

Ressourceneffiziente Segmentschalen aus Holz

Jan Knippers
Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland



Ressourceneffiziente Segmentschalen aus Holz

Der Baustoff Holz spielt als temporärer CO₂ Speicher und vor allem als Ersatz für den emissionsintensiven Baustoff Beton und eine besondere Rolle auf dem Weg zum klimaneutralen Bauen, da der genauere Blick in die Verursacherströme zeigt, dass der größte Anteil an CO₂ Emissionen, die mit dem Bauen verbundenen sind, auf die Herstellung von Zement und anderen mineralischen Bindemitteln zurückzuführen ist [1]. Inzwischen belegen sehr viele Studien die ökologischen Vorteile des Holzbau bei Geschossbauten, Wohnhäusern und ähnlichem, so dass in diesen Fällen dem Holzbau der Vorzug gegeben werden sollte [2].

Der Holzbau hat in den letzten Jahren durch einige viel publizierte Bauwerke gezeigt, dass es auch für große und hohe Geschossbauten geeignet ist. Gleichzeitig zeigt sich aber auch, dass der Baustoff Holz noch nicht die gleichen konstruktiven Gestaltungsspielräume ermöglicht, wie Stahl oder Beton. Holzbauten sind meist auf regelmäßige Stützenraster, vorwiegend einachsig spannende Deckensysteme und eher mäßige Spannweiten beschränkt [3].

Übergeordnetes Ziel der an der Universität Stuttgart entwickelten Segmentschalen ist daher zu zeigen, wie mittels integrierter digitaler Planungsmethoden und robotischen Fertigungsprozesse dem Holzbau neue Anwendungsfelder erschlossen werden, sowohl was die Komplexität der Geometrie als auch die Leistungsfähigkeit bzw. Spannweite angeht. Die an der Universität Stuttgart entwickelten Methoden und Prozesse sind so gestaltet, dass sie auch von der mittelständisch und handwerklich geprägten Holzbauindustrie genutzt werden können, und zwar in einem wirtschaftlich vertretbaren Rahmen.

1. Der Holzpavillon für die BUGA 2019 in Heilbronn



Abbildung 1: BUGA Holzpavillon, Bundesgartenschau Heilbronn, 2019 Quelle: ICD/ITKE Universität Stuttgart

Lastangepasste und damit materialeffiziente Schalenträgerwerke sind in der heutigen Baupraxis auf Grund des hohen Aufwandes für die Herstellung so gut wie ausgestorben. Für den BUGA Holzpavillon wurde als Alternative zu traditionellen Schalenbauweisen ein System entwickelt, bei dem eine doppelt gekrümmte Geometrie aus ebenen Kassetten zusammengesetzt wird [4], [5]. Dies erfordert, dass jede der 376 Kassetten des BUGA Holzpavillons unterschiedliche geometrische Abmessungen hat.

Jede dieser Kassetten besteht aus zwei Platten und sechs Randbalken jeweils aus Fichten Furnierschichtholz mit jeweils unterschiedlicher Geometrie, so dass diese nur mit einer computergestützten Fertigung sinnvoll herstellbar sind.

Der BUGA Holzpavillon war als temporäre und zerstörungsfrei demontierbare Konstruktion geplant. Die Kassetten übertragen die Kräfte in der Schalenebene über Kontakt, was eine sehr hohe Präzision in der Vorfertigung erfordert. Für die Schubkräfte in Schalenebene war die sägezahnartige Randbearbeitung erforderlich. Für die Schubkräfte senkrecht zur Schalenfläche sind lösbare Bolzen vorgesehen. Der BUGA Holzpavillon war ein zweites Mal

auf der BUGA 2023 in Mannheim zu sehen und wird bald zum dritten Mal an einem endgültigen Standort aufgebaut. Dabei bleibt die tragende Konstruktion erhalten, lediglich die wasserführende Abdichtung sowie die äußere Bekleidung mit Dreischichtplatten wird erneuert.



Abbildung 2: Robotische Fertigung für Kassetten BUGA Holzpavillon. Quelle: ICD/ITKE Universität Stuttgart

Elementarer Bestandteil des Konzeptes war eine mobile robotische Fertigungseinheit auf einer 20-Fuß Standard Containerplattform, die für dieses Projekt temporär in den Fertigungseinrichtungen der müllerblaustein HolzBauWerke GmbH installiert und dort gemeinsam von Mitarbeitern der Universität Stuttgart und der müllerblaustein HolzBauWerke GmbH betrieben wurde.



