

JOINTS

VERBINDUNGEN

READY-MADE 'JOINT'

Whereas the *Interlocking Spaces* research focused on developing self-interlocking complex joints to connect several beams at one point (as typically done in wood construction), in *Branch Formations* the directive was to use naturally grown forked branches as ready-made structural nodes (Fig. 1). The 'technical joining' thereby moves away from the complex intersection point of multiple structural axes and into the linear area of the axes themselves, therefore requiring only simple extension joints between just two members. The developed spatial frameworks are essentially structural systems without technical knots at the nodes but rather joints in the beams.

This concept is contrary to how architectural structures and systems have been typically understood and thought of for centuries.

In contemporary industrial timber-manufacturing processes, these naturally grown branch knots are generally considered as faults and the value of timber decreases proportionally with the amount of knot-holes that can be found in them. ↗³⁹

The wood found in naturally grown branch nodes is also much stronger and harder to cut, because of the intertwining and twisting of the wood fibers.¹ Anyone who has ever tried to manually cut through such an area has most likely experienced that aspect firsthand. The wood of a hardwood tree crown is optimized for flexibility and changing load case scenarios (wind, snow, etc.) and therefore develops a completely different microscopic cell structure than stem wood. ↗⁴⁰

Scientific research into the use of naturally grown tree nodes for artificial structures is starting to appear at the BOKU Vienna, for example.² ↗⁴¹

One of the new aspects that is emerging through using this type of wood is its inherent flexing capacity, in regard to the manufacturing processes and a residual global flexibility of the structures built from it. This challenges the conventional understanding of wood construction today.

READY-MADE 'VERBINDUNG'

Während sich das *Interlocking Spaces*-Projekt auf die Entwicklung von komplexen Strukturen konzentrierte, in denen mehrere Balken an einem Punkt durch Steckverbindungen gefügt werden (wie es typischerweise im Holzbau geschieht), war die Grundidee in *Branch Formations*, natürlich gewachsene Vergabelungen als schon gegebene 'Knoten' für eine Lastübertragung in Konstruktionen zu verwenden (Abb. 1). Dadurch verlagert sich das 'technische Fügen' weg vom komplexen Schnittpunkt mehrerer Strukturachsen in den linearen Bereich der Achsen selbst und erfordert daher nur einfache Verlängerungsverbindungen zwischen lediglich zwei Elementen. Die entwickelten Raumfachwerke sind im Wesentlichen strukturelle Systeme ohne technische Verbindungen an den Knotenpunkten, sondern mit Fügestellen in den Trägern.

Dieses Konzept steht im Gegensatz zu architektonischen Strukturen und Systemen, wie sie seit Jahrhunderten verstanden und gedacht werden.

Im heutigen industriellen Holzbau werden diese natürlich gewachsenen Astknoten in der Regel als Fehler in den (standardisierten) Bauteilen angesehen, und der Wert des Holzes sinkt mit der Anzahl der Astlöcher. ↗³⁹

Das Holz von natürlich gewachsenen Astknoten ist zudem viel stärker und schwerer zu sägen, weil die Holzfasern ineinander verwunden und verdreht sind.¹ Alle, die schon einmal versucht haben, von Hand einen solchen Bereich zu bearbeiten, haben das höchstwahrscheinlich bereits selbst erlebt. Das Holz aus der Krone von Laubbäumen ist von Natur aus auf Flexibilität und wechselnde Lastfälle optimiert (Wind, Schnee etc.) und entwickelt daher eine völlig andere mikroskopische Zellstruktur als Stammholz. ↗⁴⁰

Wissenschaftliche Forschungen zur Verwendung von natürlich gewachsenen Astverzweigungen für künstliche Strukturen gibt es unter anderem an der BOKU Wien.² ↗⁴¹

Einer der neuen Aspekte, die sich durch die Verwendung solcher Holzteile ergeben, ist die inhärente Biegefähigkeit, die sich auf die Herstellungsprozesse und eine globale Restflexibilität der daraus gebauten Strukturen auswirkt. Dies stellt das heute übliche Verständnis von Holzbau in Frage, das auf maximale Steifigkeit abzielt.

