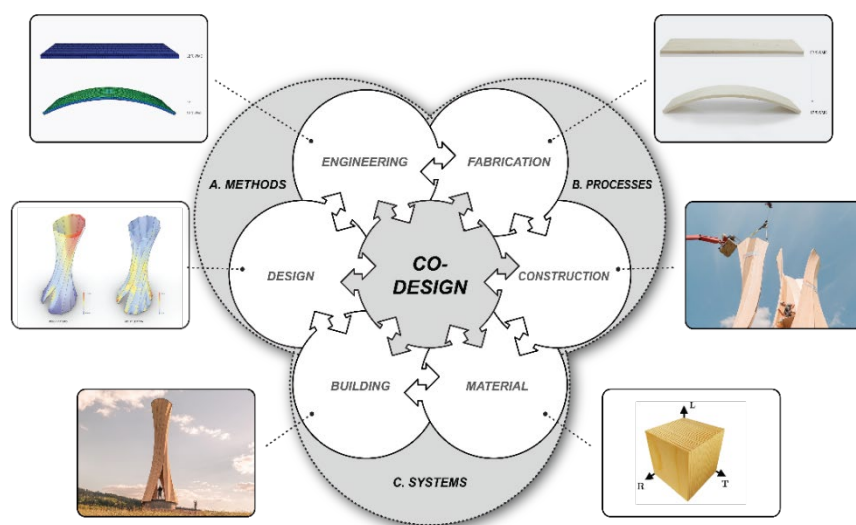


Abbildung 15: Co-Design des Urbach Turms, dass die Integration der Modellierung der Holzwerkstoffmechanik und neuartiger selbstformender Fertigungsverfahren in den digitalen Planungs-, Konstruktions- und Bauprozess verdeutlicht.

