

CONCEPTUAL JOINING

Edition Angewandte – Book series of
the University of Applied Arts Vienna
Edited by Gerald Bast, Rector

Edition Angewandte – Buchreihe der
Universität für angewandte Kunst Wien
Herausgegeben von Gerald Bast, Rektor

edition: 'Angewandte

Universität für angewandte Kunst Wien
University of Applied Arts Vienna

CONCEPTUAL JOINING

WOOD STRUCTURES FROM DETAIL TO UTOPIA

HOLZSTRUKTUREN IM EXPERIMENT

Lukas Allner, Christoph Kaltenbrunner, Daniela Kröhnert,
Philipp Reinsberg, Institute of Architecture at the University
of Applied Arts Vienna, and Institute of Art Sciences and Art
Education at the University of Applied Arts Vienna (Eds./Hrsg.)

Birkhäuser
Basel

TABLE OF CONTENTS

INHALTSVERZEICHNIS

ABOUT THE PROJECT / ÜBER DAS PROJEKT	6
ABOUT THE BOOK / ÜBER DAS BUCH	7
↗ Gerald Bast	10
PREFACE / VORWORT	
↗ Christoph Kaltenbrunner	14
DO RESEARCH! / FORSCHEN!	
[1.0] PRECONDITIONS	
FRAGESTELLUNGEN	21
[1.1] MATERIAL / MATERIAL	21
↗ Helga Lichtenegger	22
CELLULOSE NANOFIBERS IN WOOD: Tiny Structural Elements with a Huge Effect	
ZELLULOSE-NANOFASERN IN HOLZ: Kleine Strukturelemente mit großer Wirkung	
↗ Ulrich Müller, Alfred Teischinger	30
CONNECTIONS IN WOOD AND MATERIAL EFFICIENCY: Wood Formation Follows Mechanical Load	
VERBINDUNGEN IM HOLZ UND MATERIALEFFIZIENZ: Die Holzbildung folgt der mechanischen Belastung	
[1.2] CRAFT / HANDWERK	39
↗ Klaus Zwerger	40
HANDICRAFT AND TECHNOLOGY HANDWERK UND TECHNOLOGIE	
↗ Brigitte Felderer	48
HANDICRAFT AS AN ATTITUDE TOWARDS THE WORLD HANDWERK ALS HALTUNG ZUR WELT	
[2.0] CONCEPTUAL JOINING	57
CONCEPTUAL JOINING	
APPROACH / ANSATZ	58
[2.1] INTERLOCKING SPACES / INTERLOCKING SPACES	65
INTRO / EINLEITUNG	66
↗ Jun Sato	68
DEVELOPMENT OF KIGUMI JOINERY TO CREATE 'NATURALNESS' ENTWICKLUNG DER KIGUMI-TECHNIK ZUR SCHAFFUNG VON 'NATÜRLICHKEIT'	
JOINTS / VERBINDUNGEN	76
↗ Karin Raith	90
WOOD CONSTRUCTION – ON THE RENEWAL OF AN ANCIENT ART HOLZBAU – ZUR ERNEUERUNG EINER ALten KUNST	

TOOLS / WERKZEUGE	96
↗ Adam Orlinski, Clemens Preisinger, Moritz Heimrath	108
ENCODED STRUCTURES: Constraint-Based Design of Modular Elements	
CODIERTE STRUKTUREN: Constraint-basierte Konstruktion modularer Elemente	
GEOMETRY / GEOMETRIE	114
[2.2] BRANCH FORMATIONS / BRANCH FORMATIONS	129
INTRO / EINLEITUNG	130
GEOMETRY / GEOMETRIE	132
↗ Anja Jonkhans	152
DIGITAL DESIGN IN RESEARCH AND PRACTICE DIGITALES DESIGN IN FORSCHUNG UND PRAXIS	
TOOLS / WERKZEUGE	156
↗ Philipp Hornung	180
ROBOTIC FABRICATION AT THE ANGEWANDTE ROBOTICS LAB (ARL) ROBOTER-FERTIGUNG IM ANGEWANDTE ROBOTICS LAB (ARL)	
JOINTS / VERBINDUNGEN	190
[3.0] REFLECTIONS AND SPECULATIONS / REFLEXIONEN UND SPEKULATIONEN	201
↗ Hannelore Paflik-Huber	202
MATERIALITY AND ITS AESTHETICS DIE MATERIALITÄT UND IHRE ÄSTHETIK	
↗ Karolin Schmidbaur	210
CONNECTION – EMPATHIC DIALOGUE VERBINDUNG – EIN EMPATHISCHER DIALOG	
↗ Hélène Frichot	218
FOLLOW THE MATERIAL! FOLGE DEM MATERIAL!	
[4.0] A COMPLEMENTARY APPROACH ERGÄNZENDER ANSATZ	227
↗ Ferdinand Ludwig	228
JOINING LIVING WOOD LEBENDES HOLZ VERBINDEN	
[5.0] APPENDIX ANHANG	237
BIBLIOGRAPHY / BIBLIOGRAFIE	238
BIOGRAPHIES / BIOGRAFIEN	244
ACKNOWLEDGMENTS / DANKSAGUNG	254
IMPRINT / IMPRESSUM	256

ABOUT THE PROJECT ÜBER DAS PROJEKT

This book is a documentation of research work as well as a negotiation of concepts and ideas that emerged from within *Conceptual Joining*, a project at the University of Applied Arts Vienna, funded by the Austrian Science Fund (FWF) within the *Programme for Arts-based Research (PEEK)*.

The team investigated the specific characteristics of wood as well as historic, existing and potential processing techniques for that material with the aim of deriving guiding principles for the design and materialization of architectural scenarios. This process was supported by international collaboration partners and experts from various disciplines.

Das vorliegende Buch ist eine Dokumentation der Forschungsarbeit sowie eine Verhandlung von Konzepten und Ideen, die im Rahmen des Forschungsprojekts *Conceptual Joining* entstanden sind. Das Projekt an der Universität für angewandte Kunst Wien wird vom Österreichischen Wissenschaftsfonds (FWF) im Rahmen des Programms *zur Entwicklung und Erschließung der Künste (PEEK)* gefördert.

Ein Team von Forscher*innen untersuchte die spezifischen Eigenschaften von Holz sowie bestehende und mögliche Verarbeitungstechniken mit dem Ziel, Leitprinzipien für den Entwurf und die Materialisierung von architektonischen Szenarien abzuleiten. Unterstützt wurde dieser Prozess durch internationale Kooperationspartner*innen und Expert*innen aus unterschiedlichen Disziplinen.

Project Lead / Projektleitung:
Christoph Kaltenbrunner

Mentors / Mentor*innen:
Anja Jonkhans, Clemens Preisinger, Karin Raith

Researchers / Forscher*innen:
Lukas Allner, Daniela Kröhnert, Philipp Reinsberg, Mechthild Weber

In collaboration with / Zusammenarbeit mit:
Florian Fend, Philipp Hornung, Ben James, Kanade Nagata, Adam Orlinski, Andrea Rossi, Jun Sato, Shigeatsu Shimizu, Matthew Tam, Alfred Teischinger, Sandra Tuider, Landesberufsschule Murau (Vocational School Murau)

ABOUT THE BOOK

ÜBER DAS BUCH

This research has been ongoing. Questions have been investigated following a bottom-up methodology with an open-ended outcome, producing findings in the process. Therefore, this publication constitutes an open workbook that, even though it includes completed studies, also refers to further potential questions and speculations. Reflecting on the open-ended nature of working, this book invites readers to pick up on these open ends and continue exploring.

The documentation of processes, results and findings from within the research is complemented by guest essays that add perspectives and crossdisciplinary views.

The initial chapter depicts the central research questions that form the basis and precondition for *Conceptual Joining*. Academics from the fields of material and cultural science discuss the complex material properties of wood and the diverse aspects of crafting.

The central chapter illustrates the research activity disclosing techniques, workflows, findings and failures. Close collaboration partners and mentors accompanied the project documentation through excursions into specific relevant topics in the form of (stand-alone) essays. Some studies that were not followed up on have been graphically highlighted (pages with gray background). They could be possible starting points for further research.

The final section assembles reflections and speculations by guest authors from the fields of architecture, art theory and philosophy. Lastly, a contribution about a related research project shows another approach to the same material.

Dieses Projekt geht weiter. Fragestellungen wurden mit einer ergebnisoffenen Bottom-up-Methodik untersucht, Erkenntnisse entstanden im Prozess. Daher stellt diese Publikation ein offenes Arbeitsbuch dar, das, obwohl es abgeschlossene Studien enthält, auf weiterführende Fragen und Spekulationen verweist. In Anlehnung an den ergebnisoffenen Ansatz der Arbeit lädt dieses Buch Leser*innen ein, offene Enden aufzutreiben und weiterzudenken.

Die Dokumentation von Prozessen und Ergebnissen aus der Forschung ist durch Gastbeiträge ergänzt, die zusätzliche Perspektiven und interdisziplinäre Sichtweisen hinzufügen.

Das Anfangskapitel stellt die zentralen Forschungsfragen vor, die die Grundlage und Voraussetzung für *Conceptual Joining* bilden. Wissenschaftler*innen aus den Bereichen der Material- und Kulturwissenschaften diskutieren die komplexen Materialeigenschaften von Holz und die vielfältigen Aspekte handwerklicher Auseinandersetzung.

Im zentralen Kapitel wird die Forschungstätigkeit beschrieben, Techniken, Arbeitsabläufe, Erkenntnisse und Misserfolge werden offengelegt. Enge Kooperationspartner*innen und Mentor*innen ergänzen die Projektdokumentation durch Exkursionen in spezifische relevante Themen in Form von (eigenständigen) Essays. An einigen Stellen sind einzelne Untersuchungen grafisch hervorgehoben (Seiten mit grauem Hintergrund), die nicht weiter verfolgt wurden. Sie sind mögliche Anknüpfungspunkte für weitere Forschung.

Der letzte Teil besteht aus Reflexionen und Spekulationen von Gastautor*innen aus den Bereichen Architektur, Kunsttheorie und Philosophie. Ein Beitrag über ein verwandtes Forschungsprojekt zeigt schließlich eine andere Herangehensweise an das gleiche Material.





PREFACE

VORWORT

↗ GERALD BAST // English translation: the editors

Art universities have always offered a working environment that avoids boundaries, encourages curiosity, and understands experimentation as a basic condition. Artistic research or arts-based research is nevertheless a comparatively new concept at international art universities and academies. There has been heated discussion over whether artistic research is even a legitimate term and whether research should not be reserved for the sciences.

The implementation of the *FWF Programme for Arts-based Research (PEEK)* has brought about a paradigm shift in the way artistic research is viewed and treated in terms of cultural policy. The program addresses the main conflict and problem areas within the discourse on artistic research and arrives at definitional statements of remarkable clarity and conciseness. "Every artistic production is based on the work and creativity of artists, who use artistic methods or skills to arrive at art-specific forms of expression. The *Programme for Arts-based Research (PEEK)* is about promoting that process in which artistic knowledge production is accompanied by reflection and thus leads to an increase in knowledge in society. [...] However, the creative process and its reception must be intersubjectively reflected upon, documented and presented in order to be sustainably available to artistic discourse and scientific research in the sense of arts-based research."¹

As in scientific research, the process of artistic research starts with the 'state of the art', it consciously places it at the beginning and not only presupposes it as a starting point, but also openly presents it as such. Artistic research is not only able to further develop the 'state of the art', but it is also able to cross disciplinary boundaries and to cooperate openly with other fields of science. Finally, artistic research is also essential towards the process of acquiring new artistic knowledge that is being documented and thus made comprehensible.

Seit jeher bieten Kunsthochschulen ein Arbeitsumfeld, das Grenzen vermeidet, Neugier fördert und das Experimentieren als Grundbedingung begreift. Künstlerische Forschung oder Art-based Research ist dennoch ein vergleichsweise junges Kapitel an internationalen Kunsthochschulen und -akademien. Die Diskussion, ob künstlerische Forschung überhaupt ein zulässiger Begriff und Forschung nicht für die Wissenschaften reserviert sei, wurde mitunter heftig geführt.

Die Installierung des *FWF-Programms zur Entwicklung und Erschließung der Künste (PEEK)* brachte einen kulturpolitisch paradigmatischen Perspektivenwechsel in der Sichtweise und der Behandlung künstlerischer Forschung. Das Programm greift die wesentlichen Konflikt- und Problemzonen des Diskurses über künstlerische Forschung auf und kommt zu definitorischen Feststellungen von bemerkenswerter Klarheit und Prägnanz. „Jede künstlerische Produktion basiert auf der Arbeit und der Kreativität von Künstler*innen, die mit künstlerischen Methoden bzw. Fertigkeiten zu kunstspezifischen Ausdrucksformen gelangen. Mit dem *Programm zur Entwicklung und Erschließung der Künste (PEEK)* geht es um die Förderung jenes Prozesses, bei dem künstlerische Wissensproduktion von Reflexion begleitet wird und so zu einem Erkenntnisgewinn in der Gesellschaft führt. [...] Der kreative Prozess und dessen Rezeption müssen jedoch intersubjektiv reflektiert, dokumentiert und präsentiert werden, um im Sinne der Art-based Research nachhaltig dem künstlerischen Diskurs und der wissenschaftlichen Forschung zur Verfügung zu stehen.“¹

Genau wie wissenschaftliche Forschung geht künstlerische Forschung in ihrem Prozess vom 'state of the art' aus, sie stellt diesen bewusst an den Anfang und setzt ihn als Ausgangspunkt nicht nur voraus, sondern schildert ihn auch als solchen offen aus. Künstlerische Forschung vermag es nicht nur, den 'state of the art' weiterzuentwickeln, sondern dabei auch disziplinäre Grenzen zu überschreiten und offen mit anderen Wissenschaftsfeldern zu kooperieren. Wesentlich ist schließlich auch, ob der Prozess zur Erlangung neuen künstlerischen Wissens dokumentiert und damit nachvollziehbar ist.

The research project *Conceptual Joining* demonstrates all this in an impressive way. Christoph Kaltenbrunner's team combines engineering and scientific research with conceptual artistic techniques, thus creating interdisciplinary and, above all, new perspectives on cutting-edge questions. As a matter of course, they mix digital tools with traditional craft techniques, combining performance and architecture to create new worlds of experience.

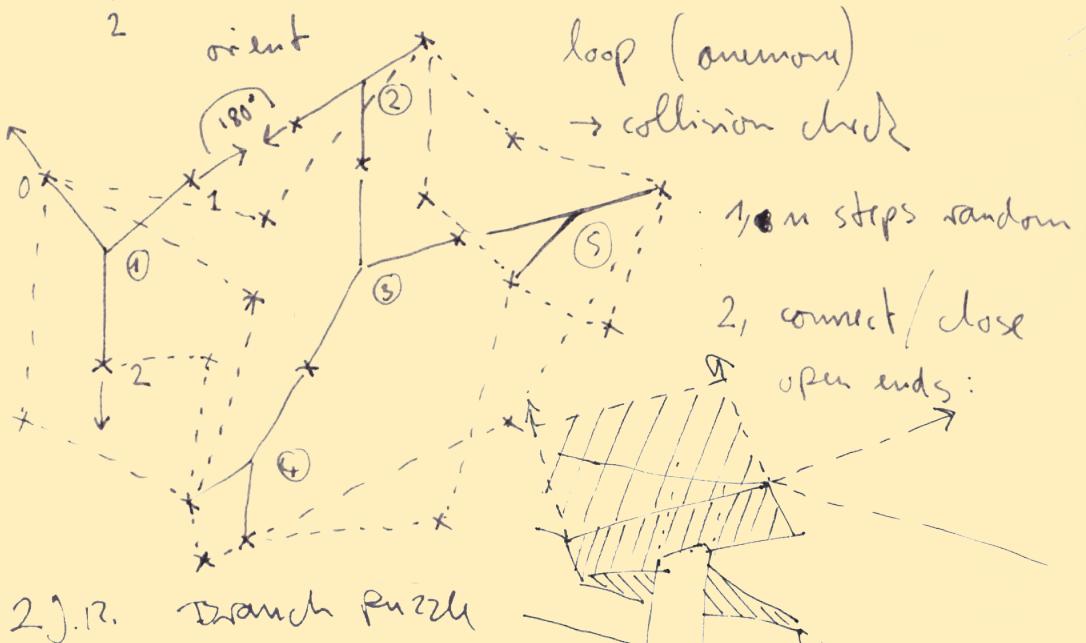
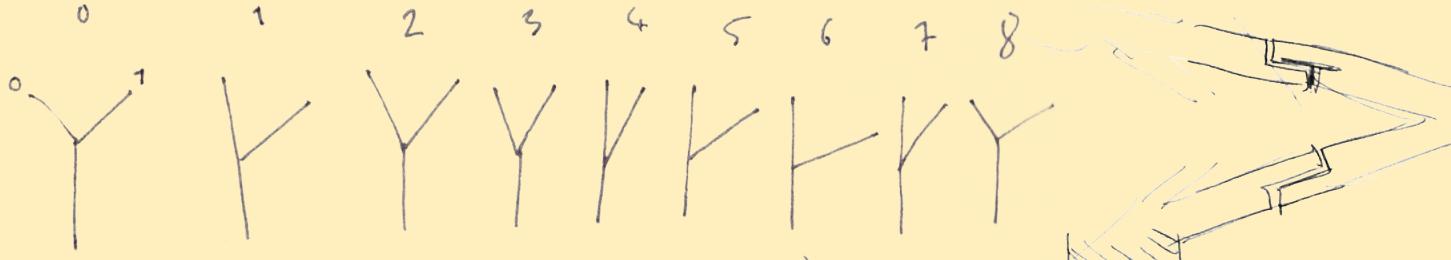
I am particularly pleased that the results from this remarkable research project have now been collected in this publication. With this volume, the *Angewandte* is also making an important contribution towards shaping and defining artistic research.

Das Forschungsprojekt *Conceptual Joining* führt all das auf eindrucksvolle Art und Weise vor. Das Team rund um Christoph Kaltenbrunner verbindet Ingenieurwissenschaft und naturwissenschaftliche Forschung mit konzeptuellen künstlerischen Ansätzen und schafft so interdisziplinäre und vor allem neue Perspektiven auf hochaktuelle Fragen. Mit großer Selbstverständlichkeit mischen sie digitale Tools mit traditionellen Handwerkstechniken und kombinieren Performance und Architektur zu neuen Erfahrungswelten.

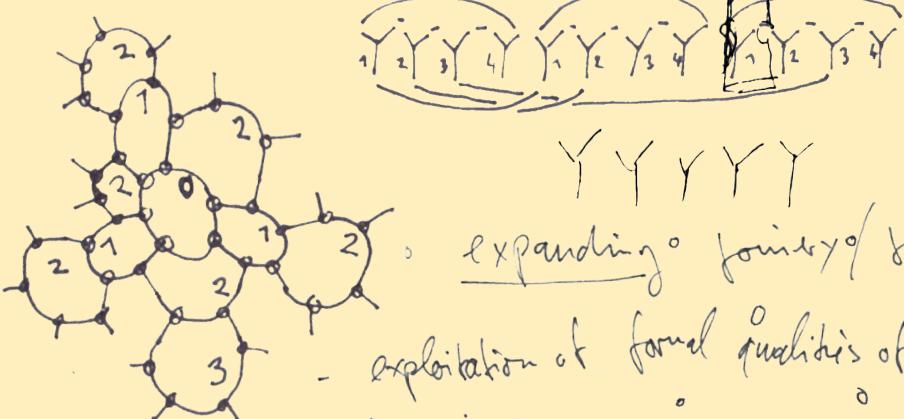
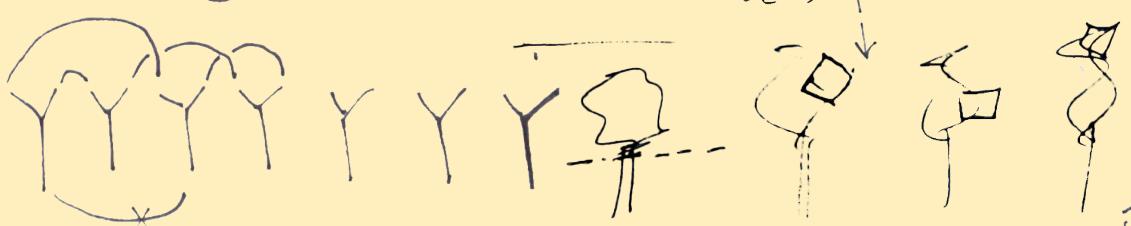
Es freut mich besonders, dass die Ergebnisse aus diesem bemerkenswerten Forschungsprojekt nun in dieser Publikation festgehalten werden. Mit dem vorliegenden Band leistet die *Angewandte* darüber hinaus einen wichtigen Beitrag zur Ausgestaltung und Definition künstlerischer Forschung.

1 ^{en:} *Programme for Arts-based Research (PEEK)*, Program document FWF 2009, p. 3.

^{de:} *Programm zur Entwicklung und Erschließung der Künste (PEEK)*, Programmdokument FWF 2009, S. 3.

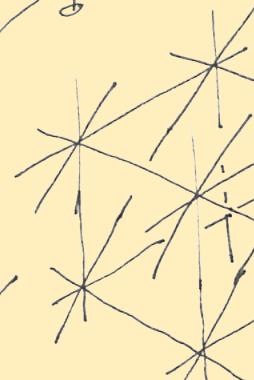
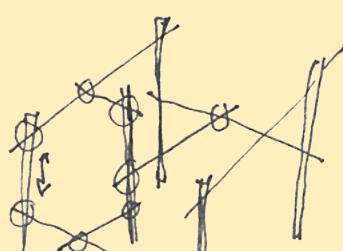
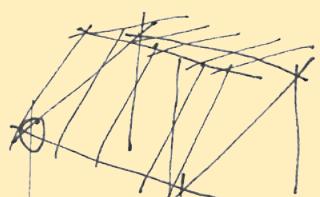


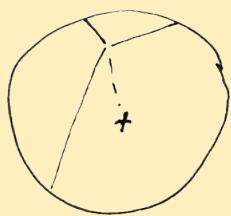
2.1.2. branch puzzle



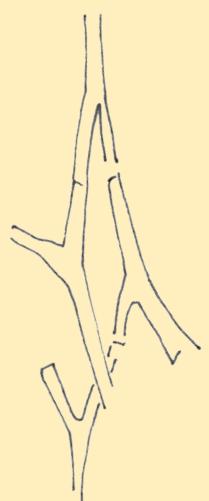
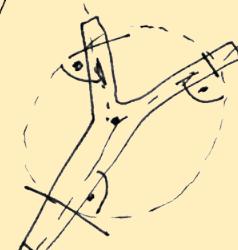
- expanding joints
 - exploitation of formal qualities of
 formal joints

scale, shift,
 extend, bend





Circle Packing



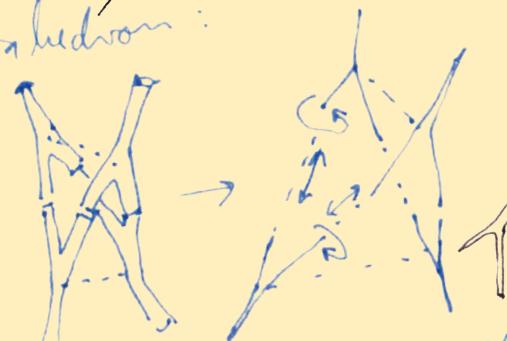
1 d, levels of freedom:

~~less~~
~~variations~~

~~rotation around axis~~

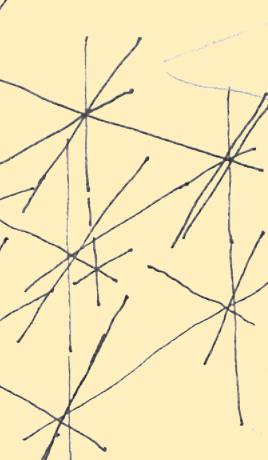
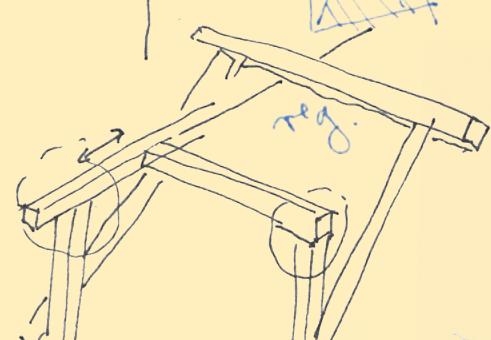
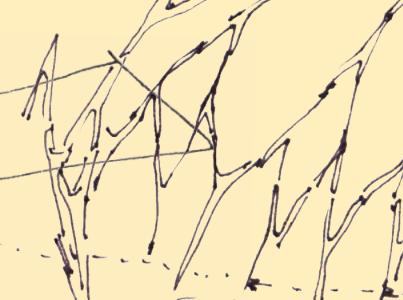
- rotation
- variable distance
- explain tetrahedron

- varavu explain febrilection



41

equal



DO RESEARCH! FORSCHEN!

↗ CHRISTOPH KALTENBRUNNER

In hindsight, every result of work done in artistic research is subject to its own special logic – a logic that arises from the actors, discussions, influences, discoveries and much more, which allows the research process to probe into uncharted territory.

The aim of this research proposal was to observe and discuss traditional joints in timber construction that do not require metal connectors. This initially required adequate problem analysis and anamnesis, which marked out the path into the research field; in a further step, the accumulated knowledge was transcribed into 'utopian' wood connections.

In contrast to quantifiable scientific research, artistic research can be based on intuition, feeling, experimentation, aesthetics – on sensual and physical perception. This kind of research opens up an interdisciplinary realm. Within this space of reciprocal relationships, the research work presented here analyzed and reflected upon, among other things, the historical construction of roof trusses as well as wooden ships, and on the basis of these findings, the forestry of that time was compared with that of today.

Nowadays, the straight growth of a tree is preferred both economically and generally. For shipbuilding in the past, sometimes one would deliberately choose or even cultivate 'crooks', i.e. woods with a special shape, which were built into a ship's structure at exposed points of the force flow. The curvilinear growth of the component would guarantee optimum material utilization for transferring loads. This kind of empirical use of material lies far from the current convention based on economics, automation and optimization.

In the approach of the empirical design process used during the research period, the tree was not perceived as a 'board supplier', but

Rückblickend betrachtet unterliegt jedes Ergebnis einer künstlerischen Forschung seiner speziellen Logik. Eine Logik, die sich aus den Akteur*innen, Diskussionen, Einflüssen, Entdeckungen und vielem mehr ergibt und den Forschungsprozess in ungeahnte Bereiche vordringen lässt.

Beobachtet und diskutiert werden sollten laut Forschungsantrag traditionelle Verbindungen im Holzbau, die ohne Metallverbinder auskommen. Dazu bedurfte es zunächst einer adäquaten Problemanalyse und Anamnese, die den Weg in das Forschungsgebiet absteckten; in einem weiteren Schritt wurde das gesammelte Wissen in 'utopische' Holzverbindungen transkribiert.

Im Gegenteil zur messbaren wissenschaftlichen Forschung kann sich die künstlerische Forschung auf Intuition, Gefühl, Experiment, Ästhetik – auf sinnliche und körperliche Wahrnehmung stützen. Diese Art Forschung öffnet einen interdisziplinären Raum. In diesem Raum wechselseitiger Beziehungen wurden in der hier vorgestellten Forschungsarbeit unter anderem der historische Dachstuhl- sowie der Holzschaftsbau analysiert bzw. reflektiert, und anhand dieser Erkenntnisse wurde die Forstwirtschaft von damals mit der gegenwärtigen verglichen.

Gilt heute der gerade Wuchs eines Baumes als wirtschaftlich und wünschenswert, suchte oder züchtete man für den Schiffsbau in der Vergangenheit bewusst 'Krummlinge', also Hölzer mit besonderer Form, die an exponierten Stellen des Kraftflusses in die Schiffskonstruktion eingebaut wurden. Der krumme Wuchs des Bauteils garantierte eine optimale Materialnutzung für den Lastabtrag. Diese Art empirischer Nutzung von Material liegt der gegenwärtigen Vorstellung von Wirtschaftlichkeit, Automatisierung und Optimierung fern.

In Annäherung an diesen empirischen Designprozess wurde im Laufe der Forschungsdauer der Baum nicht als 'Brettlieferant' wahrgenommen, sondern in seinem Ganzen betrachtet, gedacht und genutzt. Die daraus entwickelten Astgabel-Strukturen (Branch Formations)



Photo © Zara Pfeifer

was rather considered, thought about, and used in its entirety. The resulting branch structures (*Branch Formations*) not only deal with the optimal coupling of tetrahedron modules and their particular idiosyncrasies when being used as building components, but they also embody a reflection of a sustainable utilization of the material wood.

Forestry will undergo an essential restructuring over the coming decades, because global warming is changing the cultivation of timber in particular. Due to the presumably increasing average annual temperatures, the tree line will move to higher altitudes – the optimal habitat of timbers (such as spruce or fir) will become out of reach for economic harvesting. Today, branches are processed into wood chips, if at all, and the unusable remainder is left as biomass in the forest.

The focus of this research work was therefore directed towards hardwoods. Initial investigations of hornbeam branch forks showed that they could be used as a suitable components of tectonic structures, not only due to their angular fidelity between the main and secondary shoots, but also because of their structural consolidation by means of material accretion at the branch node – a hypothesis that was investigated and experimentally explored through a 'trial and error' method. Each of the harvested branch forks was tested for its properties and positioned as a 3D scan in a digital model. The assembly process was informed by a specially developed software algorithm to facilitate a spatially closed support system that could evolve. The connection points of the forks were interlocked in a form-fitting way, and by joining several branch forks, a self-contained tectonic structure was developed.

Initial experiments on a reduced scale were carried out using a robot from the University of Arts Linz in order to apply the knowledge generated from the previous studies to developing special tools for branch fork processing. These were subsequently carried forward for the large-scale implementation of branch fork connections, together with the Angewandte Robotics Lab.

beschäftigen sich nicht nur mit der optimalen Kopp lung von Tetraedern und deren besonderen Eigen schaften als Bauteil, sondern sind auch für sich ein Ab bild einer nachhaltigen Nutzung des Werkstoffs Holz.

Die Forstwirtschaft wird in den nächsten Jahrzehnten eine essenzielle Umstrukturierung erfahren, denn speziell die Klimaerwärmung verändert den Anbau von Nutzholz. Wegen der vermutlich steigenden Jahres durchschnittstemperaturen wandert die Baumgrenze in höhere Lagen – der optimale Lebensraum von Bauholz (wie Fichte oder Tanne) wird die Gebiete des wirtschaftlichen Erntens von Nutzholz verlassen. Äste werden heute, wenn überhaupt, als Hackschnitzel auf gearbeitet, der nicht nutzbare Rest bleibt als Biomasse im Wald zurück.

Der Fokus der Forschungsarbeit wurde daher auf das Laubholz gerichtet. Erste Untersuchungen von Hainbuchen-Astgabeln zeigten, dass diese nicht nur durch ihre Winkeltreue von Haupt- zu Nebentrieb im Wuchs alter, sondern auch durch ihre Verfestigung mit Hilfe von Materialzuwachs am Astknoten ein geeignetes Bauteil von tektonischen Strukturen sein könnten – eine Hypothese, die nach dem Prinzip 'trial and error' untersucht bzw. experimentell erforscht wurde. Jede der geernteten Astgabeln wurde auf ihre Eigenschaften hin geprüft und durch einen speziell entwickelten Software-Algorithmus als digitaler 3D-Scan in Lage gebracht, sodass sich ein räumlich geschlossenes Tragsystem bildete. Die Verbindungspunkte der Gabeln wurden räumlich formschlüssig verzahnt, und durch Fügen von mehreren Astgabeln entwickelte sich ein in sich geschlossenes tektonisches Gebilde.

Erste Versuche im verkleinerten Maßstab fanden mit einem Roboter der Kunsthochschule Linz statt, um mit dem aus den Experimenten generierten Wissen spezielle Werkzeuge für die Astgabel-Verarbeitung zu entwickeln. Diese wurden in weiterer Folge für die großmaßstäbliche Umsetzung der Astgabel-Verbindungen mit dem Angewandte Robotics Lab weiter getragen.

Der Diskurs endete nicht bei Astgabeln – das Fügen von Holz wurde und wird weltweit praktiziert. Unter anderem entstanden während einer Japan-Exkursion erste Ideenskizzen zu Holzstrukturen mit Steckver bindungen, die anschließend bei einem mehrtägigen Workshop an der Universität für angewandte Kunst Wien unter Leitung von Jun Sato (University of Tokyo) in Modellen einer *Kigumi*-Konstruktion weiter entwickelt



Photo © Zara Pfeifer

The discourse mentioned at the beginning did not end exclusively with branch forks – the culture of joining wood as it is practiced worldwide persisted as a key interest. Initial sketches of ideas for wooden structures with interlocking push-fit connections started to appear during a field trip to Japan. Subsequently, these concepts were further developed in models of a *Kigumi* structure during a workshop led by Jun Sato (University of Tokyo) that took place over several days at the University of Applied Arts Vienna. These complex frameworks of sticks with their sophisticated knots had to be implemented in wood.

The Landesberufsschule Murau (Styria) propelled the success of this experiment. Thanks to their interest and generous support, it was possible to experimentally develop complex *Kigumi* knots with the school's own CNC joinery machine. Among other things, the research team was able to present the complex beam structures made of square timber profiles to an international audience as part of *World Wood Day 2019*, hosted by the Open Air Museum in Stübing (Styria).

Looking back, the outcomes of this research project appear to be obvious results. But they were only conceivable and thus realizable through artistic research and within an interdisciplinary space.

In doing so, this research team with an affinity for engineering has succeeded in transcribing historical knowledge of timber construction into the present, without being traditionalist.

wurden. Diese komplexen Stabstrukturen mit ihren raffinierten Knoten galt es in Holz umzusetzen.

Für das Gelingen dieses Experiments trug wesentlich die Landesberufsschule Murau (Steiermark) bei. Dank ihrem Interesse und der freundlichen Unterstützung war ein experimentelles Entwickeln von komplexen *Kigumi*-Knoten an der schuleigenen CNC-Abbildungsmaschine möglich. Die komplexen Stabwerke aus Vierkantstäben konnte das Forschungsteam unter anderem am *World Wood Day 2019* im Freilichtmuseum Stübing (Steiermark) einem internationalen Publikum präsentieren.

Rückblickend betrachtet scheinen die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens offensichtlich auf dem Tisch zu liegen. Doch sie waren erst durch die künstlerische Forschung und den interdisziplinären Raum denk- und somit machbar.

Dabei ist es dem ingenieuraffinen Forschungsteam mit seinen Arbeiten gelungen, historisches Wissen des Holzbauwesens in die Gegenwart zu transkribieren, ohne dabei tradiert-anbiedernd zu sein.



▲► Details of the second *Interlocking Spaces* installation (top) and the *Branch Formations* demonstrator (right) at the *Conceptual Joining* show at AIL 2019.

Photos © Zara Pfeifer

CELLULOSE NANOFIBERS IN WOOD: TINY STRUCTURAL ELEMENTS WITH A HUGE EFFECT

ZELLULOSE-NANOFASERN IN HOLZ: KLEINE STRUKTURELEMENTE MIT GROSSER WIRKUNG

↗ HELGA LICHTENEGGER // English translation: Mark Wilch

For centuries, wood has evoked the widest variety of associations. Some look at it as a material for buildings and furniture, for artworks and items of everyday use, while others see it as the flexible tissue of a gigantic living plant.

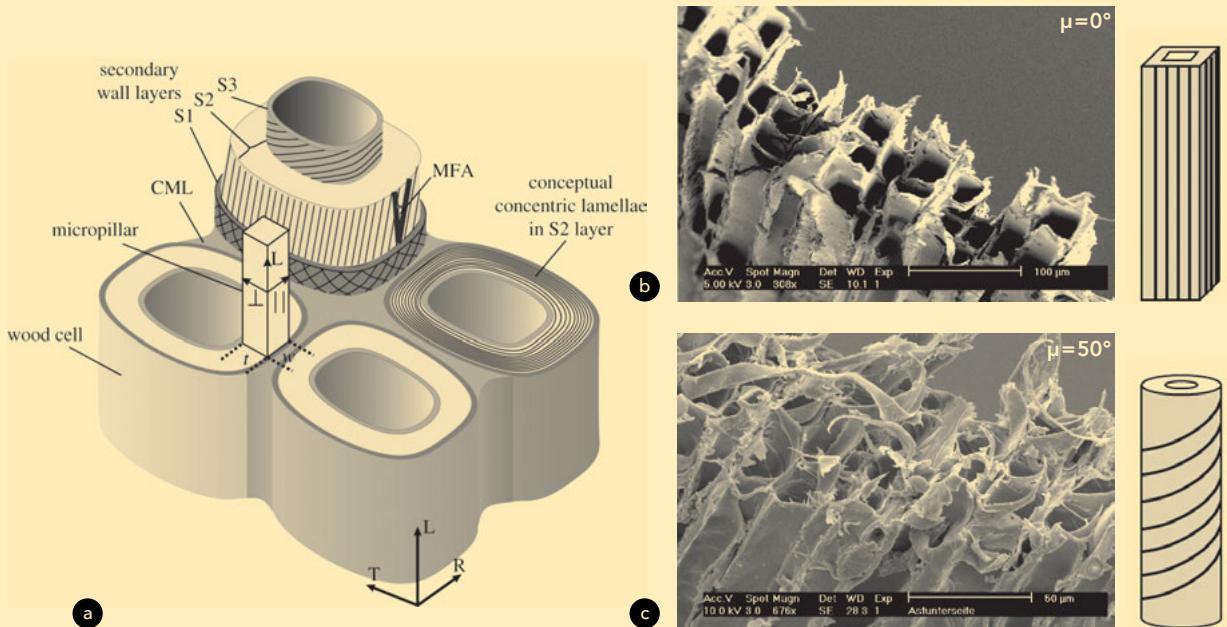
Another view opens up when you start exploring the inner workings of wood. With the aid of various microscopic and material-characterization techniques, the finest structures can be rendered visible on both a micrometric and nanometric scale. Today we know that these minute details have massive effects on the mechanical properties of wood and probably also offer an opportunity for the tree to tune these properties to fit its needs.

Wood consists of long tubular cells oriented along the stem or branch. These cells conduct water and lend the tree mechanical stability. The cell wall itself consists of crystalline cellulose nanofibrils embedded in an amorphous matrix, which they mechanically reinforce. They are wrapped around the cell in multiple layers and exhibit different orientations in the different layers (Fig. 1). Of

Seit Hunderten von Jahren weckt Holz die unterschiedlichsten Assoziationen. Während es die einen als Werkstoff für Bauten, Möbel, Kunstwerke und Dinge des täglichen Bedarfs sehen, erblicken andere darin das flexible Gewebe einer lebenden Pflanze von ungeheurer Größe.

Ein noch anderer Blick eröffnet sich, wenn man das Innere von Holz erforscht. Mit unterschiedlichen Mikroskopie- und Materialcharakterisierungstechniken können feinste Strukturen auf Mikrometer- und Nanometerebene sichtbar gemacht werden. Von diesen kleinsten Details weiß man heute, dass sie massive Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften von Holz haben und wohl eine Möglichkeit für den Baum darstellen, diese nach Bedarf maßzuschneidern.

Holz besteht aus langgestreckten, röhrenförmigen Zellen, die entlang des Stammes oder des Astes ausgerichtet sind. Sie dienen der Wasserleitung und der mechanischen Stabilisierung des Baumes. Die Zellwand selbst besteht aus kristallinen Zellulose-Nanofibrillen, die in einer amorphen Matrix eingebettet sind



mechanical significance in this context is the secondary wall 2 (S2), the thickest layer. The cellulose nanofibrils there are oriented parallel to each other and tilted slightly with respect to the longitudinal axis of the cell. This tilt angle, known scientifically as the microfibril angle (MFA), can vary greatly within a tree and plays a crucial part in mechanical behavior. If the MFA is large, the cellulose nanofibers describe a rather flat spiral, which is what makes the wood soft and elastic. If the MFA is small, in other words, if the fibers are largely oriented along the cell axis, the resulting material is stiff and strong.¹

Although the individual cellulose nanofibers may seem small and nondescript, their orientation alone provides the tree with a highly effective way to engage in mechanical adaptation. It is well-known that young trees and branches possess flexible wood with a large MFA, whereas a small MFA is found in the strong and stiff stem wood of older trees.² This is easy to verify since

und diese mechanisch verstärken. Sie sind in mehreren Lagen um die Zelle herumgewickelt und weisen in den unterschiedlichen Lagen unterschiedliche Orientierung auf (Abb. 1). Mechanisch bedeutsam ist dabei die sogenannte Sekundärwand 2 (S2), die dickste Schicht. Dort sind die Zellulose-Nanofibrillen parallel zueinander ausgerichtet und leicht gegen die Längsachse der Zelle verkippt. Dieser Kippwinkel, in der Fachsprache Mikrofibrillenwinkel (MFA) genannt, kann innerhalb eines Baumes sehr unterschiedlich ausfallen und spielt eine entscheidende Rolle für das mechanische Verhalten. Ist der MFA groß, beschreiben die Zellulose-Nanofasern also eine eher flache Spiraale, so ist das Holz weich und dehnbar. Ist der MFA klein, die Fasern also im Wesentlichen längs der Zellachse ausgerichtet, so ergibt sich ein steifes und festes Material.¹

So klein und unscheinbar die einzelnen Zellulose-Nanofasern erscheinen, ergibt sich doch allein aufgrund ihrer Orientierung für die Pflanze ein sehr wirkungsvolles Mittel der

▲ Fig. 1 | Abb. 1:
Nanostructure of the wood cell wall:
a) Structure of the layers of wood cells. The tilt angle (i.e. microfibril angle, MFA) of the cellulose nanofibers is drawn in, with permission from [8].
b) Fracture behavior of wood cells with small MFA: minimal deformation and brittle fracture.
c) Compression wood with a large MFA is observed to have substantially greater elasticity and major plastic deformation; with permission from [9].

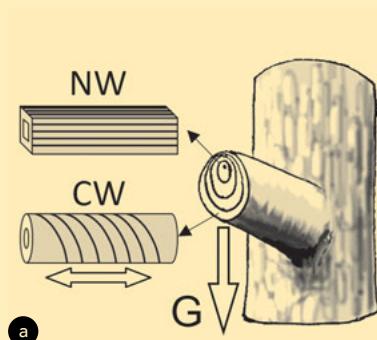
tree stems grow solely by depositing cells in a thin layer between wood and bark, the cambium, and never rid themselves of these cells from their youth. In this way, each stem writes its own history, including its mechanical history, which includes the bending loads it has been subjected to.

An effective way for a tree to withstand bending loads is for it to form 'reaction wood', a tissue with special mechanical functions. This is found in branches and stems of trees that grow on steep slopes and need to correct themselves into an upright position. In softwoods, reaction wood is called 'compression wood' (CW) and is found on the lower side (compression side) of the trunk or branch. It consists of round wood cells with especially thick walls. These cells are extremely stable under compressive loads and, not least of all, have a high lignin content. Lignin acts as an adhesive and stiffens the matrix of the wood cell wall. In compression wood cells, large amounts of lignin are placed between the cellulose nanofibers after cellulose synthesis. This massive lignification becomes particularly effective in conjunction with a large MFA, i.e. when the cellulose nanofibers are arranged in a flat spiral. The deposition of lignin expands the spiral in the longitudinal direction (Fig. 2). This small effect – occurring collectively – results in a considerable push-up effect that can push the entire stem upward. In this way, trees can not only adapt continuously but also execute movements, for example, orienting twigs towards light.

Several factors can be cited as triggers for the formation of reaction wood, for instance, light and gravity, as well as induced mechanical

mechanischen Anpassung. Es ist bekannt, dass junge Bäume und Äste biegsames Holz mit einem großen MFA besitzen, während im festen und steifen Stammholz von älteren Bäumen kleinere MFA gefunden werden.² Dies ist leicht nachzuprüfen, da Baumstämme nur durch Anlagerung von Zellen in einer dünnen Schicht zwischen Holz und Rinde, dem Cambium, wachsen und die Zellen aus ihrer Jugend nie abbauen. So schreibt also jeder Stamm seine eigene, auch mechanische Geschichte, wie zum Beispiel Biegebelastungen.

Eine effektive Möglichkeit, um Biegebelastungen standzuhalten, ist die Ausbildung von sogenanntem Reaktionsholz, einem Gewebe von besonderer mechanischer Funktionalität. Man findet es in Ästen oder in Stämmen von Bäumen, die auf steilen Hängen wachsen und die sich aufrichten müssen. Bei Nadelbäumen findet man Druckholz (compression wood, CW) an der Unterseite (der Druckseite) des Stammes oder Astes. Es besteht aus besonders dickwandigen, runden Holzzellen. Diese sind äußerst stabil unter Druckbelastung und enthalten nicht zuletzt auch eine Menge Lignin. Lignin fungiert als Kleber und versteift die Matrix der Holzzellwand. In Druckholzzellen wird es nach der Zellulosesynthese in großen Mengen zwischen die Zellulose-Nanofasern eingebaut. Besonders wirksam wird die massive Lignifizierung im Zusammenhang mit einem großen MFA, also der Anordnung von Zellulose-Nanofasern in einer flachen Spirale. Die Einlagerung von Lignin führt dabei zu einer Expansion der Spirale in Längsrichtung (Abb. 2). Dieser kleine Effekt ergibt – kollektiv ausgeführt – einen beachtlichen „Push-up“-Effekt, der ganze Stämme in die Höhe drücken kann. Auf diese Weise ist es Bäumen möglich, sich nicht nur kontinuierlich anzupassen, sondern



◀◀ Fig. 2 | Abb. 2:

Push-up effect due to lignification of the compression wood (CW) cells. a) Difference in the anatomy of the wood within the branch: on the lower side of the branch, CW with wide MFA; on the upper side, normal wood (NW). b) Typical sweep of the bole growth in coniferous tree caused by pressure from snow loads. Nonetheless, the stem can put itself upright.

Photo by Ulrich Wasem (Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research (WSL), Switzerland), with kind permission.

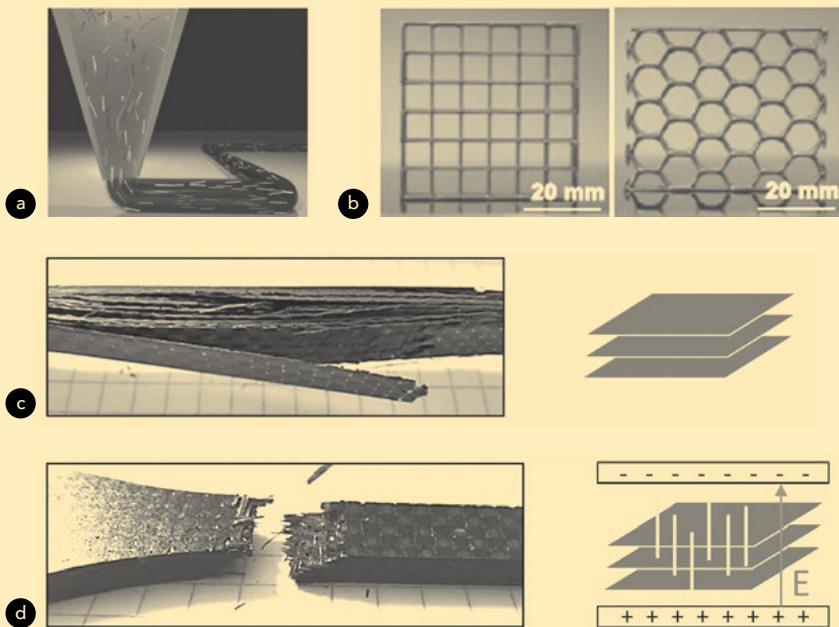
stimuli. Thus, an experiment conducted in a microgravity environment showed that induced mechanical stress led to the formation of reaction wood in young Douglas fir seedlings.³ This means that plants apparently have a sensorium for mechanical stress. In experiments involving fir branches, we were able to demonstrate that induced upward bending of the branch caused the formation of compression wood with a large MFA on the upper side of the branch although this formation is otherwise always observed on the lower side. The branch counters the bending with resistance, namely not just when subjected to downward bending but also to upward bending towards light. The exact mechanisms for this are still unclear, but could nevertheless provide crucial inspirations for new, bio-inspired fiber composites with an optimized nanostructure.

Directly replicating the wood cell is a big challenge, however, and has never been done successfully due to the cell's complexity and the small size of its components. Thus far, only a few aspects of the wood cell wall have been duplicated in new composites. For instance, Gordon and Jeronimidis crafted a simplified macroscopic model in which carbon fibers were wrapped in spirals around tubes.⁴ The model was meant to imitate at least the structure of the mainly load-bearing S2 layer in the wood cell. In the process, they were able to demonstrate several important analogies to wood, for instance, the strong dependence of mechanical properties on fiber orientation (MFA). Nonetheless, their model did not fully capture the wood cell in several respects because the other layers were not replicated and the model was many times larger than a wood cell.

auch Bewegungen zu vollführen, zum Beispiel die Ausrichtung der Zweige zum Licht.

Als Auslöser für das Entstehen von Reaktionsholz können mehrere Faktoren genannt werden, zum Beispiel Licht und Gravitation, aber auch künstliche mechanische Stimuli. So wurde in einem Experiment in Schwerelosigkeit nachgewiesen, dass künstlich aufgebrachte Biegebelastung zu Reaktionsholzbildung in jungen Douglasie-Setzlingen führen.³ Das heißt, dass Pflanzen offensichtlich ein Sensorium für mechanische Belastung besitzen. In Versuchen mit Tannenästen konnten wir zeigen, dass künstliche Durchbiegung des Astes nach oben die Bildung von Druckholz mit hohem MFA auf dessen Oberseite hervorruft, obwohl sie sonst immer nur an der Unterseite beobachtet wird. Der Ast setzt der Biegung also Widerstand entgegen, und zwar nicht nur, wenn diese nach unten, sondern auch, wenn diese nach oben zum Licht hin erfolgt. Die genauen Mechanismen sind noch ungeklärt, könnten jedoch entscheidende Inspirationen für neue, bioinspirierte Faserverbund-Materialien mit optimierter Nanostruktur liefern.

Die Holzzelle direkt nachzubauen ist allerdings eine große Herausforderung und bisher aufgrund ihrer Komplexität und der geringen Größe ihrer Komponenten noch nicht gelungen. Bisher finden sich nur einzelne Aspekte der Holzzellwand in neuen Verbundmaterialien verwirklicht. Ein vereinfachtes, makroskopisches Modell wurde zum Beispiel von Gordon und Jeronimidis hergestellt, indem sie Kohlefasern spiralförmig um Röhren wickelten.⁴ Dies sollte zumindest die Struktur der hauptsächlich lasttragenden S2-Schicht der Holzzelle imitieren. Sie konnten damit einige wichtige



► Figs. 3a–d | Abb. 3a–d:

Artificial composites with oriented nanofibers:

a) Orientation of short carbon fibers in liquid resin created by shearing in the print head, with permission from [10].

b) 3D-printed structures reinforced with nanofibers modeled after balsa wood, with permission from [6].

c) and d) Carbon-fiber composite made of woven fiber layers, once without (c) and once with (d) oriented carbon nanotubes as reinforcement.

Photos © H. Lichtenegger

The nano reinforcement yields a much lower propensity to delamination.

Upscaling, however, always results in changes to the material properties. Nanocomposites in particular often exhibit substantially different behavior than macroscopic reinforcement elements due to the increasing interface area ratio between fibers and matrix, the smaller the reinforcing fibers are dimensioned.⁵

Thanks to steady improvements in technical capabilities, it is now possible to produce materials with oriented microfibers and nanofibers. The technique of 3D printing, or additive manufacturing, in particular, enables the manufacture of complex parts. For instance, structures resembling balsa wood were fabricated out of epoxy resin in reinforced with short carbon fibers.⁶ During printing, fibers were oriented in the printing direction due to the shear forces exerted during the extrusion of the material from the print head (Fig. 3a). Unfortunately, this approach limits fiber orientation considerably. In usual printing techniques where the printing material is deposited by

Analogien zu Holz zeigen, wie beispielsweise die starke Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften von der Orientierung der Fasern (MFA). Dennoch wurde ihr Modell der Holzzelle in mehrerer Hinsicht nicht völlig gerecht, da die anderen Schichten nicht nachgebildet wurden und das Modell um ein Vielfaches größer war als eine Holzzelle. Eine Hochskalierung bleibt jedoch niemals ohne Veränderung der Materialeigenschaften. Insbesondere Nanoverbundwerkstoffe zeigen oft ein substanzell anderes Verhalten als makroskopische Verstärkungselemente, wegen der wesentlich größeren Grenzfläche zwischen Fasern und Matrix, je kleiner die verstärkenden Fasern dimensioniert werden.⁵

Mit den ständig verbesserten technischen Möglichkeiten können mittlerweile Materialien mit orientierten Mikro- und Nanofasern hergestellt werden. Insbesondere die Technik des 3D-Drucks (additive manufacturing) erlaubt die Herstellung komplexer Teile. So wurden beispielsweise balsaholzartige Strukturen auf Basis

strand, cellular structures with a normal fiber orientation with respect to the longitudinal cell axis were able to be achieved, but a controlled tilt angle (MFA) was not.

Other concepts might be useful in this context. For instance, it was shown that it is possible to align nanofibers in external electrical and magnetic fields. If fibers in a liquid polymer matrix are brought into a strong electrical field, an effect called dielectrophoresis occurs. This means a dipole is created in the fibers that acts counter to the direction of the outer field. If the fiber is diagonal to the field, it experiences torque that aligns it in the direction of the field lines.

With this technique, we recently succeeded in manufacturing hierarchical composites modeled on the structure of the chitinous shell of crabs.⁷ In the process, layers of tissue made of micrometer-size carbon fibers were laid one on top of the other and saturated with a mixture of epoxy resin and carbon nanotubes. Then an electrical field was applied perpendicular to the carbon fiber layers. The carbon nanotubes aligned themselves with the field lines, thereby creating reinforcement between the fiber layers (Figs. 3c and 3d). Polymerization of the epoxy resin fixed this orientation in place. The finished material exhibited greatly improved strength and above all, resistance to delamination compared to the control material without carbon nanotubes.

However, even this type of fiber orientation alone is not strong enough to build materials as complex as wood. Ultimately, we may be able to take a further step in this direction by combining the widest variety of methods. In the meantime,

von Epoxidharz, verstärkt mit kurzen Kohlenstofffasern, hergestellt.⁶ Hier wurden während des Druckens Fasern aufgrund von Scherkräften beim Extrudieren des Materials aus dem Druckkopf in Druckrichtung orientiert (Abb. 3a). Leider bringt dies eine starke Einschränkung der Faserorientierung mit sich: Bei üblichen Drucktechniken, die strangweise Druckmaterial ablegen, konnten zelluläre Strukturen mit einer Faserorientierung normal zur Zell-Längsachse erzielt werden, aber kein kontrollierter Kippwinkel (MFA).

Hier könnten andere Konzepte hilfreich sein. Zum Beispiel wurde gezeigt, dass sich Nanofasern in externen elektrischen und magnetischen Feldern ausrichten lassen. Wenn Fasern in einer flüssigen Polymermatrix in ein starkes elektrisches Feld eingebracht werden, tritt der Effekt der Dielectrophorese ein. Das heißt, in den Fasern entsteht ein Dipol, der entgegen der Richtung des äußeren Feldes wirkt. Steht die Faser schräg zum Feld, so erfährt sie ein Drehmoment, welches sie in Richtung der Feldlinien ausrichtet.

Mit dieser Technik konnten wir kürzlich hierarchische Verbundwerkstoffe nach dem strukturellen Vorbild des Chitinpanzers von Krabben herstellen.⁷ Dabei wurden Gewebeschichten aus Mikrometer-großen Kohlenstofffasern aufeinandergelegt und mit einer Mischung aus Epoxidharz und Kohlenstoffnanoröhrchen getränkt. Danach wurde ein elektrisches Feld normal zu den Kohlenstofffaserlagen angelegt. Die Kohlenstoffnanoröhrchen richteten sich nach den Feldlinien aus und erzeugten so eine Verstärkung zwischen den Faserlagen (Abb. 3c und 3d). Die Ausrichtung wurde durch Polymerisation des Epoxidharzes fixiert. Das fertige Material wies eine deutlich verbesserte

replicating wood as it exists in living trees remains unachievable, not least because it is an adaptive tissue capable of responding structurally to conditions in its environment – a capability that engineered materials will not be so quick to acquire. Nonetheless, we can more fully understand this model from nature even from the modest advances that have been made in fabricating and studying structures similar to those in wood.

Festigkeit und vor allem Resistenz gegen Delamination im Vergleich zum Vergleichsmaterial ohne Kohlenstoffnanoröhrchen auf.

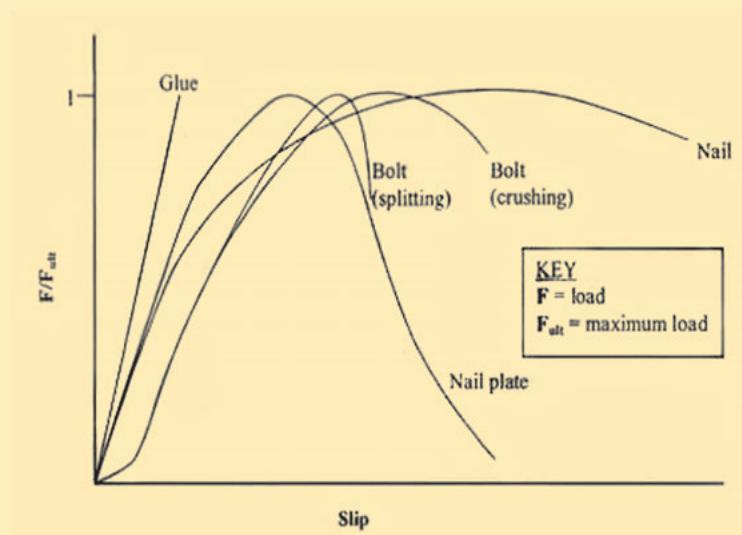
Allerdings ist auch diese Art der Faserorientierung allein nicht mächtig genug, um Materialien mit der Komplexität von Holz zu bauen. Letztlich wird vielleicht eine Kombination von verschiedenen Methoden einen weiteren Schritt in diese Richtung bringen. Einstweilen bleibt Holz, wie wir es im lebenden Baum finden, als Material unerreicht, nicht zuletzt, da es sich um ein anpassungsfähiges Gewebe handelt, das strukturell auf seine Umweltbedingungen antworten kann – eine Fähigkeit, die technische Materialien so schnell nicht besitzen werden. Dennoch können wir schon aus den bescheidenen Fortschritten bei der Herstellung und Untersuchung von holzähnlichen Strukturen ein größeres Verständnis für das natürliche Vorbild gewinnen.

-
- 1 Reiterer, A., et al. (1999): "Experimental evidence for a mechanical function of the cellulose microfibril angle in wood cell walls," in: *Philosophical Magazine A* 79(9): 2173–2184.
 - 2 Lichtenegger, H., et al. (1999): "Variation of Cellulose Microfibril Angles in Softwoods and Hardwoods. A Possible Strategy of Mechanical Optimization," in: *Journal of Structural Biology* 128(3): 257–269.
 - 3 Kwon, M., et al. (2001): "Induced compression wood formation in Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*) in microgravity", in: *Phytochemistry* 57(6): 847–857.
 - 4 Gordon, J. E., Jeronimidis, G. (1980): "Composites with high work of fracture", in: *Philosophical Transactions of the Royal Society A – Mathematical Physical and Engineering Sciences* 294(1411): 545–550.
 - 5 Pulickel, M. A., Schadler, L. S., Braun, P. V. (eds.) (2004): *Nanocomposite Science and Technology*, Weinheim: Wiley-VCH.
 - 6 Malek, S., et al. (2017): "Lightweight 3D cellular composites inspired by balsa", in: *Bioinspir Biomim* 12(2): 026014.
 - 7 Singer, G., et al. (2019): "High performance functional composites by in-situ orientation of carbon nanofillers", in: *Composite Structures* 215: 178–184.
 - 8 Rafsanjani, A., et al. (2014): *Journal of The Royal Society Interface* 11(95): 20140126.
 - 9 Reiterer, A., et al. (2001): *Journal of Material Science* 36(19): 4681–4686.
 - 10 Compton, B. G., Lewis, J. A. (2014): *Adv Mater* 26(34): 5930–5.

CONNECTIONS IN WOOD AND MATERIAL EFFICIENCY: WOOD FORMATION FOLLOWS MECHANICAL LOAD

VERBINDUNGEN IM HOLZ UND MATERIALEFFIZIENZ: DIE HOLZBILDUNG FOLGT DER MECHANISCHEN BELASTUNG

↗ ULRICH MÜLLER, ALFRED TEISCHINGER // English translation: Mark Wilch

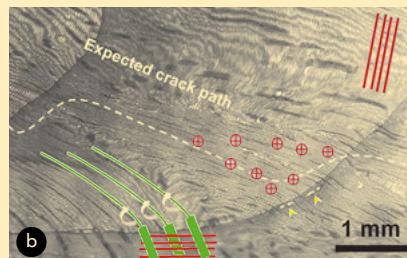
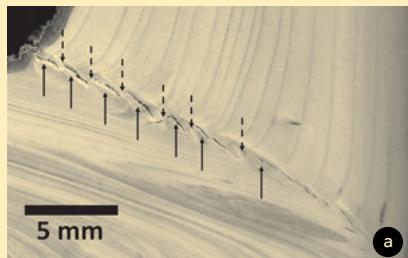


▲ Fig. 1 | Abb. 1:
Typical normalized load-slip
curves of different joints
(based on Larsen 1999)

The usable and maximum attainable dimensions of lumber are bound and limited by the dimensions of a tree trunk. The development of engineered wood products, such as composite lumber, has made it possible for this natural limitation on lumber to be overcome. The only limitation to the dimension of individual structural members arises from whether they can be transported to the construction site. To erect larger wooden structures, the individual structural

Die nutzbaren und maximal erreichbaren Dimensionen von Bauhölzern sind an die Dimension eines Baumstammes gebunden bzw. dadurch limitiert. Mit der Entwicklung von ingeniermäßig konstruierten Holzbauteilen (engineered wood products), wie Brettschichtholz, konnte diese naturbedingte Limitierung für Bauholz überwunden werden, und die einzige Einschränkung für die Dimension von einzelnen Bauteilen ergibt sich aus deren Transportierbarkeit zur Baustelle. Um größere Holzbauten zu errichten, müssen die einzelnen Bauteile mit entsprechenden Verbindungsmitteln zum gesamten Bauystem zusammengesetzt werden. McLain spricht etwas überspitzt von einer „Struktur als Anordnung von Verbindungen, die durch Bauteile voneinander getrennt sind“.¹

Die Limits in der Verbindungstechnik waren und sind auch heute noch die größten Hürden in der Entwicklung von größeren Holzbaustrukturen. Der Entwicklungsprozess führt zu Verbindungen, die höhere Kräfte übertragen können und auch steifer sind als



◀◀ Figs. 2a+b | Abb. 2a+b:

a) Fracture surface of a branch-stem junction with a pronounced zigzag pattern.
 b) Microsection from the same region with changing orientation of tracheids and reinforcement by wood rays. Red symbols: Crosses mark areas where the tracheids are oriented out of plane and lines mark tracheids in the image plane, green symbols represent the orientation and twisting of the wood rays between the cross-aligned network of tracheids. Arrows mark resin ducts. In the case of overloading of the branch, the resin deposition provides biological protection. (Source Müller et al. 2015, 2018)

Note: Tracheids represent the main cell type found in the wood tissue of softwoods.

members must be assembled into an overall structural system with corresponding joints. Exaggerating somewhat, McLain says that "a structure is a constructed assembly of joints separated by members."¹

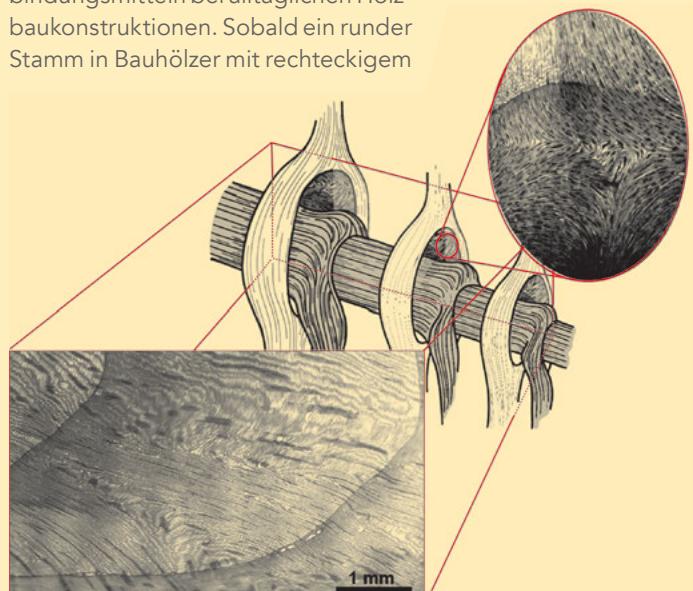
The limits in connection technology were, and still are, the biggest hurdles to developing larger wooden structures. The development process leads to connections that are able to transfer higher forces and are also stiffer than traditional fasteners such as nails, bolts or dowels. In a simplified diagram (Fig. 1*), the mechanical behavior of a fastener can be characterized by its strength, stiffness and deformation behavior.

Given the extremely intelligent, high-performance connection of a branch attachment to a tree trunk (Fig. 3), the comparably weak connectors in everyday wooden constructions are an anachronism. The moment a round trunk is cut into lumber with a rectangular cross section, the original branch attachments to the trunk become knots and thus features that determine the grade of the lumber. The structure of wood is distinctly orthogonal in orientation, so knots in cut lumber lead to substantial losses in strength because they distort the grain and cut into the longitudinally oriented wood fibers (Figs. 2a+b).

Various researchers have analyzed the highly intelligent branch-stem interface in wood as a natural composite² and taken it as a model for biometric

traditionelle Verbindungsmitte wie Nägel, Bolzen oder Dübel. In einer vereinfachten Darstellung (Abb. 1*) kann das mechanische Verhalten eines Verbindungsmitte durch seine Festigkeit, Steifigkeit und sein Verformungsverhalten charakterisiert werden.

Es gibt einen Anachronismus zwischen der sehr intelligenten Hochleistungsverbindung einer Astanbindung im Stamm eines Baumes (Abb. 3) und den vergleichsweise schwachen Verbindungsmitte bei alltäglichen Holzbaukonstruktionen. Sobald ein runder Stamm in Bauholz mit rechteckigem



Querschnitt eingeschnitten wird, werden die ursprünglichen Astanbindungen im Stamm zu 'Ästen' als qualitätsbestimmende Holzmerkmale im Bauholz.

Aufgrund der ausgeprägten orthogonalen Orientierung der Holzstruktur führen Äste im Schnittholz durch die Störung des Verlaufs und das

optimizations of engineered connection solutions.³ The stembranch interface has a surprising variety of features that can be traced to the evolution of trees as plants. The wood cells in this area are arranged in such a way that the physiological functions of transporting water and assimilates is retained even if the branch is overloaded. If a branch breaks, wound-healing mechanisms and resin deposition protect the tree from biotic attacks.

The mechanisms of these structures have been studied at different hierarchical levels.⁴ In his book *Design in Nature: Learning from Trees*, Claus Mattheck⁵ describes the branch-stem interface as an extraordinary example of biological design optimization. Mattheck's analyses of design optimization in trees with knots and burls concentrates on a macroscopic level. However, these external, macroscopically visible effects are based on micromorphological growth features, and the cell structure differs substantially from that of normal wood.⁶ The wood tissue in the trunk in the immediate area of the branch attachment shows a distinctly higher density of more than 900 kg/m³ and a larger microfibril angle (MFA) of the cellulose fibrils in the cell wall.⁷

Müller, Gindl und Jeronimidis⁸ investigated a mechanically loaded stem-branch junction directly by means of electronic speckle pattern interferometry (ESPI). To investigate the effect of an optimized external shape, they cast a polyester model with an external shape identical to that of the original natural model. These polyester models were investigated in the same test setup. In addition, non-shape-optimized polyester specimens were produced, with a thin cylinder representing the branch and a thicker cylinder, the stem. In the

Anschneiden der längsorientierten Holzfaser zu erheblichen Festigkeitsverlusten (Abb. 2a+b).

Verschiedene Forscher*innen haben die sehr intelligente Ast-Stammanbindung im natürlichen Holzverbund analysiert² und als Vorbild für biomimetische Optimierungen technischer Verbindungslösungen genommen.³ Die Stamm-Astanbindung überrascht durch verschiedene Merkmale, die sich aus der Evolution der Pflanze Baum ableiten lassen. Die Holzzellen in diesem Bereich sind derart organisiert, dass sogar im Falle einer Überlastung des Astes die physiologische Funktion des Transportes von Wasser bzw. Assimilaten erhalten bleibt. Im Falles eines Bruches schützen Wundheilungsmechanismen und Einlagerung von Harzen den Baum vor biotischen Attacken.

Der Mechanismus dieser Strukturen wurde auf verschiedenen hierarchischen Ebenen untersucht.⁴ In seinem Buch *Design in der Natur. Der Baum als Lehrmeister* beschreibt Claus Mattheck⁵ die Stamm-Astanbindung als außergewöhnliches Beispiel für eine biologische Gestaltsoptimierung. Matthecks Analysen zur Gestaltsoptimierung von Bäumen mit Ästen und Wurzeln konzentrieren sich auf eine makroskopische Ebene. Diese äußerlichen, makroskopisch sichtbaren Effekte basieren jedoch auf mikromorphologischen Wachstumsmerkmalen, und die Zellstruktur unterscheidet sich deutlich vom Zellaufbau des normalen Holzes.⁶ Das Holzgewebe des Stammes in unmittelbarer Nähe der Astanbindung zeigt eine deutlich höhere Dichte von mehr als 900 kg/m³ und einen größeren Mikrofibrillenwinkel der Cellulosefibrillen in der Zellwand.⁷

Müller, Gindl und Jeronimidis⁸ untersuchten direkt eine belastete

tests, these specimens showed substantially higher strain concentrations in the area of the junction than the shape-optimized polyester models did and failed at just half the load that the natural wood specimen did. Moreover, the natural wood specimen also displayed substantially higher energy absorption all the way to failure (tensile energy absorption) compared to the shape-optimized polyester model. It was concluded that besides the external design optimization as posited by Mattheck, there also has to be an internal material optimization in the hierarchical wood structure.

In order to analyze this internal structural optimization, thin boards were cut from the area of the stem-branch junction of felled trees. For this area, the microfibril angle (MFA) of the cellulose fibrils in the cell wall was measured by means of the wide-angle X-ray scattering (WAXS) technique, and further specimens were subjected to mechanical loading to the point of failure. Then, the fracture planes were analyzed using micro-computer tomography and the branch tissue was examined in micro-cross-sectional images in a radial, tangential and axial direction using a transmitted-light microscope.⁹ The results of these studies indicate that the stem-branch interface is a biologically optimized structure on all hierarchical levels, both macro and micro.

Figure 2a shows the planed surface of a tested specimen from the stem-branch interface with a zigzag crack pattern. Due to the tracheid effect¹⁰, light and dark areas can be detected in the area of the crack. In the dark areas, the tracheids are oriented out of plane and absorb the impinging light. In the light areas, the tracheids are oriented in the image plane and therefore reflect the impinging light.

Stamm-Astanbindung mit Hilfe einer elektronischen Specklemuster-Interferometrie (ESPI). Um den Effekt der Optimierung der äußerlichen Form zu untersuchen, wurde ein Modell aus Epoxidharz gegossen, das in der äußeren Form dem natürlichen Originalmodell glich. Diese Harzmodelle wurden in derselben Prüfanordnung untersucht. Weiters wurden Proben aus Epoxidharz ohne Formoptimierung hergestellt, wo ein dünner Zylinder den Ast repräsentiert und ein dicker Zylinder den Stamm. Diese Proben zeigten bei der Prüfung deutlich höhere Spannungskonzentrationen im Bereich der Anbindung als die formoptimierten Harzmodelle und versagten bereits bei der Hälfte der Belastung gegenüber der natürlichen Holzprobe. Zudem zeigte die natürliche Holzprobe auch gegenüber dem formoptimierten Harzmodell eine deutliche höhere Energieaufnahme bis hin zum Bruch (Brucharbeit). Daraus ergab sich, dass zusätzlich zur äußerlichen Gestaltsoptimierung nach Mattheck eine innere Materialoptimierung in der hierarchischen Holzstruktur gegeben sein muss.

Um nun die innere Strukturoptimierung analysieren zu können, wurden dünne Bretter von gefällten Bäumen aus dem Bereich einer Stamm-Astanbindung geschnitten. Für diesen Bereich wurde der Winkel der Mikrofibrillen (MFA) der Cellulosefibrillen der Zellwand mit einer Röntgen-Weitwinkelstreuung (WAXS) gemessen, und weitere Proben wurden mechanisch bis zum Bruch belastet. Anschließend wurden die Bruchflächen mit einer Mikro-Computertomografie analysiert und das Astgewebe in Mikroschnitten in radialer, tangentialer und axialer Richtung mit einem Durchlichtmikroskop untersucht.⁹ Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass die Stamm-Astanbindung auf sämtlichen

Figure 2b shows a micro-cross-sectional image from this region, where the tracheid orientation is altered locally, and the intensification effect from the wood rays is also detectable.

The model proposed by Shigo¹¹ illustrates the fiber grain in the area of the stem-branch interface and illustrates the transportation of water, nutrients and assimilates. However, a virtual cross-section through Shigo's model does not correspond to the micro-cross-sectional images presented by Müller et al. (2015, 2018). Therefore, Müller et al. (2018) developed an extension of Shigo's model (Fig. 3), which also includes the complex fiber orientation in the branch-stem area. The complex wood tissue in the transitional area from branch to stem shows extremely short tracheids with frequent localized alterations of their orientation and presumably contributes little to the transportation of water and nutrients. The tracheid orientation often varies multiple times within a single annual ring, a fact also proven in μ CT images not shown here. Numerous wood rays are embedded in the interwoven network of tracheids, which means the function of this tissue is almost exclusively dedicated to mechanically strengthening this area.

Based on the crack pattern assessment, one can conclude that the crack is propagated primarily in the area in which the tracheids are perpendicular to the initial crack formations. The wood structure fails in these zones on the one hand because of transverse tensile strain and on the other, because of shear strain perpendicular to the fiber direction. The wood rays, some of which are normally oriented to the fiber, act as crack stoppers of sorts. The propagation of the crack can be deter-

hierarchischen Ebenen (Makro- und Mikroebene) eine biologisch optimierte Struktur darstellt.

Die Abbildung 2a zeigt die gehobelte Oberfläche einer geprüften Stamm-Astanbindungsprobe mit einer zickzack-förmigen Bruchlinie. Aufgrund des Tracheid-Effektes¹⁰ sind im Bereich des Bruchs helle und dunkle Flächen erkennbar. In den dunklen Bereichen orientieren sich die Tracheiden aus der Ebene heraus und absorbieren das einfallende Licht. In den hellen Bereichen orientieren sich die Tracheiden in der Betrachtungsebene und reflektieren daher das einfallende Licht. Die Abbildung 2b zeigt einen Mikroausschnitt dieser Region, an der eine lokale Änderung der Orientierung der Tracheiden auftritt und zusätzlich der Verstärkungseffekt durch Holzstrahlen erkennbar ist.

Das von Shigo¹¹ vorgeschlagene Modell illustriert den Faserverlauf im Bereich der Stamm-Astanbindung und erklärt den Transport von Wasser, Nährstoffen und Assimilaten. Ein virtueller Schnitt durch das Modell von Shigo entspricht jedoch nicht den Mikroschnitten, wie sie bei Müller et al. (2015, 2018) dargestellt wurden. Daraus entwickelten Müller et al. (2018) eine Erweiterung des Modells von Shigo (Abb. 3), das auch die komplexe Faserorientierung im Ast-Stamm-Bereich einbezieht. Das komplexe Holzgewebe in der Übergangszone vom Ast zum Stamm zeigt sehr kurze Tracheiden mit häufiger lokaler Änderung ihrer Orientierung und trägt vermutlich kaum zum Transport von Wasser und Nährstoffen bei. Die lokal oft mehrmals innerhalb eines einzigen Jahrringes variierende Orientierung der Tracheiden konnte auch in μ CT-Bildern nachgewiesen werden, die hier nicht gezeigt werden. In das verwobene Netzwerk von Tracheiden sind zahlreiche Holzstrahlen

mined from these spots in a nearby area with flat-lying tracheids. The crack pattern with its distinct zigzag structure (Figs. 2a+b) reveals not only the course of crack propagation, but fiber-bridging as well. With this bridging process, a large fracture plane is generated, which means more fracture energy is required for further crack propagation.

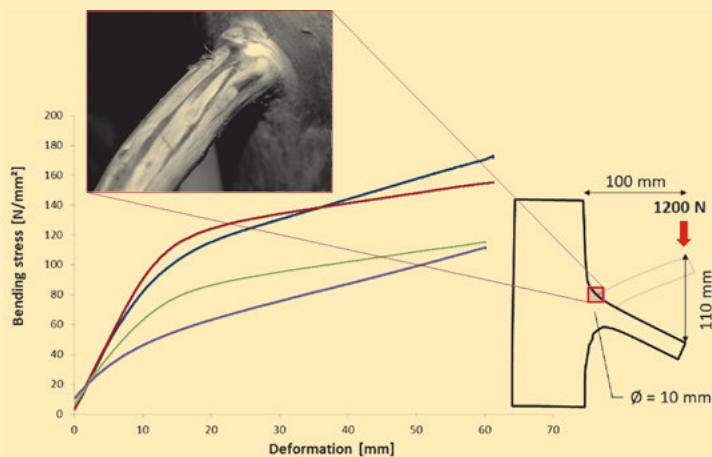
At the cell wall level, the microfibril angle (MFA) must be considered. The MFA of cell walls in the tissue of the branch-stem junction as measured by Müller et al. (2015) corresponds very closely with the measured values from the literature.¹² The cell walls of tracheids in the trunk near the pith, known as 'juvenile growth', have an MFA of 30° to 40°. By contrast, the MFA in the outer stem area, the mature wood, is about 10°. In the area of the branch-stem junction, MFAs of more than 45° were measured at the base of the branch attachment. The MFA above the branch attachment is somewhat less, at 35°. Thanks to the large MFA in the branch area, this wood tissue responds very elastically to bending stress. Moreover, the branch tissue itself is substantially denser at 0.95 g/cm³ than the stem wood at 0.45 g/cm³, which greatly increases the flexural strength of the branch wood. Branches are therefore perfectly adapted to the increased bending stress they are exposed to from wind, weather, and snow pressure.

Müller et al. (2015) have also measured the MFA in the transitional zone from branch to stem. The wood in this area has an average density of about 0.55 g/cm³. Due to the changes in fiber orientation and in cell morphology (shorter fibers), the MFA shows a strong variation of about 30°. The short and perpendicular tracheids directly above the branch therefore display highly elastic behavior,

eingebettet, sodass dieses Gewebe fast ausschließlich der mechanischen Verfestigung des betrachteten Bereichs dient.

Aufgrund der Bruchbildbeurteilung kann man schließen, dass der Bruchfortschritt primär in jenem Bereich erfolgt, in dem die Tracheiden quer zur Bruchinitiale liegen. Die Holzstruktur versagt in diesen Zonen einerseits durch Querzugbeanspruchung und andererseits durch Schubbeanspruchung quer zur Faserrichtung. Die teilweise normal dazu liegenden Holzstrahlen wirken gewissermaßen wie Rissstopper. Der Rissfortschritt wird von diesen Stellen in einen nahen Bereich mit flachliegenden Tracheiden abgeleitet. Aus dem Bruchbild mit einer ausgeprägten Zickzack-Struktur (Abb. 2a+b) kann man neben dem Verlauf des Rissfortschrittes auch ein „fiber-bridging“ erkennen. Mit dem Bruchvorgang wird dadurch eine große Bruchfläche generiert, wodurch für einen weiteren Bruchfortschritt ein zusätzlicher Betrag an Bruchenergie benötigt wird.

Auf Ebene der Zellwand muss der MFA in Betracht gezogen werden. Der MFA von Zellwänden im Gewebe der Ast-Stammanbindung stimmt nach Messungen von Müller et al. (2015) sehr gut mit den Werten aus der Literatur überein.¹² Die Zellwände von Tracheiden im Stamm nahe dem Mark, dem sogenannten juvenilen Holz, zeigen einen MFA von 30° bis 40°. Demgegenüber liegt der MFA im äußeren Stammbereich, dem adulten Holz, bei circa 10°. Im Bereich der Ast-Stammanbindung wurden jedoch MFA von mehr als 45° an der Unterseite der Astanbindung gefunden. Mit 35° ist der MFA an der Oberseite der Astanbindung etwas geringer. Durch den hohen Mikrofibrillenwinkel im Astbereich reagiert dieses Holzgewebe bei Biegebeanspruchung sehr



▲ Fig. 4 | Abb. 4:
Stress-strain curves of
unaffected (red and blue lines)
and pre-stressed branches
(magenta and green lines)
(Source: Müller et al. 2018).

acting as an easily deformable and dampening spring element when exposed to fluctuating bending stress. Overloading leads to the formation of a fracture with fiber bridging and to the generation of large fracture planes with changing orientation, which absorbs a high amount of fracture energy.

This high energy absorption also appears in the stress deformation diagram of a stem-branch junction recorded in experiments (Fig. 4). A small branch with a diameter of 10 mm was subjected to a load of nearly 1.2 kN, which translates into a bending stress on the base of the stem of 130 N/mm². In this test set-up, it was not possible to break the branch completely, and only a small crack became visible on the top side of the branch. This crack opening closed up again completely when the load was removed. On the underside of the branch, compression and fiber buckling were observed as the load increased. In a living tree, the crack that closed up again would immediately be sealed with resin, allowing the branch to retain its physiological functions. Over the subsequent growth period, all cracks of this kind would be covered over by active cambium and wood formation

elastisch. Zudem hat das Astgewebe selbst eine deutlich höhere Dichte von 0,95 g/cm³ gegenüber dem Stammholz mit 0,45 g/cm³, was die Biegefestigkeit des Astholzes deutlich erhöht. Somit sind die dem Wind, Wetter und Schneedruck ausgesetzten Äste perfekt an die erhöhte Biegebeanspruchung angepasst.

Müller et al. (2015) haben zudem den MFA in der Übergangszone von Ast zum Stamm gemessen. Die durchschnittliche Holzdichte liegt in diesem Bereich bei ungefähr 0,55 g/cm³. Aufgrund der wechselnden Faserorientierung und der sich ändernden Zellmorphologie (kürzere Fasern) ergibt sich hier eine sehr starke Streuung des MFA von etwa 30°. Die kurzen und querliegenden Tracheiden direkt oberhalb des Astes verhalten sich daher sehr elastisch und wirken unter einer schwankenden Biegebeanspruchung als ein gut verformbares und dämpfendes Federelement. Eine Überbeanspruchung führt zu einer Bruchformation mit „fiber-bridging“ und der Generierung von großen Bruchflächen mit wechselnder Orientierung, was ein hohes Maß von Bruchenergie absorbiert.

Die hohe Absorption von Energie zeigt sich auch in dem bei Versuchen aufgezeichneten Spannungs-Verformungsdiagramm einer Stamm-Astansbindung (Abb. 4). Ein kleiner Ast mit einem Durchmesser von 10 mm wurde mit einer Last von annähernd 1,2 kN belastet, was umgerechnet einer Biegespannung an der Stammbasis von 130 N/mm² entspricht. In dieser Prüfanordnung war es nicht möglich, den Ast vollständig zu brechen, und auf der Oberseite des Astes wurde nur ein kleiner Riss sichtbar. Diese Rissöffnung schloss sich wieder vollständig bei Entlastung. Auf der Unterseite des Astes konnte mit zunehmender Belastung eine Verdichtung

in a self-repair process. As Müller et al. (2018) proved, a tree generates new wood tissue following excessive mechanical loading and the original strength of a branch-stem junction is virtually restored again after just one year.

und Faserausknickung beobachtet werden. In einem lebenden Zustand würde dieser nun wieder geschlossene Riss sofort mit Harz verschlossen werden, wodurch die physiologische Funktion als Ast erhalten bleibt. In der nächsten Wachstumsperiode würden alle Risse dieser Art durch das aktive Kambium und Holzbildung im Sinne einer Selbstheilung überwältigt werden. Wie bei Müller et al. (2018) nachgewiesen, erzeugt der Baum nach einer Überlastung ein neues Holzgewebe, und die ursprüngliche Festigkeit einer Ast-Stammanbindung ist schon nach einem Jahr praktisch wieder hergestellt.

-
- 1 McLain, T. E. (1998): "Connectors and fasteners: research needs and goals", in: Fridley, K. J. (ed.): *Wood Engineering in the 21st Century. Research Needs and Goals*, proceedings from a workshop of the same name offered in conjunction with the SEI/ASCE Structures Congress XV in Portland, Oregon, on April 16, 1997, (Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers).
 - 2 Shigo, A. L. (1985): "How tree branches are attached to trunks", in: *Canadian Journal of Botany* 63(8): 1391–1401; Shigo (1990): *Die neue Baumbiologie*, Braunschweig: Thalacker; Reuschel, J. D. (1999): „Untersuchungen der Faseranordnung natürlicher Faserverbunde und Übertragung der Ergebnisse auf technische Bauteile mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode“, doctoral thesis, Universität Karlsruhe.
 - 3 Mattheck, C. (1991): *Trees. The Mechanical Design*, (Berlin: Springer); Mattheck (1998): *Design in der Natur. Der Baum als Lehrmeister*, Berlin: Springer; Burns, L. A. (2010): "Tree joints. Biomimetic insights for aerospace composite joints", 27th International Congress of the Aeronautical Sciences, 19.–24. Sept. 2010, Nizza; Müller, U., et al. (2014): „Stamm-Astanbindung – eine biologisch optimierte Struktur mit hoher mechanischer Leistungsfähigkeit“, in: Reinhard Brandner (ed.): *Bionische Tragstrukturen im Holzbau*, Tagungsband Grazer Holzbau-Fachtagung 2014, Graz: Technische Universität Graz: 113–120.
 - 4 Müller, U., Gindl, W., Jeronimidis, G. (2006): "Biomechanics of a branch. Stem junction in softwood", in: *Trees – Structure and Function* 20: 643–648; Buksnowitz, C. et al. (2010): "Tracheid length in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). Analysis of three databases regarding tree age, cambial age, tree height, inter-annual variation, radial distance to pith and log qualities", in: *Wood Research* 55(4): 1–13; Müller, U., et al. (2015): "Synergy of multi-scale toughening and protective mechanisms at hierarchical branch-stem interfaces", in: *Scientific Reports* 5: 14522; Müller, U., et al. (2018): "How softwood tree branches are attached to stems: hierarchical extension of Shigo's stem-branch model", in: *Trees – Structure and Function* 32(4): 1113–1121.
 - 5 Mattheck 1998.
 - 6 Shigo 1985.
 - 7 Trendelenburg, R. (1955): *Das Holz als Rohstoff*, München: Hanser; Timell, T. E. (1986): *Compression Wood in Gymnosperms*, Berlin: Springer; Shigo 1985; Shigo 1990.
 - 8 Müller, Gindl, Jeronimidis 2006.
 - 9 Müller et al. 2015.
 - 10 Nyström, J. (2003): 'Automatic measurement of fiber orientation in softwoods by using the tracheid effect', in: *Computers and Electronics in Agriculture* 41(1–3): 91–99.
 - 11 Shigo 1985.
 - 12 Reiterer, A., et al. (1999): "Experimental evidence for a mechanical function of the cellulose microfibril angle in wood cell walls", in: *Philosophical Magazine A* 79(9): 2173–2184; Färber, J., et al. (2001): "Cellulose microfibril angles in a spruce branch and mechanical implications", in: *Journal of Materials Science* 36: 5087–5092; Jungnikl, K., et al. (2009): "The role of material properties for the mechanical adaptation at branch junctions", in: *Trees – Structure and Function* 23: 605–610.
 - * Diagram based on Larsen, H.J. (1999): "Influence of semi-rigidity of joints on the structure", in: Haller, P. (ed.): *COST CI. Semi-rigid Timber Joints – Structural Behaviour, Modelling and New Technologies*.

