Digitale Fabrikation:
Was bringt uns die Zukunft?

Hans Jakob Wagner
Institut für Computerbasiertes Entwerfen und Baufertigung
Stuttgart, Deutschland



Digitale Fabrikation: Was bringt uns die Zukunft?

1. Einleitung

Holzbau bietet die einmalige Chance zwei der größten Zukunftsfragen mit derselben Antwort in den Griff zu bekommen [1]. Durch hohe Vorfertigungspotenziale und guter maschineller Bearbeitbarkeit setzt Holz einerseits die Latte für schnellen, qualitativen Bau von dringend benötigten leistbaren Neubauten hoch [2]. Doch auch in Klimafragen hat der moderne Holzbau einiges zu bieten. Weltweit wird das Potenzial von verbautem Holz als globale Karbondioxid-Senke entdeckt und auch die Politik zieht mehr und mehr mit [3]. Diese Punkte würden ein explosionsartiges Wachstum der Holzbaubranche erwarten lassen. Aber während in Amerika Milliarden in die Technologie gesteckt werden und die Politik hierzulande *Holzbau Offensiven* ausruft, gibt es bei den zurzeit weiterhin führenden Unternehmen der Branche in Zentraleuropa abseits zwar guter aber inkrementellen und kleinmaßstäblichen Weiterentwicklungen scheinbar keinen sichtbaren Handlungswillen zu mutigen nächsten Schritten. Die Zeit ist zu knapp um hier ohne große Ansagen und kollektiven, vereinenden Zielen in bescheidenen Schritten Marktanteile weiterhin in Prozentbruchteilen zu rechnen.

Herausforderungen für den umfassenden Ausbau des Holzanteils im Baubetrieb sind allerdings zugegebenermaßen schnell gefunden: Es mangelt an preiswertem Rohmaterial sowie an Personal in Form von Fach- als auch Hilfskräften. Aller Voraussicht nach, werden sich beide dieser Engpässe auch in Zukunft nicht lockern. Die Situation könnte sich viel eher noch drastisch verschlechtern. Was sind also die Zukunftsaussichten des Holzbaus? Bleibt er weiterhin ein Nischenmarkt? Muss sich die globale Bevölkerung andere Wege zu Ihrem *Glück* suchen? Oder schafft es der technologisch fortschrittlichste Teil der Bauindustrie mit mutigem Blick nach vorne - kontinuierlich weitere innovative Meilensteine zu setzen? Die Chance liegt vielleicht gerade darin, die oben beschriebenen Herausforderungen nicht als Hindernis, sondern als unumgängliche Vorboten der Zukunft anzuerkennen.



Abbildung 1: Der BUGA Holzpavillon spannt 30m über den zentralen Veranstaltungsbereich auf der Bundesgartenschau Heilbronn 2019. Aktuell ist angedacht, den Pavillon nach Mannheim zu übersiedeln. (ICD/ITKE Universität Stuttgart)

Seit etwas mehr als 10 Jahren werden am Institut für Computerbasiertes Entwerfen und Baufertigung der Universität Stuttgart gemeinsam mit interdisziplinären Partnern aus Architekten, Bauingenieuren, Biologen, Informatikern und Materialwissenschaftlern – Möglichkeiten und Potenziale für den Holzbau der Zukunft erforscht. In Anbetracht der oben ausgeführten Herausforderungen drehen sich die relevantesten Forschungsbemühungen

um zwei Fragen: Wie können wir mit weniger Material, stärkere Gebäudestrukturen bauen? [4] Und: Wie kann die Herstellung der Bauelemente, der Verbindungsdetails sowie die Bauplanung komplexer Strukturen in weiten Teilen durch Einsatz computerbasierter Planungswerkzeuge sowie robotischen Fertigungsmethoden automatisiert werden? [5]



Abbildung 2: Seit 10 Jahren wird an der Universität Stuttgart an dem Holzbau der Zukunft geforscht. (ICD/ITKE Universität Stuttgart)

Das Ziel dieses Beitrags ist es, zuerst die Chronologie der Entwicklungen im Feld des robotischen Holzleichtbaus an der Universität Stuttgart anhand von zwei bedeutenden Projekten zusammenzufassen. Anschließend folgt eine selbstkritische Reflektion, die der Frage nachgeht wieso jahrelange Forschungsleistung und -Entwicklung, ausgenommen einiger preisgekrönter Einzel-Bauwerke, den Einzug in den allgemeinen Kanon der Bausysteme und Fertigungsmaschinen des Holzbaus noch nicht geschafft hat.