Abbildung 3: Montage BUGA Holzpavillon. Quelle: ICD/ITKE Universität Stuttgart

Entscheidend für die wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit der Konstruktion ist, dass sie ohne Lehrgerüst im freien Vorbau hergestellt werden konnte. Das ist sehr ungewöhnlich beim Bau von Schalentragwerken und hier möglich, weil die Konstruktion leicht ist (das Flächengewicht der tragenden Konstruktion beträgt ca. 37 kg/m²) aber gleichzeitig eine hohe Biegesteifigkeit aufweist und die Verbindungen sofort kraftschlüssig geschlossen werden können, d.h. Aushärtezeiten wie im Betonbau nicht erforderlich sind.

2. Die livMatS Biomimetic Schale 2023 in Freiburg

Der livMatS Pavillon bildet eine Erweiterung des Freiburger Zentrum für interaktive Werkstoffe und bioinspirierte Technologien der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg und bietet als Seminargebäude 200 m² Fläche für das Entwickeln disziplinübergreifender Forschungs-ideen. Aus konstruktiver Sicht knüpft er an die BUGA Holzschaale an, ist aber als permanente und ganzjährig nutzbare Konstruktion ausgelegt. Die Abmessungen betragen im

Grundriss rund 15m x 16m, die Spannweite ist damit kleiner als beim BUGA Holzpavillon, wo sie knapp 30 m beträgt. Die Konstruktion besteht wie beim BUGA Holzpavillon aus ebenen Kassetten, die allerdings mit Vollgewindeschrauben dauerhaft verbunden werden. Das Konstruktionssystem des BUGA Holzpavillons wurde vor allem wirtschaftlich optimiert. Hierfür wurden zunächst die Bauteilgrößen vergrößert und so angepasst, dass bei der robotischen Herstellung so wenig Verschnitt wie möglich erzeugt wird. Dann wurde auf die Sägezahnverbindungen zur Übertragung der Schubkräfte in Schalenebene verzichtet, da diese mit einem erheblichen Aufwand für das robotische Fräsen verbunden sind. Alle Schalenkräfte werden über die Vollgewindeschrauben oder über Kontakt der Stirnflächen der Kassetten übertragen. Außerdem bestehen die Kassetten aus einfachen Dreischichtplatten und üblichem Brettschichtholz GL24h für die Randbalken.



Abbildung 4: livMatS Biomimetic Shell 2023 in Freiburg. Foto: Conné van d'Grachten

Das Herzstück der Vorfertigung ist eine neu entwickelte, transportable 7-Achs-Roboterplattform, die eine nahtlose Integration in den Werkhallen des Industriepartners müllerblaustein HolzBauWerke GmbH innerhalb weniger Stunden zuließ. Die 12m lange (40 Fuß ISO Container) Robotereinheit ermöglichte die gleichzeitige Fertigung von vier Bauteilen mit Längen bis zu 3,5 Metern. Die individuellen Hohlkassetten wurden vom Schwerlastroboter aus einzelnen, digital vorformatierten Holzteilen gefügt, geklebt und in einem weiteren Schritt gefräst, gebohrt und schließlich zeiteffizient und mit einer Passgenauigkeit im Submillimeterbereich mittels Sägeblatts abgebunden. So konnte die robotische Fertigungszeit im Vergleich zum BUGA Pavillon um 75% reduziert werden. In die digitale Fertigung der Hohlkassetten wurden manuelle Teilmontageschritte von Sonderbauteilen wie Leuchtmitteln und Akustikelementen durch Augmented Reality direkt integriert. Diese Form der Mensch-Maschine Interaktion im Fabrikationsprozess, in dem unterschiedliche Akteure in einer gemeinsamen digital gestützten Prozesskette kooperieren können und Aufgaben zielgerichtet verteilt werden, ermöglicht eine effektive, digital-handwerkliche Herstellung komplexer Bauteile mit einem hohen Maß an Präzision.