HANDICRAFT AND TECHNOLOGY

HANDWERK UND TECHNOLOGIE

↗ KLAUS ZWERGER // English translation: Mark Wilch

Excavation finds in China have verified the existence of astounding mortise and tenon joints for 4000 BC. The only tools available were stones worked for that purpose. In addition to the Stone Age, other periods have also been cited for materials that elites used for gaining, and staying in, power. Yet it was the artisans who shaped and perfected the tools of war. With their knowledge and experience, they were guaranteed work even when weapons were no longer in demand. Farmers were able to boost their agricultural yields with better implements. Woodworkers were able to improve and refine their products. Frictional wood connections were fundamental elements in highly complex wooden constructions and arose from the interplay between handicraft and technology. Experienced artisans were able to compensate for inferior tools. However, even the best tools can only be shown to advantage in the hands of skilled artisans.

If a product were to endure, artisans had to pour into it their knowledge and experience of specific boundary conditions of climate, topography, or special exposure to destructive forces of nature. Fashion trends as well as economic, social and habitual requirements influenced their work, as did cultural traits.

All these conditions resulted in astonishingly different creations. Here are a few examples to provide fur-

Grabungsfunde in China belegen erstaunliche Loch-Zapfenverbindungen für 4000 v. Chr. Als einzige Werkzeuge standen zugerichtete Steine zur Verfügung. Neben der Steinzeit verdanken auch andere Epochen ihren Namen Materialien, deren Nutzung Eliten dazu diente, ihre Macht zu erringen und zu verteidigen. Doch es waren Handwerker, die Kriegsgerüste formten und perfektionierten. Ihr Wissen, ihre Erfahrung verschaffte ihnen auch dann Arbeit, wenn keine Waffen nachgefragt wurden. Bauern konnten mit besserem Werkzeug landwirtschaftliche Erträge steigern. Holzhandwerker konnten ihre Produkte verbessern und verfeinern.

Kraftschlüssige Holzverbindungen als Grundbausteine hochkomplexer Holzkonstruktionen entstanden im Wechselspiel von Handwerk und Technologie. Versierte Handwerker konnten weniger gutes Werkzeug teilweise wettmachen. Das beste Werkzeug kann aber nur in den Händen guter Handwerksleute zur Geltung gebracht werden.

Der Handwerker musste sein Wissen und seine Erfahrung über die je spezifischen Randbedingungen von Klima, Topografie oder besondere Exponiertheit gegenüber zerstörerischen Naturgewalten in ein Produkt einfließen lassen, wenn es Bestand haben sollte. Modeströmungen, ökonomische, soziale und habituelle Vorgaben beeinflussten seine Arbeit ebenso wie kulturelle Prägungen.

ther food for thought. Categorizing these examples as Eastern or Western connections is as unsuitable as dividing them into visible connections or connections concealed at the joint. Classification systems created by scientists simplify in inadmissible ways. There is a direct logical correlation between construction and connection technology. Artisans responded in a manner adequate to the specifics of their location. They did not worry about how their work should be classified.

In Europe, structural elements originally fastened with cords or joined with very simple mortise and tenon joints gave way to lap joints for a fairly long time. They had to be worked quite precisely because the accuracy of fit between the male member and female member was there for all to see. Wood is a material with directional cellular formation. Every connection placed at an angle was clearly visible because the change in direction interrupted the homogeneity of the surface texture. Once recognized, this effect could be played with splendidly (Fig. 1).

Skeleton structures in Western construction are inconceivable without diagonal bracing. Fixing the angles of members through triangulation guaranteed the stability of each construction. Braces had to bear up under compressive and tensile loads; wooden nails driven transversely into the joint ensured that they did. However, wooden nails can work their way out of joints as a result of drying processes. They can also be pulled out of their holes if a structural element undergoes extreme twisting. Angled jointing nailing was the carpenters' solution for resisting the whims of the material. Another approach was to refine lap joints in such a way that the tensile and compressive loads

All diese Bedingungen haben zu erstaunlich unterschiedlichen Kreationen geführt. Ein paar Beispiele sollen die Überlegungen weiterführen. Eine Kategorisierung in östliche und westliche Verbindungen taugt dabei genauso wenig wie eine Einteilung in ablesbare oder im Knoten verborgene Verbindungen. Von Wissenschaftlern kreierte Ordnungen simplifizieren unzulässig. Konstruktion und Verbindungstechnologie stehen in einem unmittelbaren logischen Zusammenhang. Der Handwerker hat ortsspezifisch adäquat reagiert. Er hat sich nie den Kopf zerbrochen, wie seine Arbeit einzuordnen ist.

Ursprünglich geschnürte oder mit sehr einfachen Zapfenverbindungen gefügte Konstruktionsteile wichen in Europa für eine geraume Weile Blattverbindungen. Diese mussten sehr exakt ausgeführt werden, weil die Passgenauigkeit von Blatt und Blattsasse für jede*n einsehbar war. Holz ist ein gerichtetes Material. Jede im Winkel angelegte Verbindung sprang den Betrachter*innen ins Auge, weil durch den Richtungswechsel die Homogenität der Oberflächentextur unterbrochen war. Einmal erkannt, ließ sich damit trefflich spielen (Abb. 1).

Skelettbauten sind in der westlichen Bauwelt nicht ohne Diagonalverstrebung denkbar. Die Herstellung winkelstabiler Dreiecke sicherte jeder Konstruktion ihre Stabilität. Streben mussten auf Druck und Zug belastbar sein, quer zur Verbindung eingeschlagene Holznägel stellten das sicher. Holznägel können aber aus Verbindungen „heraustrocknen“. Sie können auch durch ein sich extrem verdrehendes Konstruktionselement aus ihrem Loch herausgezogen werden. Schrägnagelung war eine Antwort der Zimmerleute, um den Launen des Materials Widerstand zu leisten. Eine andere Variante war, Blattverbindungen



▲ Fig. 1 | Abb. 1:
Front door of a Tyrolean
farmhouse (Austria).



▲ Fig. 2 | Abb. 2:

The supporting structure for a barn roof in Retz (Austria). Facade details of the town hall in Esslingen (Germany).

were countered. The securing wooden nails were then able to relinquish their static function to notches in the outline of the laps (Fig. 2). Thereafter, the sole purpose of the nails was to prevent the structural elements from twisting against each other. An added notch makes the function of this action obvious even to a layperson. The tensile load is distributed between two notches cut side by side rather than being borne by a single notch. The multiplication and evolution of notches into decorative patterns gloss over their function and ultimately cast doubt on it. Very similar developments were evident in log construction as well (Fig. 3). Ultimately, these two trends have played into each other's hands. If a client wants his architecture to be representational, he is willing to spend a lot of money on it. An artisan who does not have to focus primarily on cost minimization has a chance to show off his skills. His product is always a form of advertising for himself as well.

For a long time, carpenters could count on what seemed to be inexhaustible resources. The larger they built, the more material they used for construction (Fig. 4). A study of historical buildings shows us when and where this principle had to be

so zu verfeinern, dass sie Zug- und Druckbelastungen Paroli boten. Damit konnten die sichernden Holznägel ihre statische Funktion an Haken in der Kontur der Blätter abtreten (Abb. 2). Die Nägel sorgten nur noch dafür, dass sich die konstruktiven Elementen nicht gegeneinander verdrehten. Ein eingefügter Haken lässt auch Lal*innen die Funktion der Maßnahme ablesen. Zwei nebeneinander gesetzte Haken entlasten den nur einfachen. Ihre Vervielfachung und Ausformung zu dekorativen Mustern überspielt die Funktion und macht sie letztlich fragwürdig. Sehr ähnliche Entwicklungen ließen sich im Blockbau beobachten (Abb. 3). Zwei Tendenzen spielen einander in die Hände. Wenn der Auftraggeber mit seiner Architektur repräsentieren will, ist er bereit, dafür viel Geld auszugeben. Handwerksleute, die nicht vorrangig an Kostenminimierung denken müssen, haben die Chance zu zeigen, was sie können. Ihr Produkt ist immer auch Werbeträger.

Für eine lange Zeit konnten sich Zimmerleute auf vermeintlich unerschöpfliche Ressourcen verlassen. Je größer sie bauten, desto mehr Material verbauten sie (Abb. 4). Das Studium historischer Bauten zeigt uns, wann wo ein Umdenkprozess eingeleitet werden musste. Die Namen von Bauepochen dienen als Schubladen, in denen Veränderungen schematisch zusammengefasst werden. Referenzbeispiele unterschiedlicher Epochen zeigen besonders anschaulich, wie Handwerksleute neue Technologien entwickelten, um auftretende Probleme zu überwinden (Abb. 5). Materialverknappung und der Anspruch, immer größere Weiten stützenlos zu überspannen, erforderten zunehmend komplexeres Wissen von Spezialisten.

Mit Beispielen aus Ostasien soll das Spektrum erweitert werden. Auch dort war Holzmangel ein Innovationsmotor.

► Fig. 3 | Abb. 3:

Integrated dividing wall in a log cabin in Kramsach (Austria).





▲ Fig. 4 | Abb. 4:
The five-story Gothic roof truss built by Thomas Schweinebacher from 1503 to 1518 in Schwaz (Austria).

reassessed. The names of architectural eras serve as filing drawers for grouping these changes in a schematic way. Reference examples from different periods vividly show how artisans developed new technologies to overcome arising problems (Fig. 5). Material shortages and the aspiration to span ever-larger expanses without support required increasingly more complex knowledge from experts.

The following examples from East Asia are meant to expand the spectrum. There, too, a shortage of wood became a driver of innovation. And there were others. In some regions, statically and structurally effective connections had to be better protected from water absorption; in other regions, they had to withstand regularly recurring typhoons with wind



▲ Fig. 5 | Abb. 5:
With the hanging truss roof structure he built from 1764 to 1767 in a church in Wädenswil (Switzerland), Hans Ulrich Grubenmann succeeded in keeping the 21 meters by 36 meters oratory free of columns.

speeds of around 200 km/h; still elsewhere they had to make it through earthquakes intact. Many historical wooden buildings have demonstrated impressive proof of their resilience, having withstood multiple natural disasters in the past (Fig. 6).

In situations where the effective parts of a connection are shifted to the inside of the assembly to protect them from excessive relative humidity and at the same time, the visible texture is supposed to repel or drain

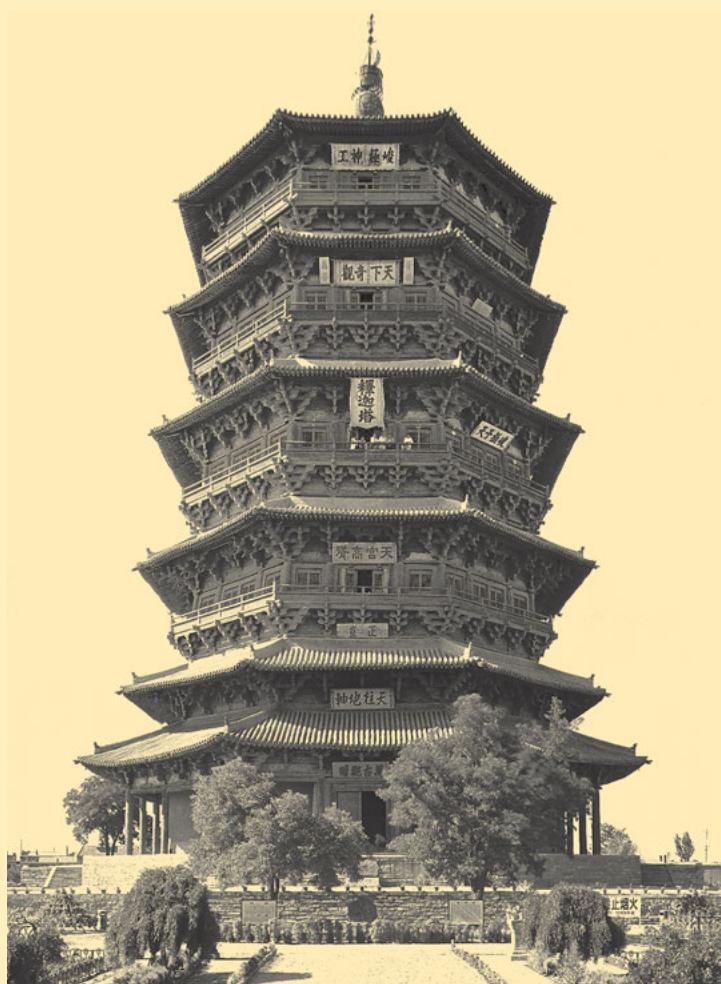
Es gab noch andere. Die statisch und konstruktiv wirksamen Verbindungen mussten in manchen Regionen besser gegen Wasseraufnahme geschützt werden, in manchen Regionen regelmäßig wiederkehrenden Taifunen mit Windgeschwindigkeiten um die 200 km/h widerstehen können und andernorts Erdbeben heil überstehen. Manche historische Holzbauten stellen eindrucksvoll unter Beweis, dass sie mehrfach Naturkatastrophen standhalten konnten (Abb. 6).

Wenn die wirksamen Teile einer Verbindung zu ihrem Schutz gegen zu hohe Luftfeuchtigkeit in ihr Inneres verlegt werden und zugleich die ablesbare Textur möglichst wasserabweisend oder -ableitend sein soll, können Handwerksleute nicht mehr durch komplexe Oberflächen beeindrucken. Ganz im Gegenteil muss das Augenmerk auf geschlossenen Holzzellen und Verbindungsknoten liegen, die eine Wasseraufnahme tunlichst unterbinden. Wenn der funktionelle Teil der Verbindung in seinem Volumen eingeschränkt ist, muss die Ausführung umso exakter ausfallen, werden doch die Kräfte einer Verbindungshälfte über Kontaktflächen auf die andere übertragen. Je weniger Spiel sie haben, je unmittelbarer Kräfte transportiert werden, desto besser ist die Verbindung. Durch fortschreitende Miniaturisierung und gleichzeitige Vervielfachung von wirksamen Haken, Stufen und Absätzen versuchten die Zimmerleute Lastanfälle möglichst breit gefächert zu verteilen (Abb. 7).

Wichtigste Voraussetzung für die Umsetzung solch anspruchsvoller Ideen waren extrem gut schärfbare Schneidwerkzeuge. Diese wiederum beförderten die Entwicklung noch besserer Verbindungen. Mangelhaftes Wissen um Eigenschaften und Qualitäten des verarbeiteten Materials kann durch

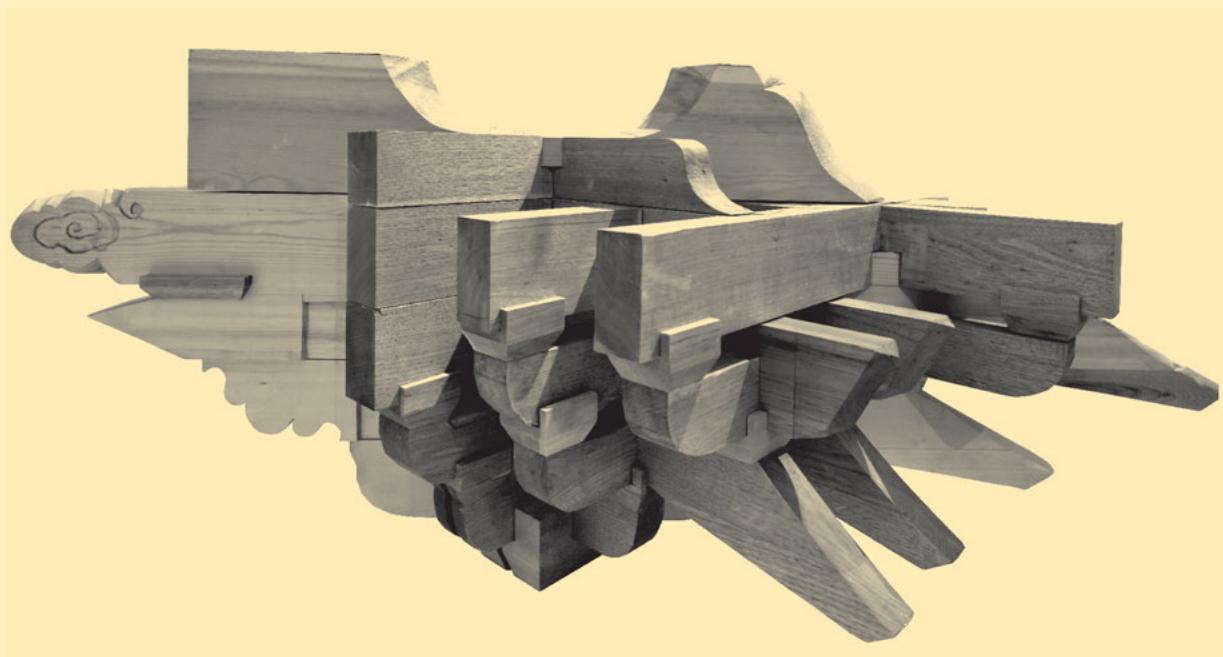
off water as effectively as possible, artisans can no longer impress the world with complex surfaces. On the contrary, they must concentrate on closed wood cells and connection joints that prevent water absorption to the greatest possible extent. If the functional part of the connection is subject to volume constraints, it must be worked all the more accurately. After all, the forces from one half of the connection are transferred via the contact surfaces to the other half. The less play there is between them and the more directly the forces are transferred, the better the connection is. Carpenters sought to distribute the arising loads as diversely as possible through progressive miniaturization and a simultaneous multiplication of effective notches, steps and recesses (Fig. 7).

To implement these sophisticated ideas, it was crucial to possess cutting tools that could be sharpened extremely well. They, in turn, encouraged the development of even better connections. But not even the best tools can make up for a lack of knowledge about the properties and qualities of the material being worked. Two further examples show what incredible advances knowledge can lead to. In houses around Mount Haku in Japan, one finds numerous connecting joints that all follow one idea. The horizontal construction elements such as beams and braces are mortised into a column or laid onto the column's peg-like top end featuring stepped recesses (Fig. 8). One is struck by the audacity of perforating a bearing column so extensively. The multi-recessed top end of the column is at least as significant. This top end bears the most massive beams that serve as horizontal bracing underneath the roof construction and bear that construction. The area gets four to five meters of snow cover



▲ Fig. 6 | Abb. 6:
The Sakyamuni Pagoda at the Fogong Temple was built in Ying County in Shanxi Province (China) in 1056. It has survived several major earthquakes despite being 67 meters high.

das beste Werkzeug nicht kompensiert werden. Zwei weitere Beispiele zeigen, zu welch unglaublichen Entwicklungen Wissen führen kann. In Häusern um den Berg Haku (Japan) hat man zahlreiche Verbindungs-knoten gefunden, die alle einer Idee folgen. Die horizontalen Konstruktionselemente wie Balken und Verstrengungen werden in eine Säule eingezapft bzw. dem stufenförmig abgesetzten zapfenförmigen oberen Ende der Säule aufgelegt (Abb. 8). Der Wagemut, die tragende Säule so stark zu perforieren, springt ins Auge. Wenigstens ebenso bedeutsam ist das mehrfach abgesetzte obere Säulenende. Es trägt die massivsten Balken, die der horizontalen



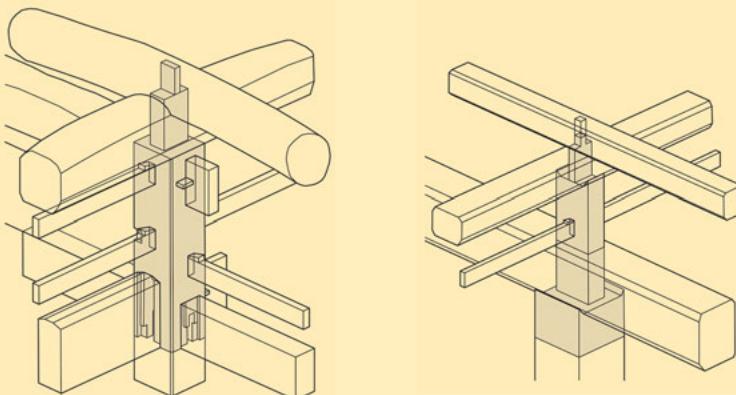
▲ Fig. 7 | Abb. 7:
A carpentry workshop at the
Forbidden City in Beijing built
this dougong model for the
exhibition *The Mystery of
Wood* in Stainz, Austria
(2014–2015).

for up to six months a year. Thanks to very tall trees that were available locally, carpenters were able to develop a building technique that met all the specific requirements posed by such extreme climatic conditions. They made full use of the elasticity of the material. Mortises never take up more than one third of the cross section. This guarantees sufficiently cohesive wood fibers even under extreme loading.

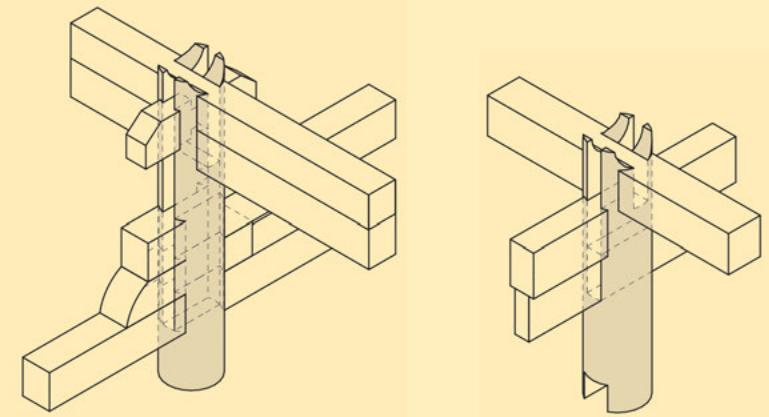
The Naxi of Northwest Yunnan in China have developed a building technique that withstands the numerous earthquakes that occur in that region. They too have fully utilized the elastic potential of wood, but the tools they had at their disposal were far less precise. For this reason, they slotted the purlin-bearing columns very deeply all the way to the lowest beam in the roof construction. The horizontal beams are reduced in width to a point where they fit into the forked column (Fig. 9). In the event of extreme fluctuations, the massive cross section of the beams works as a lever that

Aussteifung unterhalb der Dachkonstruktion dienen bzw. diese tragen. Die Gegend liegt für bis zu sechs Monate unter vier bis fünf Metern Schnee. Die Zimmerleute konnten dank lokal verfügbarer, sehr hoch gewachsener Bäume eine Bautechnologie entwickeln, die all den spezifischen Anforderungen Rechnung trug, die mit solch extremen klimatischen Bedingungen einhergingen. Sie reizten die Elastizität des Materials maximal aus. Zapfenlöcher beanspruchen nie mehr als ein Drittel des Querschnitts. Das garantiert auch bei Extrembelastung ausreichend zusammenhängende Holzfasern.

Die im Nordwesten Yunnans lebenden Naxi haben eine Bautechnologie entwickelt, die den zahlreichen Erdbeben standhält. Auch sie schöpften das Potenzial der Elastizität von Holz voll aus, mussten aber auf weit weniger präzises Werkzeug zurückgreifen. Daher schlitzten sie die pfettentragenden Säulen sehr tief bis zum untersten Balken der Dachkonstruktion. Die horizontalen Balken werden im Knoten so stark reduziert, dass sie in



◀ Fig. 8 | Abb. 8:
Joint details for load-bearing columns in a *minka* (a traditional Japanese house) located in the mountainous landscape between Ishikawa and Gifu (Japan). Drawing from: Fukui Uyō, Tsukidate Toshiei: *Mono iu Shiguchi – Hakusanroku de atsumeta minka no kakera*, Tokyo: LIXIL-Shuppan, 2019: 7, 21.



◀ Fig. 9 | Abb. 9:
Carpenters belonging to the Naxi, an ethnic minority in Yunnan (China), developed joint details such as these to withstand the massive earthquakes that occur in the region.
Drawing: Meng Yang

would inevitably crack the slotted column. To prevent this effect, the cross-section reduction is not incised at right angles. The beam cheeks to the left and right of the column envelope the column, thereby keeping the slot from being spread apart. In addition, there are always beams fitted in an orthogonal arrangement in the column, which greatly reduces the play of this lever effect on the slotted column while also providing a bearing surface for further beams in the slot.

die Säule eingehälst werden können (Abb. 9). Der massive Querschnitt der Balken wirkt im Fall extremer Schwan- kungen als Hebel, der die geschlitzte Säule sprengen müsste. Zur Verhin- derung dieses Effekts ist die Quer- schnittsreduktion nicht rechtwinkelig eingeschnitten. Die Balkenwangen links und rechts der Säule umgreifen die Säule und sperren solchermaßen die Aufspreizung des Schlitzes. Zu- sätzlich gibt es immer orthogonal ein- gehälste Balken, die den Spielraum der erwähnten Hebelwirkung auf die geschlitzte Säule stark reduzieren und zugleich Auflage für weitere Balken im Schlitz sind.

HANDICRAFT AS AN ATTITUDE TOWARDS THE WORLD

HANDWERK ALS HALTUNG ZUR WELT

↗ BRIGITTE FELDERER // English translation: Mark Welch

The topic of this book and of an entire research project focuses on processes that combine artistic, technical, theoretical and not least of all, practical knowledge extending across and beyond the boundaries of traditional disciplines. Various methods and ways of thinking have materialized here in a collaborative endeavor, thereby letting something new emerge. Handicraft is implemented in an absolutely exemplary way to trigger innovation through the application of manual skills, the use of contemporary tools, and a perception of a cultural and social history that must also always be understood as a highly relevant history of fascination, and ultimately, passion, for handicraft.

The skilled work of artisans helped to sustain a social order that was also oriented towards various forms of work (as well as non-work). The books of trades 'Ständebücher' (Fig. 1) from early modern times depict a hierarchical society into which one was born. Each skilled trade or craft followed its own rules, oriented itself towards its own values, and exercised a binding power for anyone who belonged to it. This affiliation was linked to certain requirements. For instance, future apprentices had to provide proof of their Christian and legitimate birth before they could even be accepted into a workshop and later, as journeymen, set off on long, difficult years of wandering from workshop to workshop. Viewed through

Das Thema dieses Bandes und eines ganzen Forschungsprojekts verweist auf Prozesse, die künstlerisches, technisches, theoretisches und nicht zuletzt praktisches Wissen – über disziplinäre Grenzen hinweg – zusammenführen. Verschiedene Methoden und Denkweisen materialisieren sich in einem gemeinschaftlichen Unterrichten und lassen so Neues entstehen. Handarbeit wird geradezu exemplarisch umgesetzt, um Erneuerungen auszulösen: in einer Anwendung manueller Kenntnisse, durch den Einsatz zeitgemäßer Werkzeuge wie über die Wahrnehmung einer Kultur- und Sozialgeschichte, die immer auch als höchst aktuelle Faszinationsgeschichte und letztendlich Leidenschaft für das Handwerk zu verstehen ist.

Handwerkliches Arbeiten trug eine gesellschaftliche Ordnung mit, die sich auch an unterschiedlichen Formen von Arbeit (oder auch Nicht-Arbeit) ausrichtete. Die Ständebücher der Frühen Neuzeit (Abb. 1) bildeten eine hierarchische Gesellschaft ab, in die man hineingeboren wurde. Jeder Stand folgte seinen eigenen Regeln, richtete sich nach eigenen Werten aus und übte eine bindende Kraft für all jene aus, die dem jeweiligen Stand angehörten. Diese Zugehörigkeit war an Voraussetzungen geknüpft, so musste etwa ein zukünftiger Lehrling seine christliche und zudem eheliche Geburt nachweisen, um überhaupt in eine Werkstatt

► Fig. 1 | Abb. 1:

Book jacket of Hans Sachs, Jost Amman: *Eigentliche Beschreibung aller Stände auff Erden*, Frankfurt am Main: Feyerabent. Reprint based on the 1st edition from 1568, newly published in 1984. The English translation is entitled *The Book of Trades*.

Der Papst.



Der Buchdrucker.



Der Buchbinder.



Der Apothecker.



Der Kaufmann.



Der Seydensücker.



Der Schmidt.



Der Beutler.



Der Goldschmid.



Jost Amman
Hans Sachs

Das Ständebuch

today's lens, this strict and inescapable social structure may seem like quite an abstract and remote phenomenon from a very distant past. However, one aspect that might still resonate is the positive perception of a sense of belonging, of affiliation. Although it was imposed from without, it did promise security. Being an artisan, belonging to a skilled trade or craft was associated with the self-confidence of that social standing and not (yet) geared to the performance pressures of a career for which one was personally responsible, or to the expectations of an unlimited advance up the social ladder. Life as an artisan did not require legitimization, nor was it viewed in comparison to other occupational options. Everything followed an incontrovertible and staid order. One was simply born into a given craft or trade.

▼ Fig. 2 | Abb. 2:
"The Pewterer," a colored lithograph from:
Anschauungsbuch für Kinder: 30 Werkstätten nebst ihren hauptsächlichsten Werkzeugen und Fabrikaten, Esslingen am Neckar: Verlag J. F. Schreiber, ca. 1835.

aufgenommen zu werden und sich später als Geselle auf lange, harte Jahre einer Wanderschaft begeben zu können. Aus einem heutigen Blickwinkel betrachtet mögen die Strenge und Unausweichlichkeit dieser einstigen Gesellschaftsstruktur in der historischen Distanz recht abstrakt und entfernt scheinen. Was möglicherweise dennoch fortwirkt, ist eine Wahrnehmung von Zugehörigkeit, die zwar nicht selbstgewählt war, aber Sicherheit versprach. Handwerker zu sein, zum Stand der Handwerker zu zählen, war mit einem ständischen Selbstbewusstsein verknüpft und (noch) nicht am Erfolgsdruck einer selbstverantworteten Karriere, an den Erwartungen eines grenzenlosen sozialen Aufstiegs ausgerichtet. Eine Existenz als Handwerker musste nicht legitimiert werden, sich nicht in Vergleich zu anderen beruflichen Optionen setzen. Alles folgte einer unumstößlichen und ruhigen Ordnung. Man wurde als Handwerker geboren.

Die Geschichte des Handwerks blieb dabei nie frei von Verklärungen. Illustrationen zeigen aufgeräumte, saubere Werkstätten, alles und jeder war an seinem Platz, Meister, Geselle, Lehrling. Im frühen 19. Jahrhundert, als die Industrialisierung händische Tätigkeiten längst technisch unterstützte, erweiterte oder beschleunigte, blendeten Darstellungen neue Maschinerien fast vollständig aus (Abb. 2²). Handwerkliches Leben erschien als eine idyllische Welt, die von technischen Entwicklungen unberührt zu bleiben schien. Nichts sollte dem Handwerk seinen 'golden Boden' wegziehen. Ein 'conceptual joining' von dem, was war, was ist und noch sein könnte, war nicht zu jeder Zeit denk- und abbildbar. Solch historische Romantisierungen wirken nach und prägen nach wie vor Bilder vom Handwerk, die in einen massenmedialen Umlauf geraten. Nicht



The history of handicraft was never free of idealization. Illustrations show neat, clean workshops, all things and people in their proper place, master, journeyman, apprentice. In the early 19th century, at a time when industrialization had long been technically

supporting, expanding or accelerating manual activities, depictions of the period ignored new machinery almost completely (Fig. 2²). The life of artisans appeared to be an idyllic world, seemingly untouched by any technical advances. Nothing was to be allowed to counter the old adage: "A trade in hand finds gold in every land." A conceptual joining of what was, what is, and what might be was not conceivable or depictable at all times. Historical romanticizing of this kind has had lasting effects and continues to shape images of handicraft, which then end up circulating in the mass media. It is not rare to hear handicraft today still being equated time and again with the handicraft of old, in that it excludes modern technology and understands itself to be an unbroken continuation of, or at least rediscovery of, traditional techniques.

Handicraft appears to be without a history, as it were. Artisans specializing in indigo printing fall into a different category than, say, plumbers, they are shown a different kind of appreciation. People crossing over from other professions are touted as artists. Handicraft appears to be a creative and free way of living and working, seemingly outside the realm of history. Thus, it repeatedly encourages newly charged longings and needs for a sustainable existence, in family groupings, far removed from any and all technological pressures. Understood in this way, handicraft presents itself as a realistic utopia worth striving for, in the spirit of Adorno's "there is no right life in the wrong one."³

Although this project demands new kinds of conceptual joining, one is reminded at the same time that the development of handicraft has always fed on a continuous exchange

selten wird heute Handwerk immer noch und immer wieder mit 'altem' Handwerk gleichgesetzt, das moderne Technologie ausschließt und sich als ungebrochene Fortsetzung oder zumindest Wiederentdeckung traditioneller Techniken versteht.

Handwerk erscheint gleichsam geschichtslos. Blaudrucker*innen fallen in eine andere Kategorie als Installateur*innen, erfahren eine andere Wertschätzung. Quereinsteiger*innen im Beruf werden als Künstler*innen dargestellt. Handwerk erscheint als kreative und freie Möglichkeit, zu leben und zu arbeiten, scheinbar aus der Geschichte gefallen, und bedient so immer wieder neu aufgeladene Sehnsüchte und Bedürfnisse nach einer nachhaltigen Existenz, im familiären Verband, fernab jeglichen technologischen Drucks. Ein so verstandenes Handwerk präsentiert sich als erstrebenswerte Realutopie, als das richtige Leben (im falschen).³

Wenn in diesem Projekt neue konzeptuelle Verbindungen eingefordert werden, dann wird zugleich daran erinnert, dass sich die Entwicklung des Handwerks immer aus einem kontinuierlichen Austausch von Wissen gespeist hat, etwa auf den langen Jahren der Walz (Abb. 3⁴), während deren man sich mit unterschiedlichen Methoden und Aufgaben vertraut machte. Diese direkte Weitergabe in einer Werkstatt, durch einen Meister, an wechselnden Orten war notwendig, denn handwerkliche Methoden und Anwendungen verdanken sich einem nie endenden Lernprozess, der immer auch auf unvermittelte Anschauung wie haptischer Anleitung beruht, die einen Materialwiderstand genauso direkt begreifen lässt wie den Präzisionsgrad einer Verarbeitung. Handwerkliches Wissen geht über textgebundene Vermittlung hinaus, die manuelle Expertise



of knowledge, for instance, a journeyman's long years of wandering (Fig. 3⁴) during which he learns about different methods and tasks. This direct passing on of knowledge at a workshop by a master had to occur at alternating sites because the methods and applications of a craft result from a never-ending learning process that is always based on direct visualization and tactile instruction. Workers come to grasp a material's resistance directly, as well as the degree of precision achieved with a given type of process. Knowledge of a skilled craft or trade goes beyond book learning. Manual expertise, in turn, has an impact on written documentation.

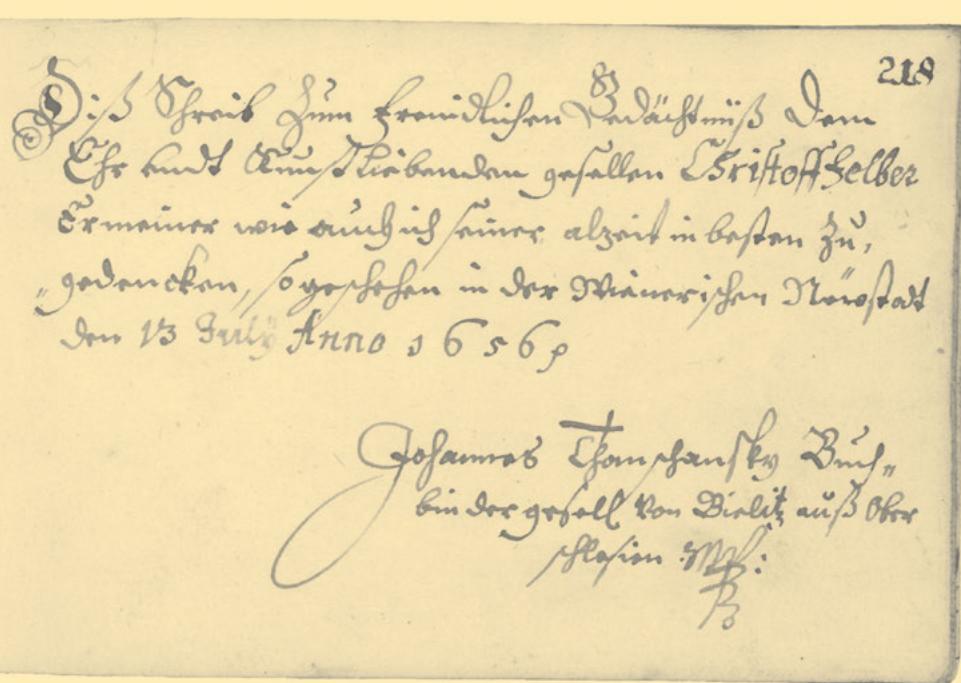
Yet the object is to connect completely different ways of conveying knowledge – oral, manual, tactile and not least of all, text-based systems – in order to impart know-how while at the same time recording it. One meshes with the other while simultaneously promoting the transfers. Instruction manuals are omnipresent

wirkt wiederum auf die schriftliche Dokumentation zurück.

Doch es gilt, ganz unterschiedliche Formen der Weitergabe zu verbinden: mündliche, manuell/haptische sowie nicht zuletzt textgebundene Systeme, um Know-how zu vermitteln und zugleich festzuhalten, eins greift ins andere und fordert zugleich Transferleistungen. Manuals sind heute medial allgegenwärtig und können doch nie umfassend sein. Die Rekonstruktion oder auch das Aufgreifen alten Wissens setzen praktische Erfahrung voraus.

In diesem Sinne werden Handwerksleute zu Zauberkünstler*innen, die die textgebundene Beschreibung eines Kunststücks nur dann in die eigene Praxis übersetzen können, wenn sie die eigenen Instrumente und händischen Fertigkeiten routiniert anwenden können.

So vermitteln handwerklich erzeugte Objekte auch Wissen, und sie zeigen Handwerk in einem engen Austausch zwischen den Denkbewegungen der



◀ Fig. 3 | Abb. 3:

Christoph Felber: Stammbuch,
1642–1662, painted parchment,
laminated on rag paper, leather,
silk, gold, Weimar, Herzogin
Anna Amalia Bibliothek, Stb 34.

today in the media but they can never cover everything.

The prerequisite for reconstructing or even taking up old knowledge again is practical experience. In this sense, artisans become magicians who can only translate the text-bound description of a trick into practice if they are adroit at using their own tools and manual skills.

Crafted objects also convey knowledge and show handicraft in a close exchange between the trends in thinking from their period of origin, the respective state of the art in technological knowledge, the experience-based skill of performing an activity reliably, quickly and deliberately, and the self-imposed striving to move beyond local knowledge and always search for experiences elsewhere. In the process, it is not always easy to distinguish craft from art, one flows into the other, as the philosopher Immanuel Kant once noted. Influences from both sides are needed, firstly, to move art forward and secondly, to constantly steer

Zeit, in der sie entstehen, dem jeweiligen Stand technischen Wissens, der sicheren Routine sowie dem auferlegten Bestreben, über lokales Können hinauszugehen und Erfahrungen auch immer andernorts zu suchen. Dabei sind Handwerk und Kunst nicht immer leicht zu unterscheiden, fließen ineinander, wie es der Philosoph Immanuel Kant einmal beschrieben hat. Es braucht Einflüsse von beiden Seiten, um erstens die Kunst weiterzubringen und zweitens Handwerk immer wieder an neue Herausforderungen heranzuführen. Handwerk ist nie stehengeblieben. Handwerk bezeichnet nie nur einen Beruf, eine gesellschaftliche Zugehörigkeit, eine historische Struktur, sondern sollte als Beschreibung einer Haltung zur Welt begriffen werden.

Heute geht es beim Handwerk immer um die Frage, wie handwerkliche Leistungen noch bestehen bleiben, wenn Handwerk, wie wir es zu kennen glauben, technologischen, rechtlichen und auch politischen Veränderungen folgt, unterliegt oder sie auch

craft towards new challenges. Handicraft has never come to a standstill. Handicraft never connotes merely an occupation, a social affiliation, or a historical structure, but should rather be understood as a description of an attitude towards the world.

Today, handicraft always revolves around the question of how skilled craftsmanship still continues to exist if handicraft, as we know it, follows or is subject to, or in the meantime, even triggers, technological, legal and even political changes. Training paths change. Manual activities and activities closely connected with computers are no longer mutually exclusive. The work artisans do is based on far-reaching knowledge yet is anchored locally and regionally. Artisans who use materials and perform work are closely and never anonymously interconnected with both and thus also with the places and people for which the work is done. Handicraft therefore also contributes to social cohesion.

The results and outcomes of different artisan skills never tell only the stories of a technique and technology, a material, or a design – they are also an expression of a structure that always presupposes a sense of responsibility. Artisans understand this responsibility as beginning with preserving and passing down knowledge to subsequent generations and always viewing their own performance as a guarantee of consistency as well. The responsibility itself does not end when a crafted product is passed on. Quality in production also leads to a corresponding interaction with, to a cultivation of, to the ascribing of value to, the material, yet never just the material but the work, the process as well.

Anyone engaged in handicraft today envisages a scenario that creates a

bisweilen auslöst. Ausbildungswege verändern sich, manuelle Tätigkeiten und solche, die eine enge Verbindung mit dem Computer eingehen, schließen einander nicht mehr aus. Handwerkliche Arbeit gründet auf weitreichendem Wissen und ist doch lokal und regional verankert. Materialien, Arbeit und die Personen, die sie ein- und umsetzen, stehen in enger und nie anonymer Beziehung zueinander und damit zu den Orten und Menschen, für die gearbeitet wird. Auch damit trägt Handwerk zu einem gesellschaftlichen Zusammenhalt bei.

Die Resultate und Hervorbringungen unterschiedlicher handwerklicher Fertigkeiten erzählen nie nur Geschichten einer Technik und Technologie, eines Materials, einer Gestaltung, sondern sind Ausdruck eines Gefüges, das immer auch Verantwortung meint. Diese Verantwortung beginnt bei der Bewahrung und der Weitergabe von Wissen an nachfolgende Generationen, denkt die eigene Leistung immer auch als Gewähr für Beständigkeit und endet selbst dann nicht, wenn ein handwerkliches Erzeugnis weitergeht. Qualität in der Herstellung führt auch zu entsprechendem Umgang, zu einer Pflege, einer Wertschreibung, die sich nie nur aufs Material beschränkt, sondern die Arbeit, den Prozess mitmeint.

Wer sich heute mit dem Handwerk auseinandersetzt, entwirft ein Szenario, das die Verbindung zu einer unmittelbaren und wahrlich begreifbaren Zukunft herstellt. Handwerk steht für eine Einstellung, die immer ‚Luxus für alle‘ anstrebt. Dieser Luxus besteht in einer Freiheit gegenüber den Angeboten eines schnellen Konsums, in der Unabhängigkeit von vergänglichen Moden, in dem Wunsch, dieser Zukunft in Hinblick auf nur beschränkt zur Verfügung stehende Rohstoffe keinen weiteren Scha-

connection to an immediate and truly graspable future. Handicraft stands for an attitude that always aspires to 'luxury for all.' This luxury consists in freedom from products offered for quick consumption, in independence from fleeting fashions, in the desire to do no further damage to this future, given the scarcity of available raw materials and, probably also in the dream of holding on to knowledge on which one's own skills are based.

In this sense, artisans – whether they make fine goods, serve our everyday comfort and convenience, or combine new technology with ancient knowledge – open up to us a view of a world, a society in which we want to live today and also in the years ahead.

den zuzufügen, und wohl auch dem Traum, an Wissen festzuhalten, das auf eigenen Fähigkeiten beruht.

In diesem Sinn eröffnen uns Handwerker*innen, ob sie nun feine Waren herstellen, alltäglichen Komfort garantieren oder neue Technologien mit altem Wissen zusammenführen, den Blick auf eine Welt, eine Gesellschaft, in der wir leben wollen – heute und auch noch dann.

1 ^{en} The famous *Book of Trades* with illustrations by Jost Amman and text by Hans Sachs is considered to be one of the first survey works of its kind aimed at depicting all trades of the time and all artisan occupations in a single volume.

^{de} Das berühmte *Ständebuch* von Jost Amman und Hans Sachs gilt als eines der ersten Überblickswerke dieser Art, die sich zum Ziel gesetzt hatten, alle Stände der Zeit und alle Handwerks- und Handelsberufe in einem Buch zusammenfassend darzustellen.

2 ^{en} *Anschauungsbuch* was a children's picture book published from 1835 on in several editions and features 30 overview illustrations of work steps, products and tools of a given trade or craft in the respective workshops. Although the accompanying text promises "a correct impression of the activities and actions of the common artisan in his use of the necessary tools", it in fact conveys an idealized picture, depicting satisfied master artisans surrounded by journeymen and apprentices. The illustrations feature almost no women even though women did in fact perform many workshop tasks. Factories or cottage industries where workers worked from home had already existed for a long time at this point but are completely absent from this publication.

^{de} Das *Anschauungsbuch* erschien ab 1835 in mehreren Auflagen und zeigt in 30 Überblicksdarstellungen jeweils Arbeitsschritte, Erzeugnisse sowie Werkzeuge eines bestimmten Handwerks in der jeweiligen Werkstatt. Obwohl der Begleittext „einen richtigen Eindruck in das Treiben und Thun der gewöhnlichen Handwerker sowie in die Verwendung der nötigen Werkzeuge“ verspricht, wird hier ein idealisiertes Bild vermittelt. So sieht man zufriedene Meister, umgeben von Gesellen und Lehrlingen. Frauen, die in den Werkstätten zahlreiche Hilfsdienste leisteten, fehlen fast durchgängig. Zu dieser Zeit längst existierende Manufakturen oder die Produktion in Heimarbeit werden ebenso wenig gezeigt.

3 ^{en} See Lehmkuhl, T. „Privat im Richtigen. Wie Adornos berühmtester Satz ursprünglich lautete“, in: *Süddeutsche Zeitung*, 26. February 2010: 14. The article discusses the text by Mittelmeier, M. in: *Recherche* 4/2009: 3.

^{de} Siehe Lehmkuhl, T. „Privat im Richtigen. Wie Adornos berühmtester Satz ursprünglich lautete“, in: *Süddeutsche Zeitung*, 26. Februar 2010: 14. Der Artikel beschäftigt sich mit dem Text von Mittelmeier, M. in: *Recherche* 4/2009: 3.

4 ^{en} *Stammbuch* was a register kept by a bookbinder journeyman named Christoph Felber from Hall in Tyrol. Based on the entries made from 1642 to 1662, this register accompanied Felber as he went from workshop to workshop as a journeyman. These travels took him to Danzig and via Vienna and today's Bratislava all the way to Constantinople before he settled in Olomouc in what is now the Czech Republic.

^{de} Das *Stammbuch* wurde von einem Buchbindergesellen aus Hall in Tirol geführt. Laut den Eintragungen, die aus den Jahren 1642 bis 1662 stammen, begleitete das Stammbuch Christoph Felber auf seinen weiten Wanderungen, die ihn nach Danzig und über Wien und Preßburg sogar bis Konstantinopel führten, ehe er sich in Olomouc/Olmütz niederließ.

APPROACH ANSATZ

Can a materialized joint detail become the origin of an architectural aesthetic?

This was the basic question that launched this project, with the intention of developing new approaches to architecture whose structure and logic are inseparably/immediately related to the essence of wood as a building material.

The use of wood in construction has seen considerable changes and innovations over the last few decades. One of the key changes has been the transition from traditional craftsmanship to industrialized, streamlined production methods. An example of the former approach can be seen in Fig. 1a, which shows the Old Walton Bridge designed by William Etheridge. A carpenter by profession, he applied his intuitive knowledge of the flow of forces rather than strict mathematical reasoning to devise the structural concept of his wooden bridge. This resulted in a diversified, rhythmic layout of the main load-bearing elements of the structure. In later times, industrialized, standardized production methods in connection with new materials like steel led to an increase in productivity through the decreasing of complexity (Fig. 1b). As a product of nature, wood exhibits a complex mechanical behavior and imperfections that stem from environmental impacts that occur during its growth process. ↗⁰¹

Thus, wood does not lend itself well to idealization in the context of statics calculations. With the introduction of engineered wood products, this apparent disadvantage, as compared to steel, for example, could be largely eliminated. The main challenge in wood construction today is the joining of individual members to form structural units. Normally, joints constitute the governing factor that limits the degree to which elements can be utilized in a wooden structure. This is the main reason for the widespread use of spruce – a comparatively soft wood – for construction purposes. Hardwood, which allows for the building of more slender and efficient structures, cannot be economically utilized due to limitations at its joints. Current practice consists of placing steel nodes in between wooden elements in order to ensure sufficient load-bearing capacity. With the advent of computer-

Kann ein materialisiertes Fügedetail zum Ursprung einer architektonischen Ästhetik werden?

Mit dieser Grundfragestellung startete das Projekt mit der Absicht, neue Ansätze für eine Architektur zu entwickeln, deren Struktur und Logik in untrennbarem/unmittelbarem Zusammenhang mit dem Wesen des Baumaterials Holz steht.

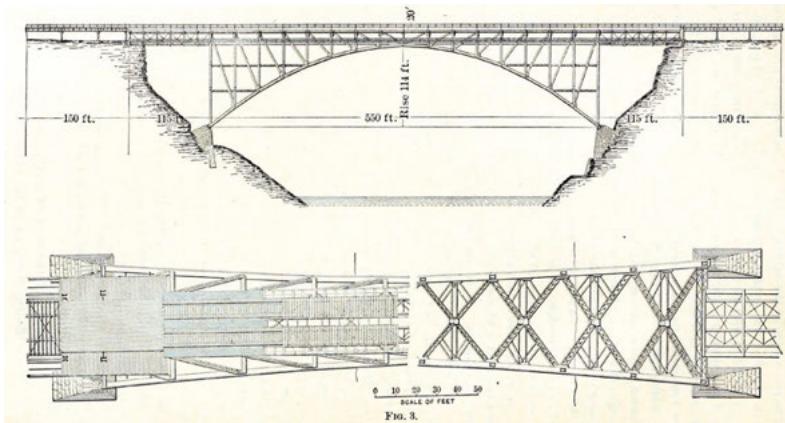
Die Verwendung von Holz im Bauwesen hat in den letzten Jahrzehnten erhebliche Veränderungen und Innovationen erfahren. Eine der wichtigsten Veränderungen war der Übergang von traditioneller Handwerkskunst zu industrialisierten, rationellen Produktionsmethoden. Ein Beispiel für den ersten Ansatz ist in Abb. 1a zu sehen, die die von William Etheridge entworfene Old Walton Bridge zeigt. Als gelernter Zimmermann nutzte er sein intuitives Wissen über den Fluss der Kräfte anstelle strenger mathematischer Überlegungen, um das strukturelle Konzept seiner Holzbrücke zu entwickeln. Das Ergebnis war eine abwechslungsreiche, rhythmische Anordnung der Haupttragellemente des Bauwerks. In späteren Zeiten führten industrialisierte, standardisierte Fertigungsmethoden in Verbindung mit neuen Materialien wie Stahl zu einer Steigerung der Produktivität bei abnehmender Komplexität (Abb. 1b). Als Naturprodukt weist Holz ein komplexes mechanisches Verhalten und Unvollkommenheiten auf, die auf die Umwelteinflüsse während des Wachstumsprozesses zurückzuführen sind. ↗⁰¹

Daher eignet es sich nicht gut für eine Idealisierung im Rahmen statischer Berechnungen. Mit der Einführung von Holzwerkstoffen konnte dieser scheinbare Nachteil gegenüber z.B. Stahl weitgehend beseitigt werden. Die größte Herausforderung im Holzbau ist heute das Zusammenfügen der einzelnen Tragelemente zu baulichen Einheiten. In der Regel bestimmen die Verbindungsdetails den Grad der konstruktiven Ausnutzung der Elemente in einer Holzkonstruktion. Die derzeitige Praxis besteht darin, Stahlverbinder zwischen den Holzelementen zu platzieren, um eine ausreichende Tragfähigkeit zu gewährleisten. Mit dem Aufkommen der computergestützten Fertigung (CAM) und fortschrittlichen digitalen Konstruktions- und Berechnungswerkzeugen ist eine Änderung dieser Konstruktionsphilosophie in greifbare Nähe gerückt. Dieser Paradigmenwechsel im Holzbau lag diesem Forschungsvorhaben zugrunde, das auf einer kritischen

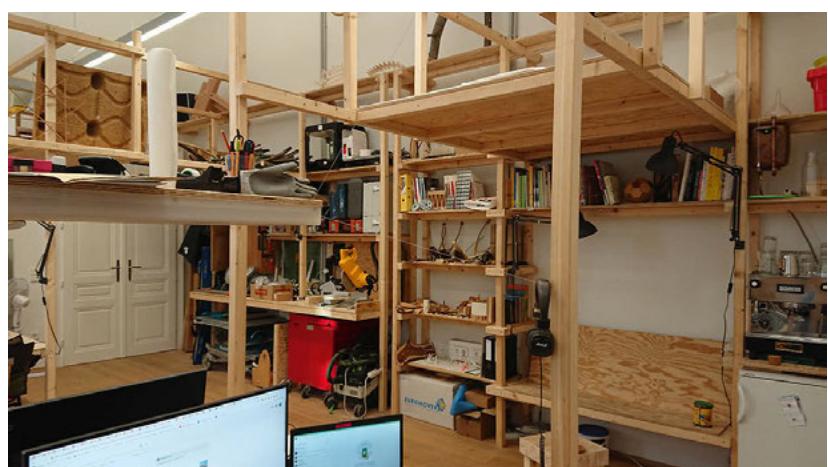
↗⁰¹ see Lichtenegger, H.: *Cellulose Nanofibers in Wood*, p. 22 ff.



▲ Fig. 1a | Abb. 1a:
Canaletto (Giovanni Antonio Canal),
A View of Walton Bridge, 1754, oil
on canvas, 48.7 x 76.4 cm, DPG600.
Dulwich Picture Gallery, London



▲ Fig. 1b | Abb. 1b:
Whirlpool Rapids Bridge, bridge over the Niagara river, 1897, Pennsylvania Steel Company of
Steelton, Pennsylvania. Engineer: Leffert L. Buck. From the Transactions of the American Society
of Civil Engineers, v. 40, 1898, digitized by Internet Archive ([https://historicbridges.org/bridges/
browser/?bridgebrowser=truss/whirlpool/](https://historicbridges.org/bridges/browser/?bridgebrowser=truss/whirlpool/)).



► Fig. 2a | Abb. 2a:
View of the project workspace at the
University of Applied Arts Vienna,
2018. The structure was originally
designed for two rooms in another
building then relocated into this
space in summer 2018.

aided manufacturing (CAM) and advanced digital design and calculation tools, a shift in design philosophy is now within reach. Similar as in nature, where shape is cheap and material is costly, computer-controlled production methods can be used to achieve geometric complexity in designing wooden joints at a negligibly extra cost as compared to current joining techniques. This paradigm shift in wood construction lay at the root of this research project, which focused on a critical reevaluation of traditional joining techniques with respect to their aesthetic potentials in the context of a digital production chain. The working method with which this project was pursued was essentially supported by physical experiments that were linked to digital workflows. This engagement with the material tied the design of architectural space to its specific materialization. In this process, the approach of an open-ended outcome, which consciously renounced a clearly delimited goal in the sense of function or form, was understood as the most important methodological instrument for achieving artistic innovation. The objective of these studies was rather a formation of space and construction, formulated as a general, fuzzy aim that clearly deviated from an approach based on optimization and problem-solving. The concepts and artifacts that emerged in the process were subsequently evaluated as possible architectural outcomes and further developed in iterative studies that built on previous findings.

In an open phase at the beginning, a wide range of topics was surveyed, compared and discussed with different experts, which was then narrowed down step by step to specific focal points of work. A multifunctional spatial structure, made of wooden beams and plywood panels (Fig. 2a), also featuring two magnetic pinboards (Fig. 2b) that were designed and implemented as a kick-off project for the workspace at the university, served as a creative catalyst and infrastructure for the discovery process and an in-depth discussion (Fig. 3). The range of topics was initially narrowed down in broad terms, such as wood connections in spatial structures, constructions with surface components and the physiology of the material (Figs. 4a-c). Accompanied by excursions to timber construction regions and (research) institutions and companies (Figs. 5a-c), the research work was subsequently further condensed, resulting in two projects: one dealing with the principle of plug-in connections (*Interlocking Spaces*) and the other with the idea of utilizing naturally grown elements (*Branch Formations*).

Neubewertung traditioneller Verbindungstechniken im Hinblick auf ihre ästhetischen Potenziale im Kontext einer digitalen Produktionskette aufbaute. Die Arbeitsweise wurde wesentlich getragen von physischen Experimenten, die mit digitalen Arbeitsabläufen verknüpft waren. Solch eine Auseinandersetzung mit dem Material bindet einen Entwurf von architektonischem Raum an die spezifische Materialisierung. Dabei wurde ein ergebnisoffener Ansatz, der bewusst auf ein klar abgegrenztes Ziel im Sinne einer Funktion oder Form verzichtete, als wichtigstes methodisches Instrument zur Erreichung künstlerischer Innovation verstanden. Vielmehr war die Zielsetzung der Studien, eine Raum- und Konstruktionsbildung, als generelle und unscharfe Absicht formuliert, was deutlich von einem auf Optimierung und Problemlösung basierenden Ansatz abweicht. Die dabei entstehenden Konzepte und Artefakte wurden anschließend als mögliche architektonische Ergebnisse bewertet und in weiteren iterativen Studien, die auf den bisherigen Erkenntnissen aufbauen, weiterentwickelt.

In einer offenen Phase zu Beginn wurde eine breite Palette an Themenbereichen abgetastet, verglichen und mit verschiedenen Expert*innen diskutiert, die dann schrittweise auf spezifische Arbeitsschwerpunkte eingegrenzt wurden. Eine multifunktionale Raumstruktur aus Holzstäben und Sperrholzplatten (Abb. 2a) sowie zwei magnetischen Pinnwänden (Abb. 2b), die als Kick-Off-Projekt für den Arbeitsbereich an der Universität entworfen und umgesetzt wurden, diente als kreativer Katalysator und Infrastruktur für den Erkundungsprozess und vertiefende Diskussionen (Abb. 3). Das Themenspektrum wurde zunächst in weit gefassten Begriffen eingegrenzt, wie z.B. Holzverbindungen in Raumtragwerken, Konstruktionen mit flächigen Bauteilen und die Physiologie des Werkstoffs. (Abb. 4a-c). Begleitet von Exkursionen in Holzbauregionen, (Forschungs-) Institutionen und Unternehmen (Abb. 5a-c) wurde die Forschungsarbeit in Folge weiter verdichtet und mündete in zwei Projekten, die sich zum einen mit dem Prinzip der Steckverbindung (*Interlocking Spaces*) und zum anderen mit der Idee der natürlich gewachsenen Bauteile beschäftigten (*Branch Formations*).

►► Fig. 2b | Abb. 2b:

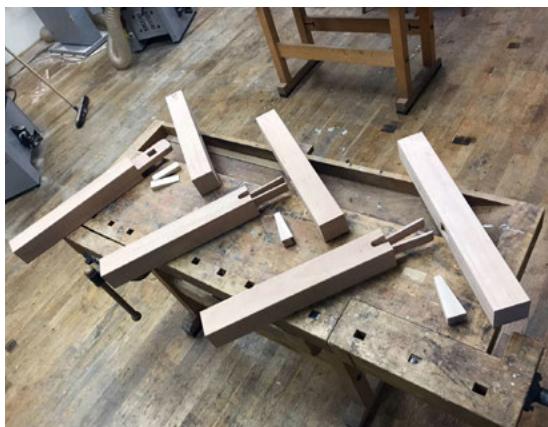
Magnetic pinboard with a collection of reference projects and possible topics for investigation at the beginning of the research phase in fall 2017. This map was continually altered and thereby served as a tool for tracing the working process, helping to keep an overview of all aspects that made up the projects at one glance.





▲▲ Fig. 3 | Abb. 3:

One of the regular discussions of the project team and mentors in the project workspace at its first location in winter 2017/18.



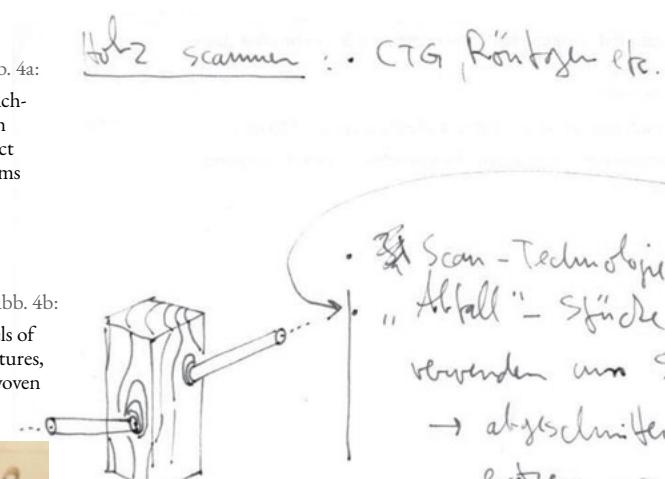
◀ Fig. 4a | Abb. 4a:

Studies of detachable joints with locks to connect hardwood beams (beech).



▼▼ Fig. 4b | Abb. 4b:

Working models of grid-shell structures, made of interwoven surface strips.



• Raum Fachwerk



• Abgabeln etc.

▲ Fig. 4c | Abb. 4c:

Sketches of initial ideas on how to use the natural properties of wood for construction.



▲ Fig. 5a | Abb. 5a:
Day trip to Nara during the excursion to Japan in spring 2018.

→ Holzstiele ^{in/} nach Wachstumsrichtung z.B. am Ast-ansatz verbinden
d. Sägewölfe verwenden?
mit Astansätzen aus Sägewölfern zu geniessen
" ist durch Sägefeuer neu
"gewachsenen Chaos-Sägefeuer"
aus "Chaosstählen"
→ Winkel machen unterschied
→ je spitzer, desto instabiler

► Fig. 5b | Abb. 5b:
Visit to a restoration project of a historic roof construction with carpenter Rolf Hummel in Bodnegg, Germany during an excursion around the Alpine region, winter 2017.



▼ Fig. 5c | Abb. 5c:
Group photo with Mr. Iwai (middle), a Daisugi forester at his plantation north of Kyoto, 2018.



INTRO

EINLEITUNG

Amongst the achievements developed in carpentry and wood construction within various cultures, climatic conditions and geographies, the refined principle of plug-in connections is a powerful manifestation. The use of solid wood for construction offers the potential to shape the structural members in a way that they can be directly connected, without the need for additional fasteners. This results in a low-tech form of assembly of interlocking members that can be used to compose flexible, temporary structures. This practice especially originates from Europe and Asia. ↗⁰² Today, it could be considered as an axiom for a future-oriented technique for building constructions out of parts that can be dis- and reassembled. ↗⁰³

Enabled by digital tools and CNC manufacturing, *Interlocking Spaces (IS)* investigated the design and fabrication of complex structures from standard timber elements that employ the concept of interlocking on both a detail and a global level, mediating between modularity and irregularity, systematics and intuition, and digital and analog practices. Traditional joinery techniques have inspired a design methodology that combines a material-oriented approach, technology and intuition in order to test a possible model for a contemporary practice of design and crafting. ↗⁰⁴

Excursions to important carpentry-related environments, such as traditional and state-of-the-art woodworking companies and research institutions in the European Alpine region and Japan, inspired preliminary concepts for this project. Japanese culture in particular had a critical influence on further developments. An exchange of thoughts and discussions with Jun Sato in Tokyo led to holding a joint workshop with students at the Angewandte in Vienna, which initiated a process of investigations on various scales that primarily resulted in two large-scale installations (*IS-1* and *IS-2*) and a series of prototypical tables (*T-1*, *T-2a*, *T-2b* and *T-3a*).

Unter den Errungenschaften, die im Zimmerei- und Holzbau innerhalb verschiedener Kulturen, Klimazonen und Geografien entwickelt wurden, ist das raffinierte Prinzip der Steckverbindungen eine kraftvolle Manifestation. Die Verwendung von Massivholz für Konstruktionen hat das Potenzial, die Bauelemente so zu formen, dass sie direkt miteinander verbunden werden können, ohne dass zusätzliche Verbindungselemente erforderlich sind. Daraus ergibt sich eine Low-Tech-Fügetechnik von miteinander verschränkten Bauteilen, mit der sich flexible, temporäre Strukturen bilden lassen. Diese Praxis stammt vor allem aus Europa und Asien. ↗⁰² Heute könnte sie als Axiom für eine zukunftsweisende Technik gelten, Konstruktionen aus zerlegbaren und wieder zusammensetzbaren Teilen zu bauen. ↗⁰³

Mithilfe digitaler Werkzeuge und CNC-Fertigung untersuchte *Interlocking Spaces (IS)* Entwurf und Herstellung komplexer Strukturen aus Standard-Holzelementen, die das Konzept der Verschränkung sowohl auf einer Detail- als auch auf einer globalen Ebene anwenden und zwischen Modularität und Unregelmäßigkeit, Systematik und Intuition sowie digitalen und analogen Praktiken vermitteln. Traditionelle Holzverbindungen haben eine Entwurfsmethodik inspiriert, die eine materialorientierte Herangehensweise, Technologie und Intuition kombiniert, um ein mögliches Modell für eine zeitgemäße Praxis von Design und Handwerk zu testen. ↗⁰⁴

Erfahrungen aus Exkursionen zu wichtigen Umfeldern des Holzbau, zum Beispiel traditionelle und moderne holzverarbeitende Betriebe und Forschungseinrichtungen im europäischen Alpenraum und in Japan, inspirierten erste Konzepte für dieses Projekt. Insbesondere die japanische Kultur hatte einen entscheidenden Einfluss auf die weiteren Entwicklungen. Ein Gedankenauftausch und Diskussionen mit Jun Sato in Tokio führten zu einem gemeinsamen Workshop mit Studierenden der Angewandten in Wien, der einen Prozess von Untersuchungen in verschiedenen Maßstäben einleitete. Als Ergebnis entstanden unter anderem zwei großflächige Installationen (*IS-1* und *IS-2*) und eine Reihe von prototypischen Tischen (*T-1*, *T-2a*, *T-2b* und *T-3a*).

↗⁰² see Zwerger, K.: *Handicraft and Technology*, p. 40 ff.

↗⁰³ see Raith, K.: *Wood Construction – On the Renewal of an Ancient Art*, p. 90 ff.

↗⁰⁴ see Felderer, B.: *Handicraft as an Attitude towards the World*, p. 48 ff.

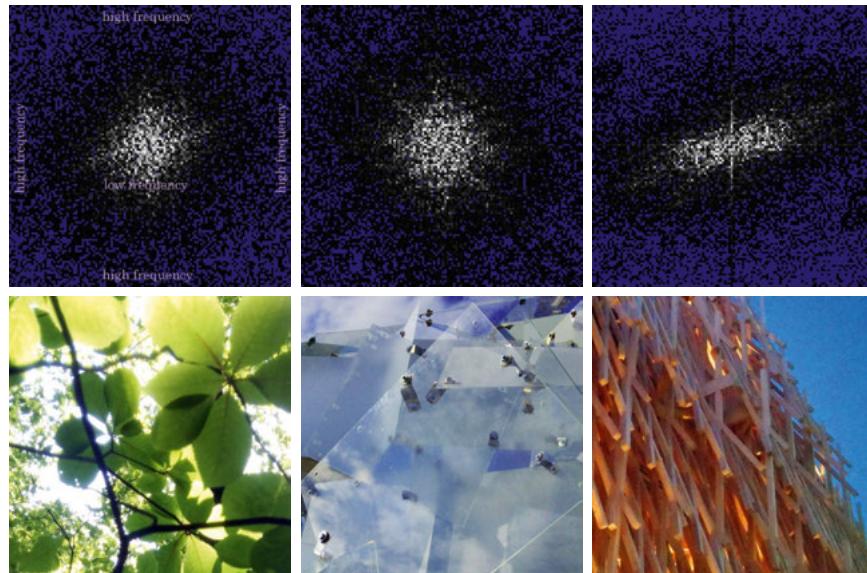


Photo © Zara Pfeifer

DEVELOPMENT OF KIGUMI JOINERY TO CREATE 'NATURALNESS'

ENTWICKLUNG DER KIGUMI-TECHNIK ZUR SCHAFFUNG VON 'NATÜRLICHKEIT'

↗ JUN SATO // German translation: Christa Wendl



◀ Fig. 1 | Abb. 1:
2D Power Spectrum.
Left: *Komorebi*.
Center: Glass pavilion at
Stanford University.
Right: Timber aggregation in
Sunny Hills Aoyama.

NATURALNESS

Using *Kigumi* techniques, it is nowadays possible to join timbers into structural designs creating natural effects such as *Komorebi*¹.

The term *Kigumi* refers to traditional Japanese timber joinery crafted without the use of any metal connectors such as plates, nails or screws. The term *Komorebi* refers to sunlight shining through leaves in the woods (Fig. 1), representing a natural atmosphere.

When a structure is composed of slender timber elements, it becomes transparent/translucent and thereby acts as a visual light filter. *Komorebi* can be one of the environments such a filter creates. Other

NATÜRLICHKEIT

Mit der *Kigumi*-Technik ist es heute möglich, Hölzer zu Konstruktionen zu verbinden und natürliche Effekte wie *Komorebi*¹ zu erzeugen.

Der Begriff *Kigumi* bezieht sich auf die traditionelle japanische Holzverbindungstechnik, die ohne Verbindungselemente aus Metall, wie Platten, Nägel oder Schrauben, auskommt. Der Begriff *Komorebi* bezeichnet das Sonnenlicht, das durch die Blätter im Wald dringt (Abb. 1) und eine Atmosphäre von Natürlichkeit schafft.

Eine Konstruktion, die aus schlanken Holzelementen besteht, wird transparent / lichtdurchlässig und wirkt dadurch als visueller Lichtfilter. *Komorebi* kann eine der Umgebun-

atmospheres found in nature, such as light conditions created by an aurora, clouds, the ocean surface², rivers³, blossoms⁴, or pampas⁵, each have their own unique embedded ‘naturalness’. Achieving these different forms of ‘naturalness’ in our built environment could be an objective in structural design, beyond functional requirements.

It is now possible to design complex configurations composed of thousands of structural elements using digital structural analysis models.

‘Naturalness’ does not necessarily have to mimic natural objects. One of the ways to create naturalness is by using the 2D light spectrum analysis method to obtain quantifiable data. For example, a random configuration of square glass panels shows a spectrum (Fig. 1 center) similar to *Komorebi* found in nature (Fig. 1 left), and the timber aggregation of the *Sunny Hills Aoyama* building shows a spectrum (Fig. 1 right) that reproduces similar effects to those caused by fleecy clouds or pampas fields.

Structures like those used for *Sunny Hills Aoyama* are lightweight and ductile as well. They also perform more robustly in the event of natural disasters, for example.

Constructions using slender elements combined with a sufficient structural height (Fig. 2) can be porous, lightweight and ductile while still remaining stable. Finally, even if the structure were to collapse due to a storm, earthquake or other events, the people inside would still be able to survive. Lives can be saved while creating naturalness at the same time.

CRAFTSMANSHIP

I once asked a carpenter which type of joinery he would like to execute to demonstrate his skill. Without hesitation, he said: “Kanawa”.

In traditional architecture, *Kanawa* joints (Fig. 3a) are used to extend columns. They can be interlocked from either direction and fixed with a square dowel. Using these types of joints makes it possible for a damaged part of the column to be replaced as well. *Okkake Daisen* joinery (Fig. 3b) has a similar shape, but it can only be interlocked from one direction and is therefore mostly used to extend beams. Expert carpenters are proudly able to carve them with the

gen sein, die ein solcher Filter erzeugt. Andere Atmosphären, die in der Natur vorkommen, wie z. B. die Lichtverhältnisse, die durch Polarlicht, Wolken, die Meeresoberfläche², Flüsse³, Blüten⁴ oder die Pampa⁵ entstehen, haben jeweils ihre eigene, einzigartige *Natürlichkeit*. Das Erreichen dieser verschiedenen Formen von *Natürlichkeit* in unserer gebauten Umwelt könnte ein Ziel der baulichen Gestaltung sein, das über die funktionalen Anforderungen hinausgeht.

Es ist nun möglich, komplexe Konfigurationen aus Tausenden von Strukturelementen mithilfe digitaler Analysemodelle zu entwerfen.

Bei „*Natürlichkeit*“ geht es nicht notwendigerweise um das Nachahmen natürlicher Objekte. Eine der Möglichkeiten, *Natürlichkeit* zu erzeugen, ist die Verwendung der 2D-Lichtspektrum-Analysemethode zum Erhalt quantifizierbarer Daten. Eine zufällige Konfiguration von quadratischen Glasscheiben zeigt beispielsweise ein Spektrum (Abb. 1 Mitte), das der in der Natur vorkommenden *Komorebi* ähnelt (Abb. 1 links), und die Holzaggregation des *Sunny Hills Aoyama* zeigt ein Spektrum (Abb. 1 rechts), das ähnliche Effekte produziert wie Schäfchenwolken oder Pampasfelder.

Strukturen, wie jene für *Sunny Hills Aoyama*, sind leicht und formbar zugleich. Zudem sind sie beispielsweise im Falle von Naturkatastrophen robuster als andere Werkstoffe.

Konstruktionen mit schlanken Elementen in Kombination mit einer ausreichenden Bauhöhe (Abb. 2) können porös, leicht und verformbar und dennoch stabil sein. Und selbst wenn das Gebäude infolge eines Sturms, eines Erdbebens oder anderer Ereignisse einstürzen sollte, könnten die Menschen im Inneren überleben. Wir schützen die Menschen und schaffen gleichzeitig *Natürlichkeit*.

HANDWERKS KUNST

Ich fragte einmal einen Zimmermann, welche Art von Arbeit er gerne ausführen würde, um sein Können zu demonstrieren. Ohne zu zögern, antwortete er: „Kanawa.“

In der traditionellen Architektur werden *Kanawa*-Verbindungen (Abb. 3a) zur Verlängerung von Balken verwendet. Sie können in beiden Richtungen ineinander gesteckt und mit einem Vierkantdübel befestigt werden. Die Verwendung dieser Art von Verbindungselementen macht es auch möglich, ein beschädigtes Bauteil einer Säule zu ersetzen. Die *Okkake-Daisen*-Verbindung (Abb. 3b) hat eine ähnliche Form, kann aber nur aus einer Richtung verriegelt werden

highest precision. I was also able to learn from some of the projects mentioned below that carpenters in Japan are accustomed to repetitive tasks like refining and assembling hundreds of timbers, as they also do this when working on shrines or temples.

The behavior of joinery using solid wood is more complicated than that which uses homogenized composite timber products, but these days, with the help of technology, it has once again become possible to work with this natural material in structures without the need for standardized modifications.

In 1991, Masahiro Inayama was able to develop the "theory of mechanism in lateral sink under partial pressure", which was a breakthrough for understanding traditional *Kigumi* joinery in detail and developing new joints.

FREE FORM

The 3D grid timber configuration used for the *Prostho Museum Research Center* (Fig. 4) has a free-form outline. The configuration in *Sunny Hills Aoyama* (Fig. 5) also has a free outline. Each outline was developed using form optimization based on structural performances. Due to these free-form outlines, especially in the case of *Sunny Hills Aoyama*, the fluctuating overall volume results in varying amounts of sunlight reaching the interior, creating the natural *Komorebi* effect.

I developed the joints used for the *Sunny Hills Aoyama* building based on a Japanese 2D grid system traditionally used for Japanese sliding doors called a *Jigoku*⁶ grid or *Chidori*⁷ grid (Fig. 6) ('Stygian grid' in English), which originated in the Hida Region. In such a grid configuration, members look as if they have been interwoven. They can be organized into square or diamond-shaped grids. For the *Sunny Hills Aoyama* building, tilted diamond grid planes were connected with additional timber profiles to form a stable overall structure. For this and the following project, the complex joint details were roughly processed by CNC machines, then manually finished by carpenters. The slender 6 × 6 cm cedar and cypress members proved to be able to withstand shrinkage without breakage.

und wird daher meist zur Verlängerung von Balken eingesetzt. Geübte Zimmerleute sind in der Lage, dieses Verbindungs-element mit höchster Präzision zu fertigen. Im Rahmen einiger der unten erwähnten Projekte habe ich auch erfahren, dass die Zimmerleute in Japan es gewöhnt sind, sich wiederholende Aufgaben wie das Verfeinern und Zusammensetzen von Hunderten von Holzelementen auszuführen, da sie dies auch bei Arbeiten an Schreinen oder Tempeln tun.

Das Bearbeiten von Massivholz ist schwieriger als das Arbeiten mit homogenisierten Verbundwerkstoffen aus Holz. Mit Hilfe der Technologie ist es jedoch wieder möglich geworden, Konstruktionen aus diesem natürlichen Material zu erstellen, ohne standardisierte Änderungen vornehmen zu müssen.

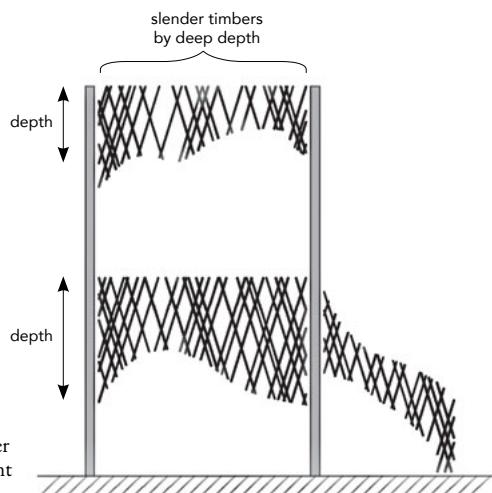
1991 entwickelte Masahiro Inayama die „Theorie zum Mechanismus des seitlichen Einsinkens unter Partialdruck“, die für das Verständnis der traditionellen *Kigumi*-Technik im Detail sowie für die Entwicklung neuer Verbindungen bahnbrechend war.

FREIFORM

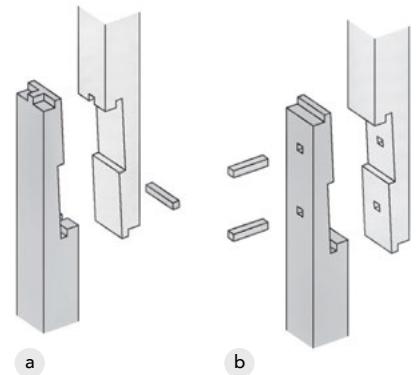
Der Umriss der 3D-Raster-Holzkonfiguration des *Prostho Museum Research Center* (Abb. 4) ist eine Freiform ebenso wie die Konfiguration des *Sunny Hills Aoyama* (Abb. 5). Die Umrisse wurden jeweils durch Formoptimierung auf der Grundlage der strukturellen Gegebenheiten entwickelt. Durch die Freiform-Umrisse, besonders im Fall von *Sunny Hills Aoyama*, führen die Schwankungen des Gesamtvolumens dazu, dass unterschiedlich viel Sonnenlicht in den Innenraum gelangt, was den natürlichen *Komorebi*-Effekt entstehen lässt.

Die bei *Sunny Hills Aoyama* verwendeten Verbindungen habe ich auf der Grundlage eines japanischen 2D-Gittersystems entwickelt, das traditionell für japanische Schiebetüren verwendet wird und *Jigoku*⁶ oder *Chidori*-Gitter⁷ (Abb. 6) genannt wird ('Stygian grid' auf Englisch) und seinen Ursprung in der Region Hida hat.

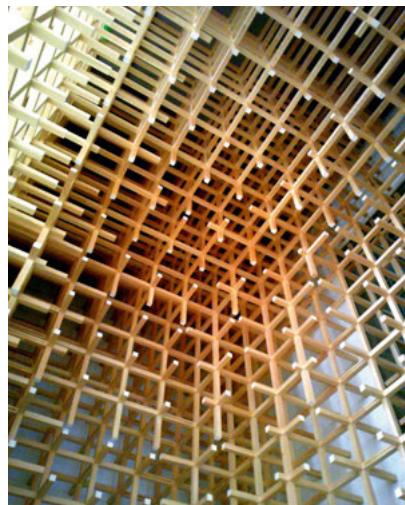
In einer solchen Gitterkonfiguration sehen die Stäbe aus, als wären sie miteinander verwoben. Sie können in quadratischen oder rautenförmigen Rastern angeordnet sein. Für das *Sunny Hills Aoyama* wurden geneigte Rautengitterebenen mit zusätzlichen Holzprofilen verbunden, um eine stabile Gesamtstruktur zu schaffen. Bei diesem und dem folgenden Projekt wurden die komplexen Verbindungsdetails von CNC-Maschinen grob bearbeitet und anschließend von Zimmerleuten manuell nachbearbeitet. Die schlanken 6 × 6 cm großen Zedern- und Zypressenhölzer erwiesen sich als schwindungsresistent, ohne zu brechen.



► Fig. 2 | Abb. 2:
Aggregation of slender
timbers with sufficient
structural height.



▲ Figs. 3a+b | Abb. 3a+b:
Kanawa joinery (a) / Okkake-daisen joinery (b).



► Fig. 4 | Abb. 4:
Prostho Museum Research Center.



►► Fig. 5 | Abb. 5:
Sunny Hills Aoyama.



► Fig. 6 | Abb. 6:
Jigoku grid / Chidori grid.

The 3D grid structure used for the *Prostho Museum Research Center* utilized *Shibo* cross joints, in which the members come together from four different directions at the joints.

In our studio, we continued our research on complex timber structures in the following conceptual proposal.

For the interior design of the *Alberni Residential Tower* (Fig. 7), we developed a timber configuration composed of vertical timbers arranged in an undulating footprint with tilted timbers attached to the vertical columns, creating a dynamic appearance that changes depending on the perspective of the viewer. For this configuration, we were able to develop an interlocking joint which allows members to be crossed at almost any angle.

In the near future, it is possible that CNC technology may be developed further, which would do away with the necessity for additional manual finishing, thereby broadening the palette of possible design solutions.

The workshop I led at the University of Applied Arts Vienna was an opportunity for students to experience this design methodology. The students developed a design for a spatial configuration of interlocking timber profiles as well as distinct joint details. In the workshop, students realized a sample of the construction with manually carved joints. After two months of further refinement and optimization in a digital model, a full-scale installation of CNC-cut members was assembled (Fig. 8).

In a further development of interlocking details, that same technique could also be applied towards realizing structures made from hardwood. Those structures could be composed of even more slender elements by maintaining the same structural performance, allowing the configurations to appear even more lightweight and transparent.

PARAMETRIC DESIGN

The envelope of the *Treehouse Setagaya* (Fig. 9) is composed of interlocking wood panels that perform as a load-bearing shell and a skin at the same time.

The overall shape is similar to that of a mantis egg, featuring an asymmetrically curved geometry. At each panel's corner, a maximum of four pieces overlap, which allows for an assembly with only one type

Bei der 3D-Rasterstruktur für das *Prostho Museum Research Center* wurden *Shibo*-Kreuzverbindungen verwendet, bei denen die Stäbe aus vier verschiedenen Richtungen an den Verbindungsstellen zusammenkommen.

In unserem Studio setzen wir unsere Forschungen zu komplexen Holzstrukturen im Rahmen des folgenden konzeptionellen Entwurfs fort.

Für die Innenraumgestaltung des *Alberni Residential Tower* (Abb. 7) entwickelten wir eine Holzkonstruktion aus vertikalen, in einer wellenförmigen Grundfläche angeordnet Hölzern. An den vertikalen Säulen sind gekippte Hölzer angebracht, die ein dynamisches Erscheinungsbild erzeugen, das sich je nach Perspektive des Betrachters verändert.

Für diese Konfiguration konnten wir eine ineinander greifende Verbindung entwickeln, die es ermöglicht, die Elemente in fast jedem Winkel zu kreuzen.

In naher Zukunft ist eine Weiterentwicklung der CNC-Technologie denkbar, die eine zusätzliche manuelle Nachbearbeitung überflüssig macht und damit die Palette der möglichen Designlösungen erweitert.

Der von mir geleitete Workshop an der Universität für angewandte Kunst Wien bot den Studierenden die Möglichkeit, diese Entwurfsmethode in der Praxis zu erleben. Die Studierenden entwickelten einen Entwurf für eine räumliche Konfiguration ineinander greifender Holzprofile sowie ausgeprägter Verbindungsdetails. Sie realisierten im Workshop ein Modell der Konstruktion mit handgeschnittenen Verbindungselementen. Nach zwei Monaten der weiteren Verfeinerung und Optimierung in einem digitalen Modell wurde eine maßstabsgerechte Installation aus CNC-geschnittenen Elementen montiert (Abb. 8).

In einer Weiterentwicklung der ineinander greifenden Details konnte die gleiche Technik auch zur Realisierung von Strukturen aus Hartholz angewendet werden. Diese Strukturen ließen sich bei gleicher baulicher Leistung aus noch schlankeren Elementen zusammensetzen, sodass die Konfigurationen noch leichter und transparenter erscheinen.

PARAMETRISCHES DESIGN

Die Hülle des *Treehouse Setagaya* (Abb. 9) besteht aus ineinander greifenden Holzpaneelen, die gleichzeitig als tragendes Gehäuse und als Hülle fungieren.

Die Form mit der asymmetrisch gekrümmten Geometrie ähnelt dem Ei einer Gottesanbeterin. An den Ecken eines jeden Paneels überlappen sich maximal vier Teile, was eine Montage mit nur einer Art von Verbindungselement ermöglicht. Aufgrund der unregelmäßigen Krümmung ist jedoch jedes



▲▲► Fig. 7 | Abb. 7:
Model of interlocking joints used for *Alberni Residential Tower*.



► Fig. 8 | Abb. 8:
The *IS-I* installation in
Stübing, Austria, 2019.

of joint. However, due to the irregular curvature, each one of the 388 members is different. To be able to cope with this complexity, the overall form, as well as the geometry of each panel, was generated as a digital parametric model. Before the full-scale realization, the design was tested in the form of a 3D-printed model (Fig. 9).

In the final materialization, the connection details are a combination of mortise and tenon joints and trapezoid grooves, which are called 'ant head joints' in Japanese. These can be fabricated with high precision using a 5-axis CNC machine, but the preparation and machining process takes a lot of time. For this project, we instead chose to cut simplified orthogonal grooves first, using a 3-axis CNC machine, before having carpenters carve the trapezoid details manually.

Throughout this project, I learned that there could be a way to implement the carpenters' skills within the development of digital fabrication processes. Even though building components might be fabricated by fully automatized, computer-controlled processes, close collaborations with experienced carpenters could decisively contribute to the development of effective and novel solutions for fabrication that address the specific challenges of a project. Carpenters will not be replaced by machines, but instead could become integral members of the whole design-to-fabrication process. Such collaborative workflows could offer the flexibility to address conditions on an individual basis (bypassing complicated universal solutions), allowing for the production of diverse and complex architectural materializations of 'naturalness'.

der 388 Teile anders. Um diese Komplexität bewältigen zu können, wurden sowohl die Gesamtform als auch die Geometrie jedes einzelnen Paneels als digitales parametrisches Modell generiert. Vor der maßstabsgetreuen Umsetzung wurde das Design in Form eines 3D-Druckmodells getestet (Abb. 9).

