

# BUGA Holzpavillon – Freiformfläche aus robotisch gefertigten Nulltoleranz- Segmenten

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



Prof. Jan Knippers  
Institut für Tragkonstruktionen und  
Konstruktives Entwerfen  
Stuttgart, Deutschland



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



Daniel Sonntag  
Institut für Tragkonstruktionen und  
Konstruktives Entwerfen  
Stuttgart, Deutschland





# BUGA Holzpavillon – Freiformfläche aus robotisch gefertigten Nulltoleranz-Segmenten

## 1. Einleitung

Der BUGA Holzpavillon zeigt neue Ansätze zum digitalen Holzbau. Die segmentierte Schalenkonstruktion basiert auf biologischen Prinzipien des Plattenskeletts von Seeigeln, die vom Institut für Computerbasiertes Entwerfen und Baukonstruktion (ICD) und dem Institut für Tragkonstruktionen und konstruktives Entwerfen (ITKE) der Universität Stuttgart seit fast einem Jahrzehnt erforscht werden.

Im Rahmen des Projekts wurde eine Roboter-Fertigungsplattform für den automatisierten Zusammenbau und die Fräsbearbeitung der 376 maßgeschneiderten Segmentbauteile des Pavillons entwickelt. Dieses Herstellungsverfahren stellt sicher, dass alle Holzsegmente wie ein großes, dreidimensionales Puzzle mit einer Genauigkeit von weniger als einem Millimeter zusammengesetzt werden können. Mit minimalem Materialeinsatz spannt das atemberaubende Holzdach 30 Meter über einen der zentralen Konzert- und Veranstaltungsorte der BUGA und schafft so einen einzigartigen architektonischen Raum.



Abbildung 1: Der BUGA Holzpavillon auf der Bundesgartenschau 2019 in Heilbronn

## 2. Bionisch segmentierte Schalenkonstruktionen

Der BUGA Holzpavillon schafft eine architektonische Attraktion auf der zentralen Sommerinsel der Bundesgartenschau 2019 in Heilbronn. Die Gestaltung des Pavillons basiert auf morphologischen Prinzipien des Plattenskeletts von Seeigeln. Nach dem vorhergehenden Forschungsgebäude des gleichen Projektteams, dem Forstpavillon auf der Landesgartenschau 2014 in Schwäbisch Gmünd, verfolgt der BUGA Holzpavillon das Forschungsziel, die architektonische Gestaltung und strukturelle Leistungsfähigkeit biomimetischer segmentierter Holzschalen auf eine neue Ebene zu heben: Ist es möglich, mit der gleichen geringen Holzmenge pro Quadratmeter wie beim Forstpavillon eine Schale zu bauen, die die dreifache Spannweite erreicht? Und kann diese Struktur vollständig wiederverwendbar konstruiert werden, so dass sie nach der BUGA ohne Leistungsverlust rückgebaut und an einem anderen Standort wiedererrichtet werden kann?

Um diese Ziele zu erreichen, nutzt der Pavillon das biomimetischen Prinzip von «weniger Material» durch «mehr Form», sowohl in Bezug auf die Gesamtkonstruktion als auch auf der Ebene der einzelnen Segmente. Um Materialverbrauch und Gewicht zu minimieren,

besteht jedes Holzsegment aus zwei dünnen Platten, die oben und unten einen Ring aus Randbalken beplanken und so hohle, großformatige Holzkassetten mit polygonalen Formen bilden. Die Bodenplatte beinhaltet eine große Öffnung, die während der Montage den Zugang zu den verdeckten Bolzenverbindungen ermöglicht und zugleich eine besondere architektonische Erscheinung erzeugt. Die Leichtbausegmente sind durch Fingerzinken verbunden, die den morphologischen Prinzipien an den Rändern der Seeigelpattern folgen. Im montierten Zustand wirkt die Holzschale durch ihre ausdrucksstarke, doppelt gekrümmte Geometrie als formaktives Tragwerk.

### 3. Integratives Co-Design und Wechselwirkungen zwischen Entwurf, Statik und Fertigung

Neue Bauweisen erfordern neue Formen des Planens und Fertigen. Der BUGA Holzpavillon ist ein hervorragendes Beispiel für Co-Design, in welchem neue Möglichkeiten von Gestaltung, Konstruktion und Fertigung durch eine kontinuierliche, computerbasierte Rückkopplung in einem interdisziplinären Team entwickelt werden.