↗³⁹ see Raith, K.: *Wood Construction – On the Renewal of an Ancient Art*, p. 90 ff.

↗⁴⁰ see Lichtenegger, H.: *Cellulose Nanofibers in Wood*, p. 22 ff.

↗⁴¹ see Müller, U., Teischinger, A.: *Connections in Wood and Material Efficiency*, p. 30 ff.



► Fig. 1 | Abb. 1:
Cross-section of a Y-shaped branch fork (common hazel),
showing the fiber layout and intertwining at the knot.
(Primary growth to the left, secondary growth to the right.)

Digital tools allow such highly irregular parts to be conceptualized as structural elements, and cutting-edge manufacturing processes can be used to machine them with high precision (Fig. 2). ↗⁴²

JOINT MORPHOLOGY

The development of joints for branch assemblies was defined by negotiating an overall stability, constraints and requirements of assembly procedures, and the possibilities of fabrication methods. In iterative feedback cycles, this process unfolded across various techniques, utilizing different digital and analog tools. ↗⁴³

First, standard half-lap joints – as the simplest solution for connecting branch ends – were chosen in order to be able to focus on the complexity and irregularity of the spatial arrangement instead of dealing with a complex geometry in the detail (Figs. 3a+b). This basic joint type allowed for a certain degree of adjustability and fitting tolerance during the assembly process. Furthermore, it enabled manual refinement after CNC fabrication that is constrained by limited degrees of freedom such as a 3-axis system (Fig. 4). Due to its simple geometry, it was also well-suited for an AR-assisted fabrication technique using low-tech hand tools. ↗⁴⁴

In subsequent steps, the half-lap principle evolved over the course of various studies (Figs. 5a–c). Some focused on improving the stability and accuracy of assembly enabled by form-fitting, while others were aimed at joint designs featuring mechanical locks with e.g., wedges to avoid using metal fasteners or glue for fixation. The latter studies showed that a romantic approach of pure wood connections with intricate joint geometry requires a simplistic, standardized overall organization of structural members. A simultaneity of complexity on both a detail and a global level rule each other out.

Digitale Werkzeuge erlauben es, solch hochgradig unregelmäßige Teile als Bauelemente zu denken, und mit modernsten Fertigungsverfahren können diese zudem mit hoher Präzision bearbeitet werden (Abb. 2). ↗⁴²

MORPHOLOGIE DER VERBINDUNGEN

In der Entwicklung von Verbindungsdetails für Astgabel-Konstruktionen wurden die Anforderung an eine Gesamtstabilität, die Notwendigkeiten von Montageverfahren sowie Möglichkeiten von Fertigungsmethoden miteinander verhandelt. In iterativen Bearbeitungsschritten entwickelte sich ein Prozess, in dem verschiedene Techniken, digitale und analoge Werkzeuge zum Einsatz kamen. ↗⁴³

Zunächst wurde die Überblattung als einfachste Lösung für eine Verbindung von Ästen untersucht, um den Schwerpunkt auf die Auseinandersetzung mit Komplexität und Unregelmäßigkeit auf die Ebene der räumlichen Anordnung zu legen, anstatt sich auf eine komplexe Geometrie im Detail zu konzentrieren (Abb. 3a+b).

Dieser Grundverbindungstyp lässt ein gewisses Maß an Justierbarkeit und Passtoleranz beim Zusammenbauen zu. Außerdem ermöglicht er eine manuelle Nachbearbeitung nach der in ihren Freiheitsgraden begrenzten CNC-Fertigung (3-Achs-System) (Abb. 4). Aufgrund ihrer einfachen Geometrie eignet sich die einfache Überblattung auch gut für eine AR-unterstützte Fertigungstechnik mit Low-Tech-Handwerkzeugen. ↗⁴⁴