Seit letztem Jahr wird das Thema Digitaler Holzbau an der Universität Stuttgart innerhalb des Exzellenz-Clusters «Integratives Computerbasiertes Planen und Bauen für die Architektur» noch weiter ins Zentrum gerückt. Hier arbeiten gegenwärtig interdisziplinäre Forschungsteams von mehr als zehn Instituten innerhalb eines Netzwerks von 10 verknüpften Forschungsprojekten daran, die Entwicklungen der letzten Jahre in einem multi-skalaren Ansatz weiterzuführen [6]. Der Fokus liegt hier nun ganz bewusst auf dem (Holz-) Geschoßbau – als meistbenötigter Gebäudetypologie. Die hier identifizierten nächsten Schritte, angepeilten Trajektorien und explorativen Forschungsideen werden abschließend kurz vorgestellt. Zur effektiven Umsetzung ist nicht nur auf Ebene der Wissenschaft ein kollektiver Ansatz von integrativem Planen von Bedarf. Der Austausch und die Abstimmung mit allen Akteuren im Bauwesen muss im Bereich der digitalen Technologien weiter ausgebaut werden. Nur so wird es möglich sein, gemeinsam Systeme, Netzwerke und Technologien aufzubauen, welche die an den Universitäten erzielten Forschungsentwicklungen zur breiten Anwendung führen können.



Abbildung 3: Forschung erlaubt die explorative Entwicklung zukunftsfähiger Bausysteme und Fertigungsprozesse. Nach 10 Jahren stellt sich die Frage der Einführung in die Industrie. (Foto: ICD/ITKE)

2. Integrative Weiterentwicklung von robotisch gefertigten Holzleichtbausystemen: Beispiel Segmentschalen

Es ist inzwischen allgemein bekannt, dass eine Rückkehr zu formaktiven Tragwerken, bekannt von gotischen Kathedralen, und Baumeistern wie Gaudi, Isler, Candela und Frei Otto, die Materialeffizienz drastisch erhöhen kann. Entwicklungen im Zuge unverhältnismäßig günstiger Energieträger machten im 20. Jahrhundert die Herstellung von Zement so günstig, dass die Arbeitsstunden der Baustellenarbeiter die maßgebliche Kennzahl der Baukosten wurden. Materialsparendes Bauen rückte daher erst mit Aufkommen der Nachhaltigkeitsdebatte zurück in den Fokus. Dieses Thema nutzt auch dem Holzbau. Doch auch hier kann mit der Einführung der Massivbauweise eine ähnliche Entwicklung festgestellt werden, die vorerst enorme Vorteile der einfachen Planbarkeit und erhöhte Redundanz des statischen Systems mitbringt [7]. Die Massivbauweise schlägt hohe Wellen, und veranlasst vor allem Feuerschutzexperten Holzbauweisen neu einzuschätzen. Dass allerdings zwei Drittel der Kosten eines Brettsperrholzelements direkt aus dem Materialrohpreis zusammengesetzt sind, zeigt deutlich auf welche Rohstoffabhängigkeit diese Bauweise mit sich bringen.
Ein gutes Beispiel dafür, wie flächige Bauteile höchste Stabilität bei geringem Materialeinsatz erreichen können, sind segmentierte Schalen. Die Grundidee hat sich in der Evolution der Plattenskelette des Seeigels durchgesetzt und ihr statisches System wurde bald von Architekten, Biologen und Tragwerksplanern in den Architekturmaßstab transferiert. Grundsätzlich lässt sich hier eine bausystem-übergreifende Analogie zu Tragwerkssystemen postulieren: Je differenzierter die Struktur ausgeformt wird, desto weniger Material ist von Nöten um die gleiche Leistungsfähigkeit zu erreichen. Auf Basis dieses Prinzips wurden im Rahmen mehrjähriger, interdisziplinärer Forschungsprojekte zwei Demonstrator-Bauwerke umgesetzt.

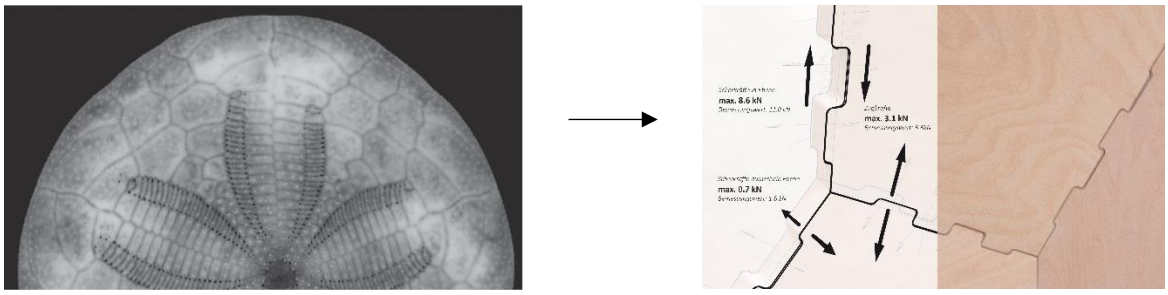


Abbildung 4: Mit Fingerzinken verbundene Platten Segmente verleihen dem Skellett des Sanddollars seine herausragende Festigkeit. Das selbe Prinzip kann beim Bau von Holzsegment schalen in den Maßstab der Architektur transferiert werden. (ICD/ITKE Universität Stuttgart)