Abbildung 5: robotische Vorfertigung der Holzkassetten. Foto: ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart

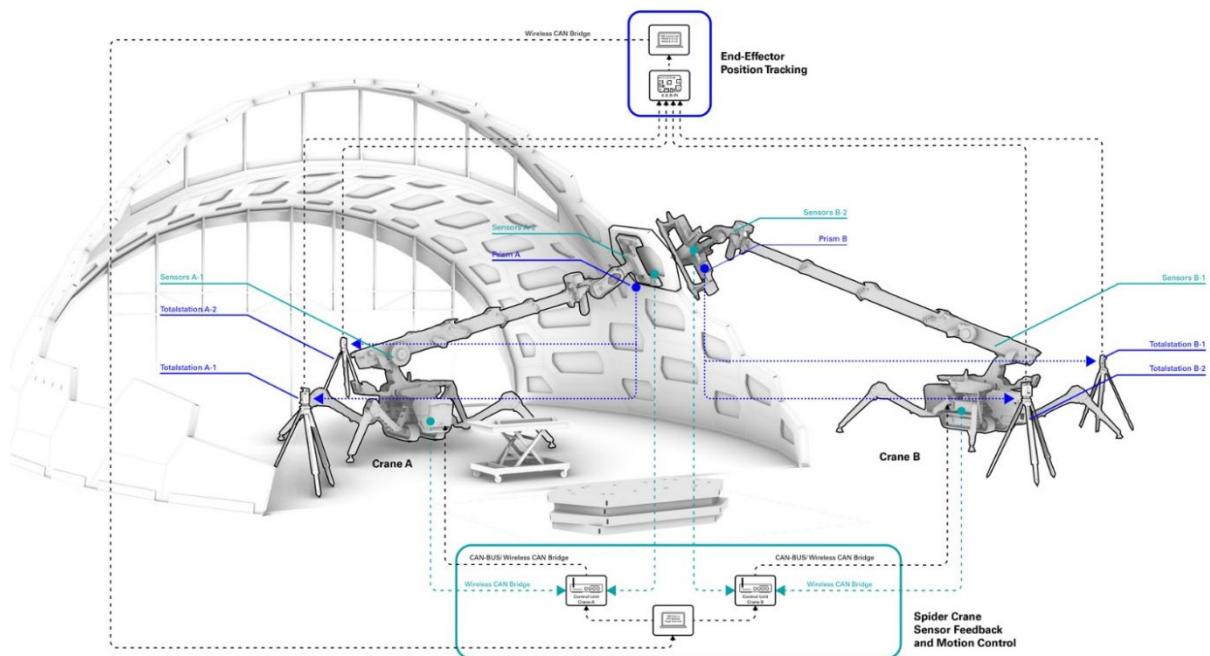


Abbildung 6: Montage der Holzkassetten auf der Baustelle. Foto: ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart

Segmentierte Holzleichtbaukonstruktionen eignen sich aufgrund der hohen Präzision in der Vorfertigung und des geringen Bauteilgewicht für eine automatisierte Montage vor Ort, die im Rahmen dieses Projekts anhand von mehreren Schalensegmenten erstmals in einer realen Baustellensituation durchgeführt wurden. Hierfür wurden zwei cyber-physikalische Montageplattformen mit End-Effektoren entwickelt, die als automatisiertes Montage-Konzept vom digitalen Zwilling bis zu praktischer Einbindung in den Bauablauf untersucht wurden.

Das Montageprinzip besteht aus einem automatisierbaren Spinnenkran, der mit einem Vakuumgreifer Bauteile aufnimmt, sie automatisch an der entsprechenden Einbauposition platziert und in Position hält, bis diese ebenfalls automatisch verschraubt werden. Hierfür fährt ein zweiter, mit einem neuartigen Schraubeffektor ausgestatteter Spinnenkran die zu verschraubenden Kanten automatisiert an und bringt alle Schrauben ein. Für die wich-

tige Lokalisierung und Präzision der Bauroboter wurde ein automatisiertes Echtzeit-Tachymeter Netz bestehend aus vier Tachymetern entwickelt, wovon jeweils zwei Tachymeter die Position eines Bauroboters bestimmen.

Um bei komplexen Schalenbauwerken eine reibungslose Montage gewährleisten zu können, ist die Qualitätssicherung von größter Bedeutung. Ziel war es Hohlkassetten durch die Fertigungsschritte zu begleiten und so mögliche Änderungen der Geometrie feststellen zu können. Dafür wurde mittels eines terrestrischen Laserscanners ein digitales Abbild ausgewählter Kassetten erzeugt, welches dann mit der Soll-Geometrie aus der Planung verglichen werden konnte. Diese Messungen wurden sowohl nach der Fertigung, unmittelbar vor der Montage auf der Baustelle, sowie im eingebauten Zustand durchgeführt. Um eine abschließende geometrische Qualitätssicherung durchführen zu können wurde außerdem eine Aufnahme der fertigen Schale erstellt, um die Geometrie final zu evaluieren.