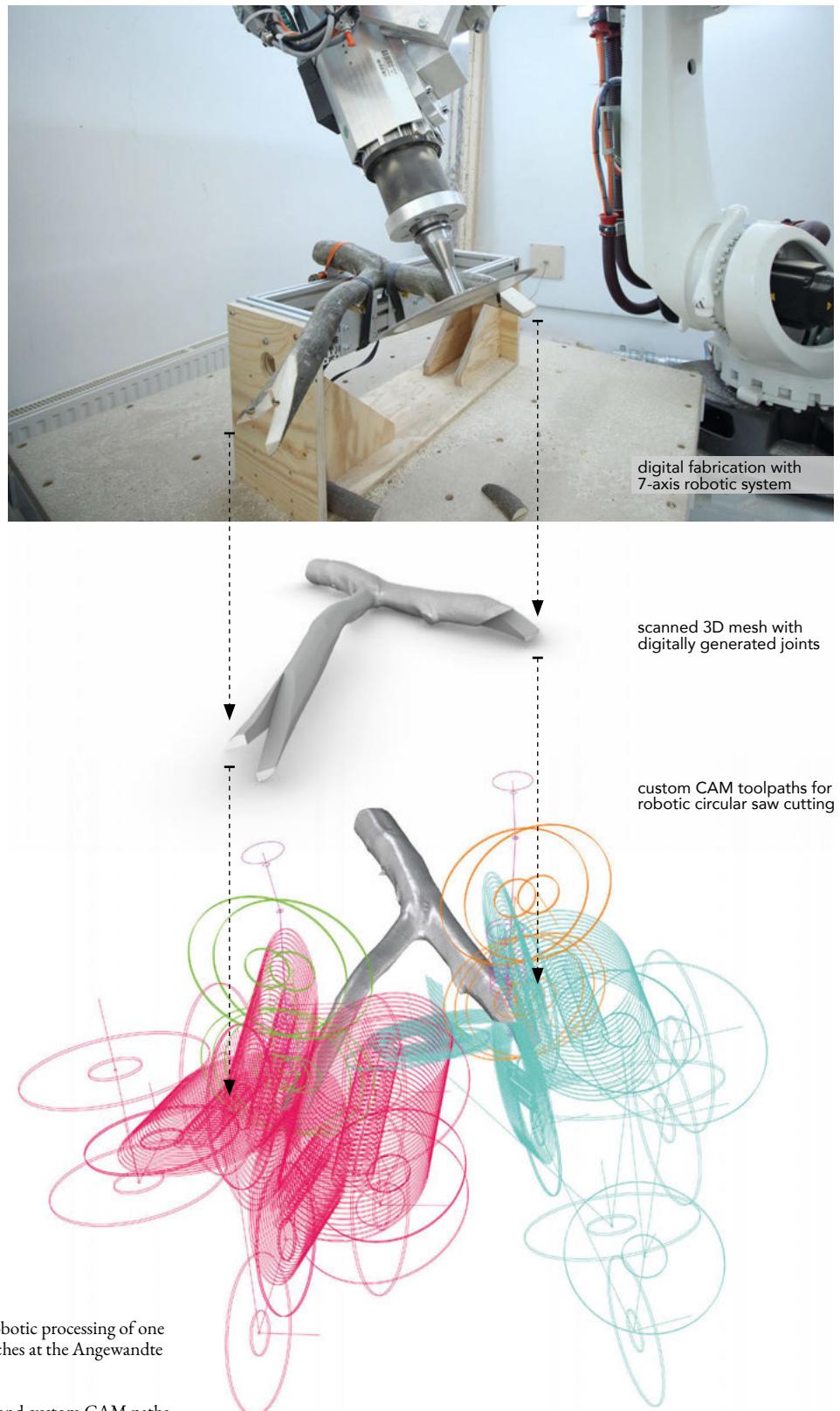
In weiteren Schritten wurde das Prinzip der einfachen Überplattung in verschiedenen Studien weiterentwickelt (Abb. 5a–c). Einige konzentrierten sich auf die Verbesserung der Stabilität und Genauigkeit beim Zusammenbau, die durch Formschluss ermöglicht wird. Andere zielen auf das Design von Verbindungen mit mechanischen Verriegelungen ab, zum Beispiel mit Keilen, um Metallverbinder oder Klebstoffe zum Fixieren zu vermeiden. Letztere haben gezeigt, dass der romantische Ansatz, reine Holzverbindungen mit komplizierten Verbindungsgeometrien zu verwenden, ein vereinfachtes, standardisiertes Gesamtlayout der Bauteile erfordert. Eine Komplexität sowohl auf Detail- als auch auf globaler Ebene schließt sich wechselseitig aus.