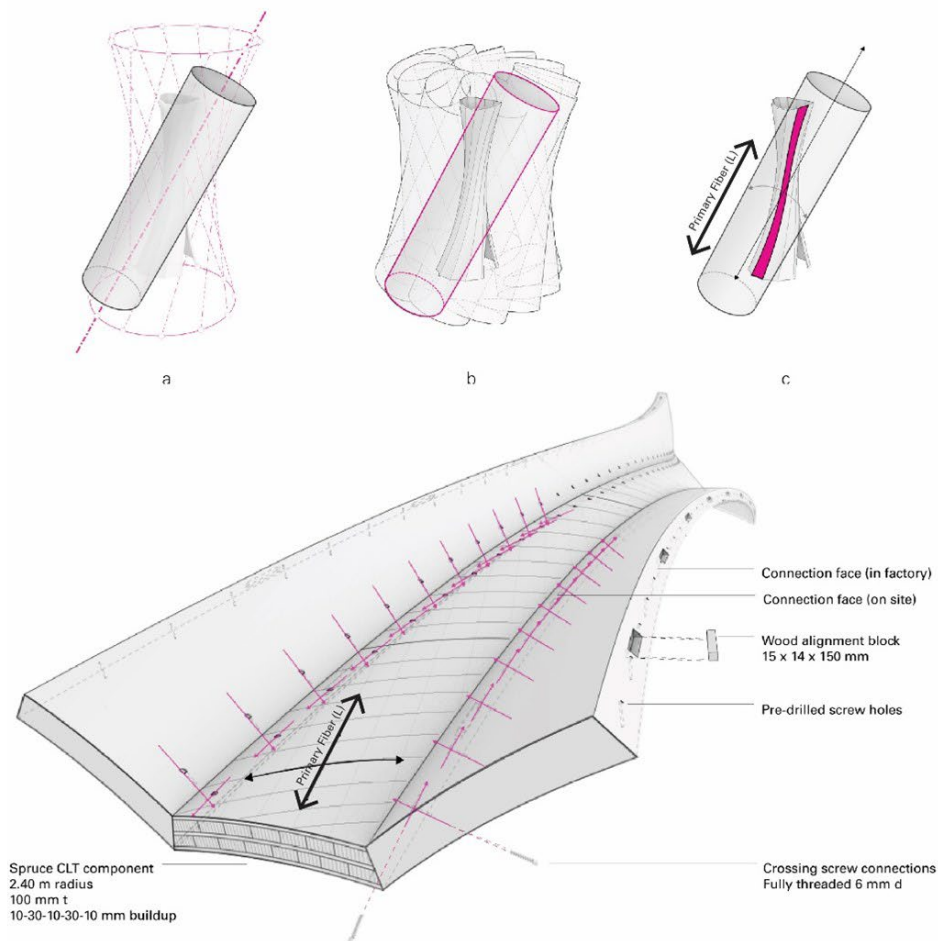


Abbildung 16: Geometrische und konstruktive Systeme für den Urbach Turm [12].



Abbildung 15: Montage der dünn-schaligen, gebogenen Komponenten des Turms vor Ort.

Der Einsatz von digitalem Design, sowie dessen Erweiterung um neue Facetten der Holzwerkstoffkunde, der Bautechnik und des Fachwissens der Handwerker stellen einen Paradigmenwechsel in der Art und Weise dar, wie Holzwerkstoffe und ihre spezifischen Eigenschaften in den Bauprozess integriert werden können. Die neuen digitalen Entwurfs- und Selbstformungsmethoden tragen dazu bei, viele der traditionellen Hindernisse bei der

Herstellung von gebogenen Holzbauteilen zu überwinden. Sie ermöglichen eine stärkere Krümmung mit dickeren Lamellen, eine Verringerung der Rückstellkräfte, den Wegfall von Negativschalungen, eine geringere Menge an korrigierender Oberflächenbearbeitung und weniger Produktionsschritte [13]. Das integrierte Potential dieser Methode konnte nur durch das rigorose Überdenken des Produktionsprozesses, unter Rücksichtnahme eines tiefgehenden, digitalen Verständnisses des Materials, nutzbar gemacht werden [14]. In diesem Fall ist es nur durch die Entwicklung interdisziplinärer und industrieller Synergien möglich, neue und nachhaltige Methoden des digitalen Bauens zu entdecken.

4. Co-Design Ausblick: Forschung des interdisziplinären Exzellenzclusters IntCDC

Die drei vorgestellten Beispiele demonstrieren auf unterschiedliche Weise die Potenziale des eingangs beschriebenen Ansatzes von Co-Design im Holzbau und werden thematisch weitergeführt.

Die im Rahmen des IBA-Prototypenhauses entwickelte Gebäudehülle wird an eine mehrgeschossige Nutzung angepasst, die eine Reihe neuer Herausforderungen und konstruktiver Möglichkeiten mit sich bringt. Zu den Forschungspartnern gehören Experten für Zerspanungstechnik, Bauphysik, Akustik, Statik, Detailplanung und Brandschutz. Durch eine Reihe von Berechnungen, Simulationen und physikalischen Messungen sollen die bauphysikalische Leistung, die statische Leistungsfähigkeit und die Fertigungseffizienz verbessert werden, um ein wirtschaftlich tragfähiges Gebäudehüllensystem zu entwickeln. Die Forschungsarbeiten zielen darauf ab, das System für mehrstöckiges Bauen einsetzen zu können.

Das für die Bundesgartenschau entwickelte Leichtbausystem für Segmentierte Holzschalen wird in weiteren Bauwerken zum Einsatz gebracht und dafür kontinuierlich optimiert und an neue Fertigungskonzepte angepasst. Das System wird vor allem hinsichtlich Akustik, Wärmedämmung, Bauphysik und Kosteneffizienz weiterentwickelt – um einen breitgefächerten Einsatz in permanenten Gebäuden zu erleichtern.



Abbildung 18: Die neue modulare Fertigungsplattform im Einsatz im Larg Scale Construction Labor (LCRL) Waiblingen.