Abbildung 7: Montage der Holzkassetten auf der Baustelle mit links: Effektor zum Positionieren der Bauteile und rechts: Effektor zum Setzen der Vollgewindeschrauben. Foto: ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart

4. Weiterentwicklung der Segmentschalen zu Deckensystemen

Die Bauform des Pavillons ermöglicht es, den geometrischen Gestaltungsspielraum sowie die konstruktive Leistungsfähigkeit einer neuen Bauweise zu erproben und zu demonstrieren, ohne gleich alle funktionalen Anforderungen hinsichtlich Akustik, Brandbeständigkeit, Dauerhaftigkeit etc. erfüllen zu müssen, die üblicherweise mit Gebäuden verbunden sind. Ziel ist aber die Übertragung der für die hier vorgestellten Segmentschalen entwickelten Ideen zu Planung, Konstruktion, Fertigung und Montage auf den allgemeinen Geschossbau.

Das entwickelte Deckensystem [6], [7] übernimmt dabei Ansätze aus den Holzsegmentschalen: ähnlich wie deren Hohlkassetten ist es zweilagig aufgebaut um den Verbrauch von Holz zu reduzieren. Die beiden Decklagen bestehen in diesem Fall aus Brettsperrholzplatten, die durch 1,2 m lange Stege aus Brettschichtholz schubsteif gekoppelt sind. Die Stege folgenden diskontinuierlich den Schubspannungen in der Platte. Die Decke lagert punktförmig auf Stützen aus Brettschichtholz auf. Um den Stützenkopf herum ist der Hohlräum mit einer Verstärkungsplatte ausgefüllt, die als Schubverstärkung das Durchstanzen verhindert, ähnlich wie Dübelleisten bei Stahlbetonflachdecken. Die Durchleitung der Stützenkräfte erfolgt über Einlagen aus Furnierschichtholz aus Baubuche, so dass auf die üblichen Einbauteile aus Stahl verzichtet werden kann. Auch die Fertigung knüpft an Ansätze von dem BUGA Holzpavillon an: zwei korrespondierende Roboter werden auf einer transportablen Containerplattform montiert. Einer platziert die Bauteile, d.h. vor allem die Stege, der zweite bearbeitet sie, d.h. bringt den Leim auf und fräst die Aussparungen. Auf diese Weise werden im Werk Deckenplatten zu transportfähigen Einheiten von etwa 12m x 2,80 m vorgefertigt und dann auf der Baustelle miteinander verklebt. Die Fugen zwischen den Segmenten werden auf der Baustelle verklebt.

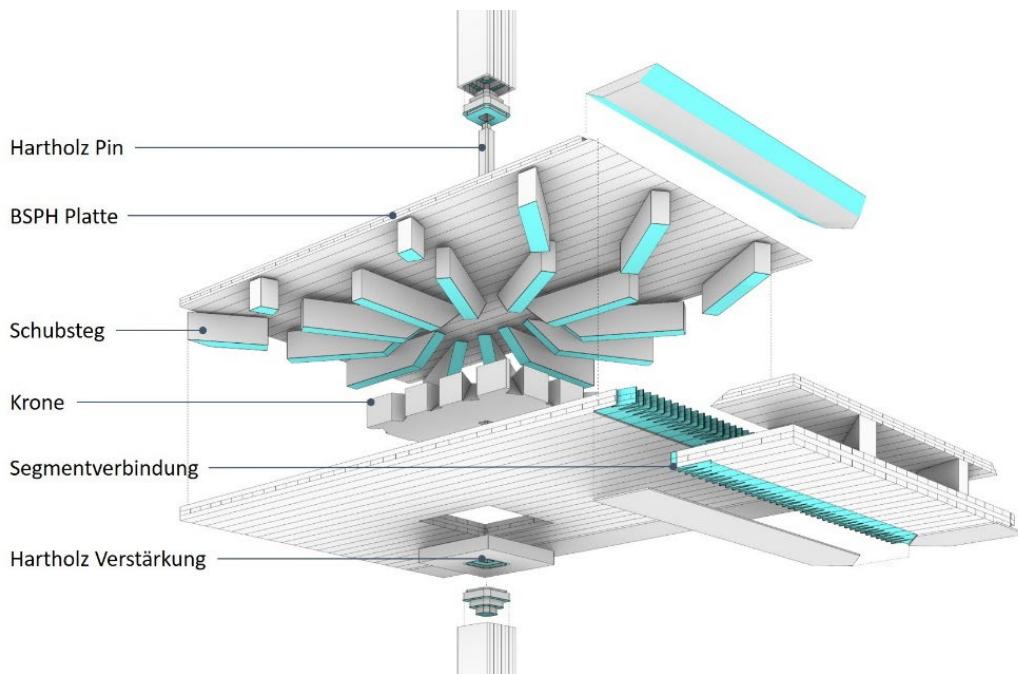


Abbildung 8: Zweilagiges Deckensystem für große Spannweiten und unregelmäßige Stützenstellung [7]
Quelle: IntCDC Universität Stuttgart