↗⁴² see Hornung, P.: *Robotic Fabrication at the Angewandte Robotics Lab (ARL)*, p. 180 ff.

and *Branch Formations : Tools : 3- and 5-Axis CNC Routing*, p. 176 f.

↗⁴³ see *Branch Formations : Tools*, p. 156–179

↗⁴⁴ see *Branch Formations : Tools : Augmented Reality*, p. 172–175



► Fig. 2 | Abb. 2:

High precision 7-axis robotic processing of one of the beechwood branches at the Angewandte Robotics Lab.

Top: Fabrication setup.

Bottom: Digital model and custom CAM paths.

On top of this sheer impossibility, such complicated joints are obsolete in the context of structures from irregular elements, which are arranged into only one singular formation. Detachable connections are more powerful for assemblies of modular components that can be re-configured in multiple ways.

The project therefore took on a more pragmatic direction, prioritizing the realization of larger structures and the development of a robust workflow that could be translated into practices for building construction. Improved variations of half-lap joint geometries were mainly developed together with a robotic workflow. ↗⁴⁵

These types of joints could either be glued and fixed with wooden dowels, resulting in a permanent bond (Fig. 6), or connected with screws to allow for disassembly (Fig. 7).

The structural deficiencies of the screwed connection ↗⁴⁶ could essentially be resolved by clamping parts using stronger bolts, nuts and washers capable of substantially increasing compression force while keeping the joints detachable (Fig. 8).

This efficient joint hints at a possible implementation of the *Branch Formations* concept into building-like architectural scenarios, in which branch forks could be used as load-bearing components.

Hinzu kommt, dass solche komplizierten Verbindungen im Zusammenhang mit der Gestaltung von Strukturen aus unregelmäßigen Elementen obsolet sind. Diese Art lösbarer Verbindungen ist sinnvoller für rekonfigurierbare (modulare) Bauteile.

Daher schlug das Projekt eine pragmatischere Richtung ein und priorisierte die Realisierung größerer Strukturen und die Entwicklung eines robusten Arbeitsablaufs, der in eine (Hoch-)Baupraxis übergehen könnte. Verbesserte Varianten der einfachen Überplattung wurden hauptsächlich zusammen mit einem robotergestützten Arbeitsablauf entwickelt. ↗⁴⁵

Diese Verbindungsarten könnten entweder geklebt und mit Holzdübeln fixiert werden, was zu einer dauerhaften Verbindung führt (Abb. 6), oder mit Schrauben zu einer möglichen Demontage verbunden werden (Abb. 7).

Die konstruktiven Mängel der Schraubverbindung ↗⁴⁶ könnten im Wesentlichen dadurch behoben werden, dass die Teile mit stärkeren Bolzen, Muttern und Unterlegscheiben miteinander verschraubt werden, wodurch der Anpressdruck wesentlich erhöht würde und die Verbindungen trotzdem lösbar blieben (Abb. 8).

Diese Hochleistungsverbindung deutet darauf hin, dass eine Umsetzung des Konzepts solcher Aststrukturen in Form von gebäudeähnlichen Architekturszenarien möglich ist.

1 Mattheck, C. (1998): *Design in Nature, Learning from Trees*, Berlin: Springer.

2 Müller, U., Gindl-Altmutter, W., et al. (2014): "Stamm-Astanbindung – eine biologisch optimierte Struktur mit hoher mechanischer Leistungsfähigkeit", in: 10. GraHFT'14.

↗⁴⁵ see Hornung, P.: *Robotic Fabrication at the Angewandte Robotics Lab (ARL)*, p. 180 ff.

↗⁴⁶ see Hornung, P.: *Robotic Fabrication at the Angewandte Robotics Lab (ARL) : Conical Scarf Miter Joint*, p. 182 ff.



