

# Roboterfertigung: Entwicklungen und Tendenzen im Holzbau

Robotic production: developments and trends  
in timber construction

Fabriquer à l'aide de robots : derniers développements  
et tendance dans le domaine de la construction bois

Mitglieder Forschungsprojekt:

Oliver David Krieg, Jan Knippers, Jian-Min Li, Achim Menges, Annette Schmitt,  
Volker Schwieger, Tobias Schwinn

Dipl.-Ing. Oliver David Krieg  
Institut für Computerbasiertes Entwerfen  
DE-Universität Stuttgart





# Roboterfertigung: Entwicklungen und Tendenzen im Holzbau

Als eines der ältesten Baumaterialien der Menschheit ist Holz und dessen Einsatz in der Architektur sowohl gesellschaftlich als auch technisch seit jeher von großer Bedeutung. Während Holz als nachwachsender Rohstoff über viele Jahrhunderte nahezu unverändert blieb, hätte die Einstellung zu einer angemessenen Verarbeitung und Anwendung kaum unterschiedlicher sein können. Obwohl während der Industrialisierung großer Aufwand betrieben wurde um das Material berechenbarer, vorhersagbarer, und homogener zu machen, ist in den letzten Jahren wieder eine erneutes Verständnis des komplexen strukturellen Aufbaus nicht als Defizit, sondern als Potential zu beobachten.

Dieses neue Verständnis von Holz als natürlicher Werkstoff wird nicht zuletzt durch die zunehmende Digitalisierung von Entwurfs- und Fertigungsprozessen in der Architektur ermöglicht. Hier lässt sich seit einigen Jahren der Beginn eines Paradigmenwechsel beobachten, in dem computerbasierte Prozesse alle Facetten nachhaltig verändern – vom Entwurf, über die Planung, bis hin zum Bauen. Dabei führt diese Digitalisierung nicht nur zu einer Effizienzsteigerung bestehender Prozesse, sondern zur Entwicklung von völlig neuen planerischen und herstellungstechnischen Methoden. Durch die Anwendung von computerbasierten Prozessen werden bisher getrennt behandelte Themen enger miteinander verbunden. Anstatt dem bisher strikt hierarchisch gegliederten Entwurfsprozess zu folgen, werden Disziplinen wie Architektur, Statik, Fertigung und Materialwissenschaften schon wesentlich früher in der Planung verknüpft. Nicht nur wird dadurch die Entwicklung von innovativen Konstruktionen möglich, sondern auch eine weitere Effizienzsteigerung und die Verwendung von weniger Ressourcen. Diese Entwicklung unterscheidet sich insofern von der Serienproduktion der Industrialisierung, als dass nicht eine schnellere Fertigung von gleichen Bauteilen, sondern eine ebenso schnelle und kostenneutrale Fertigung von immer unterschiedlichen Bauteilen möglich wird (Losgröße 1). Durch die Verwendung von innovativen Fertigungsmaschinen für die digitale Fertigung von Holzkonstruktionen werden dem Material dadurch völlig neue Anwendungsmöglichkeiten eröffnet, die Gegenstand aktueller Forschung in der Architektur sind. Dabei steht eine materialsparende und effiziente Ausnutzung des Materials durch geometrisch adaptive und flexible Konstruktionssysteme im Vordergrund.



Abbildung 1: Computerbasierter Holzbau: Der Forstpavillon auf der Landesgartenschau.