2.1. Der LAGA Forstpavillon 2014

Der Forstpavillon wurde 2014 in Schwäbisch Gmünd im Rahmen der Landesgartenschau eröffnet. Seine Struktur besteht aus Buchensperrholz-Segmenten welche mit Fingerzinken schubsteif wie ein dreidimensionales Puzzle zusammengefügt wurden [8][9]. Schwerpunkte der Forschung waren neben dem regionalen Bezug des Materials vor allem die agentenbasierte Modellierung der komplexen Geometrie der Schale sowie die robotische, subtraktive Fertigung der Schalensegmente. Das Bauwerk spannt 10m weit über eine Innenraumfläche von 125m². Die tragende Struktur besteht aus 50mm dünnen Buchensperrholzplatten was sich zu einem Materialgewicht von nur 38kg/m² Schalenfläche addiert. Schon in der Planung der Schale wurden mittels der agentenbasierten Modellierung wichtige Fertigungsparameter im System berücksichtigt [10]. So wird sichergestellt, dass alle Bauteile schlussendlich mit der robotischen Fräszelle - die in der Fabrikationshalle der Müller Blaustein Holzbauwerke installiert wurde – fertigbar sind. Der Steuerungscode für die Maschinen wurde direkt aus dem computerbasierte Entwurfsmodell erzeugt. In solch durchgehend digitalen Prozess ist die Standardisierung von Bauelementen eines Bausystems nicht mehr erforderlich. Jedes Bauteil der segmentierten Schale konnte daher vollautomatisiert in Losgröße 1 ohne Mehraufwand im Fertigungsprozess gefertigt werden.

Einen Schwachpunkt dieses Tragwerks stellte allein das Verbindungsdetail dar. Zwar waren die Fingerzinken – basierend auf dem biologischen Vorbild [11] – gut geeignet die in der Schale maßgeblichen Schubverbindungen in der Schalenfläche aufzunehmen. Doch konnten Einzellastfälle und horizontale Beanspruchungen der Schale durch zum Beispiel Wind nicht ausgeschlossen werden. In diesen Fällen treten auch in formaktiven Tragwerken geringe Momentkräfte auf – vor allem bei leichten Holzschalen. Diese Kräfte machten zusätzliche Kreuzschraubenverbindungen notwendig, welche wiederum die Dicke des Plattenmaterials maßgeblich beeinflussten.



Abbildung 5: Die charakteristischen polygonalen Plattenumrisse, die sich aus der agentenbasierten Generierungsmethode ergeben, prägen Außenraum und Innenraum Landesgartenschaudemonstrators 2014.

2.2. Der BUGA Holzpavillon 2019

Für die Weiterentwicklung dieses erfolgreichen Bausystems, wurde in den Jahren zwischen 2014 und 2019 ein Hohlkassetten Segment entwickelt [12]. Es folgt den gleichen globalen Entwurfs-Prinzipien wie der Landesgartenschau Forstpavillon. Allerdings werden die massiven Platten in verklebte und hohle Holzkassetten aufgelöst. Hierfür wird zwischen zwei Kassettenplatten ein Ring an Randbalken eingeklebt. Durch eine Montageöffnung an der Kassettenunterseite können die Kassetten dann von Balken zu Nachbarbalken mittels wieder lösbarer Bolzen verbunden werden. Durch die größere statische Höhe entsteht eine wesentlich stärkere Biegemoment resistente Verbindung. Weiters ist das System ab- und wiederaufbaubar [13]. Der mit diesem System geplante BUGA Holzpavillon zeigt mit der dreifachen Spannweite bei gleichbleibendem Flächengewicht eine enorme Leistungssteigerung [14]. Die 600m² große Schale spannt 30m über einen flexiblen Veranstaltungsbereich. Die Konstruktion wiegt mit 38kg/m² gleich viel wie der Forstpavillon – was mitunter auch auf den Wechsel zu Fichtenfurnierschichtholz zurückzuführen ist.

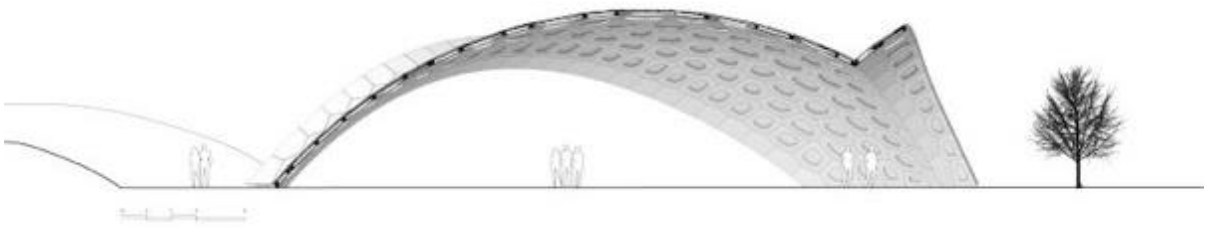


Abbildung 6: Der BUGA Holzpavillon spannt durch aufgelöste Kassettenstruktur dreimal weiter obwohl die gleiche Menge Material pro Schalenfläche verbaut wurde. (ICD/ITKE Universität Stuttgart)