▲ Fig. 3a | Abb. 3a:

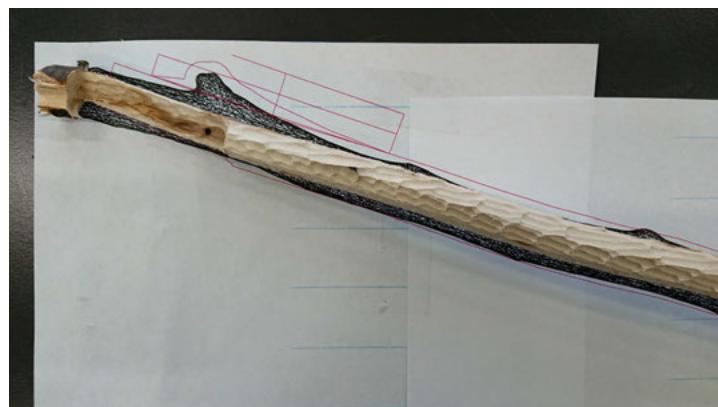
Half-lap joints, manually cut with a Japanese saw along traced lines that were mapped onto the branches using an AR app on a standard smartphone.



▲ Fig. 3b | Abb. 3b:

Two of the 3-axis CNC-processed branch forks joined via a half-lap joint, fixed with wooden dowels.

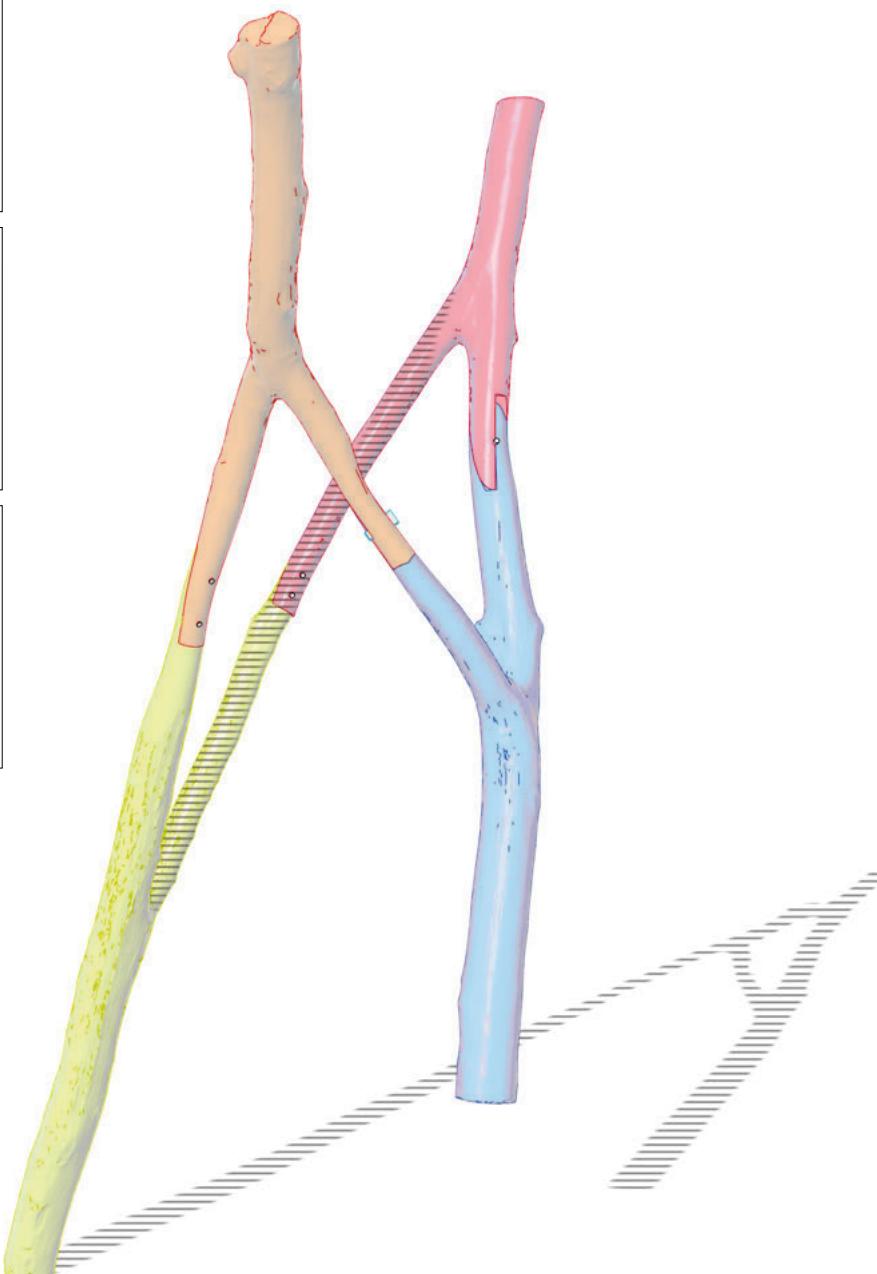
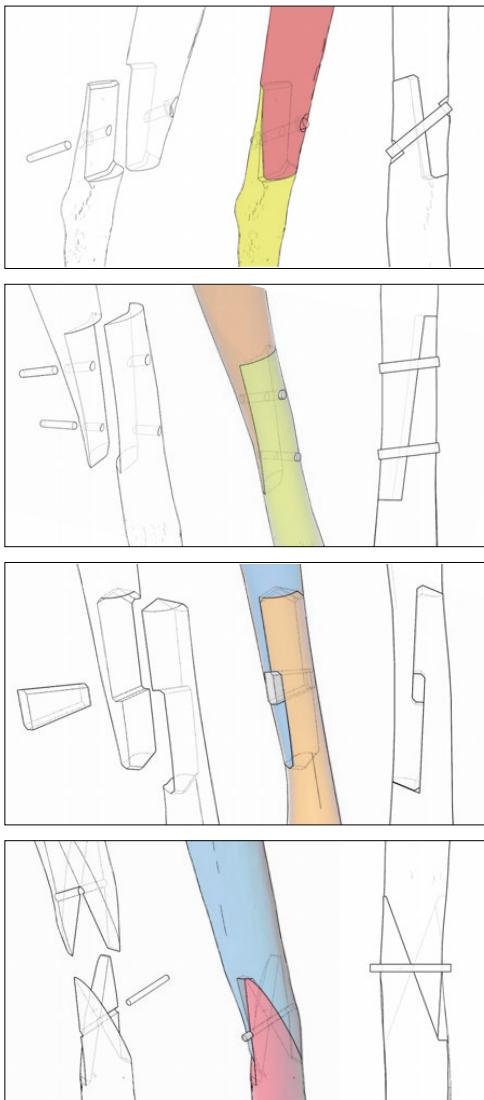
Photo © Lisa Wolf