## 1. Von der Forschung in die Praxis

In diesem Kontext steht der *Forstpavillon* für eine neue Form des Holzbaus. Das prototypische Bauwerk auf der *Landesgartenschau Schwäbisch Gmünd 2014* ist das Ergebnis eines von der EU geförderten Forschungsprojekts der Universität Stuttgart. Es zeigt, wie architektonisch innovative und zugleich besonders ressourcenschonende Konstruktionen aus dem regional verfügbaren und nachwachsenden Rohstoff Buchenholz möglich sind. Im Rahmen des Forschungsprojekts „*Robotik im Holzbau*“ wurde der Forstpavillon an der Universität Stuttgart entwickelt und in Kooperation mit *Müllerblaustein Holzbau GmbH*, *Landesgartenschau Schwäbisch Gmünd 2014 GmbH*, *Landesbetrieb Forst Baden-Württemberg (ForstBW)* und *KUKA Roboter GmbH* realisiert. Bei dem Demonstrationsbau kommt erstmals ein robotisch gefertigtes Leichtbausystem aus Buchensperrholz zur Anwendung, das vom *Institut für Computerbasiertes Entwerfen (ICD, Prof. Achim Menges)*, dem *Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen (ITKE, Prof. Jan Knippers)*, und dem *Institut für Ingenieurgeodäsie (IIGS, Prof. Volker Schwieger)* entwickelt wurde. Der Forstpavillon war Teil der *Landesgartenschau Schwäbisch Gmünd 2014*, wo er von *ForstBW* als Ausstellungsgebäude genutzt wurde. Finanziert wurde das Projekt durch den *Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE)* und dem *Cluster Forst und Holz Baden-Württemberg* sowie durch Mittel der Projektpartner.

Das Projekt ist auch das Ergebnis einer langjährigen Forschung der beteiligten Institute. Die Entwicklung robotisch gefertigter Fingerzinken wurde erstmals im „*ICD/ITKE Forschungspavillon 2011*“ auf dem universitätseigenen Campus prototypisch und vollmaßstäblich angewendet (siehe Abb. 2). Schon bei diesem Projekt spielte die enge Verknüpfung von digitalen Entwurfs- und Fertigungsmethoden, sowie konstruktive Vorbilder aus der Natureine wichtige Rolle.

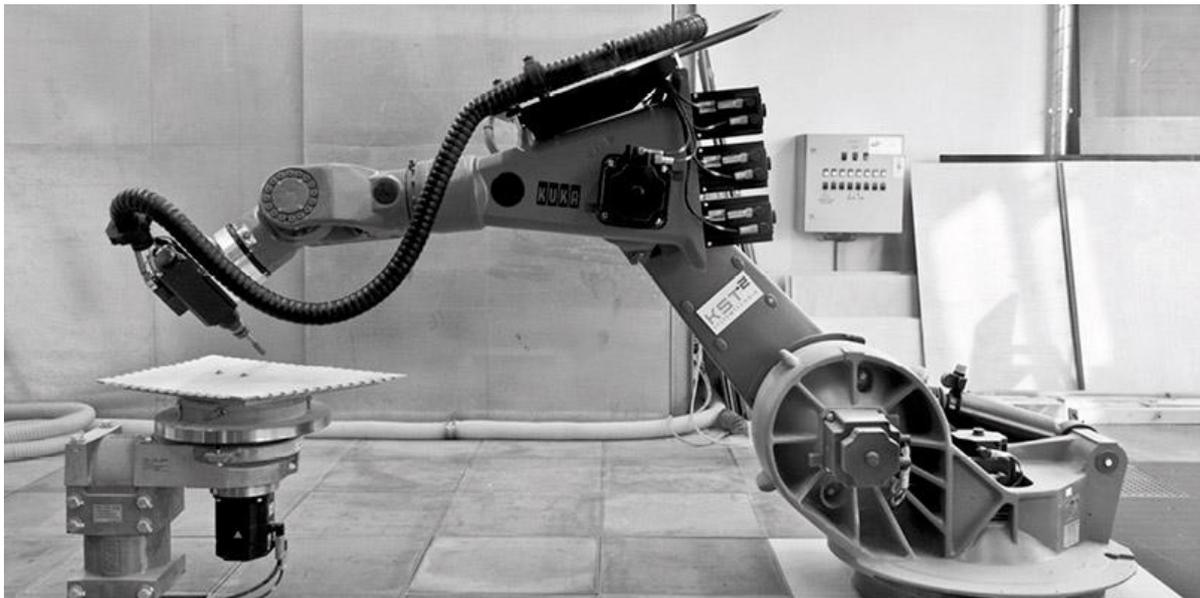


Abbildung 2: Robotische Fertigungsanlage mit sieben Achsen zum spanenden Bearbeiten von Holz und Holzwerkstoffen. Sowohl Werkzeug als auch Effektor können während der Bearbeitung gewechselt werden.