Jedes Segment des Pavillons besteht nicht mehr aus einer geometrisch komplex geschnittenen Platte, sondern muss vor dem Fräsvorgang aus im Schnitt 8 Einzelbauteilen assembliert werden. Die 376 geometrisch einzigartigen Kassettensegmente mussten also aus 752 Platten und 2168 Balken zusammengefügt werden. Anschließend mussten 17000 Fingerzinken mit variablen Maßen gefräst sowie 5295 Passbolzenlöcher zehntelmillimetergenau gebohrt werden. Die Leistungssteigerung des Systems bedingt im Schluss also einen Fabrikationsaufwand, der mit herkömmlichen, manuellen Fertigungsmethoden nicht wirtschaftlich abbildbar ist. Gleichermaßen sind herkömmliche Konzepte der robotischen Fabrikation schwer möglich: Das Verkleben der Bauteile macht nach DIN die Fertigung im

Betrieb zwingend notwendig und der Leimauftrag muss gezielt nur an dünnen Streifen auf den Rändern der jeweiligen Platten erfolgen. Mitunter aus dem Grund, dass der Holzbaubetrieb Bedenken hatte, eine stationäre robotische Anlage in seinen Hallen aufzustellen, entschied man sich für eine flexible Lösung. Zwei Schwerlast-Industrieroboter mit jeweils 500kg Nutzlast wurden auf einen transportierbaren 20 Fuß Containerboden geschraubt, mit den notwendigen Werkzeugen ausgestatte, zu dem Betrieb geliefert und dort mittels Stapler vom LKW direkt in der Halle abgesetzt.

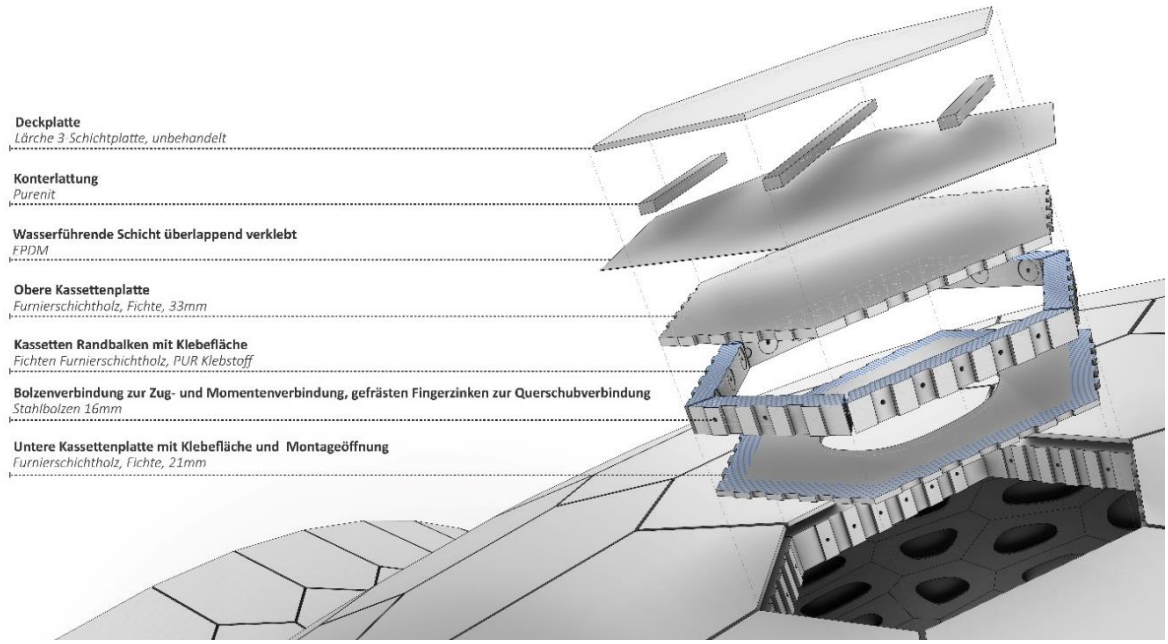


Abbildung 7: Explosionszeichnung eines Holzkassettensegments des BUGA Holzpavillons.

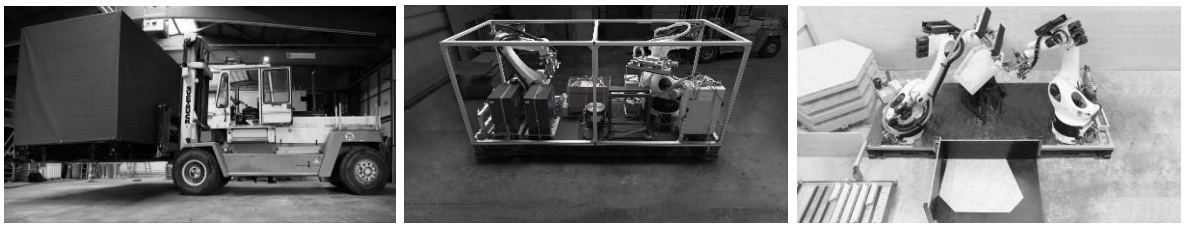


Abbildung 8: Die transportable Roboterplattform wird mit dem Gabelstapler in der Halle des Holzbauers abgesetzt. Dort aufgebaut starten die Roboter die Fügung von Kassettensegmenten.