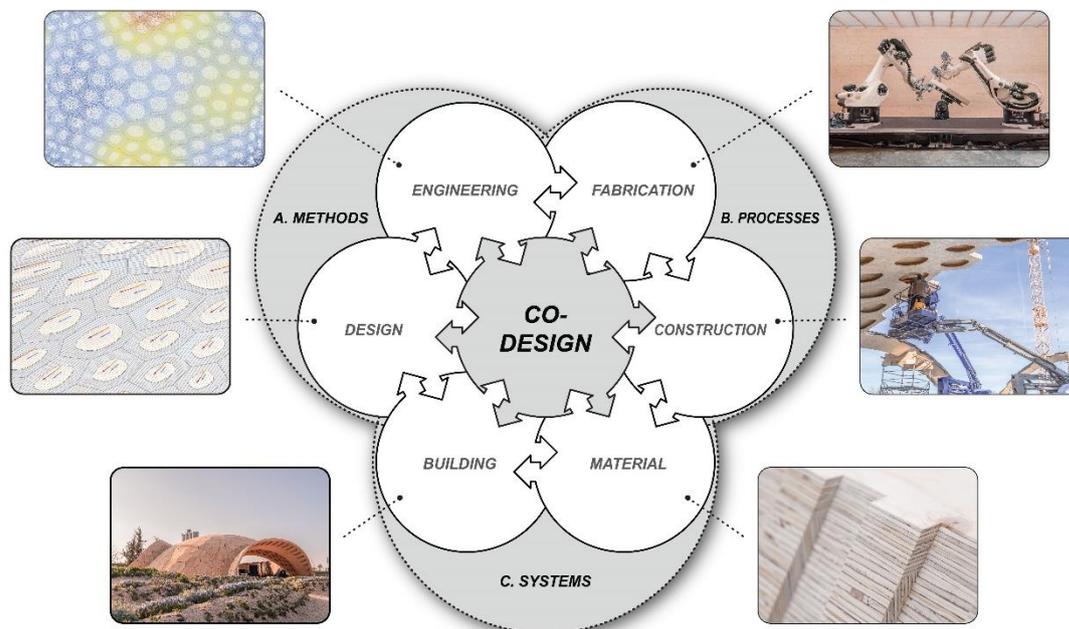


Abbildung 2: In einem integrativen und interdisziplinären Co-Design Prozess wurden über Rückkopplungsprozesse verbundene Entwicklungen des Pavillons organisiert. So fanden z.B.: Planung der Fertigungsplattform parallel mit der Detailplanung des Pavillons statt.

Das Kassettenbausystem wird aus ebenen Einzelbauteilen gefertigt, diese geometrischen Randbedingungen müssen zu jedem Planungszeitpunkt berücksichtigt werden, um die Machbarkeit zu gewährleisten. Gleichfalls stellen die statischen Erfordernisse eine Reihe von Bedingungen an die globale Schalenform, die im gesamten Entwurfsprozess berücksichtigt werden sollten. Dazu kommen noch die vielfältigen Anforderungen aus der robotischen Fertigung. Die für dieses Projekt entwickelten Co-Design-Methoden generieren die Form jedes Bauteils des Pavillons gemäß der architektonischen Entwurfsabsicht und der Berücksichtigung der vorgenannten Aspekte.

Dieser hochintegrierte Prozess ermöglicht die Fertigung von 376 unterschiedlichen Plattensegmenten mit 17 000 verschiedenen Keilzinkenverbindungen gemäß den vielfältigen konstruktiven Anforderungen an die Gesamtstruktur und die Details im Untermillimeter-Bereich. Dieser multiskalare Ansatz ermöglicht es, trotz des Pioniercharakters des Projekts und ungeachtet seiner kurzen Entwicklungszeit von nur 13 Monaten von der Beauftragung bis zur Eröffnung, innovative architektonische und strukturelle Entwicklungen ohne Verlust an Präzision gleichzeitig zu berücksichtigen.