In der endgültigen Umsetzung bilden die Verbindungs-elemente eine Kombination aus Zapfenverbindungen und trapezförmigen Nuten, die auf Japanisch 'Ameisenkopfverbindungen' genannt werden. Diese können mit einer 5-Achsen-CNC-Maschine mit hoher Präzision hergestellt werden, wobei aber die Vorbereitung und der Bearbeitungsprozess sehr zeitaufwendig sind. Für dieses Projekt haben wir uns daher entschieden, zuerst vereinfachte orthogonale Nuten mit einer 3-Achsen-CNC-Maschine zu fräsen, bevor die Zimmerleute die trapezförmigen Details manuell fertigen konnten.

Im Zuge dieses Projekts bin ich zu dem Schluss gelangt, dass es einen Weg geben könnte, die Fähigkeiten der Zimmerleute in die Entwicklung digitaler Fertigungsprozesse zu integrieren. Auch wenn Bauelemente vollautomatisiert und computergesteuert hergestellt werden können, könnte eine enge Zusammenarbeit mit erfahrenen Handwerkern entscheidend zur Entwicklung effizienter und neuartiger Lösungen für die Fertigung beitragen, die den spezifischen Herausforderungen eines Projekts gerecht werden. Die Handwerker werden nicht durch Maschinen ersetzt, sondern könnten zu einem wesentlichen Bestandteil des gesamten Design-to-Fabrication-Prozesses werden. Kollaborative Arbeitsabläufe dieser Art könnten die Flexibilität bieten, auf individuelle Bedingungen einzugehen (unter Umgehung komplizierter Universalösungen) und die Produktion vielfältiger und komplexer architektonischer Manifestationen von 'Natürlichkeit' zu ermöglichen.

1 ^{en}There are hundreds of untranslatable words in the Japanese language, especially in regard to an appreciation of nature and finding beauty in simplicity. These do not have an English counterpart and most of the time can only be paraphrased.

^{de} In der japanischen Sprache gibt es eine Vielzahl unübersetzbarer Begriffen, vor allem in Bezug auf die Wertschätzung der Natur und die Wahrnehmung von Schönheit in der Einfachheit. Diese haben kein englisches bzw. deutsches Pendant und können meist nur umschrieben werden.

2 *sazanami*: ^{en}light diffractions and sounds caused by ripples or wavelets on water,
^{de} Lichteffekte und Geräusche, die durch kleine Wellen und das Kräuseln von Wasser entstehen.

3 *kawaakari*: ^{en}light reflecting off a river in darkness,
^{de} Licht, das von einem Fluss in der Dunkelheit reflektiert wird.

4 *banafubuki*: ^{en}“flower petal storm” (usually used to describe how cherry blossom petals float down en masse, like snowflakes in a blizzard),
^{de} „Sturm von Blütenblättern“ (üblicherweise wird damit das Herabschweben der Blütenblätter der Kirschblüte in großer Zahl, ähnlich den Schneeflocken in einem Schneesturm, beschrieben).

5 *kobo*: ^{ko}: ^{en} ray, light, ^{de} Licht | *bo*: ^{en} pampas grass, ^{de} Pampasgras.

6 *Jigoku*: ^{en} hellish, which indicates difficulty in releasing, ^{de} höllisch, was auf Schwierigkeiten beim Lösen der Verbindung hinweist.

7 *Chidori*: ^{en} alternate up/down or right/left, ^{de} alternierend auf/ab oder rechts/links.



◀◀▼ Fig. 9 | Abb. 9:
Treehouse Setagaya:
Model and actual construction.



JOINTS

VERBINDUNGEN

SIMPLE LAP JOINTS

In traditional timber construction, the principle of joinery emerges as a mutual relationship between material, craft and result.¹ For the attentive observer, wooden joints reveal the thoughtful consideration of the person who has built them within a given scope.² Craftspeople think less in terms of fixed joint categories, and more in terms of modifying joints intuitively and based on their acquired knowledge, according to the concrete local conditions. ↗⁰⁵

On the other hand, they also try to simplify work processes in an intelligent way in order to reduce the required amount of physical exertion. This leads to simplification and a narrowed variety of joint types. With the rise of industrialization, this paradigm of efficiency through standardization was extensively further developed.

Today, through computer-aided design and cutting-edge manufacturing processes, non-standard joinery can be considered and applied to complex geometrical configurations in timber construction. This direction offers the potential of re-activating crafting as a practice of intuitive design and manufacturing that can produce diverse and differentiated results effectively with the help of digital techniques.

In this project, the principle of half lap joints as the simplest type of interlocking joints was chosen as a starting point, thus allowing the design process to focus on developing spatial complexity rather than complex geometry in the details (Fig. 1). Usually, a half lap joint is used to connect two members. Due to its simple form, it is a loose and flexible joint that requires additional measures in order for it to be fixed and stabilized. But this simple joint type allows for a large range of variation and geometric freedom in terms of the aggregation of parts (Figs. 2a+b). In the development process of the experimental designs over the course of this project, the individual instances of these joints were designed over constant feedback with the simultaneous development of the overall aggregation of components, resulting in a several variations of the standard type (Figs. 3a+b).

EINFACHE ÜBERBLATTUNGEN

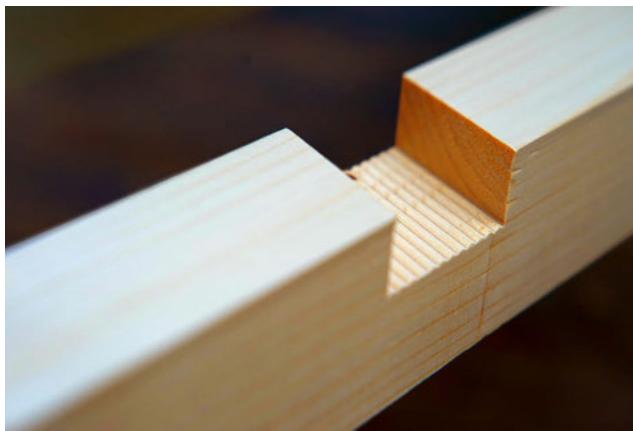
Im traditionellen Holzbau zeigt sich das Prinzip von Holzverbindungen als eine wechselseitige Beziehung zwischen Material, Handwerk und Ergebnis.¹ Für den aufmerksamen Betrachter verraten diese Details die durchdachte Überlegung derjenigen, die sie in einem gegebenen Gestaltungsspielraum gebaut haben.² Handwerksleute denken weniger in festen Kategorien von Holzverbindungen, sondern modifizieren diese intuitiv und basierend auf erlerntem Wissen, entsprechend den konkreten Gegebenheiten vor Ort. ↗⁰⁵

Andererseits versuchen Handwerksleute auch, Arbeitsabläufe auf intelligente Weise zu vereinfachen, um den erforderlichen (körperlichen) Aufwand zu reduzieren. Dies führt zu einer Vereinfachung und einer reduzierten Anzahl von Verbindungsarten. Mit dem Aufkommen der Industrialisierung wurde dieses Paradigma der Effizienz durch Standardisierung intensiv weiter vorangetrieben.

Heute allerdings können durch computergestütztes Design und modernste Fertigungsverfahren auch nicht-standardisierte Holzverbindungen relativ effizient und präzise umgesetzt und auf komplexe geometrische Konfigurationen im Holzbau angewendet werden. Diese Entwicklung hat das Potenzial, Handwerk als eine Praxis des intuitiven Entwerfens und Herstellens zu reaktivieren, die mit Hilfe digitaler Techniken vielfältige und differenzierte Ergebnisse hervorbringen kann.

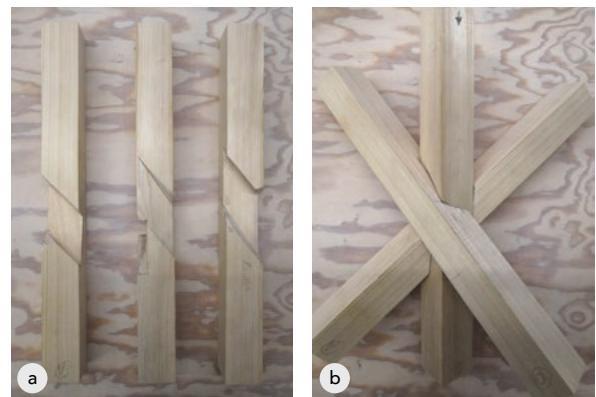
In diesem Projekt wurde das Prinzip der einfachen Überblattung als einfachste Art der Verbindung als Ausgangspunkt gewählt, um im Entwurfsprozess den Schwerpunkt auf die Entwicklung räumlicher Komplexität statt auf die komplexe Geometrie im Detail zu legen (Abb. 1). Üblicherweise wird eine Überblattung zum Verbinden zweier Stäbe verwendet. Aufgrund ihrer einfachen Form handelt es sich um eine lose und flexible Verbindung, die zusätzliche Maßnahmen erfordert, um fixiert und stabilisiert zu werden. Diese einfache Verbindungsart ermöglicht jedoch eine große Bandbreite an Variationen und geometrischen Freiheiten in Bezug auf die räumliche Anordnung von Bauteilen (Abb. 2a+b). Im Entwicklungsprozess der experimentellen Konstruktionen in diesem Projekt wurden die einzelnen Instanzen der Verbindungen in ständiger Rückkopplung mit der gleichzeitigen Entwicklung der Gesamtanordnung von Bauteilen entworfen, was zu einer Vielzahl von Variationen des Standardtyps führte (Abb. 3a+b).

↗⁰⁵ see Zwerger, K.: *Handicraft and Technology*, p. 40 ff.



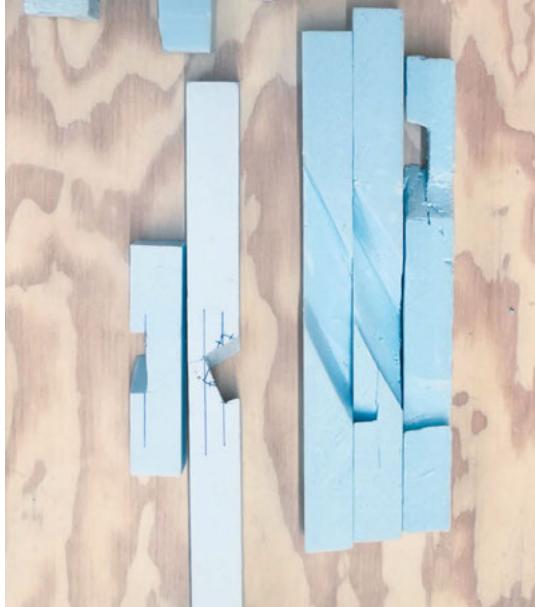
◀ Fig. 1 | Abb. 1:
Half lap joint detail in a spruce beam.
Photo © Leonard Kern

▼ Figs. 2a+b | Abb. 2a+b:
Sample of a structural knot with three parts connected
via half lap joints. The varying orientations of parts affect
modifications of the standard form at the joint.
a) Disassembled. b) Assembled.



◀ Fig. 3a | Abb. 3a:
Details of model elements from hard foam that were used to develop a
joining system over the course of the student workshop with Jun Sato at
the Angewandte 2018.

▼ Fig. 3b | Abb. 3b:
Example of a joint for connecting three members.
Image from the CNC production for the *IS-2* installation at AIL, 2019.



SPATIAL JOINT STRUCTURE

For the realization of *IS-1*, additional measures for locking and fixing connections were not solved by local measures, but rather essentially achieved by spatial interlocking of the members and by global organizational principles. Therefore, the principle of interlocking was active in both the scale of the details and the reciprocal assembly of many members (Fig. 4). As a result, the mutual relationship between detail and spatial configuration produced a system in which the architectural definition of spaces is deeply and inseparably intertwined with structural logic.

For spatial stabilization, some members acted as diagonals to brace the system in multiple directions, while others were oriented relatively vertically to allow for sufficient transmission of loads (dead-weight) (Fig. 5). The notch orientation of the simple lap joints were organized superordinately and alternately facing up- and downwards across the structure. This provided a spatial fixation of the members on one hand and made it possible to build up the structure step by step from the bottom to the top on the other, thereby loosely following the principle of stacking (Fig. 6). Furthermore, some joints were locally locked by additional members connected at the same location. At those locations, two members were fixed by an overlapping third member which was notched in a specific shape to lock the other two members in place (Figs. 7a+b). The joints were designed to retain a sufficient residual cross-section of at least 35% so that the beam could still act as a load-bearing element despite the weakening. The interlocking of three or more members at key locations made the overall structure more stable and stiff. With only a few constraints in the joint geometry, the necessary modifications of this basic type that could accommodate an overall spatial complexity as well as a simple assembly mechanism were possible (Figs. 8a-c). In comparison, more complex joint geometries that perform multi-directionally and feature sophisticated connection mechanisms would require a strict order (e.g. an orthogonal grid) and a more rigid spatial system. ↗⁰⁶

RÄUMLICHE VERHAKUNG

Für die Realisierung von *IS-1* wurden diese zusätzlichen Maßnahmen zur Verriegelung und Fixierung von Verbindungen wurden nicht durch lokale Maßnahmen gelöst, sondern im Wesentlichen durch eine räumliche Verschränkung der Stäbe und durch globale Organisationsprinzipien erreicht (Abb. 4). Somit war das Prinzip der Verzahnung sowohl im Maßstab der Details als auch in der reziproken Anordnung vieler Bauteile aktiv. So entstand durch die wechselseitige Beziehung von Detail und Raumkonfiguration ein System, in dem die architektonische Definition von Räumen eng und untrennbar mit der strukturellen Logik verwoben ist.

Für die räumliche Stabilisierung fungierten einige der Stäbe als Diagonalen, um das System in mehrere Richtungen auszusteifen, andere waren relativ vertikal ausgerichtet, um die Gravitationskräfte ausreichend abzutragen (Abb. 5). Darüber hinaus war die Ausrichtung der Ausklinkungen, die die Verbindungen bildeten, übergeordnet so organisiert, dass sie sich in der Struktur abwechselten. Dies sorgte einerseits für eine räumliche Fixierung der Stäbe und ermöglichte andererseits, die Struktur schrittweise von unten nach oben, frei nach dem Prinzip der Stapelung, aufzubauen (Abb. 6). Darüber hinaus wurden einige Verbindungen durch zusätzliche, an der gleichen Stelle angeschlossene Stäbe lokal verriegelt. An diesen Stellen wurden zwei Stäbe durch einen überlappenden dritten Stab fixiert (Abb. 7a+b). Dieses dritte Element wurde in einer bestimmten Form ausgeklinkt, um die beiden verbundenen Teile zu arretieren. Die Verbindungen wurden so ausgelegt, dass ein ausreichender Restquerschnitt von mindestens 35 Prozent erhalten blieb, sodass der Stab trotz der Schwächung immer noch als tragendes Element fungieren konnte. Die Verzahnung von drei oder mehr Teilen an bestimmten Schlüsselstellen machte die Gesamtstruktur noch stabiler und steifer. Mit nur wenigen Einschränkungen in der Verbindungsgeometrie waren die notwendigen Modifikationen des Grundtypus möglich, die sowohl eine räumliche Gesamtkomplexität als auch einen einfachen Montagemechanismus ermöglichten (Abb. 8a-c). Im Vergleich dazu würden komplexere Verbindungsgeometrien, die multidirektional funktionieren und ausgeklügelte Befestigungsmechanismen aufweisen, eine strenge Ordnung (z. B. ein orthogonales Gitter) und ein starres räumliches System erfordern. ↗⁰⁶

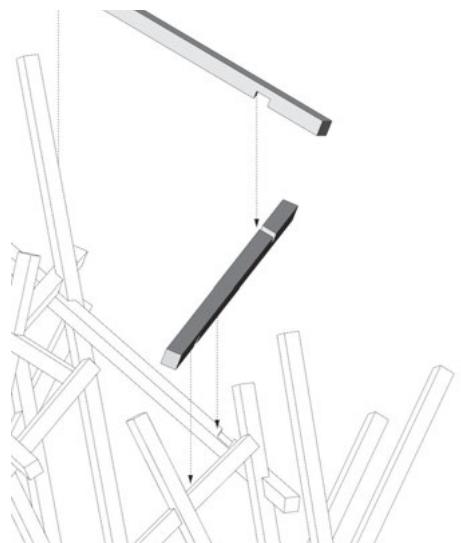
↗⁰⁶ see Zwerger, K.: *Handicraft and Technology* : Fig. 8, p. 47



► Fig. 4 | Abb. 4:
Detail view of spatially interlocking
members as part of the *IS-1* installation
at Stübing, Austria, 2019.
Photo © Leonard Kern



◀ Fig. 5 | Abb. 5:
Structural members of the *IS-1* installation are
spatially organized to form a braced construction.
Stübing, Austria, 2019.
Photo © Antonella Amesberger



▲ Fig. 6 | Abb. 6:
Diagram of a part of the build-up sequence for *IS-1*.
Most beams have notches facing in different directions.
The downward-facing notches are used to connect a
beam to the already assembled structure, the upward-
facing notches to receive the next beam instance.

PLUG-IN KIT

In traditional Japanese architecture, the technique for joining wooden structural members became highly advanced through two principle methods: *Tsugite*, the technique of extending timber members with coupling or connecting joints, and *Shikuchi*, the interlocking of timbers at right angles.³ This project focused on the *Shikuchi* concept, using joint details to connect members meeting at different angles (in contrast to the *Branch Formations* project, which uses the *Tsugite* type exclusively). A consideration of the build-up sequence was crucial for the design development process, mainly influencing the orientation of the notched joints.

This joint system was mainly investigated through the two different structural prototypes, *IS-1* and *IS-2*.

IS-1 was designed to consist of intertwined and locked connections between many nodes (global interlocking), composed of a set of unique members (Fig. 9) and appearing as an irregular formation. Yet this irregularity required a rigorous order in the build-up sequence (Figs. 10a+b). Prior to realization, this sequence was developed and simulated in a digital model of the entire structural prototype.

IS-2 employed a more modular approach. ↗⁰⁷

The planning of *IS-2* was focused on the development of a structural system that could form infinite configurations rather than being concerned with the design of an unchangeable construction as in *IS-1*. Thus, a kit of parts that can easily be plugged together was created, consisting of 10 different shapes of beams that can be connected to form three types of spatial modules, which in turn can be combined in different ways (Figs. 11a+b).

STECKBAUSATZ

In der traditionellen japanischen Architektur wurde die Technik zum Verbinden von Holzbauteilen durch zwei prinzipielle Methoden hoch entwickelt: *Tsugite*, die Technik der Verlängerung von Holzbauteilen mit Kupplungs- oder Verbindungsstellen, und *Shikuchi*, die Verzahnung von Holz im rechten Winkel mit Winkelverbindungen.³ In unserem Fall wurden die Verbindungen so gestaltet, dass sie zu Knotenpunkten für die Richtungsänderung von Bauachsen wurden. Eine Berücksichtigung der Aufbaufolge war für den Entwurfsentwicklungsprozess entscheidend, was hauptsächlich die Ausrichtung der ausgeklinkten Verbindungen beeinflusste.

Dieses Verbindungssystem wurde hauptsächlich anhand der zwei verschiedenen strukturellen Prototypen, *IS-1* und *IS-2*, untersucht.

IS-1 war so konzipiert, dass es aus miteinander verschränkten und verriegelten Verbindungen zwischen vielen Knotenpunkten bestand (globales Ineinandergreifen). Die Struktur bestand aus einer Reihe von einzigartigen Bauteilen (Abb. 9) und bildete eine unregelmäßige Formation. Diese Unregelmäßigkeit erforderte jedoch eine strenge Ordnung in der Aufbausequenz (Abb. 10a+b). Vor der Realisierung wurde diese Abfolge in einem digitalen Modell des gesamten Strukturprototyps mit 45 Stäben entwickelt und simuliert.

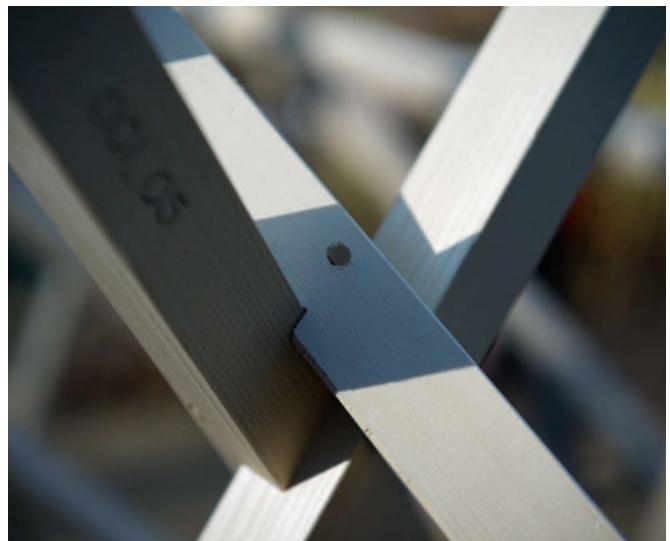
IS-2 verfolgte einen stärker modularen Ansatz. ↗⁰⁷

Die Planung von *IS-2* befasste sich mit der Entwicklung eines Struktursystems, das theoretisch in unendlichen Konfigurationen realisiert werden kann, statt mit dem Entwurf einer unveränderlichen Konstruktion wie noch bei *IS-1*. So entstand ein Bausatz aus einfach zusammensteckbaren Teilen, bestehend aus zehn unterschiedlichen Formen von Stäben, die zu drei Arten von räumlichen Modulen verbunden werden können, die ihrerseits unterschiedlich kombiniert werden können (Abb. 11a+b).

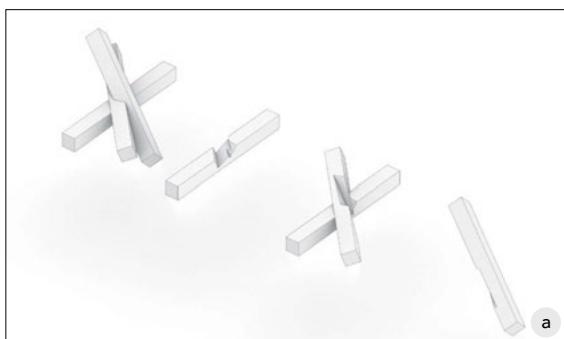
↗⁰⁷ see *Interlocking Spaces : Geometry : Modules and Complexity*, p. 122 f.



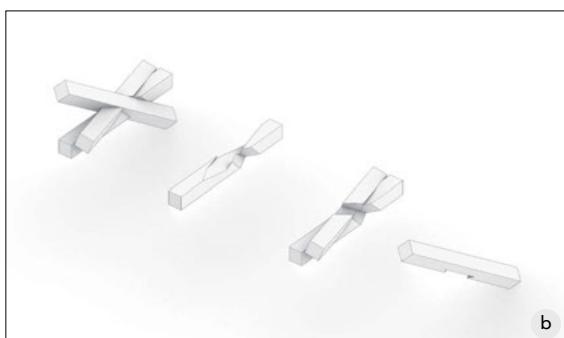
▲ Fig. 7a | Abb. 7a:
Locking of two vertical criss-crossing members by a third horizontal part inserted from above.



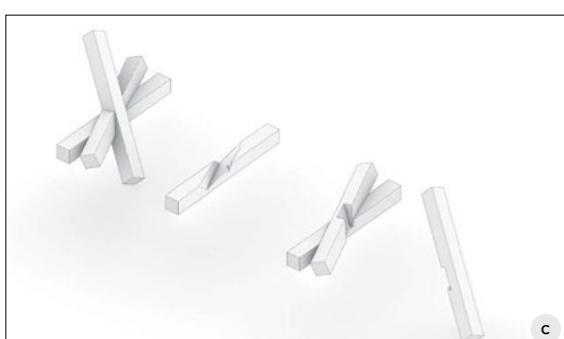
▲ Fig. 7b | Abb. 7b:
The pure interlocking system had its limits: At critical joints, wooden nails were additionally inserted crosswise to secure members from detaching.

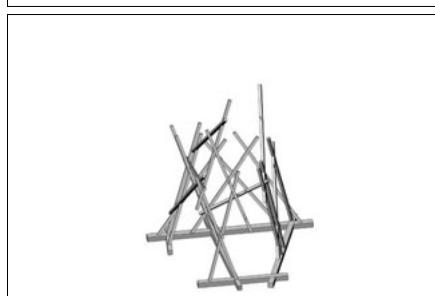
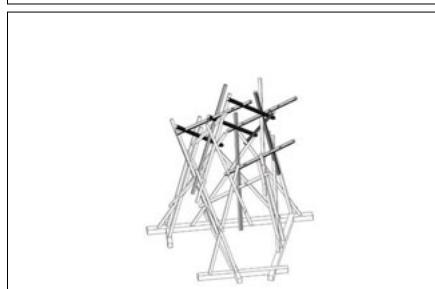
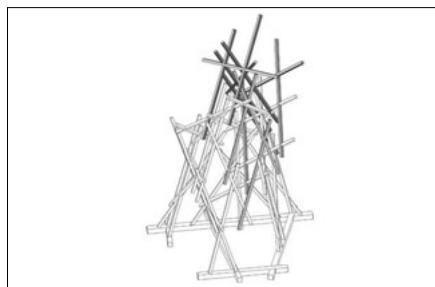
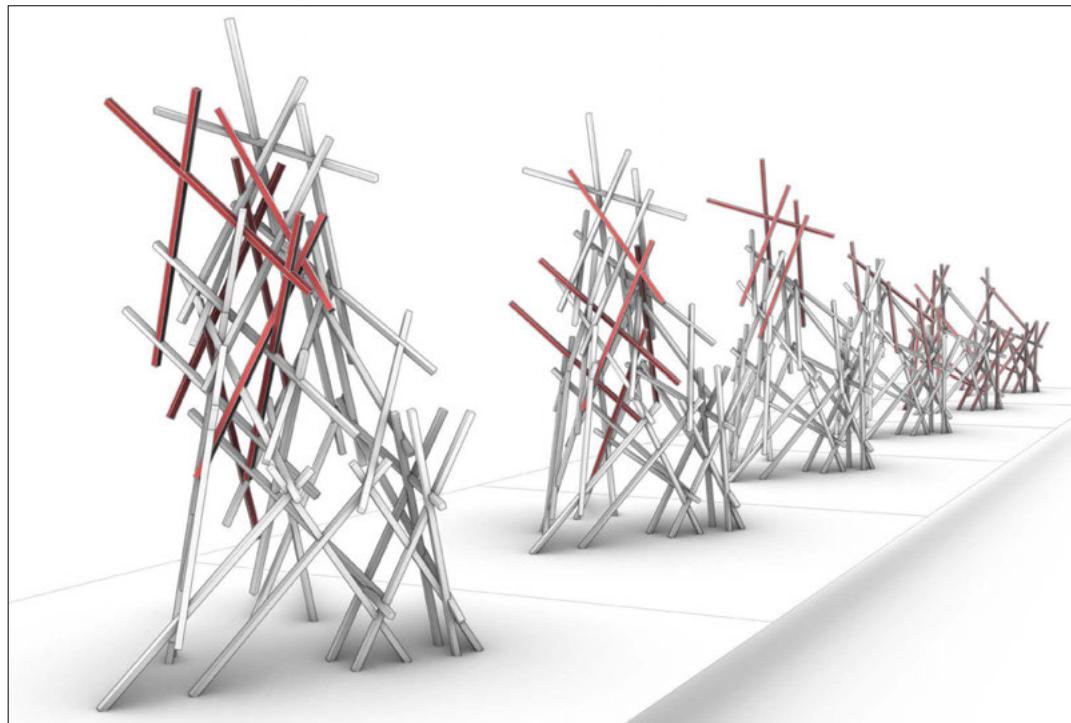


◀ Figs. 8a–c | Abb. 8a–c:
Variations of a triple-joint with elements connected at different angles.



▼ Fig. 9 | Abb. 9:
Sorting the collection of unique parts of IS-1 at the workshop of the Vocational School Murau, Austria, 2019.





◀ ▲ Fig. 10a | Abb. 10a:
Diagrams of the build-up sequence of
IS-1, which consisted of 45 beams.



► Fig. 10b | Abb. 10b:
Three stages of the first-time assembly
of *IS-1* with the help of carpenter
trainees from the Vocational School
Murau at the open-air museum
Stübing, Austria, 2019.

DETACHABLE CONNECTIONS

Unlike in traditional architecture that is based on the use of stone as a primary material, which requires a concentration of various procuring and processing abilities of artisans in a limited number of places, in a wood-based culture, artisans equipped with designing and constructing skills are spread out across the country and can start working anywhere.⁴ In forest-rich regions, this could even take place in the woods themselves. However, carpenters usually prefabricate their structures in their workshops and then take them to the building site. This practice led to the development of demountable and refined wooden joints in artful structures. The knowledge and experience made carpenters unique and distinguished them from other craftspeople who build *in situ*. ↗⁰⁸ Reflecting this culture, the prototypes developed in this project were designed as dismountable and mobile structures (Fig. 12).

After the realization of *IS-1*, the *Kigumi* system was further investigated in a case study of a table in order to test a modular approach, a concrete use case, and the implementation of surfaces. Over the course of the *Kigumi* table design studies, a technique was developed that considers the tabletop not only as a usable interface, but also as an essential interlocking component, thus an integral part of the structural system. To stabilize the substructure framework of beams, a precisely CNC-milled plywood panel with specific cutouts was plugged onto the tips of the criss-crossing beams, locking them into position (Figs. 13a–c). Later on, this concept was integrated into the design of *IS-2*, in which the surfaces indicated possibilities of use and inhabitation on a more general and abstract level. ↗⁰⁹

LÖSBARE VERBINDUNGEN

Anders als in der traditionellen Architektur, die auf der Verwendung von Stein als primärem Material basiert, was eine Konzentration verschiedener Beschaffungs- und Verarbeitungsfähigkeiten von Handwerksleuten an einer begrenzten Anzahl von Orten erfordert, sind in einer holzbasierten Kultur Handwerksleute, die mit Design- und Konstruktionsfähigkeiten ausgestattet sind, über das ganze Land verteilt und könnten überall ihre Arbeit aufnehmen.⁴ In waldreichen Regionen könnte dies sogar in den Wäldern selbst geschehen. Allerdings fertigen die Zimmerleute ihre Konstruktionen in der Regel in ihren Werkstätten vor und bringen sie dann mit auf die Baustelle. Diese Praxis führte zur Entwicklung von zerlegbaren und raffinierten Verbindungen in kunstvollen Holzkonstruktionen. Das Wissen und die Erfahrung machten die Zimmerleute einzigartig und unterschieden sie von anderen Handwerkern, die *in situ* bauen. ↗⁰⁸ Diese Kultur widerspiegeln, sind die in diesem Projekt entwickelten Prototypen als zerlegbare und mobile Strukturen konzipiert (Abb. 12).

Nach der Realisierung von *IS-1* wurde das *Kigumi*-System in einer Fallstudie eines Tisches weiter untersucht, um einen modularen Ansatz, eine konkrete Nutzbarkeit und die Implementierung von flächigen Bauteilen zu testen. In der Folge der *Kigumi*-Tisch-Design-Studien wurde eine Technik entwickelt, in der die Tischplatte nicht nur als benutzbare Fläche, sondern auch als wesentlicher Bestandteil des strukturellen Systems betrachtet wird. Zur Stabilisierung einer Unterkonstruktion aus Stäben wurde eine präzise CNC-gefräste Sperrholzplatte mit speziellen Ausschnitten auf die Spitzen der sich kreuzenden Stäbe aufgesteckt, um diese zu fixieren (Abb. 13a–c). Später wurde dieses Konzept in den Entwurf von *IS-2* integriert, in dem diese Flächen auf einer allgemeineren und abstrakteren Ebene Nutzungen und Möglichkeiten einer Aneignung andeuten. ↗⁰⁹

↗⁰⁸ see Felderer, B.: *Handicraft as an Attitude towards the World*, p. 48 ff.

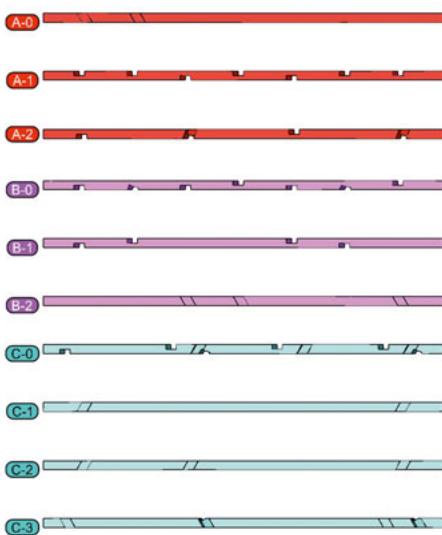
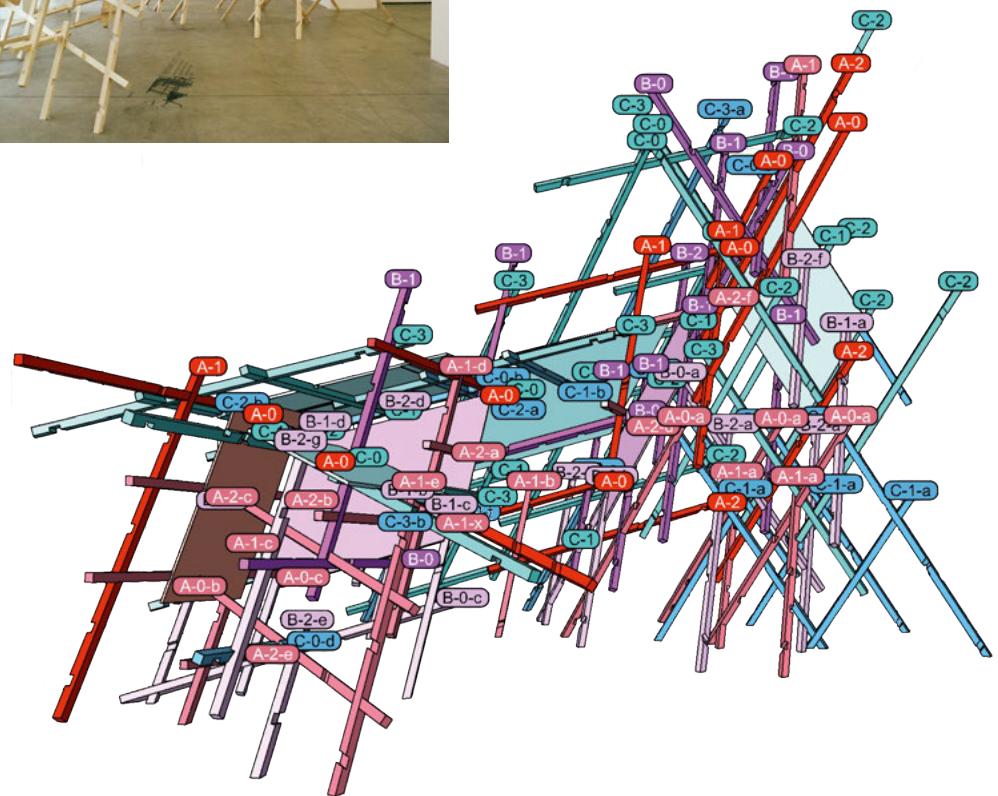
↗⁰⁹ see *Interlocking Spaces : Geometry : Speculation*, p. 126 f.



◀ Fig. 11a | Abb. 11a:

From a possibly infinite structure, a subsection with 105 beams was realized and presented at the Angewandte Innovation Laboratory (AIL) during the *Conceptual Joining* show, Vienna, 2019.

Photo © Zara Pfeifer



◀ ▲ Fig. 11b | Abb. 11b:

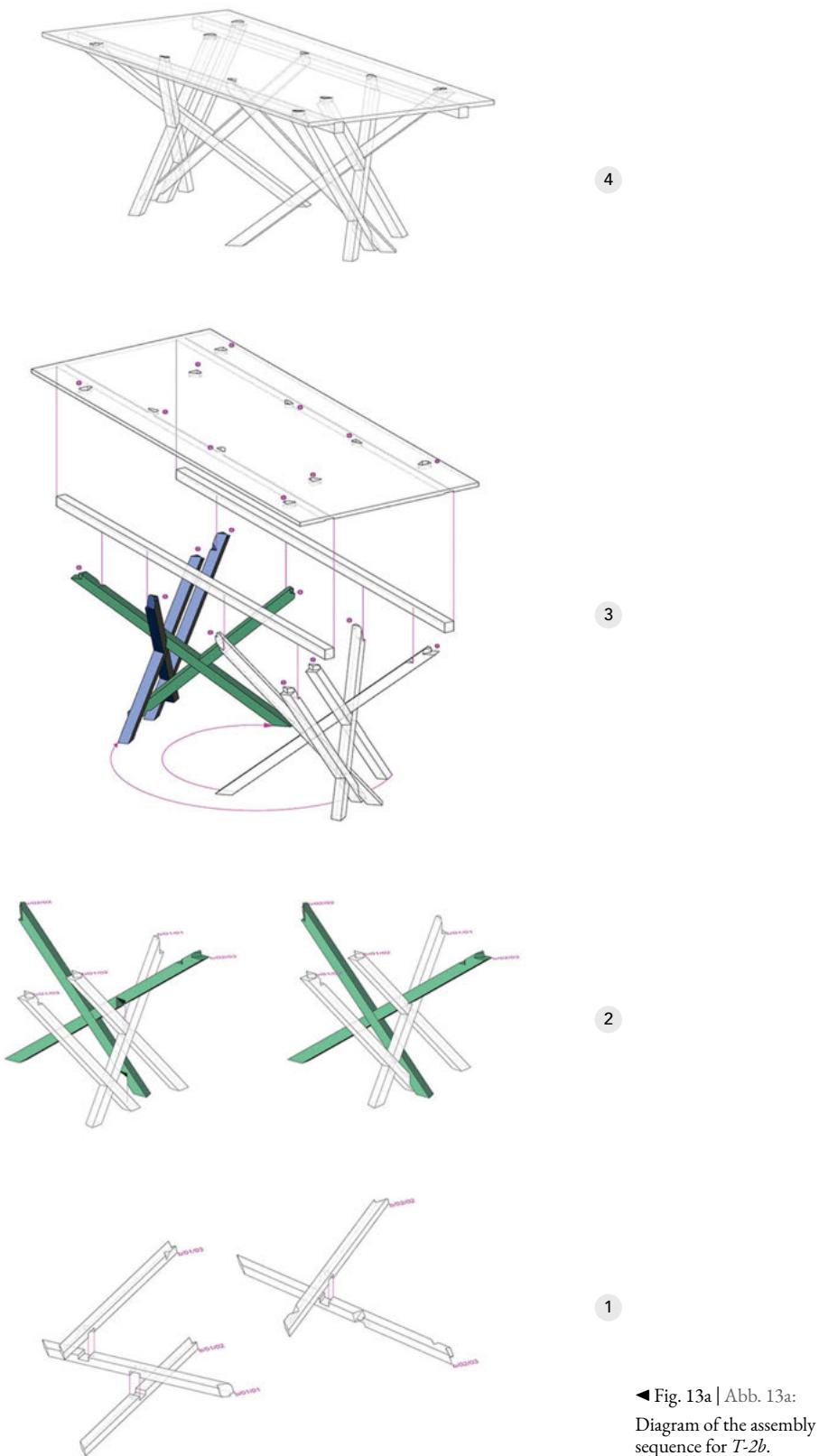
Digital model of IS-2 with the 10 types of beams highlighted in different colors.



► Fig. 12 | Abb. 12:

All parts of IS-1 (including the base structure for build-up) and the first proto-table T-1 stacked onto a wooden pallet for transportation from Stübing to Vienna, 2019.

[2.1] INTERLOCKING SPACES : JOINTS



◀ Fig. 13a | Abb. 13a:
Diagram of the assembly
sequence for *T-2b*.



▲ Fig. 13b | Abb. 13b:

T-2b consists of a modification of the beam configuration developed in *T-1*, the tips of the beams slot into holes in the plywood tabletop to stabilize the system without additional fasteners.



▲ Fig. 13c | Abb. 13c:

Detail of the interlocking of beams and tabletop.

OPEN JOINTS

In a structural system with wooden interlocking members, notches also constitute a local weakening of the cross sections. In the first structural prototype *IS-1*, this disadvantage was compensated for by introducing an optimization methodology that allowed the depth of notches to vary locally, resulting in local eccentricities (Fig. 14).

Structural analysis informed a refined configuration of lap joints to adjust the local profile overlap in order to minimize weakening of cross sections in joints with higher bending moments. ↗¹⁰

Through this approach, it was possible to retain 70% of the cross section on beams positioned in lower areas that received more loads (Fig. 15a). Towards the top, this ratio decreased to the 50% standard for half lap joints (Fig. 15b).

With *IS-2*, the focus was on implementing modularity. The modular principle allowed the structure to be extended in multiple ways by adding modules, or to be modified by recombining modules. The consideration of a set of possible configurations was implemented into the design of modules composed of members that featured a redundancy of joints. In a set configuration, some of the joints were unused and left exposed to possibly be activated in the event of a reconfiguration or extension. These open and unused joints refer to a possible systematic changeability and represent a functional ornament, visualizing an underlying architectural logic that is based on the nature of joinery (Fig. 16). ↗¹¹

OFFENE VERBINDUNGEN

In einem Struktursystem mit ineinander greifenden Holzstäben stellen Ausklinkungen für die Verbindungen auch eine lokale Schwächung der Querschnitte dar. Beim ersten strukturellen Prototyp *IS-1* wurde dieser Nachteil durch die Einführung einer Optimierungsmethodik kompensiert, die es erlaubte, die Tiefe der Ausklinkungen zu variieren, was zu lokalen Exzentrizitäten führte (Abb. 14).

Eine Analyse des Tragverhaltens im digitalen Modell diente als Grundlage für eine Verfeinerung der Verbindungsdetails, um die lokale Überblattung jeweils so anzupassen, dass die Schwächung der Querschnitte in Verbindungen mit höheren Biegemomenten minimiert wird. ↗¹⁰

Durch diesen Ansatz konnten 70 Prozent des Querschnitts bei Stäben in den unteren Bereichen beibehalten werden, die stärker belastet wurden (Abb. 15a). Nach oben hin verringerte sich dieses Verhältnis auf die für Überblattungsverbindungen üblichen 50 Prozent (Abb. 15b).

Bei *IS-2* lag der Fokus auf der Entwicklung eines modularen Systems. Das Modulprinzip erlaubte es, Strukturen durch Hinzufügen von Modulen auf vielfältige Weise zu erweitern oder durch Neukombination von Modulen zu verändern. Die Berücksichtigung einer Reihe von möglichen Konfigurationen wurde in der Gestaltung der Module aus Stäben integriert, was zu einer Redundanz an Verbindungen führte. In einer bestimmten Konfiguration blieben einige der Verbindungen unbenutzt und offen, um im Falle einer Neukonfiguration oder Erweiterung der Struktur möglicherweise aktiviert zu werden. Diese offenen und unbenutzten Verbindungen verweisen auf eine Veränderbarkeit des Systems und stellen ein funktionales Ornament dar, das eine zugrunde liegende architektonische Logik visualisiert, die auf dem Wesen von Holzverbindungen beruht (Abb. 16). ↗¹¹

1 Zwerger, K. (2012): "Functions of wooden joints", in: *Wood and Wood Joints – Building Traditions in Europe, Japan and China*, Basel: Birkhäuser: 100.

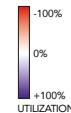
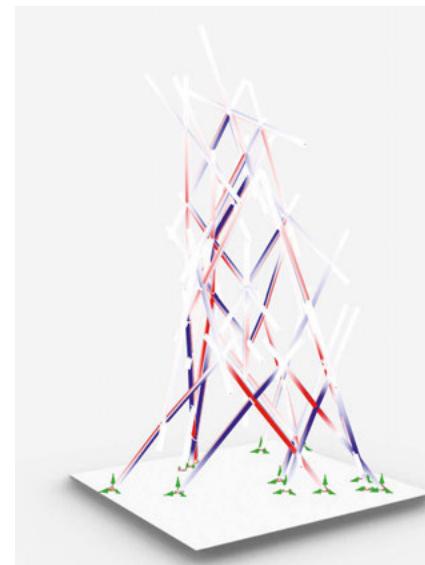
2 *ibid.*

3 Tadanori, S. (2018): "Kigumi", in: *Japan in Architecture – Genealogies of its Transformation*, Mori Art Museum, Tokyo, Japan: 40.

4 "Possibilities of Wood" (2018), in: *Japan in Architecture – Genealogies of its Transformation*, Mori Art Museum, Tokyo, Japan: 37.

↗¹⁰ see *Interlocking Spaces : Tools : Design to Fabrication*, p. 98 f.

↗¹¹ see *Interlocking Spaces : Geometry : Modules and Complexity*, p. 122 f.



◀ Fig. 14 | Abb. 14:

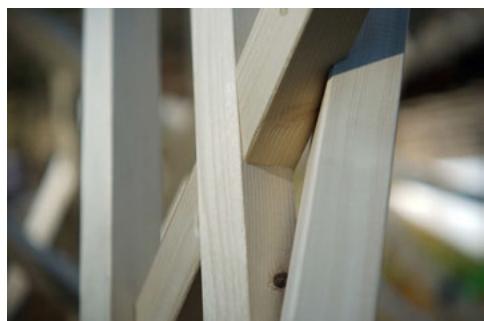
Although the *IS-1* configuration had an unfinished appearance, the structure was in fact optimized as a complete model for the exact amount of 45 beams. Simulation of member utilization in *IS-1* under load with *Karamba3d*.



◀ Fig. 15a | Abb. 15a:

Joint of *IS-1* at the bottom with a partial profile overlap, ~70% of the member cross section remained. (For the installation at Stübing, 2019, supports were secured by steel pipes driven into the earth.)

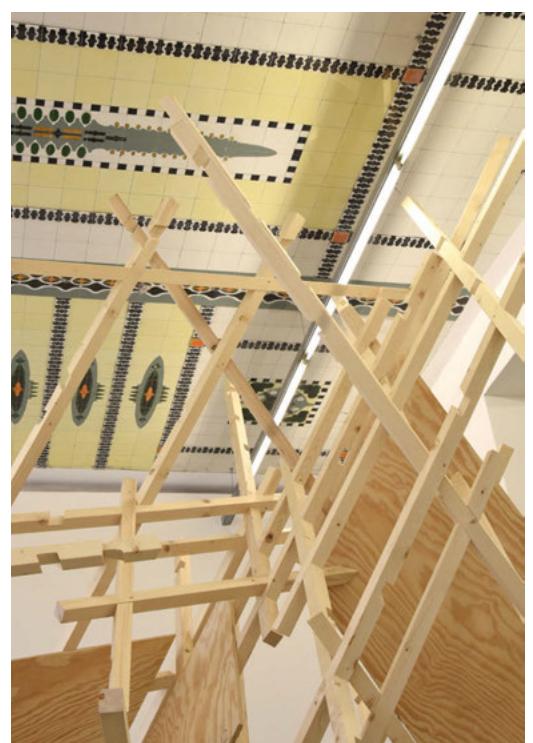
Photo © Leonard Kern



▲ Fig. 15b | Abb. 15b:

Joint of *IS-1* at the top with full profile overlap, 50% of the member cross section remained.

Photo © Leonard Kern



► Fig. 16 | Abb. 16:

Detail view of the *IS-2* installation at AIL, 2019.

Photo © Zara Pfeifer

WOOD CONSTRUCTION – ON THE RENEWAL OF AN ANCIENT ART

HOLZBAU – ZUR ERNEUERUNG EINER ALTEN KUNST

↗ KARIN RAITH // English translation: Mark Wilch

In recent years, wood has been rediscovered as a building material. Its advantages, such as strength, elasticity and natural beauty, have always been appreciated. However, with resources becoming increasingly scarce, wood is becoming ever more valuable as a renewable raw material and in light of climate change, ever more significant as a reservoir for carbon dioxide. To use wood as a CO₂ sink, one must ensure that wooden building components are used for as long as possible. This must be followed by a multi-stage process of down-cycling (cascade use) because the carbon absorbed by wood is released back into the atmosphere through combustion and composting.

The longevity of buildings in a technical, aesthetic and functional sense contributes to climate protection regardless of the building materials involved but is especially effective for wood because of this material's long-term storage of carbon dioxide. Architecture that retains its value is professionally executed and therefore robust and durable. It has lasting appeal because of the quality of its design. Its spatial configuration allows for a multiplicity of interpretations and adaptations to meet changing use requirements. Another method of retaining carbon for as long as possible is the use of modular timber structures that can be easily disassembled and reassembled in other locations or in new arrangements. These systems offer further flexibility, but their reconfiguration calls for construction measures, which, in turn, require the input of energy and resources.

NATURAL FORM

Standard wood products have been used for decades in building construction. The standardization of these wood materials follows primarily an industrial, mechanistic logic from a different era, when the processing of a large number of identical parts guar-

In den letzten Jahren wurde Holz als Baumaterial wiederentdeckt. Seine Vorteile wie Festigkeit, Elastizität und seine natürliche Schönheit wurden schon immer geschätzt, doch mit zunehmender Ressourcenverknappung wird Holz als nachwachsender Rohstoff immer wertvoller und gewinnt aufgrund des Klimawandels auch als Kohlendioxidspeicher an Bedeutung. Um Holz als CO₂-Senke zu nutzen, muss für eine möglichst langfristige Verwendung der hölzernen Bauteile und danach für ein mehrstufiges Downcycling (Kaskadennutzung) gesorgt werden, denn durch Verbrennung („energetische Verwertung“) und Kompostierung wird der vom Holz aufgenommene Kohlenstoff wieder an die Atmosphäre abgegeben.

Das Prinzip der Langlebigkeit von Bauten in technischer, ästhetischer und funktioneller Hinsicht trägt zwar unabhängig von den verwendeten Baustoffen zum Klimaschutz bei, ist im Holzbau aber wegen der langfristigen Kohlenstoffspeicherung im Material besonders wirkungsvoll. Wertbeständige Architektur ist fachgerecht ausgeführt und daher robust und dauerhaft, sie bleibt aufgrund ihrer gestalterischen Qualität langfristig attraktiv, und die räumliche Konfiguration erlaubt vielfältige Interpretationen und Anpassungen an veränderte Nutzungsanforderungen. Eine andere Methode, Kohlenstoff möglichst lang zu binden, ist die Verwendung modularer Holzbauten, die leicht zerlegt und an anderen Orten oder in neuen Anordnungen wieder zusammengefügt werden können. Solche Systeme bieten weitere Flexibilität, erfordern aber für die Rekonfiguration Baumaßnahmen, die selbst wieder Energie und Ressourcen benötigen.

NATÜRLICHE FORM

Seit Jahrzehnten wird mit Standard-Holzprodukten gebaut. Diese Vereinheitlichung der Holzwerkstoffe folgt primär einer industriellen, mechanistischen Logik und stammt aus einer Epoche, in der die Verarbeitung einer großen Anzahl gleicher Teile niedrige Kosten garantierte. Das Holz wird

anted low costs. Wood is robbed of its individuality, standardized and homogenized in order to control its load-bearing behavior more effectively with conventional calculation methods and to use it for serial construction. The paradox here is that this type of standardized material must not only serve repetitive construction tasks such as those assigned to building mass housing but also individualistic architecture – the construction of buildings that are unusual, unique and striking. But might not the opposite tack be more logical? Although classifying and standardizing this living raw material into standard cut boards and panels facilitates modular construction, this approach utilizes only a fraction of wood's potential. Waste wood goes into particle board or paper production, a use that also falls far short of fully tapping this material's capacity. What a richness of forms, structures and textures is lost in the process!

Traditional Japanese wood construction, an art with a long history, reveals another attitude that could give fresh impetus to renewing the (Western) practices common today. Wood is revered in Japanese culture. The respect for this natural material is rooted in Shintō, a religious tradition that views all things in the natural world as inhabited by spirits (*kami*) and therefore also honors trees as living organisms. The rules that have been passed down oblige artisans to use a tree in such a way that it continues to exist for a long time, ideally as an aesthetic object or building component that is appreciated over the course of centuries.¹ To be able to ascertain the suitable function and the appropriate place for any given tree in an architectural structure, its unique qualities must be recognized – its 'personality', as Tsunekazu Nishioka once said. In Japanese carpentry, he was a highly respected master among the *miyadaiku*, the temple and shrine carpenters, and headed up the restoration and reconstruction work on the oldest Buddhist temple complexes in Japan, *Hōryū-ji* and *Yakushi-ji*.²

Respecting the personality of wood meant creating continuity between its natural, living state and its use as part of a building.³ Wood was incorporated into the structure with the same directional orientation it had at the original site where it grew. This practice was applied in particular when trees were converted into vertical structural members, to columns and posts. For instance, a post cut out of the windward side of the tree was placed on the windward side of the building, with the root end at the bottom and

seiner Individualität beraubt, normiert und homogenisiert, um sein Tragverhalten mit den herkömmlichen Berechnungsmethoden besser kontrollieren zu können und um es für serielles Bauen zu nutzen. Paradox ist, dass solcherart standardisiertes Material nicht nur repetitiven Bauaufgaben wie etwa dem Massenwohnungsbau, sondern auch individualistischer Architektur zu dienen hat – der Konstruktion des Außergewöhnlichen, Einzigartigen und Aufsehenerregenden. Doch wäre es umgekehrt nicht sinnvoller? Die Klassifikation und Vereinheitlichung des lebendigen Rohstoffs zu Standard-Schnitt- und -Plattenware erleichtert zwar das modulare Bauen, doch es wird nur ein Bruchteil des Material-Potenzials genutzt und das Restholz unter seiner Leistungsfähigkeit in der Spanplatten- oder Papiererzeugung verwertet⁴. Welcher Reichtum an Formen, Strukturen und Texturen geht dabei verloren!

Der traditionelle japanische Holzbau, eine Kunst mit einer langen Geschichte, offenbart eine andere Haltung, die Impulse zu einer Erneuerung der heute gängigen (westlichen) Praxis geben könnte. Holz genießt in der japanischen Kultur große Wertschätzung. Der Respekt vor dem Naturstoff wurzelt im Shintō, einer religiösen Tradition, die alle Naturscheinungen als beseelt erachtet und daher auch die Bäume als lebendige Organismen ehrt. Die überlieferten Regeln verpflichten Handwerker*innen, einen Baum so zu verwenden, dass er lange fortbesteht, idealerweise als ein ästhetischer Gegenstand oder Bauteil, der über Jahrhunderte geschätzt wird.¹ Damit die passende Funktion und der angemessene Platz des individuellen Baums im architektonischen Gefüge gefunden werden können, müssen seine Eigenarten erkannt werden – seine ‚Persönlichkeit‘, wie das Tsunekazu Nishioka nannte, der von der japanischen Fachwelt hochverehrte Meister der Zunft der Tempelschreiner (*miyadaiku*) und Leiter der Restaurierungs- und Rekonstruktionsarbeiten an den ältesten buddhistischen Tempelanlagen Japans, *Hōryū-ji* und *Yakushi-ji*.²

Die Persönlichkeit des Holzes zu respektieren hieß, eine Kontinuität zwischen seinem natürlichen, lebendigen Zustand und seiner Verwendung als Teil eines Gebäudes zu schaffen.³ Es wurde in der gleichen Lagebeziehung zu den Himmelsrichtungen eingebaut, wie es an seinem ursprünglichen Standort gewachsen war. Das galt insbesondere für die Verarbeitung der Bäume zu vertikalen Bauteilen, zu Säulen und Pfosten. Beispielsweise wurde ein aus der Wetterseite des Baumes geschnittener Pfosten an der Wetterseite des Gebäudes positioniert, das Wurzelende unten, das Kronenende oben.⁴ So konnten die Eigenarten der Mikrostruktur, die in Reaktion auf die Gravitation, die geologischen und klimatischen Bedingungen des Wuchsorts entstanden waren, ihr

the crown end at the top.⁴ This approach unlocked the full potential of the microstructure's unique properties, which came about in response to gravity and to the geological and climatic conditions at the growth site. Different kinds of wood were used in accordance with their typical properties, but anomalies (known as 'timber defects' in the parlance of the traditional construction industry) such as reaction wood, twisted growth, or forked growth were also turned into virtues and used for special purposes. If incorporated as a load-bearing member with a natural camber or shallow arch, a crooked stem is more resistant to vertically acting loads than a straight one. This intelligent use of wood in accordance with its specific natural advantages is not only found in elitist temple construction but was also customary in vernacular architecture (Fig. 1), in other words in a realm where raw materials had to be used sparingly because of the precarious conditions of life. In pre-industrial times, knee timber was also coveted in the West for use in special elements, for example, for ribs in shipbuilding, for the hoops forming the tread of a wheel in the wheelwright trade, for stair stringers, and also in furniture construction until Thonet invented the bentwood process. In the mass timber construction of recent decades, timber defects were considered undesirable.

volles Potenzial entfalten. Unterschiedliche Holzarten wurden ihren typischen Eigenschaften entsprechend eingesetzt, aber auch Anomalien (in der Diktion der konventionellen Bauindustrie ‚Holzfehler‘) wie Reaktionsholz, Drehwuchs oder Gabelwuchs in Vorzüge verwandelt und für besondere Zwecke genutzt. Ein krummschäftiger Stamm, als Träger mit natürlicher Überhöhung oder flacher Bogen eingebaut, ist widerstandsfähiger gegenüber vertikal wirkenden Lasten als ein gerader. Diese intelligente Verwendung des Holzes gemäß seinen spezifischen natürlichen Vorteilen ist nicht nur in der elitären Tempelbaukunst zu finden, sondern war auch in der vernakulären Architektur üblich (Abb. 1), also in einem Bereich, wo aufgrund prekärer Lebensbedingungen mit Rohstoffen sparsam umgegangen werden musste. Auch im Westen war in vorindustrieller Zeit Krummholz für besondere Elemente begehrts, etwa für die Spanten im Schiffsbau, für Radreifen in der Wagnerei, für Treppenwangen und bis zur Erfindung des Bugholzes durch Thonet ebenso im Möbelbau. Für den Massen-Holzbau der letzten Jahrzehnte waren Holzfehler unerwünscht.



▲ Fig. 1 | Abb. 1:
Michigami House, *Hida no sato* (Hida Folk Village), Hida,
Gifu prefecture, Japan, ~ 18th century.

Photo © Karin Raith

Yet we no longer have to produce identical building elements in large series to build economically. Digitalization opens up new possibilities for designing more freely and for updating traditional knowledge. It allows for individualized fabrication and the use of wood parts that deviate from rectilinear geometries. Carpenters on a par with Nishioka are few and far between nowadays, that is, carpenters with the experience and intuition to sense the inner structure of a tree or piece of wood and to utilize it with the full virtuosity of their craft. Yet today trees can be scanned and captured in 3D models; automated digital searches can help determine the ideal use for each wood component in the structure of a building.

With GPS, laser measurement, and RFID (radio-frequency identification), wood can be tracked with precision, from its place of harvest in the forest through all the processing steps to its place of installation within the building. As in the highly advanced Japanese building tradition for sacred architecture, these technologies even let us maintain the connection between the position of the wooden element in the building and the original growth site of the tree in order to make optimum use of the element's individual capacity. Once the specific properties of each individual building component are captured in a data model, it is easier to reuse the component later in a different context.

The fact that the load-bearing behavior of irregular wood geometries and natural forms of growth can also be calculated facilitates the use of deciduous trees, which will withstand the effects of climate change better than their coniferous counterparts. Thus far, their stems have only been used in the form of glued laminated timber (glulam), largely for post-and-beam construction in facades. The crowns have not been economically usable for wood construction due to their complex geometry.

THE ART OF JOINERY

Stone construction always played a subordinate role in Japan, so all attention was directed at refining wood construction. This focus resulted in interlocking wood joints (*kigumi*) of unbelievable diversity and ingenuity. They have also proved their mettle in the frequent earthquakes and typhoons that occur there and under heavy snow loads. For cost reasons, metal connectors were largely dispensed with.⁵ What fascinates us today about these all-wood joints is, on the

Doch wir müssen nicht mehr gleiche Bauelemente in großer Serie produzieren, um wirtschaftlich zu bauen. Die Digitalisierung eröffnet neue Möglichkeiten für freiere Gestaltung und für die Aktualisierung des traditionellen Wissens. Sie erlaubt eine individualisierte Fabrikation und die Verwendung von Holzteilen, die von der geradlinigen Geometrie abweichen. Es gibt zwar kaum mehr Zimmermeister*innen, die wie Nishioka die Erfahrung und Intuition besitzen, die innere Struktur eines Baumes oder Holzstücks zu erfühlen und sie mit handwerklicher Virtuosität zu nutzen, doch heute können Bäume gescannt und in 3D-Modellen erfasst werden, mit automatisierten digitalen Suchläufen kann die ideale Verwendung für jeden Holzteil in der Baustruktur ermittelt werden.

Mittels GPS, Laservermessung und RFID (radio-frequency identification) ist das Holz vom Ernteort im Wald durch alle Verarbeitungsschritte bis zum Einbauort im Gebäude präzise verfolgbar. Damit könnte sogar – wie in der hochentwickelten japanischen Sakralbautradition – der Bezug zwischen der Position des Holzelements im Gebäude und dem ursprünglichen Wuchsplatz des Baums beibehalten werden, um das Holz entsprechend seiner individuellen Leistungsfähigkeit optimal einzusetzen. Sind die spezifischen Eigenschaften jedes einzelnen Bauteils auch in einem Datenmodell erfasst, dann vereinfacht dies seine spätere Wiederverwendung in einem anderen Kontext.

Dass auch das Tragverhalten irregulärer Holz-Geometrien und natürlicher Wuchsformen berechnet werden kann, erleichtert die Verwendung von Laubbäumen, die den Klimawandel besser als Nadelbäume überstehen werden. Bisher wurden deren Stämme nur in Form von Brettschichtholz vor allem für Pfosten-Riegel-Konstruktionen im Fassadenbau eingesetzt, die Kronen waren wegen ihrer komplexen Geometrie für den Holzbau bisher nicht ökonomisch nutzbar.

FÜGEKUNST

Da der Steinbau in Japan immer eine untergeordnete Rolle spielte und alle Aufmerksamkeit auf die Verfeinerung des Holzbau gerichtet war, entwickelte sich eine unglaubliche Vielfalt und Raffinesse der Holzverbindungen (*kigumi*), die ihre Leistungsfähigkeit auch bei den häufigen Erdbeben und Taifunen oder unter hohen Schneelasten bewiesen. Aus Kostengründen wurde weitgehend auf metallische Verbindungsmitte verzichtet.⁵ Heute faszinieren uns diese einstofflichen Verbindungen einerseits wegen ihrer komplexen, durchdachten Geometrie, andererseits wegen der Vorteile der Monomaterialität in der Kreislaufwirtschaft (Abb. 2). Die meisten *kigumi*-Verbindungen sind lösbar und erlauben eine zerstörungsfreie Weiterverwendung der Bauteile, doch

one hand, their complex and carefully conceived geometry and on the other hand, the advantages of their mono-materiality in the circular economy (Fig. 2). Most *kigumi* joints can be disassembled, allowing for the non-destructive reuse of the building components. Even with joints that cannot be disassembled, the problem of separating the materials by type is eliminated.

With the design technique known as *kiwari-jutsu* (literally: wood dividing system), the proportions between the individual building components were determined and their reciprocal relationships with each other were systematized, also with regard to aesthetics.⁶ Creativity tended to flow into perfecting the building components and their construction rather than into achieving individualistic architectural designs. Residential buildings were modular compositions with a universal structural arrangement that was based on a grid of supports spaced one *ken* apart. This unit of measure varied somewhat with locality and over time until it was gradually regimented.⁷ Diversity arose from the functional flexibility of the modules. This kind of modularity, which creates order without giving rise to monotony, would also be possible in contemporary wood construction. Parametric design tools facilitate work with individual components and enable combinatorics and a creation of variants to approach an ideal structure. Could wood in its differentiated, non-homogeneous form not be used for modular, generic and open-use architecture as well?

selbst im Falle unlösbarer Verbindungen entfällt das Problem der sortenreinen Trennung der Materialien.

Mit der Entwurfstechnik *kiwari-jutsu* (wörtlich: Holzteilungstechnik) wurden die Proportionen zwischen einzelnen Bauteilen bestimmt und ihre wechselseitigen Beziehungen auch in ästhetischer Hinsicht geregelt und systematisiert.⁶ Die Kreativität floss eher in die Perfektion der Bauteile und ihrer Fügung als in die individuelle Gestaltung der Architektur. Die Wohnhäuser waren modulare Kompositionen mit einer universellen strukturellen Ordnung, basierend auf einem Stützenraster im Abstand von einem *ken*, dessen Größe örtlich und zeitlich ein wenig variierte und erst nach und nach reglementiert wurde.⁷ Vielfalt entstand durch die funktionelle Flexibilität der Module. Eine solche Modularität, die Ordnung erzeugt, ohne Eintönigkeit aufkommen zu lassen, wäre auch im zeitgenössischen Holzbau möglich. Parametrische Entwurfswerzeuge erleichtern das Arbeiten mit individuellen Komponenten, sie erlauben eine Kombinatorik und Variantenbildung zur Annäherung an eine Idealstruktur. Könnte damit das Holz nicht auch in seiner differenzierten, inhomogenen Form für modulare, generische und nutzungsoffene Architektur verwendet werden?

1 Brown, A. (1995): *The Genius of Japanese Carpentry. Secrets of an Ancient Craft*, Tokyo: Tuttle Publishing: 21.

2 ibid., 55.

3 ibid.

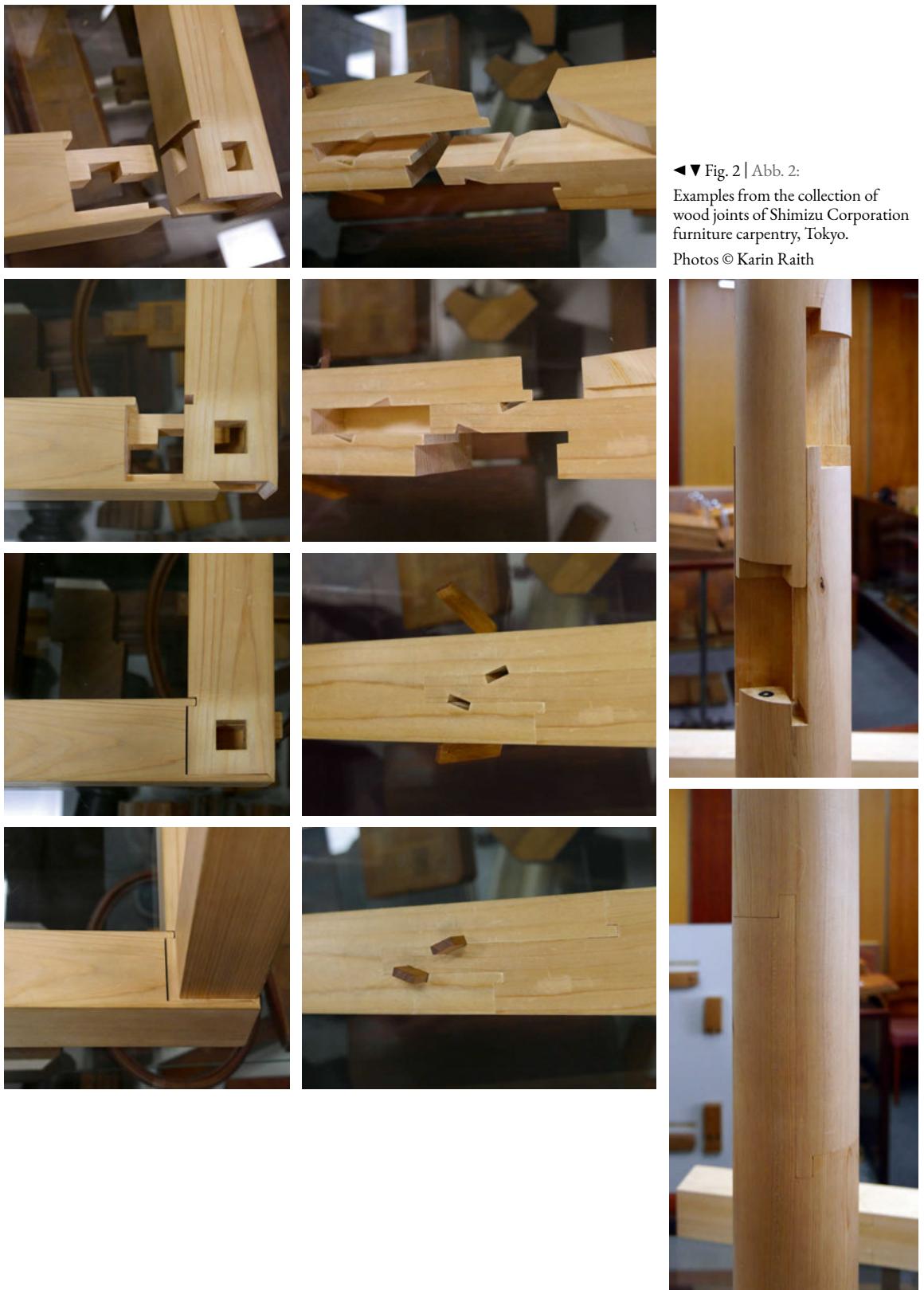
4 ibid., 56.

5 ^{en} It is a myth that traditional wood joinery in Japan made do without any metal parts at all. Even the oldest temples have nails, albeit few in number, which were used for additionally securing the wood joints.

^{de} Dass die traditionelle Holzfügekunst Japans völlig ohne Metallteile auskam, ist ein Mythos – es finden sich auch in den ältesten Tempelbauten Nägel, die zur zusätzlichen Sicherung der Holzverbindungen verwendet wurden, allerdings nur in geringer Anzahl.

6 “It is based on a similar idea to that of modern programming in the sense that it generates a string of optimal proportions obtained by multiplying a standard dimension with a coefficient ($Y = aX$).” Tadanori, S. (2018), “Secret Books of Carpentry Techniques”, in: Takahide, T. et al. (eds.): *Japan in Architecture. Genealogies of its Transformation*, Tokyo: Shimoda Yasunari: 45. “In architecture the dimensions of the rafters *taruki* are taken as the basic unit, and the proportions of the bays, projecting eaves and so on, are then calculated according to a formula based on the size of the rafter.” (JAANUS, Japanese Architecture and Art Net Users System, <http://www.aisf.or.jp/~jaanus/deta/k/kiwari.htm>, December 17, 2020).

7 Engel, H. (1985): *Measure and Construction of the Japanese House*, Tokyo: Tuttle Publishing.



◀▼ Fig. 2 | Abb. 2:

Examples from the collection of
wood joints of Shimizu Corporation
furniture carpentry, Tokyo.

Photos © Karin Raith

TOOLS

WERKZEUGE

The presented comprehensive workflow for the design, fabrication and assembly of three different case studies, composed of standard timber elements, has been developed in an iterative process. A wide range of analog and digital tools as well as different expertises within the team, ranging from carpentry to computation, were employed to support an experimental investigation that consisted of alternating design, testing, fabrication and assembly phases.

INITIAL WORKSHOP

During the initial workshop at the University of Applied Arts Vienna in October 2018, the *Conceptual Joining* team, together with Jun Sato, worked with students from different departments (industrial design, architecture, and art education) on three-dimensional structures made of wooden beams derived from *Kigumi* techniques (Fig. 1). ↗¹²

This workshop, and the subsequent refinement and fabrication of the design that emerged from it, formed the basis of further research in the *Interlocking Spaces* project and was key to exploring and engaging with a range of different tools. Joining principles as well as an overall aggregation were developed, following intuitive decisions and analysis of structural performance to negotiate irregularity, systematics and order. The approach was based on a holistic understanding of the mutual relationship between connection details and the appearance of an overall aggregation (Figs. 2a+b).

For the intended realization of a full-scale prototype, spruce timber beams with a square section of 5×5 cm and a length of 220 cm were set as a design constraint.

In the initial concept phase, no work was done with wood or on the computer. Instead, the tool palette was deliberately limited to sketches on paper and working models made of polystyrene hard foam (XPS).

Der hier beschriebene umfassende Arbeitsablauf für den Entwurf, die Herstellung und die Montage von drei verschiedenen Modellstudien aus Standard-Holzelementen wurde in einem iterativen Prozess entwickelt. Ein breites Spektrum an analogen und digitalen Werkzeugen sowie unterschiedliche Expertisen innerhalb des Teams, von der Tischlerei bis zur Berechnung, trugen dazu bei, einen experimentellen Untersuchungsprozess zu unterstützen, der aus Entwurfs-, Test-, Herstellungs- und Montagephasen bestand.

PROJEKTSTART

Im anfänglichen Workshop an der Universität für angewandte Kunst Wien im Oktober 2018 arbeitete das Team von *Conceptual Joining* gemeinsam mit Jun Sato mit Studierenden aus verschiedenen Abteilungen (Industriedesign, Architektur und Kunstvermittlung) an dreidimensionalen Strukturen aus Holzstäben, die von *Kigumi*-Techniken abgeleitet wurden (Abb. 1). ↗¹²

Die Projektentwicklungen erfolgten anhand von physischen Modellen wie auch von digitalen Studien. Dieser Workshop und die anschließende Weiterentwicklung und Fertigung des darin entstandenen Entwurfs waren die Grundlage der weiteren Forschungsarbeit im Projekt *Interlocking Spaces* und der Schlüssel zur Erkundung und Auseinandersetzung mit einer Reihe verschiedener Werkzeuge. Die Konzepte für Verbindungsdetails sowie eine Gesamtanordnung von Stäben wurden nach intuitiven Entscheidungen und Analysen des Tragverhaltens entwickelt, um Unregelmäßigkeit, Systematik und Ordnung miteinander zu verhandeln. Der Ansatz basierte auf einem ganzheitlichen Verständnis der wechselseitigen Beziehung zwischen Verbindungsdetails und dem Erscheinungsbild einer Gesamtstruktur (Abb. 2a+b).

Für die angestrebte Realisierung eines maßstabsgetreuen Prototyps wurden Fichtenholzstäbe mit einem quadratischen Querschnitt von 5×5 cm und einer Länge von 220 cm als Designvorgabe festgelegt.

In der ersten Konzeptphase wurde zunächst weder mit Holz noch am Computer gearbeitet. Stattdessen wurde die Werkzeugpalette bewusst auf Skizzen auf Papier und Arbeitsmodelle aus Hartschaum (extrudiertes Polystyrol / XPS) beschränkt.

↗¹² see Sato, J.: *Development of Kigumi Joinery to create 'Naturalness'*, p. 72, paragraph 3



▲ Fig. 1 | Abb. 1:

Simultaneous studying of details and overall design of a *Kigumi* structure during a student workshop with Jun Sato at the University of Applied Arts Vienna, 2018.



▲ Fig. 2a | Abb. 2a:

Connection detail development with extruded polystyrene hard foam as a model making material.

◀ Fig. 2b | Abb. 2b:

Scale model (1:5) development of a *Kigumi* structure from timber beams.

This limitation was meant to enable intuitive ideas and free associations independent from the constraints of the tough material wood, whilst the engagement with the substitute material (hard foam) avoided the occurrence of naïve assertions that would be impossible to materialize, similar to the danger when working with the computer, which does not include the resistance of the material and gravity. Only and after various ideas had been tested and discussed, design decisions were further developed with the computer and applied to the actual material wood simultaneously (Figs. 3a+b).

In constant iterations of doing, analyzing, questioning and possibly discarding ideas at any time, a working method of feedback loops and exchange between participants emerged.

DESIGN TO FABRICATION

The close relationship between detail and complex form within the final design scheme with which the workshop ended was also the result of coupling digital and analog tools in the thought process. In order to translate the key properties of this design scheme into a subsequent development phase aimed towards the realization of a prototype, the 1:5 scale model (Fig. 2b) was digitized via 3D scanning and converted into a digital axis model. The 3D scan model (Fig. 4) served as a spatial sketch and basis for a replica in the 3D modeling environment *Rhinoceros3D*.¹ In an iterative process, the model was subsequently rationalized towards optimized manufacturing and assembly whilst balancing a recognizable systematic and the irregular complexity of the formation.

For the realization of the first full-scale installation *IS-1*, members were grouped and aligned into interlocking grid planes (Fig. 5). Additionally, the configuration was optimized to include a maximum of three members connected into one structural node (= at one point) to simplify the joint details. In order to perform a computational simulation aimed at finding a structurally optimized global form, this topological layout was translated into a constraint-based model in *Kangaroo3D*², a physics simulation plugin for the *Rhinoceros/Grasshopper* environment. Vertical dead loads were applied to all node points, while the bottom endpoints were constrained to stay on the ground plane.

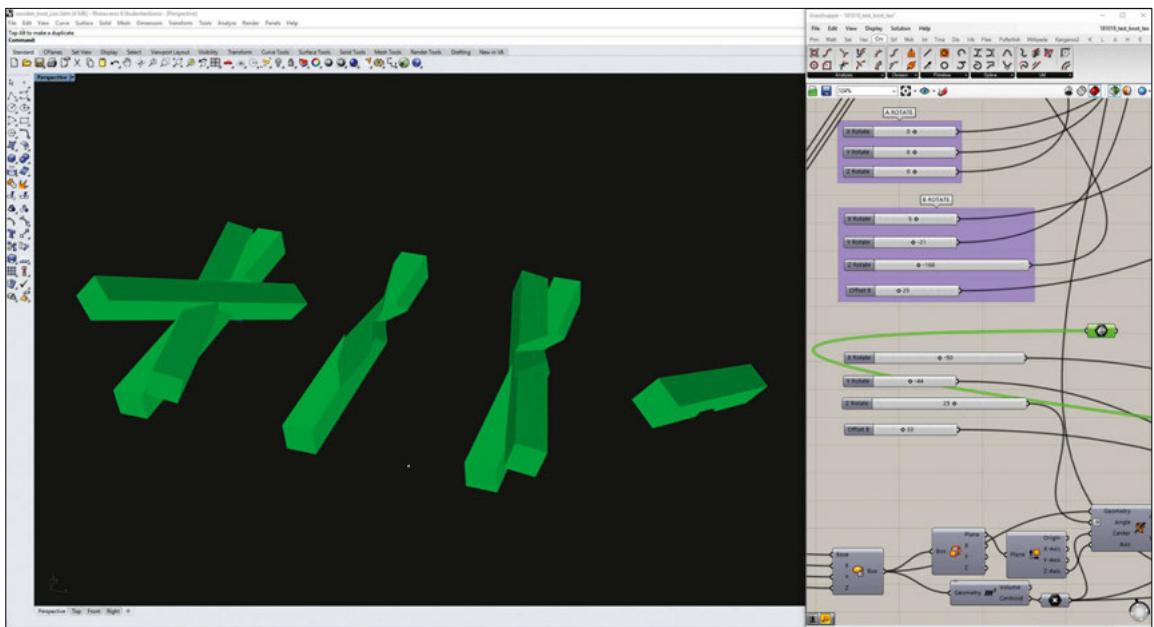
Diese Beschränkung sollte intuitive Ideen und freie Assoziationen unabhängig von den Zwängen des im Modell weniger leicht zu bearbeitenden Werkstoffs Holz ermöglichen, während die Beschäftigung mit dem Ersatzmaterial (Hartschaum) das Entstehen von naiven Behauptungen verhinderte, die nicht umsetzbar wären, weil die Arbeit mit dem Computer die Widerstandsfähigkeit des Materials und die Wirkung der Schwerkraft nicht unmittelbar vor Augen führt. Erst nachdem verschiedene Ideen getestet und diskutiert worden waren, wurden Entwurfsentscheidungen mit Hilfe des Computers weiterentwickelt und gleichzeitig auf das reale Material Holz angewendet (Abb. 3a+b).

In ständigen Iterationen des Ausprobierens, Analysierens, Hinterfragens und möglicherweise jederzeit Verwerfens von Ideen entstand eine Arbeitsform von Feedbackschleifen und Austausch zwischen den Teilnehmer*innen.

ENTWURF UND UMSETZUNG

Die enge Beziehung zwischen Detail und komplexer Form innerhalb des endgültigen Entwurfsschemas, mit dem der Workshop endete, war auch das Ergebnis der Verknüpfung von digitalen und analogen Werkzeugen im Denkprozess. Um die wesentlichen Eigenschaften dieses Entwurfs in einer anschließenden Entwicklungsphase mit dem Ziel der Realisierung eines Prototyps zu übersetzen, wurde das Modell im Maßstab 1:5 (Abb. 2b) mittels 3D-Scan digitalisiert und in ein digitales Achsmodell umgewandelt. Das 3D-Scanmodell (Abb. 4) diente als räumliche Skizze und Grundlage für eine Nachbildung in der 3D-Modellierungs-Software *Rhinoceros3D*.¹ In einem iterativen Prozess wurde dieses Modell anschließend auf eine optimierte Fertigung und Montage hin rationalisiert, wobei eine erkennbare Systematik und die unregelmäßige Komplexität der Formation ausbalanciert wurden.

Für die Realisierung der ersten maßstäblichen Installation *IS-1* wurden die Elemente in miteinander verschränkten Gitterebenen gruppiert und ausgerichtet (Abb. 5). Zusätzlich wurde die Konfiguration dahingehend optimiert, dass maximal drei Stäbe zu einem Struktuknoten (an einem Punkt) verbunden wurden, um die Details zu vereinfachen. Um eine rechnerische Simulation durchzuführen, die darauf abzielt, eine strukturell optimierte globale Form zu finden, wurde dieses topologische Layout in ein Constraint-basiertes Modell in *Kangaroo3D*² übersetzt, einem Physiksimulations-Plugin für die *Rhinoceros/Grasshopper*-Umgebung. Vertikale Kräfte (Eigengewicht) wurde auf alle Knotenpunkte angewendet, während die unteren Endpunkte auf der Bodenebene fixiert waren.

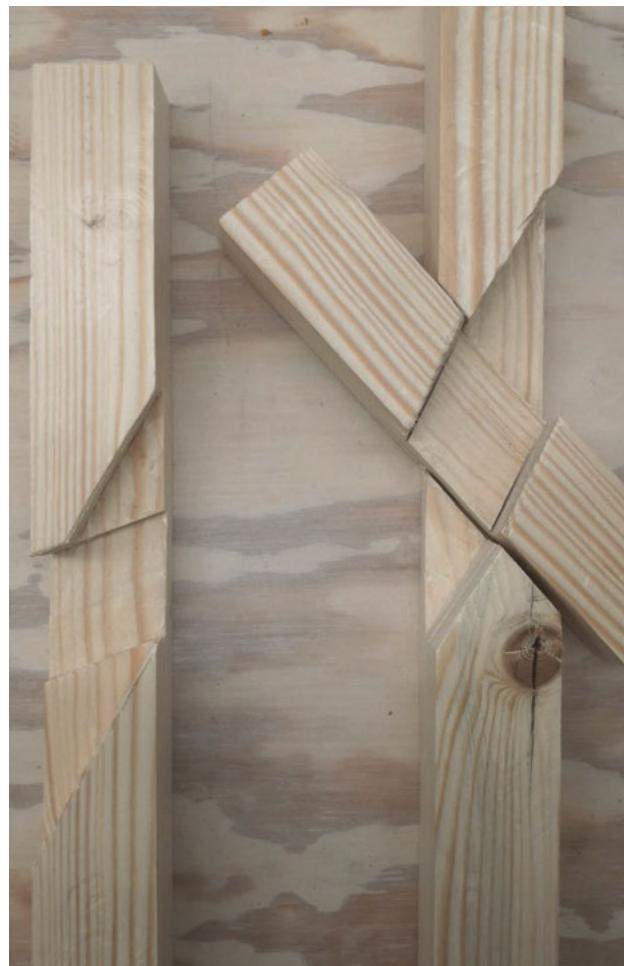


▲ Fig. 3a | Abb. 3a:

Parametric model of a joint for three members connected at varying angles.

► Fig. 3b | Abb. 3b:

Analog joint studies with spruce elements with a cross section of 5×5 cm.



Timber elements were represented as polylines, whose segments bridged the distances between the connection nodes. These lines were constrained to remain colinear in the simulation and intersecting elements that met at nodes remained connected to maintain the global connectivity logic. The line segments were defined as springs that could expand and compress within the simulation. The flexibility of spring length allowed for deformation and adjustment of the global form in order to find a state of equilibrium that balanced the geometric constraints with the applied force conditions. ↗¹³

The converged state at the end of the simulation showed a straightened model with all members aligned with an emphasis towards a vertical orientation (Figs. 6a+b). *Karamba3d*,³ a parametric structural design and analysis tool for the *Grasshopper3D* environment, helped to monitor the effect of the modification and its measurable improvements in load transmission throughout the model.

Grasshopper3D was also used to generate and draw the wooden joints digitally, which served as the basis for computer-aided manufacturing (CAM) with a CNC truss-cutting machine. Through a cooperation with the carpentry department of the vocational training school in Murau, Austria, such a tool became accessible for this project. The school owns a *Hundegger Robot-Solo*⁴, an industrial CNC truss-cutting machine featuring a 5-axis robotic aggregate and an automatic tool changer (Fig. 7).

It is mainly used for prefabricated timbers that are primarily used as roof trusses and in frame constructions. All structures throughout the project were realized using this machine.

Cambium, *Hundegger*'s own CAM software, provides many predefined parametric macroinstructions (macros) that can be customized by adding parameters to control position, orientation and rotation in relation to the local coordinate system of each beam (Fig. 8). Dependent on the respective form, the algorithm automatically generates a set of G-code instructions⁵ for a sequence of operations using different tools. For the fabrication of the beams in this project, only four different operations were relevant: saw cutting, milling, marking and text output. The complex mathematical analysis of 3D models and the processing of relevant data towards fabrication was done using *Grasshopper3D*

Die Stäbe wurden in Polylinien aufgelöst, deren Liniensegmente die Abstände zwischen den Verbindungsknoten überbrückten. Diese Linien wurden in der Simulation darauf beschränkt, kolinear zu bleiben, sich kreuzende Elemente, die sich an Knotenpunkten trafen, blieben verbunden, um die globale Verbindungslogik beizubehalten. Die Liniensegmente wurden außerdem als Federn definiert, die sich innerhalb der Simulation ausdehnen und zusammendrücken konnten. Die Flexibilität der Federlänge erlaubte eine Verformung und Anpassung der globalen Form, um einen Gleichgewichtszustand zu finden, der die geometrischen Randbedingungen mit den angewandten Kraftbedingungen in Einklang brachte. ↗¹³

Der konvergierte Zustand nach der Simulation zeigte ein begradigtes Modell, bei dem alle Stäbe im Durchschnitt senkrechter ausgerichtet waren (Abb. 6a+b). *Karamba3d*,³ ein parametrisches Werkzeug zur Tragwerksplanung und Analyse für die *Grasshopper3D*-Umgebung, diente als Kontrolle für die messbare Verbesserung der Lastableitung im Modell als Ergebnis der modifizierten Formation.

Grasshopper3D wurde auch verwendet, um die Holzverbindungen in Form eines digitalen Modells zu generieren und zu zeichnen, das als Grundlage für eine CAM-Fertigung mit einer CNC-Abbildung diente. Durch eine Kooperation mit der Zimmereiabteilung der Landesberufsschule in Murau, Österreich, wurde ein solches Werkzeug für dieses Projekt zugänglich. Das Berufsbildungszentrum besitzt als Teil seiner Infrastruktur eine *Hundegger Robot-Solo*⁴, eine industrielle CNC-Maschine mit 5-Achs-Roboteraggregat und automatischem Werkzeugwechsler (Abb. 7).