Das Roboter-Setup ist mit einer Vielzahl von Werkzeugen für konventionelle Holzbaubearbeitungen ausgerüstet. Ein Handhabungs-Arm ist mit Vakuumgreifer, Parallelgreifern einer ins Automations-System eingebundenen Kamera und Prozessüberwachungssensoren ausgestattet. Der zweite Roboter ist mit Klebstoffapplikationskopf, Nagelpistole und Motorspindel für die tatsächlichen Bearbeitungen zuständig. Ein zentraler Drehkipptisch ist mit Vakuumspannern ausgestattet welche ebenfalls direkt an die Robotersteuerung angebunden sind.



Abbildung 9: Nach dem Auftragen von Klebstoff, werden Balken robotisch gefügt und mit Buchennägeln fixiert. Eine Deckplatte schließt den Kassettenrohling bevor er in der Presse abgelegt wird.

Für die Herstellung der geklebten Kassetten werden zuerst die Plattenrohlinge auf den Zentralen Bearbeitungstisch gehoben und dort mit den Vakuumspannern eingespannt. Nun wird in 8cm breiten Streifen einkomponentiger PUR Klebstoff durch die Roboter appliziert. Balken werden aus dem Einspeisungswagen gegriffen und auf die mit Klebstoff vorbereitete Fläche gedrückt, während der zweite Roboter den Balken mit zwei Buchennägeln fixiert. Nachdem alle Balken gefügt wurden, wird eine zweite Lage Klebstoff auf den Balkenring appliziert. Die Deckplatte wird aufgesetzt und ebenfalls mit Nägeln fixiert. Der bis zu 2.7m im Durchmesser und 150kg schwere Kassettenrohling wird nun vom Bearbeitungstisch direkt in die Presse gehoben. Mitarbeiter des Holzbauunternehmens legen nun Zwischenlagen in die Presse und schließen diese nachdem jeweils eine Gruppe aus vier Kassetten zusammengebaut wurde. Nach dem Pressen werden die Kassettenrohlinge von den Robotern zurück auf den zentralen Tisch gehoben und dort von allen Seiten vollautomatisch besäumt.

Obwohl für die Konzeption und Umsetzung dieser Fabrikationsanlage nur wenige Monate zur Verfügung standen, konnte die robotisch Fertigung mitunter sehr gute Taktzeiten erreichen und arbeitete bis auf Einzelfälle weitestgehend ohne Unterbrechung. Das robotische Zusammensetzten der Kassetten benötigte mit den Robotern durchschnittlich nur 7 Minuten. Die fristgerechte, bauaufsichtlich zugelassene und höchstgenaue Herstellung des Bundesgartenschaupavillons setzte so neue Maßstäbe in der robotischen Fertigung im Holzleichtbau.



Abbildung 10: Aufbau vor Ort: Durch die maßgenaue Vorfertigung wird der Pavillon wie ein dreidimensionales Puzzle in wenigen Tagen ohne Leergerüst von zwei Handwerken zusammengesetzt.

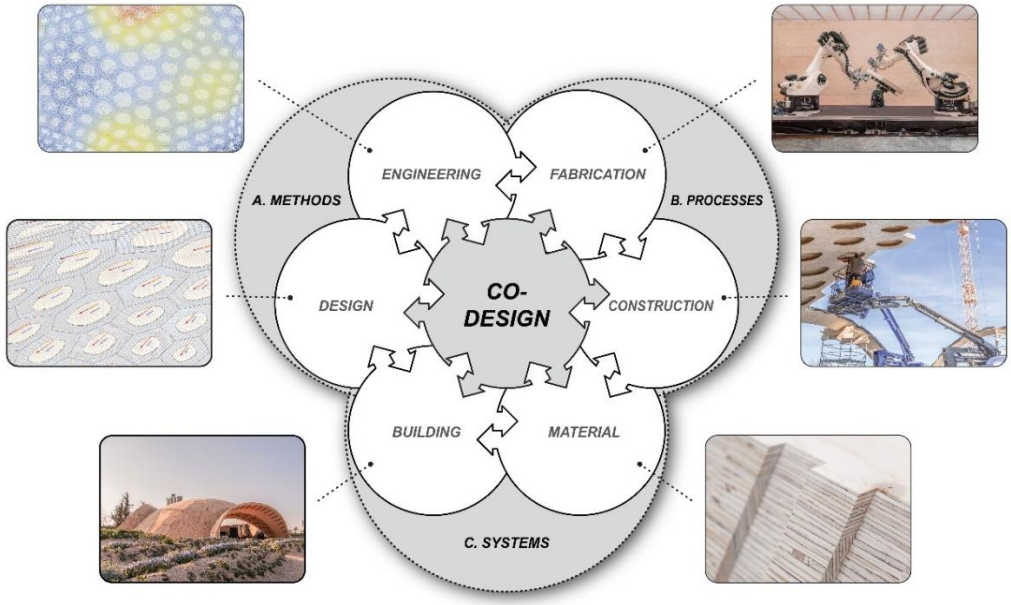


Abbildung 11: Nur durch integratives und kooperatives Planen und denken lässt sich das Maximum aus digitalen Technologien im Rahmen der Co-Design-Methodologie erreichen.