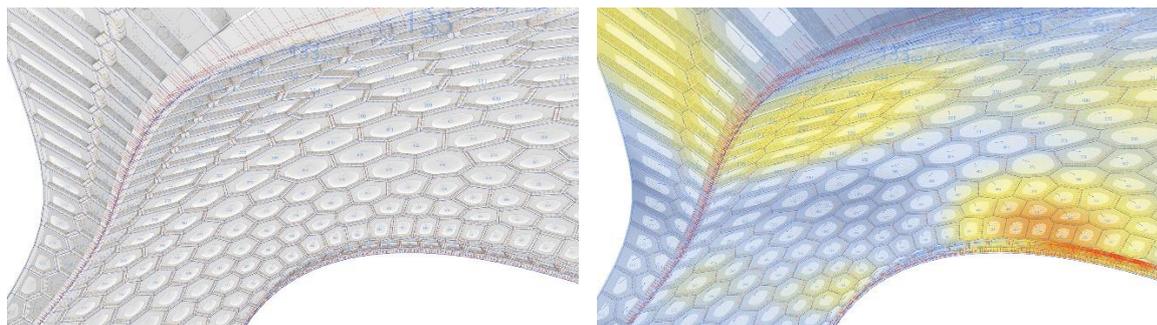


Abbildung 3+4: Computerbasiertes Modell des BUGA Holzpavillons. Das Modell fungiert als Kommunikationsplattform zwischen Statik, Fertigung und Entwurf und bezieht alle Parameter die sowohl für Berechnung als auch Fertigung nötig sind mit ein.

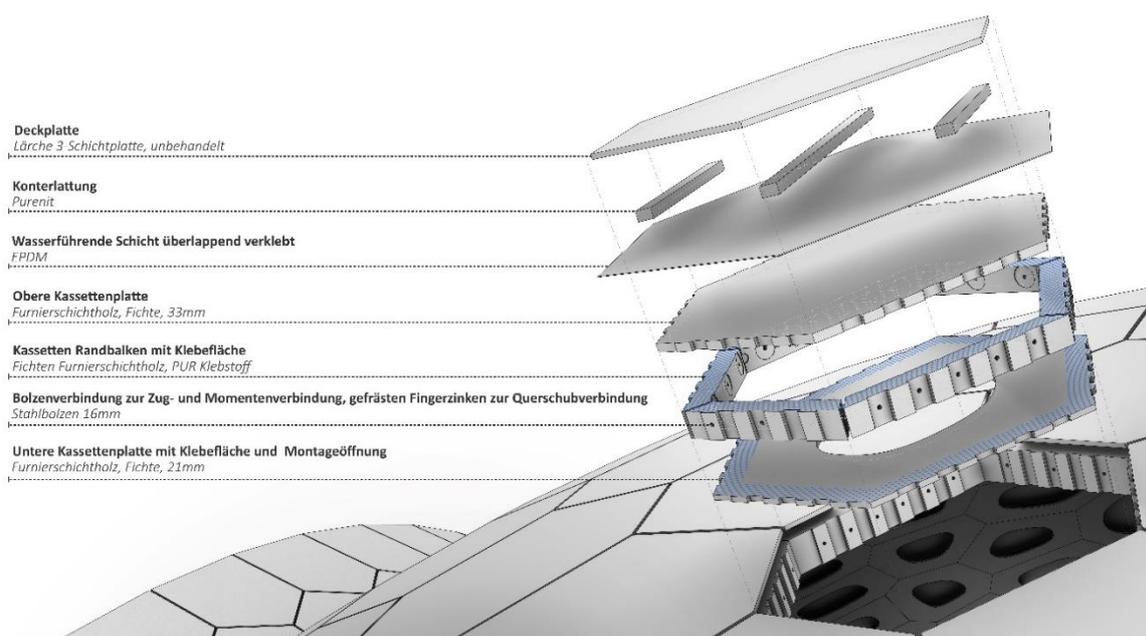


Abbildung 5: Explosionszeichnung eines Holzkassettensegments des BUGA Holzpavillons.

## 4. Kassettensystem

Die komplexen dreidimensionalen Bauteilgeometrien und die über die ganze Schale variierenden Verbindungsgeometrien stellen hohe Anforderungen an die Planung und die statische Berechnung. Eigens entwickelte, BIM-ähnliche computerbasierte Schnittstellen und die Verwendung von parametrischen Planungstools sind erforderlich, um die schiere Menge an Informationen (Bauteildicken, Faserverläufe der Einzelbauteile, Anzahl und Anordnung der Verbindungsmittel, Bereiche ohne kraftschlüssige Verbindungen, etc.) zu verwalten. Ebenso ermöglicht die parametrische Planung Rückkopplungen zur statischen Optimierung der globalen Schalengeometrie, der Segmentanordnung, der Öffnungsgeometrien, der Bauteilstärken und der Anordnung der Verbindungsmittel. Diese sind für die schlanke Schalengeometrie und den geringen Materialeinsatz zwingend erforderlich.