## 2. Bionik: Vorbilder aus der Natur

Im Vergleich zu technischen Konstruktionen besitzen natürliche Konstruktionen in der Tier- und Pflanzenwelt in der Regel wesentlich komplexere Formen und Strukturen. Dieses „Mehr“ an Form ist häufig der Grund für deren besondere Leistungsfähigkeit und Materialeffizienz und geht mit einem „Weniger“ an Materialeinsatz und Ressourcenverbrauch einher. Aus der Natur lassen sich daher oft wirksame Prinzipien ableiten, die in die Gestaltung technischer Systeme übertragen werden können. Dieses bionische Vorgehen besteht im Falle des *Forstpavillons* in der Ableitung einer segmentierten Schalenkonstruktion und ihrer Verbindungsdetails aus dem Plattenskelett von Seeigeln. Die aus Calciumcarbonat bestehenden, individuellen Platten des Skeletts bilden durch ihre spezifische Anordnung

eine besonders stabile und effiziente Schalenkonstruktion. Die charakteristische Ausbildung der Plattenränder zeigt dabei Extrusionen, die die Platten verzahnen und als biologisches Vorbild für die Verbindung von Plattenkonstruktionen dienen.

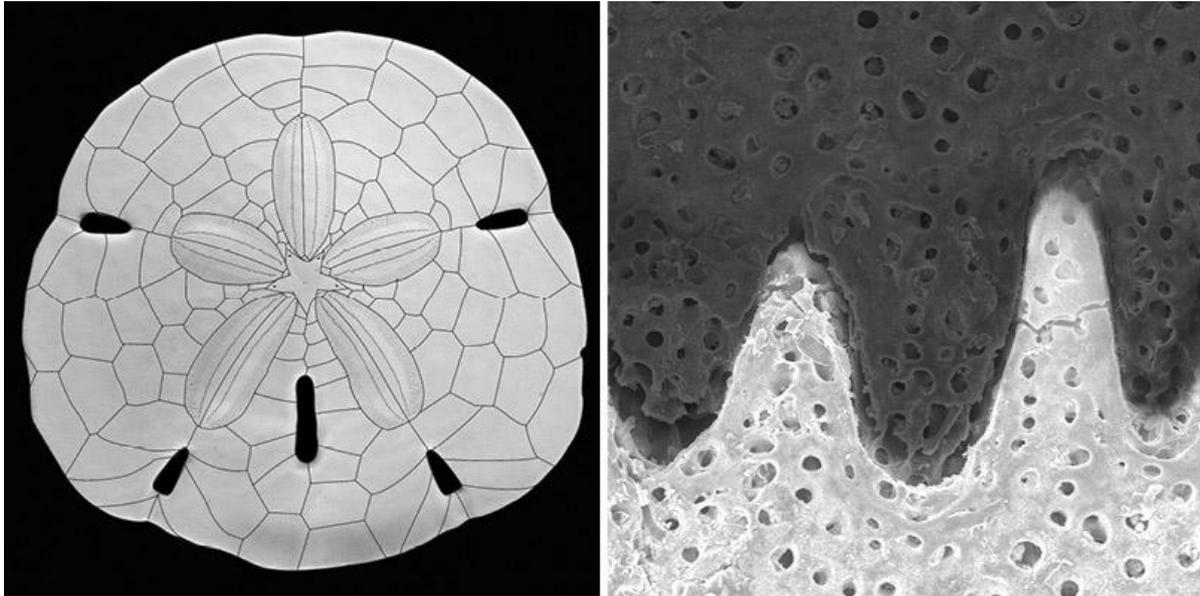


Abbildung 3: Der Seeigel als biologisches Vorbild für eine Plattenstruktur: Die Aufteilung der Platten (links) und deren mikroskopisch kleine Verbindung (rechts) kann in ein technisches System übertragen werden. (Fotos: Nebelsick, 2014)