▲▲ Fig. 4 | Abb. 4:

Surface finish after 3-axis CNC milling with an 8 mm ball-nose milling tool. The joint's contact surfaces needed to be finished manually, removing the ridges (scallops height) to achieve a planar surface. (The roughness was caused by the limitation of the cutting tool diameter, due to the orientation of the joint surfaces not being parallel to the Cartesian X, Y and Z planes and because of strong vibrations.)

[2.2] BRANCH FORMATIONS : JOINTS



▲► Fig. 5a | Abb. 5a:

Top two: Modified half-lap joints. The typically planar contact surfaces were changed into a conical shape for improved stability against sheer forces and better form-fitting during assembly. Bottom two: Variations of joints with mechanical locks.

► Fig. 5b | Abb. 5b:

Fabrication tests of a conical lap joint, realized through flank milling which caused strong vibrations, ripping off material. Therefore work on this technique was not continued.



▼► Fig. 5c | Abb. 5c:

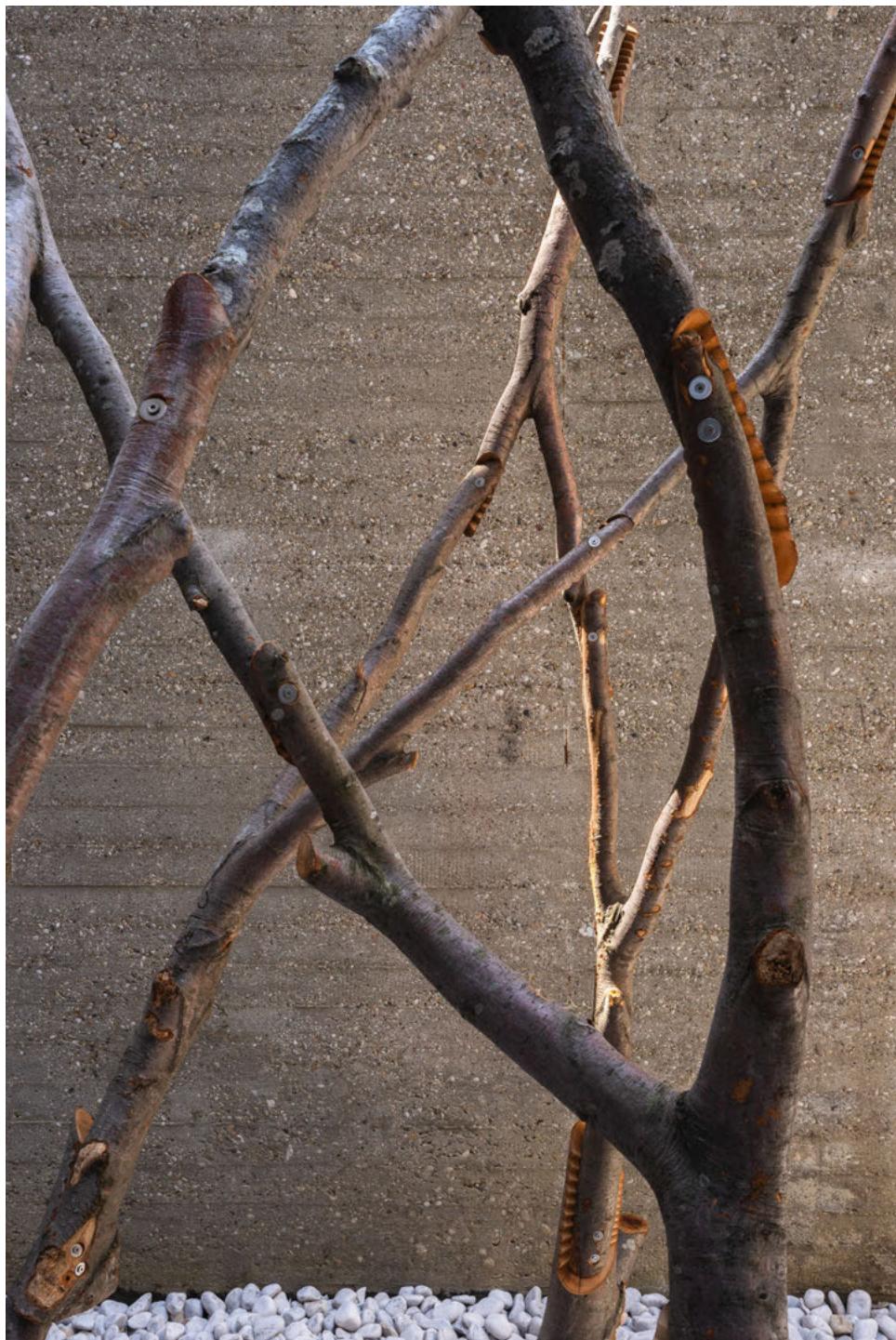
Fabrication tests of a scarf joint (with lock), realized through circular saw cutting and drilling. Due to minimal vibrations, cutting (as opposed to milling) proved to be a successful fabrication technique that was further developed in the project.



◀▼ Fig. 6 | Abb. 6:

Parts were glued to form tetrahedral cells as fixed (prefab) modules for the assembly of the demonstrator in the *Conceptional Joining* show in the Angewandte Innovation Laboratory, 2019.





▲ Fig. 7 | Abb. 7:

A reversible connection with screws and washers, as used throughout the *Branch Formations* prototype, 2021, as it was planned to be reerected at different locations over the course of the *Deep Dreaming Creatures* performative art project.

Photo © Thomas Steineder



▲ Fig. 8 | Abb. 8:
Comparison of a screwed and a bolted connection.



Photo © Thomas Steiner