Statisch gesehen übertragen die Deckplatten weiterhin die Kräfte in der Schalenebene; die Biegemomente, die beispielsweise aus asymmetrischen Belastungen entstehen, werden durch die aufgelöste Konstruktion effizient übertragen. Außerdem entsteht durch die Kassettenform die Möglichkeit eine neuartige Bolzenverbindung einzusetzen. Die verwendeten Verbindungsmittel und Bauweisen entsprechen größtenteils dem Stand der Technik und können daher auf Grundlage der geltenden normativen Bedingungen nachgewiesen werden.



Abbildung 6: Robotische Fertigung der Kassettensegmente – Balkenelemente werden auf eine Basis-Platte geklebt und mit LignoLoc-Nägeln fixiert. Anschließend wird die Kasette mit einer Deckplatte geschlossen und in der Presse abgelegt.

## 5. Additive und Subtraktive Robotische Vorfertigung

Im Vergleich zu massiven Holzelementen, wie sie beispielsweise in dem Vorgängerbau des Forstpavillons eingesetzt wurden, reduzieren die Holzkassetten Gewicht und Material deutlich, erhöhen aber auch die Anzahl der Bauteile um das Achtfache und führen zu einer komplexeren Fertigung. Das Streben nach höherer Ressourceneffizienz muss daher mit der automatisierten Roboterfertigung der Schalensegmente einhergehen. Dazu wurde vom ICD Universität Stuttgart und der BEC GmbH eine neuartige, transportable, 14-achsige Roboter-Holzfertigungsplattform entwickelt, die beim Industriepartner Müller-Blaustein Holzbauwerke GmbH zum Einsatz kam. Die Plattform beinhaltet zwei Schwerlastroboter, die auf einem 20-Fuß Standard-Containerboden montiert sind. Die Flexibilität von Industrierobotern ermöglicht die Integration aller Vorfertigungsschritte der Kassettensegmente des Pavillons innerhalb einer einzigen, kompakten Fertigungseinheit.

Während der Produktion werden die Holzkassetten zunächst von den Robotern zusammengebaut. Dazu gehören die Platzierung von vorformatierten Holzplatten und -balken, das kontrollierte Aufbringen des Klebstoffs zwischen Platten und Balken, sowie eine temporäre Lagesicherung mit Buchennägeln für den Trocknungsvorgang. In einem zweiten Schritt werden in die montierten Segmente die maßgeschneiderten Keilzinkenverbindungen und Öffnungen mit 300µm Genauigkeit gefräst. Von der Montage der Balken und Platten, über das Fräsen mit unterschiedlichen Werkzeugen, bis hin zur sensorbasierten Prozess- und bildbasierten Qualitätskontrolle - alles geschieht in einem vollautomatischen Ablauf, gesteuert von 2 Millionen Zeilen Robotercode, die direkt aus dem computerbasierten Modell erzeugt werden. Im Durchschnitt dauert das robotische Fügen 8 Minuten pro Segment. Für das Hochpräzisionsfräsen werden weitere 30 Minuten benötigt.

Eine Verwendung von PUR-Klebern ist in der Tafelbauweise, welche der Kassettenskonstruktion am ähnlichsten kommt, nicht geregelt. Daher mussten hohe Anforderungen an die Präzision und die Qualität der Klebefugen in der robotischen Produktion der Kassetten berücksichtigt werden. Die feine Dosierung des Klebstoffs, sowie die Herstellungsgeschwindigkeit in der Fertigung boten hier allerdings hohe Verarbeitungssicherheit. Ohne automatisierte Fertigung wäre diese Klebefugengüte schwer zu erreichen gewesen. Der gesamte Prozess wurde durch die MPA Stuttgart betreut. Hier war auch eine vorhabenbezogene Bauartgenehmigung für die Überprüfung der Klebefugenqualität erforderlich.