Im Verlauf des Forschungsprojekts wurden die mikroskopischen Fingerzinken, aber auch die Anordnung der Platten generell untersucht, um geometrische und konstruktive Prinzipien herzuleiten. Dabei wurde schnell deutlich, dass sowohl grundsätzliche Regeln für alle Platten gelten, als auch spezifische Anpassungen bei jeder einzelnen Platte vorkommen. Zum einen unterscheidet sich die Plattenkonstruktion der Seeigel von sogenannten Faltkonstruktionen in der Valenz der Eckpunkte. Während Faltragwerke an den Plattenrändern hohe Biegemomente aufnehmen müssen, treffen bei Plattenkonstruktionen nur drei Platten an einem Punkt zusammen. Dadurch treten keine Biegemomente auf und die Kräfte werden größtenteils als Scherkräfte an den Plattenrändern weitergeleitet. Zum anderen besitzt jede Platte eine unterschiedliche Form, um lokal auftretende Belastungen optimal aufnehmen und ableiten zu können. Das Prinzip dieser morphologischen Anpassung wurde auf den digitalen Entwurfsprozess übertragen und konnte aufgrund der digitalen Fertigung der Holzplatten mit einem Industrieroboter umgesetzt werden.

### 3. Verbindung: Robotische Fertigung im Holzbau

Im Mittelpunkt des Forschungsprojekts stand die Entwicklung einer Segmentbauweise, die aufgrund der geometrischen Ausdifferenzierung der Bauteile und ihrer robotisch gefertigten Zinkenverbindungen ein hohes Maß an Anpassungsfähigkeit und Leistungsfähigkeit erlaubt. In der digitalen Fabrikation ist momentan eine Entwicklung von prozessspezifischen CNC Maschinen hin zu flexibleren und vielfältiger einsetzbaren Maschinen, wie dem Industrieroboter, zu beobachten. Dadurch, dass deren Anwendung erst durch die Steuerungssoftware und das Werkzeug, den sogenannten Effektor, spezifisch wird, bieten Industrieroboter wesentlich umfangreichere und flexiblere Einsatzmöglichkeiten trotz günstigeren Investitionskosten im Vergleich zu den meisten CAM Maschinen. Dieser Vorteil wird durch den umfangreichen Einsatz von Industrierobotern in der Automobilindustrie bereits seit mehr als 30 Jahren genutzt. Im Gegensatz zu solchen Anwendungen in der Serienproduktion, in denen dieselben Arbeitsschritte wiederholt werden, bieten Industrieroboter vor allem die Möglichkeit der Serie-0 Fertigung mit jeweils unterschiedlichen aber ähnlichen Arbeitsschritten, die für den Holzbau und speziell für komplexe Holzkonstruktionen eher typisch sind. In der Wissenschaft und Forschung liegen die Schwerpunkte dabei auf der Analyse des tatsächlichen Möglichkeitenraums des Industrieroboters, sowie die Integration und direkte Anbindung der Robotersteuerung an die

Planungswerkzeuge. Der Möglichkeitenraum der robotischen Bearbeitung von Holz lädt zur Entwicklung von neuen Bearbeitungsmethoden ein, die außerhalb des Bereichs aktueller CNC Technologien liegen, und sich durch ein hohes Maß an Adaptivität, Materialeffizienz und geometrischer Bauteildifferenzierung auszeichnen. So werden nicht nur neue Holzkonstruktionen möglich, sondern auch die Verwendung von neuen Holzwerkstoffen und zusätzlichen Holzarten.



Abbildung 4: Der ICD/ITKE Forschungspavillon 2011 diente als erster vollmaßstäblicher Demonstrator für eine robotisch gefertigte Plattenstruktur, die durch Fingerzinken verbunden ist.



Abbildung 5: Das weiterentwickelte Konstruktionssystem aus Buchensperrholz wird auf einer robotischen Anlage gefertigt (links). Die Montage vor Ort (rechts) auf der Landesgartenschau Schwäbisch Gmünd benötigte drei Wochen.