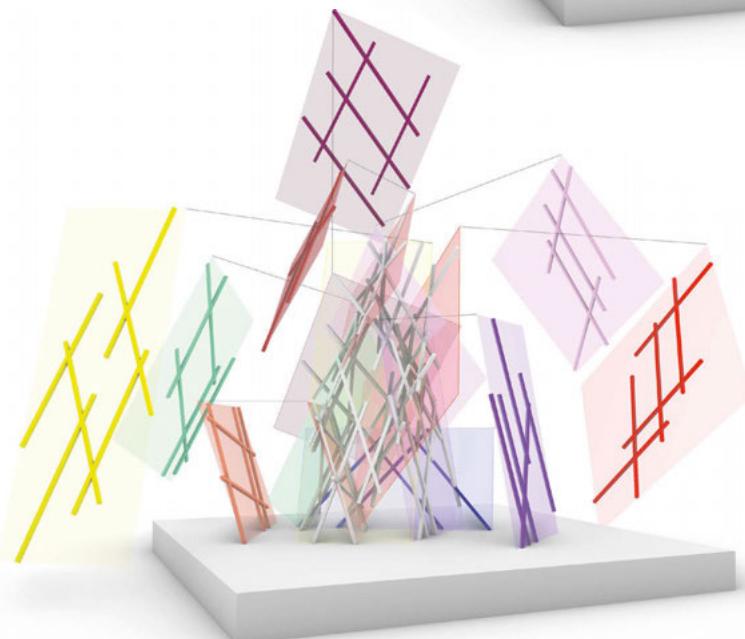
Sie wird vor allem zur Herstellung von vorgefertigten Holzbauteilen eingesetzt, die in Dachstühlen und in Rahmenkonstruktionen verwendet werden. Bei diesem Projekt wurden alle Konstruktionen mit dieser Maschine realisiert.

Innerhalb der Maschinensteuerungssoftware *Cambium* stellt die *Hundegger*-eigene CAM-Software viele vordefinierte parametrische Makroanweisungen (Makros) zur Verfügung, die durch Parameter zur Steuerung von Position, Orientierung und Rotation in Bezug auf das lokale Koordinatensystem jedes Trägers angepasst werden können (Abb. 8). Abhängig von der jeweiligen Form generiert der Bearbeitungsalgorithmus automatisch eine Abfolge von G-Code-Anweisungen⁵ für eine Sequenz von Operationen mit verschiedenen Werkzeugen. Für die Fertigung der Träger in diesem Projekt waren nur vier verschiedene Operationen relevant: Sägen, Fräsen, Markieren und Textausgabe. Die komplexe mathematische Analyse der 3D-Modelle und die Aufbereitung der relevanten Daten für die Fertigung

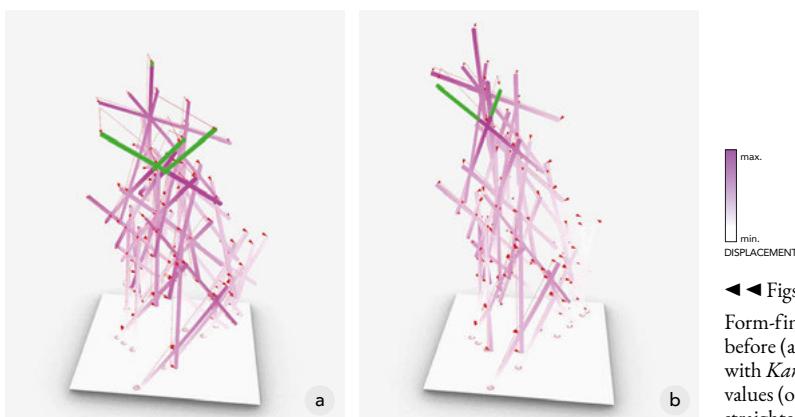
↗¹³ see Orlinski, A., Preisinger, C., Heimrath, M.: *Encoded Structures*, p. 108 ff.



▲ Fig. 4 | Abb. 4:
Structured light 3D scan with an *Artec Eva*.



▲ Fig. 5 | Abb. 5:
Explosion drawing of the rationalized model with groups of members aligned to interlocking grid planes indicated in colors. Within each group, members with similar directions are re-oriented to parallel vectors.



◀◀ Figs. 6a+b | Abb. 6a+b:
Form-finding simulation with *Kangaroo3D*,
before (a) and after (b). A simultaneous analysis
with *Karamba3d* shows a reduction in displacement
values (optimization) under gravitational force in the
straightened state after simulation.

for the first *IS-1* realization. Several small definitions were set up to analyze beams extracted from the digital model, and to export specific data lists in BVX-file-format into *Cambium*⁶ (Fig. 9). For the following realizations of the *Kigumi* tables and *IS-2*, the CAD/CAM software *Cadworks3D*⁷ was used.

Cadworks is specifically designed to facilitate a translation of data from the most common 3D modeling environments to the software *Cambium*, which controls the machine itself. *Cadworks* is a widely used CAD/CAM solution in the timber construction industry which has a powerful built-in automated function that analyzes *Rhinoceros*-NURBS geometry and determines the most suitable macro for fabrication in *Cambium*. This workflow was used to cut notches (Fig. 10), add markings for positioning, and label the beams with an index number for identification in the assembly process. The plywood panels that complemented the framework structures in the table studies and in the second installation *IS-2* were fabricated using a 3-axis CNC router.

ASSEMBLY

All the designs accounted for a build-up process that assumed an assembly without any additional supporting structures. In order to precisely define the positioning of the first series of beams, a base structure was developed for *IS-1* and *IS-2* with markings and labels indicating the locations of the support points of the associated beams. The structure was erected piece by piece based on this supporting grid, which was removed once the structure was strong enough (Fig. 11).

For assembly, a custom-made augmented reality app for Android mobile devices helped to order, orient and position the numbered beams. The digital model was overlaid with the physical structure to monitor the construction process (Fig. 12).

In addition, when using the app, beams could be displayed in groups associated with the predefined assembly sequence, and individual beams could be identified via their ID at their specified location in the assembly. This process helped the assembly team to intuitively use the app as a guide for the construction process in lieu of printed plans. The first-time installation of *IS-1*, consisting of 45 beams,

erfolgten bei der ersten *IS-1*-Realisierung mit *Grasshopper3D*, für die Analyse der aus dem digitalen Modell extrahierten Stäbe und den Export spezifischer Datenlisten im BVX-Format zur Einspeisung in *Cambium*⁶ (Abb. 9) wurden kleine Definitionen erstellt. Für die späteren Realisierungen von *Kigumi*-Tischen und *IS-2* wurde stattdessen die CAD/CAM-Software *Cadworks3D*⁷ eingesetzt.

Cadworks wurde speziell dafür entwickelt, eine Übersetzung von Daten aus 3D-Modellierungsumgebungen in *Cambium* zu ermöglichen. *Cadworks* ist eine weit verbreitete CAD/CAM-Lösung in der Holzbau-Industrie, die über eine leistungsstarke integrierte Automatisierungsfunktion verfügt, die *Rhinoceros*-NURBS-Geometrien analysiert und das am besten geeignete Makro für die Fertigung in *Cambium* ermittelt. Dieser Arbeitsablauf wurde genutzt, um Ausklinkungen herzustellen (Abb. 10), Markierungen für die Positionierung beim Zusammenbau vorzunehmen und die Balken mit einer Indexnummer zur Identifizierung im Montageprozess zu versehen. Die Sperrholzplatten, die die Rahmenstrukturen in den Tischstudien und in der zweiten Installation *IS-2* ergänzten, wurden mit einer 3-Achsen-CNC-Portalfräse gefertigt.

MONTAGE

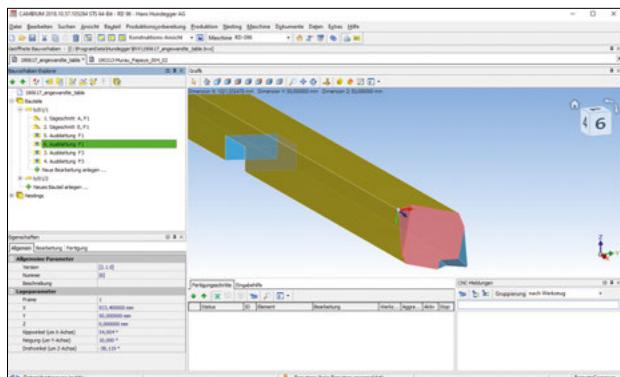
Bei allen Entwürfen wurde ein Aufbauprozess berücksichtigt, der eine Montage ohne zusätzliche Stützkonstruktionen voraussetzt. Um die Positionierung der ersten Reihe von Stäben genau zu definieren, wurde für *IS-1* und *IS-2* eine Grundstruktur mit Markierungen und Beschriftungen entwickelt, die die Positionen der Stützpunkte der zugehörigen Träger anzeigen. Die Struktur wurde Stück für Stück auf der Grundlage dieses Stützgitters errichtet, das entfernt wurde, sobald die Struktur stark genug war (Abb. 11).

Bei der Montage half eine eigens entwickelte Augmented-Reality-App für Android-Mobilgeräte bei der Anordnung, Ausrichtung und Positionierung der nummerierten Träger. Das digitale Modell wurde angezeigt und mit der physischen Struktur überlagert, um den Bauprozess zu überwachen (Abb. 12).

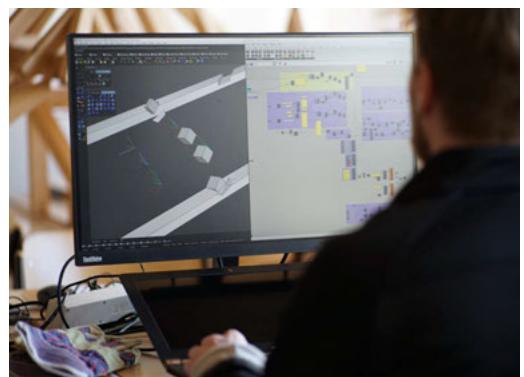
Darüber hinaus konnten bei Verwendung der App die Träger in Gruppen angezeigt werden, die mit der vordefinierten Montagereihenfolge verbunden waren, und einzelne Träger konnten über ihre ID an ihrer festgelegten Position in der Konstruktion identifiziert werden. Dieser Prozess half dem Montageteam, die App intuitiv als Leitfaden für den Bauprozess anstelle von gedruckten Plänen zu nutzen. Die erstmalige Montage von *IS-1*, die aus 45 Trägern bestand,



► Fig. 7 | Abb. 7:
Hundegger ROBOT-Solo CNC truss-cutting machine at the Vocational School Murau, Austria, 2019.



▲ Fig. 8 | Abb. 8:
Cambium interface while preparing machining files for one beam of *T-2b*.



▲ Fig. 9 | Abb. 9:
Reverse engineering the digital model. Extracting the correct parameters from the *Rhino3D* model (left on the screen) using *Grasshopper* (right on the screen) was successful for the more simple notch geometries, but became difficult for more complex instances. For *IS-1* this technique eventually failed in some cases, leading to tedious manual remodeling in *Cambium*.

▼► Fig. 10 | Abb. 10:
The robotic aggregate of the *Hundegger ROBOT-Solo* machining a 5×5 cm spruce beam (which is the minimum size for this machine).





▲ Fig. 11 | Abb. 11:
Build-up process of *IS-1* on the basis of a temporary supporting grid for the group exhibition *Understanding Artistic Research* at the Museum of Applied Arts (MAK) Vienna, 2019.



▲ Fig. 12 | Abb. 12:

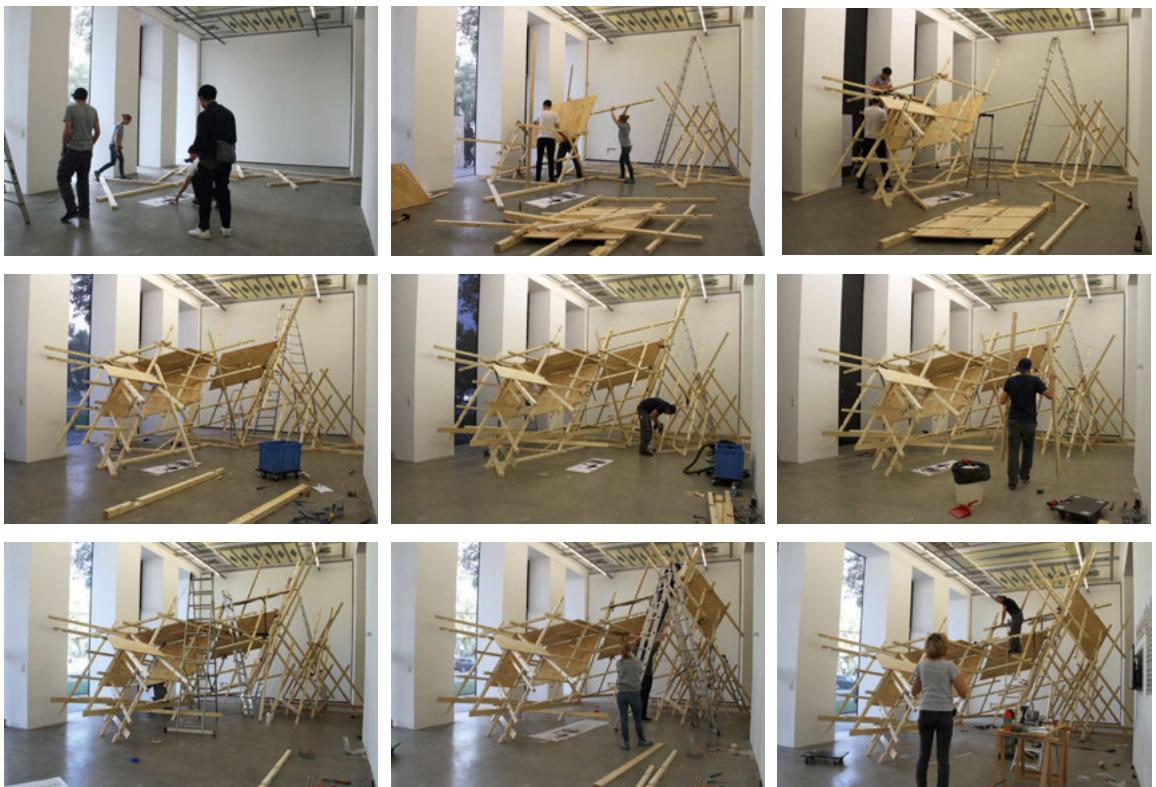
A custom AR app developed by Ben James helped to choreograph the build-up process for the installation of *IS-1* as part of the *World Wood Days Festival 2019*, Stübing, Austria.



▲ Fig. 13a | Abb. 13a:
Carpenter trainees assembling *IS-1*, Stübing, 2019.

▼ Fig. 13b | Abb. 13b:

Build-up process of *IS-2*, AIL, 2019.



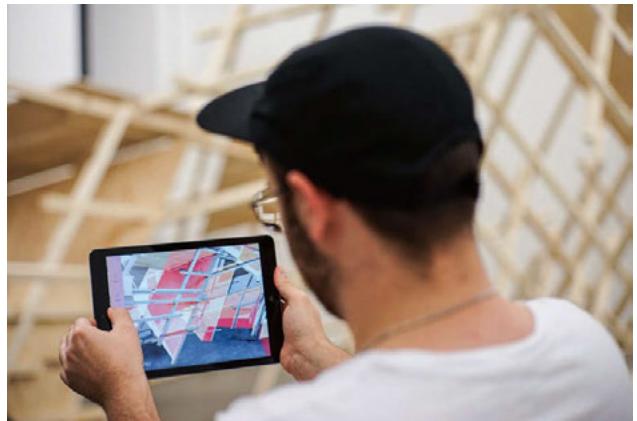
was mainly conducted by ten trainee carpenters who were able to assemble the structure in about 90 minutes (Fig. 13a). Mainly three researchers were involved in the build-up process for *IS-2*, consisting of 105 beams, which took two days (Fig. 13b).

The AR assembly app was also further developed as a communication tool for the final exhibition. Exhibition visitors were able to view a graphical visualization of the underlying modular logic, as well as possible extensions to the structure as virtual overlays on top of the physically built structure (Figs. 14a+b).

wurde hauptsächlich von zehn angehenden Zimmerleuten durchgeführt, die die Struktur in etwa 90 Minuten montieren konnten (Abb. 13a). Am Aufbau von *IS-2*, das aus 105 Trägern bestand, waren hauptsächlich drei Forscher*innen beteiligt, was zwei Tage dauerte (Abb. 13b).

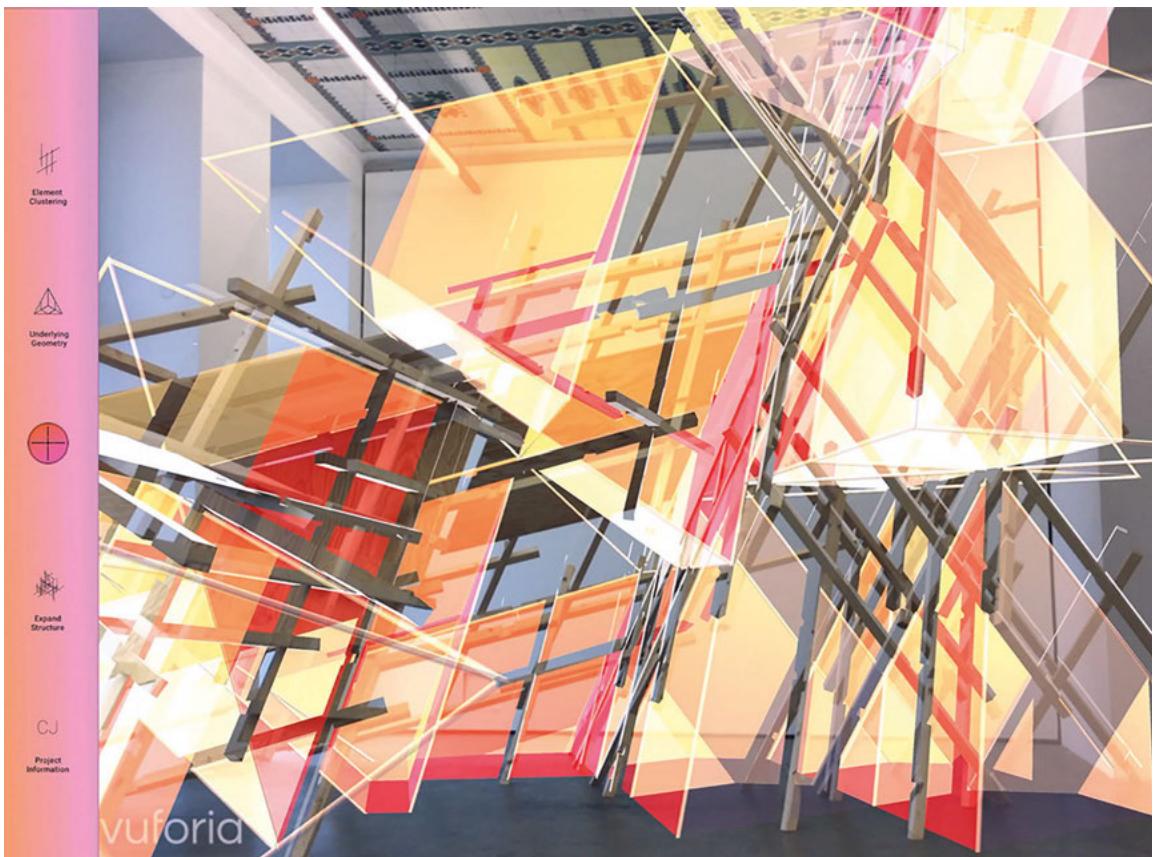
Die AR-Aufbau-App wurde auch als Kommunikationsstool für die finale Ausstellung weiterentwickelt. Ausstellungsbesucher*innen konnten sich eine grafische Visualisierung der zugrundeliegenden modularen Logik sowie mögliche Erweiterungen als virtuelle Überlagerungen der physischen Struktur anzeigen lassen (Abb. 14a+b).

-
- 1 *Rhinoceros3D* Version 6 – <https://www.rhino3d.com>.
 - 2 *Kangaroo 2.0* – <https://www.grasshopper3d.com/profiles/blogs/kangaroo-2-0-now-out-of-the-pouch-and-available-for-testing>.
 - 3 *Karamba3d* – <https://www.karamba3d.com>.
 - 4 Hans Hundegger AG – <https://www.hundegger.com/de-de/maschinen/abbundmaschinen/robot-solo>.
 - 5 ^{en} CNC programming language to control automated machines, see also <https://en.wikipedia.org/wiki/G-code>.
^{de} CNC-Programmiersprache für die Steuerung automatisierter Maschinen, siehe auch <https://en.wikipedia.org/wiki/G-code>.
 - 6 Hans Hundegger AG (2014): “BVX Specification: Documentation Specification of BVX1-Format”, Hans Hundegger AG, Hawangen Germany.
 - 7 *Cadworks* Version 2019 – <https://www.cadwork.com/indexL1a.jsp>



► Fig. 14a | Abb. 14a:

A custom AR app, developed by Ben James, was installed on a tablet which allowed visitors of the *Conceptual Joining* show at AIL, 2019 to move around the structure and view 'through' the display different visualizations of additional information.



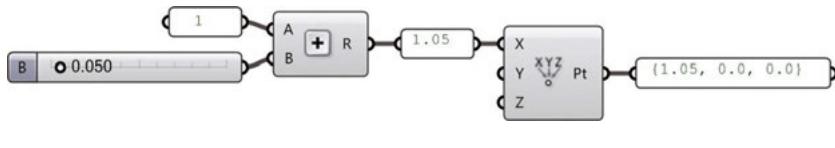
▲ Fig. 14b | Abb. 14b:

Screenshot of AR content displayed on the tablet device showing the underlying system of modular groups of beams highlighted as colored solids. A user menu (bar with icons on the left) allowed users to switch between the different visualizations. Changing light conditions, the monochrome (no texture) background of the gallery space, and quick changes in perspective affected a slight mismatching of physical and digital geometries.

ENCODED STRUCTURES: CONSTRAINT-BASED DESIGN OF MODULAR BEAMS

CODIERTE STRUKTUREN: CONSTRAINT-BASIERTE KONSTRUKTION MODULARER ELEMENTE

↗ ADAM ORLINSKI, CLEMENS PREISINGER, MORITZ HEIMRATH // German translation: Christa Wendl



◀ Fig. 1 | Abb. 1:
Simple definition: generating a point with Cartesian coordinates (image source: *Karamba3d*).

WAYS OF WORKING:

Parametric modelling and advances in computer-aided design have prompted a modified understanding of what geometry creation can be. ‘Making geometry’ has expanded from a drawing- or modeling-based approach towards a generative one (Fig. 1). Access to algorithmic modelling platforms and visual programming languages such as *Grasshopper3D* has made it possible for parametric workflows to assist in organizing formal complexities in a much more interconnected way. Geometric compositions no longer accumulate due to static, step-by-step operations, but rather interlink through a record of algorithms, whereby shapes emerge through programmed rules and flexible parameters.

ARBEITSWEISEN:

Parametric Modeling und Fortschritte im Bereich der computergestützten Konstruktion haben zu einem veränderten Verständnis der Geometrieerstellung geführt. Das ‚Erstellen von Geometrie‘ hat sich von einem zeichnungs- oder modeling-basierten Ansatz hin zu einem generativen erweitert (Abb. 1). Algorithmische Modeling-Plattformen und visuelle Programmiersprachen wie *Grasshopper3D* haben es möglich gemacht, dass parametrische Workflows dabei helfen können, formale Komplexität mittels Vernetzung zu organisieren. Geometrische Kompositionen bilden sich nicht mehr infolge statischer Schritt-für-Schritt-Operationen heraus, sondern sind durch Algorithmen miteinander verbunden, wobei die Formen basierend auf programmier-ten Regeln und flexiblen Parametern entstehen.

ORGANIZING QUANTITIES:

One consequential effect of these workflows is an updated mastery of dealing with large quantities of elements at the same time. The difference between 5, 50 or 500 times often reflects the change of a single parameter, changing the relationship between time, effort and quantity. Instructions for building shapes and forms have directly replaced building shapes and forms, and the focus has shifted towards assembling the right algorithms, rules and parameters to create geometric ensembles.

MENGEN ORGANISIEREN:

Ein Folgeeffekt dieser Workflows ist die verbesserte Möglichkeit, große Mengen von Elementen gleichzeitig zu erzeugen. Der Unterschied zwischen 5, 50 oder 500 Mal spiegelt oft nur die Änderung eines einzigen Parameters wider, was das Verhältnis zwischen Zeit, Aufwand und Menge verändert. Das Bauen von Formen wurde auf direkte Weise durch Instruktionen zum Bauen von Formen ersetzt, und der Fokus hat sich auf die Erstellung der richtigen Algorithmen, Regeln und Parameter zur Erzeugung geometrischer Ensembles verlagert.

TOOL CLUSTERS & COMBINATIONS:

Parametric modelling is characterized by connecting various modules to chains of actions. Modules in use serve a specific task (small or big) in the design process, and often times stem from different disciplines with differentiated purposes. They perform within the same digital vocabulary – *text/string, number/float, point, vector, plane, Boolean, mesh, NURBS curves and surfaces, etc.* – which allows them to exchange data and communicate in the same model environment. By connecting multiple modules to clusters, it is possible to bond their functionalities and blend tools into custom-made instruments.

FOR EXAMPLE:

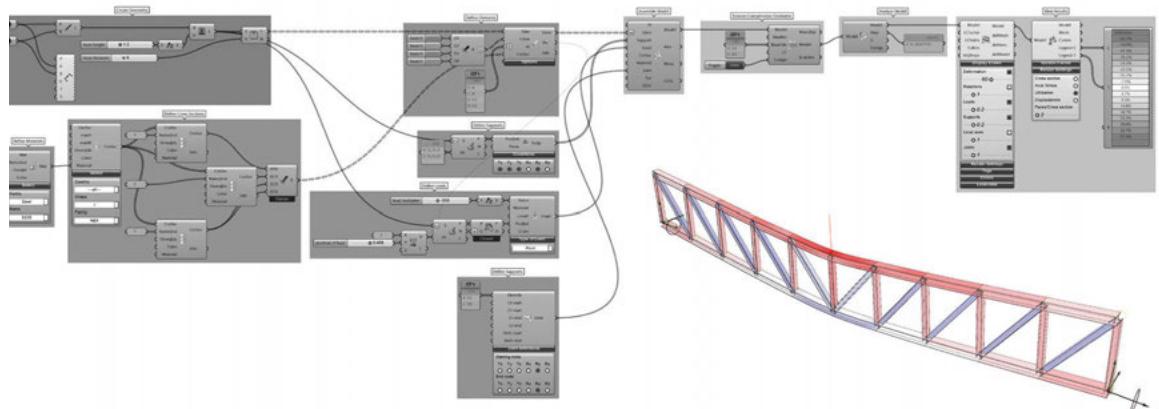
Parametric geometry can be translated into a structural model that is evaluated for stiffness and deflection (Fig. 2). Changes in input parameters result in updates of the geometry (element count, distances, etc.), which then leads to a differentiated structural calculation result. The numeric calculation outcome can be furthermore connected to a *genetic algorithm* that links back to the initial input parameters. It iteratively runs through a large number of value changes, while remembering the resulting outcome. The effect is a recursive feedback loop that tracks parameter sets aimed towards a minimal structural deflection optimum.

TOOL-CLUSTER & KOMBINATIONEN:

Das parametrische Modeling zeichnet sich durch die Verknüpfung verschiedener Module zu Handlungsketten aus. Die verwendeten Module dienen einer bestimmten (kleinen oder großen) Aufgabe im Konstruktionsprozess und stammen oft aus unterschiedlichen Disziplinen mit differenzierten Zwecken. Sie basieren auf dem gleichen digitalen Vokabular – *Text/String, Zahl/Float, Punkt, Vektor, Ebene, boolescher Wert, Polygonnetz, NURBS Kurve und Freiformfläche, etc.* –, wodurch sie Daten austauschen und in der gleichen Modellumgebung kommunizieren können. Durch die Verbindung mehrerer Module zu Clustern ist es möglich, deren Funktionalitäten zusammenzuführen und Tools zu maßgeschneiderten Instrumenten zu verschmelzen.

BEISPIEL:

Eine parametrische Geometrie kann in ein Strukturmodell übersetzt werden, dessen Steifigkeit und Durchbiegung ausgewertet werden (Abb. 2). Änderungen der Eingabeparameter führen zu Aktualisierungen der Geometrie (Elementanzahl, Abstände etc.), die dann zu einem differenzierten Strukturberechnungsergebnis führen. Das numerische Berechnungsergebnis kann darüberhinaus mit einem *genetischen Algorithmus* verknüpft werden, der auf die anfänglichen Eingabeparameter zurückgreift. Dieser durchläuft iterativ eine große Anzahl von Wertänderungen und merkt sich dabei das daraus resultierende Ergebnis. Der Effekt ist eine rekursive Rückkopplungsschleife, die Parametersätze mit minimaler statischer Durchbiegung sucht.



▲ Fig. 2 | Abb. 2:

Karamba3d – parametric definition (left) and calculated truss model (right bottom). The model automatically adapts to changing input parameters (image source: *Karamba3d*).

FORMATIONS FOLLOW ORCHESTRATION:

Various strategies for managing geometric complexities, as well as add-on tools for analysis, computation and simulation, have emerged through distinct contributions to parametric modelling platforms. Building blocks that solve simple mathematic equations, or components that contain entire ‘solvers’ (for example, for structural calculation), have allowed geometry to be shaped according to precise information sequences from various fields. Geometry has taken steps towards embodying combined principles across multiple technologies and from multiple sources.

ANIMATED, SIMULATED & SCRIPTED:

When updating parameters within an algorithmic framework, structures turn into flexible entities that adapt to changing circumstances. In architecture and especially in structural engineering, geometry is often seen as rigid or static. By displaying the ability to self-organize and to adapt to change, geometries can be animated, making them more malleable, plastic and dynamic in the process. Simulation tools such as *Karamba3d* or *Kangaroo* compute complex physical models with a multitude of parts, whereby each part embodies specific physical or material properties. While ‘running’ a solver for those models, encoded properties combine and merge in a simulated collective behavior of combined complexity.

GENETIC ALGORITHM:

The *White Noise* pavilion was assembled from modular beam elements that were rigidly layered in longitudinal directions, while being randomly rotated in cross directions (Fig. 3). By addressing all the beam rotation parameters simultaneously, a genetic algorithm filtered hundreds of different arrangements for structural performance within specified design boundaries. After 5,000 generations, the evolutionary process tracked the configuration with the minimum deformation number and therefore the maximum structural stiffness. This methodology shapes a ‘structural fitness’ into the randomness of the project’s body (Fig. 4).

MAPPING FORCES TO FORM:

Horizontal grids are interlaced through an algorithm that places one diagonal in each iteration (Fig. 5).

FORMATIONEN FOLGEN DER ORCHESTRIERUNG:

Infolge unterschiedlicher Beiträge zu parametrischen Modell-Plattformen sind verschiedene Strategien zur Handhabung geometrischer Komplexität sowie Zusatzttools für Analyse, Berechnung und Simulation entstanden. Bausteine, die einfache mathematische Gleichungen lösen, oder Komponenten, die ganze ‚Solver‘ (z. B. für Strukturberechnungen) enthalten, haben es ermöglicht, Geometrie nach präzisen Informationsfolgen aus unterschiedlichen Bereichen zu gestalten. Die Geometrie nähert sich einer Verkörperung kombinierter Prinzipien mehrerer Technologien und aus mehreren Quellen an.

ANIMIERT, SIMULIERT & GESKRIPTET:

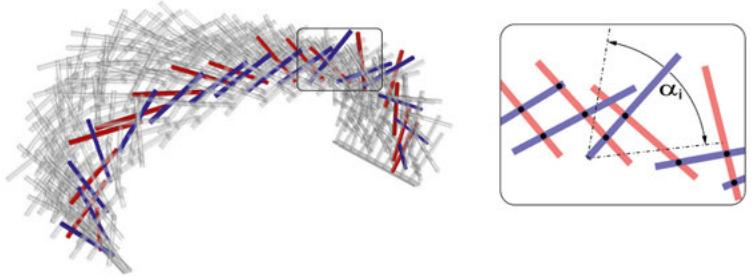
Durch das Aktualisieren von Parametern innerhalb eines algorithmischen Rahmens werden Strukturen zu flexiblen Gebilden, die sich an veränderte Gegebenheiten anpassen. In der Architektur und vor allem in der Tragwerksplanung gilt Geometrie oft als starr oder statisch. Durch die Fähigkeit, sich selbst zu organisieren und an Veränderungen anzupassen, werden Geometrien lebendig und damit formbar, plastisch und dynamisch. Simulationstools wie *Karamba3d* oder *Kangaroo2* berechnen komplexe physikalische Modelle mit einer Vielzahl von Teilen, wobei jedes Teil spezifische physikalische Charakteristika oder Materialeigenschaften verkörpert. Während ein Solver für diese Modelle ‚läuft‘, verbinden sich die kodierten Eigenschaften und verschmelzen in einem simulierten kollektiven Verhalten von kombinierter Komplexität.

GENETISCHER ALGORITHMUS:

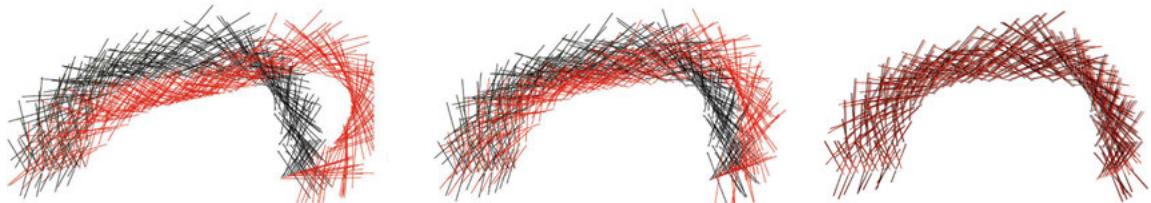
Der *White Noise* Pavillon wurde aus modularen Stäben zusammengesetzt, die in Längsrichtung starr geschichtet und in Querrichtung zufällig gedreht wurden (Abb. 3). Durch die gleichzeitige Berücksichtigung aller Rotationsparameter der Stäbe filterte ein genetischer Algorithmus Hunderte von verschiedenen Anordnungen für die strukturelle Optimierung innerhalb der vorgegebenen Rahmenbedingungen heraus. Nach 5.000 Generationen hatte der evolutionäre Prozess die Konfiguration mit der minimalen Verformungszahl und damit der maximalen strukturellen Steifigkeit gefunden. Diese Methode verleiht der Zufälligkeit des Projekt-körpers eine ‚optimierte Strukturlogik‘ (Abb. 4).

KRÄFTE AUF DIE FORM ABBILDEN:

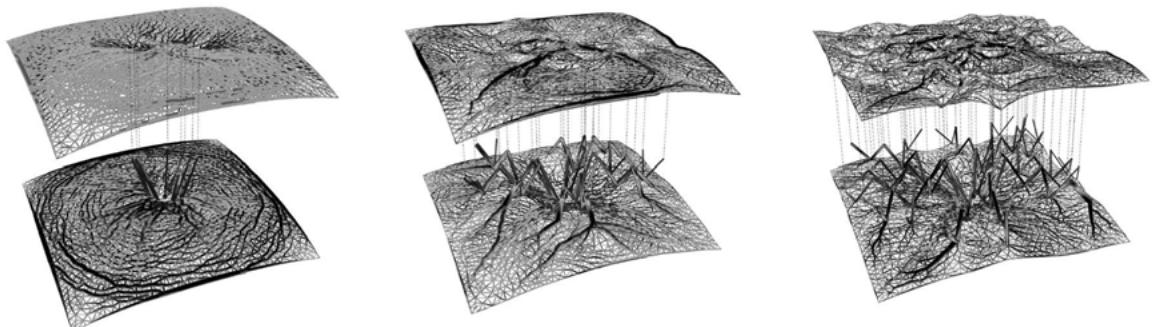
In der Studie „Stitching with Diagonals“ werden horizontale Trägerroste durch einen Algorithmus verwoben, der in jeder Iteration eine Diagonale platziert (Abb. 5). Die Mitte



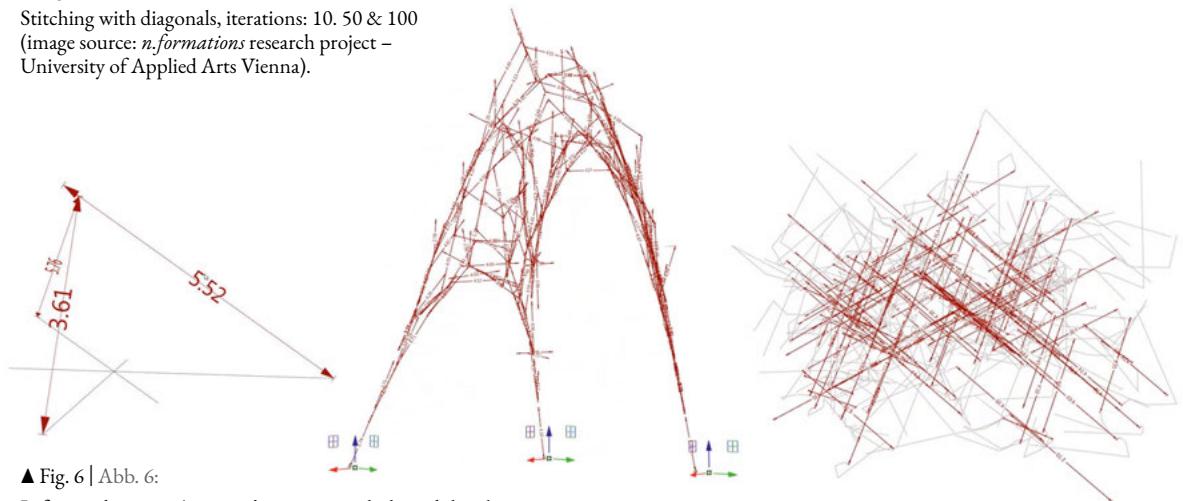
► Fig. 3 | Abb. 3:
Beam aggregation controlled through angle parameters, *White Noise* – soma architecture (image source: Bollinger+Grohmann).



▲ Fig. 4 | Abb. 4:
Evolutionary structural optimization using *Karamba3d* and *Galapagos* to find a beam aggregation (black lines) with a minimum deformation behavior (red lines), *White Noise* – soma architecture (image source: Bollinger+Grohmann).



▲ Fig. 5 | Abb. 5:
Stitching with diagonals, iterations: 10, 50 & 100 (image source: *n.formations* research project – University of Applied Arts Vienna).



▲ Fig. 6 | Abb. 6:
Left: simple reverse 'catenary' structure with three sliding beams,
Middle: complex reverse catenary structure with 200 sliding beams,
Right: sliding beams coupled with angle constraint, *Kigumi Extended* (image source: Adam Orlinski / *Conceptual Joining* research project – University of Applied Arts Vienna).

The center of the structure serves as a support cluster, where polylines ‘grow’ from the inside out. In each step, the algorithm adds one element in succession while continually orienting the newly created diagonal towards the spot with the lowest stiffness. When the edge of the grid is reached by all polyline agents, the algorithm stops, resulting in a unique, self-supporting spatial structural system.

GOAL-BASED SOLVING:

Kangaroo2 serves as a powerful engine for form-finding that can take various constraints and physical forces into account. A combinatory toolbox developed by Daniel Pirker, it performs goal-based solving on top of geometric setups. Goals address assigned parts and collect into a solver, where they are evaluated in an iterative simulation run. Every goal defines target states for geometries to converge towards. This is managed by addressing the fundamental unit that underlies most geometric constructions: points. The solver iteratively attempts to move those ‘control points’ towards their respective goals, while elastically morphing the origin geometry (line, polylines or mesh) in the process. Various goals can be layered on top of each other, whereby an individual point (within the larger system) might be affected by more than one goal at the same time. Points that are impacted by several goals with different objectives converge towards a balanced state. Even if not all participating goals might be resolved fully, the solution lies in releasing the highest amount of force that those goals introduce to the system.

KIGUMI EXTENDED:

Custom-programmed goals allow for intersecting lines to share interlacing points in a flexible matter. Those points can freely slide alongside all their corresponding line domains. Applying vertical pulling forces to all lines – while anchoring some points to the floor – results in an upside-down catenary geometry that emerges from the form generation (Fig. 6). During the iterative simulation process, the network continuously connects through its topology of all line chains and their flexible, hinge-like sliding intersection joints. After hundreds of iterations, all participating constraints (anchor, force, interlacing joint, line length) converge into a stable solution of an arching beam structure (Fig. 7). The form-finding process can be extended through additional

der Struktur dient als Stützpunkt, an dem die Polylinien von innen nach außen ‚wachsen‘. In Einzelschritten fügt der Algorithmus nacheinander Elemente hinzu, wobei dieser die neu erzeugte Diagonale kontinuierlich auf die Stelle mit der geringsten Steifigkeit ausrichtet. Wenn alle Polylinien den Rand des Gitters erreicht haben, stoppt der Algorithmus, und es entsteht ein einzigartiges, selbsttragendes räumliches Struktursystem.

ZIELBASIERTES LÖSEN:

Kangaroo2 dient als leistungsfähige Engine zur Formfindung, die verschiedene Constraints und physikalische Kräfte berücksichtigen kann. Diese kombinatorische Toolbox, die von Daniel Pirker entwickelt wurde, führt zielbasiertes Lösen auf der Grundlage geometrischer Setups durch. Ziele beziehen sich auf zugewiesene Bauteile und fließen in einen Solver ein, wo sie in einem iterativen Simulationslauf ausgewertet werden. Jedes Ziel definiert Sollzustände, denen sich die Geometrien annähern sollen. Dies geschieht durch die Adressierung einer grundlegenden Einheit, die den meisten geometrischen Konstruktionen zugrunde liegt, nämlich von Punkten. Der Solver versucht iterativ, diese ‚Steuerungspunkte‘ in Richtung der jeweiligen Ziele zu bewegen und dabei die Ursprungsgemetrie (Linie, Polylinien oder Netz) elastisch zu verformen. Verschiedene Ziele können übereinandergeschichtet werden, wobei ein einzelner Punkt (innerhalb des größeren Systems) von mehr als einem Ziel gleichzeitig betroffen sein kann. Punkte, die von mehreren Zielen mit unterschiedlichen Zielsetzungen beeinflusst werden, konvergieren zu einem ausgeglichenen Zustand. Auch wenn nicht alle beteiligten Ziele vollständig aufgelöst werden können, liegt die Lösung in der Freigabe der höchsten Menge an Kraft, die diese Ziele in das System einbringen.

KIGUMI EXTENDED:

Individuell programmierte Ziele ermöglichen es, dass sich kreuzende Linien auf flexible Weise Verschneidungspunkte teilen. Diese Punkte können entlang aller zugehörigen Linienbereiche frei hin- und hergleiten. Durch die Anwendung von vertikalen Zugkräften auf alle Linien – bei gleichzeitiger Verankerung einiger Punkte am Boden – ergibt sich eine auf den Kopf gestellte Kettenliniengeometrie, die aus der Formgebung hervorgeht (Abb. 6). Während des iterativen Simulationsprozesses verbindet sich das Netzwerk kontinuierlich über seine Topologie aus allen Linienketten und deren flexiblen, scharnierartig gleitenden Kreuzungspunkten. Nach Hunderten von Iterationen fügen sich alle beteiligten Constraints (Anker, Kraft, Verschränkungsgelenk, Linienlänge) zu einer stabilen Lösung einer bogenförmigen

constraints such as direction goals that further shape the collective body of lines.

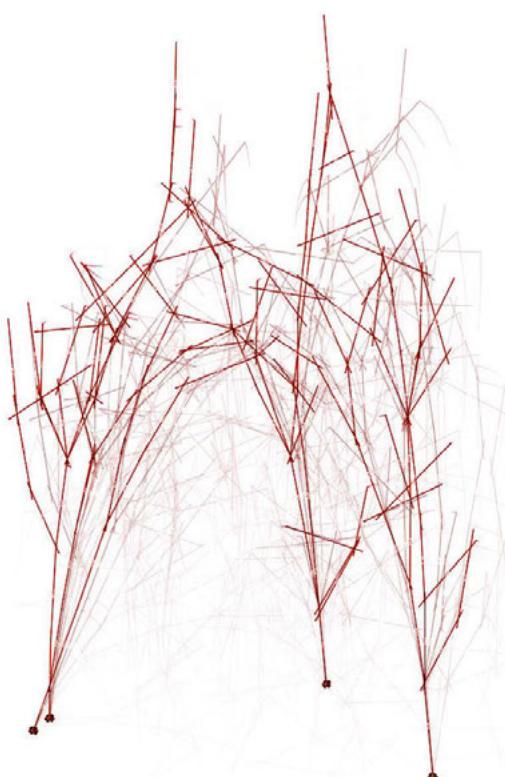
CONCLUSION:

Top-down strategies such as 'hidden' control surfaces that operate as organizing instruments for beam sets, or bottom-up approaches like recursive L-system loops: the wide domain for creating modular beam structures is fundamentally defined by the relationship between part and whole. Managing this intricate relationship is what governs all atomic connections, as well as the collective sum. The immense amount of possibilities for combining simple lines to joint forms is developing with growing access to co-evolving computational algorithms. Digital building blocks can be remixed to advanced form simulators with various orchestrating effects. Feedback from real-time structural analysis is starting to influence beam choreographies in the same way geometric constraints or other coded instructions do. Tapping into those workflows hosts the potential to further investigate a territory between rigid modularity and an organic world of forces, and to probe new formal expressions in the process.

Stabkonstruktion zusammen (Abb. 7). Der Formfindungsprozess kann durch zusätzliche Constraints wie Richtungsziele erweitert werden, die den kollektiven Linienkörper weiter formen.

FAZIT:

Ob Top-down-Strategien wie 'verdeckte' Steuerflächen, die als organisierende Instrumente für Stabgruppen fungieren, oder Bottom-up-Ansätze wie rekursive L-System-Schleifen: Der breite Ansatz zur Erstellung modularer Stabkonstruktionen wird grundsätzlich durch das Verhältnis zwischen dem Teil und dem Ganzem definiert. Die Handhabung dieser komplexen Beziehung bestimmt nicht nur sämtliche Verbindungspunkte, sondern auch die kollektive Summe. Die immense Menge an Möglichkeiten, einfache Linien zu gemeinsamen Formen zu kombinieren, entwickelt sich mit dem wachsenden Zugang zu gleichzeitig entstehenden Rechenalgorithmen. Digitale Bausteine können zu fortschrittlichen Formsimulatoren mit verschiedenen Orchestrierungseffekten neu gemischt werden. Feedback aus der Echtzeit-Strukturanalyse beginnt die Stabchoreografien auf die gleiche Weise zu beeinflussen wie geometrische Regeln oder andere codierte Instruktionen. Die Nutzung dieser Workflows birgt das Potenzial, das Territorium zwischen starrer Modularität und einer organischen Welt der Kräfte weiter zu erforschen und dabei neue formale Ausdrucksformen zu entdecken.



► Fig. 7 | Abb. 7:

Animated geometry of interlaced beams, *Kigumi Extended* (image source: Adam Orlinski / *Conceptual Joining* research project – University of Applied Arts Vienna).

GEOMETRY GEOMETRIE

DESIGN AND RATIONALIZATION

Starting with the general concept of a reciprocal structural system formed by interlocking linear members, a dynamic form-finding process without a distinct design goal developed that nevertheless led to specific articulations.

Structures were designed in a mutual relationship between detail and spatial configuration, employing the principle of interlocking on both the scale of notched joints as well as the spatial positioning of members. ↗¹⁴ This resulted in frameworks in which the architectural definition of spaces was deeply and inseparably intertwined with the characteristics and constraints of the joint details, which in turn were defined by material logic, establishing a direct relationship between space and material.

In this context, the joining principle not only serves the functional purpose of construction, but it becomes fundamental to architectural organization and articulation.

The workshop results show that although the design had complex characteristics referring to the concept of 'naturalness' (Fig. 1) ↗¹⁵, there was a necessity for an underlying systematic and ordering principles if such structure were to be realized with timber beams. Furthermore, such principles were important to eventually generalize the design to some extent in order to translate the concept to other contexts. In the continuation of the workshop results, these ordering principles were identified and developed. A digitized model of the first *Kigumi* prototype was the basis for an iterative workflow of rationalization and optimization to this end (Fig. 2). ↗¹⁶

Investigations on form-finding in a digital hanging model for optimizing structural performance not only helped to refine the realized structure, but also led to further digital studies on the relationships between design freedom and geometric constraints, chaos and order, and space-encompassing structures and structurally optimized form (Fig. 3). ↗¹⁷

ENTWURF UND UMSETZUNG

Ausgehend von einem allgemeinen Konzept eines reziproken Struktursystems aus linearen Stäben entwickelte sich ein dynamischer Formfindungsprozess ohne eindeutiges Entwurfsziel, der jedoch zu spezifischen Ausformungen führte.

Strukturen wurden in einem wechselseitigen Verhältnis von Detail und räumlicher Konfiguration entworfen, wobei das Prinzip des miteinander Verschränkens sowohl auf der Ebene der Überblattungsverbindungen als auch auf der Ebene der räumlichen Positionierung der Stäbe angewendet wurde. ↗¹⁴ Dies führte zu Konstruktionen, in denen die architektonische Definition von Räumen grundlegend und untrennbar mit den Eigenschaften und Anforderungen der Verbindungsdetails verwoben war, die ihrerseits durch die Logik des Materials definiert waren, wodurch diese Strukturen geprägt waren von einer engen Beziehung zwischen Raum und Material.

In diesem Zusammenhang dient das Verbindungsprinzip nicht nur dem funktionalen Zweck der Konstruktion, sondern es wird zum bestimmenden Faktor für die architektonische Organisation und Ausformung.

Die Ergebnisse des Workshops zeigen, dass, obwohl der Entwurf komplexe Merkmale aufwies, die sich auf das Konzept der 'Natürlichkeit' (Abb. 1) ↗¹⁵ beziehen, dennoch ein zu grunde liegendes systematisches und ordnendes Prinzip notwendig war, um eine solche Struktur mit Holzstäben realisieren zu können. Darüber hinaus waren solche Prinzipien wichtig, um den Entwurf zu einem gewissen Grad zu verallgemeinern, damit das Konzept auf andere Kontexte übertragen werden kann. In Fortführung der Workshop-Ergebnisse wurden diese Ordnungsprinzipien identifiziert und entwickelt. Ein digitalisiertes Modell des ersten *Kigumi*-Prototyps war die Grundlage für einen iterativen Arbeitsablauf der Rationalisierung und Optimierung in diesem Sinne (Abb. 2). ↗¹⁶

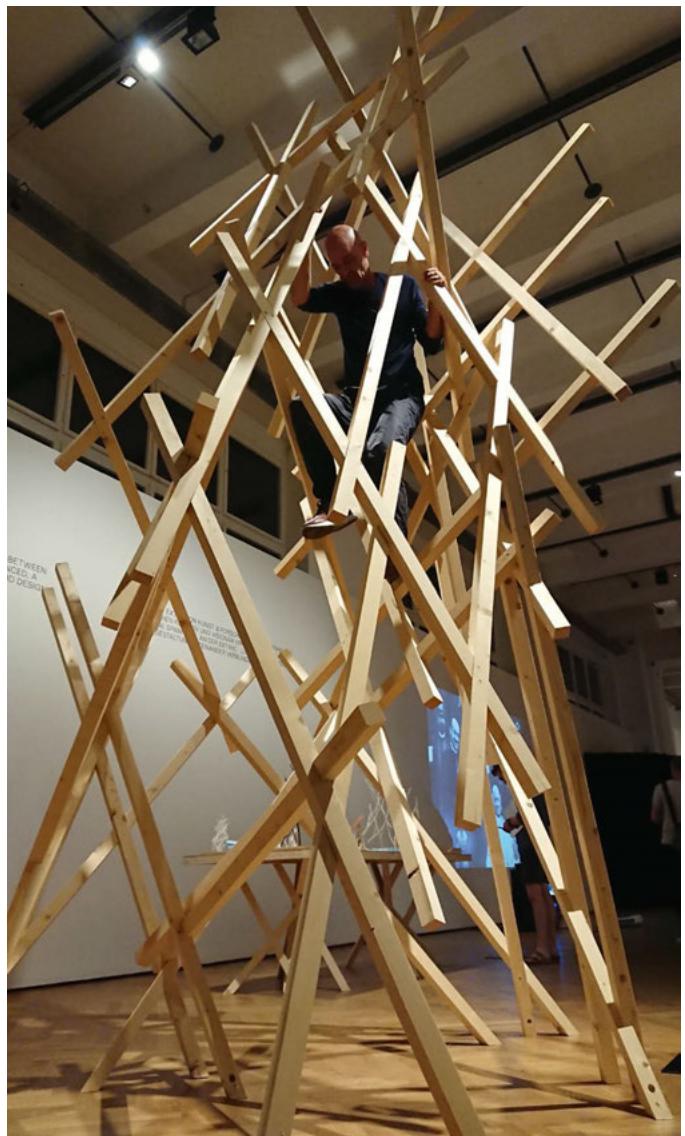
Untersuchungen zur Formfindung im digitalen Hängemodell zur Optimierung der Tragfähigkeit halfen nicht nur bei der Verfeinerung der realisierten Struktur, sondern führten auch zu weiteren digitalen Studien über die Beziehungen zwischen Gestaltungsfreiheit und geometrischen Zwängen, Chaos und Ordnung sowie raumgreifender Kapazität und strukturell optimierter Form (Abb. 3). ↗¹⁷

↗¹⁴ see *Interlocking Spaces : Joints : Plug-In Kit*, p. 80 f.

↗¹⁵ see Sato, J.: *Development of Kigumi Joinery to create 'Naturalness'*, p. 68 ff.

↗¹⁶ see *Interlocking Spaces : Tools : Design to Fabrication*, p. 98 f.

↗¹⁷ see Orlinski, A., Preisinger, C., Heimrath, M.: *Encoded Structures : Kigumi Extended*, p. 112



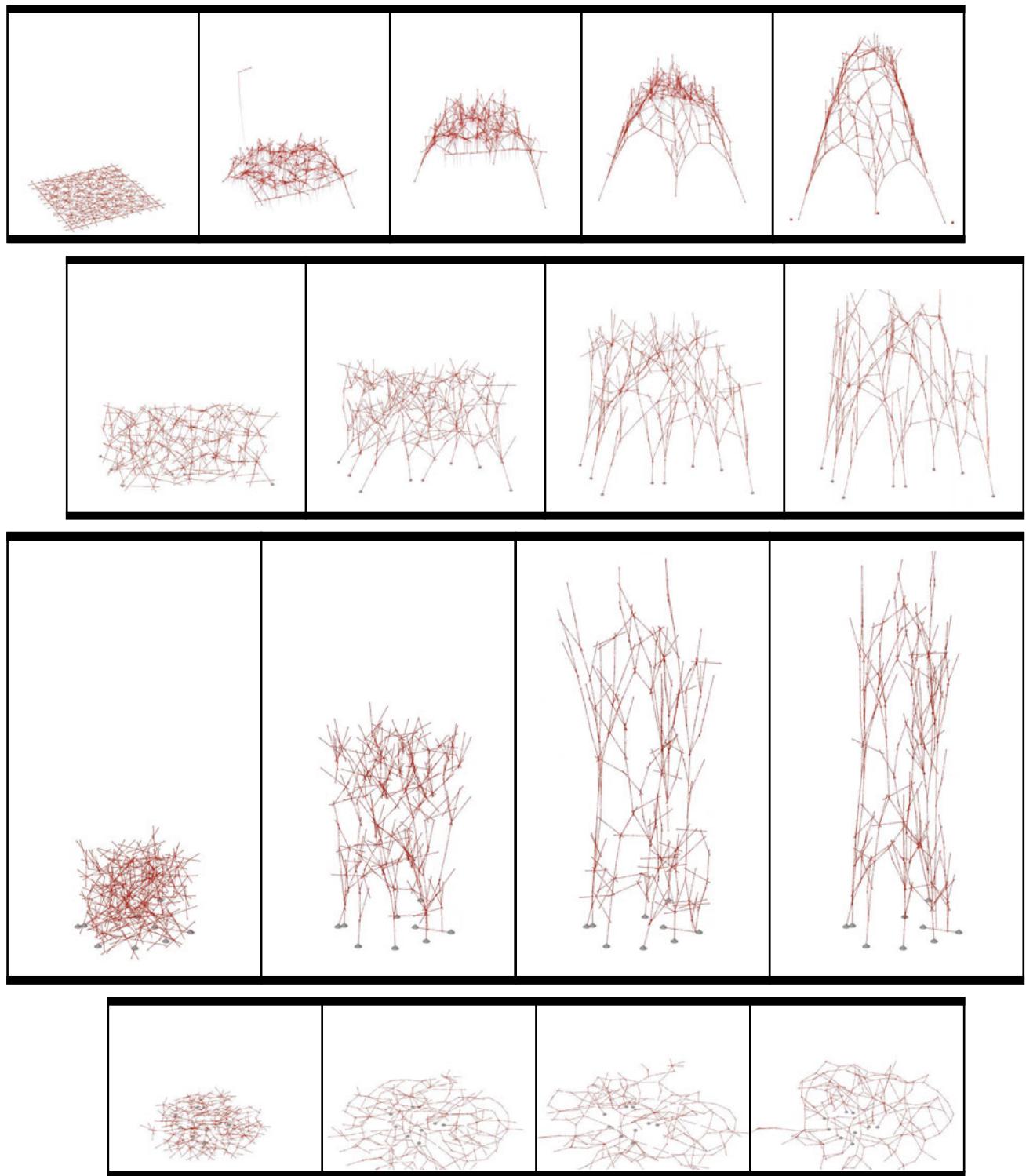
► Fig. 1 | Abb. 1:

Performance artist Daniel Aschwanden interacting with *IS-1* at the opening of the group exhibition *Understanding Artistic Research*, MAK, Vienna 2019.



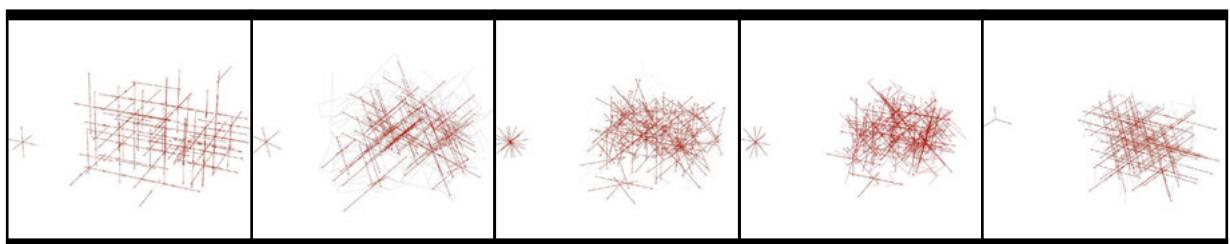
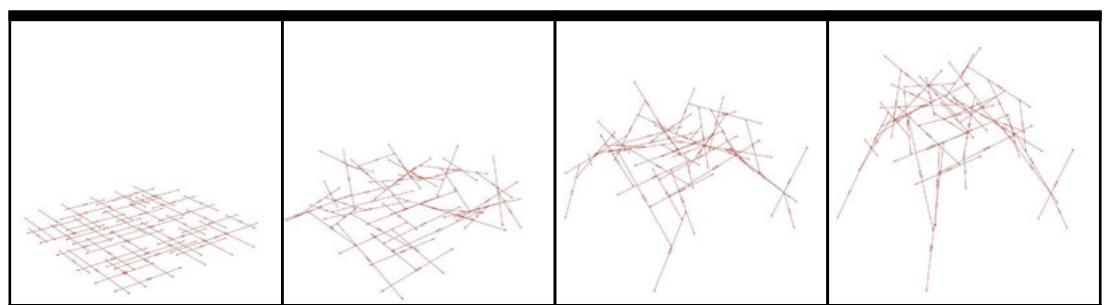
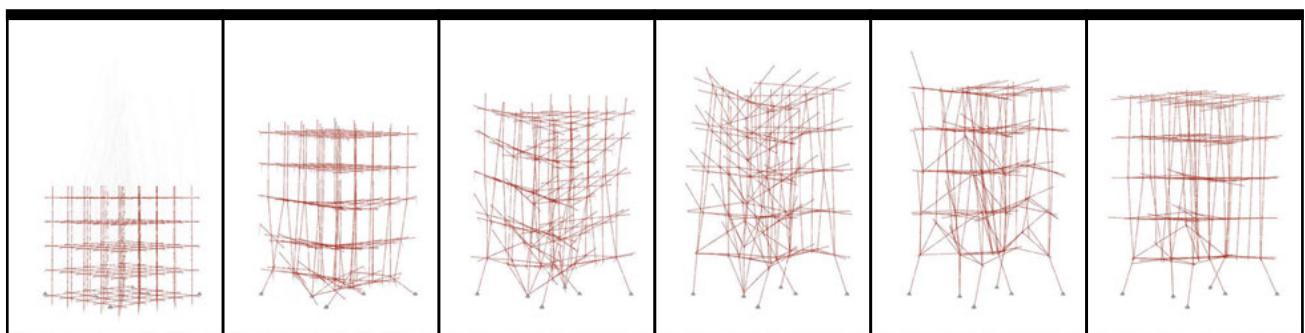
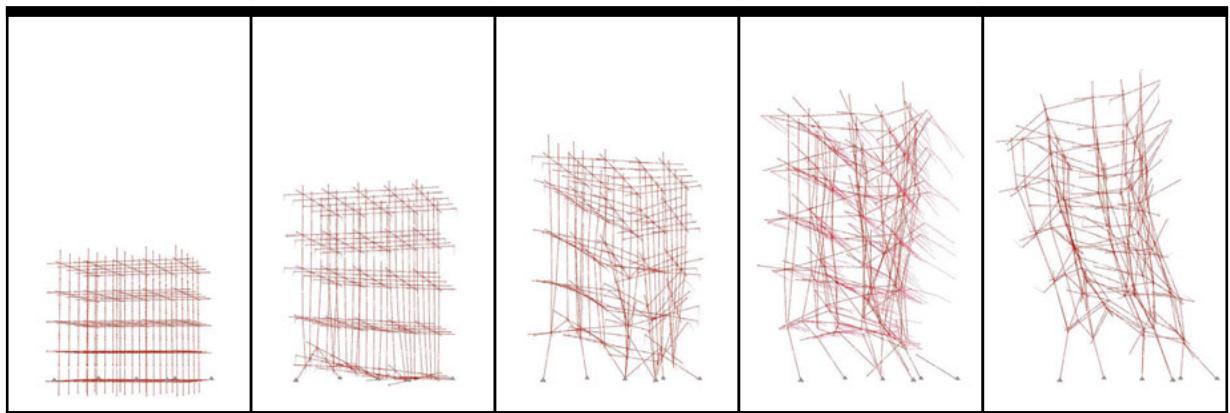
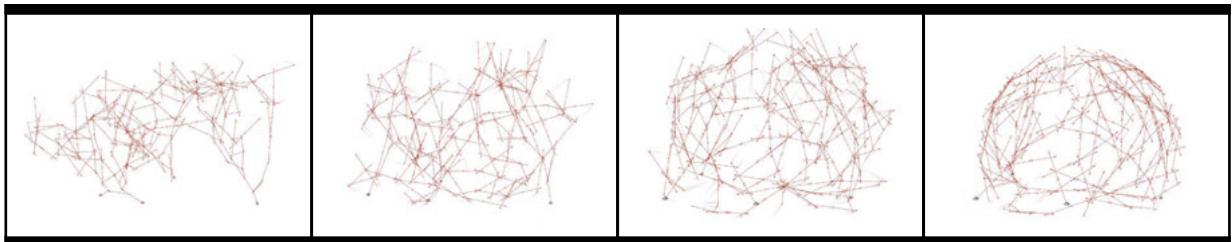
◀ Fig. 2 | Abb. 2:

3D-printed models (from left to right) of the 3D scan of the analog model form the workshop, a rationalized modification of that configuration with members aligned to as few different vectors as possible and the design of the built structure (*IS-1*) that balances irregularity and order.



▲► Fig. 3 | Abb. 3:

Sequences of form-finding studies *Kigumi Extended* by Adam Orlinski.
Line elements of identical length were arranged into frameworks and tested in
physics simulations with various sets of constraints and forces using *Kangaroo3D*.



MODULAR SYSTEM

Subsequent to the realization of the first prototype *IS-1*, the *Kigumi* system was developed towards modularity with the aim of transforming the singular formation into an adaptive design system. This development started with case studies that investigated an application as tables. At first, a specific subsection of *IS-1* was identified as a potential frame module (Fig. 4a). The extracted fraction was modified and refined to become a self-standing construction (Fig. 4b) that condensed the structural principles of the reciprocal system (Fig. 5). Two of these modules were combined and expanded by additional beams that support the tabletop, to form a complete structure (Figs. 6a–d). The beams within the modules are organized in two criss-crossing lattice planes. ↗¹⁸

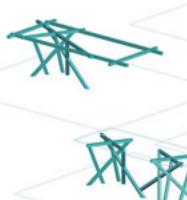
In a further iteration (*T-2a*), the table surface was intersected with these planes and partially shifted to differentiate the usable surface into a split-level configuration (Figs. 7a+b). The transcription of a structural principle into the spatial organization and the articulation of usable interfaces affected a blurring of a clear programmatic definition of the architectural scheme. It introduced a level of uncertainty that had the potential to open the palette of use cases. In this latent ambiguity, there is no ideal or optimized inhabitation scenario; rather, the ‘diffuse functionality’ affords many possible modes of interaction, and a usage must be found in each situation in an active engagement.

Despite shortcomings in terms of structural performance (Fig. 8) and assembly process, this model demonstrated some of these potentials as people interacted with this table (Figs. 9a+b).

Focusing on the structural and geometric development of the *Kigumi* system, the table study *T-2b* was a first test of an interlocking concept that combines beams and surface panels (Figs. 10a+b) ↗¹⁹, which was later implemented into the design of the second large-scale installation *IS-2*.

MODULARES SYSTEM

Im Anschluss an die Realisierung des ersten Prototyps *IS-1* wurde das *Kigumi*-System in Richtung Modularität weiterentwickelt, mit dem Ziel, die singuläre Formation in ein adaptives Designsystem zu transformieren. Diese Entwicklung begann mit Fallstudien, die eine Anwendung für Tische untersuchten. Zunächst wurde ein bestimmter Teilbereich von *IS-1* als potenzielles Modul identifiziert (Abb. 4a). Der extrahierte Teilbereich wurde modifiziert und verfeinert, um eine selbsttragende Konstruktion zu werden (Abb. 4b), in der die strukturellen Prinzipien des reziproken Systems verdichtet sind (Abb. 5). Zwei dieser Module wurden kombiniert und durch zusätzliche Stäbe, die die Tischplatte tragen, zu einer kompletten Struktur erweitert (Abb. 6a–d). Die Stäbe innerhalb der Module sind in zwei sich kreuzenden Gitterebenen organisiert. ↗¹⁸



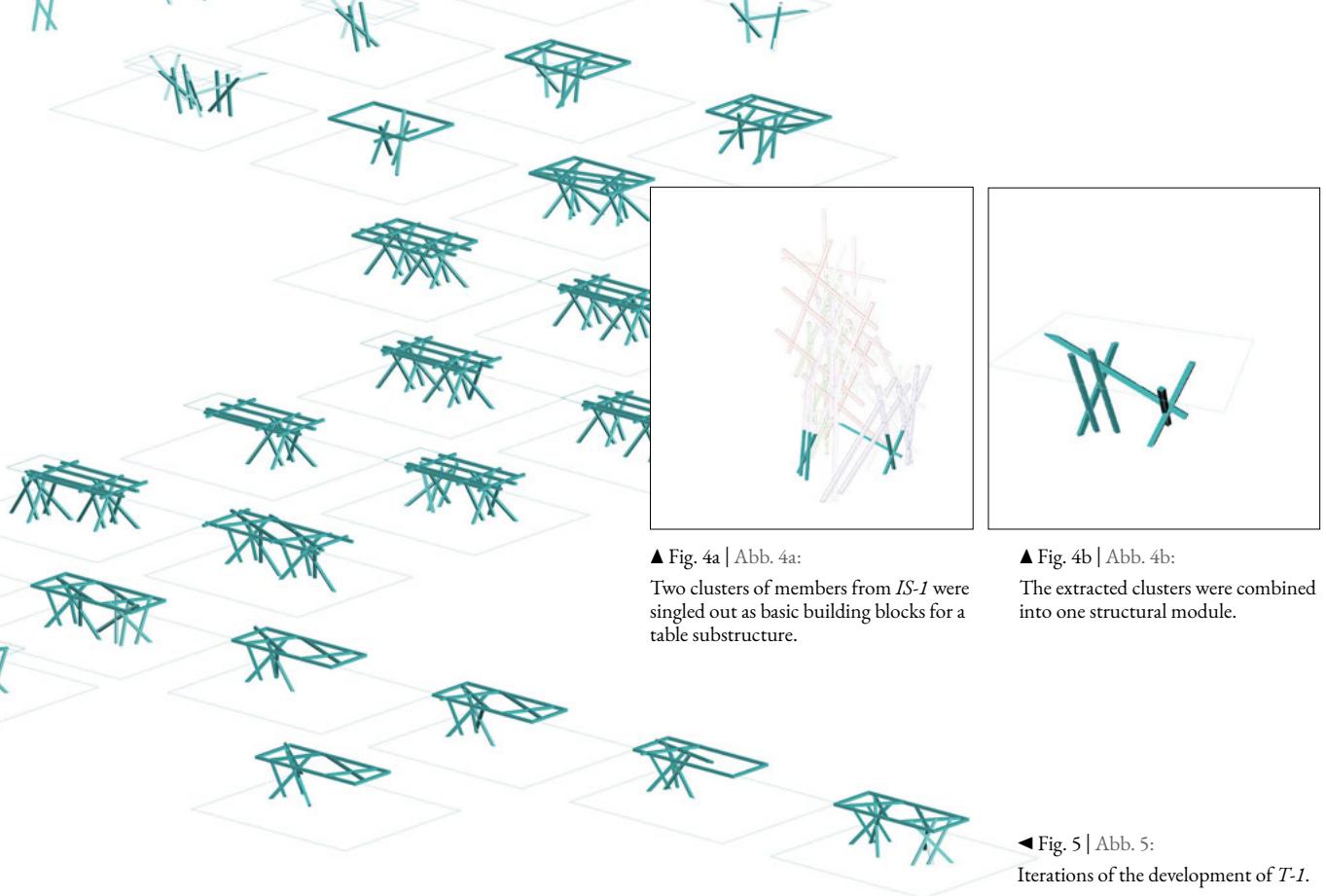
In einer weiteren Iteration der Tischstudien (*T-2a*) wurde die Tischfläche mit diesen Ebenen verschoben und teilweise verschoben, um so die Nutzfläche in eine Split-Level-Konfiguration zu differenzieren (Abb. 7a+b). Die Übertragung eines strukturellen Prinzips in die räumliche Organisation und die Ausformung von nutzbaren Oberflächen bewirkten eine Verwischung der programmativen Definition des architektonischen Schemas. Dies führte zu einer gewissen Unbestimmtheit, die das Potenzial hatte, die Möglichkeiten der Benutzbarkeit zu erweitern. In dieser latenten Unklarheit gibt es kein ideales oder optimiertes Nutzungsszenario, die diffuse Funktionalität bietet vielmehr viele Möglichkeiten der Interaktion, eine Nutzung muss jeweils situationsbezogen in einer aktiven Auseinandersetzung gefunden werden.

Trotz der mangelhaften strukturellen Leistungsfähigkeit (Abb. 8) und des schwierigen Montageprozesses zeigte dieses Modell einige dieser Potenziale, die sichtbar wurden, sobald Menschen mit dem Tisch interagierten (Abb. 9a+b).

Mit dem Fokus auf die strukturelle und geometrische Entwicklung des *Kigumi*-Systems war die Tischstudie *T-2b* ein erster Test eines Konzeptes, in dem die zusätzlichen Flächen Teil des konstruktiven Systems werden (Abb. 10a+b) ↗¹⁹, dieses wurde später im Design der zweiten größeren Installation *IS-2* übernommen.

↗¹⁸ see *Interlocking Spaces : Tools : Design to Fabrication*, p. 98

↗¹⁹ see *Interlocking Spaces : Joints : Detachable Connections*, p. 84 and p. 87



▲ Fig. 4a | Abb. 4a:

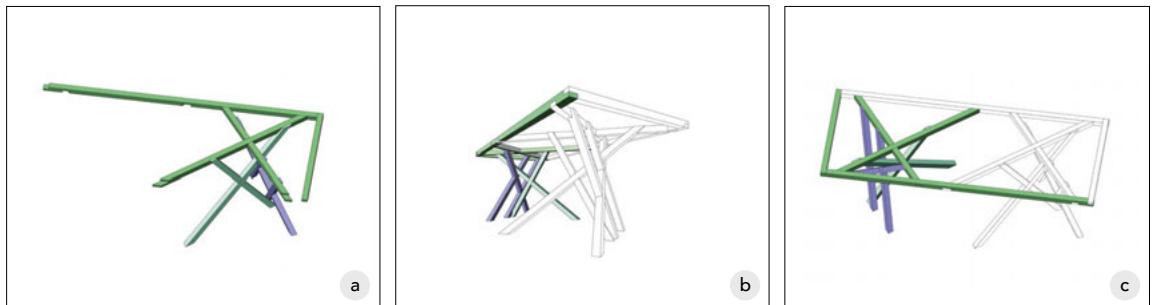
Two clusters of members from *IS-1* were singled out as basic building blocks for a table substructure.

▲ Fig. 4b | Abb. 4b:

The extracted clusters were combined into one structural module.

◀ Fig. 5 | Abb. 5:

Iterations of the development of *T-1*.



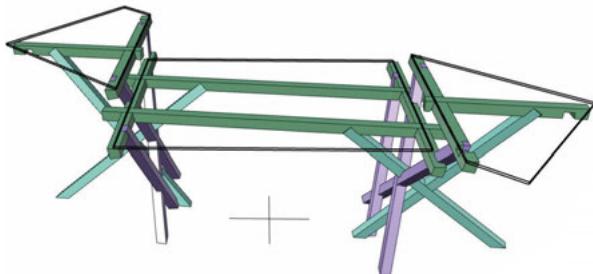
▲▲▲ Figs. 6a-c | Abb. 6a-c:

A configuration of beams (a) is duplicated and rotated 180° (b) to form a complete structure (c).

► Fig. 6d | Abb. 6d:

T-1 as an exhibition display for models and artifacts from the *Conceptual Joining* research process at the *World Wood Days 2019*, Stübing, Austria.





▲ Fig. 7a | Abb. 7a:
The design of *T-2a* employs the same copy-paste principle as in *T-1*.



▲ Fig. 7b | Abb. 7b:
T-2a is designed as a module with spare notches at the periphery to connect with duplicates to form a long linear array.



▲ Fig. 8 | Abb. 8:
The splitting of otherwise continuous beams at the top horizontal layer affected a high density of notches where the tabletop splits.
As a result, some connections had to be screwed for fixation, furthermore the tabletop panel had to be screwed.



▲► Figs. 9a+b | Abb. 9a+b:
T-2a in use at the *Angewandte Festival*, Vienna, 2019 (a) and at the *Conceptual Joining* show at AIL, Vienna, 2019 (b).





▲ Fig. 10a | Abb. 10a:

T-2b consists of a modification of the beam configuration developed in *T-1*, the tips of the beams slot into holes in the plywood tabletop to stabilize the system without additional fasteners.

▼ Fig. 10b | Abb. 10b:

T-3a is a further development of *T-2b* with a more slender hard wood structure. Beams in cherry wood, tabletop in birch plywood.



MODULES AND COMPLEXITY

The modules of the table studies were enlarged and adapted to an architectural setting. Various modular systematics were investigated in digital models, negotiating repetition and diversity and examining the thresholds of design flexibility within structural constraints.

Two concepts of a modular system emerged. One used spatial modules, designed as robust and stable structural units that could be aggregated into a simple logic of linear arrays in x and y directions and stacked vertically (Fig. 11).

The other category operated with less rigid, but more versatile components. These could be arranged into a wide variety of configurations using a complex syntax (Fig. 12). For the realization of the *IS-2* installation, the two systems were combined (Fig. 13) using the advantage of one to compensate for the weakness of the other, merging stability and versatility into a comprehensive version of the *Kigumi* system (Figs. 14a–c).

The modular design concept manifested itself in aggregations formed by a limited set of part types, each present in multiple instances (Fig. 15). The prefab beam elements were designed with multiple notches to facilitate all possible combinations of modules, which produces a redundancy of joint details that offers a variety of recombinations. ↗²⁰

The configuration of beams that was realized as *IS-2* (Fig. 16) was expanded by a set of plywood panels interlocking with the linear members. These surfaces are not part of the modular system but are rather positioned according to local conditions, which adds a layer of design interventions independent from modular constraints. On one hand, they perform as bracing elements to stabilize the overall framework at strategic locations, on the other, they indicate possible use cases and thus refer to an application as part of a building (Fig. 17).

Within the spatial modules (Fig. 14c), beams are positioned using a limited set of angles and distances between them. That is why even though the beam elements were specifically designed for a distinct role and relative position, to some extent, they also had a universal functionality within the modular system. With some limitations, elements could be repositioned or added independently from their prescribed relative location, this provided an additional

MODULE UND KOMPLEXITÄT

Im weiteren Verlauf wurden die in den Tischstudien entwickelten Module vergrößert und an einen architektonischen Kontext angepasst. Verschiedene Modulsysteme wurden in digitalen Modellen untersucht, wobei Wiederholung und Vielfalt miteinander verhandelt und die Möglichkeiten der gestalterischen Freiheit innerhalb konstruktiver Rahmenbedingungen untersucht wurden.

Es bildeten sich zwei Konzepte eines modularen Systems heraus. Beim einen wurden geräumige Module verwendet, die als robuste und stabile Struktureinheiten konzipiert waren. Diese konnten in einer einfachen Logik von linearen Anordnungen in x- und y-Richtung zusammengefügt und vertikal gestapelt werden (Abb. 11).

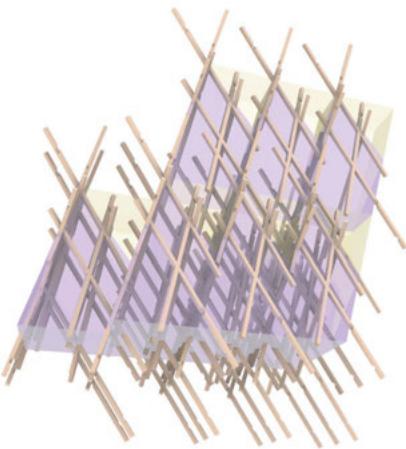
Das andere System arbeitete mit weniger stabilen, aber vielseitigeren Komponenten. Diese konnten mit Hilfe einer komplexen Syntax zu einer Vielzahl von Konfigurationen angeordnet werden (Abb. 12). Für die Realisierung der *IS-2*-Installation wurden diese beiden Systeme schließlich kombiniert (Abb. 13), wobei der Vorteil des einen die Schwäche des anderen ausglich. So konnte eine Version des *Kigumi*-Systems umgesetzt werden, die sowohl stabil als auch vielseitig war (Abb. 14a–c).

Das modulare Konstruktionskonzept manifestierte sich in Aggregationen, die aus einem begrenzten Sortiment von Bauteiltypen gebildet wurden, die jeweils in mehreren Ausführungen vorkamen (Abb. 15). Diese vorgefertigten Stabelemente wurden mit mehreren Ausklinkungen versehen, um alle möglichen Kombinationen von Modulen zu berücksichtigen, was zu einer Redundanz der Verbindungsdetails führte. ↗²⁰

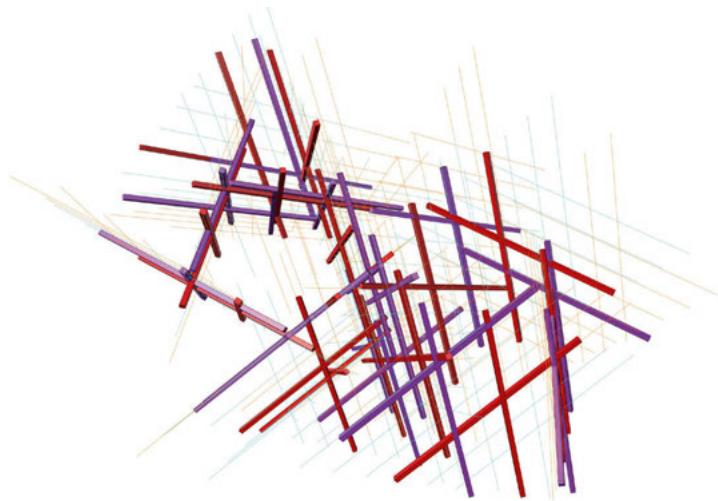
Die als *IS-2* realisierte Stabkonstruktion (Abb. 16) wurde durch eine Reihe von Sperrholzplatten erweitert, die mit den linearen Elementen verbunden sind. Diese Flächen sind nicht Teil der modularen Logik, sondern werden entsprechend der jeweiligen lokalen Bedingung positioniert, was zusätzliche, von den Einschränkungen des Modulsystems unabhängige Gestaltungsfreiheiten mit sich bringt. Die Platten fungieren einerseits als aussteifende Elemente, die die Konstruktion an strategischen Stellen stabilisieren, andererseits deuten sie mögliche Nutzungen an und verweisen so auf eine Anwendung als Teil von Gebäuden (Abb. 17).

Innerhalb der Module (Abb. 14c) wurden die Stäbe unter Verwendung einer begrenzten Anzahl von Winkeln und Abständen zueinander positioniert. Daher hatten die Stabelemente, obwohl sie speziell für eine bestimmte Rolle und eine relative Position entworfen wurden, bis zu einem gewissen Grad auch eine universelle Funktionalität innerhalb des

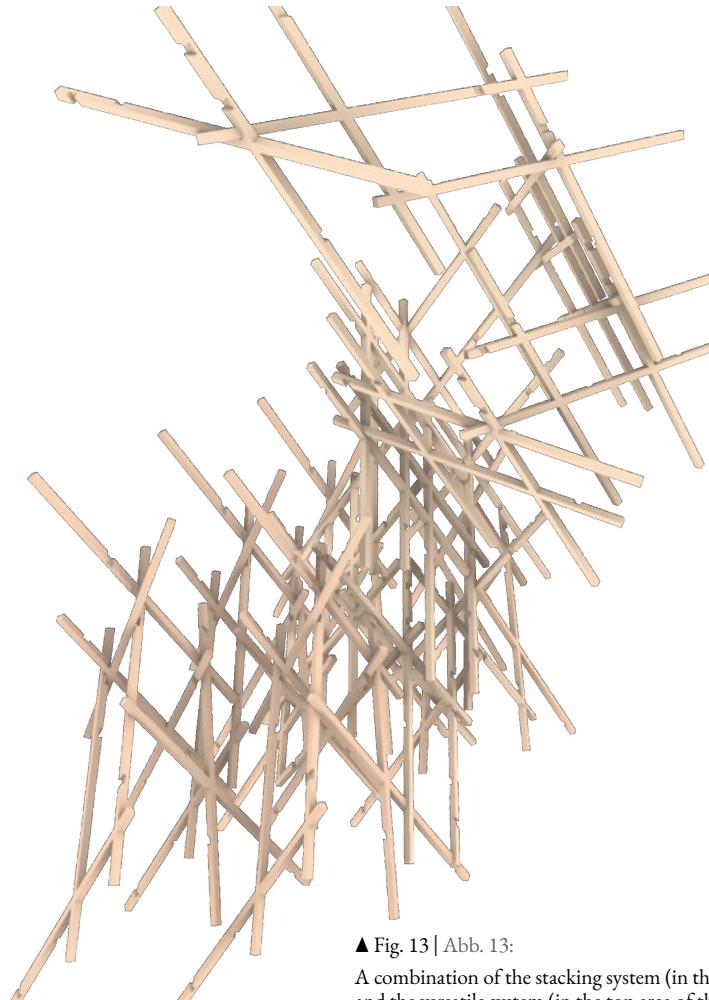
↗²⁰ see *Interlocking Spaces : Joints : Open Joints*, p. 88 ff.



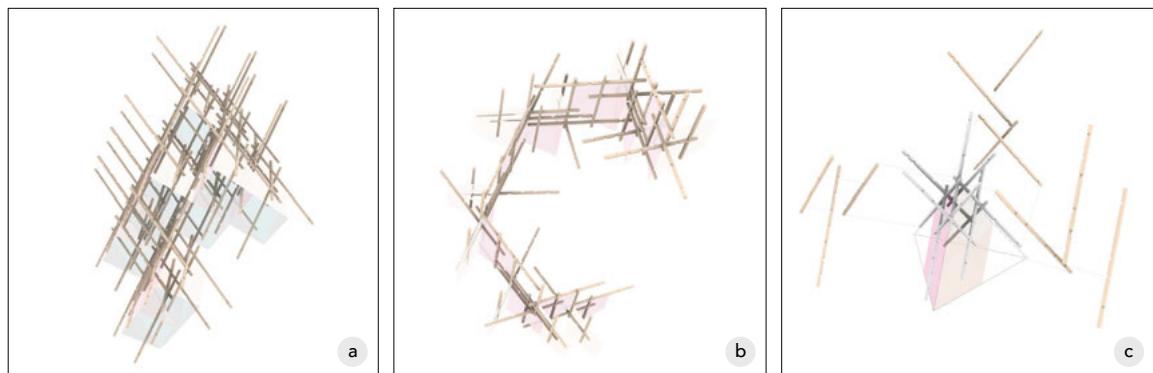
▲ Fig. 11 | Abb. 11:
Diagram of a system of identical spatial
modules which can be stacked and arrayed.



▲ Fig. 12 | Abb. 12:
Diagram of a possible configuration of a system of two types of spatial
modules, which can form a larger module. These modules would not be
stable without an assembly of multiple module instances.

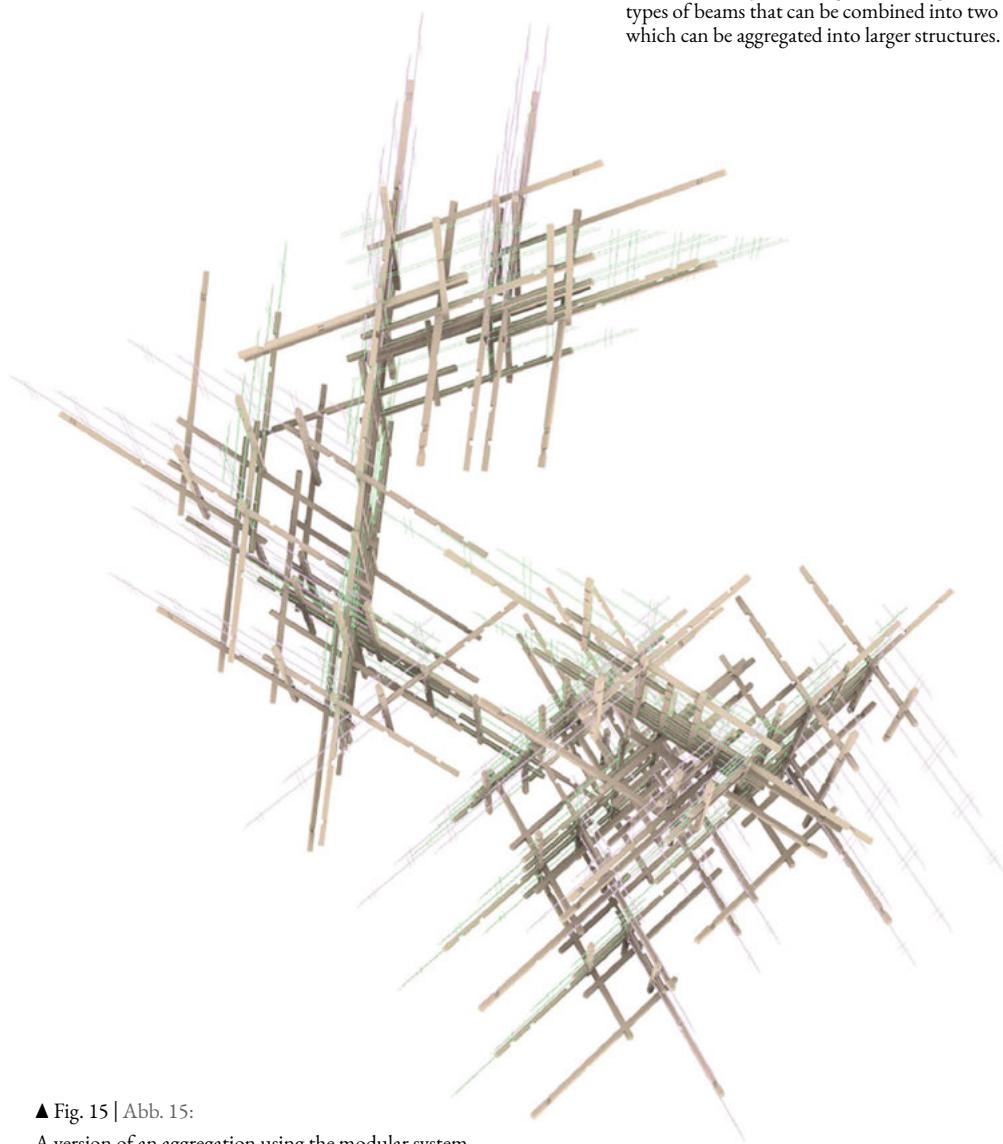


▲ Fig. 13 | Abb. 13:
A combination of the stacking system (in the bottom area of the structure)
and the versatile system (in the top area of the structure).