Das Plattformbasierte Konzept flexibler Vorfabrikation, dass MIT der TIM Plattform erstmals getestet wurde, ist im Rahmen des Exzellenzclusters IntCDC durch vier neue Module erweitert und dadurch eine vollumfängliche Modulare Modellfabrik entwickelt worden, die flexibel und projekt-basiert weltweit in existierenden Vorfertigungshallen betrieben werden kann. Anstatt Modularer Bausysteme stellt dieser Ansatz Modulare Fertigungsplattformen in den Vordergrund und soll damit dem Holzbau projekt-basierte Möglichkeiten zur digitalen Fertigung zu ermöglichen.

Auch die selbstformende Methode für stark gekrümmte CLT-Bauteile wird bereits für weitere, tragende Anwendungen erforscht, zum Beispiel für die Herstellung von Windkrafttürmen, Masten, gewölbten Dach- und Deckenkonstruktionen und gekrümmten Scherwänden, bei denen Holzwerkstoffe eine umweltfreundliche Alternative zu konventionellen geformten Materialien wie Beton oder Kohlefaserverbundwerkstoffen darstellen. Parallel dazu wird selbstformendes Holz als Methode der nächsten Generation der Fertigbauweise eingesetzt, bei der die Komponenten in flachen Konfigurationen hergestellt und transportiert werden und sich erst vor Ort selbständig formen können. Übergreifend fließen Erkenntnisse aller hier beschriebenen Projekte in die Themenschwerpunkte des DFG Exzellenzclusters IntCDC an der Universität Stuttgart ein. Hier werden digitale und integrative Methoden, Systeme und Prozesse für den Holzgeschoßbau erforscht. Durch die Entwicklung von adaptiven, flexiblen, digital geplanten und gefertigten Holzleichtbau-Geschoßdeckensystemen sollen dem Holzbau hier neue Bautypologien eröffnet werden.

5. Referenzen

- [1] J. Knippers, C. Kropp, A. Menges, O. Sawodny, and D. Weiskopf, «Integratives computerbasiertes Planen und Bauen: Architektur digital neu denken,» Bautechnik, 2021.
- [2] O. Bucklin, H. Drexler, O. Krieg, A. Menges: 2018, Integrated Solid Timber: a Multi-Requisite System for the Computational Design, Fabrication, and Construction of Versatile Building Envelopes, in ACADIA – Recalibration: on Imprecision and Infidelity [Proceedings of the ACADIA Conference 2018], Universidad Iberoamericana, Mexico City, pp. 424-433. (ISBN: 978-0-692-17729-7)
- [3] O. Bucklin, A. Menges, H. Drexler, T. Haag: 2020, Development of a Mono-Material Wood Wall System: Activating Digitally Fabricated Air Cavities for High-Performance Solid Timber Construction. Technology|Architecture + Design 4:2 Matter (doi:10.1080/24751448.2020.1804760)
- [4] O. Bucklin, A. Menges, O. Krieg, H. Drexler, A. Rohr, F. Amtsberg: 2021, Mono-Material Wood Wall: Digital Fabrication of Performative Wood Envelopes. Journal of Facade Design and Engineering, 9(1). (DOI: 10.7480/jfde.2021.1.5398)
- [5] M. Alvarez et al., «The BUGA Wood Pavilion – Integrative interdisciplinary advancements of digital timber architecture,» in Ubiquity and Autonomy – 39th ACADIA Conference 2019, Austin, USA, 2019, pp. 490–499.
- [6] D. Sonntag et al., «Lightweight segmented timber shell for the Bundesgartenschau 2019 in Heilbronn,» in Form and Force: Proceedings of the International Association for Spatial Structures Annual Symposia 2019 Barcelona, 2019, no. October, pp. 1–8.
- [7] H. J. Wagner, M. Alvarez, A. Groenewolt, and A. Menges, «Towards digital automation flexibility in large-scale timber construction: integrative robotic prefabrication and co-design of the BUGA Wood Pavilion,» Constr. Robot., vol. 4, no. 3–4, pp. 187–204, Dec. 2020.
- [8] H. J. Wagner, M. Alvarez, O. Kyjaneck, Z. Bhiri, M. Buck, and A. Menges, «Flexible and transportable robotic timber construction platform – TIM,» Autom. Constr., vol. 120, p. 103400, Dec. 2020.
- [9] H. J. Wagner, S. Aicher, L. Balangé, U. Basalla, V. Schwieger, and A. Menges, «Qualities of the Unique: Accuracy and Process-Control Management in Project-based Robotic Timber Construction,» in World Conference on Timber Engineering 2021 – WCTE 2021, 2021.
- [10] D. Wood et al., «From Machine Control to Material Programming: Self-Shaping Wood Manufacturing of a High Performance Curved CLT Structure – Urbach Tower,» in FABRICATE 2020: Making Resilient Architecture, London, UK, 2020, pp. 50–57. [Online]. Available: <https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/10094460/1/Fabricate-2020.pdf>
- [11] D. Wood, Material Programming for Fabrication – Integrative Computational Design for Self-Shaping Curved Wood Building Components in Architecture: University of Stuttgart, 2021.