Fingerzinken zeichnen sich durch eine leistungsstarke, form- und kraftschlüssige Verbindung aus. In der traditionellen Holzbearbeitung werden Fingerzinken und deren konstruktive und ästhetische Qualität meist durch eine manuelle Herstellung erreicht. Auch moderne maschinengesteuerte Prozesse sind in der Herstellung von Fingerzinken auf rechtwinklige oder flache Verbindungen beschränkt. Diese Einschränkungen wurden durch einen neu entwickelten siebenachsigen Herstellungsprozess aufgehoben und erlauben wesentlich höhere Freiheitsgrade in der Verbindungsgeometrie. Der Vorteil dieser Entwicklung liegt nicht nur in der Möglichkeit, Platten unterschiedlicher Materialstärke in

verschiedenen Winkeln zu verbinden, sondern in deren Funktionsweise als Verbindungselement für komplexe Plattenstrukturen mit differenzierten Bauteilgeometrien.

Der durch den robotischen Herstellungsprozess eröffnete theoretische Möglichkeitsraum für fingergezinkte Sperrholzplatten wurde durch die vorher analysierten morphologischen und funktionalen Prinzipien aus der Natur informiert, um Bereiche mit besonders leistungsstarken Merkmalen zu finden. Infolgedessen wurde ein Plattensystem entwickelt, das auf Prinzipien beruht, die biegetragfähige, wenn auch verformbare, Strukturen ermöglichen.

#### 4. Digitaler Holzbau: Holzplattenkonstruktionen

Die komplexe Plattenstruktur des *Forstpavillons* wird erst durch computerbasierte Entwurfs- und Simulationsverfahren möglich. Diese erlauben es, bionische Konstruktionsformen zu modellieren und zu simulieren. Das im Rahmen dieses Forschungsprojekts entwickelte Entwurfswerkzeug bietet die Möglichkeit, von Beginn an Materialeigenschaften und Herstellungsbedingungen in die Planung zu integrieren. Die Platten werden dabei nicht einzeln gezeichnet oder modelliert, sondern sie finden in einem digitalen Simulations- und Optimierungsprozess ihre Lage, Größe und Form in Übereinstimmung mit den Möglichkeiten der robotischen Fertigung von selbst. Parallel dazu wurden die Fingerzinkenverbindungen und die Verschraubungen experimentell überprüft, und die Ergebnisse in den statischen Berechnungen berücksichtigt.