▲ Figs. 14a–c | Abb. 14a–c:

The two systems merged together into a new system that can form both linear arrays (stacking) (a) and angled arrays (b) by using ten types of beams that can be combined into two different modules (c) which can be aggregated into larger structures.



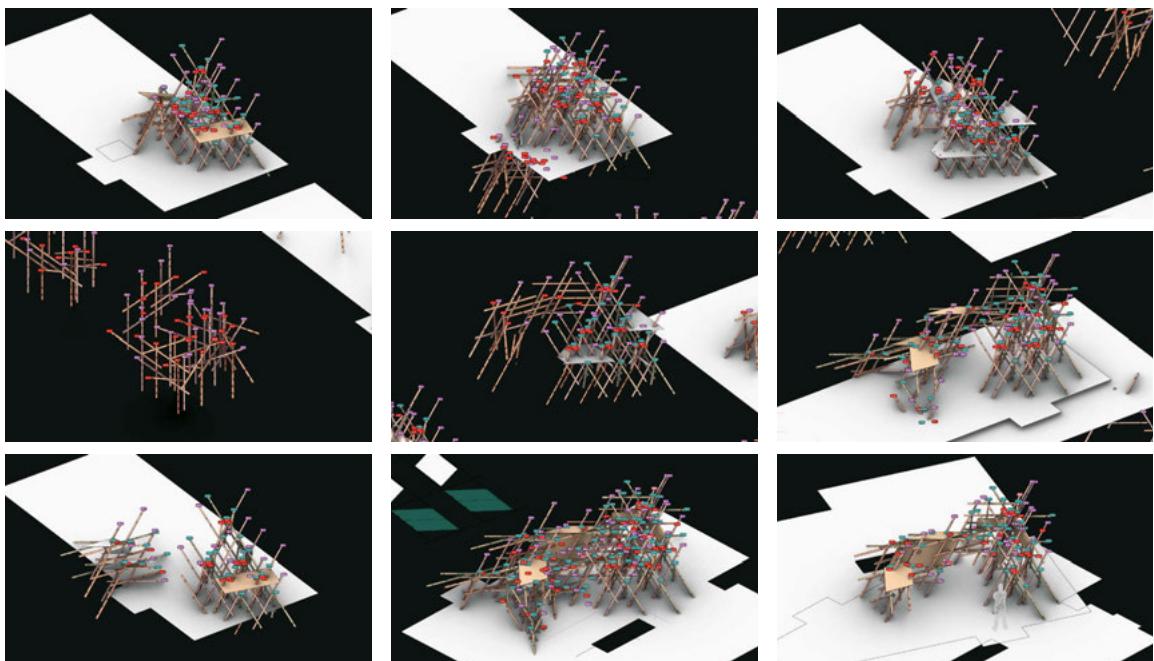
▲ Fig. 15 | Abb. 15:

A version of an aggregation using the modular system.



◀ ▲ Fig. 16 | Abb. 16:
IS-2 installation for the *Conceptual Joining* show at AIL, Vienna, 2019.
Photo © Zara Pfeifer (left)

▼ Fig. 17 | Abb. 17:
Studies of different possible configurations of the *IS-2* system.



layer of design flexibility allowing for local modifications. In this way, for example, the structure could be stabilized locally, which was especially helpful at the boundary conditions where the structure was less dense and thus more ductile (Figs. 18a+b). Furthermore, the soft wood and the simple joints would enable further ad hoc alterations in the build-up process.

SPECULATION

Whilst the table models were designed for a concrete usage, the larger installations referred to possible inhabitations on a more general and abstract level (Fig. 19). Especially *IS-2* demonstrates the versatility of a flexible (timber construction) design system based on *Kigumi* principles.

In further developments, the selection of structural members could be expanded to include elements with larger spans and cross sections to accommodate larger-scale architectural activations, eventually becoming a comprehensive building construction system. Picking up the concept of a ‘diffuse functionality’ ^{↗ 21} as a result of mediating geometric and structural constraints with functionality, the assemblies formed by this system provide usability merely as approximations (Fig. 20).

This ambivalent condition of ‘more or less’ binds the architectural environments to the physical reality of a joinery-based material practice.

A strong presence of ‘differentness’ is inherent to these structures, which aims at inviting users to a dialogue, inducing a process of inhabitation rather than adapting to predefined standard requirements.

modularen Systems. Mit einigen Einschränkungen konnten diese Elemente unabhängig von ihrer vorgesehenen relativen Position neu positioniert oder hinzugefügt werden, was eine zusätzliche Ebene der Designflexibilität darstellte und lokale Modifikationen ermöglichte. Auf diese Weise konnte zum Beispiel die Struktur lokal stabilisiert werden, was besonders an den Rändern hilfreich war, wo die Struktur weniger dicht und damit duktiler war (Abb. 18a+b).

Darüber hinaus würden das weiche Holz und die einfachen Details weitere Ad-hoc-Änderungen im Aufbauprozess ermöglichen.

SPEKULATIONEN

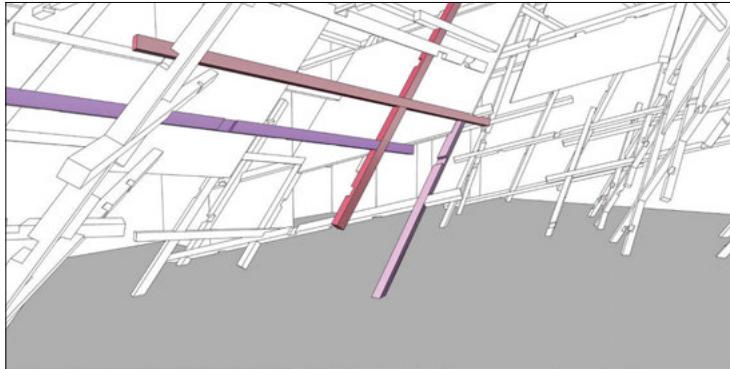
Während die Tischmodelle für eine konkrete Nutzung konzipiert waren, verwiesen die größeren Installationen auf mögliche Bespielungen auf einer allgemeineren und abstrakteren Ebene (Abb. 19). Insbesondere bei *IS-2* wurde die Vielseitigkeit eines flexiblen Konstruktionssystems sichtbar, das auf *Kigumi*-Prinzipien basiert.

In weiteren Entwicklungen könnte die Palette der Bauteile um Elemente mit größeren Spannweiten und Querschnitten erweitert werden, um architektonische Aktivierungen im größeren Maßstab zu ermöglichen und so ein umfassendes Baukonstruktionssystem zu etablieren. Das Konzept einer ‚diffusen Funktionalität‘ ^{↗ 21} aufgreifend, die sich aus der Vermittlung zwischen geometrischen und strukturellen Zwängen und einer Funktionalität ergibt, bieten die durch dieses System gebildeten Ensembles eine Nutzbarkeit lediglich als Annäherung an (Abb. 20).

Dieser ambivalente Zustand des ‚mehr oder weniger‘ bindet die architektonischen Umgebungen an die physische Realität einer Materialisierung.

Diesen Strukturen ist eine starke Präsenz der ‚Andersartigkeit‘ inhärent, die darauf abzielt, Nutzer*innen zum Dialog einzuladen und dadurch einen Prozess des Aneignens zu bewirken, anstatt sich an vordefinierte Standardanforderungen anzupassen. Dies führt zu einer anderen, einladenderen Art der Vielseitigkeit in der Architektur im Vergleich zu konventionellen, utilitaristischen Modulsystemen.

^{↗ 21} see *Interlocking Spaces : Geometry : Modules and Complexity*, p. 122



▲ Fig. 18a | Abb. 18a:

A part of the structure *IS-2* as it was planned in the digital model turned out to be too weak in the realization.



▲ Fig. 18b | Abb. 18b:

A plywood panel and a beam were added in the build-up process to improve stability locally.

Photo © Zara Pfeifer



◀ Fig. 19 | Abb. 19:

Performance artist Daniel Aschwanden interacting with *IS-1* at the atrium of the University of Applied Arts Vienna, 2019.



▲ Fig. 20 | Abb. 20:

During the construction of *IS-2* a constellation of beams and panels frame an enclosed space and appear as an unfinished building envelope.

INTRO

EINLEITUNG

Wood not only serves as a sustainable resource, but also offers the potential to develop complex structural models and architectural spaces that are derived from its natural properties.

Trees naturally form intricate configurations of roots, branches, leaves, etc. that correspond to multiple forces and conditions. As a result, wood is a dynamic, inhomogeneous material with varying densities, directional grains, and a complex geometry. ↗²²

In the current practice of wood-based construction, trunks are cut into rectilinear elements, then the more irregular parts of the tree are chipped and processed further into timber products. The resulting standardized components have the highest possible homogeneous quality and a designed and predictable performance, and they can be optimally manufactured and controlled by industrial machines.

On the other hand, nowadays, computational methods such as 3D scanning and structural analysis allow designers to cope with the irregular complexity of the natural material and embrace its heterogeneity.

In contrast to a more prevalent design approach that starts with a predefined scheme that adapts building elements to it, this project seeks to identify the principles embedded in the material's logic that offer significant implications for architectural structures in order to investigate emergent formations. Studies driven by such material-oriented design systematics are aimed at producing spatial frameworks that mediate the intelligence and aesthetics of the irregular construction resource with a designed ordering logic.

Holz dient nicht nur als nachhaltige Ressource, sondern bietet auch das Potenzial, komplexe Strukturmodelle und architektonische Räume zu entwickeln, die von den materialinhärenten Eigenschaften abgeleitet sind.

Bäume bilden von Natur aus komplizierte Gebilde aus Wurzeln, Ästen, Blättern usw., die den unterschiedlichsten Krafteinwirkungen und Umgebungsbedingungen entsprechen. Dadurch ist Holz ein dynamisches, heterogenes Material mit unterschiedlichen Dichten, gerichteten Faserverläufen und einer komplexen Geometrie. ↗²²

Im heutigen Holzbau werden Stämme zu linearen und rechtwinkligen Elementen geschnitten oder zerteilt und zu verklebten Holzprodukten weiterverarbeitet. Die unregelmäßigeren Teile des Baumes werden zumeist lediglich thermisch verwertet oder zu Zellstoff verarbeitet. Die so erzeugten standardisierten Bauteile haben eine größtmögliche homogene Qualität, ein geplantes und vorhersagbares Verhalten und können von industriellen Maschinen optimal gefertigt und verarbeitet werden.

Andererseits erlauben heutzutage rechnergestützte Methoden wie 3D-Scannen und digitale Berechnungsmodelle Entwerfer*innen, mit der unregelmäßigen Komplexität des natürlichen Materials umzugehen und seine Heterogenität zu nutzen.

Im Gegensatz zum gängigen Entwurfsansatz, der auf einem abstrakten Schema basiert und die Bauelemente daran anpasst, versucht dieses Projekt, die bereits in der Logik des Materials eingebetteten Prinzipien zu identifizieren und produktiv zu nutzen. Als Grundlage für einen Entwurfsprozess haben diese signifikante Auswirkungen auf die Konzeption architektonischer Strukturen. Untersuchungen mit einer solchen materialorientierten Entwurfssystematik zielen darauf ab, räumliche Gefüge zu schaffen, die die Intelligenz und Ästhetik der unregelmäßigen Bau-Ressource mit einer gestalteten Ordnungslogik verhandeln.

↗²² see Lichtenegger, H.: *Cellulose Nanofibers in Wood*, p. 22 ff. and Müller, U., Teischinger, A.: *Connections in Wood and Material Efficiency*, p. 30 ff.



GEOMETRY

GEOMETRIE

ABSTRACTED NATURE

Amongst the specific properties of wood as a construction material, the moments of bifurcation are one of the most particular characteristics that constitute its irregular nature. When considered as standard building material, these singularities represent disruptions to an otherwise homogenous performance. However, looking at wood in its original form, as a less abstracted entity, bifurcating branches appear as integral elements in the structural system of a tree. From this perspective, the alleged 'disturbances' appear as optimized nodes, allowing for a continuous flow of forces. ↗²³

Can we make use of this intelligence in construction? What if wood were used as a form, rather than as an abstracted material?

In pre-industrial times, specific grown forms of trees were used as hand tools,¹ selected as high-performance components for shipbuilding (Fig. 1) and in traditional vernacular architecture in Japan. ↗²⁴

In contemporary architectural research, examples of an approach to utilizing such forms are starting to appear, e.g., the *Wood Chip Barn* project,² in which Y-shaped tree forks were used to approximate a truss. Building on such precedents, *Branch Formations* on the other hand aims at deriving possible space-defining and structural schemes from the inherent characteristics of wood, deliberately waiving a predefined application. To develop a bottom-up, material-based methodology, both branch-part characteristics and their relationship to one another are the two main criteria to be investigated.

The most challenging aspect is the irregular geometry of branch parts. Such non-standard elements can hardly be processed within a standard industrial production chain and the uniqueness of each part introduces the challenge of organizing complex data sets. ↗²⁵

ABSTRAHIERTE NATUR

Betrachtet man Holz als Baumaterial, zählen die Gabelungen zu den vielen spezifischen Eigenschaften und sind ein besonderes Merkmal, das seine unregelmäßige Natur ausmacht. Wird Holz als Standard-Baumaterial eingesetzt, stellen diese Singularitäten Unterbrechungen einer homogenen Leistungsfähigkeit dar. Betrachtet man Holz jedoch in seiner ursprünglichen Form, als ein weniger abstrahiertes Gebilde, stellen Astverzweigungen integrale Elemente im strukturellen System eines Baumes dar. Aus dieser Perspektive erscheinen die vermeintlichen Störungen als optimierte Knotenpunkte, die einen kontinuierlichen Kraftfluss ermöglichen. ↗²³

Können wir diese Intelligenz für Konstruktionen nutzen? Was wäre, wenn Holz als Form und nicht als abstraktes Material verwendet würde?

In vorindustrieller Zeit wurden spezifische Wuchsformen von Bäumen als Handwerkszeug verwendet,¹ als Hochleistungsbauteile für den Schiffsbau ausgewählt (Abb. 1) und teilweise auch in der traditionellen Architektur in Japan eingesetzt. ↗²⁴

In der zeitgenössischen Architekturforschung tauchen bereits erste Beispiele für einen Ansatz zur Nutzung solcher Formen auf, zum Beispiel im Projekt *Wood Chip Barn*,² bei dem y-förmige Baumgabeln zusammengefügt wurden, um in Annäherung einen Fachwerkträger zu bilden.

Aufbauend auf solchen Beispielen zielte *Branch Formations* darauf ab, mögliche raumdefinierende und strukturelle Schemata aus den inhärenten Eigenschaften von Holz abzuleiten, wobei bewusst auf eine vordefinierte Nutzungsmöglichkeit verzichtet wurde. Um eine materialbasierte Bottom-up-Methodik zu entwickeln, waren sowohl die Eigenschaften der Teile als auch ihre Beziehung zueinander die beiden Hauptkriterien, die es zu untersuchen galt.

Der herausforderndste Aspekt war die unregelmäßige Geometrie von Astgabeln. Solche nicht standardisierten Elemente können kaum innerhalb einer industriellen Standard-Produktionskette verarbeitet werden, und die Einzigartigkeit jedes Teils bringt die Herausforderung mit sich, komplexe Datensätze organisieren zu müssen. ↗²⁵

↗²³ see *Branch Formations : Joints : Ready-made Joint*, p. 190

↗²⁴ see Raith, K.: *Wood Construction – On the Renewal of an Ancient Art*, p. 90

↗²⁵ see *Branch Formations : Tools : Catalog – Parametric Structural Analysis*, p. 160–171

bei de
den
(stafr
jeder
Plank
ster,
Helfe
baus
Helfe
Schr
mach
Die
Küns
gefär
auch
außer
Die
Haus
öfter
lige F
Ports
3 Fuf
Einflu
ser g
In e
der
frem
oder
den
das b
eine
Lehrt
Aufna
Im
Anza
zeit i
eines
Hiera
Sie +
aber

Der

Die E
fahre
es ur
ausr

Gelenkketten (Ledemall) zum Übertragen von Kurven. Dieses Werkzeug war Eigentum jedes Zimmermanns, das er in einer Kiste ebenso aufbewahrte wie auch das Kalfatwerkzeug zum Dichten der Plankennähte mit Werg und Pech. Mit dieser, meist von ihm ausgeschmückten Kiste war er relativ beweglich und konnte in Zeiten mangelnder Arbeit als Schiffszimmermann auf Segelschiffen anheuern.

Die Werft stellte die Hebezeuge wie Hubschrauben, Winden oder Taijen, die an provisorisch aufgestellten Böcken angebracht wurden. Vereinzelt waren auch große, feste Kräne für das Einsetzen der Masten im Gebrauch wie das Danziger Krantor, das 1444 vollendet wurde. Mechanische Werkzeuge kamen erst später auf. Beim Bau der größten Holzklipper setzte der Amerikaner Donald Mackay um 1850 bereits dampfbetriebene schwenkbare Bandsägen ein, um Spanen mit schrägen Außenseiten – mit Schmiege – aussägen zu können.

Der Aufwand eines Schiffbaus führte früher als bei anderen Handwerkszweigen zur Arbeitsteilung. Bereits

Unten
Auswahl des Schiffbauholzes. Stich. – Aus: Encyclopédie
Methodique, 1787, Tafel 100

Links
Aus einer Astgabel (oben) wird mit dem Beil ein Kniestück (unten) herausgearbeitet. Stich. – Aus: Instruction, 1804,
Tafel 27



▲ Fig. 1 | Abb. 1:

Selection of wood for shipbuilding, from: Encyclopédie méthodique, Paris 1787 (scanned page from: Broelmann, J.: *Schiffbau – Handwerk, Baukunst, Wissenschaft, Technik*).

Source: 'Deutsches Museum, München, Bibliothek, 2000/Gesch. 650.109'.

A comparison of tree species shows that deciduous trees form crowns and branches with larger diameters, suggesting that hardwood branches are more suitable as ready-made components than those of coniferous trees. Crowns account for a significant portion of a tree and are typically disregarded for construction, leaving a lot of its potential unused. This becomes especially problematic when considering climate change. Projections in forestry research³ for Central Europe show that the stocks of the most commonly used conifer species like spruce will decrease because deciduous trees seem to be more robust in warmer and drier climates.⁴ This underscores the relevance of a technique that makes use of neglected yet valuable resources. ↗²⁶

Simplifying branches as abstracted digital models is the base condition for a systematic working method. 3D-scanned elements can be translated into axis models, allowing for studies and simulations with large sets of digital parts. ↗²⁷

JOINING PRINCIPLES

The growth pattern of trees forms strands of fibers, which constitute the distinctly heterogeneous characteristic of wood.

To activate the structural potential of this property, branch parts are joined along their grain orientation, thus following the principle of the natural system.

↗²⁸

However, as an artificial entity, a reconfiguration of the natural elements allows for a modification of the original that embeds new functionalities. The naturally cantilevering branches can be rearranged into closed loops, forming structural cells and providing a greater versatility as components for architectural purposes (Fig. 2). To compensate for the large variety of forms and different branch lengths within a flexible design system, aggregates can be joined using linear bridging elements (Fig. 3). Joining parts directly requires a lesser amount of joints, but also requires a more precise selection mechanism in order to match the available specimens (Fig. 4). The limitation of this geometric flexibility has the advantage of creating frameworks with increased stability, therefore the latter approach was pursued in this project.

Ein Vergleich von Baumarten zeigt, dass Laubbäume Kronen und Äste mit größeren Durchmessern bilden, was darauf hindeutet, dass sich Äste aus Hartholz (von Laubbäumen) besser als Fertigteile eignen als die von Nadelbäumen. Die Krone stellt einen beträchtlichen Teil eines Baumes dar, der typischerweise für Konstruktionen nicht beachtet wird, wodurch viel Potenzial ungenutzt bleibt. Dies wird besonders problematisch, wenn man den Klimawandel mit einbezieht. Prognosen der Wald-Forschung³ für Mitteleuropa zeigen, dass die Bestände der am häufigsten verwendeten Nadelbaumarten wie der Fichte abnehmen werden, da Laubbäume robuster gegenüber wärmerem und trockenerem Klima zu sein scheinen.⁴ Dies unterstreicht die Relevanz einer Vorgehensweise, die auf vernachlässigte, aber wertvolle Ressourcen zurückgreift. ↗²⁶

Die Vereinfachung von Ästen zu abstrahierten digitalen Modellen ist die Grundvoraussetzung für eine systematische Arbeitsweise. 3D-gescannte Elemente wurden zunächst in Achsmodelle übersetzt, was Studien und Simulationen mit großen Mengen digitaler Daten und präzise Berechnungen ermöglichte. ↗²⁷

FÜGEPRINZIPIEN

Das Wachstumsschema von Bäumen bildet Faserstränge aus, die die ausgeprägte heterogene Eigenschaft von Holz ausmachen.

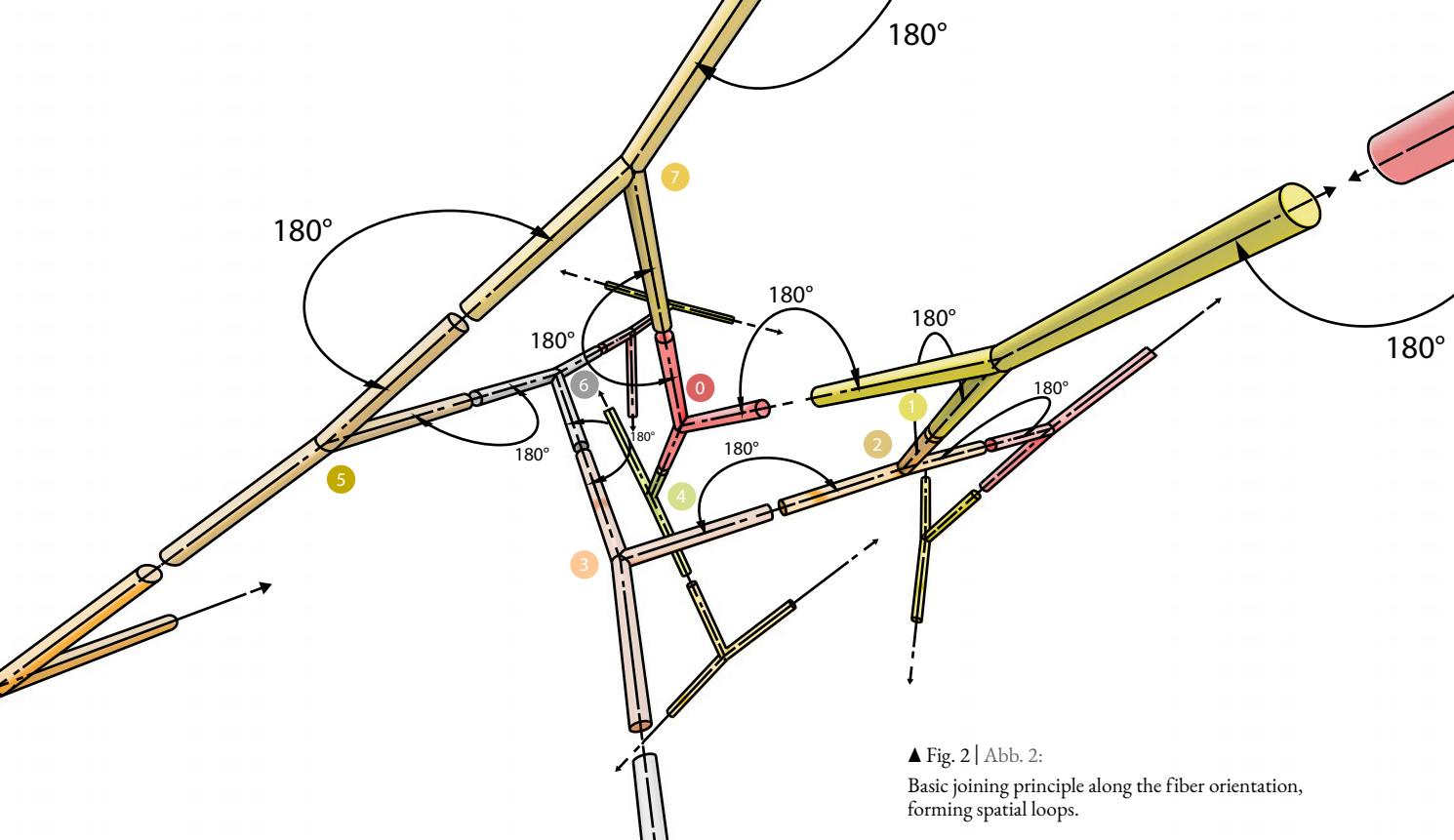
Um das strukturelle Potenzial dieser Eigenschaft zu aktivieren, wurden die Äste entlang ihrer Faserorientierung und damit entsprechend dem Prinzip des natürlichen Systems verbunden. ↗²⁸

Als künstliches Gebilde erlaubt eine Re-Konfiguration der natürlichen Elemente jedoch eine Modifikation des Originals, um neue Funktionsweisen mit einzubeziehen. Die von Natur aus auskragenden Äste lassen sich zu geschlossenen Gebilden zusammensetzen, sodass sie strukturelle Zellen bilden und als Bauteile für architektonische Zwecke vielseitiger einsetzbar sind (Abb. 2). Um die große Formenvielfalt und die unterschiedlichen Astlängen innerhalb eines flexiblen Konstruktionssystems zu kompensieren, können Aggregate mit linearen Überbrückungselementen verbunden werden (Abb. 3). Das direkte Verbinden von Teilen erfordert eine geringere Anzahl von Verbindungsstellen, macht aber einen präziseren Auswahlmechanismus notwendig, um die verfügbaren Exemplare zuzuordnen (Abb. 4). Die Einschränkung dieser geometrischen Flexibilität hat allerdings den Vorteil, dass Fachwerke mit erhöhter Stabilität entstehen, daher wurde dieser Ansatz in diesem Projekt weiter verfolgt.

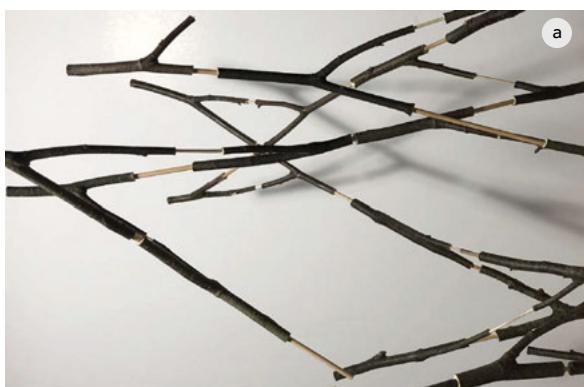
↗²⁶ see *Branch Formations : Joints : Ready-made Joint*, p. 190 f.

↗²⁷ see *Branch Formations : Tools : Catalog + Discrete Elements*, p. 160 f.

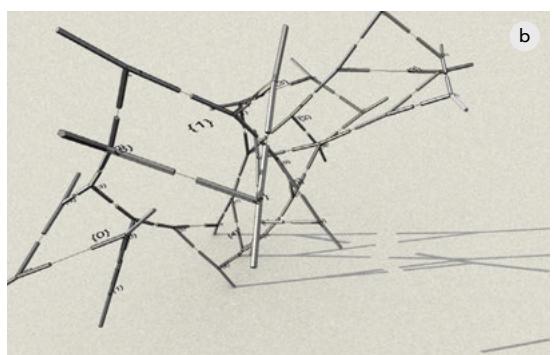
↗²⁸ see Frichot, H.: *Follow the Material!*, p. 218 ff.



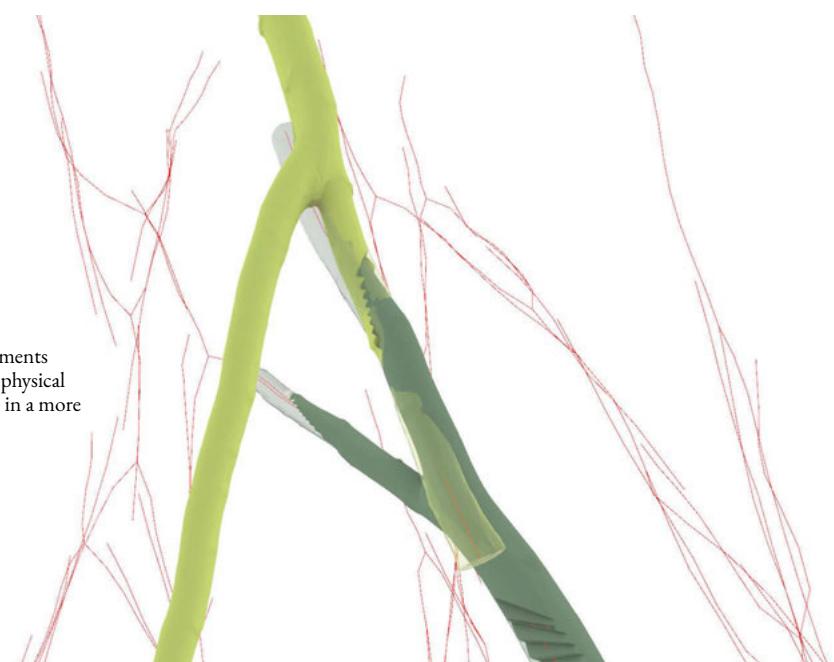
▲ Fig. 2 | Abb. 2:
Basic joining principle along the fiber orientation,
forming spatial loops.



◀ ▶ Fig. 3 | Abb. 3:
Physical (a) and digital (b) studies of connections with additional
bridging elements.



► Fig. 4 | Abb. 4:
Branch forks with overlapping end segments
(in the digital model), allowing for the physical
parts to be joined directly – this results in a more
compact framework.



CELLULAR STRUCTURES

In the context of a concept of spatial frameworks as closed cells (Fig. 5a), these modules can be organized in larger aggregations with a simple repetitive topology (Figs. 5b+c). The most compact and stable form is a tetrahedral module (Figs. 6a–c). The predictability of this concept enables a robust setup for a flexible workflow that integrates an inventory of diverse parts. The design process starts with a regular framework of identical placeholder elements or ‘proto-parts’, defining an overall layout in a digital model (Fig. 7 top). ↗²⁹

These substitute items are replaced by irregular elements from the digitized set, and the discrepancies from the regular form result in a discontinuous model (Fig. 7 middle). In a physics simulation in a digital model, gaps between elements are closed, reestablishing the initial topology as a globally deformed model consisting of aligned and overlapping branch elements (Fig. 7 bottom). ↗³⁰

Sets with varying ranges of angles, representing branches from different tree species, would result in very different formations (Figs. 8a–c).

Furthermore, it was observed that the drying process affected a deformation in the branch forks, which was difficult to predict. The 3D scanning method, which involves a prior marking of elements ↗³¹, would allow for precise monitoring of that process as a basis for further research.

The close relationship between material and form in this context indicates a potential for further investigations into material-specific spatial organization and structural models.

ZELLARTIGE STRUKTUREN

Im Hinblick auf konzeptionelle Raumgerüste aus geschlossenen Zellen (Abb. 5a) ist die kompakte und stabilste Form ein tetraeder-förmiges Modell (Abb. 6a–c). Diese Module können in größeren Aggregationen mit einer einfachen, sich wiederholenden Topologie organisiert werden (Abb. 5b+c). Die Vorhersagbarkeit dieses Prinzips eröffnet einen soliden Ansatz für einen flexiblen Arbeitsprozess, der auf einem Inventar von diversen (Bau-)Teilen aufbaut. Der Designprozess begann mit einem regulären Raumgerüst aus identischen Platzhalterelementen oder ‚Proto-Teilen‘, die in einem digitalen Modell das Gesamtaufmaß definierten (Abb. 7 oben). ↗²⁹ Diese Platzhalterelemente wurden durch die unregelmäßigen Elemente aus dem digitalisierten Satz ersetzt, wodurch es zu Abweichungen von der regelmäßigen Form kam und ein diskontinuierliches Gefüge entstand (Abb. 7 Mitte). In einer physikalischen Simulation im digitalen Modell wurden diese entstandenen Lücken zwischen den Elementen wieder geschlossen. Dadurch wurde die ursprüngliche Topologie in Form eines global deformierten Modells aus zueinander ausgerichteten und ineinander greifenden Astgabeln wiederhergestellt (Abb. 7 unten). ↗³⁰

Die Verwendung von Datensätzen aus Elementen mit unterschiedlichen Winkeln, die Ästen von verschiedenen Baumarten entsprechen, würde zu sehr unterschiedlichen Formationen führen (Abb. 8a–c).

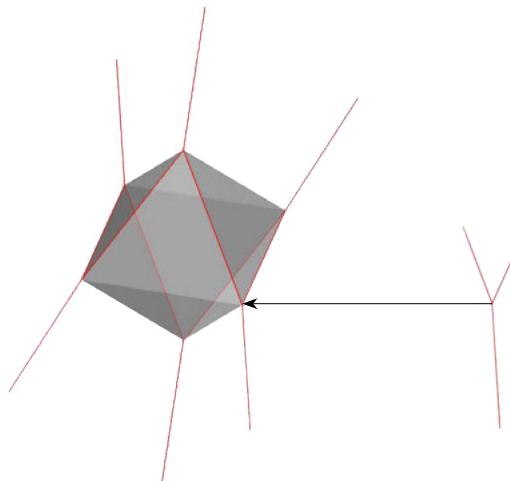
Zudem wurde beobachtet, dass der Trocknungsprozess eine schwer vorhersehbare Verformung in den Astgabeln bewirkt. Eine 3D-Scan-Methode, die eine Markierung der Elemente vorab voraussetzt, ↗³¹ würde eine genaue Erfassung dieses Prozesses als Grundlage für weitere Untersuchungen ermöglichen.

Diese Aspekte verdeutlichen den direkten Zusammenhang von spezifischer, auf eine Baumart bezogener Materialgestalt und der daraus resultierenden Raumstruktur und bieten Raum für weitere Forschungen zu materialspezifischen Raumwürfen und Strukturmodellen.

↗²⁹ see *Branch Formations : Tools : Discrete Elements*, p. 160 f.

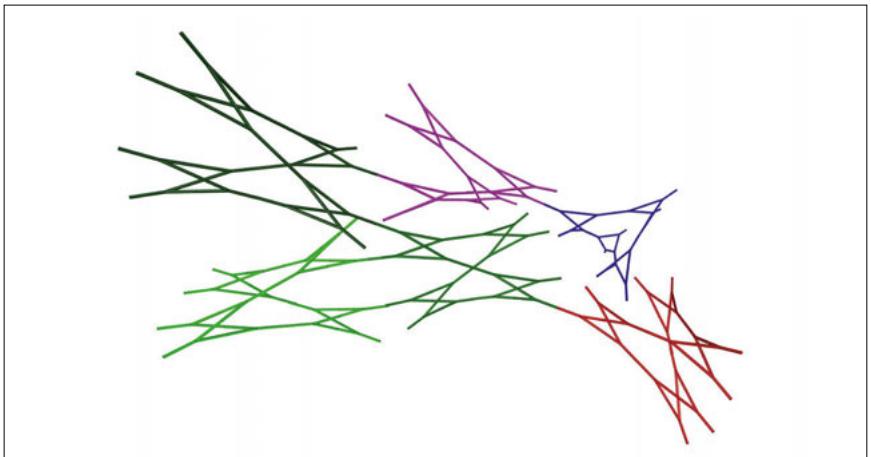
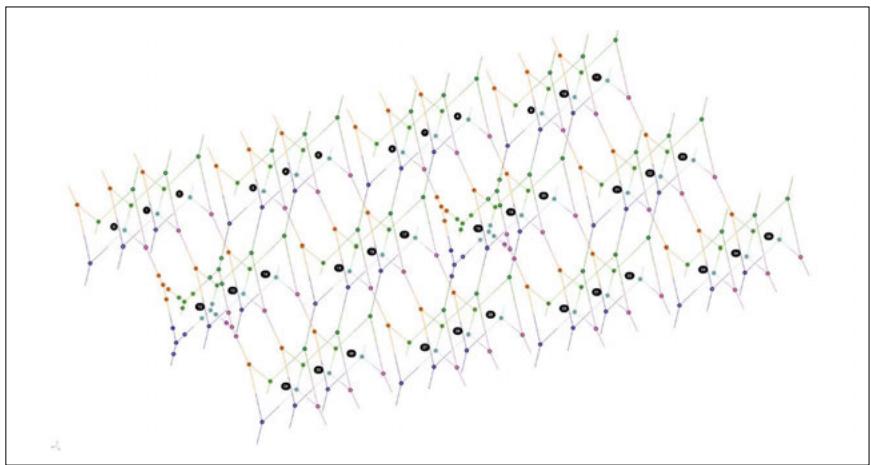
↗³⁰ see *Branch Formations : Tools : Constraint-based Relaxation Method*, p. 164 f.

↗³¹ see *Branch Formations : Tools : 3D Scanning*, p. 158 f.

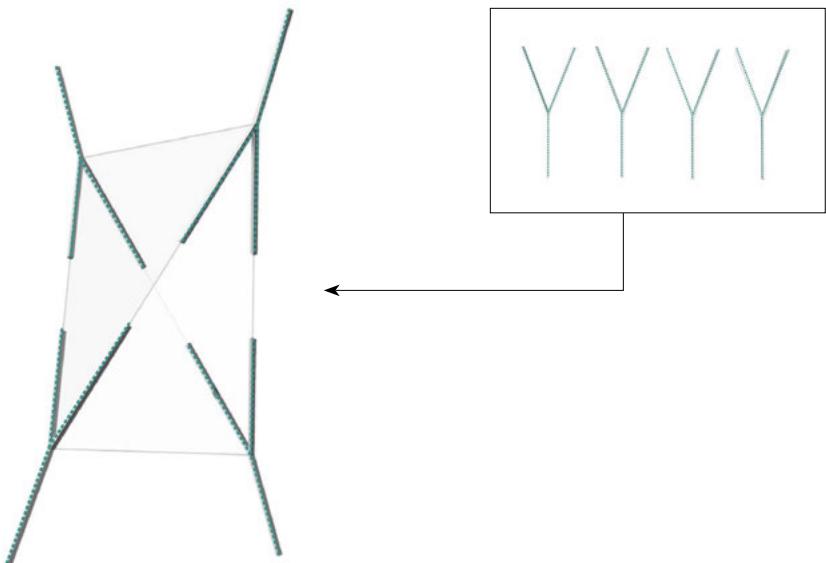


► Fig. 5a | Abb. 5a:
Cellular octahedral module consisting
of six Y-shaped branch forks.

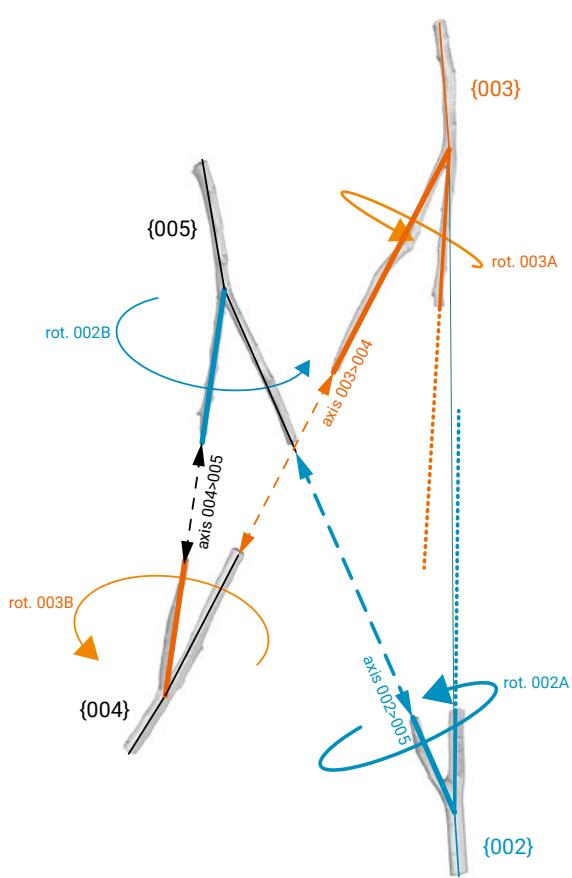
▼ Fig. 5b | Abb. 5b:
Aggregation logic for multiple modules (axis model),
each of a regular octahedral grid from identical elements.



▲ Fig. 5c | Abb. 5c:
Irregular formation from regular tetrahedral modules (hereby
four modules form a larger component, highlighted by colors).



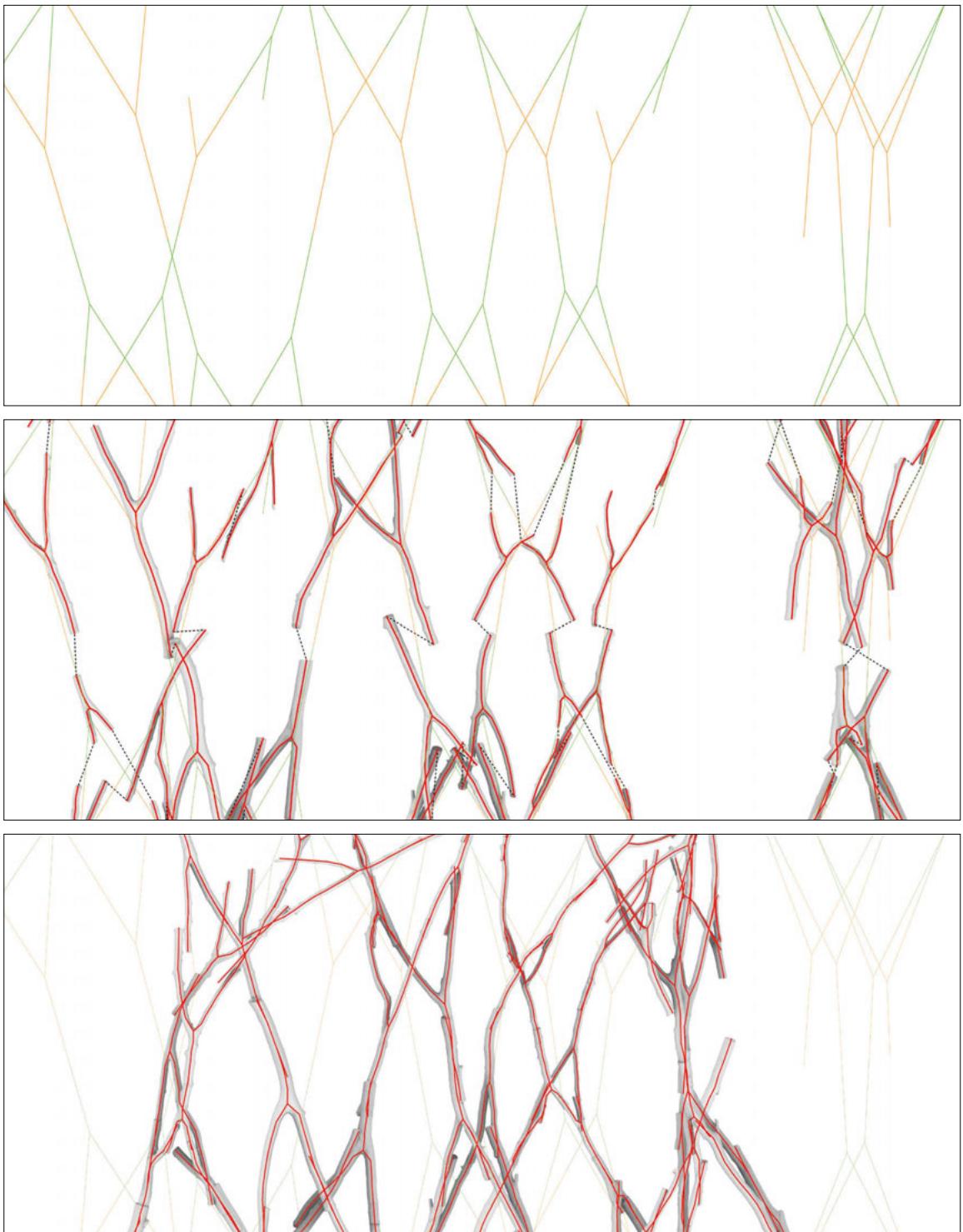
► Fig. 6a | Abb. 6a:
Diagram of a tetrahedral cell from
four Y-shaped branch forks.



▲ Fig. 6b | Abb. 6b:
Diagram of the geometric degrees of freedom to form a tetrahedral
cell configuration (similar to the kinematic system of a robotic arm).

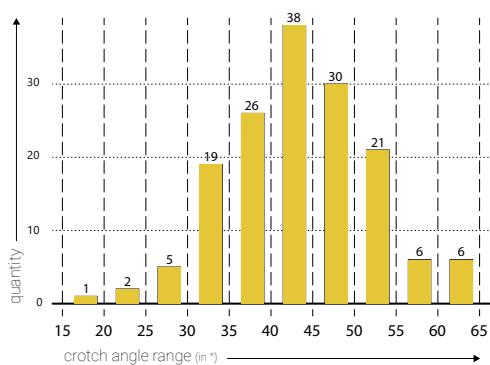


▲ Fig. 6c | Abb. 6c:
Realization of one tetrahedral cell, built from four Y-shaped
hornbeam and beechwood branch forks.

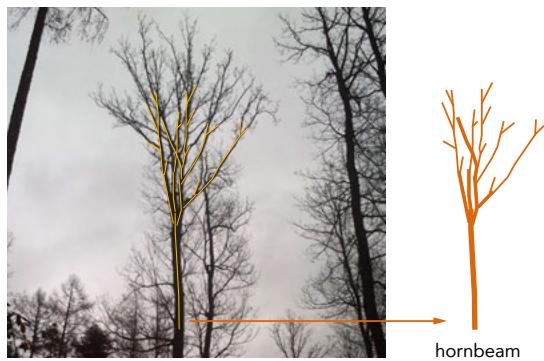


▲ Fig. 7 | Abb. 7:

Gap compensation via force-based relaxation after replacement of the 'proto-parts' with 3D-scanned data from real branch forks: top: topological aggregation, middle: replacement with scanned data, and bottom: relaxation/realigning process.

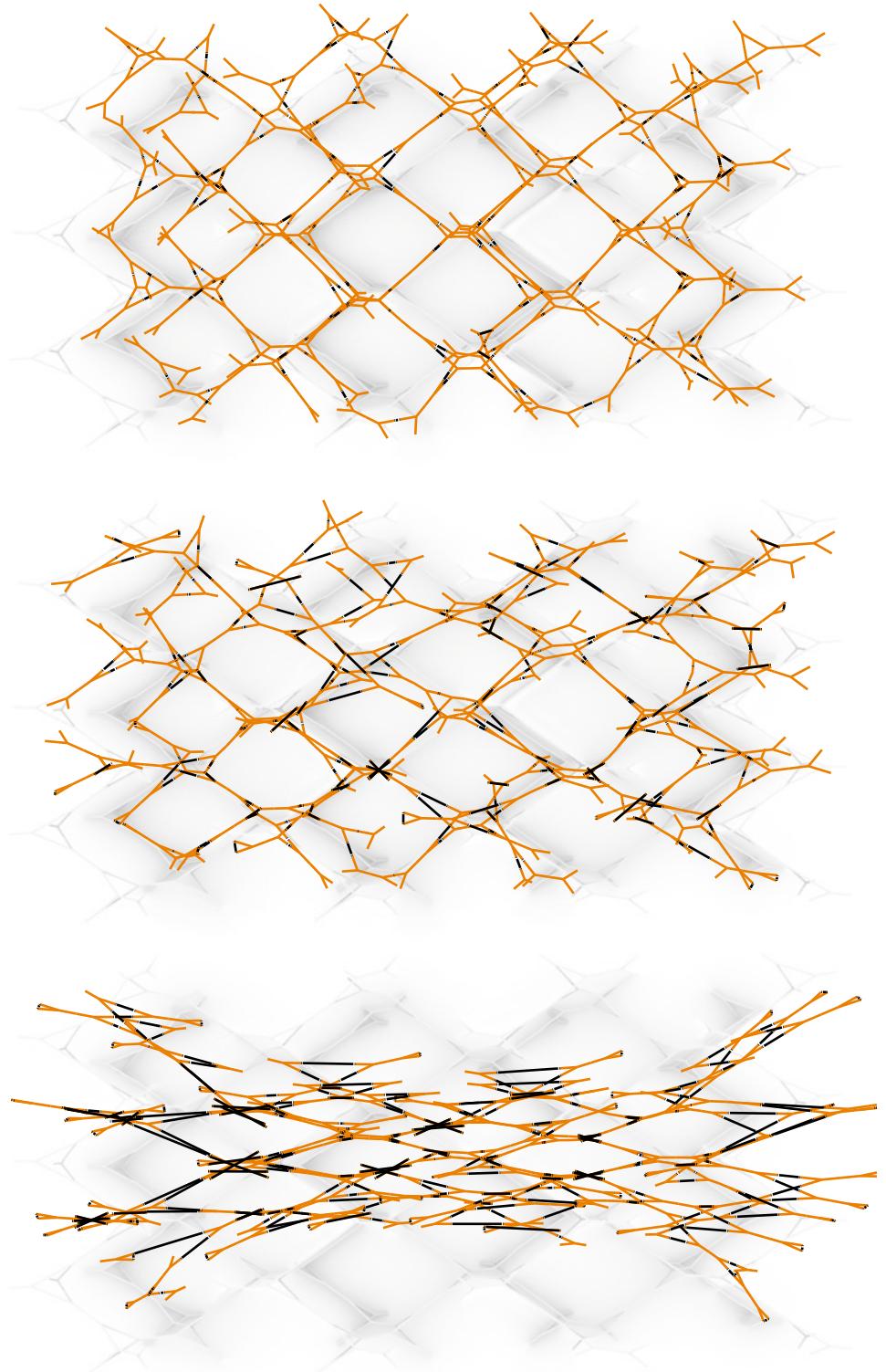


▲ Fig. 8a | Abb. 8a:
An initial analysis of crotch angles in a collection of 154 hornbeam twigs shows the Gaussian distribution (bell curve). In this set the average crotch angle is 42.7° . 87% are within a range of 30° – 55° . It shows that the unique elements are very similar. It was observed that the same range of angles occurred across all generations and scales of branches within the sample tree crowns.



▲ Fig. 8b | Abb. 8b:

In other tree types such as oak the average crotch angle as well as minima and maxima are different, resulting in a diverging crown architecture. There is still very little research or scientific data on typical crotch angles and statistical distribution for various tree species. It was assumed that the angles ranges vary only marginally within one species under similar growth conditions. Across species, there is a larger variety of angles.



▲ Fig. 8c | Abb. 8c:

The same 'proto-part' aggregation after random replacement with simplified branch forks with varying crotch angle ranges: 60° – 80° (top), 17° – 105° (middle), 23° – 30° (bottom).

'MULTI-NODES'

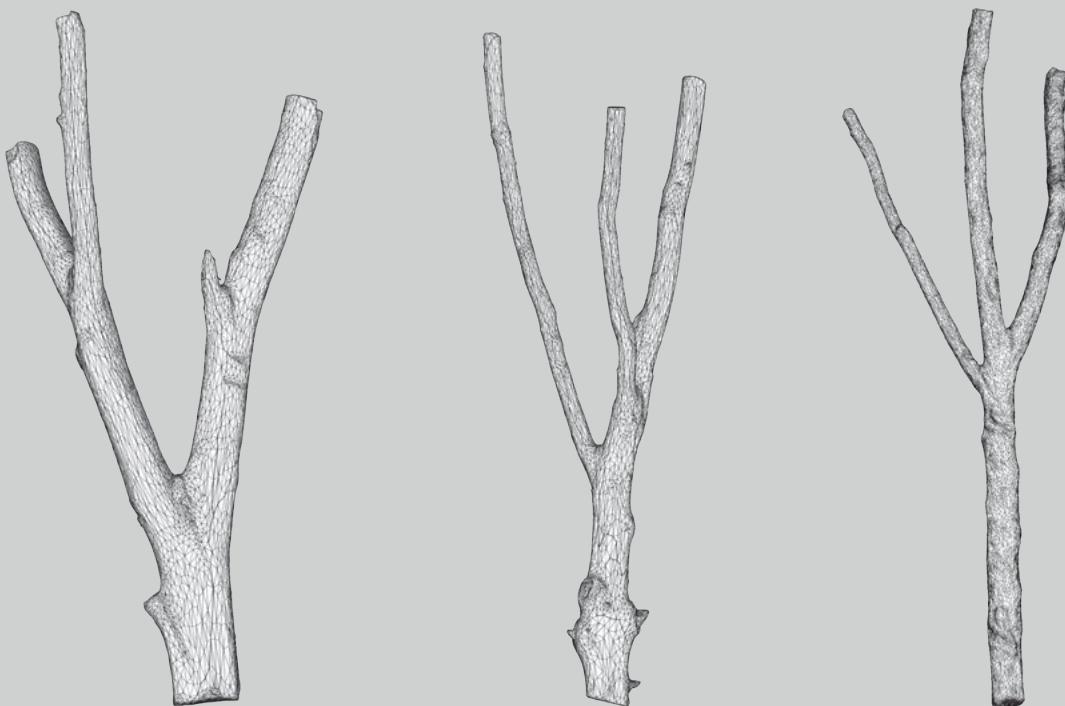
An implementation of branch types with more ends (Fig. 9) would open up further opportunities for structural applications. Frameworks with structural nodes that can connect more than three member axes would allow for the formation of triangles for bracing as part of its layout (Fig. 10), thus providing more design flexibility. Such manifold nodes could be established through forked branches that naturally come with multiple bifurcations. However, segments of branches could also be combined into designed components (Fig. 11).

Because of their increased stability, provided by stiff triangular cells, these components could be used in frameworks that utilize extension elements between nodes, opening up possibilities for modular design systems (Fig. 12). The irregular branch elements could be transformed into versatile components, capable of being reconfigured for various settings.

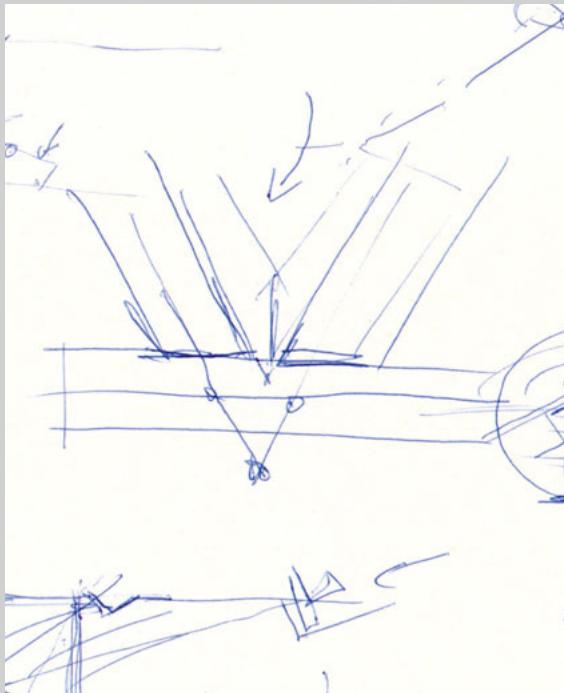
MEHRFACHKNOTEN

Das Verwenden von Astgabeln mit mehreren Enden (Abb. 9) würde weitere Möglichkeiten für strukturelle Anwendungsbiete eröffnen. Aus strukturellen Knoten, an denen mehr als drei Stabachsen zusammentreffen, könnte man Tragwerke mit Dreiecken zur Aussteifung schaffen (Abb. 10), was mehr Designflexibilität bieten würde. Solche Verzweigungsknoten könnten Astgabeln sein, die von Natur aus mehrfache Verzweigungen aufweisen, alternativ könnten aber auch verschiedene Astgabel-Teile kontrolliert zu neuen Bauteilen zusammengesetzt werden (Abb. 11).

Durch die erhöhte Stabilität, die durch steife Dreieckszellen gegeben ist, könnten diese Bauteile in Fachwerken mit zusätzlichen, dazwischenliegenden Verlängerungsstäben verwendet werden. Das würde wiederum ermöglichen, ein modulares Konstruktionssystem anzudenken (Abb. 12). Die unregelmäßigen Astgabeln könnten somit in vielseitig einsetzbare Komponenten umgewandelt werden, die für verschiedene Szenarien neu konfigurierbar bleiben.



▲ Fig. 9 | Abb. 9:
3D scans of naturally grown elements
with more than three branch ends.



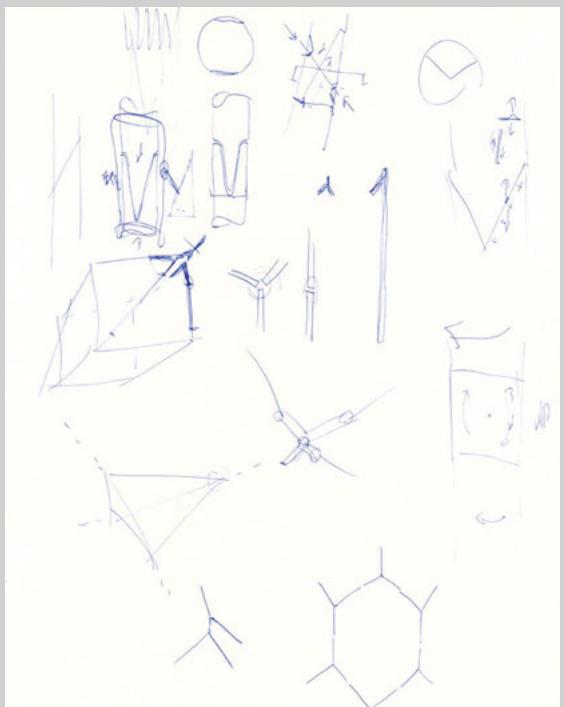
▲ Fig. 10 | Abb. 10:

Diagram of a node detail in a typical truss scheme with triangular cells (see also *Approach*, Fig. 1b, p. 59).



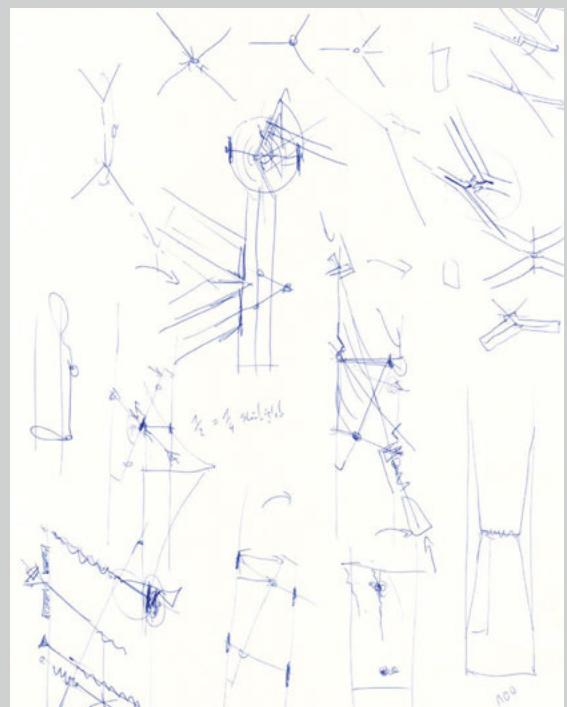
▲ Fig. 11 | Abb. 11:

Sketch of a structural node formed by two Y-shaped branch forks, glued together with finger joints.



▲▲ Fig. 12 | Abb. 12:

Sketches from a brainstorming session with Moritz Heimrath and Adam Orlinski (B+G engineers).



SORTING AS A DESIGN TOOL

A workflow that employs a simplified framework made of identical parts as a preset for replacing the regular constituents with the actual specimens from the available set of parts offers two domains of (design) engagement. One is concerned with the global layout and topology (Fig. 13), the other addresses the local replacement of parts.

To control the population of the preliminary aggregations, various selection criteria are applicable. Parts can be categorized according to their location within the aggregation. When overlaying the initially generic constellation with organizational patterns, instances of parts can be called out for specific replacement (Fig. 14).

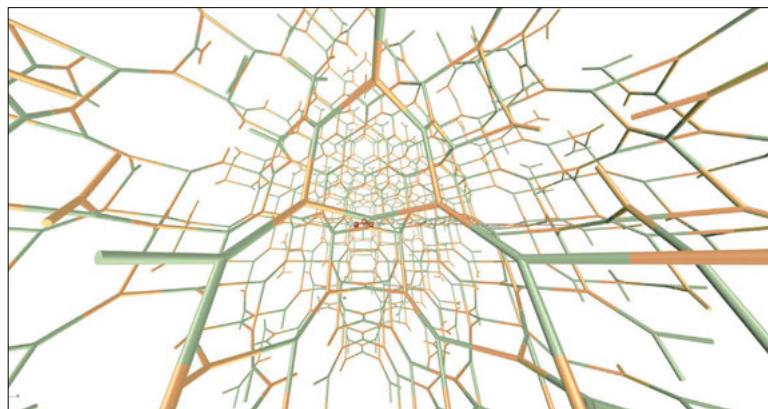
The sorting of items in the scanned catalog represents the complementary tool used for assigning suitable parts to locations in the pre-aggregated structure.

SORTIEREN ALS GESTALTUNGSWERKZEUG

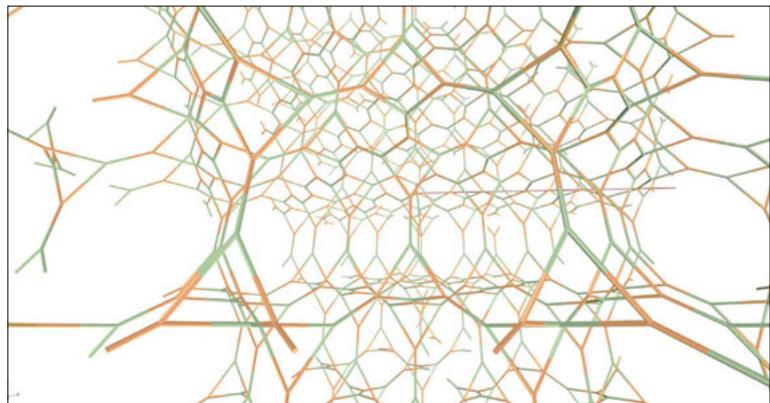
Ein Workflow, der darauf basiert, identische Bauteile in einem regelmäßigen Raumfachwerk durch tatsächliche Exemplare aus einem verfügbaren Datensatz zu ersetzen, bietet zwei Ebenen für eine (Design-)Auseinandersetzung. Die eine befasst sich mit dem globalen Layout und der Topologie (Abb. 13), die andere mit dem lokalen Austauschen von Teilen.

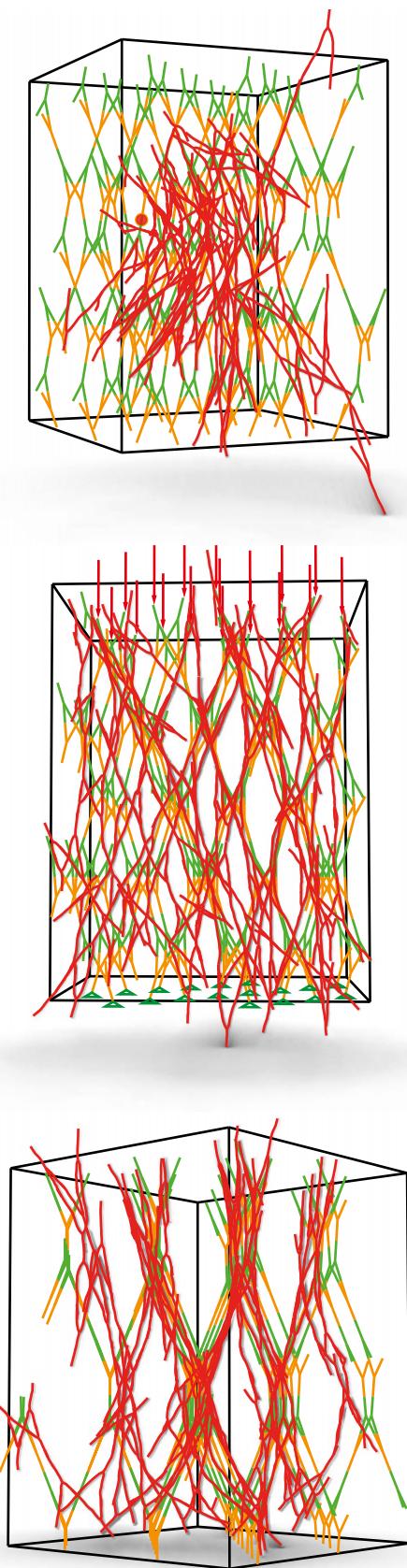
Um die Zusammensetzung der vorläufigen Aggregation („Proto-Aggregation“) zu steuern, waren verschiedene Auswahlkriterien anwendbar. Teile konnten nach ihrer Lage innerhalb der Aggregation kategorisiert werden. Durch Überlagern der zunächst generischen Aggregation mit verschiedenen Organisationsmustern konnten die einzelnen Instanzen der Teile gezielt ausgetauscht werden (Abb. 14).

Ergänzend zur Auswertung der Ordnung der Teile innerhalb der „Proto-Aggregation“ konnten die Elemente im gescannten Katalog nach verschiedenen Kriterien, wie etwa Größe, Durchmesser usw., sortiert werden, um eine gezielte Zuordnung von passenden Teilen an entsprechende Stellen in dieser vorläufig generierten Struktur zu ermöglichen.



◀ ▶ Fig. 13 | Abb. 13:
‘Infinite’ octahedron (left) and tetrahedron (bottom) grid structures.





◀ Fig. 14 | Abb. 14:
 Different possible sorting concepts applied to identical sets of parts result in large variations: top: Sorting of locations of part instances according to vicinity to an 'attractor' point in combination with a sorting of parts by size. middle: Assigning parts by cross section according to local utilization (simulated via structural analysis with *Karamba3d*). bottom: Sorting parts by crotch angle, positioning elements gradually with wide angles at the bottom and narrow angles at the top.

SPECULATIONS

The emergent formations were understood as a kind of architectural infrastructure (Figs. 15a+b). Potential applications and activation as building structures were investigated in speculative studies. To translate the abstract frameworks into architectural scenarios that hint at possibilities for use and inhabitation, these studies were mainly invested in introducing surfaces as complementary elements (Figs. 16a–g). To cope with the ambiguity and idiosyncratic characteristics of the branch structures, speculations operated on a geometric level, neglecting distinct material aspects, to leave space for further reflection and interpretation.

In a collaboration with performance artists Lucie Strecker and Daniel Aschwanden, an interpretative interaction of technical structures and organic bodies was practiced through the means of performance art.

The second prototype (Fig. 17) ³² was activated as a multidimensional stage for various performance activities as part of the trans-disciplinary multimedia art project *Deep Dreaming Creatures*⁵ (Fig. 18).

SPEKULATIONEN

Die so entstehenden Formationen wurden als eine Art architektonische Infrastruktur verstanden (Abb. 15a+b). Mögliche Anwendungen und Aktivierungen als Gebäudestrukturen wurden in spekulativen Studien untersucht. Um die abstrakten Gefüge in architektonische Szenarien zu übersetzen, die Möglichkeiten einer Nutzung und Bewohnbarkeit andeuten, wurden in diesen Studien vor allem Oberflächen als ergänzende Elemente eingeführt (Abb. 16a–g). Um mit der Uneindeutigkeit und der eigenwilligen Charakteristik der Aststrukturen umzugehen, bewegten sich die Spekulationen auf einer geometrischen Ebene, eindeutige materielle Aspekte wurden bewusst vernachlässigt, um Raum zu lassen für weitere Überlegungen und Interpretationen.

In einer Zusammenarbeit mit den Performance-Künstlern Lucie Strecker und Daniel Aschwanden wurde zudem ein interpretatives Zusammenspiel von technischen Strukturen und organischen Körpern mit den Mitteln der Performance-Kunst ausgelotet.

Der zweite Prototyp (Abb. 17) ³² diente dabei als mehrdimensionale Bühne für verschiedene Aktivitäten im Rahmen des interdisziplinären Multimedia-Kunstprojekts *Deep Dreaming Creatures*⁵ (Abb. 18).

1 Spindler, K. (1995): "Wooden handle of the copper axe used by the Neolithic hunter Oetzi 5,000 years ago", in: Spindler, K.: *Der Mann im Eis*, München: Goldmann.

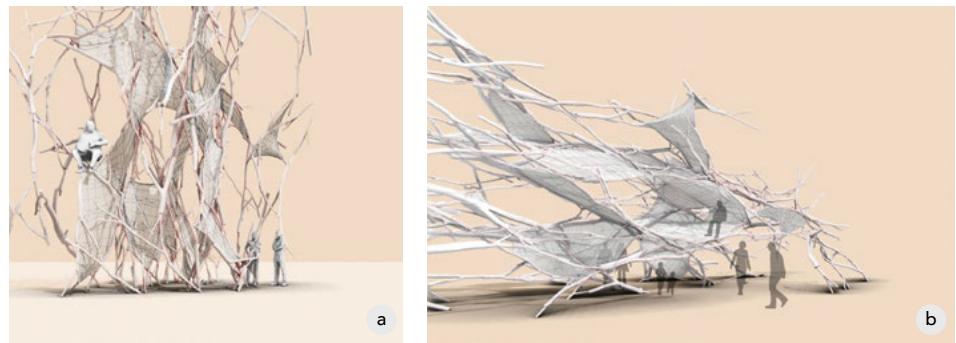
2 Mollica, Z., Self, M. (2016): "Tree fork truss", in: Adriaenssens, S., Gramazio, F., et al. (eds.): *Advances in Architectural Geometry*, Zürich: vdf Hochschulverlag, ETH Zürich: 138–153.

3 Hanewinkel, M. (2010): *Baumarteneignung Fichte und Buche bei Klimawandel*, <http://www.waldwissen.net>.

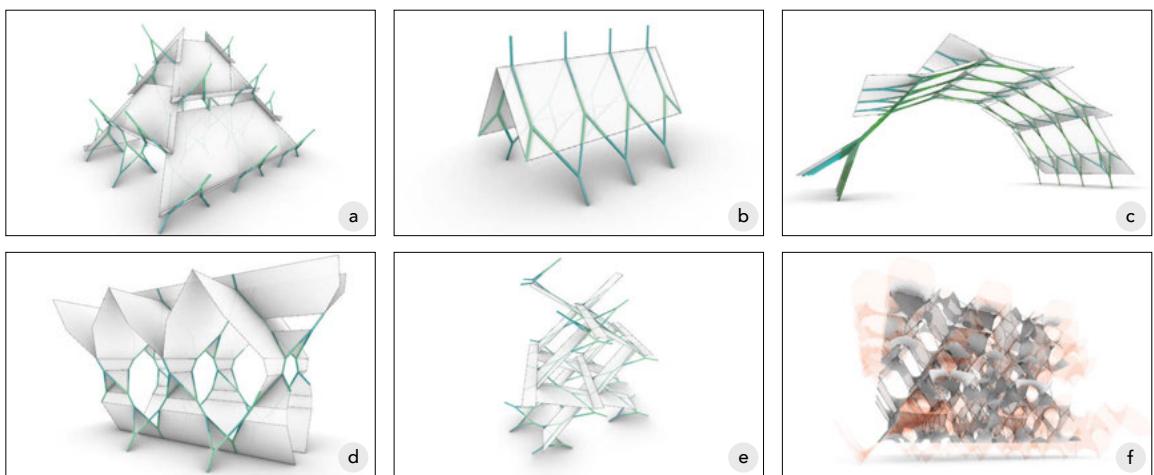
4 Schüler, S., Grabner, M., et al. (2013): "Fichte – fit für den Klimawandel?", in: *BFW-Praxisinformation* 31: 10–12.

5 *Deep Dreaming Creatures*: Daniel Aschwanden and Lucie Strecker in collaboration with brut Vienna, Lukas Allner and Daniela Kröhnert, Jens Hauser, David Berry, Ben James, Vera Sebert and Philippe Riera, 2021.

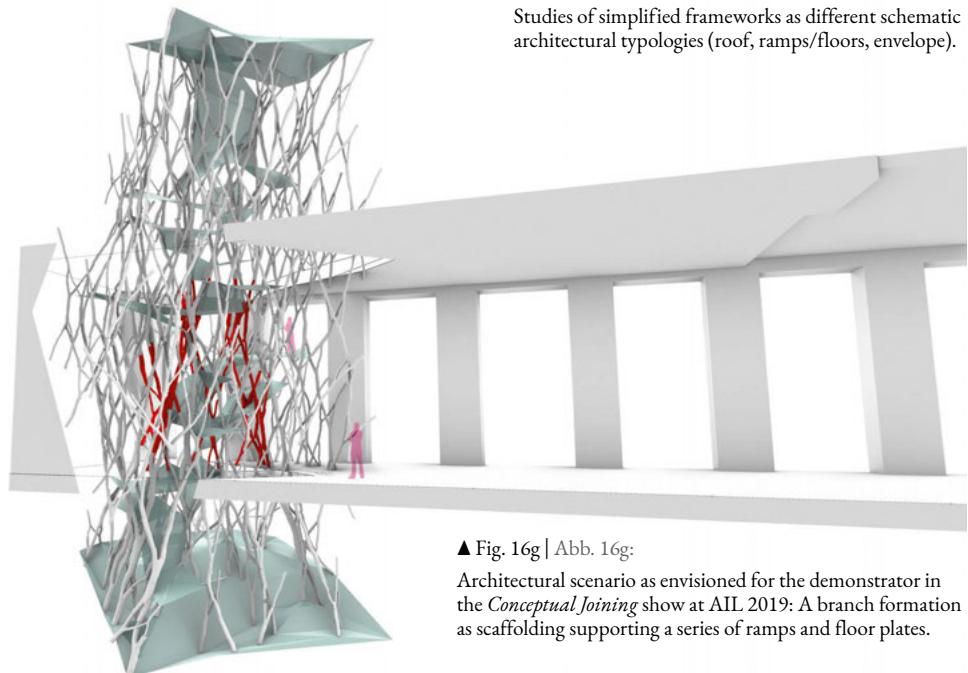
 ³² see *Branch Formations : Tools : Intuitive Assembly*, p. 166 f.



▲▲ Figs. 15a+b | Abb. 15a+b:
Use case studies with tensile fabric surfaces within horizontally (a)
and vertically (b) oriented branch formations.



▲ Figs. 16 a-f | Abb. 16a-f:
Studies of simplified frameworks as different schematic
architectural typologies (roof, ramps/floors, envelope).



▲ Fig. 16g | Abb. 16g:
Architectural scenario as envisioned for the demonstrator in
the *Conceptual Joining* show at AIL 2019: A branch formation
as scaffolding supporting a series of ramps and floor plates.



▲ Fig. 17 | Abb. 17:
Full-scale realization at the University of Applied
Arts Vienna, 2021.
Photo © Thomas Steineder

► Fig. 18 | Abb. 18:
Performance artists Lucie Strecker and Daniel Aschwanden
interacting with the branch formation as part of the trans-
disciplinary project *Deep Dreaming Creatures*.
Photo © Daniel Aschwanden, Lucie Strecker







Photo © Daniel Aschwanden,
Lucie Strecker

DIGITAL DESIGN IN RESEARCH AND PRACTICE

DIGITALES DESIGN IN FORSCHUNG UND PRAXIS

↗ ANJA JONKHANS // English translation: Mark Wilch

The construction industry has reached a high level of production output over the past 20 years, yet it is one of the least efficient industries. Construction-related spending accounts for 13 percent of global GDP while the sector's productivity has grown by just one percent a year over the past two decades.¹ In light of climate change and resource exploitation, the focus is gradually shifting from being solely on profitability and is taking on an ethical dimension that necessitates innovation and the changes that innovation triggers.

The ability to merge architectural design environments with complex analytical tools that simulate forces and their flow has influenced thinking on structural design and opened the way to creating buildings that have a high degree of formal freedom and structural complexity. At the other end of the design spectrum, the linkage of design tools with digital fabrication has simultaneously led to a radical change in thinking in dealing with material practice in architecture. A central issue in this context is the feedback among the design processes in the development of holistic and integrated design methods. Advances in construction technology and material technology have, among other things, led to free-form surfaces becoming striking elements of contemporary architecture. Today's computer-aided design (CAD) software provides intuitive interfaces for designing structures of any desired complexity, with respect to geometry as well as organizational forms, work processes, and fabrication techniques. Fabrication on machines with computerized numerical control (CNC), for instance, 3D printers or laser cutters, gives manufacturers great flexibility in achieving complex forms.

Moreover, a new generation of CAD research views digital manufacturing as a means of challenging the material practices of *Baukulturen*², i.e. the cultures of building that give rise to and impact the built environment. The interplay of a multitude of new and old materials, for example, high-performance fiber³, metal sheet⁴, concrete⁵ and earthen materials⁶,

Die Bauindustrie ist eine der am wenigsten effizienten Branchen und hat in den letzten 20 Jahren ein hohes Plateau im Produktionswachstum erreicht. Während die baubezogenen Ausgaben 13 Prozent des weltweiten BIP ausmachen, ist das jährliche Wachstum des Sektors in den letzten 20 Jahren nur um ein Prozent gestiegen.¹ Bedingt durch die Klimaveränderung und die Ausbeutung von Ressourcen verändert sich der Fokus graduell und ist nicht nur auf Wirtschaftlichkeit gelenkt, sondern bekommt eine ethische Dimension, die Innovation und dadurch ausgelöste Veränderungen notwendig macht.

Die Fähigkeit, architektonische Entwurfsumgebungen mit komplexen analytischen Werkzeugen zur Simulation von Kraft und deren Fluss zu verschmelzen, hat die Denkweise des Tragwerksentwurfs beeinflusst und die Realisierung von Gebäuden mit einem höheren Grad an formaler Freiheit und struktureller Komplexität ermöglicht. Gleichzeitig hat am anderen Ende der Entwurfspraxis die Verknüpfung von Entwurfswerkzeugen mit digitaler Fabrikation zu einem tiefgreifenden Umdenken im Umgang mit der Materialpraxis in der Architektur geführt. Dabei ist die Rückkopplung zwischen den Designprozessen ein zentrales Anliegen bei der Entwicklung ganzheitlicher und integrierter Designmethoden. Fortschritte in der Konstruktions- und Materialtechnologie haben unter anderem zu Freiformflächen als markante Elemente in der zeitgenössischen Architektur geführt. Heutige Computer-aided Design Software bietet intuitive Schnittstellen für den Entwurf beliebig komplexer Strukturen, sowohl bezogen auf Geometrie als auch auf Organisationsformen, Arbeitsabläufe und Fertigungstechniken. Weiters bietet die Herstellung mit Hilfe von computergesteuerten Maschinen, zum Beispiel 3D-Druck oder Laserschneiden, eine große Flexibilität, um komplexe Formen zu realisieren.

Darüber hinaus versteht eine neue Generation von computergestützter Designforschung die digitale Fabrikation als ein Mittel, die materiellen Praktiken von Baukulturen² herauszufordern. Das Zusammenspiel einer Vielzahl neuer und alter Materialien, zum Beispiel High-Performance-Fasern³, Metallplatten⁴, Beton⁵ und Erd-Materialien⁶, stellt neue Alternativen dar, wie wir Bausysteme verstehen. Die

represents new alternatives for how we understand construction systems. The use of digital simulations as an integrated component of the design-to-fabrication process has resulted in new material practices that incorporate feedback and offer rich possibilities for new tectonic logics and the optimized use of material resources.⁷

Innovative research projects at universities, for example, generate new ways of thinking and new strategies for resolving problems. The first direct uncoupling from industrial use creates space for pursuing research as a think tank of sorts. Research begins with a very specific set of questions, which can change substantially as the project work unfolds. Even a test series thought to have failed provides answers to questions and thereby opens up a field that can be further developed with all of the actors involved. Research requires a beginner's mind, in other words, assessing all results in an unbiased way with fresh and open eyes and then interconnecting them.

One could say in general that the development of digital design and digital fabrication processes has given rise to whole new areas and possibilities for research and production sites. Many of these possibilities are not sufficiently used on an everyday basis in the construction industry because it is still quite a conservative industry. It is very expensive and often not financially feasible for small and medium-sized enterprises to conduct their own research. Large companies are better equipped and resourced – sometimes better than small universities – and can afford to run their own innovation departments.

The ideal situation is to have production sites and research cooperate closely with each other. Research at universities is (to a certain extent) less subject to temporal and financial constraints, which enables solutions to be worked out more freely. At the same time, close collaboration on knowledge transfer between university research and industrial manufacturing is indispensable for comprehensive test series and for access to various kinds of machinery that production sites can make available. These types of collaboration are especially beneficial to small innovative companies. To address the challenges posed today by climate change and resource reuse, close cooperation between production sites and research is one way that innovations can be made suitable for large-scale application more quickly.

Verwendung digitaler Simulationen als integrierter Bestandteil des Design-to-Fabrication-Prozesses hat zu neuen Materialpraktiken geführt, welche Feedback einbeziehen und reichhaltige Möglichkeiten für neue tektonische Logiken und optimierte Nutzung von Materialressourcen bieten.⁷

Innovative Forschungsprojekte zum Beispiel an den Universitäten generieren neue Denkansätze und Lösungsstrategien. Die erste unmittelbare Loslösung von industrieller Nutzung schafft den Freiraum, Forschung als „Thinktank“ zu betreiben. Forschung beginnt mit einer sehr spezifischen Fragestellung, die sich im Laufe der Projektarbeit stark ändern kann. Auch eine vermeintlich misslungene Testreihe gibt Antworten auf Fragen und eröffnet so ein Feld, das sich mit allen beteiligten Akteur*innen weiterentwickelt. Forschung erfordert die sogenannte „Beginner's Mind“, also mit offenen Augen unvoreingenommen alle Ergebnisse neu zu bewerten und in Verbindung zueinander zu stellen.

Allgemein kann man sagen, dass durch die Entwicklung des digitalen Designs und digitaler Fertigungsprozesse völlig neue Bereiche und Möglichkeiten für die Forschung und Produktionsstätten entstanden sind. Viele dieser Möglichkeiten werden im Alltag der Baubranche nicht ausreichend genutzt, da sie eine immer noch recht konservative Branche ist. Für kleine und mittlere Unternehmen ist es sehr aufwendig und oft unleistbar, eigene Forschung zu betreiben. Große Unternehmen haben eine bessere Ausrüstung und Ressourcen – manchmal bessere als kleine Universitäten – und können sich eigene Innovationsabteilungen leisten.

Eine enge Zusammenarbeit zwischen Produktionsstätten und Forschung ist ideal. Die Forschung an Universitäten ist (in gewissen Maßen) unabhängiger von zeitlichen und finanziellen Zwängen, was eine freiere Lösungserarbeitung ermöglicht. Zugleich ist ein enger Wissenstransfer zwischen universitärer Forschung und industrieller Fertigung unabdingbar für ausführliche Testserien und den Zugang zu diversen Maschinenparks, welche von den Produktionsstätten zur Verfügung gestellt werden können. Vor allem kleinere innovative Firmen profitieren sehr stark von solchen Kooperationen. Um auf die heutigen Herausforderungen von Klimaveränderung und Ressourcen-Wiederverwendung eingehen zu können, ist eine enge Zusammenarbeit von Produktionsstätten und Forschung eine Möglichkeit, Innovationen schneller fit für die Anwendung im großen Maßstab zu machen.

-
- 1 Barbosa, F., et al. (2017): *Reinventing Construction. A Route to Higher Productivity*, Washington DC: McKinsey Global Institute.
 - 2 ^{en} For more on the fascinating concept of *Baukultur*, see “Davos Declaration 2018”, <https://davosdeclaration2018.ch/>, and Davis, H. (2006): *The Culture of Building*, New York: Oxford University Press Inc.
^{de} Mehr zum faszinierenden Konzept von *Baukultur* siehe „Davos Declaration 2018“, <https://davosdeclaration2018.ch/>, und Davis, H. (2006): *The Culture of Building*, New York: Oxford University Press Inc.
 - 3 Ramsgaard Thomsen, M., et al. (2015): “Hybrid tower, designing soft structures”, in: Ramsgaard Thomsen et al. (eds.): *Modelling Behaviour. Design Modelling Symposium 2015*, Berlin: Springer: 87–99; Menges, A., Knippers, J. (2015): “Fibrous Tectonics”, in: *Architectural Design* 85(5): 40–47.
 - 4 Nicholas, P. et al. (2016): “Adaptive meshing for bi-directional information flows. A multi-scale approach to integrating feedback between design, simulation, and fabrication”, in: Adriaenssens, S., et al. (eds.): *Advances in Architectural Geometry*, Zürich: vdd Hochschulverlag AG, ETH Zürich: 260–273.
 - 5 Sitnikov, V. (2014): “Monolith translucent lattice”, in: *Proceedings of ACADIA 14: Design Agency, Projects of the 34th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture, Los Angeles*: 263–264.
 - 6 Samec, E., Srivastava, A., Chaltiel, S. (2019): “Light formwork for earthen monolithic shells”, in: *Proceedings of the International Conference on Sustainable Material, Systems and Structures (SMSS2019): Challenges in Design and Management of Structures*, Rovinj, Croatia.
 - 7 Tamke, M., et al. (2012): “A new material practice. Integrating design and material behavior”, in: *SimAUD '12: Proceedings of the 2012 Symposium on Simulation for Architecture and Urban Design*: 1–9, <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2339456>.



TOOLS

WERKZEUGE

DIGITAL AND PHYSICAL TOOLS

A tool is defined as a device or implement – especially a handheld one – used to carry out a particular function.¹

Today, as architects and designers, we not only consider physical tools as part of our palette, but the toolbox has also been expanded by well-established as well as just emerging digital possibilities. Cartesian-based NC technologies have been around since 1952,² back then still controlled by punch-card systems. The first computer was hooked up in 1959, in order to control 3-axis CNC systems that have played a major part in the evolution of today's industrialized and standardized production chains.

But today, computers add immense flexibility and quick reprogrammability of production routines. Therefore, more motion control axes can be added to the 3-axis system, allowing for more degrees of freedom in the processing of geometrically complex forms. Furthermore, the exponential increase in computation power over the last two decades has opened up the potential to not only produce but also compute complex and intricate non-standardized parts. In addition to embracing the efficiency provided by modern industrial tools, this research also investigated the potential of more recently emerging technologies like 3D scanning and augmented reality.

However, it is important to pick each tool as a means to an end and embrace the coexistence of traditional and future methods, to not fall in love with our tools and thereby possibly lose sight of the actual tasks at hand. A multitude of possibilities (in that regard) have been offered by the workshop facilities of the Angewandte as well as our collaborating partners, the expertise of various specialists, and the skills and prowess of the research team.