Die Genauigkeit aller Holzbauelemente wurde im Vorfabrikationsprozess minutiös kontrolliert. Um Klebstoff-Fugenmaße von maximal 0.3mm einzuhalten, wurden alle verarbeiteten Balken vor dem robotischen Fügeprozess exakt auf Maß gehobelt. Der additive robotische Fügung erlaubte für etwas größere Toleranzen, bevor diese in dem anschließenden subtraktiven Fräsprozess wieder auf ein Minimum gebracht wurden. Messungen des Instituts für Ingenieurgeodesie (IIGS, Prof. Schwieger) ergaben maximale Abweichungen vom Soll von nur 300 Mikrometern. Diese Genauigkeit ist von absoluter Relevanz für das schnelle und einfache Montieren der Holzkassetten und macht eine Übertragung der Normalkräfte in der Schale über Stoßkontakt zwischen allen Kassetten möglich.



Abbildung 7+8: Detailansicht der gefrästen Fingerzinken. Passgenaue Fügung der Kassetten ermöglicht Kraftübertrag zwischen Kassetten auf Stoß.

## 6. Konstruktion

Obwohl der BUGA Holzpavillon an drei Seiten großzügig geöffnet ist, muss sein innovatives Bausystem auch herkömmliche Fragen wie Wasserdichtigkeit, UV-Schutz, elektrische Installationen, Lichtplanung, Blitzableitung und Fundamentdetails zufriedenstellend integrieren.

Der Pavillon sitzt auf drei Streifenfundamenten, welche miteinander verbunden wurden, um Horizontalkräfte in der Konstruktion kurzzuschließen. Die maßgebliche Herausforderung stellte hier die Schnittstelle zwischen zwei Gewerken da, welche mit drastisch unterschiedlichen Toleranzen arbeiten. Bei der Herstellung der Fundamente musste mit Ungenauigkeiten von mehr als einem Zentimeter gerechnet werden. Da die Holzschalenkonstruktion, von den Streifenfundamenten startend, nach oben hin aufgebaut wird und auf Nulltoleranz geplant und gefertigt wurden, müssen die zuerst gesetzten Kassetten mit zumindest 0.3mm Genauigkeit auf den Fundamentstreifen platziert werden. Hierfür wurden in den Fundamenten mittels eingelassenen Bolzen feinjustierbare Stahlkästen vorgesehen. Die Holzkassetten wurden dann mittels einem Bolzen direkt auf diesen Füßen angeschraubt. Hinter den Fundamentstreifen wurden Drainagebereiche vorgesehen, in welche Regenwasser über eine über den gesamten Pavillon montierte EPDM Folie geleitet wird. Eine Unterkonstruktion aus rezyklierten und wasserfesten Puren-Latten hält darüber Lärchenholz Dreischichtplatten, die als Fassadenverkleidung und UV-Schutz dienen.

Unter den Fassadenplatten läuft außerdem ein Netz aus Blitzableitern. Da für die Blitzschutzplanung von doppelt gekrümmten Holzsegmentschalenkonstruktionen keine klaren Vorgaben existieren, mussten die Positionen der Blitzableiter mit Kugelkalotten im 3D-Programm abgestimmt werden. Für den Verlauf der Blitzableiter war des Weiteren die Elektroinstallationen für die Lichter im Inneren der Kassetten zu berücksichtigen: Da die Schale so dünn konstruiert wurde, musste ein Überschlag der elektrischen Spannungen in die Lichtinstallationen durch Mindest-Abstände sichergestellt werden.

Für die Lichtinstallationen wurden schon in der robotischen Vorfertigung Löcher in die Kassettenränder gebohrt, durch welche elektrische Kabelleitungen von dem Inneren einer Kassette zur anderen gleitet werden konnte. Pro Kassette wurden in etwa 3 LED-Streifenlichter installiert. Dies erlaubt die abendliche Illumination des Pavillons.

## 7. Aufbau

Nach der Vorfertigung im Werk von Müller Blaustein Holzbauwerken, wurden alle Kassetten in transportfähigen Stapeln verpackt. Da die gesamte Fertigung schon in der inversen Einbausequenz getaktet wurde, konnten auf der Baustelle diese Stapel Kassette für Kassette abgeräumt werden, ohne dass weitere Sortierungen vorgenommen werden hätten müssen.