Abbildung 9: Geplante Fertigung der zweilagigen Holzdecken in der Halle des Excellenzclusters IntCDC, Waiblingen. Quelle: IntCDC Universität Stuttgart

Um den Verbrauch an Klebstoff und damit auch die Montagezeiten zu reduzieren ist die Ausbildung der Klebefuge zwischen den vorgefertigten Deckensegmenten unterschiedlich, bzw. an Größe sowie Art der Beanspruchung angepasst, d.h. überwiegend Biegung oder zusätzlich auch große Schubkräfte. Dies erhöht die geometrische Komplexität der Bauweise weiterhin, so dass diese insgesamt nur mit einer konsistenten digitalen Integration von Planung und Fertigung denkbar ist.

Eine besondere Herausforderung für den mehrgeschossigen Holzbau stellen die Anforderungen aus dem Schallschutz und dem sommerlichen Wärmeschutz dar. Gängige Konzepte reagieren hierauf mit Masse, was im Hinblick auf eine ressourceneffiziente Leichtbaukonstruktion kontraproduktiv ist. Während die thermische Speichermasse aus den tragenden Konstruktionen in den Ausbau verlegt werden kann, ist für den Schallübertrag die Masse der tragenden Decke maßgebend. Hier werden Ansätze untersucht, bei denen die Schubstege wie Federn so ausgelegt sind, dass sie die beiden Deckenlagen zwar statisch verbinden, aber akustisch den Trittschallübertrag dämpfen.

5. Die Holzbaudemonstratoren

Die Holzbauforschung an der Universität Stuttgart im Rahmen des Exzellenzclusters IntCDC unterscheidet sich von vielen anderen Forschungsprojekten auch darin, dass sie in großformatigen Demonstratoren, wie zum Beispiel den beiden hier vorgestellten Holzsegmentschalen, erprobt wird. Viele Fragen stellen sich erst bei der baulichen Umsetzung im Maßstab 1:1, z.B. die Ausführung von Anschluss- und Randdetails oder die Integration

und Ausführung von Dicht- und Dämmebenen oder von äußeren Bekleidungen. Ein besonderer Aspekt, der in Forschungsprojekten häufig kaum adressiert wird, ist die Frage der bauaufsichtlichen Genehmigung. Forschung ist nur dann Forschung, wenn sie sich außerhalb des Stands der Technik befindet, bzw. das Ziel hat, diesen zu erweitern. Das bedeutet für den Transfer in die Praxis, dass dieser über Zustimmung im Einzelfall bauaufsichtlich abgedeckt werden muss. Wenn der Aufwand hierfür aber zu groß wird, ist dieser Transfer kaum realistisch. Die Genehmigungsfähigkeit muss also von Beginn an mit gedacht werden, und auch Gutachter und Genehmigungsbehörden entsprechend eingebunden werden.

Zentrales Projekt des Exzellenzclusters ist das Large Scale Construction Laboratory, das LCRL Gebäude, das auf dem Universitätscampus in Vaihingen 2026 mit Außenabmessungen von rund 100m x 30m realisiert werden soll. Es ist gleichzeitig Heimat für die Forschenden des IntCDC aber gleichzeitig auch Demonstrator für die verschiedenen Forschungsthemen. Diese werden in das Gebäude integriert, z.B. der Gradientenbeton für die Bodenplatte und die Untergeschosse, die Holzbaudecken im Bürobereich und ein Faserträger im Dach, sowie Bio Composite als innen liegende Bekleidungen. Dabei sollen nicht nur die Bausysteme sondern auch die Fertigungs- und Montageprozesse erprobt werden. Auch hier sollen die Kasetten für das Dachtragwerk nicht nur digital vorgefertigt, sondern in Teilbereichen auf der Baustelle robotisch montiert werden.