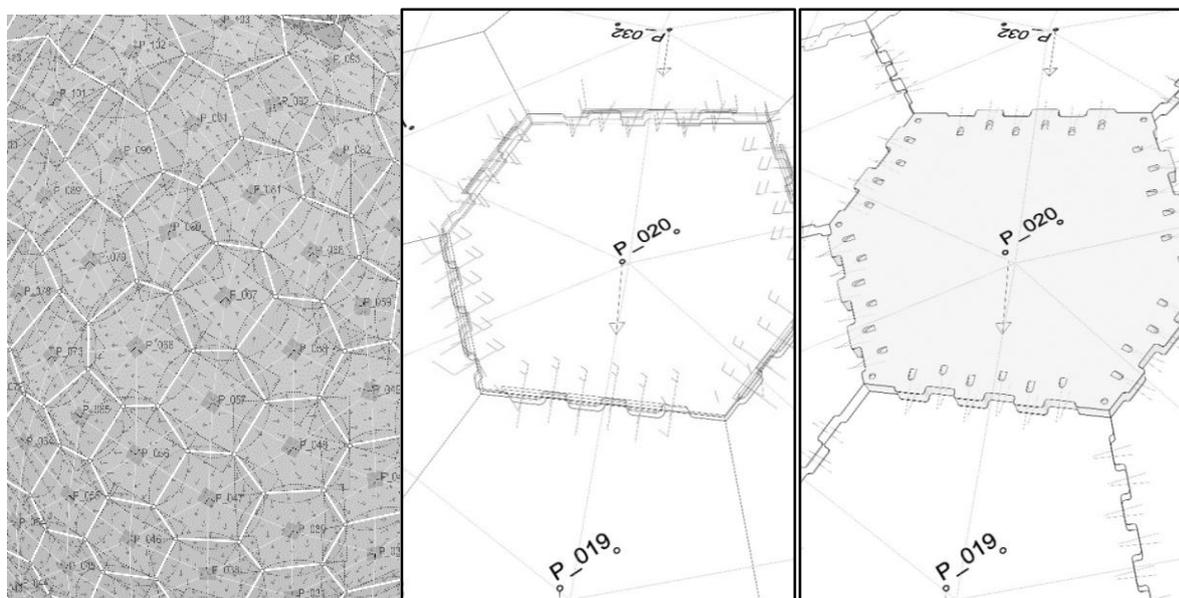


Abbildung 6: Der computerbasierte Entwurfsprozess ermöglicht eine optimierte Plattenaufteilung (links). Das Informationsmodell wird automatisch generiert und beinhaltet auch die Maschinendaten für die robotische Fertigung (mitte). Die tatsächliche Plattengeometrie (rechts) wird lediglich für Repräsentationszwecke erstellt.

Die durchgehend computerbasierte Planung erlaubt die digitale Fertigung aller Bauteile der Holzkonstruktion, von der Herstellung der 243 unterschiedlichen Platten bis hin zum Zuschnitt der Dämmung, wasserführenden Schicht und Deckschicht aus Lärchenplatten. Die größte Herausforderung und Innovation stellt dabei die Fertigung der 7600 geometrisch unterschiedlichen Zinkenverbindungen dar, die dem Pavillon seine Stabilität verleihen und im Innenraum sichtbar bleiben. Hier kommt der robotischen Fertigung eine Schlüsselrolle zu, da sie im Vergleich zu üblichen computergesteuerten Fertigungsmethoden einen wesentlich höheren Freiheitsgrad bietet: die Verbindungen, die in mikroskopisch kleinem Maßstab auch der Seeigel nutzt, lassen sich nur mit einer 7-achsigen Roboteranlage effizient umsetzen. Wie auch beim Seeigel spielt es dabei keine Rolle, dass alle Platten Einzelstücke sind. Die gesamte Vorfertigungszeit des Schalentragswerks sowie der Aufbau der Schale betragen lediglich je 3 Wochen.