3. Diskussion

3.1. Standardisiertes Bauen als Nischenmarkt

Durchgehend digitale Planung und weitgehend automatisierte / robotische Fertigung wird oft mit Standardisierungsmaßnahmen in Verbindung gebracht. Zugegebenermaßen, findet man die höchsten Automatisierungs-Level abseits von Forschungsprojekten immer noch bei Fertighausherstellern. Aber auch neue Player mit plattform-basierten Ansätzen [15] wie Katerra lassen sich Hallen mit robotischen Fertigungsanlagen bestücken [16]. Auch im klassischen Modul-Bau lassen sich relativ schnell breite Betätigungsfelder für robotische Unterstützung finden. Wenn man aber den neuesten Zahlen des McKinsey Instituts Glauben schenkt, lässt sich nur ein bescheidener Anteil von ca. 13.5% der Neubauten effektiv mit Standardisierung und modularem Bauen abdecken [17]. Der weit größere Anteil der Baumaßnahmen wird also maßgeschneidert gefertigt werden müssen. Welche Möglichkeiten dabei auch hier mit durchgehend digitalen Informationsflüssen und der robotischen Fertigung in Losgröße 1 bestehen, wurde mit dem BUGA Wood Pavillon eindrücklich vorgezeigt. Wie die entwickelten Technologien allerdings systematisch, und auch abseits von Forschungsprojekten wiederverwendet werden können bleibt zu erforschen.

3.2. Gesellschafts-intrinsisches Gestaltungsbedürfnis

Nicht zu Letzt ist das Planen unserer gebauten Umwelt eine zutiefst sozial-kommunikative Aufgabe. Es bedarf bedachter Rücksichtnahme auf Bedürfnisse verschiedenster Akteure für die Entwicklung von Ideen und den Einbezug lokaler Randbedingungen. Begreift man das Planen und Bauen als gesamtgesellschaftliche, gar kommunikative Herausforderung, wird bald klar, dass die Vorteile die Standardisierung mit sich bringt eine dunkle Kehrseite hat. Welche Bauweisen sind der regionalen Kultur, den lokalen Randbedingungen und den persönlichen Wünschen des Bauherrn am ehesten gerecht? Wie möchten regionale Gemeinschaften Ihre Lebensumwelt gestalten? Diese Fragen sind so eng mit persönlichen Lebensfragen verbunden, dass sie sich schwer nach vordefinierten Schemata beantworten lassen. Dabei braucht man noch gar nicht von Bodetragfähigkeit, Lokalen Schneelasten etc zu sprechen. Wer den Holzbau der Zukunft gestalten will, wird weiterhin davon ausgehen müssen, dass Gebäude Einzelanfertigungen sind. Robotische Fertigungssysteme haben nicht die Aufgabe dies zu ändern, sondern werden sich daran genauso anpassen müssen wie Abbundmaschinen es heutzutage schon leisten – Bausystemübergreifende Fertigungsschritte mittels digital integrierter Maschinenansteuerung von Einzelfall zu Einzelfall immer mit hoher Qualität zu meistern.

3.3. Projektbasierte Fertigung

Wenn man von Digitalisierung und Automatisierung spricht, muss man oft klarstellen, dass dies Werkzeuge sind, die nicht grundsätzlich gewachsene Strukturen ersetzen möchten – und es auch keinen Grund zur Sorge für Handwerker gibt. Die Erfahrung zeigt, dass vor allem dann gute Lösungen erzielt werden, wenn Tradition mit Computer und Roboter verschmilzt. In der Subtraktiven (CNC) Bearbeitung laufen Digitalisierung und Handwerk schon seit Jahren Hand in Hand und es werden dadurch neue Möglichkeiten erarbeitet. Das Integrative Arbeiten wird auch für robotische Bearbeitung im Holzbau weiterhin der Schlüssel zum Erfolg sein. Um solch eine nahtlose Kooperation zwischen Mensch und Maschine zu ermöglichen, müssen Maschinen flexibel gedacht, organisiert und betrieben werden. Agilität und Anpassungsfähigkeit sind im Bauwesen ein überlebenswichtiger Faktor. Verzögerte Materiallieferungen, Planungsänderungen, Wetter und sonstige Faktoren können die am besten geplanten Fertigungsterminierung nutzlos machen. Erfolgreiche Baubetriebe müssen in Zukunft auch mit automatisierten Fabrikationssystemen in der Lage sein, Engstellen auszuweichen und Arbeitsabläufe zeitlich, räumlich und personell flexibel zu gestalten.



Abbildung 12: Nur durch integratives und kooperatives Operieren mit der Industrie kann Grundlagenforschung an den Universitäten den Bezug zu Baufertigung behalten.