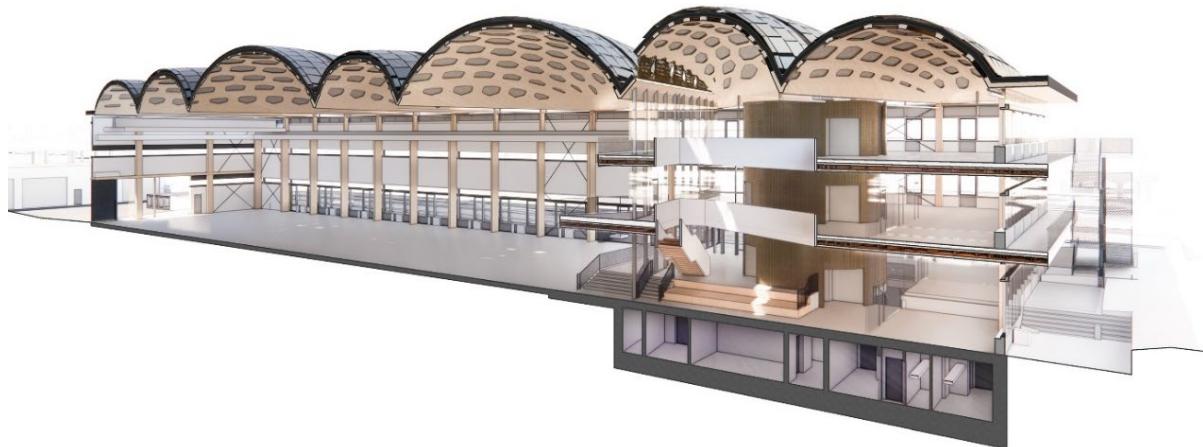


Bild 10: Large Scale Robotic Construction Laboratory des IntCDC auf dem Campus Vaihingen der Universität Stuttgart, Fertigstellung 2026. Quelle: IntCDC Universität Stuttgart

Bei den Holzdecken sind neben den Aspekten der digitalen Planung und Fertigung vor allem die Klebefugen eine besondere Herausforderung. Hierbei kommen auch Verklebungen auf der Baustelle zum Verbinden der Deckensegmente zum Einsatz.

6. Mitwirkende an der Holzbauforschung

Die hier dargestellten Holzbauforschungen sind nur durch die intensive interdisziplinäre Zusammenarbeit einer Vielzahl an Mitwirkenden aus unterschiedlichen Disziplinen möglich. Diese kommen aus folgenden Instituten und Einrichtungen der Universität Stuttgart:

ICD – Institut für Computerbasiertes Entwerfen und Baufertigung

ITKE – Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen

MPA – Materialprüfungsanstalt, Abteilung Holzkonstruktionen

IABP – Institut für Akustik und Bauphysik

ISW – Institut für Steuerungstechnik der Fertigungseinrichtungen

VISUS – Visualisierungsinstitut der Universität Stuttgart

SOWI – Institut für Sozialwissenschaften

- [1] BBSR online-Publikation Nr 17/2020. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), 2020
- [2] Umwelt Bundesamt, Texte 192/2020. Potenziale von Bauen mit Holz - Erweiterung der Datengrundlage zur Verfügbarkeit von Holz als Baustoff zum Einsatz im Holzbau sowie vergleichende Ökobilanzierung von Häusern in Massiv und Holzbauweise
- [3] Svatoš-Ražnjević, H., Orozco, L., Menges, A.: 2022, Advanced Timber Construction Industry: A Review of 350 Multi-Storey Timber Projects from 2000–2021. *Buildings*, vol. 12, no. 4. (DOI: 10.3390/buildings12040404)
- [4] Bechert, S., Sonntag, D., Aldinger, L., Knippers, J.: 2021, Integrative structural design and engineering methods for segmented timber shells - BUGA Wood Pavilion. *Structures* 34 (2021) 4814–4833
- [5] Wagner, H.J., Alvarez, M., Kyjanek, O., Bhiri, Z., Buck, M., Menges, A., Flexible and transportable robotic timber construction platform – TIM. *Automation in Construction* 120 (2020) 103400
- [6] Krtschil, A., Orozco, L., Bechert, S., Wagner, H.J., Amtsberg, F., Chen, T.Y., Shah, A., Menges, A., Knippers. J. Structural development of a novel punctually supported timber building system for multi-storey construction. *Journal of Building Engineering* 58 (2022) 104972
- [7] Tapia,C., Simon, K., Stimpfle, L., Münzer, A., Aicher, S. : Full-scale bi-axial static and dynamic load test for an advanced plate-column connection used in the new large construction robotics laboratory at Stuttgart University