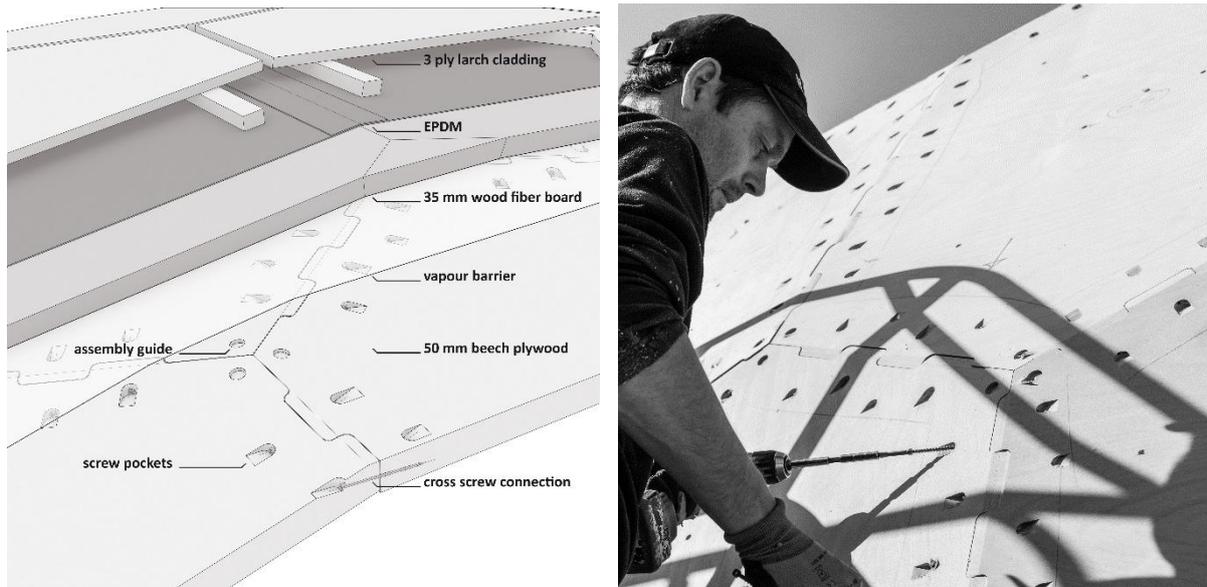


Abbildung 7: Der Forstpavillon besitzt einen komplett digital generierten und fabrizierten Konstruktionsaufbau. Oberhalb der tragenden Plattenkonstruktion befinden sich Dampfsperre, Holzweichfaserplatten, EPDM, Konterlattung, und Lärchen-3-Schicht-Platten.

Der *Forstpavillon* ist die erste robotisch gefertigte Schalenkonstruktion aus Buchenholzplatten. Im Sinne der funktionalen Integration, einem Grundprinzip biologischer Strukturen, sind diese Platten zugleich Tragwerk und Gebäudehülle. Die Verbindungskräfte, die an den Plattenrändern auftreten, werden durch die robotisch gefräste Zinkenverbindung aufgenommen. So entsteht eine besonders leistungsfähige Holzkonstruktion, deren tragende Schicht aus gerade einmal 50mm starken Buchenplatten besteht. Die Verwendung von regional verfügbarem Buchenholz steht dabei nicht nur im Einklang mit zukünftigen Beforstungsstrategien in Mitteleuropa, sondern eignet sich aufgrund der hervorragenden mechanischen Eigenschaften auch für einen ressourcenschonenden Holzleichtbau. Mit einer Schalenfläche von 245 m<sup>2</sup> und äußeren Abmessungen von ca. 17 x 11 x 6 m (LxBxH) bietet der *Forstpavillon* eine Nutzfläche von ca. 125 m<sup>2</sup> und ein Raumvolumen von 605 m<sup>3</sup>. Die gesamte, sehr dünne Schale konnte aus gerade einmal 12 m<sup>3</sup> Holz hergestellt werden. Die eingesetzten Holzressourcen wurden fast vollständig verwendet, da der Verschnitt der Plattenfertigung zu einem Buchenparkettfußboden weiterverarbeitet wurde. Aufgrund der durchgehend digitalen Planung und Vorfertigung konnte das gesamte Gebäude in lediglich vier Wochen errichtet werden.

Das Innere des *Forstpavillons* ist in zwei räumliche Bereiche gegliedert: einen Eingangsbereich und den Hauptausstellungsbereich. In beiden Bereichen ist die Schale kuppelförmig ausgebildet und besteht aus konvex-polygonalen Platten. Dazwischen befindet sich eine sattelförmige Einschnürung aus konkav-polygonalen Platten. Der Besucher betritt das Gebäude durch den niedrigeren Teil der Schale und wird dann durch die räumliche Einschnürung fließend in den sechs Meter hohen Hauptraum geleitet, der sich durch die große Glasfassade zur Landschaft hin weit öffnet. Besonders präsent ist im Innenraum das Muster der sichtbaren und weitgehend unbehandelten, tragenden Buchenholzkonstruktion mit Ihren charakteristischen Zinkenverbindungen. Durch den geometrisch bedingten Übergang von konvex- zu konkavpolygonalen Platten wird der räumliche Wechsel noch akzentuiert.

Die Realisierung des *Forstpavillons* zeigt auf, dass die robotische Herstellung in Wechselwirkung mit computerbasierten Entwurfs-, Simulations- und Messverfahren es Architekten, Ingenieuren und Holzbauern ermöglicht, von Beginn an interdisziplinär, herstellungs- und materialorientiert zu arbeiten. Dabei entstehen nicht nur leistungsfähige und ressourcenschonende Holzbaukonstruktionen, sondern auch eine neuartige, ausdrucksstarke Architektur.



Abbildung 8: Forstpavillon auf der Landesgartenschau Schwäbisch Gmünd 2014.