This has established an open field that has been quite different from a streamlined production chain optimized to produce (predetermined) results efficiently. The openness allowed for an (art-based) research methodology that navigates freely in between the constituents and possibilities of that field in order

DIGITALE UND PHYSISCHE WERKZEUGE

Per Definition ist ein Werkzeug ein Gerät oder ein Hilfsmittel, insbesondere eines, das in der Hand gehalten wird, um eine bestimmte Tätigkeit zu ermöglichen oder zu erleichtern.¹

Als Architekt*innen und Designer*innen betrachten wir heute nicht nur physische Werkzeuge als mögliche Hilfsmittel; der zu Verfügung stehende Werkzeugkasten wurde durch gut etablierte, aber auch gerade erst im Entstehen begriffene digitale Werkzeuge erweitert. Kartesisch basierte NC-Technologien gibt es seit 1952,² damals noch gesteuert durch Lochkartensteuerungssysteme. Der erste Computer wurde 1959 angeschlossen, um 3-Achsen-CNC-Systeme zu steuern, die wiederum eine wichtige Rolle bei der Entwicklung heutiger industrialisierter und standardisierter Produktionsketten gespielt haben.

Heute erlauben Computer eine enorme Flexibilität und schnelle Umprogrammierung von Produktionsroutinen. Einem 3-Achsen-System können zusätzliche Bewegungssachsen hinzugefügt werden, was mehr Freiheitsgrade bei der Bearbeitung geometrisch komplexer Formen ermöglicht. Darüber hinaus hat die exponentielle Zunahme der Rechenleistung in den letzten zwei Jahrzehnten das Potenzial eröffnet, komplexe und komplizierte nicht standardisierte Teile nicht nur zu produzieren, sondern auch zu berechnen. Neben der effizienten Nutzung, die moderne industrielle Werkzeuge bieten, untersuchte dieses Forschungsprojekt auch das Potenzial neuerer Technologien wie 3D-Scanning und Augmented Reality.

Es ist jedoch wichtig, jedes Werkzeug als Mittel zum Zweck zu betrachten und die Koexistenz traditioneller und zukünftig möglicher Methoden als Grundlage anzunehmen, sich nicht in unsere Werkzeuge zu verlieben und dabei möglicherweise die eigentlichen Aufgaben aus den Augen zu verlieren. Eine Vielzahl von Möglichkeiten boten sowohl die Werkstatteinrichtungen der Angewandten als auch die der Kooperationspartner*innen, die Expertise verschiedener Fachleute und die Fähigkeiten und Fertigkeiten der Forschenden.

Dadurch entstand ein offenes Feld, ganz anders als eine zweckoptimierte Produktionskette, die darauf ausgelegt ist, effizient und zielgerichtet zu produzieren. Diese Offenheit ermöglicht eine (künstlerische) Forschungsmethodik, die frei zwischen den Komponenten und Möglichkeiten dieses



►►► Figs. 1a–c | Abb. 1a–c:
A mixture of manual and battery-powered hand saws, axes and professional chainsaw expertise by a local lumberjack were used in the process 2018–2021.

▼ Fig. 1d | Abb. 1d:
Forester Sandra Tuider (left), an expert in sustainable forestry, focusing on natural rejuvenation of mixed forests in Lower Austria. She closely collaborated with the team throughout the project and provided access to her forest for collecting branch forks.



to find the best-suited tool or combination of tools. Results were not bound to predefined objectives, but were partially found through a process of trial and error and improvisation, possibly leading to altogether novel techniques. This ‘maker attitude’³, both in physical and digital realms, is understood as a means of process-oriented understanding and clarifying complex questions.

HARVESTING

In contrast to the common material-resourcing approach to wood construction, which relies on processed timber products, this project followed a different strategy. The ‘building material’ was used in its original, unprocessed form, therefore branches were collected in the woods, directly after the annual felling season that takes place from December to February. Harvesting them through precise (and careful) cutting, without having to remove entire trees from the ecological cycle, is also an imaginable alternative.

Aside from the occasional ash or black pine specimen, an assortment of mainly hornbeam and beech branches was collected during several harvesting sessions (Figs. 1a–d).

3D SCANNING

In the beginning, various available technologies, from laser scanning (Fig. 2a) to photogrammetry to structured light scanning (Fig. 2b), were tested and evaluated on variously sized and shaped wooden elements. Structured light scanning emerged as the most versatile and suitable for the given geometries (Fig. 3).

Prior to scanning, the branches were edited (Fig. 5) and marked in order to be able to match the physical parts with the respective digital models via reference points later in the course of processing (Fig. 6).

Feldes navigiert, um das jeweils am besten geeignete Werkzeug oder die beste Kombination von Werkzeugen zu finden. Ergebnisse waren nicht an eine Zielvorgabe gebunden, sondern wurden in einem Prozess des Ausprobierens und der Improvisation gefunden, die ihrerseits teilweise zu völlig neuen Techniken führten. Diese ‚Maker‘-Haltung³, sowohl auf physischer als auch auf digitaler Ebene, wurde als Mittel zum prozessorientierten Erkenntnisgewinn und zur Klärung komplexer Fragen verstanden.

ERNTEN

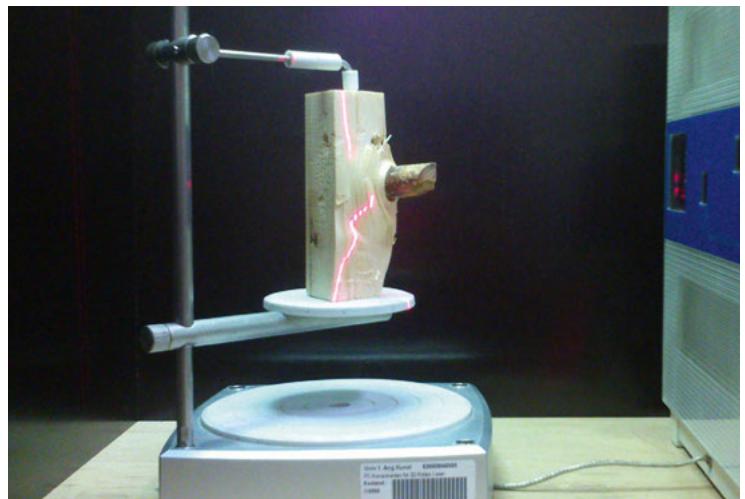
Im Gegensatz zur üblichen Materialbeschaffung im Holzbau, die auf bereits bearbeitete Holzprodukte zurückgreift, verfolgte dieses Projekt eine andere Strategie. Das ‚Baumaterial‘ wurde in einer unbearbeiteten Form verwendet, dazu wurden Äste nach der alljährlichen Fällsaison zwischen Februar und April direkt im Wald gesammelt. Vorstellbar wäre stattdessen auch, diese durch gezieltes (und behutsames) Abschneiden zu gewinnen, ohne ganze Bäume aus dem ökologischen Kreislauf herauszunehmen.

Im Projekt wurde, neben gelegentlichem Eschen- oder Schwarzkiefernholz, bei mehreren Sammlungsaktionen ein Sortiment von hauptsächlich Hainbuchen- und Buchenästen zusammengetragen (Abb. 1a–d).

3D-SCANNEN

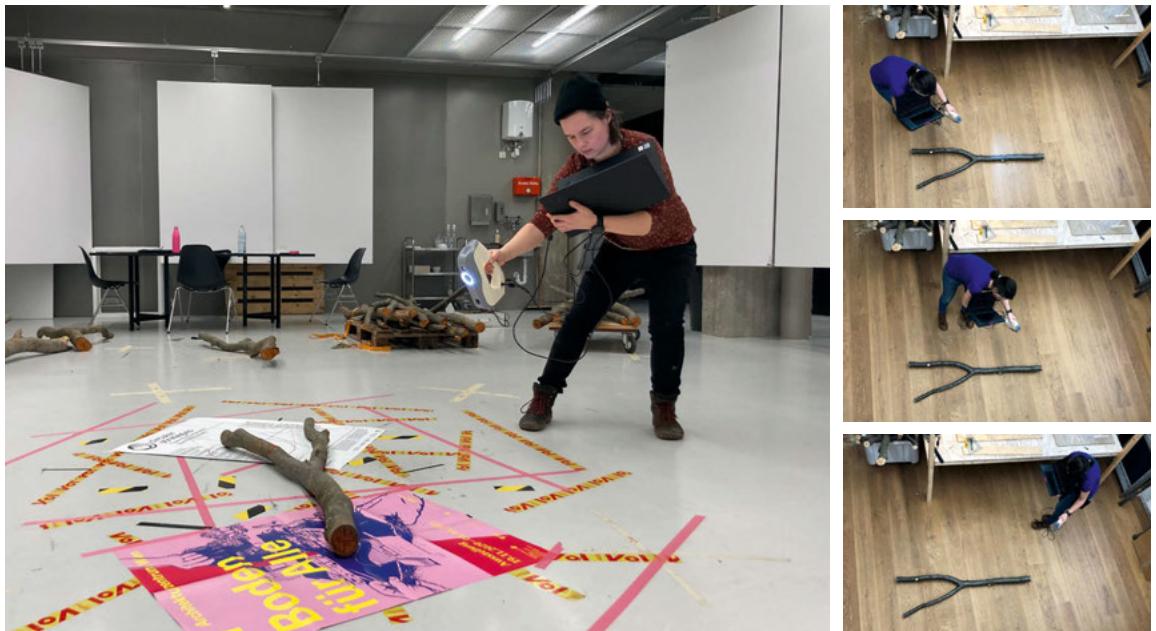
Zu Beginn wurden verschiedene verfügbare Technologien vom Laserscanning (Abb. 2a) über Photogrammetrie bis hin zum Structured Light Scanning (Abb. 2b) an unterschiedlich geformten Holzelementen verschiedener Größe getestet und beurteilt. Structured Light Scanning erwies sich als das vielseitigste und für die gegebenen Geometrien am besten geeignete Verfahren (Abb. 3).

Die Äste wurden vor dem Scannen grob zugeschnitten (Abb. 5) und markiert, um im Zuge der Bearbeitung später die physischen Teile mit den jeweiligen digitalen Modellen über Referenzpunkte abgleichen zu können (Abb. 6).



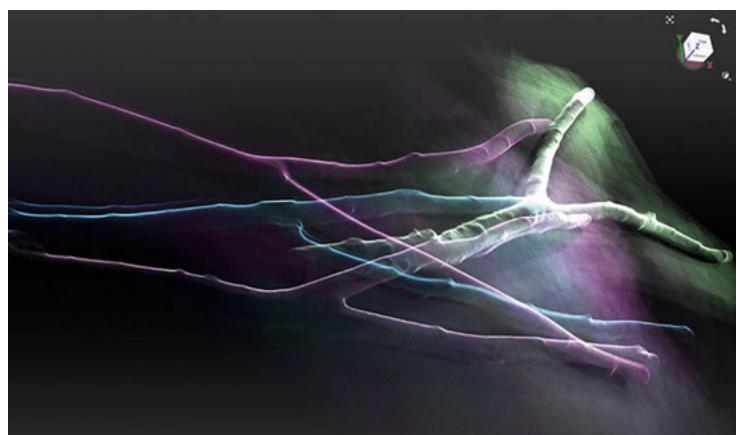
► Fig. 2a | Abb. 2a:

First laser scanning test with a *Next Engine* Scanner in the ddplab of the IoA at the Angewandte 2018.



▲▲ Fig. 2b | Abb. 2b:

Real-time scanning of a beechwood branch with a handheld *Artec Eva* structured light scanner at the Angewandte 2021.



► Fig. 3 | Abb. 3:

Digital representations of scanned branches in the *Artec Studio* software package.

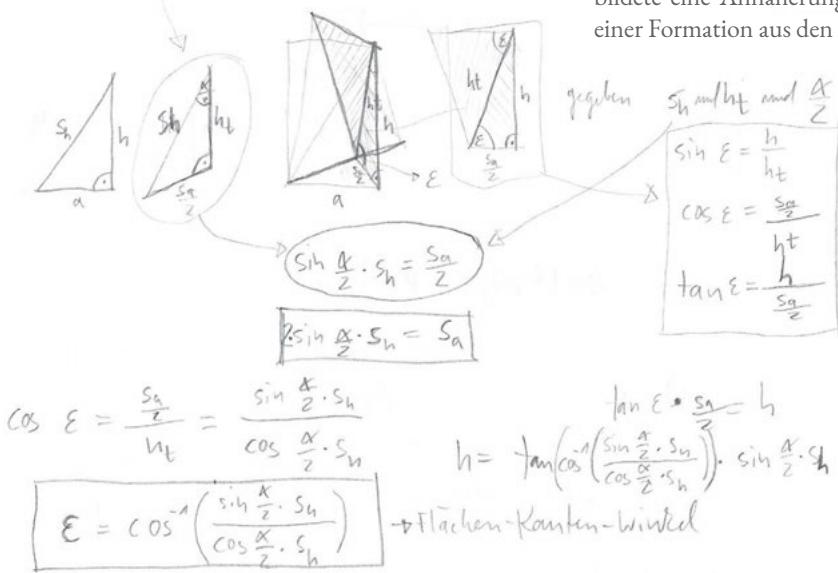
CATALOG

In an automated process utilizing *Grasshopper3D*, centerline models were generated from the scanned mesh geometries (Fig. 7). Transforming the volumetric meshes that have large file sizes, into polylines, enabled both more efficient computing of digital data and mathematical/geometric calculation.⁴ These models were collected in a digital catalog containing a large number of unique elements, each with a similar topology but different dimensions, angles and cross-sections of the individual branch arms (Fig. 8).

DISCRETE ELEMENTS

In order to form spatial constructions from these elements, approximation models with unified, identical parts were first created in an intermediate step. For the aggregation of branch elements as simplified models, the *Wasp*⁵ plug-in for *Grasshopper3D* was used. The plug-in allows parts to be aggregated according to predefined connectivity rules. To define the *Wasp* ‘parts’, one averaged, Y-shaped ‘proto-part’ was constructed with a geometry based on the average crotch angle and the longest branch arm length retrieved from the set of scanned elements. The connectivity rules were designed to generate three-dimensional cellular lattice structures (Figs. 4 and 10 left). ↗³³

Finally, a ‘proto-aggregation’ of those identical ‘proto-parts’ approximated the extents and global density of a formation from the actual unique parts.



↗³³ see *Branch Formations : Geometry : Cellular Structures*, p. 136 f.

KATALOG

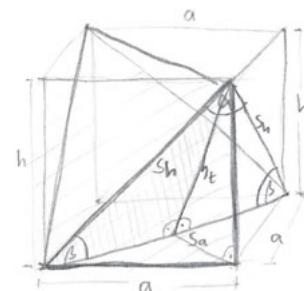
In einem automatisierten Prozess in *Grasshopper3D* wurden aus den gescannten Geometrien Achsmodelle erzeugt (Abb. 7). Die Umwandlung von Volumen in Polylinien reduzierte einerseits die Dateigrößen wesentlich und ermöglichte eine effizientere Datenverarbeitung, die vereinfachten Achsmodelle erlaubten andererseits auch eine mathematische/geometrische Berechnung.⁴

Diese Modelle wurden in einem digitalen Katalog zusammengefasst, der eine große Anzahl einzigartiger Elemente enthält, jedes mit einer ähnlichen Topologie, aber mit unterschiedlichen Abmessungen, Winkeln und Querschnitten der einzelnen Astarme (Abb. 8).

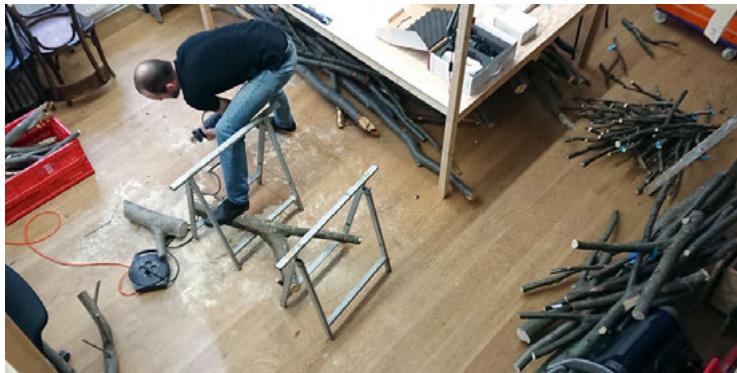
DISKRETE ELEMENTE

Um räumliche Konstruktionen aus diesen Elementen zu bilden, wurden in einem Zwischenschritt zunächst Näherungsmodelle mit vereinheitlichten, identen Teilen erstellt. Für diese Aggregation von Astelementen als vereinfachte Modelle wurde das *Wasp*-Plugin für *Grasshopper3D* verwendet. Das Plugin erlaubt es, ‘Teile’ nach vordefinierten Regeln, die die Verbindungen der Teile zueinander bestimmen, räumlich anzugeordnen. Um solche *Wasp*-‘Teile’ zu definieren, wurde ein durchschnittliches y-förmiges ‘Proto-Teil’ konstruiert, dessen Geometrie auf dem durchschnittlichen Schrittwinkel und der längsten Astarmlänge basiert. Diese Werte werden aus der Summe aller gescannten Elemente ermittelt. Die Regeln für die Verbindungen der Teile wurden so entworfen, dass dreidimensionale zelluläre Gitterstrukturen entstanden (Abb. 4 und 10 links) ↗³³

Eine Aggregation der identischen ‘Proto-Teile’ schließlich bildete eine Annäherung an die Ausdehnung und Dichte einer Formation aus den tatsächlichen Unikaten.



◀▲ Fig. 4 | Abb. 4:
Geometric calculations for setting up the connection rules in order to aggregate tetrahedral cells based on an average crotch angle.

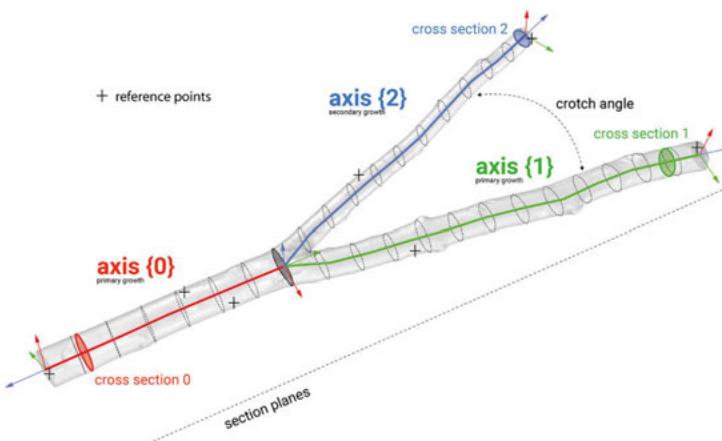


► Fig. 5 | Abb. 5:

The scanning workflow started with preparing the branches by flush cutting of the individual branch arm ends.

► Fig. 6 | Abb. 6:

Besides labeling each branch with a unique identifier, they were also marked with several reference points on the three trimmed ends and other areas on the bark. This allowed for being able to synchronize physical and digital realms at any future step.



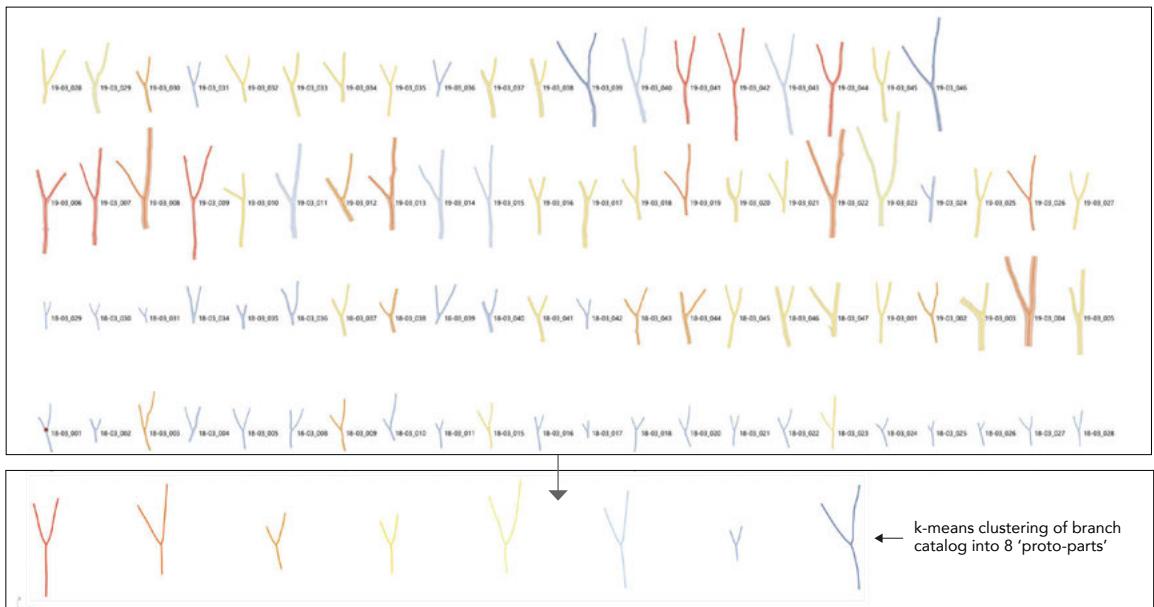
A close-up photograph of several dark, woody branches with small, light-colored spots, likely insect damage. One branch has handwritten text '14-03-072' and '14-02-7' written on it.

◀ Fig. 7 | Abb. 7:

Centroids of co-parallel section outlines define vertices of polylines. Reference points are placed at the locations of the markings. These serve as a geometric reference for matching the digital and the analog models to achieve high precision and accurate placement during CAM processing despite the complex irregular form.

▼ Fig. 8 | Abb. 8:

Using a k-means algorithm, a catalog of digitized branch elements is clustered into eight groups, each represented by one ‘prototype’ (average of the geometric features of the elements contained in one cluster).



ITERATIVE AGGREGATION

In an alternative approach, aggregations of multiple ‘proto-parts’ were created as the basis for a final arrangement. The ‘proto-parts’ for this method were formed by grouping the collection of scanned elements into n subsets of geometrically similar parts using the k-means algorithm⁶ (Fig. 8). In the resulting ‘proto-aggregations’, the distribution of elements varied and they did not form uniform structures, so they were generated iteratively. The parts were accumulated in a step-wise manner to form structures of interconnected tetrahedral cells, adding more in each case, so as to minimize the spacing of the open ends (Figs. 9 and 10 middle and right).

In a subsequent step, the two remaining open ends within the cells were connected with lines to create a cohesive structure. Insertion of supplementary connecting lines, especially in the peripheral areas of the aggregation, further densified and stabilized the overall structure (Fig. 11). Although the resulting structures were a better approximation of formations from different parts, nevertheless, this (purely computer-generated) approach proved difficult to control. Especially the additional line connections caused a significant change in the following form adjustments with the ‘relaxation method’.

The unpredictability of the results was consistent with the concept of object-based design methodology, but proved to be less robust and thus less flexible than structural designs based on a uniform topology.

ITERATIVE AGGREGATION

In einem alternativen Konzept wurden Aggregationen aus mehreren ‚Proto-Teilen‘ als Grundlage für eine endgültige Anordnung erstellt. Die ‚Proto-Teile‘ für dieses Verfahren wurden gebildet, indem die Sammlung der gescannten Elemente mit dem k-Means-Algorithmus⁶ in n Teilmengen geometrisch ähnlicher Teile gruppiert wurde (Abb. 8). In den daraus entstehenden ‚Proto-Aggregationen‘ variierte die Verteilung der Elemente, und sie bildeten keine gleichförmigen Strukturen, daher wurden sie iterativ generiert. Die Teile wurden schrittweise angesammelt, dabei wurden weitere jeweils so hinzugefügt, dass die Abstände der offenen Enden möglichst gering waren (Abb. 9 und 10 Mitte und rechts).

Sie wurden außerdem so positioniert, dass je vier Teile möglichst in sich geschlossene tetraeder-förmige Zellen bilden. In einem anschließenden Arbeitsschritt wurden die beiden offenen Enden innerhalb der Zellen mit Linien verbunden, um eine in sich verbundene Struktur herzustellen. Ein Einfügen ergänzender Verbindungslien, insbesondere in den Randbereichen der Aggregation, verdichtete und stabilisierte die Gesamtstruktur zusätzlich (Abb. 11). Obwohl die entstehenden Strukturen eine bessere Annäherung an Formationen aus unterschiedlichen Teilen darstellten, erwies sich dieser (rein computergenerierte) Ansatz als schwer steuerbar. Besonders die zusätzlichen Linien-Verbindungen bewirkten eine starke Veränderung in der folgenden Formanpassung mit der ‚Relaxation-Methode‘.

Die Unvorhersehbarkeit der Resultate entsprach zwar dem Konzept der objekt-basierten Entwurfsmethodik, zeigte sich aber als weniger robust und dadurch weniger flexibel als Strukturentwürfe, die auf einer gleichförmigen Topologie aufbauen.

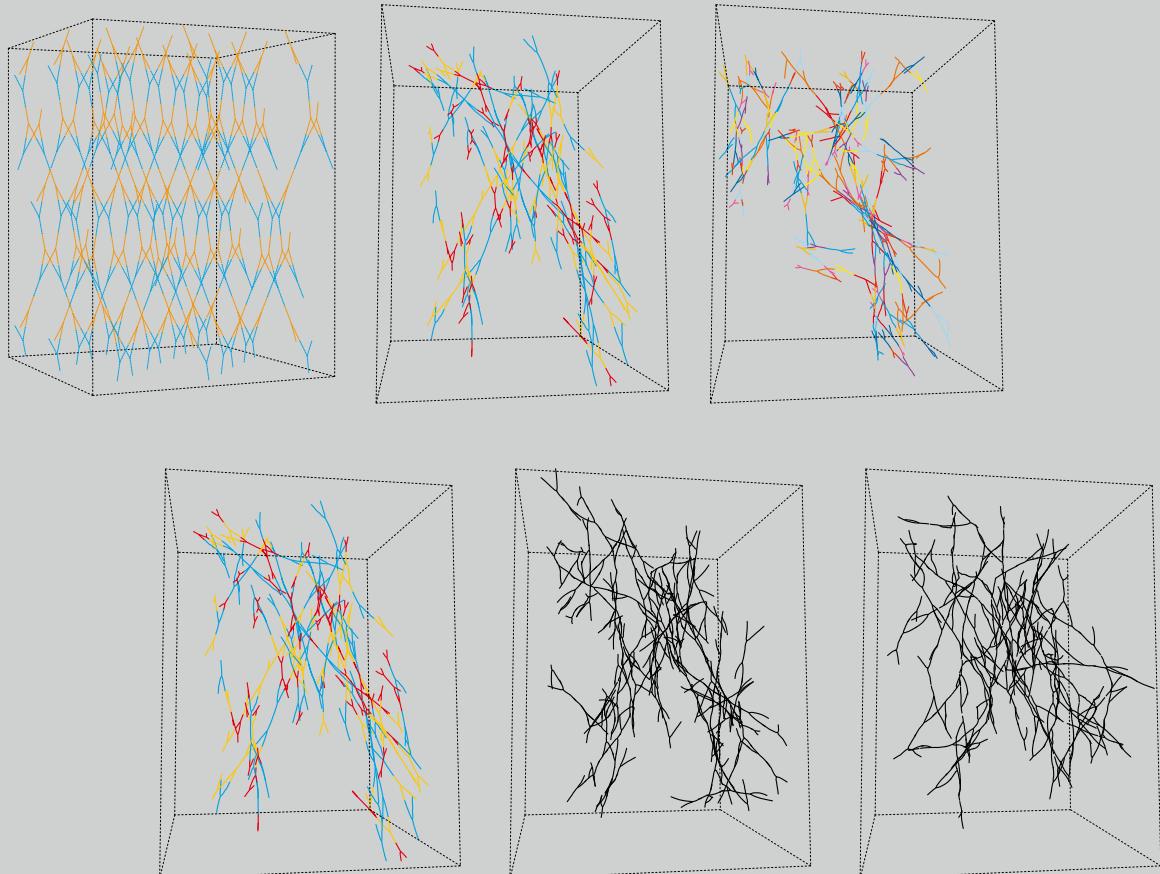
► Fig. 9 | Abb. 9:

Study of an iterative goal-based *Wasp* aggregation. In each step (iteration), parts are added and positioned so that four parts each formed self-contained tetrahedral cells as precisely as possible (highlighted in colors). The white lines indicate the remaining gaps to be closed.



▼ Fig. 10 | Abb. 10:

Iterative goal based *Wasp* aggregation: Left: Using one 'proto-part' results in a regular grid. Middle and right: Increasing the amount of 'proto-parts' (e.g. 3 and 10) results in unpredictable aggregations, that are closer to natural growing patterns.



▲ Fig. 11 | Abb. 11:

Aggregation with three 'proto-parts':
Left: initial *Wasp* aggregation. Middle: relaxed aggregation.
Right: Additional topological links create a more compact, but also more deformed formation after relaxation.

CONSTRAINT-BASED RELAXATION METHOD

Replacing the simplified modular instances ('proto-parts') from the discrete element aggregation with the actual unique form of each specimen from the catalog ^{↗ 34} generates discontinuities in the previously idealized framework (Fig. 7, p. 139).

The catalog allows for various options for sorting the elements according to various geometric properties (e.g., cross section) and/or requirements defined for the global structure (e.g., a specific load case) (Fig. 12). ^{↗ 35}

To apply the dynamic relaxation method, the *Grasshopper* plug-in *Kangaroo3D*⁷ was used. The aggregation topology was translated into a constraint-based model. Parts were defined as rigid bodies with tension springs connecting end segments (Fig. 13a).

In the iterative simulation process, the springs were compressed, closing gaps and forcing ends to overlap. Additionally, collinearity and angle constraints were set in order for overlapping end segments to align (Fig. 13b).

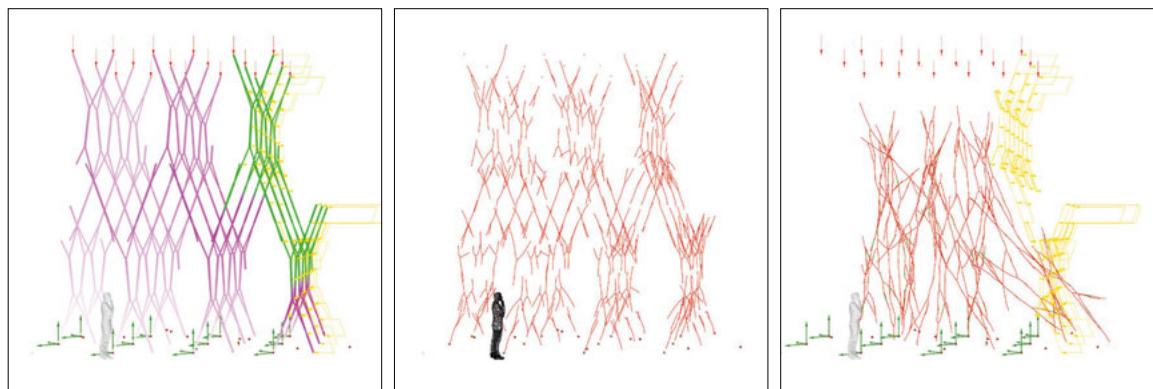
ABHÄNGIGKEITSBASIERTE RELAXATION-METHODE

Ersetzt man die vereinfachten modularen Instanzen ('Proto-Teile') aus der diskreten Element-Aggregation durch die tatsächlichen, eindeutigen Formen jedes Exemplars aus dem Katalog, ^{↗ 34} entstehen in dem zuvor vereinfachten Stabwerk Unterbrechungen (Fig. 7, S. 139).

Der Katalog erlaubt nun verschiedene Möglichkeiten, die Elemente nach geometrischen Eigenschaften (z. B. Querschnitt) und/oder Anforderungen, die für die globale Struktur definiert wurden (z. B. ein bestimmter Lastfall) (Abb. 12), zu sortieren. ^{↗ 35}

Für die 'Relaxation-Methode' wurde das *Grasshopper*-Plug-in *Kangaroo3D*⁷ verwendet. Die Aggregationen mit eingesetzten Teilen aus dem Katalog wurden in ein abhängigkeitsbasiertes Modell übersetzt. Die Elemente wurden als starre Elemente und die Verbindungen, die die jeweiligen Endsegmente verbinden, als bewegliche Zugfedern definiert (Abb. 13a).

Im iterativen Simulationsprozess kontrahierten die Federn, um die Lücken zwischen den Teilen zu schließen. Zusätzlich wurden Kollinearitäts- und Winkelanforderungen definiert, um die Überlappung der Endsegmente zu steuern (Abb. 13b).

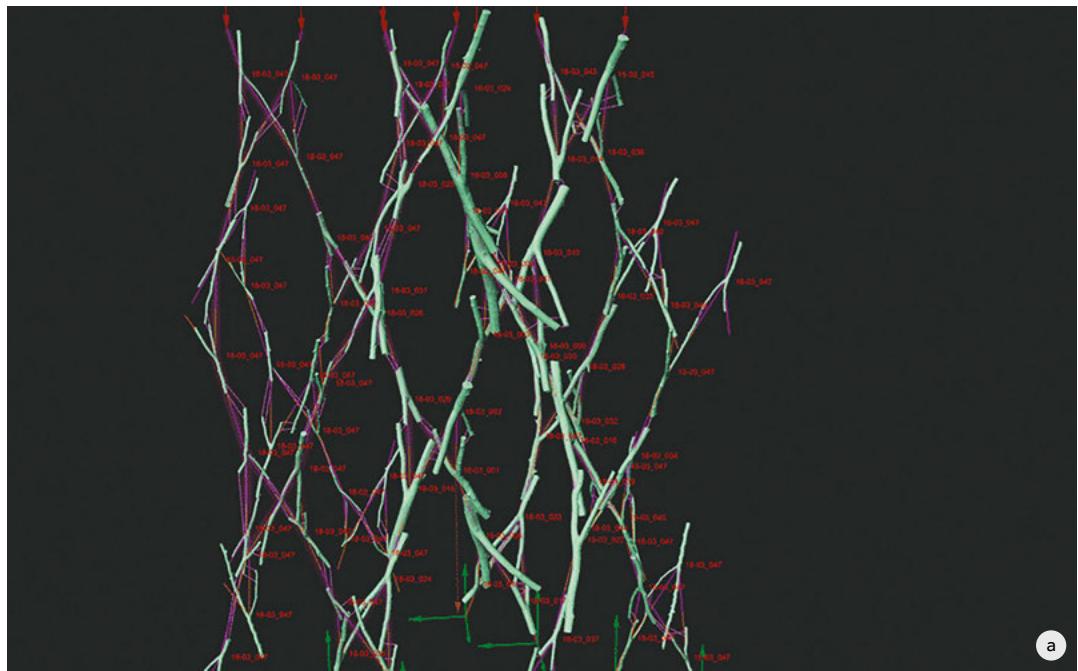


▲ Fig. 12 | Abb. 12:

Replacement of 'proto-parts' with centerline models of unique branches from the catalog (middle) according to load case calculation (left), and realignment (relaxation) of the model (right)

^{↗ 34} see *Branch Formations : Tools : Catalog*, p. 160 f.

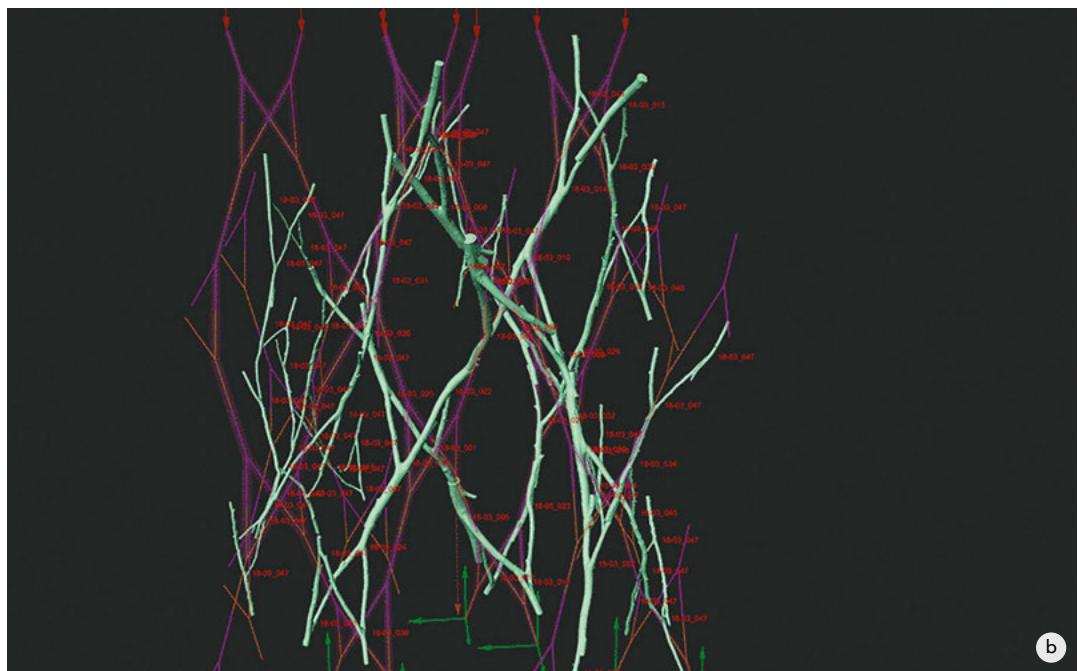
^{↗ 35} see *Branch Formations : Geometry : Sorting as a Design Tool*, p. 144 f.



▲▼ Figs. 13a+b | Abb. 13a+b:

Constraint-based model with the mesh models of scanned branches defined as rigid bodies and compressing 'springs' (line-goal: 0-length) between correlating ends.

- a) at the initial position after replacement of the 'proto-parts'
- b) realigned, after the relaxation process



INTUITIVE ASSEMBLY

In a second, more intuitive approach, digital elements from the catalog were manually placed and oriented toward each other. The connections between individual branch arms were manually defined between the respective segments. Using a modified *Grasshopper3D-Kangaroo* definition, the geometry of these models was automatically adjusted in real time according to the 'relaxation method'. Despite being a more time-consuming process for positioning parts, one huge benefit of this approach lay in its potential for freedom of experimentation (agency of the designer). The effects of certain decisions were immediately apparent because there was no intermediate development of programming for an algorithmically generated assembly. Thus, infinite possibilities of irregular and ordered formations that consist of a small number of parts can be quickly tested (Figs. 14a+b and 15a+b).

This method was used to design the digital model for the realization of a second demonstrator. Compared to the first realization in the course of the exhibition in AIL 2019, a variation of the same scheme with a repetitive uniform topology was developed for that purpose. Tetrahedral units were interconnected with single branch elements, resulting in a more compact assembly (Figs. 16a+b). The branch elements were sorted by size and diameter in order to position the strongest elements in the lower area, thinner branch forks at the top. In addition, the placement of parts was specifically designed to accommodate the limited number of branch forks available. Individual elements could be swapped as needed, and the automatic geometry adjustment made the effects on the overall configuration immediately visible.

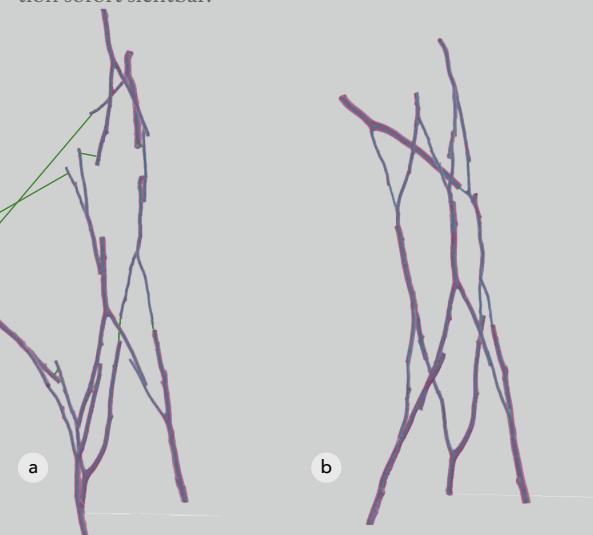
INTUITIVE ANORDNUNG

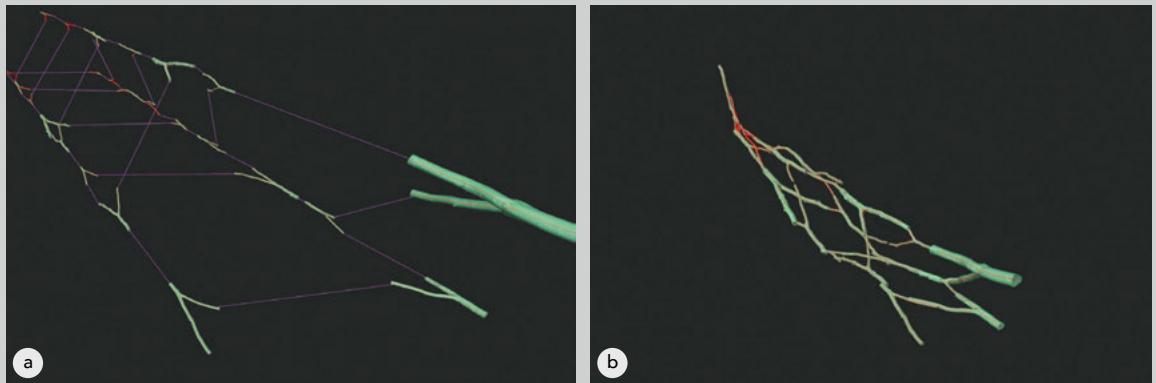
In einem zweiten, intuitiveren Ansatz wurden die digitalen Elemente aus dem Katalog manuell platziert und grob zueinander ausgerichtet. Die Verbindungen zwischen einzelnen Abzweigungen wurden ebenso von Hand zwischen den jeweiligen Segmenten gesetzt. Mit einer modifizierten *Grasshopper3D-Kangaroo*-Definition wurde in Echtzeit die Form dieser Modelle entsprechend der 'Relaxation-Methode' automatisch angepasst. Trotz des erhöhten Zeitaufwands beim Anordnen der Teile besteht in diesem Ansatz ein großer Vorteil in der Handlungsfreiheit beim Experimentieren. Die Auswirkungen bestimmter Entscheidungen zeigen sich unmittelbar, da die zwischengeschaltete Entwicklung einer Programmierung für eine algorithmisch generierte Anordnung entfällt. So können unendlich viele Möglichkeiten unregelmäßiger und geordneter Formationen mit einer kleinen Anzahl an Teilen schnell getestet werden (Abb. 14a+b and 15a+b).

Diese Methode wurde verwendet, um das digitale Modell für die Realisierung eines zweiten Demonstrators zu entwerfen. Anders als bei der ersten Umsetzung im Zuge der Ausstellung im Angewandte Innovation Laboratory 2019 wurde hierfür eine Variante des gleichen Schemas mit einer sich wiederholenden einheitlichen Topologie untersucht. Tetraeder-förmige Module wurden direkt durch einzelne Äste miteinander verbunden, was zu einer kompakteren Struktur führte (Abb. 16a+b). Die Astelemente wurden nach Größe und Durchmesser sortiert, um die stärksten Elemente im unteren Bereich, dünnere Astgabeln oben zu positionieren. Darüber hinaus wurde die Anordnung der Teile speziell auf die begrenzte Anzahl der verfügbaren Astgabeln abgestimmt. Einzelne Elemente konnten bei Bedarf getauscht werden, und durch die automatische Formanpassung wurden die Auswirkungen auf die Gesamtkonfiguration sofort sichtbar.

► Figs. 14a+b | Abb. 14a+b:

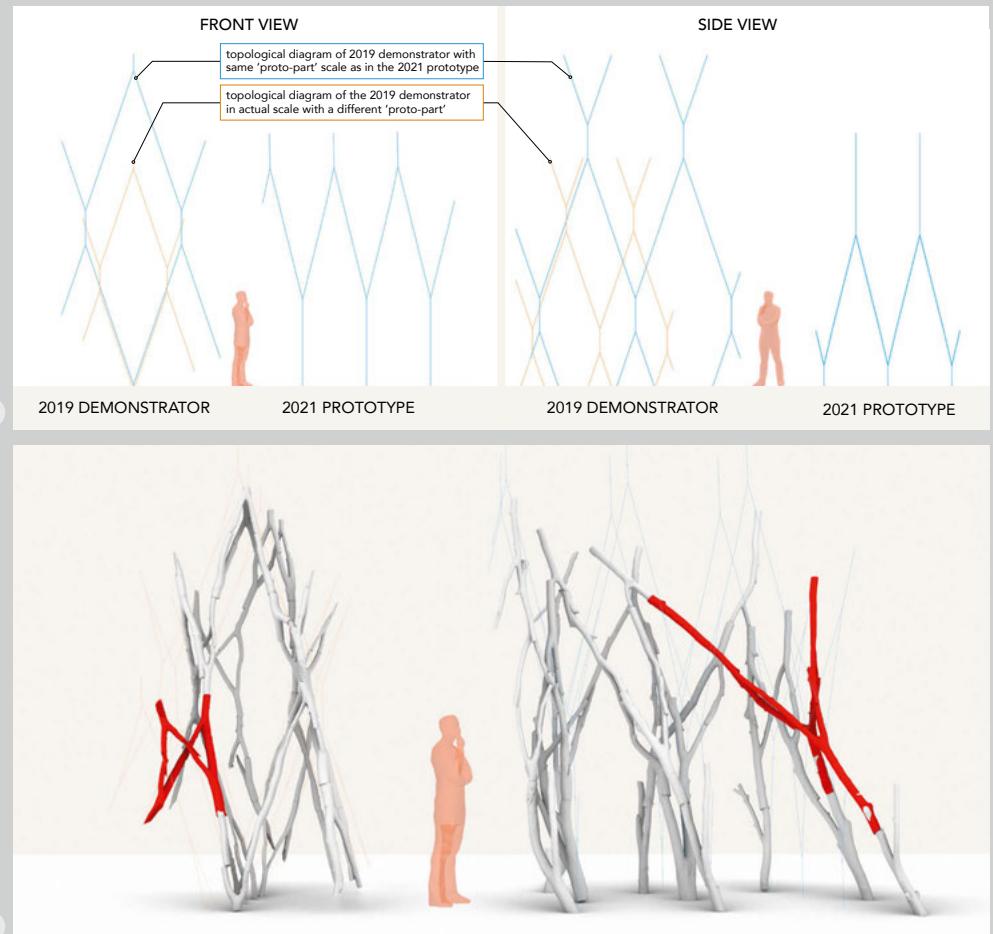
- a) Intuitive assembly of branch elements.
Connections between elements are defined manually by placing lines at correlating ends.
- b) Relaxed model.





▲ Figs. 15 a+b | Abb. 15 a+b:

Manual assembly of elements to approximate a truss, before (a) and after relaxation (b).



▲ Figs. 16a+b | Abb. 16a+b:

Comparison of the demonstrator built in 2019 from 59 branch forks for the *Conceptual Joining* show at the AIL Angewandte Innovation Laboratory (left) and the *Branch Formations* prototype built in 2021 from 39 branch forks in a courtyard at the Angewandte (right).

a) Topological diagrams based on one 'proto-part'.

b) Digital models with branch elements (3D scans) from two different sets. Although the latter realization was based on a more compact topology, it resulted in a more spacious structure because it consisted of much larger branch elements.

PARAMETRIC STRUCTURAL ANALYSIS

In order to define a distribution of branch forks that corresponded to the load transfer pattern within a structure, the load-bearing behavior of a global ‘proto-aggregation’ was evaluated in *Karamba3d*⁸ for *Grasshopper3D*. According to the previously described method ↗³⁶, different load case scenarios were evaluated (Fig. 17 top).

Local utilization as shown by simplified structural analysis (Fig. 17 middle) was used as the defining parameter for the replacement of ‘proto-parts’. Each member in the set was positioned according to the best-suited cross section, and the resulting gaps were closed using the previously mentioned relaxation method (Fig. 17 bottom).

The deformed models showed a significant transformation of the initial regular aggregation. A final formation would therefore require another structural evaluation to either validate its structural integrity or inform modifications of the scheme by exchanging individual elements in order to optimize the overall performance.

Alternatively, the geometric change in the aggregated form could be minimized with an inventory restricted to elements with identical branch-segment lengths. A possibly even more effective approach would be to reconsider the choice of cross sections as the only selection criteria for the positioning of elements. A multi-criteria assessment including geometric features of branches could increase the level of control for structural optimization.

The first realized demonstrator from 59 branches at the *Conceptual Joining* show at the Angewandte Innovation Laboratory (AIL) (Fig. 18) was a cutout from a larger aggregation model made of 788 elements designed for a load case scenario that assumed an architectural scheme with platforms and ramps (Fig. 16g, p. 147 and Fig. 19).

PARAMETRISCHE STRUKTURANALYSE

Um eine Verteilung der Astgabeln entsprechend der Lastabtragung innerhalb einer Struktur zu definieren, wurde zunächst mit *Karamba3d*⁸ für *Grasshopper3D* das Tragverhalten einer ‘Proto-Aggregation’ ausgewertet. Entsprechend der zuvor beschriebenen Methode ↗³⁶ wurden verschiedene Lastfallszenarien ausgewertet (Abb. 17 oben).

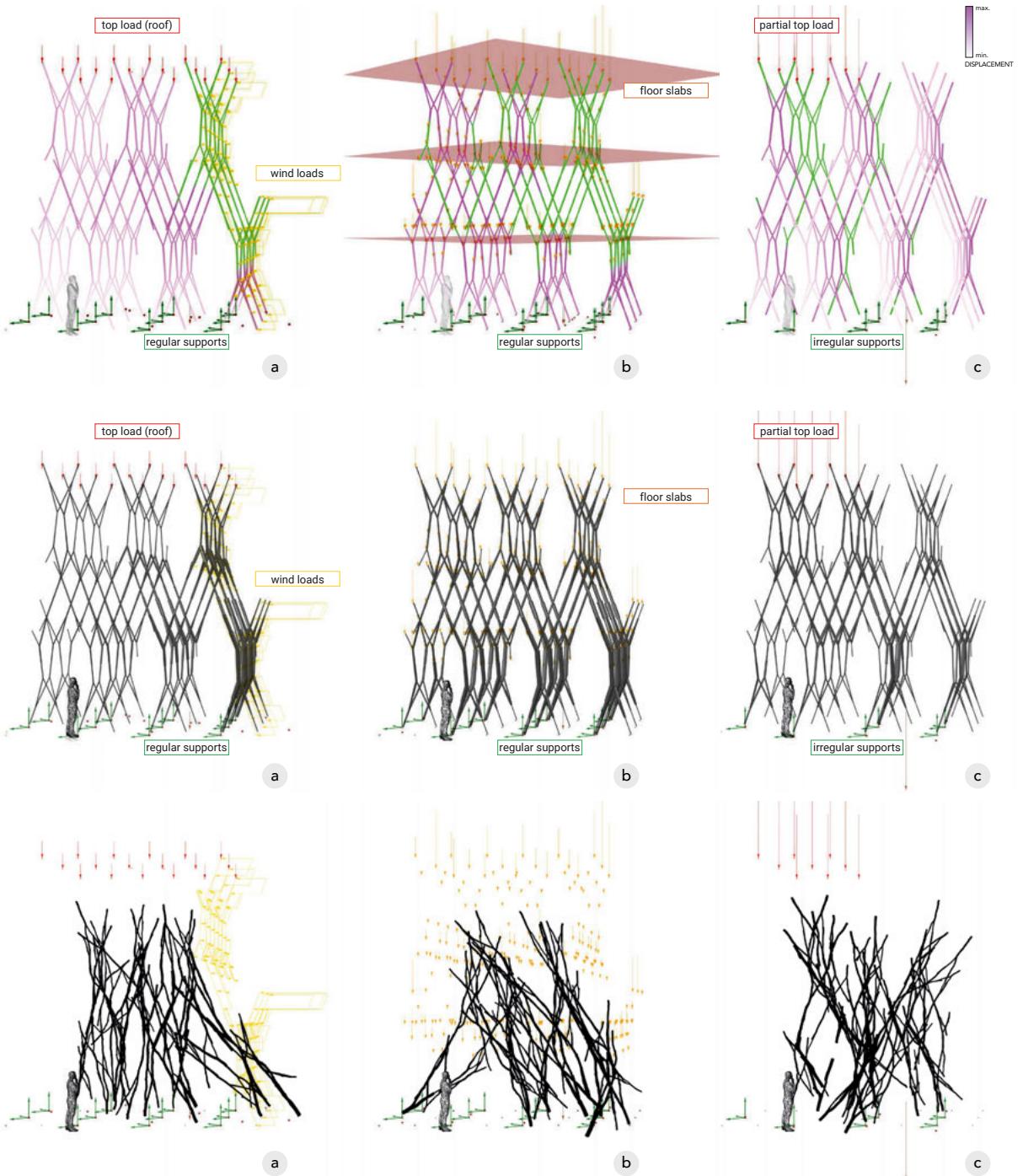
Die vereinfachte statische Berechnung zeigte die lokale Belastung (Abb. 17 Mitte), welche dann als bestimmender Parameter für den Austausch der ‘Proto-Teile’ mit den Modellen der verfügbaren Astgabeln verwendet wurde. Jedes Element des Katalogs wurde entsprechend dem am besten passenden Ast-Querschnitt positioniert, und die resultierenden Lücken wurden mit der zuvor beschriebenen ‘Relaxation-Methode’ geschlossen (Abb. 17 unten).

Die formangepassten Modelle zeigten eine deutliche Veränderung gegenüber der ursprünglichen regelmäßigen ‘Proto-Aggregation’. Eine endgültige Formation würde daher eine weitere strukturelle Bewertung erfordern, um entweder ihre strukturelle Integrität zu verifizieren oder um durch ein gezieltes Austauschen einzelner Elemente das Tragverhalten der Struktur zu optimieren.

Alternativ könnte die geometrische Veränderung der aggregierten Form durch eine Beschränkung auf Elemente mit identischen Astlängen minimiert werden. Ein möglicherweise noch effektiverer Ansatz wäre es, die Wahl der Querschnitte als alleiniges Auswahlkriterium für die Positionierung der Elemente zu überdenken. Eine Multi-Kriterien-Bewertung, die zusätzliche geometrische Eigenschaften der Astgabeln mit einbezieht, könnte die Kontrollmöglichkeiten für eine Tragwerksoptimierung noch erweitern.

Der erste realisierte Demonstrator aus 59 Astgabeln für die *Conceptual Joining*-Show im Angewandte Innovation Laboratory (AIL) (Abb. 18) war ein Teilbereich aus einem größeren Aggregationsmodell aus 788 Elementen, das für ein Lastfallszenario konzipiert war, in dem eine architektonische Konstruktion angenommen wurde, die Plattformen und Rampen trägt (Abb. 16g, S. 147, und Abb. 19).

↗³⁶ see *Branch Formations : Geometry : Sorting as a Design Tool : Fig. 14 middle*, p. 145



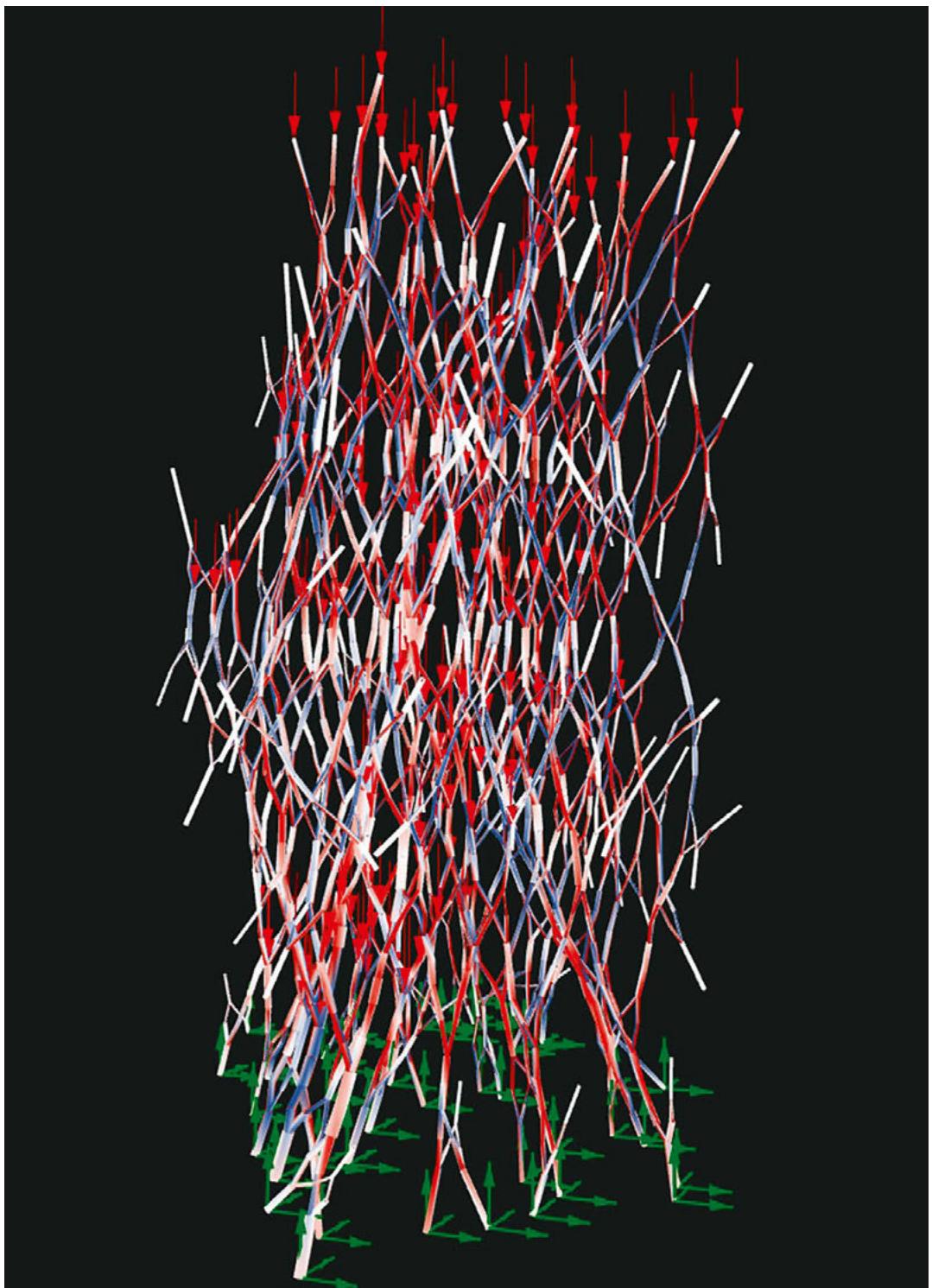
▲ Fig. 17 | Abb. 17:

Top: visualization of displacement with *Karamba3d*. Load case scenarios with generic assumptions of gravity along with various vertical and horizontal load cases. a) 'Roof' dead load, wind load, regular supports. b) 'Floor-plate' live load, regular supports. c) Partial dead load at the top, irregular supports. All calculations are done applying the average cross section to all elements. Middle: The analysis affects a layout of the required cross section distribution. Bottom: Dependent on the scenario, large variations of the initial form occur, representing a combinatory adaptation of the same set of elements to the respective force conditions.



▲ Fig. 18 | Abb. 18:

The demonstrator built in 2019 from 59 branch forks for the *Conceptual Joining* show at the AIL Angewandte Innovation Laboratory.



▲ Fig. 19 | Abb. 19:

The built demonstrator was a cutout from an assumed larger aggregation made of 788 elements with an assumed load case scenario which imagines a possible architectural scheme for such structures (see also Fig. 16g, p. 147).

AUGMENTED REALITY

Augmented reality (AR) was used as a communication tool over the course of the *Conceptual Joining* show at the Angewandte Innovation Laboratory (AIL).

In the exhibition, visitors were able to see complementary digital information and explore the extended structural assembly of branches (Fig. 20), the structural evaluation model, the relaxation simulation, and the use case scenario with ramps and floor plates as virtual information overlaid with the physical installation (Fig. 21).

In addition to the use as a means of communication, AR was investigated as a productive tool in a method for cutting joints with AR-assisted handcrafting. An intrinsic link between machine learning and machine vision creates the potential to allow for feedback between these processes and augmented reality fabrication methods.

This combination of computation and simple analog techniques allows one to envision novel and more democratic fabrication processes, in which the intelligence of computational interfaces is used to augment manual processes. Such research could enable users to work with a high level of complexity utilizing simple tools, as recent examples like the *Steampunk Pavilion*⁹ demonstrate.

A possibility once reserved for either high-end CNC machinery or highly skilled craftspeople could therefore be brought to a diverse array of users with traditional skills and minimal access to advanced fabrication equipment, in this case, with merely a pen, a handsaw, and a conventional, off-the-shelf smartphone (Figs. 22–25).

AUGMENTED REALITY

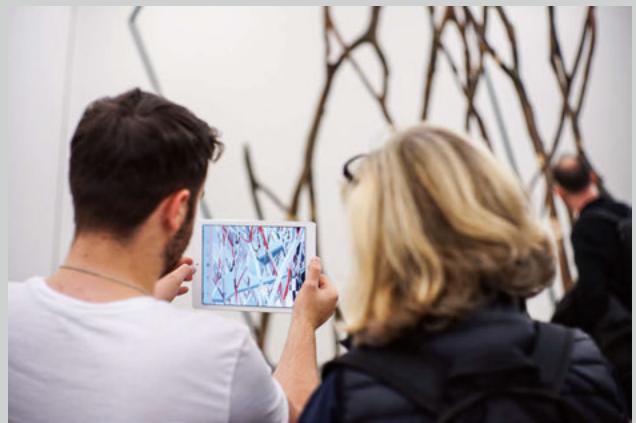
Im Rahmen der *Conceptual Joining*-Show wurde Augmented Reality (AR) im Angewandte Innovation Laboratory als Kommunikationswerkzeug eingesetzt.

In der Ausstellung konnten die Besucher ergänzende digitale Informationen, wie etwa die erweiterte Astgabelstruktur (Abb. 20), das statische Berechnungsmodell, die Relaxationssimulation sowie das Nutzungsszenario mit Rampen und Bodenplatten, mit der physischen Installation überlagert sehen und erkunden (Abb. 21).

Neben dem Einsatz zur Kommunikation wurde AR im Projekt als produktives Werkzeug zur Herstellung von Holzverbindungen mit einfachen Handwerkzeugen untersucht. Eine intrinsische Verbindung zwischen maschinellem Lernen und maschinellem Sehen schafft die Möglichkeit für eine Rückkopplung mit Augmented-Reality-Fertigungsmethoden.

Diese Kombination aus Computing und (simplen) analogen Techniken erlaubt es, sich neuartige und demokratischere Fabrikationsprozesse vorzustellen, bei denen die Intelligenz von Computerschnittstellen genutzt wird, um manuelle Prozesse zu erweitern. Weitere Forschung in diese Richtung könnte es Gestalter*innen ermöglichen, mit relativ einfachen Mitteln dezentral an hochkomplexen Strukturen zu arbeiten, wie auch jüngste Beispiele wie der *Steampunk-Pavillon*⁹ zeigen.

Eine Möglichkeit, die früher entweder High-End-CNC-Maschinen oder hochqualifizierten Handwerkerleuten vorbehalten war, kann so einer Vielzahl von Nutzer*innen zugänglich gemacht werden, die mit eher herkömmlichen Fähigkeiten und geringem Zugang zu hochentwickelten Fertigungsmaschinen ausgestattet sind. In diesem Fall sind lediglich ein Stift, eine Handsäge und ein gewöhnliches Smartphone notwendig (Abb. 22–25).



► Fig. 20 | Abb. 20:
Visitors at the *Conceptual Joining* show, interacting with the custom AR app, developed by Ben James.
Photo © Leonard Kern



▲ Fig. 21 | Abb. 21:
Screenshot of the AR app showing the overlay of the digital and the physical.



▲ Fig. 22 | Abb. 22:

Equipment and building material for AR-assisted handcraft fabrication.



◀▲ Fig. 23 | Abb. 23:

The smartphone app, developed by Ben James, makes it possible to 'map' digitally generated cutting lines onto physical branches. These lines are manually traced with a pen.



▲▲ Figs. 24a+b | Abb. 24a+b:

Branch with traced lines (a) as
guideline for manual cutting (b).



◀ Fig. 25 | Abb. 25:

A tetrahedral cell temporarily
assembled with zip ties.

3- AND 5-AXIS CNC ROUTING

For the first attempt at processing such irregular elements with digital fabrication tools, a standard 3-axis CNC gantry router was used to machine branch elements that were assembled into a tetrahedral module (Figs. 26a+b). ↗³⁷

To be able to mount the individual branches for milling, an adjustable wooden U-frame was developed (Fig. 27). All four branches were processed from two sides to cut the joints, remove the bark, and equalize adjacent cross sections (Figs. 28a–c).

The level of precision that could be achieved with such a standard Cartesian fabrication tool was surprisingly high, despite the irregular organic geometry. However, the whole process turned out to be very time-consuming, did not allow for more complex joints, and required a lot of improvisational talent along the way (Fig. 29).

Some of these shortcomings could be resolved using a 5-axis system. This would require a more complex programming setup and the development of a new fixation device (Fig. 30). Also, the still very limited machine boundary needs to be taken into consideration (Fig. 31).

3- UND 5-ACHSEN-CNC-FRÄSEN

Für den ersten Versuch, solche unregelmäßigen Elemente mit digitalen Fabrikationswerkzeugen zu bearbeiten, wurde eine Standard-3-Achsen-CNC-Portalfräse verwendet. Es wurden damit Astgabeln bearbeitet und zu einem tetraederförmigen Modul zusammengesetzt (Abb. 26a+b). ↗³⁷

Um die einzelnen Äste zum Fräsen montieren zu können, wurde ein verstellbarer Holz-U-Rahmen entwickelt (Abb. 27). Alle vier Äste wurden jeweils beidseitig bearbeitet, dabei wurden die Verbindungen gefräst, im gleichen Arbeitsschritt wurde die Rinde entfernt und die Dicke der angrenzenden Ast-Querschnitte angeglichen (Abb. 28a–c).

Der Präzisionsgrad, der mit einem solchen kartesischen Standard-Fertigungswerkzeug erreicht werden konnte, war trotz der unregelmäßigen organischen Geometrie überraschend hoch. Allerdings erwies sich der gesamte Prozess als sehr zeitaufwendig, das Verfahren ließ keine komplexeren Verbindungen zu und erforderte im Prozess viel Improvisationstalent (Abb. 29).

Einige dieser Unzulänglichkeiten könnten mit einem 5-Achs-System behoben werden. Dies würde jedoch einen komplexeren Programmieraufwand und die Entwicklung einer neuen Fixievorrichtung erfordern (Abb. 30). Ebenso muss der sehr begrenzte Bearbeitungsraum dieser Maschinen berücksichtigt werden (Abb. 31).

1 Google Dictionary.

2 “Numerical Control Servo-System”, Servomechanisms Laboratory at MIT, 1952.

3 Savage, A. (2019): *Every Tool's a Hammer: Life Is What You Make It*, New York: Atria Books.

4 ^{en} Axis models are the necessary simplification as a base condition for statics calculations with the finite element method (FEM), see also Spyros, C. C. (1994): *Finite Element Modeling*, Morgantown: West Virginia Univ. Press: 33–34.

^{de} Achsmodelle sind eine notwendige Vereinfachung als Grundlage für statische Berechnungen mit der Finite-Elemente-Methode (FEM), siehe auch Spyros, C. C. (1994): *Finite Element Modeling*, Morgantown: West Virginia Univ. Press: 33–34.

5 Rossi, A., Tessmann, O. (2019): “From Voxels to Parts: Hierarchical Discrete Modeling for Design and Assembly”, in: *ICGG 2018 – Proceedings of the 18th International Conference on Geometry and Graphics*, Cham: Springer: 1001–1012.

6 ^{en} k-means clustering is a method of vector quantization, originally from signal processing, that aims to partition n observations into k clusters in which each observation belongs to the cluster with the nearest mean (cluster centers or cluster centroid), serving as a prototype of the cluster (https://en.wikipedia.org/wiki/K-means_clustering, last access June 14th, 2021).

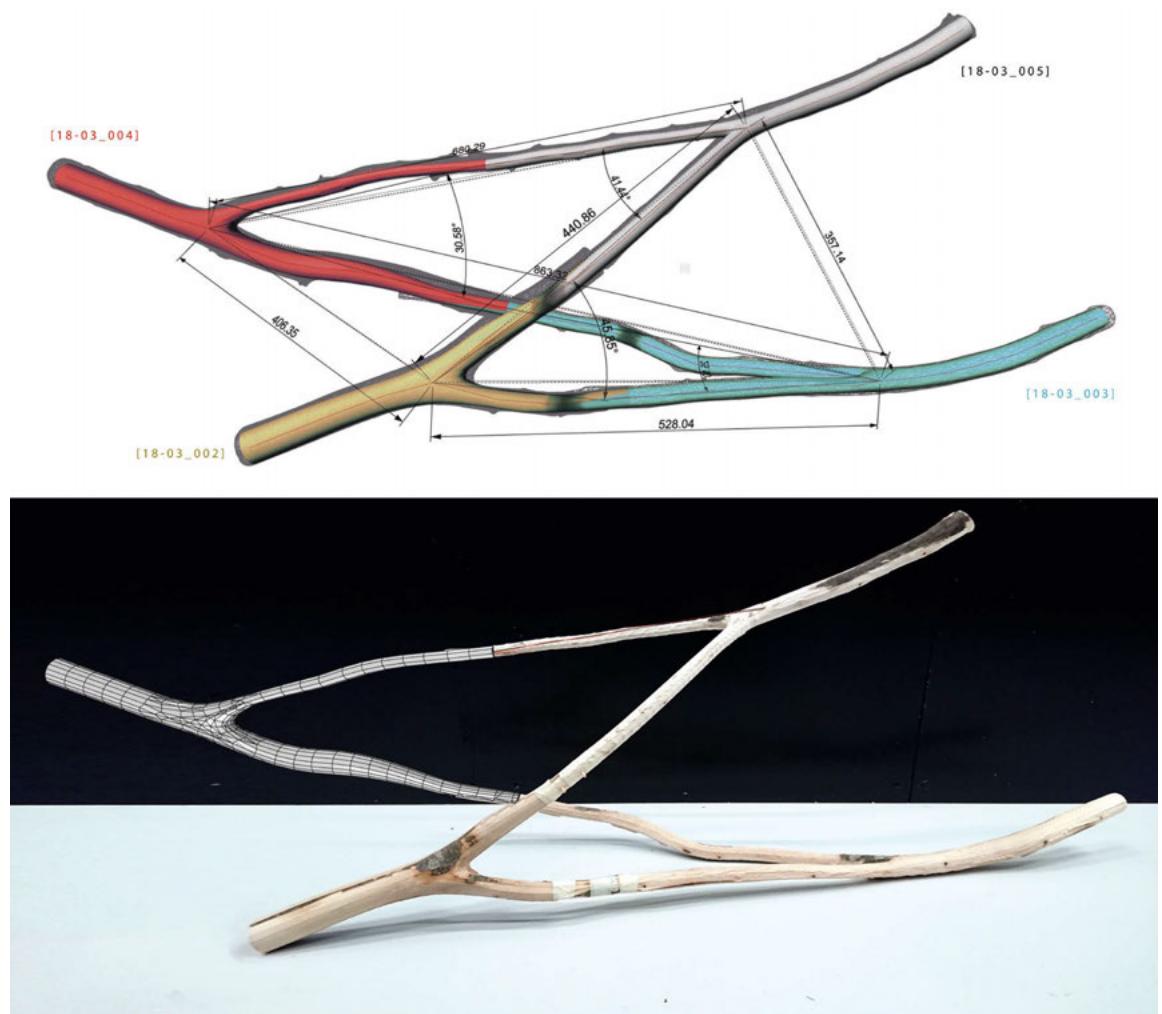
^{de} Ein k-Means-Algorithmus ist ein Verfahren zur Vektorquantisierung, das auch zur Clusteranalyse verwendet wird. Dabei wird aus einer Menge von ähnlichen Objekten eine vorher bekannte Anzahl von k Gruppen gebildet. Der Algorithmus ist eine der am häufigsten verwendeten Techniken zur Gruppierung von Objekten, da er schnell die Zentren der Cluster findet (<https://de.wikipedia.org/wiki/K-Means-Algorithmus>, abgerufen am 14.06.2021).

7 Senatore, G., Piker, D. (2015): “Interactive real-time physics: an intuitive approach to form-finding and structural analysis for design and education”, in: *Computer-Aided Design* 61: 32–41.

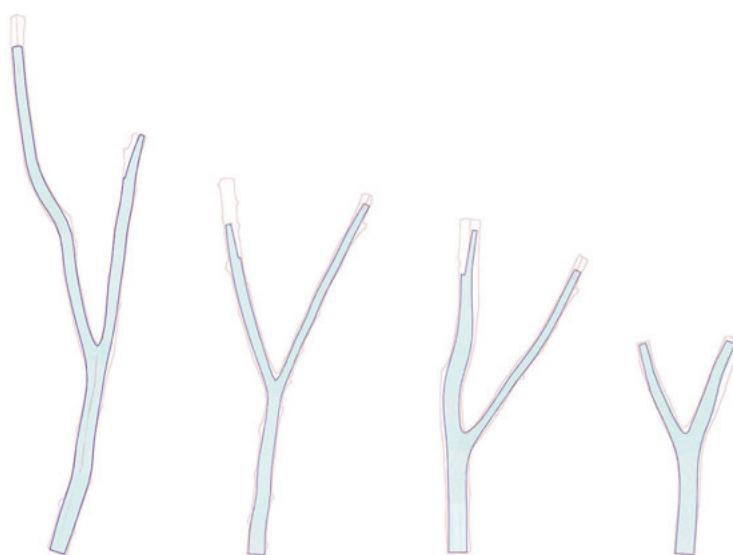
8 Preisinger, C. (2013): “Linking Structure and parametric Geometry”, in: *Architectural Design* 83: 110–113, doi: 10.1002/ad.1564.

9 *Steampunk Pavilion* by Gwyllim Jahn & Cameron Newnham + Soomeen Hahm Design + Igor Pantic, Tallinn, Estonia, 2019.

↗³⁷ see *Branch Formations : Joints : Joint Morphology : Figs. 3b and 4*, p. 195



▲ Fig. 26a | Abb. 26a:
Digital and physical models of four
Y-shaped branches assembled into
one tetrahedral module.



◀ Fig. 26b | Abb. 26b:
Top view of the milling paths for one side
of each of the four individual branches.



◀ Fig. 27 | Abb. 27:

U-frame fixture to hold various branch elements throughout the machining process. The forking ends were fixed to a rigid L-shaped part and a moveable beam held the opposite branch end. The scanned branch geometries were aligned with the XY plane (horizontal) within each CAD/CAM file. A 1:1 printout of the digital model was used as a template to position the branches in the fixture. Branches were fixed to this U-frame using three standard woodscrews in linear extension to the centerlines of the individual branch arms.

▼▼► Figs. 28a–c | Abb. 28a–c:

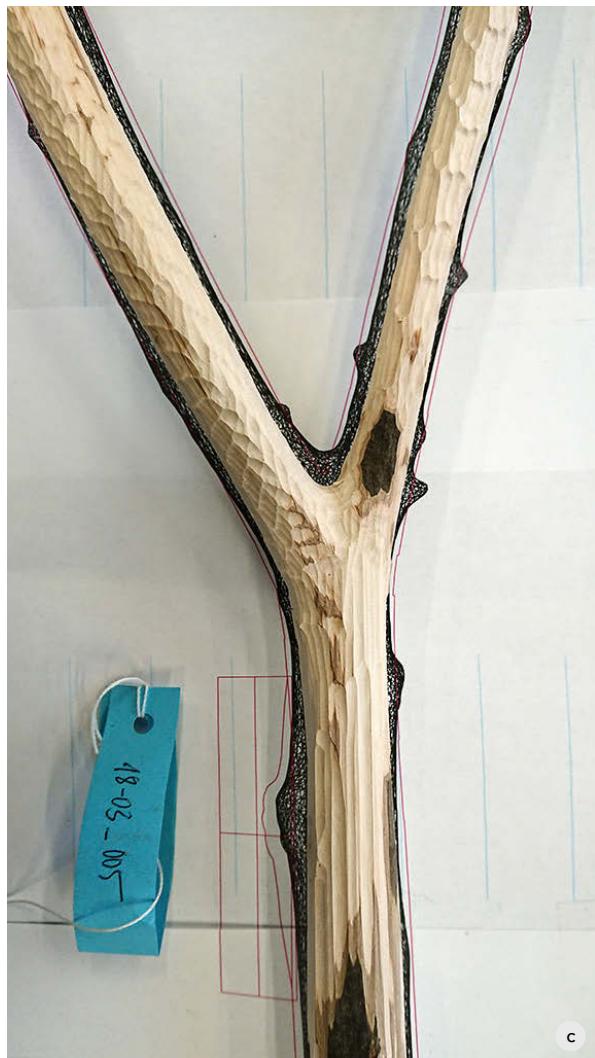
a) Fixture positioned on the router table. b) By flipping the fixture, branches can be machined from two sides in the milling process. c) Dependent on the G-code, the traces of the cutting tool form different surface patterns.



a



b

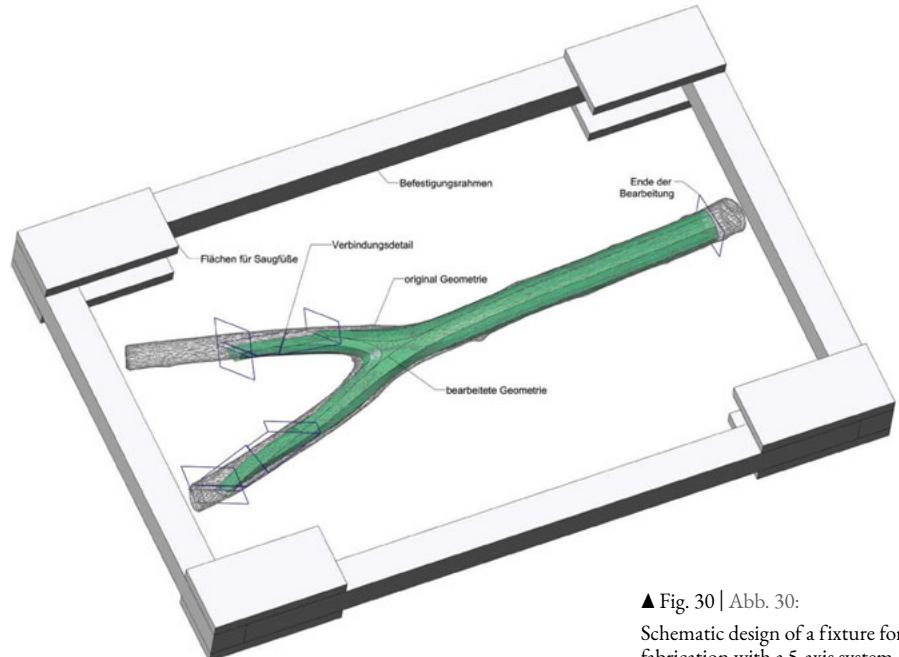


c



◀ Fig. 29 | Abb. 29:

The fabrication required constant supervision as several improvised modifications were necessary during the milling process, e.g. adding supports to compensate for high vibrations or rip and tear at the ends.



▲ Fig. 30 | Abb. 30:

Schematic design of a fixture for fabrication with a 5-axis system.



◀ Fig. 31 | Abb. 31:

The machine boundary of a standard 5-axis CNC router has a height limitation.

ROBOTIC FABRICATION AT THE ANGEWANDTE ROBOTICS LAB (ARL)

ROBOTER-FERTIGUNG IM ANGEWANDTE ROBOTICS LAB (ARL)

↗ PHILIPP HORNUNG

Digital planning and building require digital tools and processes that enable digitally driven manufacturing and ultimately, a holistic, contemporary form of working. In this context, the interface between software and hardware plays an important role.

In *Branch Formations*, the use of flexible and multifunctional software and hardware was essential towards addressing the individual and complexly shaped, non-standard components.

DIGITAL TOOLS

As digital tool(s), here generally referred to as software, *Grasshopper3D* was used, a parametric and visual programming environment in the CAD software *Rhinoceros3D*, which allows for the creation of parameter-based, individual and customized algorithms. *Grasshopper3D* offers a repertoire of standard functions, which can be extended by third-party plug-ins, like *KUKA|prc*, which allows for offline programming (machine syntax/code > offline simulation) of *KUKA* robots.¹

ROBOTS

Industrial robots are versatile, digitally controlled machines and provide a direct link to digitally based, physical manufacturing. They offer a large machine workspace, with a small machine footprint. Their kinematic system offers a high degree of freedom in terms of 'end-effector'² movement and orientation. In addition, there is a high degree of flexibility due to the free choice of tools and materials. This combination of aspects make industrial robots an all-rounder tool perfectly suited for customized, individualized processes.

Digitales Planen und Bauen erfordert digitale Werkzeuge und Prozesse, die digital gestützte Fertigung und letzten Endes ein ganzheitliches zeitgenössisches Arbeiten ermöglichen. Dabei spielt die Schnittstelle zwischen Software und Hardware eine wichtige Rolle.

Im Fall von *Branch Formations* war die Verwendung flexibler und multifunktionaler Software und Hardware essenziell, um auf die individuellen und komplex geformten, nicht standardisierten Bauteile eingehen zu können.

DIGITALE WERKZEUGE

Als digitales Werkzeug, hier allgemein als Software bezeichnet, wurde auf *Grasshopper3D* zurückgegriffen, eine parametrische und visuelle Programmierumgebung in der CAD-Software *Rhinoceros3D*, welche das Erstellen von parametrischen, individuellen und maßgeschneiderten Algorithmen ermöglicht. *Grasshopper3D* bietet ein Repertoire an Standard-Funktionen, das durch Plugins von Drittanbietern erweitert werden kann. Ein solches Plugin ist *KUKA|prc*, das Offline-Programmieren (machine syntax/code > offline simulation) von *KUKA*-Robotern ermöglicht.¹

ROBOTER

Industrie-Roboter sind vielseitige, digital gesteuerte Maschinen und stellen eine direkte Schnittstelle zur digital gestützten (physischen) Fertigung dar. Diese bieten einen großen Bearbeitungsbereich bei geringer Aufstellfläche. Ihr kinematisches System lässt viele Freiheitsgrade für Bewegungs- und Orientierungsmöglichkeiten des 'Endeffektors'² offen. Hinzu kommt ein hohes Maß an Flexibilität durch die freie Werkzeug- und Materialwahl. In Summe machen all diese Aspekte solch einen Industrie-Roboter gewissermaßen zu einem Universalwerkzeug, das sich perfekt für maßgeschneiderte, individualisierte Prozesse eignet.

CLAMPING DEVICE

Due to the individual, strongly diverging branch fork geometries, it was necessary to develop an adjustable clamping device that was stiff enough to withstand vibrations during the machining process. In addition to the temporary fastening, it was important not to damage or injure the branches.

The clamping fixture (Figs. 1a–c) was mounted on the 7th axis of the articulated-arm robot.

The branch fork typology resulted in three clamping points, the minimum for a sufficiently determined and stable fixation. These requirements were implemented by a two-axis clamping fixture made of aluminum profiles. This device consisted of a cubic base structure, the ‘trestle’, two linear ‘cantilevers’ (clamping axis rails), as well as three ‘holding points’ in the form of V-shaped brackets. Clamping axis #1 was freely positionable on the upper planar mounting plane of the trestle, with two linear adjustable clamping points. Clamping axis #2 was freely positionable on the inner/lower planar mounting plane of the trestle, with one linearly adjustable clamping point. By using an exact digital representation of the physical clamping device (Fig. 2), it was possible to precisely simulate the machining process in order to avoid physical collisions in the robot cell.

► Fig. 1a | Abb. 1a:

For initial tests, three unique 3D-printed supports per branch fork were used for mounting (fabrication event in Sankt Aegidi, 2019, collaboration with *Creative Robotics Lab* of the University of Art and Design Linz). This solution incorporated direct bolting, which resulted in damage of the branches.

▼ Fig. 1b | Abb. 1b:

Development of an adaptive clamping fixture for flexible and damage-free mounting. The adjustability was still too limited and the large cantilevers of the branches caused problematic vibrations.



► Fig. 1c | Abb. 1c:

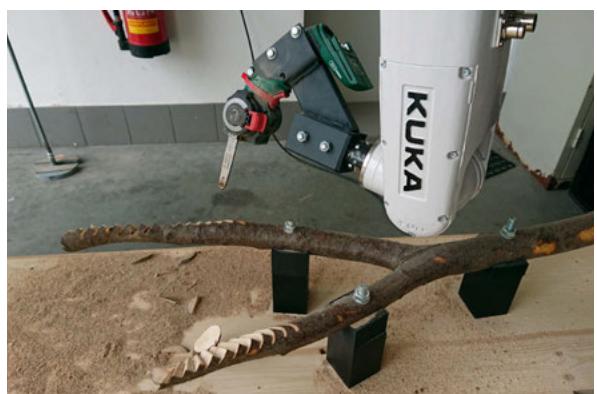
The clamping fixture was improved by integrating additional rails and extended support points for better adjustability. This made it possible to process larger components plus a wider variety of them. The outwardly shifted support points reduced the vibrations significantly.

SPANNHILFE

Aufgrund der individuell sehr stark divergierenden Astgabel-Geometrien war es notwendig, eine möglichst flexible Einspannvorrichtung zu entwickeln, die steif genug ist, um den Vibrationen während des Bearbeitungsprozesses standzuhalten, dabei aber die Äste nicht beschädigt.

Die Spannvorrichtung (Abb. 1a–c) wurde auf der siebenten Achse des Knickarmroboters, einem um eine vertikale Achse drehenden Drehtisch, montiert.

Die Astgabeltypologie ergab drei Einspannpunkte, die das Minimum für eine ausreichend definierte und stabile Fixierung darstellen. Diese Anforderungen wurden durch eine Zwei-Achsen-Spannvorrichtung aus Aluminiumprofilen umgesetzt. Die Vorrichtung bestand aus einem kubischen Grundkörper, dem ‚Bock‘, zwei linearen ‚Auslegern‘ (Spannachse) sowie drei ‚Haltepunkten‘ aus v-förmigen Konsolen. Achse 1 hatte zwei linear einstellbare Einspannpunkte und war auf der oberen Montage-Ebene des Bocks frei positionierbar. Achse 2 hatte einen linear einstellbaren Einspannpunkt und war auf der inneren/unteren Montage-Ebene des Bocks frei positionierbar. Durch ein exaktes digitales Modell der physikalischen Spannvorrichtung (Abb. 2) war es möglich, den Bearbeitungsprozess vorab präzise zu simulieren, um später Kollisionen bei der Bearbeitung zu vermeiden.



JOINTS

The overall objective was the development and testing of joints that feature an inherent assembly logic, spatial fitting accuracy, and good force transmission. The joints were developed through an interaction of design-specific decisions (global and local) and manufacturing-specific dependencies (material, tools and machine).

Modified lap joints

Initial preliminary tests followed the approach of a classical CNC wood machining with cylindrical shank end mills. In the first studies, the fabrication of joint geometries was tested. In addition, sections of the branch surface were cut away by flank milling, to equalize the cross-section between two branches in the area of the joint. However, the machining with cylindrical end mills turned out to be problematic (Fig. 3). ↗³⁸ Another significant finding from these initial tests was the increased collision potential of the milling spindle, cutting tool, and material and clamping device, associated with the widely differing branch fork geometries.

Scarf joint with lock

For the first robotic prototype (Fig. 4), a joint was developed (Fig. 5) to be machined with a circular saw blade and a drill bit (Fig. 6). The joint consisted of two interlocking pairs of wedges with two-sided planar surfaces that were locked with a dowel in the center. The advantage of this connection geometry was the efficiency of its realization through few tool paths and only two tool types. However, this joint type turned out to be problematic during assembly in terms of forming a tetrahedral module, because the individual connections do not have a common global joining direction. The parts could only be connected with a certain degree of elastic deformation of the branch arms. Moreover, the joint had a certain residual weakness in the area of the tips of the shanks, which caused the joint to deform and gape easily under load. To ensure the best possible connection, this joint should be glued to achieve a full material closure.