Die komplett vorgefertigten Holzkassetten wurden von einem Team von zwei Handwerkern in nur 10 Arbeitstagen im freien Vorbau vor Ort montiert, ohne die sonst üblichen, umfangreichen Unterkonstruktionen oder Stützgerüste zu benötigen. Nach der Verbindung der Segmente über wiederverwendbare Bolzen, wurde eine EPDM-Folie in 8 Streifen über den Pavillon gelegt und so die Wasserdichtigkeit sichergestellt. Die sichtbare Außenverkleidung des Pavillons bilden unbehandelte Lärchenplatten. Alle Bauelemente sind für leichte Demontage und Wiederaufbau an einem anderen Ort ausgelegt.

Einen Sonderfall stellten die Kassetten im Knick der drei Bögen dar. Da die Verbindungen zwischen den Kassetten in dem Knick der Schale nicht mit Bolzen gelöst werden konnten, wurden hier Holzschraubenverbindungen vorgesehen. Da diese Verbindungen nicht reversibel sind, wurden die Bögen jeweils in transportfähigen Halbbögen schon im Werk vormontiert. Die Bögen kamen dann in zwei Transporten auf die Baustelle, wurden dort aufgestellt und mit einem Schlussstein verbunden.



Abbildung 9+10: Vorfertigung der Halbbögen im Werk von Müller Blaustein Holzbauwerke und Aufbau vor Ort und Aufbau vor Ort



Abbildung 11+12: Aufbau der Schalenkassetten im freien Vorbau. Fugen zwischen den Kassetten werden durch das Anziehen der Bolzen geschlossen, bis alle Kassetten direkt aneinanderstoßen.

## 8. Architektonischer Ausdruck

Die tragende Holzschale des Pavillons erreicht eine stützenfreie Spannweite von 30 Metern bei einem Gewicht von nur 38 kg/m<sup>2</sup>. Dies ist weniger als das Flächengewicht des Forstpavillons, trotz der dreifachen Spannweite und fünffachen Größe! Der BUGA Holzpavillon

zeigt die Möglichkeiten einer effizienten, wirtschaftlichen, ökologischen und ausdrucksstarken Holzarchitektur, die an der Schnittstelle von Handwerk, digitaler Innovation und Forschung entsteht.

Der BUGA Holzpavillon liegt an einer zentralen Kreuzung in der wellenförmigen Landschaft der Sommerinsel des BUGA-Geländes. Drei dynamische Bögen bilden einladende Öffnungen zu den Hauptwegeachsen aus und führen die Besucher in das Innere des Pavillons. Die Schale schafft einen geschwungenen Raum für Konzerte und öffentliche Veranstaltungen, mit einer sehr guten Akustik und einer einzigartigen architektonischen Atmosphäre. Dies gilt insbesondere bei Nacht, wenn Tausende von LED-Leuchten, die in die inneren Öffnungen der Schale eingebettet sind, das Innere des Pavillons in ein dezentes, warmes und einladendes Licht tauchen.

Die Forschung an digitalen Holzbausystemen wird im Rahmen des neuen Exzellenz-Clusters «Integratives Computerbasiertes Planen und Bauen für die Architektur» an der Universität Stuttgart fortgesetzt.

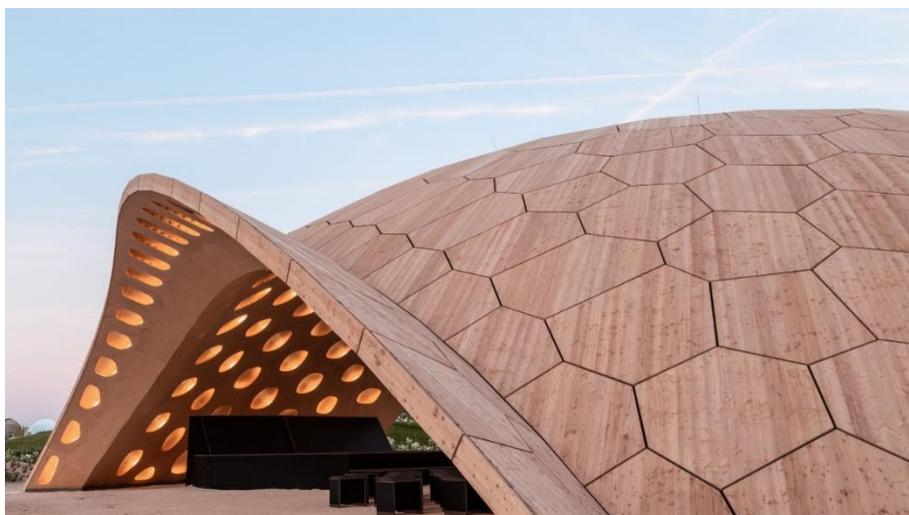


Abbildung 13: Der BUGA Holzpavillon auf der Bundesgartenschau 2019 in Heilbronn



Abbildung 14: Die Bühne im BUGA Holzpavillon auf der Bundesgartenschau 2019 in Heilbronn wird als flexible Veranstaltungsfläche genutzt.