Hier konnte mit der transportierbaren Roboterplattform TIM und der ersten Produktions-Fallstudie ein erstes Konzept vorgelegt werden. Für Holzbaubetriebe am relevantesten ist hier, dass die flexible Einbindung der Robotik in die Arbeitshallen des Holzbauers, Ansätze zur projekt-basierten Robotischen Fertigung aufzeigen. Die Robotik konnte zeitlich begrenzt in die Arbeitsabläufe des Traditionsbetriebs eingebunden werden. Nach Abschluss der Vorfertigung, stand die beanspruchte Halle innerhalb weniger Tage in vollem Umfang für das nächste Projekt zur Verfügung – und die Robotik wird an anderer Stelle eingesetzt. Man möchte fast so weit gehen zu sagen, dass nicht in dem produzierenden Gewerbe, sondern im Bauwesen die wahren Möglichkeiten der vierten Industriellen Revolution begraben liegen. Maschinenhersteller können hier zwar auf einen großen Fundus an Konzepten für die Flexible Produktion aus dem Produzierenden Gewerbe zurückgreifen, es sollte aber allen Beteiligten klar sein, dass die Holzbauindustrie ihr eigenes, intrinsischen Bedürfnissen folgendes Rahmenwerk für digitale Fertigung entwickeln werden muss.



Abbildung 13: Der mit dem 2. Preis prämierte Wettbewerbsbeitrag für das Haus Baden-Württemberg auf der EXPO 2020 in Dubai zeigt mögliche Anwendungsgebiete von Segmentschalen.

3.4. Trajektorien in die Zukunft

Erarbeitete Forschungsergebnisse zeigen (nicht nur an der Universität Stuttgart) große Potenziale der integrativen, computerbasierten Planung und Vernetzung von Fertigungssystemen sowie Bausystemen auf. Essenziell für den Einsatz dieser Technologien wird jedoch sein, direkte Rückkopplungsprozesse zu ermöglichen die auf systemunabhängigen und –übergreifenden Schnittstellen beruhen. Weiters muss noch gezeigt werden, welche Vorteile mit materialsparenden und digital geplanten Bausystemen im Rahmen des Geschoßbaus möglich sind. Ziel wird es hier sein, einerseits zu prüfen, wie Robotik auch direkt auf der Baustelle zur Vorfertigung genutzt werden kann. So könnte man aus Restriktionen der Transportmaße ausbrechen und großmaßstäbliche Bauteile effektiv vorfertigen. Bei allen (notwendigen) Bedenken zu Sicherheit, Feuerschutz und Wirtschaftlichkeit – möchten wir alle Akteure im Holzbau einladen, sich gemeinsame Konzepte für eine Zukunft zu entwickeln in denen das Material Holz den Großteil des Hochbau-Neubaus bedient.

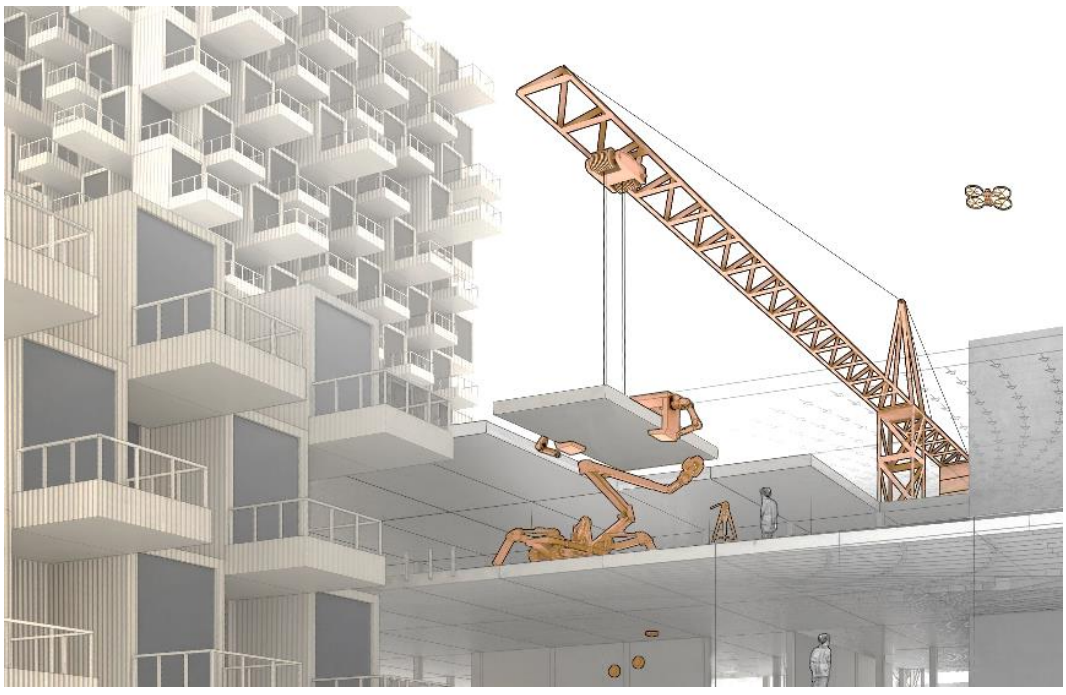


Abbildung 14: Im Rahmen des vor kurzem gestarteten Exzellenz-Cluster «Integratives computerbasiertes Entwerfen und Bauen für die Architektur" wird der Holz-Geschoßbau in den Fokus gerückt.