Conical scarf miter joint

For the 'Robotic Demonstrator – Sankt Aegidi', a small-scale setup was developed in cooperation with the Creative Robotics Lab of the University of Art and Design Linz. A first attempt at creating a newly developed joint geometry was tested with the help of

VERBINDUNGEN

Das übergeordnete Ziel war die Entwicklung und Eprobung von Verbindungen, die sich durch eine inhärente Montagelogik, räumliche Passgenauigkeit und gute Kraftübertragung auszeichnen.

Die Verbindungen wurden in einem Zusammenspiel von konstruktionsspezifischen Entscheidungen (auf globaler sowie lokaler Ebene) und fertigungsbedingten Gegebenheiten (Material, Werkzeug und Maschine) entwickelt.

Modifizierte Überblattung

Erste Vorab-Versuche verfolgten den Ansatz einer klassischen CNC-Holzbearbeitung mit Schafffräsern. Hierbei wurden Holz-Holz-Verbindungen getestet. Zusätzlich wurden im gleichen Bearbeitungsschritt Teile der Astoberfläche durch Flankenfräsen abgetragen, um den Querschnitt zwischen zwei Ästen im Bereich der Verbindung anzugeleichen. Die Bearbeitungen mit Schafffräsern erwies sich jedoch als problematisch (Abb. 3). ↗³⁸ Eine weitere, wichtige Erkenntnis aus diesen ersten Versuchen war das erhöhte Kollisionspotenzial von Frässpindel, Werkzeug, Material und Einspannvorrichtung, das mit den sehr unterschiedlichen Astgabelgeometrien einherging.

Geschäftete Verbindung mit Schloss

Für den ersten Prototypen (Abb. 4) wurde eine Verbindung entwickelt (Abb. 5), die mit einem Kreissägeblatt und einem Bohrer bearbeitet werden konnte (Abb. 6). Die Verbindung bestand aus zwei Paaren von Keilen mit zweiseitig planen Flächen, die ineinander greifen und in der Mitte mit einem Dübel verriegelt wurden. Der Vorteil dieser Verbindungsgeometrie war die effiziente Realisierbarkeit mit nur wenigen Werkzeugpfaden und lediglich zwei Werkzeutypen. Diese Art der Verbindung erwies sich jedoch beim Zusammenfügen zu einem tetraedrischen Modul als problematisch, da die einzelnen Verbindungen keine gemeinsame globale Fügerichtung hatten. So konnten die Astgabeln nur mit einem gewissen Grad an elastischer Verformung der Zweigarme verbunden werden. Außerdem wies die Verbindung im Bereich der Schenkel spitzen eine gewisse Restschwäche auf, die dazu führte, dass sich die Verbindung unter Belastung leicht verformte und aufklaffte. Um eine bestmögliche Verbindung zu gewährleisten, sollte diese Verbindung verklebt werden, um einen vollständigen Materialschluss zu erreichen.

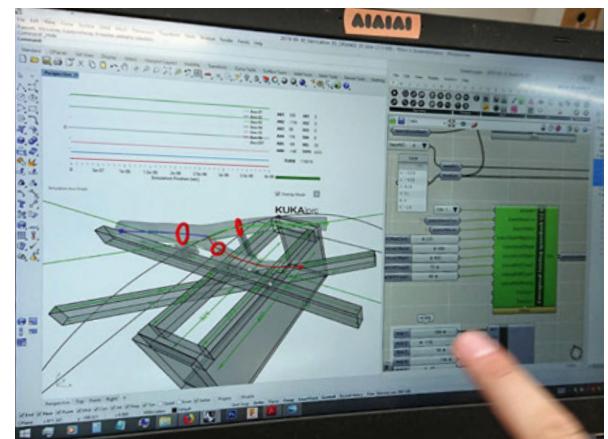
Geschäftete und konisch geschränkte Keilzinken-Verbindung

Für den 'Robotic Demonstrator – Sankt Aegidi' wurde in Zusammenarbeit mit dem Creative Robotics Lab der Kunsthochschule Linz ein Aufbau im kleinen Maßstab entwickelt. Mit Hilfe eines Miniaturroboters und einer Mikro-

↗³⁸ see *Branch Formations : Joints : Joint Morphology : Fig. 5b*, p. 197



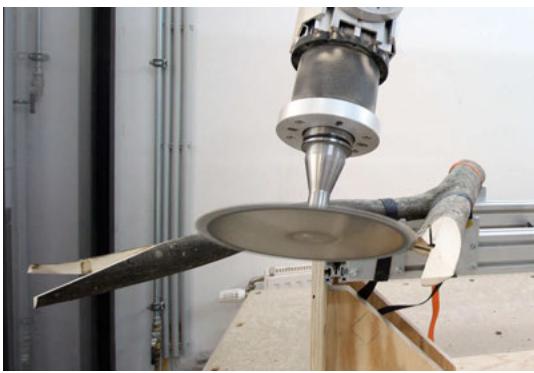
► Fig. 2 | Abb. 2:
Digital model of the clamping fixture.



► Fig. 3 | Abb. 3:
The flexibility of the branches in combination with the high force impact, caused by flank milling (high friction caused by large contact area between the tool blades and the material), led to higher vibrations, and ultimately to partial material breakage and a rough surface finish.



▲ Fig. 5 | Abb. 5:
Detail view of the branch connections.
▼ Fig. 6 | Abb. 6:
Machining with a circular saw blade attached to a 6-axis robotic arm.



▼ Fig. 4 | Abb. 4:
Prototypical realization of a tetrahedral cell from beechwood and common hornbeam branches.



a miniature robot and a micro-chainsaw (Fig. 1a). Subsequently, the joint geometry was further refined and the production process was adapted to the larger *KUKA* robot at ARL.

The joint (Fig. 7) was based on conical scarf miters that are placed perpendicularly on an inclined (pitch) longitudinal axis of the joint, creating a toothed and shafted joint geometry. A parametric model was used to define the geometry by variably controlling the rotation around the common longitudinal joint axis (roll), the inclination of the shank/joint axis (pitch), and the amount and amplitude of the teeth (Fig. 8). Due to the fan-like layout and geometry of the teeth, there was only one possible way to match two parts at the joint. This form-fitting capacity ensured a precise relative positioning of parts and stability. Furthermore, the mechanical interlocking teeth increased the contact surface area and friction to provide an improved load transmission compared to a standard half-lap joint. When used as a connection that could be disassembled, parts can be pressed together with screws. However, with this technique, a certain amount of softness is present in the joint. If the screw connection fails, the whole joint fails.

Therefore, the joint should be glued to ensure the best possible frictional connection. Despite all this, the new joint proved to be extremely interesting with high potential, since it can also be realized with few tool paths and only two tool types.

The *Branch Formations* demonstrator (Fig. 11), a larger configuration of branches, was designed as a dense global structure. In this condensed setup, the bifurcation nodes were positioned in close vicinity to one another, therefore it was necessary to realize the machining operations for the joints using a long, narrow and thin tool for planar cuts. A chainsaw blade (Fig. 9) was ideal to machine close to the knot of the branch because the tool geometry has an extremely low interference contour, and a low probability of collision with the ‘neighboring branch’ or the clamping fixture (Figs. 10a–c).

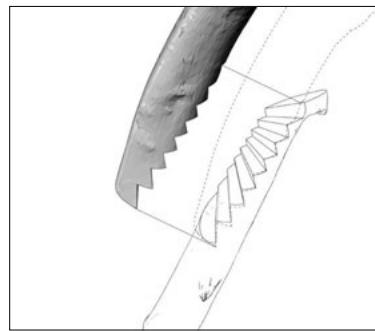
The ‘mechanical feed’ of the chainsaw allowed for the use of ‘forehand’ or ‘backhand’ cutting, as well as cutting with both the tip and the edge of the blade. The backlash and play of the cutting chain resulted in a rough surface finish, which reduced the fitting accuracy and thus the surface friction and stability were compromised.

Kettensäge wurde ein erster Versuch zur Herstellung einer neu entwickelten Verbindungsgeometrie erprobt (Abb. 1a). Später wurde die Geometrie der Verbindung weiter verfeinert und der Fertigungsprozess an den größeren *KUKA*-Roboter im ARL angepasst.

Bei der Verbindung (Abb. 7) handelt es sich um konisch geschränkte Keilzinken, die quer zu einer geneigten Längsachse (‘pitch’) der Verbindung angeordnet sind und so eine gezahnte sowie sich insgesamt verjüngende Verbindungsgeometrie erzeugen. Mit einem parametrischen Modell wurde die Geometrie erstellt, mit der die Rotation um die gemeinsame Längsachse der Verbindung (‘roll’), die Neigung der Verbindungsachse (‘pitch’) sowie die Höhe und Amplitude der Zähne variabel gesteuert werden konnten (Abb. 8). Aufgrund der fächerartigen Anordnung und Geometrie der Keilzinken gab es nur eine Möglichkeit, die beiden Teile am Verbindungs- punkt zusammenzufügen. Diese Formschlussfähigkeit gewährleistete eine präzise relative Positionierung der Teile. Die mechanisch miteinander verschränkten Zähne vergrößerten auch die Kontaktfläche und die Reibung und sorgten so für eine verbesserte Kraftübertragung im Vergleich zu einer Standard-Überblattungsverbindung. Als demontierbare Verbindung eingesetzt, können die Teile mit Schrauben zusammengepresst werden. Bei dieser Technik ist jedoch ein gewisses Maß an Weichheit in der Verbindung vorhanden. Wenn die Verschraubung versagt, versagt die gesamte Verbindung. Daher sollte die Verbindung geklebt werden, um den bestmöglichen Kraftschluss zu gewährleisten. Die neue Verbindung erwies sich trotz alledem als äußerst interessant mit großem Potenzial, da sie ebenfalls mit wenigen Werkzeugpfaden und lediglich zwei Werkzeugtypen realisiert werden kann.

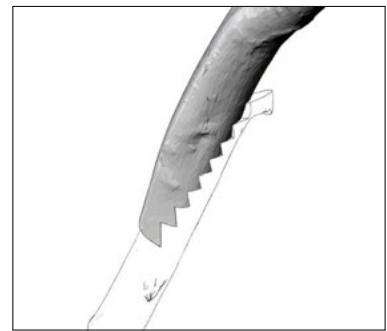
Der *Branch Formations* Demonstrator (Abb. 11), eine größere Konfiguration von Astgabeln, wurde als eine dichte globale Struktur entworfen. In dieser verdichteten Konfiguration waren die Verzweigungsknoten in unmittelbarer Nähe positioniert, daher war es notwendig, die Bearbeitung mit Hilfe eines langen, schmalen und dünnen Werkzeugs für planare Schnitte zu realisieren. Ein Kettensägeblatt (Abb. 9) war ideal für die Bearbeitung in der Nähe des Astknotens geeignet, da die Werkzeuggeometrie eine extrem geringe Störkontur, geringe Wahrscheinlichkeit einer Kollision mit dem ‘Nachbar-Ast’ oder dem Spannbock aufwies (Abb. 10a–c).

Der mechanische Vorschub der Kettensäge erlaubte den Einsatz von Vorhand- bzw. Rückhand-Schneiden sowie ein Bearbeiten mit der Spitze als auch mit der Schneide des Blattes. Das Spiel der Schneidekette führte jedoch zu einer rauen Oberfläche, was die Passgenauigkeit reduzierte und somit die Oberflächenreibung und Stabilität beeinträchtigte.



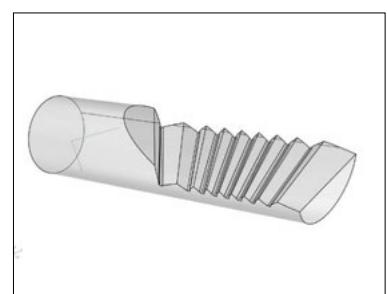
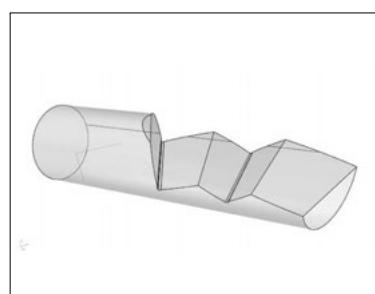
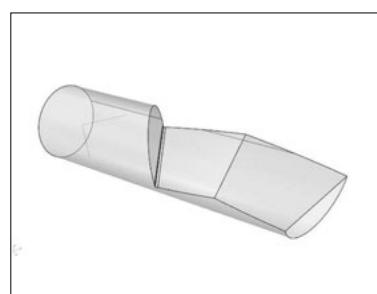
▼ Fig. 8 | Abb. 8:

Several versions of the parametric joint model with varying amounts of teeth (conical miters).



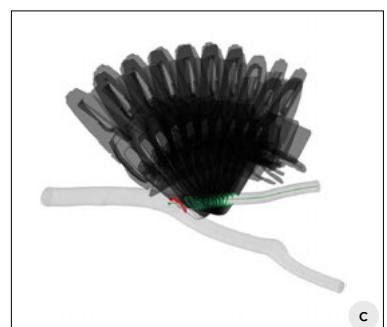
▲ Fig. 7 | Abb. 7:

Digital model of a conical scarf miter joint.



▼ Figs. 10a–c | Abb. 10a–c:

Digital simulation of cutting process for collision check. Chainsaw position at a single point (a) and at multiple points (b) along the toolpath shows that the tool (chainsaw) moves within minimal boundaries. However, when cutting too close to the branch node, collisions still occur (c).

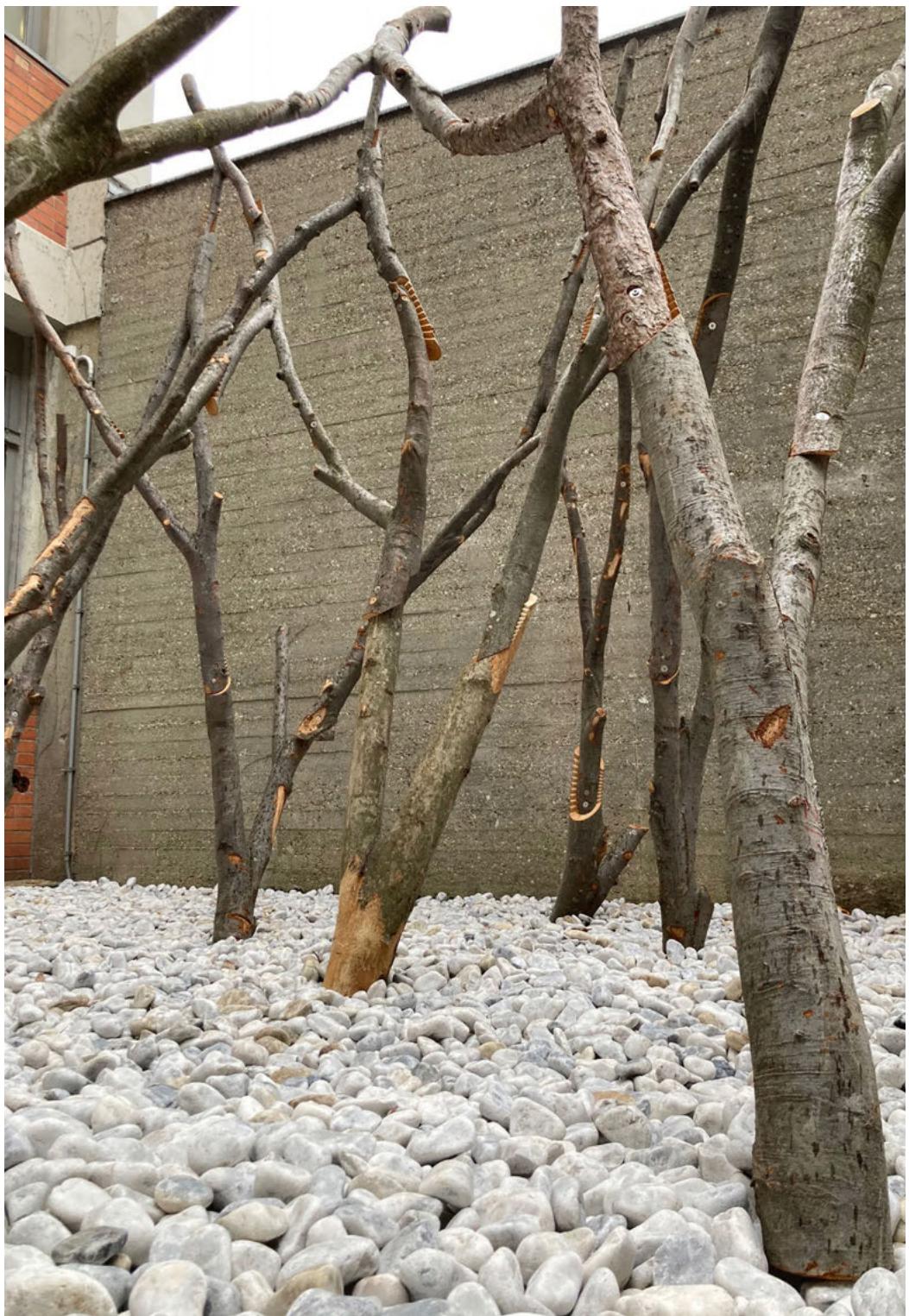


▲ Fig. 9 | Abb. 9:

Chainsaw machining with an off-the-shelf electric chainsaw, mounted to the robotic arm with a custom-built adapter.



▲ Fig. 11 | Abb. 11:
Branch Formations demonstrator in the
Conceptual Joining show at the AIL, 2019.



▲ Fig. 12 | Abb. 12:
Full-scale prototype at the University
of Applied Arts Vienna, 2021.

Based on these findings, another iteration for a new full-scale prototype (Fig. 12) was realized. The design was adapted for the machining with a circular saw blade which required more free space to operate, resulting in a less dense aggregation. The decision to design for circular saw blade fabrication (Fig. 13) was due to the high cutting performance and precision of the finished surfaces and high cutting performance (Fig. 14).

The option of using standard tools offered the advantage of being able to combine various saw blade diameters and thicknesses efficiently and cost-effectively in a single machining operation, which meant that high cutting depths or smaller interference contours of the tool were possible if required.

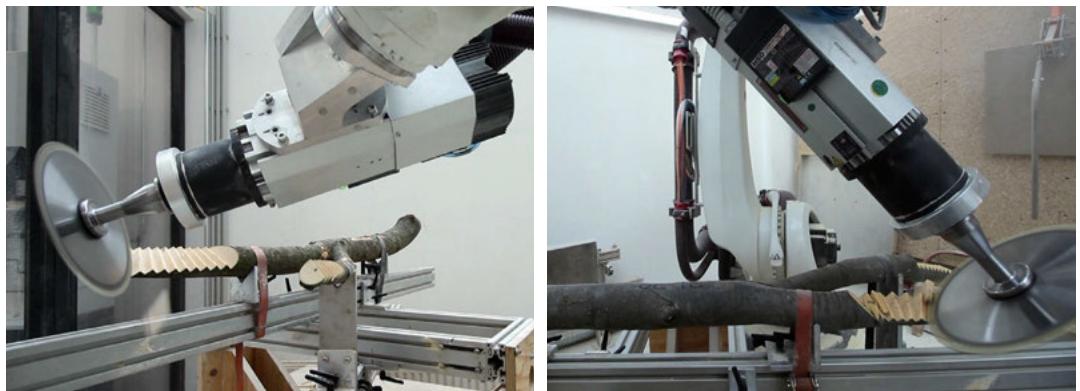
The investigations described above demonstrate that customized processes, based on robotics and flexibly deployable software/hardware solutions, can be used to address the individual and complexly shaped, non-standard components. This is associated with highly individualized component machining and manufacturing, resulting in highly customized components and complex constructions.

Basierend auf den vorhergehenden Erkenntnissen wurde in einer weiteren Iteration ein neuer 1:1-Prototyp realisiert (Abb. 12). Das Design der Konstruktion wurde auf die Bearbeitung mit einem Kreissägeblatt ausgelegt, was zu einem global weniger dicht gegliederten Tragwerk führte. Die Entscheidung für die Auslegung auf eine Fertigung mit Kreissägeblatt (Abb. 13) war den geringen Toleranzen des Sägeschnitts bzw. der Schnittoberfläche und der hohen Schnittleistung geschuldet (Abb. 14).

Die Option, auf Standard-Werkzeug zurückzugreifen, bietet den Vorteil, effizient und kostengünstig diverse Sägeblatt-Durchmesser und -Dicken in einer Bearbeitung kombinieren zu können, wodurch bei Bedarf hohe Schnitttiefen oder geringere Störkontur von Seiten des Werkzeugs möglich sind.

Die beschriebenen Demonstratoren zeigen, dass mit Hilfe maßgeschneiderter Prozesse, gestützt durch Robotik und flexibel einsetzbarer Software/Hardware, auf die individuellen und komplex geformten, nicht standardisierten Bauteile eingegangen werden kann. Dies ist mit einer hoch individualisierten Bauteilbearbeitung und Fertigung verbunden, die hochgradig individuelle Bauteile und komplexe Konstruktionen ermöglichen.

-
- 1 ^{en} A typical custom workflow for *Branch Formations* looks like this: pre-optimized 3D model from form-finding > custom algorithm (importing data > extracting > processing > generating toolpath > exporting toolpath + fabrication data) > machine files.
^{de} Ein typischer benutzerdefinierter Arbeitsablauf für *Branch Formations* sieht wie folgt aus: vor-optimiertes 3D-Modell aus der Formfindung > benutzerdefinierter Algorithmus (Daten importieren > extrahieren > verarbeiten > Werkzeugpfad erzeugen > Werkzeugpfad + Fertigungsdaten exportieren) > Maschinendateien.
- 2 ^{en} “In robotics, an end effector is the device at the end of a robotic arm, designed to interact with the environment. The exact nature of this device depends on the application of the robot.” (https://en.wikipedia.org/wiki/Robot_end_effector; last accessed on June 15, 2021).
^{de} „Als Endeffektor wird in der Robotik das letzte Element einer kinematischen Kette bezeichnet. Bei Industrierobotern kann es sich hierbei zum Beispiel um eine Einheit zum Schweißen von Autokarosserien oder allgemein um einen einfachen Greifer handeln, bei humanoiden Robotern sind dies beispielsweise die Hände.“ (<https://de.wikipedia.org/wiki/Endeffektor>; aufgerufen am 15.6.2021).



▲▲ Fig. 13 | Abb. 13:
Circular saw machining with the robotic arm at the Angewandte Robotics Lab.



▲ Fig. 14 | Abb. 14:
Precise surface finish of the joint.

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).

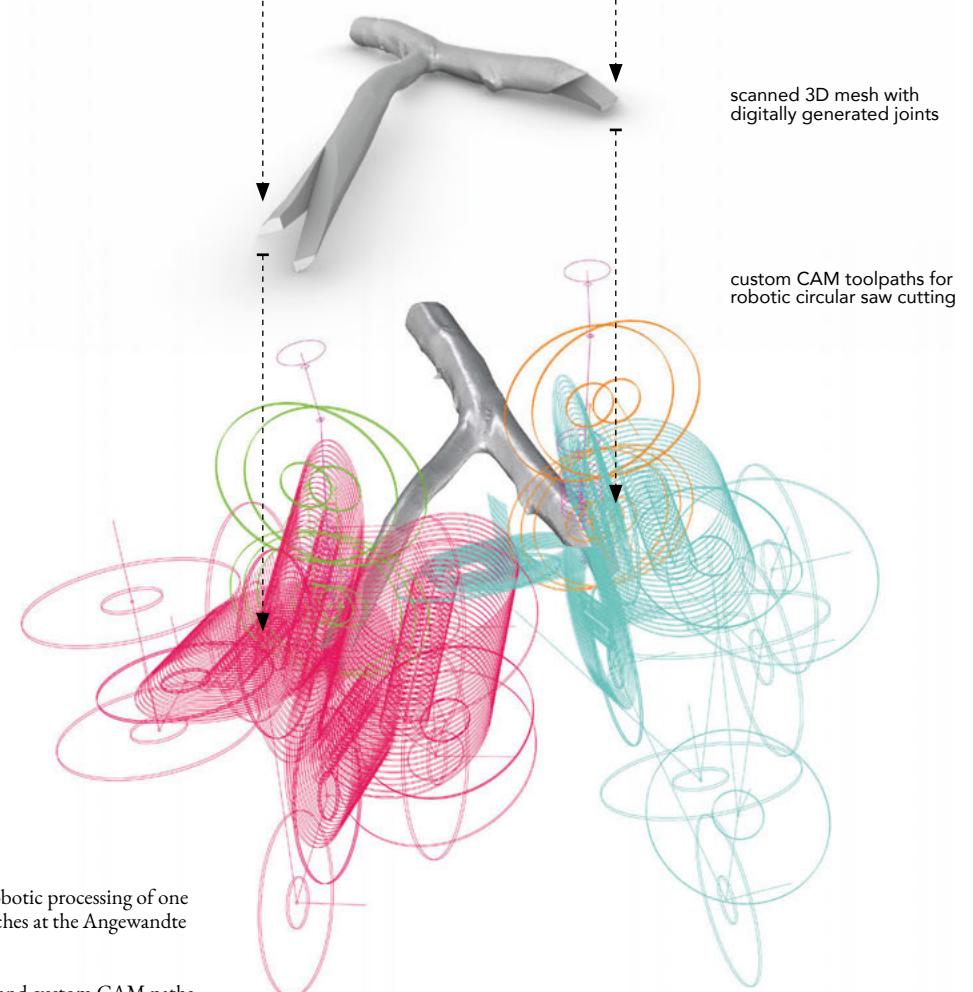
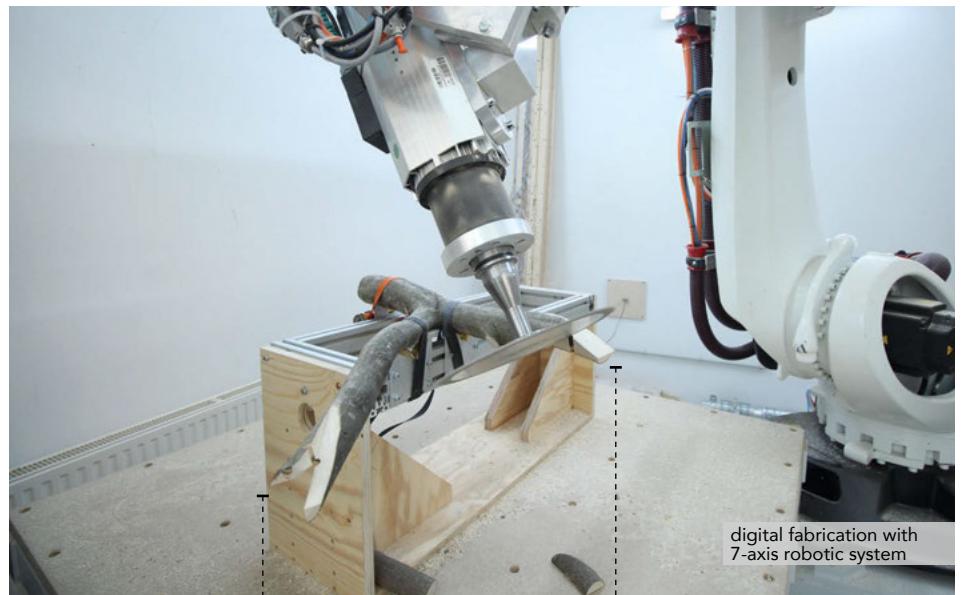
Dieser Grundverbindungstyp lässt ein gewisses Maß an Justierbarkeit und Passtoleranz beim Zusammenbauen zu. Außerdem ermöglicht er eine manuelle Nachbearbeitung nach der in ihren Freiheitsgraden begrenzten CNC-Fertigung (3-Achs-System) (Abb. 4). Aufgrund ihrer einfachen Geometrie eignet sich die einfache 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 zielten 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 Verbindungsgemetrien 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.

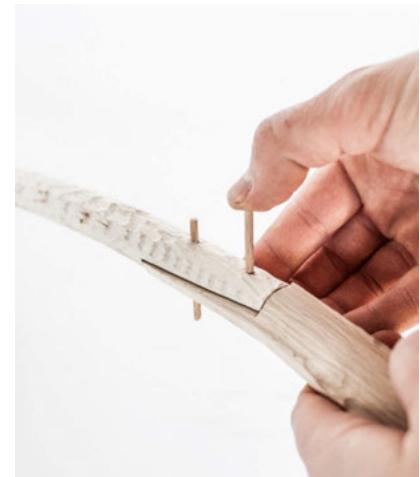
↗⁴⁵ see Hornung, P.: *Robotic Fabrication at the Angewandte Robotics Lab (ARL)*, p. 180 ff.

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



▲ Fig. 3a | Abb. 3a:

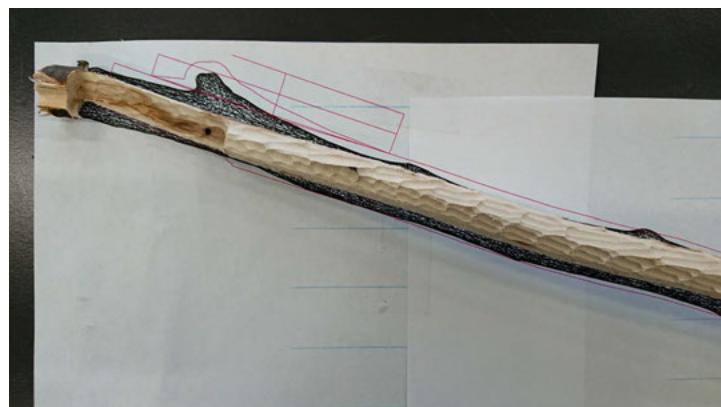
Half-lap joints, manually cut with a Japanese saw along traced lines that were mapped onto the branches using an AR app on a standard smartphone.



▲ Fig. 3b | Abb. 3b:

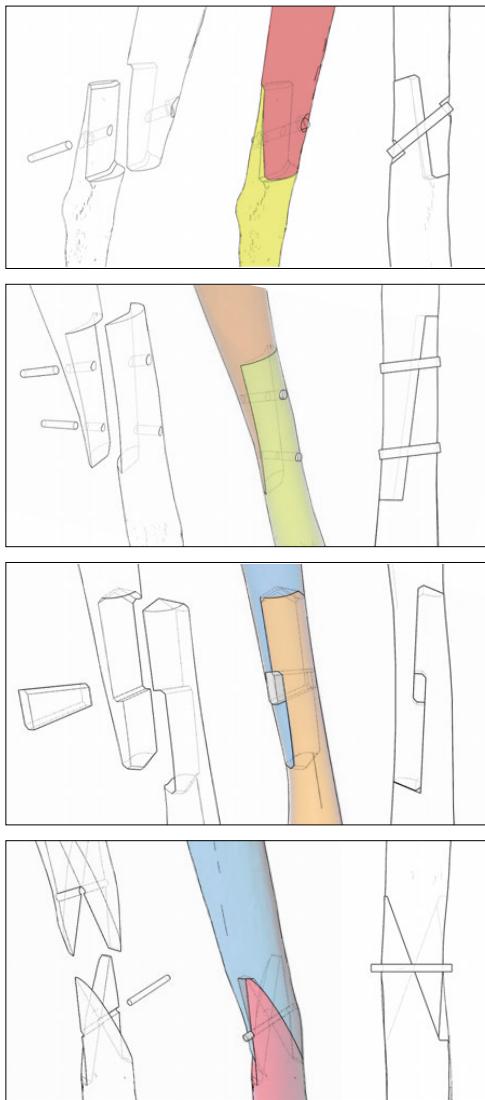
Two of the 3-axis CNC-processed branch forks joined via a half-lap joint, fixed with wooden dowels.

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 (scallop 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.)



▲► 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:

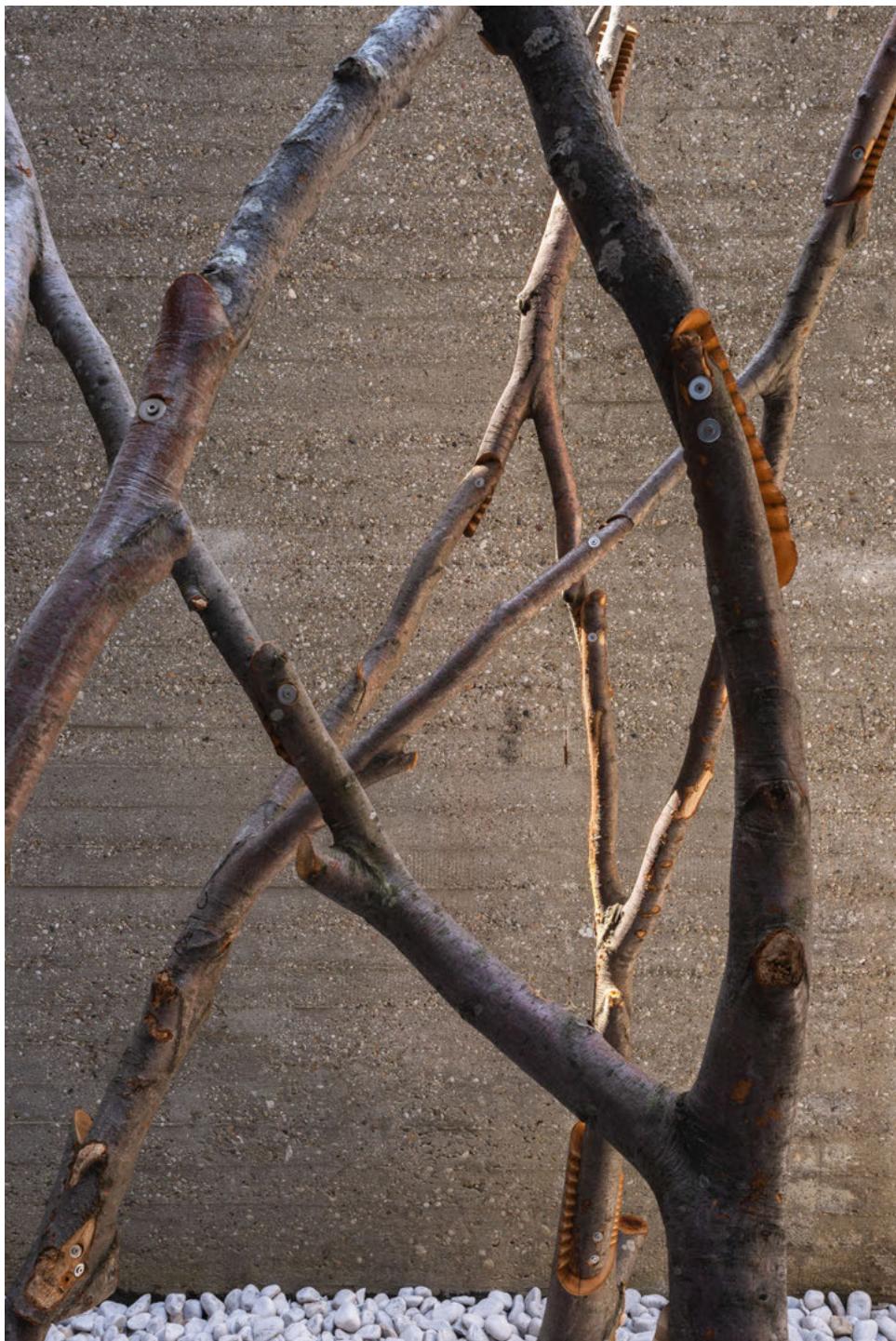
Fabrication tests of a scarf joint (with lock), realized through circular saw cutting and drilling. Due to minimal vibrations, cutting (as opposed to milling) proved to be a successful fabrication technique that was further developed in the project.



◀▼ 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.



MATERIALITY AND ITS AESTHETICS

DIE MATERIALITÄT UND IHRE ÄSTHETIK

↗ HANNELORE PAFLIK-HUBER // English translation: Mark Wilch



▲ Detail of the 'interlocking scarf joints' of the first robotic production of one tetrahedron module from branches.

The research project documented in this publication is entering a new frontier, in content and in aesthetic appearance, and poses a number of new questions for aesthetics. Do these experimental wooden structures have their own aesthetic language? Let me answer that question up front: Yes, they do.

When something is put to the test, for example, when various joining techniques for wood in architecture or the structural strength of wooden constructions are investigated and

Das in dieser Publikation dokumentierte Forschungsprojekt beschreitet Neuland, sowohl was die Inhalte als auch was das ästhetische Erscheinungsbild betrifft, und stellt zahlreiche neue Fragen an die Ästhetik. Besitzen die experimentellen Holzstrukturen eine eigene ästhetische Sprache? Um es gleich eingangs zu beantworten: Ja, das tun sie.

Wenn etwas auf die Probe gestellt wird, wie zum Beispiel verschiedene Verbindungsmöglichkeiten von Holz in der Architektur, oder die statische

this gives rise to a new result based on a process of experimentation with digital planning tools and analog construction experiments, then logic dictates that we must develop a new or adapted theoretical model as a further tool for understanding, explaining and comprehending these experiments. Openness is immanent in this model. Initial parameters are known but what direction will the research project take? Therefore, initial theory proposals should not be hasty determinations but rather an offer that, in a best-case scenario, can be applied to many further proposals and models.

Fundamental concepts must be defined first, before a theory is formulated, a method analogous to the practical approach being taken by those participating in this research. The first step, for example, is to analyze wood as a material in the history of architecture in general and in various cultures in particular. This task entails applying the effective method of comparative research used in other academic fields. In Japanese culture, for instance, wood is utilized as a material in the architecture of the Ise Grand Shrine (伊勢神宮, Ise Jingū) in an aesthetic, ideological and substantive sense. It is obvious that no material other than wood could fit this concept.

THESIS

There are many parameters that pertain to all media, also to all wooden structures: color, form, density of the material, weight, compatibility, resistance, etc. In terms of aesthetic appearance, these characteristics exist for each and every material. In each medium, they have their own highly specific attributes and meanings. But there are also specific differences that are particular only to the individual material or the respective

Belastbarkeit von Holzkonstruktionen untersucht wird und daraus ein neues Ergebnis entsteht, dem ein Prozess des Experimentierens sowohl mit digitalen Planungswerkzeugen als auch mit analogen Konstruktionsversuchen vorausgeht, dann liegt es in der Logik begründet, dass wir als ein weiteres Tool zum Verstehen, zum Erklären und Begreifen dieser Experimente auch ein neues bzw. angepasstes theoretisches Modell entwickeln müssen. Diesem Modell ist eine Offenheit immanent. Bekannt sind erste Parameter, aber in welche Richtung wird das Forschungsprojekt gehen? Somit sollten erste Theorieentwürfe keine vorschnellen Festlegungen sein, sondern ein Angebot, das im besten Fall auf viele weitere Entwürfe und Modelle angewandt werden kann.

Dies begründet, dass erst grundlegende Begriffe definiert werden müssen, bevor eine Theorie formuliert wird. Diese Methode ist analog zur praktischen Vorgehensweise der Forschungsteilnehmer*innen. Als Erstes wird zum Beispiel das Material Holz in der Geschichte der Architektur und im Speziellen in verschiedenen Kulturen analysiert. Dies beinhaltet die effektive Methode der Vergleichswissenschaft. In der japanischen Kultur zum Beispiel wird das Material Holz in der Architektur beim Ise-Schrein ästhetisch, ideologisch und inhaltlich zum Einsatz gebracht. Es ist offensichtlich, dass für dieses Konzept kein anderes Material zur Auswahl stehen kann.

THESE

Es gibt viele Parameter, die auf alle Medien, auch auf Holzstrukturen, zu treffen: Farbe, Form, Dichte des Materials, Gewicht, Kompatibilität, Widerstand etc. Im ästhetischen Erscheinungsbild existieren diese Eigenschaften für jedes Material. In jedem Medium besitzen sie ihre ganz eigenen Zuschreibungen und Bedeutungen.



▲ Detail of the first *Kigumi* structure at *World Wood Day* 2019 in the Austrian Open-Air Museum Stübing (Styria), 2019.

Photo © Leonard Kern

medium and that characterize it in its distinctiveness and uniqueness. These differences are not necessarily transferable from one material to another material or medium.

Let us continue focusing on wood for a moment and specifically, on wooden sculpture and wooden architecture. As a basic material, wood possesses a highly complex structure compared to metal or to concrete. Wood comprises 50 percent cellulose and up to 40 percent cellulose-like substances. In this context, the lignin content of the cellulose determines the strength of the material. The density ranges from 470 kg/m³ in spruce to 1,060 kg/m³ in azobe. The difference in the speed of sound in woods is equally extreme, which plays a major role in the construction of musical instruments. All parameters can be named precisely in a finer adjustment step. They are valid for wood only and not applicable to another material.

MATTER AND MATERIALITY

Wood is matter. Matter, in this meaning, is an uncountable noun, it has no plural form. There is no matter

Aber es gibt auch spezifische Differenzen, die nur dem einzelnen Material und dem jeweiligen Medium eigen sind und es in seiner Besonderheit und in seinem Alleinstellungsmerkmal kennzeichnen. Diese sind nicht ohne Weiteres von einem Material auf das andere Material oder Medium übertragbar.

Bleiben wir beim Holz und im Speziellen bei der Holzskulptur und der Holzarchitektur. Das Grundmaterial Holz besitzt im Vergleich zu Metall oder zu Beton einen sehr komplexen Aufbau. Holz besteht bis zu 50 Prozent aus Zellulose und bis zu 40 Prozent aus zelluloseähnlichen Stoffen. Hierbei bestimmt der Lignin-Anteil der Zellulose die Festigkeit des Materials. Die Dichte reicht von 470 kg/m³ bei der Fichte bis zu 1.060 kg/m³ bei der Azobé. Die Schallgeschwindigkeit differenziert sich ebenso extrem, was beim Instrumentenbau eine große Rolle spielt. So kann man in der Feinjustierung präzise alle Parameter benennen. Sie haben nur für das Holz ihre Gültigkeit und sind nicht auf ein anderes Material übertragbar.

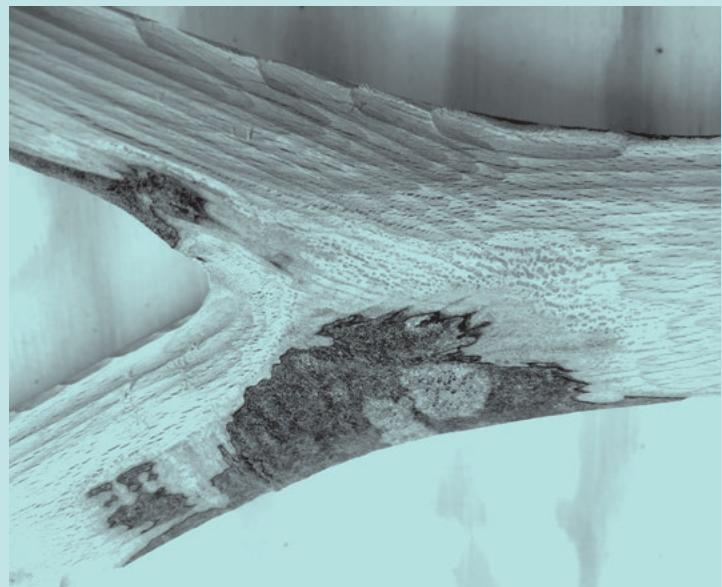
MATERIE UND MATERIALITÄT

Holz ist Materie. Der Begriff Materie ist ein Terminus, zu dem es keinen Plural gibt. Es gibt keine Materie ohne eine Form. Die Form der Materie ist immer abgeschlossen und begrenzt. Der Begriff Materialität ist etwas grundsätzlich anderes als der Begriff Material. Mit der Nachsilbe „-ität“ wird die „Materialhaftigkeit“ eines Objektes, „die Tatsache, dass etwas so oder so ist“, umschrieben. Die Materialität eines Gegenstandes ist die Bedingung der Möglichkeit ästhetischer Erfahrung. Wenn man die Materialität oder Teile davon durch andere Materialien substituiert, verändert man auch die ästhetische Erfahrung des Objektes. Oberfläche, Textur, Farbe, Reflexion, Gewicht oder andere phy-

without form. The form of matter is always self-contained and limited. The concept of materiality is something fundamentally different than the concept of matter. The end syllable 'ity' describes the 'material-ness' of an object, the fact that something is the way it is. The materiality of an object is the condition that enables it to be experienced aesthetically. If the materiality or parts thereof are substituted with different materials, the way that the object is aesthetically experienced also changes. Surface, texture, color, reflection, weight and any other physical, chemical or biological characteristics are always based on the specific materiality of the object.

How can one recognize the aesthetic and semantic meaning of the materiality of an object? Theoretical models of the aesthetics of materiality have been posited by many, from Friedrich Kittler and Peter Sloterdijk to Roland Barthes and Bruno Latour. In light of the increasing digitization of everyday life, they conjure up the "waning of the senses" of hyperrealism as an all-encompassing but also as an "illusory world of images in HD", in the words of Jean Baudrillard dating back to 1979. Given the growing importance of technology and media in recent decades, the materiality discussion has also been picked up by the traditional humanities and the material sciences, such as the fields of aesthetics and art. New scientific realms such as the imagery sciences have come into being and are addressing the subject of the *iconic turn*, with an emphasis on their own specific materiality. This tour de force through the theoretical history of the humanities and the cultural sciences with respect to materiality reveals the diversity that has yielded the successive reintegration of realities for things (*Dingrealitäten*) into

sische, chemische oder biologische Eigenschaften beruhen immer auf der spezifischen Materialität des Objekts.



Wie kann man die ästhetische und semantische Bedeutung der Materialität eines Gegenstandes erkennen? Von Friedrich Kittler bis Peter Sloterdijk, von Roland Barthes bis Bruno Latour finden sich theoretische Modelle einer Ästhetik der Materialität, die angesichts der zunehmenden Digitalisierung der Alltagswelt das „Schwinden der Sinne“ der Hyperrealität als eine allumfassende, aber auch „trägerische Bildwelt in HD“, wie es Jean Baudrillard bereits 1979 formulierte, beschwören. In den letzten Jahrzehnten wurde die Materialitätsdiskussion angesichts der wachsenden Bedeutung von Technik und Medien auch von den traditionellen Geistes- und Materialwissenschaften wie der Kunstwissenschaft und Ästhetik aufgegriffen. Neue Wissenschaftsfelder wie die Bildwissenschaften sind entstanden, die den *iconic turn* unter Betonung ihrer spezifischen Materialität thematisieren. Diese Tour de force durch die Theoriegeschichte der Geistes- und Kulturwissenschaften bezüglich Materialität offenbart

▲ Close-up of a 3-axis-CNC-routed beechwood branch from the first *Branch Formations* tetrahedron prototype, 2018.

topics and research initiatives such as *Conceptual Joining* at the University of Applied Arts Vienna.

In the search for concepts and the formation of theories, it is important to avoid the mistake of understanding a concept such as the *material turn* hierarchically, let alone placing the thing as a material object before and above all movement in spiritual-intellectual interpretation. *Conceptual Joining* as a subject of research is one example of how both aspects are mutually dependent on each other. 'New Materialism' is not a return to the simple primacy of a concrete thing, but rather a scientific narrative that puts the material aspects front and center.

An 'aesthetics of materiality' is understood to subsume certain conceptions of materiality that influence society and its subjects at a certain time in a specific way in fields of study such as philosophy, the visual arts, design and architecture. Within this semantic field, the 'aesthetics of materiality' is deemed to revolve around general aesthetic and semantic codings in contrast to the concepts of 'matter' and 'material'. The concept reflects the meaning of individual types of materiality as they relate to matter and form. Aesthetic and philosophical conceptions of materiality transcend matter as a concept to the extent that they ask about how one should approach materiality in general, in accordance with the fundamental philosophical assumptions, the fundamental mental attitudes and discursive rules that constitute and determine the field of discourse on materiality.

Materials are not by law identical to themselves. They are subject to modifications and metamorphoses. Thus, the focus of attention is directed

die Vielfalt, die die sukzessive Reintegration von Dingrealitäten in Themen und Forschungsinitiativen wie *Conceptual Joining* der Angewandten in Wien hervorgebracht hat.

Der Begriffssuche und der Theoriebildung darf nicht der Fehler unterlaufen, einen Begriff wie den des *material turn* hierarchisch zu verstehen oder gar das Ding als materiellen Gegenstand vor und über alle geistig-intellektuelle Interpretationsbewegung zu stellen. Der Forschungsgegenstand von *Conceptual Joining* ist ein Beispiel, wie beide einander bedingen. Bei dem sogenannten 'New Materialism' handelt es sich nicht um eine Rückkehr zu dem simplen Primat eines konkreten Dings, sondern um ein wissenschaftliches Narrativ, das materielle Aspekte in den Vordergrund rückt.

Unter einer 'Ästhetik der Materialität' sind hier bestimmte Konzeptionen von Materialität verstanden, die in den Wissenschaften wie der Philosophie, der bildenden Kunst, dem Design und der Architektur die Gesellschaft und ihre Subjekte zu einer bestimmten Zeit auf jeweils spezifische Weise beeinflussen. Innerhalb des Wortfeldes gilt, dass im Gegensatz zu den Begriffen 'Materie' und 'Material' es sich bei den 'Ästhetiken der Materialität' um allgemeine ästhetische und semantische Codierungen handelt. Der Begriff reflektiert die Bedeutung einzelner Stofflichkeiten im Verhältnis von Materie und Form. Ästhetische und philosophische Konzeptionen von Materialität transzendieren den Materiebegriff insofern, als sie nach dem Umgang mit Materialität und Stofflichkeit im Allgemeinen fragen, nach den philosophischen Grundannahmen, den mentalen Grundeinstellungen und diskursiven Regeln, die das Diskursfeld der Materialität konstituieren und bestimmen.

► Detail of the *Branch Formations* demonstrator at the *Conceptual Joining* show at the Angewandte Innovation Laboratory (AIL), 2019.



at the approaches taken to designing and forming them. Matter and materiality have long been overshadowed by scientific analysis and by ideas. All matter, as the premise goes, is limited because it is imprisoned in the limits of its physical conditions. However, the fact that the intellectual and the material are mutually dependent on each other, that matter and materiality shape our thinking, is something that has long been ignored, especially in the visual arts and in architecture. It has not been until over the last three decades that a veritable boom has occurred in science that has been exploring the concepts of materiality.

For a long time, art studies followed classic aesthetics with its traditional postulate of 'material sublimation.' This says that form must transcend less-valued material in order to become art or architecture. In recent decades, there has been a paradigm shift, so that material is now thought to be emancipated from its 'pre-formation' and thus to be an autonomous, aesthetic category. Material analysis must be equated with form analysis, as verified by the designs in the research project *Conceptual Joining*. The research group's methodological approach places the material and the parameters described above as the points of departure for their considerations. Only this method leads, as a logical consequence, to an innovative, aesthetic *model*. To my mind, none of the projects engage with *form* as a concept. The *model* concept brings us closer to the complexly structured results when all optional connections drawn upon here are included. The traditional dichotomy between material and form is thus transcended.

In her revolutionary 1990 book entitled *Gender Trouble*, the American

Materialien sind nicht per Gesetz mit sich selbst identisch. Sie unterliegen Modifikationen und Metamorphosen. Damit wird das Augenmerk auf die Verfahrensweisen ihrer Gestaltung und Formung gelenkt. Materie und Materialität standen lange im Schatten der wissenschaftlichen Analyse und der Ideen. Alle Materie, so die Prämissen, ist beschränkt, weil sie in den Grenzen ihrer physikalischen Bedingungen verhaftet ist. Dass jedoch Geistiges und Materielles einander bedingen, dass Materie und Materialität unser Denken prägen, wurde insbesondere auf dem Gebiet der bildenden Künste und der Architektur lange ignoriert. Erst in den letzten drei Jahrzehnten ist es zu einer regelrechten Konjunktur der Begriffswissenschaft zu Materialität gekommen.

Nachdem die Kunswissenschaft lange Zeit der klassischen Ästhetik mit ihrem traditionellen Postulat der 'Materialsublimierung' gefolgt war, nach der die Form das niedriger bewertete Material überwinden muss, um Kunst oder Architektur zu werden, hat sich in den letzten Jahrzehnten ein Paradigmenwechsel vollzogen, der das Material in Emanzipation von seiner 'Prä-Formation' und somit als eine autonome, ästhetische Kategorie denkt. Die Materialanalyse muss der Formanalyse gleichgestellt werden, was sich anhand der Entwürfe des Forschungsprojektes *Conceptual Joining* verifizieren lässt. Die methodische Vorgehensweise der Forschungsgruppe stellt das Material und die oben beschriebenen Parameter an den Ausgangspunkt ihrer Überlegungen. Nur diese Methode führt in logischer Konsequenz zu einem innovativen, ästhetischen Modell. Der Begriff Form greift meiner Meinung nach bei keinem der Projekte. Der Begriff des Modells kommt den komplex gestalteten Ergebnissen näher, wenn man alle optionalen Verbindungen, die hier gezo-

philosopher Judith Butler thinks of materiality not as something that stands outside a discourse or that can precede a discourse but rather as something that is brought about through a discursive practice in thinking and acting.

The task is to name the parameters for wood, to describe the unique feature of this material in order to point out how it specifically differs from all other materials. This is the foundation on which specific material aesthetics can be built. This process is followed by theorizing. Imagery science should not neglect participating in a timely fashion in a discussion about the 'material aesthetics of wood' in order to guarantee successful research.

gen werden, mit einschließt. Die traditionelle Dichotomie zwischen Material und Form ist somit überwunden.

Die amerikanische Philosophin Judith Butler denkt in ihrem revolutionären Buch *Das Unbehagen der Geschlechter* von 1990 Materialität nicht als etwas, das außerhalb eines Diskurses steht oder ihm vorausgehen kann, sondern als etwas, das durch eine diskursive Praxis im Denken und Handeln der Subjekte hervorgebracht wird.

Es gilt, die Parameter für Holz zu benennen, das Alleinstellungsmerkmal dieses Materials zu beschreiben, um dann die spezifische Differenz zu allen anderen Materialien aufzuzeichnen. Darauf lässt sich die spezielle Materialästhetik aufbauen. Diesem Prozess folgt die Theoriebildung. Die Bildwissenschaft sollte es nicht versäumen, rechtzeitig an einer Diskussion der 'Materialästhetik Holz' teilzunehmen, um eine erfolgreiche Forschung zu gewährleisten.

CONNECTION – EMPATHIC DIALOGUE

VERBINDUNG – EIN EMPATHISCHER DIALOG

↗ KAROLIN SCHMIDBAUR // German translation: Christa Wendl

In her book *Meeting the Universe Halfway*, Karen Barad, Professor of Feminist Studies, Philosophy and History of Consciousness at UC Santa Cruz, California, USA, writes:

"Matter and Meaning are not separate elements. They are inextricably fused together, and no event, no matter how energetic, can tear them asunder. Even atoms, whose very name, 'atomos', means 'indivisible' or 'uncuttable', can be broken apart. But matter and meaning cannot be dissociated, not by chemical processing, or centrifuge, or nuclear blast. Mattering is simultaneously a matter of substance and significance, most evidently perhaps when it is the nature of matter that is in question, when the smallest parts of matter are found to be capable of exploding deeply entrenched ideas and large cities. Perhaps this is why contemporary physics makes the inescapable entanglement of matters of being, knowing, and doing, of ontology, epistemology, and ethics, of fact and value, so tangible, so poignant."

It has been at the core of my thinking and academic work as well as my practical work as an architect in recent years, although much of contemporary practice and everyday problems still seem to follow other agendas, that the idea of *Verbindung* ('connection') holds the key to a new paradigm that offers opportunities for a long, necessary, disruptive change. The idea of 'connection' can be applied as a general attitude

Karen Barad, Professorin für feministische Studien, Philosophie und Geschichte des Bewusstseins an der UC Santa Cruz, Kalifornien, USA, schreibt in ihrem Buch *Meeting the Universe Halfway*:

„Materie und Bedeutung sind keine separaten Elemente. Sie sind untrennbar miteinander verbunden, und kein noch so energiegeladenes Ereignis kann sie auseinanderreißen. Sogar Atome, deren Name ‚atomos‘ ‚unteilbar‘ oder ‚unzerschneidbar‘ bedeutet, können gespalten werden. Materie und Bedeutung hingegen sind nicht voneinander zu trennen, weder durch chemische Bearbeitung noch mithilfe von Zentrifugen oder durch Atomexplosionen. Materialität ist gleichzeitig eine Frage der Substanz und der Relevanz, am deutlichsten vielleicht, wenn die Natur der Materie in Frage gestellt wird, wenn sich herausstellt, dass die kleinsten Bauteile der Materie in der Lage sind, tief verwurzelte Ideen und große Städte zu sprengen. Vielleicht ist das der Grund, warum die moderne Physik die unausweichliche Verflechtung von Fragen des Seins, des Wissens und des Tuns, der Ontologie, der Erkenntnistheorie und der Ethik, der Fakten und der Werte so greifbar und so ergreifend macht.“

Es stand in den letzten Jahren meiner akademischen wie praktischen Arbeit als Architektin im Mittelpunkt meines Denkens – auch wenn die zeitgenössische Praxis und die Problemstellungen des Alltags immer noch vorwiegend anderen Agenden zu folgen

towards life, as a thought model, a work method, a way to rethink collaboration – on the whole, a code for a changed and more appreciative handling of the world and ourselves.

Over the course of this brief text, I would like to view the publication at hand, *Conceptual Joining – Wood Structures from Detail to Utopia*, through the lens of this idea, and in addition, contribute visual material from two other architectural case studies to further illustrate this point.

It can be said that the 20th century has been a century of analysis. Over the past few decades, we have experienced the fragmentation of our world through specialization, digitalization, automation and the general dominance of analytical thinking, combined with values that prioritize growth, image and performance. The 20th century was also known as the age of knowledge, in which information, technology, networks, the individual, growth and an 'either-or' thinking were key values guiding our planes of existence. As we speak, the light and shadow aspects of this mindset are visible and thematized,¹ and the challenges of our contemporary life and practice are witness to its dangers: rapid technological advancement, urbanization, social imbalances, the endangered planet, the great acceleration, and the crossing of thresholds that have produced an urgent need for cultural and environmental preservation.

With the digitization of our world and increasing fluidity between real and virtual environments, we are also experiencing an increasing loss of a sense of the body, a capacity for the sensitive, sensual perception and experience of our surroundings, of liveliness and life itself. We have managed to separate ourselves from ourselves,

scheinen –, dass die Idee der Verbindung den Schlüssel zu einem neuen Paradigma in sich birgt, das Chancen für einen längst anstehenden, disruptiven Wandel bietet. Die Idee der Verbindung lässt sich als generelle Lebensinstellung anwenden, als Denkmodell, als Arbeitsmethode, als Weg, Kooperation neu zu denken – insgesamt als Code für einen veränderten und wertschätzenderen Umgang mit der Welt und uns selbst.

In diesem kurzen Text möchte ich die vorliegende Publikation *Conceptual Joining – Holzstrukturen im Experiment* aus dem Blickwinkel dieses Gedankens betrachten und darüber hinaus Bildmaterial von zwei weiteren architektonischen Fallstudien beisteuern, um diesen Punkt weiter zu illustrieren.

Man kann das 20. Jahrhundert auch als ein Jahrhundert der Analyse bezeichnen. Die letzten Jahrzehnte waren von einer Fragmentierung unserer Welt durch Spezialisierung, Digitalisierung und Automatisierung sowie von einer allgemeinen Dominanz des analytischen Denkens gekennzeichnet, kombiniert mit Werten, die Wachstum, Image und Leistung priorisieren. Das 20. Jahrhundert wurde auch als das Zeitalter des Wissens bezeichnet, in dem Information, Technologie, Netzwerke, das Individuum, Wachstum und ein Entweder-Oder-Denken zentrale Werte waren, die unsere Daseinsebenen bestimmten. Heute sind die Licht- und Schattenaspekte dieser Denkweise sichtbar und werden thematisiert,¹ und die Herausforderungen des modernen Lebens und der Praxis zeugen von ihren Gefahren: rasanter technischer Fortschritt, Urbanisierung, soziales Ungleichgewicht, der gefährdete Planet, die große Beschleunigung und das Überschreiten von Schwellen, die ein dringendes Bedürfnis nach Bewahrung von Kultur und Umwelt wecken.

from each other, from meaning, from responding to nature, from life, from a holistic human existence.

Yet, with the turn of the millennium we are seeing new ideas and a more integrated world view re-emerging. The 21st century may become the age of synthesis (and consciousness), where we understand that everything is connected to everything else, and with something larger than us,² or as Karen Barad writes, "the inescapable entanglement of matters of being, knowing, and doing, of ontology, epistemology, and ethics, of fact and value."³ Translated into prospective values for an emerging future existence, qualities such as experience (next to knowledge), synthesis (next to analysis), ecology (next to networks), the collective (next to the individual), inner work (next to movement and progress), may be the result – on the whole – of an inclusive "both-and approach".

In his book *Thinking Fast and Slow*⁴, cognitive psychologist Daniel Kahneman explores mental activity with the help of a metaphor of two systems that, respectively, produce fast and slow thinking, conscious and intuitive thought, and explains how they each, on their own, affect decision making in the human being, but also produce the most effective and productive decisions through their reciprocal contributions. As another example, recent studies in neuroscience focused on research on the effect of meditation,⁵ the state of coherence between left and right brain activity, and its potential to incur epigenetic changes in our bodies on the one hand, and a status of connectivity beyond the material world on the other. For us human beings, I believe the chance of the idea of synthesis lies in a re-connection of our interior and exterior worlds, of conscious and

Mit der Digitalisierung unserer Welt und der zunehmenden Fluidität zwischen realen und virtuellen Umgebungen erleben wir auch einen zunehmenden Verlust von Körperlichkeit, der Fähigkeit zur sensiblen, sinnlichen Wahrnehmung und Erfahrung unserer Umgebung, der Lebendigkeit und des Lebens selbst. Wir haben es geschafft, uns von uns selbst, voneinander, vom Sinn, vom Eingehen auf die Natur, vom Leben, von einer ganzheitlichen menschlichen Existenz zu entfernen.

Doch mit der Jahrtausendwende entstehen wieder neue Ideen und eine ganzheitlichere Weltsicht. Das 21. Jahrhundert könnte das Zeitalter der Synthese (und des Bewusstseins) werden, in dem wir verstehen, dass alles mit allem anderen und mit etwas Größerem als uns selbst² verbunden ist, oder wie Karen Barad es ausdrückt, „die unausweichliche Verflechtung von Fragen des Seins, des Wissens und des Tuns, der Ontologie, der Erkenntnistheorie und der Ethik, der Fakten und der Werte“.³ Übersetzt in prospektive Werte für eine entstehende zukünftige Existenz können Qualitäten wie Erfahrung (neben Wissen), Synthese (neben Analyse), Ökologie (neben Netzwerken), das Kollektiv (neben dem Individuum), innere Arbeit (neben Bewegung und Fortschritt) das Ergebnis sein – ein umfassender „Sowohl-als-auch-Ansatz“.

In seinem Buch *Thinking Fast and Slow*⁴ erforscht der Kognitionspsychologe Daniel Kahneman mentale Aktivität mit Hilfe der Metapher von zwei Systemen, die jeweils schnelles und langsames Denken, bewusstes und intuitives Denken hervorbringen, und erklärt, wie diese jeweils für sich genommen die Entscheidungsfindung im Menschen beeinflussen, aber die effektivsten und produktivsten Entscheidungen durch ihre wechselseitigen Beiträge hervorbringen. Ein

intuitive knowledge, of heart and brain, of emotional and intellectual development.

As an architect, the question is how we can consider the idea of synthesis for the production of architecture or architectural ideas, for a methodology that would perhaps lead to new visual sequences of insight, three-dimensional thought models, and eventually, proposals for our built environment that produce a different experience of space and self.

I consider the work in this publication, as well as the case studies below, valuable examples of how such 'empathic dialogue' as an idea of synthesis may occur: with ourselves, in collaboration, in the idea of reciprocity as a design methodology, in the use of materials and technology, in a changed relationship with nature, and others.

In *Conceptual Joining – Wood Structures from Detail to Utopia*, the researchers not only literally deal with the challenge of joining (connection) as a technical problem-solving task, but also embark on a very special dialogue with nature by focusing on the forks between branches as the main components of a novel structural framework, instead of the straight branches themselves. What is normally eliminated as waste is used here as the main construction material with the added potential of developing complex structural models and novel architectural spaces that follow the natural properties of the unusual resource. On a third level, looking through the lens of the idea of synthesis, advanced computational methods are utilized in the project to first analyze and secondly synthesize the heterogenous, natural components into a coherent structure in a process of empathic dialogue,

weiteres Beispiel sind jüngste Studien im Bereich der Neurowissenschaften, die sich mit der Erforschung der Wirkung von Meditation,⁵ einem Zustand von Kohärenz zwischen linker und rechter Hirnaktivität, und ihrem Potenzial, einerseits epigenetische Veränderungen in unserem Körper herbeizuführen und andererseits einen Zustand der Konnektivität jenseits der materiellen Welt zu erreichen, beschäftigen. Für uns Menschen liegt die Chance des Synthesegedankens meines Erachtens in einer Wiederverbindung von Innen- und Außenwelt, von bewusstem und intuitivem Wissen, von Herz und Hirn, von emotionaler und intellektueller Entwicklung.

Für mich als Architektin stellt sich die Frage, wie wir den Gedanken der Synthese in der Architektur einsetzen können, in einer Methodik, die möglicherweise zu neuen visuellen Einsichten, dreidimensionalen Gedankenmodellen und schließlich zu Vorschlägen für unsere gebaute Umwelt führen würde, die eine andere Erfahrung von Raum und Selbst generieren.

Ich betrachte die Arbeiten dieser Publikation sowie die Fallstudien im Folgenden als wertvolle Beispiele dafür, wie ein solcher 'empathischer Dialog' als Idee der Synthese entstehen kann: mit uns selbst, in der Kooperation, in der Idee der Reziprozität als Entwurfsmethodik, in der Verwendung von Materialien und Technologie, in einer veränderten Beziehung zur Natur und zu anderen.

In *Conceptual Joining – Holzstrukturen im Experiment* setzen sich die Forscher*innen nicht nur buchstäblich mit der Herausforderung des Zusammenführens (Verbindens) als technische Problemlösungsaufgabe auseinander, sondern treten in einen ganz besonderen Dialog mit der Natur, indem sie nicht die geraden Äste,

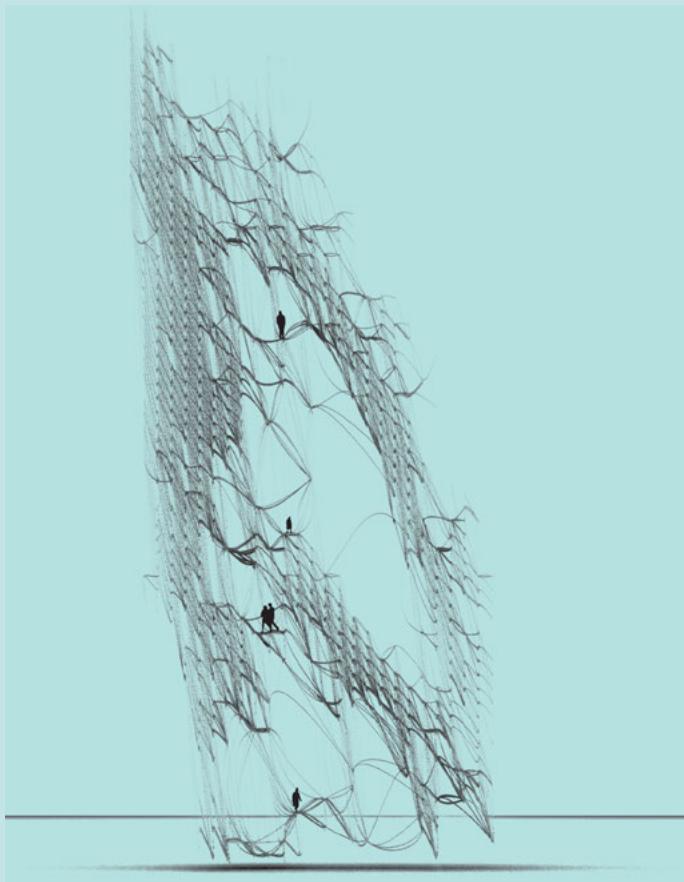
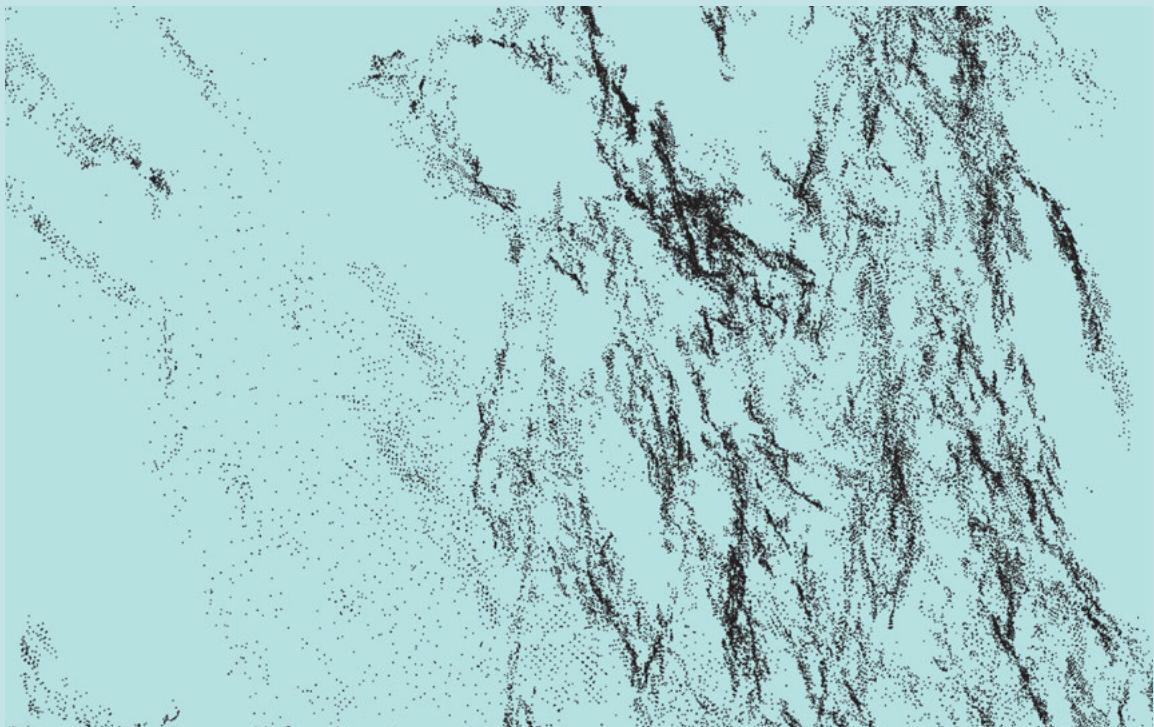
producing a surprising and fresh co-creation between nature and technology.

The second example, 'Hybrid Processes – Diffuse Spaces' (Fig. 1), utilizes the idea of 'translation' as a design methodology for an experimental, open-ended and interpretative design process in which both intuition and analytical thinking are activated through the use of analog and digital tools. In a reciprocal process of productive translation between media, techniques and readings, and similar to the potential produced by the cohesion between right- and left-brain activity, the expectation is that through that process, a multiplicity of readings can be created in their in-between.⁶ The hypothesis is also that the more balance between complementing qualities can be integrated into the design process, the higher the possibility for creating architecture in the sense of sustainable,⁷ lastingly beautiful, and meaningful structures that remain open for discovery beyond singular readings or quick familiarization.

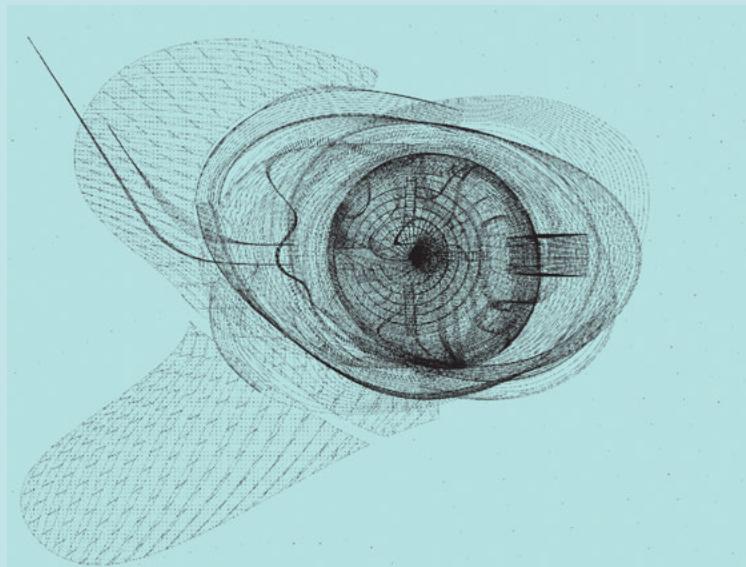
Finally, in the 'The 5th World' (Fig. 2), a new relationship to nature is built up in a proposal for a cultural heritage library for the Lakota Native American tribe by learning from their philosophy. As a tribe, the Lakota are known for their hunting culture and a spirituality that places the sacredness of nature at its core. The Lakota believe that everything has a spirit, including trees, rocks, rivers and almost every natural being. In the proposal, the archetypal architectural elements 'bowl', 'horizon' and 'dome' refer to the six cardinal directions in the beliefs of the Lakota: north, east, south and west, up (sky) and down (earth), and place an emphasis on the inner spatial experience of the structure in combination with its surroundings.

sondern die Verzweigungen zwischen den Ästen als Hauptbestandteile eines neuartigen Tragwerks in den Mittelpunkt stellen. Was sonst als Abfall entsorgt wird, dient hier als Hauptbaumaterial mit dem zusätzlichen Potenzial, komplexe Strukturmodelle und neuartige architektonische Räume zu entwickeln, die den natürlichen Eigenheiten der ungewöhnlichen Ressource folgen. Auf einer dritten Ebene, durch die Linse der Idee der Synthese betrachtet, werden in dem Projekt fortschrittliche Computermethoden eingesetzt, um die heterogenen natürlichen Komponenten erst zu analysieren und dann in einem Prozess des empathischen Dialogs zu einer kohärenten Struktur zu synthetisieren, wodurch eine überraschende und neue Co-Kreation zwischen Natur und Technologie entsteht.

Das zweite Beispiel, das Seminar *Hybride Prozesse – Diffuse Räume* (Abb. 1), nutzt die Idee der 'Übersetzung' als Methodik für einen experimentellen, ergebnisoffenen und interpretativen Entwurfsprozess, in dem sowohl Intuition als auch analytisches Denken durch den Einsatz analoger und digitaler Werkzeuge aktiviert werden. In einem wechselseitigen Prozess der produktiven Übersetzung zwischen Medien, Techniken und Lesarten und ähnlich dem Potenzial, das durch die Kohäsion zwischen rechter und linker Gehirnaktivität entsteht, ist die Erwartung, dass durch diesen Prozess eine Vielzahl von Lesarten im Raum dazwischen entstehen kann.⁶ Die Hypothese ist auch, dass je mehr Balance zwischen sich ergänzenden Qualitäten in den Entwurfsprozess integriert werden kann, desto größer die Möglichkeit wird, Architektur im Sinne von nachhaltigen,⁷ dauerhaft schönen und sinnvollen Strukturen zu schaffen, die jenseits singulärer Lesarten oder schneller Gewöhnung offen für Entdeckungen bleiben.



▲▲▲ Fig. 1 | Abb. 1:
HYBRID PROCESSES – DIFFUSE SPACES,
2020
Empathic dialogue as a design method
University of Innsbruck, Institute for
Experimental Architecture, Karolin
Schmidbaur, Lukas Allner, Iris Schuhmacher,
Rebecca Sillaber.
© Iris Schuhmacher, Rebecca Sillaber



▲▲ Fig. 2 | Abb. 2:

'THE 5th WORLD'

Empathic dialogue through a new relationship with nature,
COOP HIMMELB(L)AU, The 5th World, South Dakota, USA, 2015,
Wolf D. Prix, Karolin Schmidbaur,
Ghazal Khezri, Shima Roshanzamir,
Morteza Farhadian.

© top: Markus Pillhofer

© bottom: COOP HIMMELB(L)AU

In *The 5th World* (Abb. 2) schließlich wird in einem Entwurf einer Bibliothek des kulturellen Erbes der Lakota, eines Stammes nordamerikanischer Ureinwohner, eine neue Beziehung zur Natur aufgebaut, indem von der Philosophie der Lakota gelernt wird. Die Lakota sind bekannt für ihre Jagdkultur und eine Spiritualität, die die Unantastbarkeit der Natur in den Mittelpunkt stellt. Sie sind der Auffassung, dass alles beseelt ist, einschließlich Bäume, Felsen, Flüsse und jedes natürliche Wesen. Die archetypischen Architekturelemente ‚Schale‘, ‚Horizont‘ und ‚Kuppel‘ im Entwurf beziehen sich auf die sechs Himmelsrichtungen nach Sicht der Lakota: Norden, Osten, Süden und Westen, oben (Himmel) und unten (Erde), und legen den Schwerpunkt auf das innere Raumerlebnis des Bauwerks in Kombination mit seiner Umgebung.

The 5th World spiegelt auch den Lakota-Glauben wider, dass sich die Menschheit am Wendepunkt von der

‘The 5th World’ is also part of the Lakota belief that mankind is at the turning point from the 4th to the 5th world, a threshold of rethinking with the option to choose either a path of greed or a path of spirituality. Let’s hope that the above ideas will contribute towards us taking the latter path.

4. zur 5. Welt befindet sich eine Schwelle des Umdenkens mit der Option, entweder einen Weg der Gier oder einen Weg der Spiritualität zu wählen. Hoffen wir, dass die obengenannten Ideen dazu beitragen werden, dass wir den letzteren Weg einschlagen.

-
- 1 ^{en:} On this subject, Lopold, H. (2009): *Globalisierung und integrales Bewusstsein. Der Beitrag Jean Gebfers zu einer neuen Weltsicht*, Schaffhausen: Novalis: 151:
“In line with the system, all specialized researchers and scientists seek solutions and alternatives in their own fields of expertise but fail to go beyond that and grapple with the question of why new problems keep cropping up in unexpected places despite optimum solution models. As tempting as it may be for me to add my own suggestions for relevant fields, I will stick to the integral issue at hand. It demands, as a *conditio sine qua non*, that a consciousness unfolds that controls the possibilities opened up by technical progress – and not vice versa. As Gebser noted: ‘For it is the spiritual possibilities that ultimately also determine the political, economic and sociological ones.’”
^{de:} Dazu Leopold, H. (2009): *Globalisierung und integrales Bewusstsein. Der Beitrag Jean Gebfers zu einer neuen Weltsicht*, Schaffhausen: Novalis: 151:
„Systemgerecht werden von allen spezialisierten Forschern und Wissenschaftlern Lösungen und Alternativen im Rahmen ihrer Fachgebiete gesucht, ohne sich darüber hinaus mit der Frage zu beschäftigen, warum trotz optimaler Lösungsmodelle fortwährend neue Probleme an unerwarteten Stellen entstehen. So verlockend es wäre, eigene Vorschläge für einschlägige Gebiete hinzuzufügen, soll hier doch an der integralen Themenstellung festgehalten werden. Diese verlangt als *conditio sine qua non* eine Bewusstseinsbildung, welche die durch den technischen Fortschritt entstandenen Möglichkeiten beherrscht – und nicht umgekehrt. ‘Denn die geistigen Möglichkeiten sind es’, so Gebser, ‘die letztlich auch die politischen, wirtschaftlichen und soziologischen bestimmen.’”
- 2 ^{en:} Interestingly, this is also the definition of a complex system. This should be the model of how we understand the challenges of our current lives today.
^{de:} Interessanterweise entspricht dies auch der Definition eines komplexen Systems. Es sollte als Modell für das Verständnis der Herausforderungen des modernen Lebens dienen.
- 3 Barad, K. (2007): *Meeting the Universe Halfway*, Durham. London: Duke University Press.
- 4 Kahneman, D. (2011): *Thinking fast and slow*, New York, NY: Farrar, Straus and Giroux.
- 5 Singer, W., Ricard, M. (2008): *Hirnforschung und Meditation. Ein Dialog*, Berlin: Suhrkamp.
- 6 Friedlaender, S. (1918): *Schöpferische Indifferenz*, München: G. Müller.
- 7 ^{en:} Sustainable in the original sense of the word: ‘fit for the future’.
^{de:} „Nachhaltig“ im ursprünglichen Sinn des Wortes: „zukunftsfähig“.

FOLLOW THE MATERIAL!

FOLGE DEM MATERIAL!

↗ HÉLÈNE FRICHOT // German translation: Christa Wendl, Lukas Allner and Daniela Kröhnert

There is a telling scene in the American TV series *The Wire* in which a wise old newcomer to a team of police investigators painstakingly explains to the group that to get to the bottom of the Baltimore drug ring they will have to "follow the money!" He explains to his colleagues, whose attempts to break up a debilitating local trade in drugs have mostly been thwarted, that if "you follow the drugs, you get drug addicts and drug dealers, but you start to follow the money, and you don't know where the fuck it's gonna take you...". This reorientation of their efforts turns out to be a breakthrough for the team. They will, in time, discover that, instead of pursuing a circle of disadvantaged youth living in a cluster of much neglected social housing highrises, who are caught up in insidious cycles of drug running and drug abuse, by following the money instead, they will get to the power and thereby uncover those driving death and destruction into the community.

When I enunciate the imperative of the title of this essay, 'Follow the material!', it's with a similar sense of urgency registered on local and global scales concerning the havoc we are wreaking amidst our collective environment-worlds¹. To follow the material can mean to follow a path of environmental devastation, where the best of intentions associated with some new material product turns out to create toxic environments and illness in local populations. For the architect and designer,

In der amerikanischen Fernsehserie *The Wire* gibt es eine vielsagende Szene, in der ein weiser alter Newcomer in einem Team von Polizeiermittler*innen der Gruppe in mühevoller Kleinarbeit erklärt, dass sie, um dem Drogenring von Baltimore auf den Grund zu gehen, „dem Geld folgen“ müssten. Er erklärt seinen Kollegen*innen, deren Versuche, den zerstörerischen lokalen Drogenhandel zu zerschlagen, größtenteils erfolglos geblieben sind: „Wenn man den Drogen folgt, bekommt man Drogensüchtige und Drogendealer, aber wenn man beginnt, dem Geld zu folgen, weiß man verdammt nochmal nicht, wohin es einen führen wird ...“ Diese Neuausrichtung ihrer Bemühungen erweist sich als Durchbruch für das Team. Mit der Zeit erkennen die Ermittler*innen, dass es nicht sehr sinnvoll ist, eine Gruppe benachteiligter Jugendlicher zu verfolgen, die in heruntergekommenen Sozialbauten leben und in heimtückische Kreisläufe von Drogenhandel und Drogenmissbrauch verstrickt sind. Stattdessen ist es weitaus zielführender, dem Geld zu folgen und so an jene zu gelangen, die im Hintergrund die Fäden ziehen und Tod und Zerstörung in die Community bringen.

Wenn ich den Imperativ des Titels dieses Essays, „Folge dem Material!“, ausspreche, so geschieht dies mit einem ähnlichen Gefühl der Dringlichkeit, wie es auf lokaler sowie globaler Ebene spürbar wird und das die Verwüstungen, die wir in unserer gemeinsamen „Um-Welt“¹ anrichten,

to follow the material is an exercise in learning what materials can do, as well as understanding the implications of choosing one material over another. To follow the material requires breaking with bad hylomorphic habits, specifically, breaking with the assumption that form or lofty ideas should take precedence over material distribution, and that matter is merely that stuff we use to fill in the abstract shapes of our conceptual design experiments. Too often, material is the after-effect, how we, as designers, color in the spaces between the lines. This is dangerous and irresponsible.

To follow the material is inherently an ethical decision. The act of following demands an ethical comportment toward the world, from within the thick midst of our relational architectural ecologies². As I explain in *How to Make Yourself a Feminist Design Power Tool*³ in the final chapter, which is dedicated to the imperative, 'Follow the material!', following the materials of your local environment-world means undertaking immanent ethical action. It's about developing a virtuosity in your ethical performances.⁴ Practicing, over and over again, the best approach; thinking on your feet from the midst of your troubles. An important distinction emerges here, espoused by thinkers such as Francesco Varela and Gilles Deleuze, and found between prescriptive principles secured from a moral high ground, which presumes that the thinker is objective, if not omniscient, and ethical know-how that is practiced via trial and error and stays close to the ground, following the rumbling of things. The latter is an active and engaged form of ethics, and far more difficult to pursue. As J.K. Gibson Graham asked, "What can we learn from things that are happening on the ground?"⁵

betrifft. Dem Material zu folgen kann bedeuten, einem Pfad der Umweltzerstörung zu folgen, wo sich die besten Absichten, die mit einem neuen Werkstoff verbunden sind, als toxische Umgebungen herausstellen und Krankheiten in der lokalen Bevölkerung verursachen. Für Architekt*innen und Designer*innen ist dem Material zu folgen eine Übung, um zu verstehen, was Materialien bewirken können und was es bedeuten kann, ein bestimmtes Material einem anderen vorzuziehen. Dem Material zu folgen bedeutet, mit schlechten hylomorphen Gewohnheiten zu brechen, insbesondere mit der Annahme, dass die Form oder hehre Ideen Vorrang vor der Materialverteilung haben sollten und dass Materie lediglich der Stoff sei, mit dem wir die abstrakten Formen unserer konzeptionellen Design-Experimente ausfüllen. Zu oft ist das Material nur ein Nebeneffekt, wenn wir als Designer*innen die Räume zwischen den Linien ausmalen. Das ist gefährlich und verantwortungslos.

Dem Material zu folgen ist im Wesentlichen eine ethische Entscheidung. Der Akt des Folgens erfordert ethisches Verhalten gegenüber der Welt, aus der dichten Mitte unserer relationalen architektonischen Ökologien heraus.² Wie ich im letzten Kapitel in *How to Make Yourself a Feminist Design Power Tool*,³ das dem Imperativ „Folge dem Material!“ gewidmet ist, erkläre, ist es eine immanent ethische Handlung, den Werkstoffen der lokalen „Um-Welt“ zu folgen. Es geht darum, eine Virtuosität im ethischen Handeln⁴ zu entwickeln. Deshalb heißt es, immer und immer wieder die beste Herangehensweise zu üben; schnell aus der Mitte unserer Probleme heraus zu reagieren! Hier zeigt sich eine wichtige Unterscheidung, wie sie von Denkern wie Francisco Varela und Gilles Deleuze gemacht wird, und zwar zwischen präskriptiven Prinzipien, die



▲ Performance artist Daniel Aschwanden interacting with the first *Kigumi* structure during the exhibition *Understanding Art and Research* at the Museum of Applied Arts in Vienna (MAK), 2019.

Photo © Leonard Kern

Staying close to the ground means being prepared to get dirty, or rather, it requires acknowledging that we are already culpable, that we have already made material mistakes that now require mending and amendments. We have to strive to do our work better next time, to develop an ethico-aesthetic know-how.

For me, "Follow the material!", a call formulated as an imperative and therefore projected with urgency, comes most directly from my reading of the work of Gilles Deleuze and Félix Guattari, both when they write individually and in collaboration.