- [12] L. Aldinger, S. Bechert, D. Wood, J. Knippers, and A. Menges, «Design and Structural Modelling of Surface-Active Timber Structures Made from Curved CLT - Urbach Tower, Remstal Gartenschau 2019,» in *Impact: Design With All Senses*, C. Gengnagel, O. Baverel, J. Burry, M. Ramsgaard Thomsen, and S. Weinzierl, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 419–432.
- [13] S. Bechert, L. Aldinger, D. Wood, J. Knippers, and A. Menges, «Urbach Tower: Integrative structural design of a lightweight structure made of self-shaped curved cross-laminated timber,» *Structures*, vol. 33, pp. 3667–3681, 2021, doi: 10.1016/j.istruc.2021.06.073.
- [14] P. Grönquist, D. Wood, M. M. Hassani, F. K. Wittel, A. Menges, and M. Rüggeberg, «Analysis of hygroscopic self-shaping wood at large scale for curved mass timber structures,» *Science Advances*, vol. 5, no. 9, eaax1311, 2019, doi: 10.1126/sciadv.aax1311.

6. Danksagung

Die hier vorgestellte Forschung wird teilweise gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen der Exzellenzstrategie des Bundes und der Länder – EXC 2120/1 – 390831618

ⁱDie hier dargelegte Bedeutung der zwei Begrifflichkeiten basiert auf einem der treffendsten Texte zu deren Abgrenzung im Kontext digitaler Entwurfs- und Planungsmethoden: Terzidis, Kostas: *Algorithmic Architecture*; Elsevier Architectural Press, Oxford, 2006, S. XI.

ⁱⁱ Eine historische Herleitung und differenzierte Darlegung von *Computation* in Wechselwirkung mit architektonischem Entwurfsdenken anhand ausgewählter Texte von 1806 bis 2010 findet sich in unserer Schriftensammlung: Menges, A., Ahlquist, S. (eds.): 2011, *Computational Design Thinking*, John Wiley and Sons, London.

ⁱⁱⁱ Eine kompakte technische und konzeptionelle Darlegung von *Computational Construction* ist zum Beispiel folgendem Text zu entnehmen: Menges, A.: 2015, *The New Cyber-Physical Making in Architecture – Computational Construction*, Architectural Design, Vol. 85 No. 5, Wiley, London, S. 28-33.

^{iv} Diese Einführung ist angelehnt an die generelle Darlegung in: Menges, A.: 2018, Digitalisierung und Normierung, in ARCH+ 233: Norm-Architektur, ARCH+, Berlin, pp. 110-111.