4. Danksagung

Das Forschungsteam für den Bundesgartenschau Holzpavillon besteht aus Architekten und Ingenieuren der Universität Stuttgart. Am ICD aus Prof. Achim Menges, Martin Alvarez, Abel Groenewolt, Oliver David Krieg, Ondrej Kyjanek und Hans Jakob Wagner. Am ITKE aus Prof. Jan Knippers, Lotte Aldinger, Simon Bechert und Daniel Sonntag. Monika Göbel (ICD) koordinierte die Ausführung.
Der Pavillon wurde realisiert durch eine Kooperation der Universität Stuttgart mit der BUGA Heilbronn 2019 GmbH (Oliver Töllner, Hanspeter Faas) und Müller Blaustein Holzbauwerke (Reinhold Müller, Daniel Müller, Bernd Schmidt). Das Roboter-Setup wurde in einer Kooperation mit BEC GmbH (Zied Bhiri, Matthias Buck) entwickelt. Das Projekt wurde ermöglicht durch Fördermittel des Ministeriums für Wissenschaft und Kunst, des Europäischen Fond für Regionale Entwicklung, der Bundesgartenschau Heibronn 2019 GmbH und GETTYLAB. Die Forschungsarbeiten wurden darüber hinaus teilweise von der Deutschen Forschungsgemeinschaft im Rahmen der Excellenzinitiative – EXC 2120/1 – 390831618 unterstützt.

5. Referenzen

[1] M. H. Ramage *et al.*, "The wood from the trees: The use of timber in construction," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 68, pp. 333–359, Feb. 2017.
[2] S. Krötsch and L. Müller, "The development of multi- storey timber construction," in *Manual of Multistorey Timber Construction*, H. Kaufmann, S. Krötsch, and S. Winter, Eds. München: DETAIL Business Information GmbH, 2018, pp. 10–13.
[3] G. Churkina *et al.*, "Buildings as a global carbon sink," *Nat. Sustain.*, Jan. 2020.
[4] M. Hensel and A. Menges, "Inclusive Performance: Efficiency Versus Effectiveness Towards a Morpho-Ecological Approach for Design," *Archit. Des.*, vol. 78, no. 2, pp. 54–63, 2008.
[5] A. Menges and T. Schwinn, "Manufacturing reciprocities," *Archit. Des.*, vol. 82, no. 2, pp. 118–125, 2012.
[6] ICD, "New Cluster of Excellence EXC 2120: Integrative Computational Design and Construction for Architecture," 2018. [Online]. Available: https://icd.uni-stuttgart.de/?p=24111. [Accessed: 17-Jan-2020].
[7] A. Deplazes, "Holz: indifferent, synthetisch Timber: Indifferent, Synthetic Andrea Deplazes," *DETAIL Magazine*, pp. 22–25, 2000.
[8] O. D. Krieg *et al.*, "Biomimetic Lightweight Timber Plate Shells: Computational Integration of Robotic Fabrication, Architectural Geometry and Structural Design," in *Advances in Architectural Geometry 2014*, vol. 1, no. 11, 2014, p. 379.
[9] J.-M. Li and J. Knippers, "Segmental Timber Plate Shell for the Landesgartenschau Exhibition Hall in Schwäbisch Gmünd—the Application of Finger Joints in Plate Structures," *Int. J. Sp. Struct.*, vol. 30, no. 2, pp. 123–139, 2015.
[10] T. Schwinn, O. D. Krieg, and A. Menges, "Behavioral Strategies: Synthesizing design computation and robotic fabrication of lightweight timber plate structures," *Proc. ACADIA 2014 Des. Agency*, pp. 177–188, 2014.
[11] T. Schwinn, O. D. Krieg, and A. Menges, "Robotically Fabricated Wood Plate Morphologies," *Rob | Arch 2012 Robot. Fabr. Archit. Art Des.*, no. 1, pp. 48–61, 2013.
[12] O. D. Krieg, S. Bechert, A. Groenewolt, R. Horn, J. Knippers, and A. Menges, "Affordances of Complexity : Evaluation of a Robotic Production Process for Segmented Timber Shell Structures," *Proc. 2018 World Conf. Timber Eng.*, pp. 1–8, 2018.
[13] 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.
[14] D. Sonntag *et al.*, "Lightweight segmented timber shell for the Bundesgartenschau 2019 in Heilbronn," in *Form and Force: Proceedings of the International Association for Spactial Structures Annual Symposia 2019 Barcelona*, 2019, no. October, pp. 1–8.
[15] O. D. Krieg and O. Lang, "Adaptive Automation Strategies for Robotic Prefabrication of Parametrized Mass Timber Building Components," in *36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, 2019, pp. 521–528.
[16] M. Marks, "Changing the game : A conversation with Katerra's Michael Marks," *McKinsey Voices on Infrastructure*, 2019. [Online]. Available: https://www.mckinsey.com/industries/capital-projects-and-infrastructure/our-insights/changing-the-game-a-conversation-with-katerras-michael-marks.
[17] N. Bertram, S. Fuchs, J. Mischke, R. Palter, G. Strube, and J. Woetzel, "Modular construction : From projects to products," 2019.