## 9. 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 Kyjaneck 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 Heilbronn 2019 GmbH und GETTYLAB. Die Forschungsarbeiten wurden darüber hinaus teilweise von der Deutschen Forschungsgemeinschaft im Rahmen der Exzellenzinitiative – EXC 2120/1 – 390831618 unterstützt.

## 10. Bibliografie

- Bechert, S., Knippers, J., Krieg, O. D., Menges, A., Schwinn, T., & Sonntag, D. (2016). Textile Fabrication Techniques for Timber Shells. In S. Adriaenssens, F. Gramazio, M. Kohler, A. Menges, & M. Pauly (Eds.), *Advances in Architectural Geometry 2016* (pp. 154–169). Zurich: vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich. [http://doi.org/10.3218/3778-4\\_12](http://doi.org/10.3218/3778-4_12)
- Groenewolt, A., Schwinn, T., Nguyen, L., & Menges, A. (2018). An interactive agent-based framework for materialization-informed architectural design. *Swarm Intelligence*, 12(2), 155–186. <http://doi.org/10.1007/s11721-017-0151-8>
- Grun, T. B., Von Scheven, M., Bischoff, M., & Nebelsick, J. H. (2018). Structural stress response of segmented natural shells: A numerical case study on the clypeasteroid echinoid *Echinocyamus pusillus*. *Journal of the Royal Society Interface*, 15(143), 21–28. <http://doi.org/10.1098/rsif.2018.0164>
- Menges, A., Wagner, H. J., & Schwinn, T. (2018). Bionische segmentierte Holzplattenschalen: integrative agentenbasierte Modellierung und robotische Fertigung. 24. Internationales Holzbau-Forum /HF 2018, 239-249.
- Li, J.-M., & Knippers, J. (2015). Segmental Timber Plate Shell for the Landesgartenschau Exhibition Hall in Schwäbisch Gmünd—the Application of Finger Joints in Plate Structures. *International Journal of Space Structures*, 30(2), 123–140. <http://doi.org/10.1260/0266-3511.30.2.123>
- Menges, A., & Schwinn, T. (2012). Manufacturing Reciprocities. *Architectural Design*, 82(2), 118–125. <http://doi.org/10.1002/ad.1388>
- Menges, A. (2013). Morphospaces of Robotic Fabrication. In S. Brell-Çokcan & J. Braumann (Eds.), *Rob | Arch 2012* (pp. 28–47). Vienna: Springer Vienna. [http://doi.org/10.1007/978-3-7091-1465-0\\_3](http://doi.org/10.1007/978-3-7091-1465-0_3)
- Alvarez, M., Wagner, H. J., Groenewolt, A., Krieg, O. D., Sonntag, D., Bechert, S., ... Knippers, J. (2019). The buga wood pavilion - Integrative interdisciplinary advancements of digital timber architecture. ACADIA 2019, Austin, USA. Schwinn, T., Krieg, O. D., & Menges, A. (2013). Robotically Fabricated Wood Plate Morphologies. In S. Brell-Çokcan & J. Braumann (Eds.), *Rob | Arch 2012* (pp. 48–61). Vienna: Springer Vienna. [http://doi.org/10.1007/978-3-7091-1465-0\\_4](http://doi.org/10.1007/978-3-7091-1465-0_4)
- Bechert, S., Groenewolt, A., Krieg, O., Menges, A., Knippers, J.: 2018, Structural Performance of Construction Systems for Segmented Timber Shell Structures, in *Creativity in Structural Design* [Proceedings of the IASS Conference 2018], Boston.
- Sonntag D., Aldinger L., Bechert S. und Knippers J. (2019) Statische Modellierung und Berechnung von Segmentschalen aus Holz, Baustatik und Baupraxis, Stuttgart, 2020, (angenommen)
- Introducing TIM – a mobile robotic timber construction platform*. 2018, accessed 20.October 2018, <<http://icd.uni-stuttgart.de/?p=23427>>.