Given that this present collection, *Conceptual Joining*, focuses on wood as a material for experimentation, it is serendipitous that Deleuze and Guattari use wood as a material example when they discuss what it means, for them, to follow the material. They explain that wood "is more or

von einer moralischen Überlegenheit ausgehen, was eine objektive, wenn nicht gar allwissende Denker*in voraussetzt, und ethischem Know-how, das durch 'Versuch und Irrtum' entsteht, indem es dem unbequemen Lauf der Dinge folgt und damit stets auf dem Boden der Tatsachen bleibt. Letzteres ist eine aktive und engagierte Form der Ethik, die weitaus schwieriger umzusetzen ist. Es gilt, wie J. K. Gibson-Graham zu fragen: „Was können wir von den Dingen lernen, die auf dem Boden geschehen?“⁵ Nahe am Boden zu bleiben bedeutet, bereit zu sein, sich schmutzig zu machen, oder besser gesagt, es erfordert die Anerkennung, dass wir bereits schuldig sind, dass wir bereits wesentliche Fehler gemacht haben, die nun korrigiert und geändert werden müssen. Wir müssen uns bemühen, unsere Arbeit beim nächsten Mal besser zu machen, ein ethisch-ästhetisches Know-how zu entwickeln.

less porous, more or less elastic and resistant. At any rate, it is a question of surrendering to the wood, then following where it leads by connecting operations to a materiality, instead of imposing a form upon a matter.⁶ This is their anti-hylomorphic recommendation: Don't impose a form, instead, surrender to the wood. Follow it closely to see what it needs, what it can do, and follow it closely to see what it connects to. In addition: "Do not assume a fixed form and a matter deemed homogenous."⁷ They speak, for instance, of the "variable undulations and torsions of the fibers guiding the operation of splitting wood."⁸ Wood's capacity for deformation, they explain, must be cross-referenced with its more essential qualities, for instance, its porosity, elasticity and resistance, to which might be added whether the wood is a soft or a hard wood. The wood has "material traits of expression"⁹, these are the wood's own properties, which means it is capable of some behaviors and not capable of others. All these capacities, or what Deleuze and Guattari also call 'affects', must be understood intimately so that the one working the wood can form the best possible working relationship with the wood.

Matter is subject to continuous variation, it persists for as long as its duration allows amidst a perpetual flux of environmental encounters, performing according to its capacities and affects. Deleuze and Guattari spell out the consequence of understanding matter as flux and flow by insisting that "this matter-flow can only be followed."¹⁰ 'Following' can be undertaken while staying in place, much as the craftsperson follows the wood while stationed at her work table, but of course, it is also necessary to venture into the woods to source the right kind of wood with the right

Für mich ergibt sich „Folge dem Material!“, ein als Imperativ formulierter und daher mit Dringlichkeit versender Aufruf, am direktesten aus der Lektüre der Arbeiten von Gilles Deleuze und Félix Guattari, sowohl aus ihren individuellen als auch ihren gemeinsamen Schriften.

In Anbetracht der Tatsache, dass die vorliegende Publikation, *Conceptual Joining*, Holz als experimentelles Material in den Mittelpunkt stellt, ist es ein glücklicher Zufall, dass Deleuze und Guattari Holz als Materialbeispiel verwenden, wenn sie darüber diskutieren, was es für sie bedeutet, dem Material zu folgen. Sie erklären, dass Holz „mehr oder weniger porös, mehr oder weniger elastisch und widerstandsfähig ist. Auf jeden Fall geht es darum, sich dem Holz hinzugeben und ihm zu folgen, wohin es führt, wenn man Arbeitsabläufe mit einer Materialität verbindet, anstatt der Materie eine Form aufzuzwingen.“⁶ Ihre anti-hylomorphe Empfehlung lautet: Zwingt dem Holz keine Form auf, gebt euch ihm vielmehr hin. Beobachtet es genau, um zu sehen, was es braucht, was es kann und womit es sich verbindet. Dazu kommt: „Geht nicht von einer festen Form und einer als homogen befundenen Materie aus.“⁷ Sie sprechen beispielsweise von den „variablen Wellen und Verdrehungen der Fasern, die den Vorgang des Holzspaltens bestimmen“.⁸ Die Verformungsfähigkeit des Holzes, so erklären sie, muss mit seinen wesentlicheren Eigenschaften in Beziehung gesetzt werden, zum Beispiel mit seiner Porosität, Elastizität und Widerstandsfähigkeit, zu denen noch hinzukommen könnte, ob es sich um Weich- oder Hartholz handelt. Holz verfügt über „materielle Ausdrucksmerkmale“.⁹ Dies sind alles Eigenschaften, die dem Holz eigen sind, was bedeutet, dass es von sich aus zu bestimmten Verhaltensweisen fähig ist und zu anderen nicht.

kind of fibers. The craftsperson, the designer, must venture out of the safe circle of her studio and venture further afield to gain material knowledge and know-how. Deleuze and Guattari acknowledge that merchants might also bring the material to the craftsperson, but this immediately proves problematic, for how can the craftsperson really know the material if they have not undertaken their own journey into the environment-world of the woods? The moment a merchant or a middleman intercedes, there are further opportunities for a whole chain of actors to line up, one after the other, collecting profits along the way as the wood makes its supply-chain passage from the forest to the worktable.



▲ Students hand-carving joints during the *Kigumi* workshop with Jun Sato at the Angewandte, 2018.

Now, what is interesting about Deleuze and Guattari's small scene involving a carpenter applying her skills, following the grain of the wood, understanding the disruptive power of the knots, and so forth, is that the larger, more complex supply chains in which she is situated are only hinted at, entering the scene when the merchant arrives with their wares. Questions that emerge when following the ethical imperative 'Follow the material!' include: What wood has

All diese Fähigkeiten – von Deleuze und Guattari auch 'Affekte' genannt – müssen genau verstanden werden, damit die Bearbeiter*innen die bestmögliche Arbeitsbeziehung mit dem Holz eingehen können.

Materie unterliegt kontinuierlicher Veränderung. Sie besteht so lange, wie es ihre Lebensdauer erlaubt, inmitten eines immerwährenden Flusses an Begegnungen mit der Umwelt, und sie verhält sich entsprechend ihren Fähigkeiten und Affekten. Deleuze und Guattari weisen auf die Konsequenz des Verständnisses von Materie als Fluss und Strömung hin, indem sie darauf bestehen, dass „diesem Fluss der Materie nur gefolgt werden kann“.¹⁰ Folgen kann man auch, wenn man an Ort und Stelle bleibt, so wie die Handwerker*in dem Holz folgt, während sie an ihrem Arbeitstisch steht. Aber natürlich ist es auch notwendig, sich in den Wald zu begeben, um die richtige Art von Holz mit der richtigen Faser-Struktur zu finden. Die Handwerker*in, die Designer*in muss sich aus dem sicheren Terrain ihres Ateliers herauswagen und in die Ferne schweifen, um Materialwissen und Know-how zu erlangen. Deleuze und Guattari räumen ein, dass auch Händler*innen das Material zu den Handwerker*innen bringen könnten. Aber das erweist sich schnell als problematisch, denn wie können Handwerker*innen das Material wirklich kennen, wenn sie nicht eigens in die 'Um-Welt' des Waldes gereist sind? Sobald Händler oder Mittelsmänner ins Spiel kommen, ergeben sich weitere Möglichkeiten für eine ganze Kette von Akteuren, die sich entlang der Lieferkette aneinanderreihen und auf dem Weg des Holzes vom Wald bis zum Arbeitstisch Gewinne einstreichen.

An der kleinen Szene von Deleuze und Guattari, in der eine Tischler*in

the carpenter chosen to work with? Where did it come from? What global journeys has it already undertaken before it arrived on my work bench? Who has been affected on this journey? What labouring bodies have been made more vulnerable?¹¹

Jane Hutton's recent book *Reciprocal Landscapes: Stories of Material Movements*¹² draws acute attention to the flows of harvested timber, offering as an example timber chosen for the famous Highline project in New York. While wood is not a dominant material in this project, Hutton explains that it is applied to soften and domesticate the industrial transformation of the former elevated inner city rail line into a public park. The wood used for the original work on the Highline was tropical ipe, which led to protests by the Rainforest of New York group agitating about the unsustainable harvesting of this timber, and the associated "ecological and human rights issues and abuses."¹³

Hutton herself 'follows the material' that is ipe by journeying back along its supply chain into the Amazonian forest itself, where she meets members of the Instituto Floresta Tropical (IFT) based in Bélem, Brazil. This is the town, something of a timber gateway to the world, where Timber Holdings is to be found, the exporter that supplied the timber for the Highline project. Rather than painting the picture black and white, Hutton follows the efforts of the IFT to undertake sustainable harvesting by following best practices and attending to licensing rules in order to do this work legally. Still, with the global demand for hard woods, which prove to be hardy materials for domestic garden decking and furniture and public parks such as the Highline, the frontline of logging pushes ever deeper into the Amazon,

ihre Fähigkeiten einsetzt, der Maserung des Holzes folgt, die disruptive Kraft der Äste versteht und so weiter, ist interessant, dass die größeren, komplexeren Lieferketten, von denen sie ein Teil ist, nur angedeutet werden und in die Szene Eingang finden, wenn Händler*innen mit ihren Waren eintreffen. Zu den Fragen, die sich ergeben, wenn man dem ethischen Imperativ „Folge dem Material!“ folgt, zählen: Welches Holz hat die Tischler*in für ihre Arbeit gewählt? Woher kommt es? Welche globalen Reisen hat es bereits hinter sich, wenn es auf der Werkbank landet? Wer ist von den Auswirkungen dieser Reise betroffen? Welche Arbeiter*innen wurden dadurch noch verwundbarer gemacht?¹¹

In ihrem kürzlich erschienenen Buch *Reciprocal Landscapes: Stories of Material Movements*¹² weist Jane Hutton auf die Liefer-Ströme von Bauholz hin und nennt als Beispiel das berühmte High-Line-Projekt in New York. Hutton erklärt, dass, obwohl Holz in diesem Projekt eine untergeordnete Rolle spielt, es eingesetzt wird, um das industrielle Areal im Zuge seiner Transformation von einer ehemaligen innerstädtischen Hochbahnlinie in einen öffentlichen Park abzumildern und zu domestizieren. Zu Beginn des Baus des High-Line-Projektes wurde tropisches Ipe verwendet, was zu Protesten der Gruppe Rainforest of New York führte, die die nicht-nachhaltige Ernte dieses Holzes und die damit verbundenen „ökologischen und menschenrechtlichen Probleme und Missstände“¹³ anprangerte.

Hutton selbst 'folgt dem Material' Ipe, indem sie entlang seiner Lieferkette zurück in den Amazonaswald reist und dort die Mitglieder des Instituto Floresta Tropical (IFT) an ihrem Standort in Bélem in Brasilien trifft. In dieser Stadt, die als Tor zur Welt des Holzes bezeichnet werden kann, befindet sich



▲ CNC-processed hornbeam and beechwood branch parts prior to assembly, at the Angewandte Innovation Laboratory (AIL), 2019.

step by slow step, reducing the capacity of the whole earth system to breathe.

To follow the material means to pay attention. What does the wood want to do?¹⁴ By paying attention and responding to the specific implications of such questions, how might the designer respond in the most ethical way? Paying attention to the many goddesses in the details may well lead us to better worlds, and to more amenable, less destructive, environmental relations. To follow the material could be part of the journey made from the design detail to utopia, but it's more likely that following the material will mean 'staying with the trouble.' This is the slogan that Donna Haraway, provocative thinker of science and technology, has called out loud and clear in her more recent work.¹⁵ You see, the risk of thinking towards Utopia, which is by definition nowhere – not here, not now – is that we are holding out for that promised day, and forgetting to act right here, from the mess of the now, from the dirt and grime and difficulty of our immediate, immanent milieu.

Timber Holdings, die Exportfirma, die das Holz für das High-Line-Projekt liefert hat. Anstatt das Bild schwarz-weiß zu malen, verfolgt Hutton die Bemühungen des IFT nach, wie es versucht, eine legale und nachhaltige Holzernte durchzuführen, indem es Best Practices befolgt und sich an Lizenzregeln hält. Doch mit der weltweiten Nachfrage nach Harthölzern, die sich als widerstandsfähiges Material für heimische Gartenterrassen und -möbel sowie öffentliche Parks wie das High-Line-Projekt erwiesen haben, dringt die Front der Abholzung Schritt für Schritt immer tiefer in den Amazonas vor und nimmt dabei langsam dem gesamten Planeten immer mehr die Fähigkeit zu atmen.

Dem Material zu folgen bedeutet, aufmerksam zu sein. Was möchte das Holz tun?¹⁴ Wie könnte die Designer*in am ethischsten agieren, wenn sie auf die spezifischen Implikationen solcher Fragen achtet und darauf eingehet? Wenn wir den vielen ‚Göttinnen der kleinen Dinge‘ Rechnung tragen, kann dies durchaus zu einer besseren Welt führen und unsere Umweltbeziehungen verträglicher und weniger zerstörerisch machen. Dem Material zu folgen könnte ein Teil der Reise sein, die vom Design-Detail zur Utopie führt. Wahrscheinlicher ist es jedoch, dass dem Material zu folgen bedeutet: „unruhig bleiben“. Das ist die Parole, die Donna Haraway, provokante Denkerin im Bereich Wissenschaft und Technologie, in ihren rezenten Werken laut und deutlich ausruft.¹⁵ Man sieht, das Risiko des Denkens in Richtung Utopie, die per definitio-nem nirgendwo ist – nicht hier, nicht jetzt –, liegt darin, dass wir auf diesen versprochenen Tag warten und vergessen, genau hier zu handeln, aus dem Chaos des Jetzt heraus, aus dem Schmutz und Elend und den Schwierigkeiten unseres unmittelbaren, immanrenten Umfeldes heraus.

ADDITIONAL REFERENCES | WEITERE REFERENZEN:

- Alaimo, S., Hekman, S. (eds.) (2009): *Material Feminisms*, Bloomington: Indiana University Press.
- Coole, D., Frost, S. (eds.) (2010): *New Materialisms: Ontology, Agency, and Politics*, Durham, NC: Duke University Press.
- Deleuze, G. (1988): *Spinoza: Practical Philosophy*, trans. Robert Hurley, San Francisco: City Lights.
- Dolphijn, R., van der Tuin, I. (eds.) (2012): *New Materialism: Interviews and Cartographies*, Ann Arbor, MI: Open Humanities Press, University of Michigan Library.
- Frichot, H. (2019): *Dirty Theory: Troubling Architecture*, Baunach: Spurbuchverlag.
- Lloyd Thomas, K. (ed.) (2007): *Material Matters: Architecture and Material Practice*, London: Routledge.

- 1 ^{en} see Frichot, H. (2016): *How to Make Yourself a Feminist Design Power Tool*, Baunach: Spurbuchverlag: 88: "I take the conjunction environment-world from the idiosyncratic work of Uexküll who uses the term *Umwelt*: a surrounding, engulfing world. (Uexküll, 2010) [...] Environment-world is my own 'bad' translation of the German term *Umwelt*, which would usually be translated as, quite simply, 'environment'. The thing is, that the German can also be taken at face value, literally. As such we have two parts – *um* and *Welt* – the first meaning 'surroundings', or that which surrounds, and the second meaning 'world'." ^{de} siehe dazu Frichot, H. (2016): *How to Make Yourself a Feminist Design Power Tool*, Baunach: Spurbuchverlag: 88: „Die Konjunktion environment-world entnehme ich der ideozykatischen Arbeit von Uexküll, der den Begriff *Umwelt* verwendet als: eine umgebende, verschlingende Welt. (Uexküll, 2010) [...] Environment-world ist meine eigene „schlechte“ Übersetzung des deutschen Begriffs „Umwelt“, der normalerweise ganz einfach mit „environment“ übersetzt wird. Die Sache ist die, dass das Deutsche auch wörtlich genommen werden kann. Wir haben also zwei Teile – *um* und *Welt* –, wobei das erste „Umgebung“ oder das, was umgibt, und das zweite „Welt“ bedeutet.“
- 2 Rawes, P. (ed.) (2013): *Relational Architectural Ecologies*, London: Routledge.
- 3 Frichot, H. (2016): *How to Make Yourself a Feminist Design Power Tool*, Baunach: Spurbuchverlag.
- 4 Varela, F. J. (1999): *Ethical Know-How: Action, Wisdom and Cognition*, Stanford, CA: Stanford University Press.
- 5 Gibson-Graham, J. K. (2011): "A Feminist Project of Belonging for the Anthropocene", in: *Gender, Place & Culture*, 18(1): 1–21, here: 4.
- 6 Deleuze, G., Guattari, F. (1987): *A Thousand Plateaus: Capitalism and Schizophrenia*, trans. Brian Massumi, Minneapolis: University of Minnesota Press. 408; see also Frichot 2016.
- 7 Deleuze, Guattari 1987: 408.
- 8 ibid.
- 9 ibid.
- 10 ibid, 409.
- 11 see Borasi, G. (2010): *Journeys: How Travelling Fruit, Ideas and Buildings Rearrange Our Environment*, Montreal: CCA, and Barcelona: Actar.
- 12 Hutton, J. (2020): *Reciprocal Landscapes: Stories of Material Movements*, London: Routledge.
- 13 ibid, 209.
- 14 see Lefebvre, P. (2018): "'What the Wood wants to do': Pragmatist Speculations on a Response-able Architectural Practice", in: Doucet, I., Frichot, H. (eds.) (2018): *Resist, Reclaim, Speculate: Situated Perspectives on Architecture and the City*, special edition, *Architectural Theory Review*, 22(1): 24–41.
- 15 ^{en} Haraway, D. (2016): *Staying with the Trouble: Making Kin in the Chthulucene*, Durham: Duke University Press.
^{de} Haraway, D. (2018): *Unruhig bleiben: Die Verwandtschaft der Arten im Chthuluzän*, Frankfurt am Main: Campus.

JOINING LIVING WOOD

LEBENDES HOLZ VERBINDELN

↗ FERDINAND LUDWIG // German translation: Christa Wendl and the author



▲ Fig. 1 | Abb. 1:
A young and fully established
Living Root Bridge in
Meghalaya, India.
Photo © Ferdinand Ludwig

INTRODUCTION

In architecture, design with living trees, whereby living wood is used as a construction material, has a long tradition. For hundreds of years, the Khasi and Jaintia people of the hills of Meghalaya in Northeast India have been building living bridges.¹ By guiding and connecting aerial roots of the Indian rubber fig (*Ficus elastica*), they make use of natural growth processes that create a stable, load-bearing structure over time (Fig. 1).

EINFÜHRUNG

Entwerfen mit lebenden Bäumen unter Verwendung von Holz als lebendem Baumaterial hat in der Architektur eine lange Tradition. Seit Hunderten von Jahren bauen die Khasi und Jaintia in den Hügeln von Meghalaya im Nordosten Indiens lebende Brücken.¹ Durch das Formen und Verbinden von Luftwurzeln des indischen Gummibaums (*Ficus elastica*) machen sie sich natürliche Wachstumsprozesse zunutze und lassen so mit der Zeit ein stabiles Tragwerk entstehen (Abb. 1).

Referring to these ideas, *Baubotanik*² applies engineering methods to trees in order to create structures that can serve as three-dimensional elements that can potentially take over the functions of building components. With this in mind, a variety of techniques are being developed to train trees, joining them with each other and with non-living elements to create a biological-technical system. Based on botanical growth principles, organic joints can be established that use the trees' natural capacity to connect, called "inosculation."³

BAUBOTANIK RESEARCH AND TEST FIELDS

The scientific approach to this question is a central objective of the Baubotanik research group. The aim of the research is to base the construction and design of Baubotanik buildings on fundamental botanical growth rules. This requires the description and production of living plant stems as a technical material⁴ and the development of techniques for creating organic joints using inosculation.⁵ To address these questions, the Baubotanik research group and its partners set up a number of experimental buildings and a series of long-term inosculation tests (Fig. 2). One aim of the inosculation tests is to examine different tree species for applicability to Baubotanik and to create foundations for the development of practical joining techniques.⁶ For this reason, different joining techniques have been applied to ten species and multiple joint geometries.⁷ The applied joining techniques can be divided into three groups: techniques that bind plants together with wide and pliable ties that lay over the bark, techniques using thin ropes that cut into the bark while being incorporated into the growth process, and techniques in which the

Bezug nehmend auf diese Ideen nutzt die *Baubotanik*² ingenieurwissenschaftliche Methoden, um aus Bäumen Strukturen zu schaffen, die als räumliche Konstruktionselemente potenziell die Funktion von Bauteilen in der Architektur übernehmen können. Um Bäume zu formen und sie untereinander und mit nicht-lebenden Elementen zu einem biologisch-technischen System zu verbinden, wurde eine Vielzahl an Techniken erprobt. Basierend auf botanischen Wachstumsprinzipien können organische Verbindungen erzeugt werden, die die natürliche Verwachungsfähigkeit der Bäume nutzen.³

FORSCHUNGS- UND TESTFELDER DER BAUBOTANIK

Die wissenschaftliche Bearbeitung dieser Frage ist ein zentrales Anliegen der Forschungsgruppe Baubotanik. Ziel der Forschung ist es, die Konstruktion und den Entwurf baubotanischer Gebäude auf elementaren botanischen Wachstumsregeln zu begründen. Dies erfordert die Beschreibung und Produktion von lebenden Pflanzenstämmen als technische Materialien⁴ sowie die Entwicklung von Methoden zur Herstellung organischer Verbindungen mit Hilfe von Verwachsungen.⁵ Um diesen Fragen nachzugehen, hat die Forschungsgruppe Baubotanik gemeinsam mit ihren Partnern mehrere Versuchsbauwerke errichtet und Langzeit-Verwachungsversuche gelegt (Abb. 2).

Ein Ziel der Verwachungsversuche ist es, verschiedene Baumarten auf ihre Eignung für die Baubotanik zu untersuchen und Grundlagen für die Entwicklung praxisgerechter Verbindungstechniken⁶ zu schaffen.

Im Zuge der Arbeiten wurden verschiedene Verbindungstechniken an zehn Baumarten und mehreren Verbindungsgeometrien⁷ angewendet.



▲ Fig. 2 | Abb. 2:
Baubotanik test field at Bruns Nurseries, Bad Zwischenahn, Germany.

Photo © Ferdinand Ludwig



▲ Fig. 3 | Abb. 3:
Tests of different joining
techniques used to develop
practicable and plant-
compatible inosculation
methods.

Photo © Ferdinand Ludwig

plants are connected by screws that penetrate the wooden core of the stems. Where possible and reasonable, these techniques were applied to all species and to parallel as well as crosswise connections, using between two to eight plants (Fig. 3).

The preliminary results show that the tendency to inosculation increases with the vigor of growth and decreases with the amount of secondary epidermal tissues (cork, bark). Species clearly differ in their reactions to the different joining techniques. The anatomy of the wood (circular or diffuse arrangement of the pores) and the ability of a species to partition and seal wounds are important factors in some joining techniques. The tests showed London plane to be the most applicable species because all joining techniques tested on it lead to good and fast inosculation results. Out of all these techniques, the screwing method has been proven as a very

Die eingesetzten Verbindungsmethoden lassen sich in drei Gruppen einteilen: Techniken, bei denen Pflanzen mit breiten und dehnbaren, über der Rinde liegenden Bändern miteinander verbunden werden; Techniken mit dünnen Seilen, die in die Rinde schneiden und dabei in den Stamm einwachsen; sowie Techniken, bei denen die Pflanzen durch den hölzernen Kern der Stämme durchdringende Schrauben miteinander verbunden werden. Soweit möglich und sinnvoll, wurden diese Techniken bei allen Baumarten und sowohl bei Parallel- als auch bei Kreuzverbindungen angewandt, wobei jeweils zwischen zwei und acht Pflanzen herangezogen wurden (Abb. 3).

Die vorläufigen Ergebnisse zeigen, dass die Neigung zu verwachsen mit der Wuchskraft zu- und mit dem Anteil der sekundären Abschlussgewebe (Kork, Rinde) abnimmt. Die Baumarten unterscheiden sich deutlich in



practicable, reliable and plant-compatible method.⁸

BAUBOTANIK DESIGN APPROACH AND EXPERIMENTAL BUILDINGS

In addition to these technical questions, Baubotanik calls for a new design approach, taking into account the processual character of the structures: their generic shape, appearance and spatial effect fundamentally change between seasons and over the years. This is demonstrated by the *Baubotanik Footbridge*, the Baubotanik research group's first 1:1 test building. The living columns of the bridge construction sprout in spring and summer, creating a dense wall of leaves that form a canopy over the footbridge. When the trees finally drop their leaves in fall, the building assumes an explicitly constructive appearance, which lasts through the winter months. Over time, the proportions of the building are changed by the growth of the canopy, while the main geometry remains constant, since trees show longitudinal growth only at the green, uppermost tips of the young branches, while the older parts only grow in circumference⁹, which is essential for Baubotanik structures. In the case of the footbridge, this is most noticeable in the junctions between the plant and the metal handrails, where the plants grow around stainless steel pipes, creating a tightly fitted joint that indi-

hher Reaktion auf die verschiedenen Verbindungstechniken. So sind die Anatomie des Holzes (ringförmige oder diffuse Anordnung der Poren) und die Fähigkeit einer Baumart, Wunden abzuschotten und zu verschließen, wichtige Faktoren für die Anwendbarkeit einer Verbindungstechnik. Die Versuche zeigen, dass die ahornblättrige Platane die am besten geeignete Baumart ist, da alle an ihr getesteten Verbindungstechniken zu guten und schnellen Verwachsungsresultaten führten. Von all diesen Techniken hat sich das Schraubverfahren als eine sehr praktikable, zuverlässige und pflanzenverträgliche Methode erwiesen.⁸

ENTWURFSANSATZ UND EXPERIMENTELLE BAUBOTANISCHE BAUWERKE

Neben diesen technischen Fragen erfordert die Baubotanik auch einen neuen Entwurfsansatz, der dem prozessuellen Charakter der Bauwerke gerecht wird: Im Wechsel der Jahreszeiten und im Verlauf der Jahre verändern sich die ursprüngliche Form, das Erscheinungsbild und die räumliche Wirkung der Bauten grundlegend. Deutlich wird dies zum Beispiel an dem Projekt *Baubotanischer Steg*, dem ersten 1:1-Versuchsbauwerk der Forschungsgruppe Baubotanik. Hier treiben die lebenden Pflanzenstützen im Frühjahr und Sommer aus und bilden eine dichte Blätterwand und ein Dach über dem Steg. Wenn im

▲ Fig. 4 | Abb. 4:
Development of the connection between the stainless steel handrail and the living structure of the Baubotanik Footbridge from 2005 to 2012.
Photo © Ferdinand Ludwig



▲▲ Fig. 5 | Abb. 5:

Left: *Plane Tree Cube* in Nagold, Germany by OLA – Office for Living Architecture. Right: Joint trees that will develop into the main load-bearing structure.

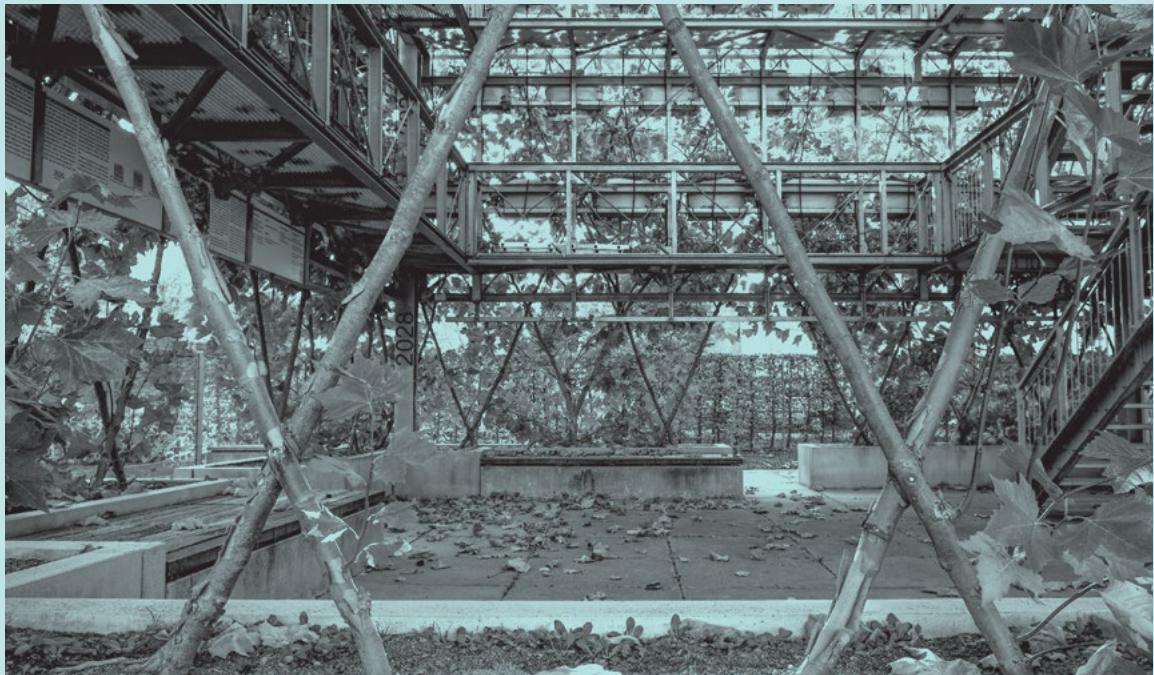
Photos © Ferdinand Ludwig

cates the increasing stability of these connections (Fig. 4).

While the *Baubotanik Footbridge* investigates the incorporation of non-living elements into the living structure through overgrowth, other prototypes experiment on inosculation between plants, developing the traditional Khasi approach. The *Plane Tree Cube* is a *Baubotanik* building that was realized in 2012 in the context of a horticultural show in Nagold (southern Germany) as an experimental building that demonstrates the potential of the plant-addition technique¹⁰ (Fig. 5). This technique was developed by the *Baubotanik* research group and is based on the fact that trees have the ability to compensate for the loss of organs by generating new ones, either in the same locations or elsewhere. If several plants are inosculated and thereby merge into one organism, the former individual ones no longer require all of their biological parts. This means that the roots or the leaves, or even both, can be removed, provided that

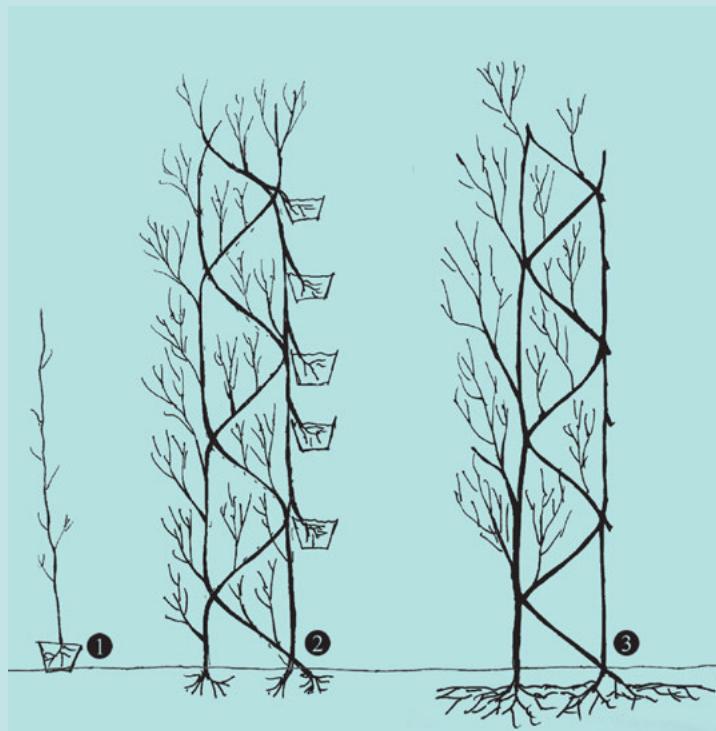
Herbst die Blätter von den Bäumen fallen, nimmt das Bauwerk ein ausgesprochen konstruktives Aussehen an, das bis in die Wintermonate anhält. Im Lauf der Zeit verändern sich die Proportionen der Konstruktion durch das Wachstum des Kronendaches, während die Grundgeometrie erhalten bleibt. Der Grund dafür ist, dass Bäume nur an den grünen, obersten Spitzen der jungen Äste ein Längenwachstum aufweisen, während die älteren Teile nur im Umfang zunehmen, was ein wesentlicher Aspekt *baubotanischer* Projekte ist. Im Fall des Stegs wird dies insbesondere an den Verbindungen zwischen Baumstütze und den Metallhandläufen deutlich, wo die Pflanzen um die Edelstahlrohre herumwachsen und so eine formschlüssige Verbindung schaffen, wodurch die Stabilität dieser Verbindungen zunehmen kann (Abb. 4).

Während beim *Baubotanischen Steg* die Einbindung von nicht-lebenden Elementen in die lebende Struktur durch Einwachsen untersucht wird, wird bei anderen Prototypen mit Ver-



the inosculated structure as a whole can compensate for the loss. The plant-addition technique uses young plants that are arranged in space above and adjacent to each other and connected in such a way that they merge into one network-like plant structure. Only the lowest plants are planted in the ground, all others are planted in special containers with an automated system that continuously supplies them with water and nutrients to allow them to grow. As the network develops, the roots embedded in the ground that have more space to exploit additional resources grow more vigorously than those placed in the containers. Once the inosculation have developed, water and nutrients can be transported via the artificially created plant structure from the roots in the ground to the uppermost leaves, and the roots of the container plants become obsolete. Step by step, the high-level roots can be cut off, the automated watering system can be removed, and ultimately, the living structure becomes self-sufficient. Simultaneously,

wachstum zwischen Pflanzen experimentiert und der traditionelle Ansatz der Khasi weiterentwickelt. Der *Platanenkubus* ist ein baubotanisches Bauwerk, das 2012 im Rahmen einer Gartenschau in Nagold (Süddeutschland) als Experimentalbau realisiert wurde und das Potenzial der Pflanzenaddition¹⁰ demonstriert (Abb. 5). Diese von der Forschungsgruppe Baubotanik entwickelte Technik basiert auf der Tatsache, dass Bäume die Fähigkeit besitzen, den Verlust von Organen zu kompensieren, indem sie an gleicher oder anderer Stelle neue Organe bilden. Verwachsen mehrere Pflanzen miteinander und verschmelzen so zu einem einzigen Organismus, benötigen die ehemaligen Einzelpflanzen nicht mehr alle ihre biologischen Teile. Das bedeutet, dass die Wurzeln oder die Blätter oder sogar beide entfernt werden können, vorausgesetzt, die verwachsene Struktur als Ganzes kann den Verlust ausgleichen. Bei der Pflanzenaddition werden Jungpflanzen so im Raum über- und nebeneinander angeordnet und miteinander verbunden, dass sie zu einer



▲ Fig. 6 | Abb. 6:

The concept of plant addition, whereby multiple plants are joined to one organism.

© Ferdinand Ludwig

the plant structure becomes stronger and eventually self-supporting due to secondary growth in circumference so that the scaffolding, which was initially required to support the containers and the young plants, can be removed¹¹ (Fig. 6).

netzartigen Pflanzenstruktur verschmelzen. Nur die untersten Pflanzen werden in den Boden, alle anderen in Pflanzgefäß gepflanzt. In diesen werden sie über ein automatisiertes System mit Wasser und Nährstoffen versorgt. Im Verlauf der Entwicklung wachsen die in den Boden gesetzten Wurzeln stärker als die Wurzeln in den Pflanzgefäß, da sie über einen größeren Wachstumsraum verfügen und so zusätzliche Ressourcen erschließen können. Sobald sich die Verwachungen etabliert haben, können Wasser und Nährstoffe über die künstlich geschaffene Pflanzenstruktur von den Wurzeln im Boden zu den obersten Blättern transportiert werden, und die Wurzeln in den Pflanzgefäß werden obsolet. Sie können Schritt für Schritt entfernt werden, und das automatische Bewässerungssystem kann stillgelegt werden. Es entsteht eine autark lebensfähige Struktur, die durch sekundäres Dickenwachstum immer stabiler und letztlich selbsttragend wird. Dann können auch die anfangs zur Stützung der Pflanzgefäß und der Jungpflanzen erforderlichen Gerüste entfernt werden¹¹ (Abb. 6).

CONCLUSION

Ultimately, the Baubotanik plant-addition approach demonstrates a completely new understanding of plants. The plant is no longer seen as a single biological entity with a naturally determined development path from sapling to tree, but rather as a living construction material or element, joined with other living material and technical elements to form a unified whole. This process allows for the immediate creation of living buildings on the scale of a fully grown tree, or – seen from another perspective – it leads to the construction of trees. On the other hand, the restrictions of natural growth, such as locally available resources, create

FAZIT

Der baubotanische Ansatz der Pflanzenaddition führt zu einem völlig neuen Verständnis von Pflanzen. Die Pflanze wird nicht mehr als einzelnes biologisches Wesen mit einem von der Natur bestimmten Entwicklungsweg vom Sprössling zum Baum gesehen, sondern als lebendes Baumaterial oder Element, das sich mit anderen lebenden und technischen Elementen zu einem größeren Ganzen verbindet. Dieser Prozess ermöglicht die unmittelbare Schaffung von lebenden Bauwerken in der Größenordnung eines ausgewachsenen Baumes oder führt – aus anderer Perspektive betrachtet – zur Konstruktion von Bäumen. Gleichzeitig setzen limitierende Fak-

limitations to the approach. From this viewpoint, Baubotanik fundamentally changes the way we use wood in architecture. Instead of felling trees to produce lumber, the living tree itself is integrated into architecture and thereby its ecological benefits as well: shading, cooling and purifying the air become integral parts of our built environment.

toren des natürlichen Wachstums, beispielsweise die lokal verfügbaren Ressourcen, dem Ansatz Grenzen. Aus dieser Perspektive betrachtet verändert die Baubotanik die Art und Weise, wie wir Holz in der Architektur verwenden, grundlegend. Anstatt Bäume zur Holzgewinnung zu fällen, werden lebende Bäume selbst in die Architektur integriert und damit auch ihre ökologischen Vorteile: Verschattung, Kühlung und Luftreinigung werden zu integralen Bestandteilen unserer gebauten Umwelt.

-
- 1 Ludwig, F., Middleton, W. (2018): "Growing bridges", in: Grüntuch-Ernst, A. (ed.): *Hortitecture – The Power of Architecture and Plants*, Berlin: Jovis: 176–183; Ludwig, F., Middleton, W., et al. (2019): "Living bridges using aerial roots of *Ficus elastica* – An interdisciplinary perspective", in: *Scientific Reports* 9(1): 1–11; Middleton, W., Habibi, A., et al. (2020): "Characterizing regenerative aspects of living root bridges", in: *Sustainability* 12(8): 3267.
- 2 ^{en} The term *Baubotanik* was developed at the Institute of Modern Architecture and Design (IGMA) at the University of Stuttgart. Founded in 2007, the Baubotanik research group was established as a transdisciplinary and inter-institutional network. After ten years of intense research, the subject was consolidated upon setting up the professorship Green Technologies in Landscape Architecture (GTLA) at the Technical University of Munich. The research group is embedded in an interdisciplinary network of researchers, designers and practitioners.
- ^{de} Der Begriff *Baubotanik* wurde am Institut für Grundlagen moderner Architektur und Entwerfen (IGMA) der Universität Stuttgart entwickelt. Die Forschungsgruppe Baubotanik entstand 2007 als interdisziplinäres und interinstitutionelles wissenschaftliches Netzwerk. Nach zehn Jahren intensiver Forschung kam es mit der Einrichtung der Professur Green Technologies in Landscape Architecture (GTLA) an der Technischen Universität München zu einer Konsolidierung der Disziplin. Die Forschungsgruppe ist Teil eines interdisziplinären Netzwerks von Forschern, Entwerfern und Praktikern.
- 3 Ludwig, F., Middleton, W., et al. (2019b): "Baubotanik: Living wood and organic joints", in: Hudert, M., Pfeiffer, S. (ed.): *Rethinking Wood: Future Dimensions of Timber Assembly*, Basel: Birkhäuser: 262–275.
- 4 Ludwig, F., de Bruyn, G., et al. (2009): "Plant stems as building material for living plant constructions", in: *Proceedings of the 6th Plant Biomechanics Conference*, Cayenne, French Guyana, France: 398–405.
- 5 Ludwig, F. (2012): *Botanische Grundlagen der Baubotanik und deren Anwendung im Entwurf*, doctoral thesis, Universität Stuttgart: 300; Ludwig, F., Storz, O., et al. (2012): "Living systems: Designing growth in Baubotanik", in: *Architectural Design Journal* 82(2): 82–87.
- 6 ^{en} The focus here is on tree species commonly used in or native to central Europe. In contrast to the aerial roots of *Ficus elastica*, which are very flexible and inosculate very easily, the stems of these species have to be connected in a technical way to initiate the inosculation process.
- ^{de} Der Fokus liegt hier auf Baumarten, die in Mitteleuropa gebräuchlich oder heimisch sind. Im Gegensatz zu den Luftwurzeln von *Ficus elastica*, die sehr flexibel sind und zum Verwachsen neigen, müssen die Stämme dieser Arten auf technische Weise verbunden werden, um den Verwachungsprozess zu stimulieren.
- 7 ^{en} The species chosen in a first test series were: white willow (*Salix alba*), silver birch (*Betula pendula*), black alder (*Alnus glutinosa*), black locust (*Robinia pseudoacacia*), London plane (*Platanus acerifolia*), European ash (*Fraxinus excelsior*), Norway maple (*Acer platanoides*), English oak (*Quercus robur*), common hornbeam (*Carpinus betulus*) and common beech (*Fagus sylvatica*).
- ^{de} Die in einer ersten Testreihe ausgewählten Arten waren: Silberweide (*Salix alba*), Sandbirke (*Betula pendula*), Schwarzerle (*Alnus glutinosa*), Gewöhnliche Robinie (*Robinia pseudoacacia*), Ahornblättrige Platane (*Platanus acerifolia*), Gemeine Esche (*Fraxinus excelsior*), Spitzahorn (*Acer platanoides*), Stieleiche (*Quercus robur*), Hainbuche (*Carpinus betulus*) und Rotbuche (*Fagus sylvatica*).
- 8 Ludwig 2012: 300; Ludwig, Storz et al. 2012.
- 9 Ludwig, F., Storz, O. (2005): "Baubotanik – Mit lebenden Pflanzen konstruieren", in: *Baumeister, Zeitschrift für Architektur* 11(2005): 72–75.
- 10 Ludwig, F. (2016): "Baubotanik: Designing with living material", in: Lösche, S. K. (ed.): *Materiality and Architecture*, London: Routledge.
- 11 *ibid.*

BIBLIOGRAPHY

BIBLIOGRAFIE

[1.0] PRECONDITIONS / FRAGESTELLUNGEN

- Buksnowitz, C., et al. (2010): "Tracheid length in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). Analysis of three databases regarding tree age, cambial age, tree height, inter-annual variation, radial distance to pith and log qualities", in: *Wood Research* 55(4): 1–13.
- Burns, L. A. (2010): "Tree joints. Biomimetic insights for aerospace composite joints", 27th International Congress of the Aeronautical Sciences, 19.–24. Sept. 2010, Nizza.
- Färber, J., et al. (2001): "Cellulose microfibril angles in a spruce branch and mechanical implications", in: *Journal of Materials Science* 36: 5087–5092.
- Gordon, J. E., Jeronimidis, G. (1980): "Composites with high work of fracture", in: *Philosophical Transactions of the Royal Society A – Mathematical Physical and Engineering Sciences* 294(1411): 545–550.
- Jungnikl, K., et al. (2009): "The role of material properties for the mechanical adaptation at branch junctions", in: *Trees – Structure and Function* 23: 605–610.
- Kwon, M., et al. (2001): "Induced compression wood formation in Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*) in microgravity", in: *Phytochemistry* 57(6): 847–857.
- Lehmkuhl, T. (2010): *Privat im Richtigen. Wie Adornos berühmtester Satz ursprünglich lautete*, in: *Süddeutsche Zeitung*, 26. Februar 2010: 14. The article discusses the text by Mittelmeier, M., in: *Recherche* 4/2009: 3.
- Lichtenegger, H., et al. (1999): "Variation of cellulose microfibril angles in softwoods and hardwoods. A possible strategy of mechanical optimization", in: *Journal of Structural Biology* 128(3): 257–269.
- Malek, S., et al. (2017): "Lightweight 3D cellular composites inspired by balsa", in: *Bioinspir Biomim* 12(2): 026014.
- Mattheck, C. (1998): *Design in der Natur. Der Baum als Lehrmeister*, Berlin: Springer.
- Mattheck, C. (1991): *Trees. The Mechanical Design*, Berlin: Springer.
- McLain, T. E. (1998): "Connectors and fasteners: research needs and goals", in: Kenneth J. Fridley (ed.): *Wood Engineering in the 21st Century. Research Needs and Goals*, proceedings from a workshop of the same name offered in conjunction with the SEI/ASCE Structures Congress XV in Portland, Oregon, on April 16, 1997, Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers, 1998.
- Müller, U., Gindl-Altmutter, W., Keckes, J. (2018): "How softwood tree branches are attached to stems: hierarchical extension of Shigo's stem-branch model", in: *Trees – Structure and Function* 32(4): 1113–1121.
- Müller, U., Gindl-Altmutter, W., et al. (2018): "Synergy of multi-scale toughening and protective mechanisms at hierarchical branch-stem interfaces", in: *Scientific Reports* 5: 14522.
- Müller, U., Gindl, W., Jeronimidis, G. (2006): "Biomechanics of a branch. Stem junction in softwood", in: *Trees – Structure and Function* 20: 643–648.
- Müller, U., Konnerth, J., et al. (2014): "Stamm-Astanbindung – eine biologisch optimierte Struktur mit hoher mechanischer Leistungsfähigkeit", in: Brandner, R. (ed.): *Bionische Tragstrukturen im Holzbau*, Tagungsband Grazer Holzbau-Fachtagung 2014, Graz: Technische Universität Graz: 113–120.
- Nyström, J. (2003): "Automatic measurement of fiber orientation in softwoods by using the tracheid effect", in: *Computers and Electronics in Agriculture* 41(1–3): 91–99.

- Pulickel, M. A., Schadler, L. S., Braun, P. V. (eds.) (2004): *Nanocomposite Science and Technology*, Weinheim: Wiley-VCH.
- Reiterer, A., Lichtenegger, H. C., et al. (1999): "Experimental evidence for a mechanical function of the cellulose microfibril angle in wood cell walls", in: *Philosophical Magazine A* 79(9): 2173–2184.
- Reuschel, J. D. (1999): *Untersuchungen der Faseranordnung natürlicher Faserverbunde und Übertragung der Ergebnisse auf technische Bauteile mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode*, doctoral thesis, Universität Karlsruhe.
- Shigo, A. L. (1990): *Die neue Baumbiologie*, Braunschweig: Thalacker.
- Shigo, A. L. (1985): "How tree branches are attached to trunks", in: *Canadian Journal of Botany* 63(8): 1391–1401.
- Singer, G., Sinn, G., et al. (2019): "High performance functional composites by in-situ orientation of carbon nanofillers", in: *Composite Structures* 215: 178–184.
- Timell, T. E. (1986): *Compression Wood in Gymnosperms*, Berlin: Springer.
- Trendelenburg, R. (1955): *Das Holz als Rohstoff*, München: Hanser.

[2.0] CONCEPTUAL JOINING / CONCEPTUAL JOINING

- Anderson, C. (2012): *Makers: The New Industrial Revolution*, London: Random House Business Books.
- Benjamin, W. (2010): *Das Kunstwerk im Zeitalter seiner technischen Reproduzierbarkeit: Drei Studien zur Kunstsoziologie*, Frankfurt am Main: Suhrkamp.
- Bertin, V. (2002): "Hebelstabwerke", in: *ARCH+* 159/160: 150–155.
- Bosshard, H. H. (1982): *Holzkunde 1–3*, Basel: Springer.
- Braungard, M., McDonough, W. (2002): *Cradle to Cradle*, New York, NY: North Point Press.
- Broelmann, J. (1996): *Schiffbau – Handwerk, Baukunst, Wissenschaft, Technik*, München: Deutsches Museum.
- Brown, S. A. (1989): *The Genius of Japanese Carpentry: An Account of a Temple's Construction*, New York, NY: Kodansha International.
- Bukauskas, A., Shepherd, P., et al. (2018): "Inventory-constrained structural design: new objectives and optimization techniques", in: *Proceedings of the IASS Annual Symposium 2018: Creativity in Structural Design*.
- Bukauskas, A., Shepherd, P., et al. (2017): "Form-fitting strategies for diversity-tolerant design", in: *Proceedings of the IASS Annual Symposium 2017: Interfaces: Architecture . Engineering . Science*.
- Candilis, G. (1980): *Bugholzmöbel*, Stuttgart: Krämer.
- Carpo, M. (2017): *The Second Digital Turn: Design Beyond Intelligence*, Cambridge, MA: The MIT Press.
- Carpo, M. (2012): *The Digital Turn in Architecture, 1992–2012*, Chichester: Wiley.
- Carpo, M. (2011): *The Alphabet and the Algorithm*, Cambridge, MA: The MIT Press.
- Dachs, S. (ed.) (2007): *Charles und Ray Eames*, Köln: DuMont.
- Frank Gehry: *New Bentwood Furniture Designs* (1992), exhibition catalogue, Montreal Museum of Decorative Arts.
- Frid, T. (1987): *Holzverbindungen*, Ravensburg: Maier.
- Gramazio, F., Kohler, M. (2008): *Digital Materiality in Architecture*, Baden: Müller.

- Graubner, W. (2004): *Holzverbindungen – Gegenüberstellungen japanischer und europäischer Lösungen*, München: DVA.
- Grosser, D. (2007): *Die Hölzer Mitteleuropas: Ein mikroskopischer Lehratlas*, Remagem: Verlag Dr. Kessel.
- Hennessey, J., Papanek, V. (1973): *Nomadic Furniture 1*, New York, NY: Pantheon Books.
- Hennessey, J., Papanek, V. (1974): *Nomadic Furniture 2*, New York, NY: Pantheon Books.
- Henrichsen, C. (2004): *Holzkultur Japan – Bauten, Gegenstände, Techniken*, Basel: Birkhäuser.
- Hensel, M., Menges, A. (eds.) (2008): *Form Follows Performance: Zur Wechselwirkung von Material, Struktur, Umwelt*, ARCH+ 188.
- Holz (2009), ARCH+ 193.
- Jackson, A., Day, D., Jennings, S. (1996): *The Complete Manual of Woodworking: A Detailed Guide to Design, Techniques, and Tools for the Beginner and Expert*, New York, NY: Knopf.
- Jeska, S., Pascha, K. S. (2014a): *Neue Holzbautechnologien – Materialien, Konstruktionen, Bautechnik, Projekte*, ed. Hascher, R., Basel: Birkhäuser.
- Jeska, S., Pascha, K. S. (2014b): *Emergent Timber Technologies – Materials, Structures, Engineering, Projects*, ed. Hascher, R., Basel: Birkhäuser.
- Kawasaki, K., Tanaka, H. (2013): "Traditional wood joint system in digital fabrication", in: *Computation and Performance – Proceedings of the 31st eCAADe Conference*: 711–717.
- Koizumi, K. (1986): *Traditional Japanese Furniture*, Tokyo: Kodansha International.
- Lefteri, C. (2003): *Holz*, Ludwigsburg: avedition.
- Lopéz-Pérez, D. (2019): *R. Buckminster Fuller – Pattern-Thinking*, Zürich: Lars Müller Publishers.
- Mang, C. (1982): *Thonet Bugholzmöbel*, Wien: Brandstätter.
- Mattheck, C. (1998): *Design in Nature, Learning from Trees*, Berlin: Springer.
- Mattheck, C. (1991): *Trees – The Mechanical Design*, Berlin: Springer.
- Mattheck, C., Kubler, H. (1995): *Wood – The Internal Optimization of Trees*, Berlin: Springer.
- Menges, A. (ed.) (2012): *Material Computation: Higher Integration in Morphogenetic Design*, London: Wiley.
- Menges, A. (ed.) (2011): *Computational Design Thinking*, Chichester: Wiley.
- Mollica, Z., Self, M. (2016): "Tree fork truss", in: Adriaenssens, S., Gramazio, F., et al. (eds.): *Advances in Architectural Geometry*, Zürich: vdf Hochschulverlag, ETH Zürich: 138–153.
- Mori Art Museum (ed.) (2018): *Japan in Architecture – Genealogies of its Transformation*, Tokyo: Mori Art Museum.
- Neuhart, M., Neuhart, J. (2010): *The Story of Eames Furniture 1–2*, Berlin: Die Gestalten Verlag.
- Neumann, O. (ed.) (2007): *Futurewood: Innovation in Building Design + Manufacturing*, proceedings of the Parametric Modeling and Digital Wood Fabrication Workshop and Symposium, University of British Columbia, Feb. 14, 2007, Cambridge, Ont.: Riverside Architectural Press.
- Ngo, D., Pfeiffer, E. (2003): *Bent Ply – The Art of Plywood Furniture*, New York, NY: Princeton Architectural Press.
- Noll, T. (2006): *The Joint Book: The Complete Guide to Wood Joinery*, New York, NY: Chartwell Books.
- Ostergard, D. E. (ed.) (1987): *American Federation of Arts: Bent Wood and Metal Furniture: 1850–1946*, Washington, DC: The University of Washington Press.

- Pfeiffer, S. (ed.) (2015): *Interlocking Digital and Material Cultures*, Baunach: Spurbuchverlag.
- Preisinger, C. (2013): "Linking structure and parametric geometry", in: *Architectural Design* 83: 110–113, doi: 10.1002/ad.1564.
- Retsin, G. (ed.) (2019): *Discrete: Reappraising the Digital in Architecture*, *Architectural Design* 89.
- Rossi, A., Tessmann, O. (2018): "From voxels to parts: hierarchical discrete modeling for design and assembly", in: *International Conference on Geometry and Graphics*, Cham: Springer: 1001–1012.
- Sato, H., Nakahara, Y. (1995): *The Complete Japanese Joinery*, Vancouver: Hartley & Marks.
- Savage, A. (2019): *Every Tool's a Hammer: Life Is What You Make It*, New York, NY: Atria Books.
- Schindler, C. (2008): "ZipShape – A computer-aided fabrication method for bending panels without molds", in: *Architecture <in computro> – Proceedings of the 26th eCAADe Conference*: 477–484.
- Schindler, C., Salmerón Espinosa, M. (2011): "ZipShape Mouldless Bending II – A shift from geometry to experience", in: *Respecting Fragile Places – Proceedings of the 29th eCAADe Conference*: 477–484.
- Schindler, C., Tamke, M., et al. (2014): "Processing Branches: Reactivation the Performativity of Natural Wooden Form With Contemporary Information Technology", in: *International Journal of Architectural Computing* 12(2): 101–115.
- Schüler, S., Grabner, M., et al. (2013): "Fichte – fit für den Klimawandel?", in: *BFW-Praxisinformation* 31: 10–12.
- Seike, K. (1977): *The Art of Japanese Joinery*, Boston: Weatherhill.
- Senatore, G., Piker, D. (2015): "Interactive real-time physics: An intuitive approach to form-finding and structural analysis for design and education", in: *Computer-Aided Design* 61: 32–41.
- Shigo, A. L. (1986): *A New Tree Biology*, Durham, New Hampshire: Shigo and Trees Associates.
- Shigo, A. L. (1985): "How tree branches are attached to trunks", in: *Canadian Journal of Biology* 63: 1391–1401.
- Spindler, K. (1995): "Wooden handle of the copper axe used by the neolithic hunter Oetzi 5,000 years ago", in: Spindler, K.: *Der Mann im Eis*, München: Goldmann.
- Stevens, W. C. (2006): *Solid and Laminated Wood Bending*, reprint from the 1952 edition, Amsterdam: Fredonia Books.
- Thompson, R. (2013): *Sustainable Materials, Processes and Production*, London: Thames & Hudson.
- Weinand, Y. (2016): *Advanced Timber Structures*, Basel: Birkhäuser.
- Zwerger, K. (2012a): *Das Holz und seine Verbindungen: Traditionelle Bautechniken in Europa, Japan und China*, Basel: Birkhäuser.
- Zwerger, K. (2012b): *Wood and Wood Joints – Building Traditions in Europe, Japan and China*, Basel: Birkhäuser.

[3.0] REFLECTIONS AND SPECULATIONS / REXFLEXIONEN UND SPEKULATIONEN

- Alaimo, S., Hekman, S. (eds.) (2009): *Material Feminisms*, Bloomington: Indiana University Press.
- Barad, K. (2007): *Meeting the Universe Halfway*, Durham, NC: Duke University Press.
- Baudrillard, J. (1978): *Agonie des Realen*, Berlin: Merve.

- Borasi, G. (2010): *Journeys: How Travelling Fruit, Ideas and Buildings Rearrange Our Environment*, Montreal: CCA; Barcelona: Actar.
- Buchli, V. (ed.) (2002): *The Material Culture Reader*, London: Routledge.
- Butler, J. (1995): *Körper von Gewicht. Die diskursiven Grenzen des Geschlechts*. Berlin: Suhrkamp (Original version: *Bodies That Matter. On the Discursive Limits of "Sex"*, New York, London: Routledge 1993).
- Butler, J. (1990): *Das Unbehagen der Geschlechter*, Frankfurt am Main: Suhrkamp.
- Coole, D., Frost, S. (eds.) (2010): *New Materialisms: Ontology, Agency, and Politics*, Durham, NC: Duke University Press.
- Deleuze, G. (1988): *Spinoza: Practical Philosophy*, trans. Robert Hurley, San Francisco: City Lights.
- Deleuze, G., Guattari, F. (1987): *A Thousand Plateaus: Capitalism and Schizophrenia*, trans. Brian Massumi, Minneapolis: University of Minnesota Press.
- Didi-Huberman, G. (1999): *Die Ordnung des Materials (Vorträge aus dem Warburg-Haus 3)*, Berlin: Akademie-Verlag.
- Dolphijn, R., van der Tuin, I. (eds.) (2012): *New Materialism: Interviews and Cartographies*, Ann Arbor, MI: Open Humanities Press, University of Michigan Library.
- Frichot, H. (2019): *Dirty Theory: Troubling Architecture*, Baunach: Spurbuchverlag.
- Frichot, H. (2016): *How to Make Yourself a Feminist Design Power Tool*, Baunach: Spurbuchverlag.
- Friedlaender, S. (1918): *Schöpferische Indifferenz*, München: G. Müller.
- Gibson-Graham, J. K. (2011): "A feminist project of belonging for the anthropocene", in: *Gender, Place & Culture* 18(1): 1–21.
- Graves-Brown, P. (2000): *Matter, Materiality and Modern Culture*, London: Routledge.
- Gumbrecht, H. U., Pfeiffer, K. L. (1994): *Materialities of Communication*, Stanford, CA: Stanford University Press.
- Haraway, D. (2016): *Staying with the Trouble: Making Kin in the Chthulucene*, Durham, NC: Duke University Press.
- Heidegger, M. (1950): *Holzwege*, Frankfurt am Main: Klostermann.
- Hutton, J. (2020): *Reciprocal Landscapes: Stories of Material Movements*, London: Routledge.
- Ingold, T. (2007): "Materials against materiality", in: *Archaeological Dialogues* 14: 1–16.
- Kahneman, D. (2011): *Thinking Fast and Slow*, New York. NY: Farrar, Straus and Giroux.
- Knappett, C. (2014): "Materiality", in: Ian Hodder (ed.): *Archaeological Theory Today*, Hoboken: Wiley: 188–207.
- Knappett, C. (2005): *Thinking through Material Culture: An Interdisciplinary Perspective*, Philadelphia: University of Pennsylvania Press.
- Lefebvre, P. (2018): "'What the Wood wants to do': Pragmatist Speculations on a Responseable Architectural Practice", in: Doucet, I., Frichot, H. (eds.): *Resist, Reclaim, Speculate: Situated Perspectives on Architecture and the City*, special edition, *Architectural Theory Review* 22(1): 24–41.
- Leopold, H. (2009): *Globalisierung und integrales Bewusstsein. Der Beitrag Jean Gebser's zu einer neuen Weltsicht*, Neukirchen: Novalis Verlag.
- Lieb, L. (ed.) (2015): *Materiale Textkulturen 1*, Berlin: de Gruyter.
- Lloyd Thomas, K. (ed.) (2007): *Material Matters: Architecture and Material Practice*, London: Routledge.
- Mersch, D. (2002): *Was sich zeigt. Materialität, Präsenz, Ereignis*. Paderborn: Fink.

- Rawes, P. (ed.) (2013): *Relational Architectural Ecologies*, London: Routledge.
- Samida, S., Eggert, M. K. H., Hahn, H. P. (eds.) (2014): *Handbuch Materielle Kultur: Bedeutungen – Konzepte – Disziplinen*, Stuttgart/Weimar: Metzler.
- Sanders, J. T. (1993): "Merleau-Ponty, Gibson and the materiality of meaning", in: *Man and World* 26(3): 287–302.
- Singer, W., Ricard, M. (2008): *Hirnforschung und Meditation. Ein Dialog*, Berlin: Suhrkamp.
- Sloterdijk, P. (2019): "Licht und Widerstand. Über Materie", in: Heibach, C., Rohde, C. (eds.): *Ästhetik der Materialität*, Paderborn: Fink: 31–52.
- Trüby, S. (2019): "Antenne und Bunker. Zur Ästhetik der Immaterialität", in: Heibach, C., Rohde, C. (eds.): *Ästhetik der Materialität*, Paderborn: Fink: 79–96.
- Varela, F. J. (1999): *Ethical Know-How: Action, Wisdom and Cognition*, Stanford, CA: Stanford University Press.
- Wagner, M. (2001): "Material", in: Barck, K., Fontius, M., et al. (eds.): *Ästhetische Grundbegriffe. Historisches Wörterbuch in sieben Bänden*, Stuttgart/Weimar: Metzler: vol. 3, 866–882.
- Welsch, N., Schwab, J., Liebmann, C. (2013): *Materie: Erde, Wasser, Luft und Feuer*, Berlin/Heidelberg: Springer.

[4.0] A COMPLEMENTARY APPROACH / ERGÄNZENDER ANSATZ

- Ludwig, F. (2012): *Botanische Grundlagen der Baubotanik und deren Anwendung im Entwurf*, doctoral thesis, Universität Stuttgart.
- Ludwig, F. (2016): "Baubotanik: Designing with living material", in: Löschke, S. K. (ed.): *Materiality and Architecture*, London: Routledge.
- Ludwig, F., de Bruyn, G., et al. (2009): "Plant stems as building material for living plant constructions", in: *Proceedings of the 6th Plant Biomechanics Conference, Cayenne, French Guyana, France*, 398–405.
- Ludwig, F., Middleton, W. (2018): "Growing bridges", in: Grüntuch-Ernst, A. (ed.): *Hortitecture – The Power of Architecture and Plants*, Berlin: Jovis: 176–183.
- Ludwig, F., Middleton, W., et al. (2019a): "Living bridges using aerial roots of *Ficus elastica* – An interdisciplinary perspective", in: *Scientific Reports* 9(1): 1–11.
- Ludwig, F., Middleton, W., et al. (2019b): "Baubotanik: Living wood and organic joints", in: Hudert, M., Pfeiffer, S. (eds.): *Rethinking Wood: Future Dimensions of Timber Assembly*, Basel: Birkhäuser: 262–275.
- Ludwig, F., Schönle, D., et al. (2016): "Baubotanik: Building architecture with nature", in: *Online Journal Biotope City*.
- Ludwig, F., Storz, O., et al. (2012): "Living systems: Designing growth in Baubotanik", in: *Architectural Design Journal* 82(2): 82–87.
- Ludwig, F., Storz, O. (2005): "Baubotanik – Mit lebenden Pflanzen konstruieren", in: *Baumeister, Zeitschrift für Architektur* 11(2005): 72–75.
- Middleton, W., Habibi, A., et al. (2020): "Characterizing regenerative aspects of living root bridges", in: *Sustainability* 12(8): 3267.

BIOGRAPHIES

BIOGRAFIEN

► *Conceptual Joining* Team:

From left to right:

Lukas Allner, Philipp Reinsberg, Mechthild Weber, Daniela Kröhnert and Christoph Kaltenbrunner
at the *Conceptual Joining* show at AIL 2019.

Photo © Zara Pfeifer



Space Frame Demonstrator
beech branches, Ø 5-15cm
augmented reality
2019

track this

PROJECT LEAD:

CHRISTOPH KALTENBRUNNER:

Christoph Kaltenbrunner has been head of the Department of Design, Architecture and Environment (DAE) of the Institute of Art Sciences and Art Education at University of Applied Arts Vienna since 2014. He studied mechanical engineering, technical physics, product design and architecture. He received several scholarships to study in Japan, England and the USA. In 1994 he co-founded the internationally known award-winning architecture studio propeller z in Vienna, which he left in 2013 to fully concentrate on research and education. Besides numerous teaching activities including exhibitions, workshops and lecture events, he is responsible for the development of the Bachelor-Master curriculum for the teaching professions at the Angewandte. He was project leader of *Conceptual Joining*.

Seit 2014 ist Christoph Kaltenbrunner Leiter der Abteilung Design, Architektur und Environment für Kunstpädagogik (DAE) des Instituts für Kunstwissenschaft und Kunstpädagogik an der Universität für angewandte Kunst Wien. Er studierte Maschinenbau, Technische Physik, Produktdesign und Architektur. Er erhielt mehrere Stipendien für Studienaufenthalte in Japan, England und den USA. 1994 war er Mitbegründer des international bekannten und preisgekrönten Architekturbüros propeller z in Wien, das er 2013 verließ, um sich ganz auf Forschung und Lehre zu konzentrieren. Neben zahlreichen Lehrtätigkeiten einschließlich Ausstellungen, Workshops und Vortagsveranstaltungen ist er für die Entwicklung des Bachelor-Master Curriculums für die Lehrberufe an der Angewandten verantwortlich. Er war Projektleiter bei *Conceptual Joining*.

RESEARCH TEAM:

LUKAS ALLNER:

Lukas Allner studied Architecture at the Academy of Fine Arts Stuttgart and at the University of Applied Arts Vienna, graduating from Studio Prix in 2010 with distinction. He received the MAK-Schindler scholarship and the TISCHE grant. He obtained a wide range of experiences in the fields of architecture and design working independently and with international firms. With some years of experience at different universities across Europe, he is currently teaching at the University of Innsbruck and at the Angewandte with a focus on experimental construction and circular design. He was part of the research team at *Conceptual Joining*.

Lukas Allner studierte Architektur an der Akademie der Bildenden Künste Stuttgart und an der Universität für angewandte Kunst Wien und schloss sein Studium 2010 im Studio Prix mit Auszeichnung ab. Er erhielt das MAK-Schindler-Stipendium und das TISCHE-Stipendium. Er sammelte vielfältige Erfahrungen in den Bereichen Architektur und Design, sowohl in der freien Wirtschaft als auch bei internationalen Firmen. Nach einigen Jahren Erfahrung an verschiedenen Universitäten in Europa lehrt er derzeit an der Universität Innsbruck und an der Angewandten mit den Schwerpunkten experimentelles Bauen und Circular Design. Er war Teil des Forschungsteams bei *Conceptual Joining*.

DANIELA KRÖHNERT:

Daniela Kröhnert is an architectural researcher and artist specializing in digital fabrication. She studied architecture at the Karlsruhe Institute of Technology (KIT) in Germany and graduated with distinction from the University of Applied Arts Vienna at Studio Prix in 2011. She gained professional experience as a design architect at COOP HIMMELB(L)AU, working on international projects.

Daniela Kröhnert ist Architekturforscherin und Künstlerin mit Spezialisierung auf digitale Fabrikation. Sie studierte Architektur am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) in Deutschland und schloss ihr Studium an der Universität für angewandte Kunst Wien im Studio Prix 2011 mit Auszeichnung ab. Berufserfahrung sammelte sie als Designarchitektin bei COOP HIMMELB(L)AU,

She taught digital design at the Technical University of Nuremberg and is currently teaching at the Angewandte and is responsible for the Digital Design and Production Lab. She was part of the research team at *Conceptual Joining*.

PHILIPP REINSBERG:

Philipp Reinsberg is an architect and carpenter working on the interface of applied and digital craftsmanship. He studied architecture and industrial design at the University of Applied Arts Vienna, but started his career as a carpenter in Germany, with a company specialized in cultural heritage, restoring wooden objects and structures. He gained international experience on different interdisciplinary and intercultural projects. Since 2016, he has been working for United Nations Industrial Development Organization as an expert in wood technology and design and he is currently teaching at the Institute of Art Sciences and Art Education at the Angewandte. He was part of the research team at *Conceptual Joining*.

MECHTHILD WEBER:

Mechthild Weber studied architecture at the Academy of Fine Arts Stuttgart and at the Academy of Fine Arts Vienna. She received the MAK-Schindler scholarship and gained experience in stage design and architectural practices. Since 2010 she has been working with Querkraft architects in Vienna on a wide range of projects in multiple scales throughout all planning phases. She was part of the research team at *Conceptual Joining*.

wo sie an internationalen Projekten arbeitete. Sie lehrte Digitales Design an der Technischen Hochschule Nürnberg und unterrichtet derzeit an der Angewandten als Teil des Leitungsteams des Digital Design and Production Lab. Sie war Teil des Forschungsteams bei *Conceptual Joining*.

Philipp Reinsberg ist ein Architekt und Zimmermann und arbeitet an der Schnittstelle von angewandtem und digitalem Handwerk. Er studierte Architektur und Industriedesign an der Universität für angewandte Kunst Wien, begann aber seine Karriere als Zimmermann in Deutschland in einem auf Denkmalpflege spezialisierten Unternehmen. Internationale Erfahrungen sammelte er in verschiedenen interdisziplinären und interkulturellen Projekten. Seit 2016 arbeitet er für die Organisation der Vereinten Nationen für industrielle Entwicklung als Experte für Holztechnologie und Design und lehrt derzeit am Institut für Kunstwissenschaft und Kunstpädagogik an der Angewandten. Er war Teil des Forschungsteams bei *Conceptual Joining*.

Mechthild Weber studierte Architektur an der Akademie der Bildenden Künste Stuttgart und an der Akademie der bildenden Künste Wien. Sie erhielt das MAK-Schindler-Stipendium und sammelte Erfahrungen im Bühnenbild und in verschiedenen Architekturbüros. Seit 2010 arbeitet sie mit Querkraft Architekten in Wien an einer Vielzahl von Projekten in verschiedenen Maßstäben über alle Planungsphasen hinweg. Sie war Teil des Forschungsteams bei *Conceptual Joining*.

MENTORS:

ANJA JONKHANS:

Anja Jonkhans is an architect teaching at the University of Applied Arts Vienna. She received her Diploma and Masters degree in architecture from the Bartlett School of Architecture (UCL), London, where she was awarded several scholarships. Having worked for - amongst others – Alsop Architects and Grimshaw Architects in London, she was a founding partner of Spacelab/UK with Peter Cook, Colin Fournier and Niels Jonkhans for the design and realization of the Kunsthau Graz museum. Before teaching at the Angewandte she held a position as an assistant professor at the TU Graz. Her teaching and research subjects are in the field of building construction and drafting techniques. She supported *Conceptual Joining* as a mentor.

Anja Jonkhans ist Architektin und lehrt an der Universität für angewandte Kunst Wien. Sie erwarb ihr Diplom und ihren Master-Abschluss in Architektur an der Bartlett School of Architecture (UCL) in London, wo sie mehrere Stipendien erhielt. Sie hat unter anderem für Alsop Architects und Grimshaw Architects in London gearbeitet und war Gründungspartnerin von Spacelab/UK mit Peter Cook, Colin Fournier und Niels Jonkhans für die Planung und Umsetzung des Kunsthau Graz. Vor ihrer Lehrtätigkeit an der Angewandten hatte sie eine Stelle als Assistentenprofessorin an der TU Graz inne. Ihre Lehr- und Forschungsthemen liegen im Bereich der Baukonstruktion und Entwurfstechnik. Sie unterstützte *Conceptual Joining* als Mentorin.

CLEMENS PREISINGER:

Clemens Preisinger is a structural engineer and researcher. He started his career as a researcher at the Institute for Structural Concrete at the Technical University Vienna. Since 2008 Clemens has been working for the structural engineering company Bollinger+Grohmann. During that time he contributed to several research projects at the University of Applied Arts Vienna. There he currently heads the 'Digital Simulation' department. Since 2010 Clemens has been developing the parametric, interactive Finite Element program Karamba3d as a freelancer. He holds a PhD in structural engineering from the Technical University Vienna and he supported *Conceptual Joining* as a mentor.

Clemens Preisinger ist Bauingenieur und Forscher. Er begann seine Karriere als Forscher am Institut für Konstruktiven Beton der Technischen Universität Wien. Seit 2008 arbeitet Clemens Preisinger für das Tragwerksplanungsbüro Bollinger+Grohmann. Während dieser Zeit hat er an mehreren Forschungsprojekten an der Universität für angewandte Kunst Wien mitgearbeitet. Dort leitet er derzeit die Abteilung 'Digitale Simulation'. Seit 2010 entwickelt Preisinger als freier Mitarbeiter das parametrische, interaktive Finite-Elemente-Programm Karamba3d. Er hat an der Technischen Universität Wien in Bauingenieurwesen promoviert und unterstützte *Conceptual Joining* als Mentor.

KARIN RAITH:

Karin Raith is professor for the Building Construction department at the University of Applied Arts Vienna. She researches, teaches and publishes on landscape history and theory, especially on cultural aspects of the relationship between architecture and landscape. She has had longstanding teaching assignments on this topic at the Vienna University of Technology and University of Natural Resources and Applied Life Sciences Vienna, and has lectured internationally. She is the author of *The Underside of Architecture* (Springer 2006), co-author of *Ernst HiesMayr – Simple Houses; Cultures of Landscape*;

Karin Raith ist Professorin für Baukonstruktion an der Universität für angewandte Kunst Wien. Sie forscht, lehrt und publiziert zu Landschaftsgeschichte und -theorie und vor allem zu kulturellen Aspekten der Beziehung zwischen Architektur und Landschaft. Sie hatte langjährige Lehraufträge zu diesem Thema an der TU Wien und der Universität für Bodenkultur Wien und hielt internationale Vorträge. Sie ist Autorin von *Die Unterseite der Architektur* (Springer 2006), Mitautorin von u.a. *Ernst HiesMayr – einfache Häuser; Kulturen der Landschaft; Vieldeutige Natur* (Transcript 2009); *Urban*

Ambiguous Nature (Transcript 2009); *Urban Change in Iran* (Springer 2016) and *Urban Heritage Along the Silk Roads* (Springer 2019), among others. She supported *Conceptual Joining* as a mentor.

Change in Iran (Springer 2016) und *Urban Heritage Along the Silk Roads* (Springer 2019). Sie unterstützt *Conceptual Joining* als Mentorin.

GUEST ESSAYS:

GERALD BAST:

Gerald Bast studied law and received his doctorate at the Johannes Kepler University Linz, since 2000 he has been the Rector of the University of Applied Arts Vienna.

Member of the pool of experts of the Institutional Evaluation Program of the European University Association (EUA), editor of the book series *ARIS – Art, Research, Innovation and Society* published by Springer International Publishing (together with Elias Carayannis) and member of the Board of Trustees of the European Forum Alpbach. He has written numerous publications on university law and university management as well as art and cultural policy.

Gerald Bast, Studium der Rechtswissenschaften und Promotion an der Johannes Kepler Universität Linz ist seit 2000 Rektor der Universität für angewandte Kunst Wien; Mitglied im Pool of Experts des Institutional Evaluation Program der Europäischen University Association (EUA), Herausgeber der Buchreihe *ARIS – Art, Research, Innovation and Society* bei Springer International Publishing (gemeinsam mit Elias Carayannis) und Kuratoriumsmitglied des Europäischen Forum Alpbach. Zahlreiche Veröffentlichungen zu den Themen Universitätsrecht und Universitätsmanagement sowie Kunst- und Kulturpolitik.

BRIGITTE FELDERER:

Brigitte Felderer has been head of the interdisciplinary master's program Social Design-Arts as Urban Innovation at the University of Applied Arts Vienna since 2012 and has realized numerous exhibition projects and publications in the fields of media and cultural history. In her projects as well as in her teaching she pursues transdisciplinary and cross-thematic issues, deals with aspects of everyday culture as well as artistic possibilities and methods of responding to current social challenges and developing innovative solutions.

Brigitte Felderer leitet seit 2012 das interdisziplinäre Masterstudium „Social Design-Arts as Urban Innovation“ an der Universität für angewandte Kunst Wien und hat zahlreiche medien- und kulturhistorische Ausstellungsprojekte und Publikationen realisiert. In ihren Projekten wie in ihrer Lehre verfolgt sie transdisziplinäre und themenübergreifende Fragestellungen, beschäftigt sich mit Aspekten der Alltagskultur sowie mit künstlerischen Möglichkeiten und Methoden, auf aktuelle gesellschaftliche Herausforderungen zu reagieren und innovative Lösungen zu entwickeln.

HÉLÈNE FRICHOT:

Hélène Frichot is Professor of Architecture and Philosophy, and Director of the Bachelor of Design, Faculty of Architecture at the Building and Planning University of Melbourne, Australia. She is a guest professor, and the former Director of Critical Studies in Architecture at the School of Architecture, KTH Stockholm, Sweden. Her recent publications include *Dirty Theory: Troubling Architecture* (AADR 2019), *Creative Ecologies: Theorizing the Practice of Architecture* (Bloomsbury 2018),

Hélène Frichot ist Professorin für Architektur und Philosophie und Leiterin des Bachelor-Studiengangs Design an der Fakultät für Architektur, Bau und Planung der Universität Melbourne, Australien. Sie ist Gastprofessorin und frühere Direktorin der Critical Studies in Architecture, School of Architecture, KTH Stockholm, Schweden. Zu ihren jüngsten Veröffentlichungen gehören *Dirty Theory: Troubling Architecture* (AADR 2019), *Creative Ecologies: Theorizing the Practice of Architecture*

How to Make Yourself a Feminist Design Power Tool (2016). Recently edited collections include: with Naomi Stead, *Writing Architectures: Ficto-Critical Approaches* (Bloomsbury 2020); with Marco Jobst, *Architectural Affects After Deleuze and Guattari* (Routledge 2021).

(Bloomsbury 2018), *How to Make Yourself a Feminist Design Power Tool* (2016). Zu den jüngsten Sammelbänden gehören: mit Naomi Stead, *Writing Architectures: Ficto-Critical Approaches* (Bloomsbury 2020); mit Marco Jobst, *Architectural Affects After Deleuze and Guattari* (Routledge 2021).

MORITZ HEIMRATH:

Moritz Heimrath studied at the Academy of Fine Arts in Stuttgart and graduated from the University of Applied Arts Vienna in 2010. He is currently a partner at Bollinger+Grohmann ZT GmbH and part of the developer team of *Karamba3D*, an interactive parametric finite-element plugin for *Grasshopper*. His research focuses on the relationship between structure, computational strategies and aesthetic architectural concepts. Heimrath is teaching the implementation of digital design strategies at the Institute of Technology GSO in Nuremberg, Germany and digital analysis and simulation at the Academy of Fine Arts, Vienna. In 2012 he received the MAK Schindler Scholarship from the Ministry of Arts, Culture and Education of Austria.

Moritz Heimrath studierte an der Akademie der Bildenden Künste in Stuttgart und schloss sein Studium an der Universität für angewandte Kunst Wien im Jahr 2010 ab. Derzeit ist er Partner bei Bollinger+Grohmann ZT GmbH und Teil des Entwickler-teams von *Karamba3d*, einem interaktiven parametrischen Finite-Elemente-Plugin für *Grasshopper*. Seine Forschung konzentriert sich auf die Beziehung zwischen Struktur, Berechnungsstrategien und ästhetischen Architekturkonzepten. Heimrath lehrt die Umsetzung digitaler Entwurfsstrategien am Institut für Technologie GSO in Nürnberg und digitale Analyse und Simulation an der Akademie der bildenden Künste Wien. 2012 erhielt er das MAK-Schindler-Stipendium des österreichischen Ministeriums für Kunst, Kultur und Bildung.

PHILIPP HORNUNG:

Philipp Hornung studied architecture at the Georg-Simon-Ohm University in Nuremberg, and the University of Applied Arts Vienna at the master class of Zaha Hadid where he received his degree with distinction. He gained experience at numerous international renowned architectural offices such as Graft Architects, Allmann Sattler Wappner and COOP HIMMELB(L)AU. He has been a research assistant for the arts-based research project *Robotic Woodcraft* at the Angewandte. Philipp Hornung is associate and lead developer for robotics/code at *Print A Drink*. Since 2017 he has been running the ARL – Angewandte Robotics Lab for creative robotics at the Angewandte.

Philipp Hornung studierte Architektur an der Georg-Simon-Ohm-Hochschule in Nürnberg und an der Universität für angewandte Kunst Wien in der Meisterklasse von Zaha Hadid, wo er seinen Abschluss mit Auszeichnung erhielt. Er sammelte Erfahrungen in zahlreichen international renommierten Architekturbüros wie Graft Architekten, Allmann Sattler Wappner und COOP HIMMELB(L)AU. Er war wissenschaftlicher Mitarbeiter im künstlerischen Forschungsprojekt *Robotic Woodcraft* an der Angewandten. Philipp Hornung ist Associate und Lead Developer für Robotik/Code bei *Print A Drink*. Seit 2017 leitet er das ARL – Angewandte Robotics Lab für kreative Robotik an der Angewandten.

HELGA LICHTENEGGER:

Helga Lichtenegger holds a PhD in physics and is Professor of Applied Physics and Biomaterial Sciences at BOKU. She is the head of the Institute of Physics and Materials Science (IPM) and deputy head of the Department of Material Sciences and Process Engineering (MAP) at the University

Helga Lichtenegger ist Doktorin in Physik und Professorin für Angewandte Physik und Biomaterialwissenschaften. Sie leitet das Institut für Physik und Materialwissenschaft (IPM) und stellvertretend das Department für Materialwissenschaften und Prozesstechnik (MAP) an der Uni-

of Natural Resources and Life Sciences Vienna (BOKU). She is also a private lecturer at the Vienna University of Technology for Building Principles of Biological Materials. She researches, teaches and publishes in the fields of solid state physics, materials physics, biophysics, ultrastructure research, composites, materials testing, nanomaterials and bionics. Furthermore she is currently on the Scientific Advisory Board of ESRF (The European Synchrotron) and the Technical Scientific Advisory Board at Helmholtz Zentrum Geesthacht.

versität für Bodenkultur Wien (BOKU). Zudem ist sie Privatdozentin an der Technischen Universität Wien für Bauprinzipien biologischer Materialien. Sie forscht, lehrt und publiziert in den Bereichen Festkörperphysik, Materialphysik, Biophysik, Ultrastrukturforschung, Verbundwerkstoffe, Werkstoffprüfung, Nanomaterialien und Bionik; zudem ist sie momentan im Wissenschaftlichen Beirat der ESRF (The European Synchrotron) und technisch wissenschaftliche Beirätin im Helmholtz Zentrum Geesthacht.

FERDINAND LUDWIG:

Ferdinand Ludwig is professor for Green Technologies in Landscape Architecture and head of the Research Group Baubotanik at Technical University of Munich. At the cutting edge of design, natural sciences and engineering, his work centers on architectural concepts in which plants play a central role, thereby broadening architectural knowledge by confronting aspects of growth and decay, probability and chance. He is a partner at the office "ludwig.schönle" and has designed and created numerous projects, such as *Plane-Tree-Cube* in 2012, *Baubotanik Tower* in 2009, and *Baubotanik Footbridge* in 2005.

Ferdinand Ludwig ist Professor für Green Technologies in Landscape Architecture und Leiter des Forschungsgebiets Baubotanik an der Technischen Universität München. An der Schnittstelle von Entwurf, Natur- und Ingenieurwissenschaften beschäftigt er sich mit architektonischen Konzepten, in denen Pflanzen eine zentrale Rolle spielen, und erweitert so das architektonische Wissen durch die Auseinandersetzung mit Aspekten von Wachstum und Verfall, Wahrscheinlichkeit und Zufall. Er ist Partner im Büro „ludwig.schönle“ und hat zahlreiche Projekte entworfen und realisiert, wie z. B. den *Platanenkubus* 2012, den *Baubotanischen Turm* 2009 und den *Baubotanischen Steg* 2005.

ULRICH MÜLLER:

Ulrich Müller was a key researcher at BOKU and later led the research area "Wood Materials Technologies" at the *Wood K plus* Competence Center, Linz. In 2008 he received tenure at BOKU in the field of wood technology and since 2013 he has been a research associate at the Institute of Wood Technology and Renewable Resources. Since 2014, he has been working on the topic of "wood in vehicle construction" and leads the project *WoodC.A.R.* (Wood – computer aided research). In addition to his otherwise more application-oriented projects, biological structures such as the stem-branch connection are among the research areas that he has been working on a scientific level for years.

Ulrich Müller war nach Tätigkeit in der Holzindustrie als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der BOKU tätig und leitete später den Forschungsbereich „Wood Materials Technologies“ am Kompetenzzentrum *Wood K plus*, Linz. Im Jahr 2008 habilitierte er sich an der BOKU im Bereich Holztechnologie und ist seit 2013 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Holztechnologie und Nachwachsende Rohstoffe. Seit 2014 beschäftigt er sich mit dem Thema „Holz im Fahrzeugbau“ und leitet das Projekt *WoodC.A.R.* (Wood – computer aided research). Neben seinen sonst eher anwendungsorientierten Projekten gehören biologische Strukturen wie die Stamm-Ast-Verbindung zu den Forschungsgebieten, die er seit Jahren auf wissenschaftlicher Ebene bearbeitet.

ADAM ORLINSKI:

Adam Orlinski studied architecture at the University of Applied Arts Vienna at Studio Prix, and graduated in 2011 with the Honorary Prize

Adam Orlinski studierte Architektur an der Universität für angewandte Kunst Wien im Studio Prix, und schloss 2011 mit dem Ehrenpreis des

of the Austrian Ministry of Science and Research. He is currently working at Bollinger+Grohmann ZT GmbH and is part of the developer team of *Karamba3D*, an interactive parametric finite-element plugin for *Grasshopper*. In both his professional and academic work, his research focuses on interdisciplinary digital design strategies and their possible fabrication methods in the context of structural design.

HANNELORE PAFLIK-HUBER:

Hannelore Paflik-Huber studied in mathematics, European and East Asian art history, and ethnology. Her doctorate thesis was on "Models of Time. Artistic positions of contemporary art." She was an assistant on the exhibition *Time – The Fourth Dimension*, among others in Brussels, Vienna, Lyon and London. In 1986 she founded the journal *FrauenKunstWissenschaft*. She was a teaching assistant at the University of Heidelberg and received a scholarship from the Bund für Wissenschaftlerinnen in der Forschung. Since the 1990s she has lectured on contemporary art, video art and aesthetics at art academies and art history institutes. Recent book projects: *Presence or Infinity – Visualization of Time in Contemporary Art*; *Walter De Maria, Vertical Earth Kilometer*.

JUN SATO:

Jun Sato is an associate professor at University of Tokyo and head of Jun Sato Structural Engineers Co., Ltd., Tokyo, Japan. In his academic work and practice, in collaboration with architects such as Kengo Kuma, Riken Yamamoto, Toyo Ito, Sou Fujimoto and Junya Ishigami, he focuses on morphogenetic forms based on geometry, materials, dynamics, craftsmanship, site matters and the spirit of engineering.

He worked at Toshihiko Kimura's engineering office from 1995 to 1999 and received the Japan Structural Design Award in 2009.

KAROLIN SCHMIDBAUR:

Karolin Schmidbaur studied architecture at the Technical University of Munich, Germany. Since 1992, she has practiced architecture internationally at COOP HIMMELB(L)AU in Vienna, Austria, in Los Angeles, California, and Guadalajara, México.

österreichischen Ministeriums für Wissenschaft und Forschung ab. Derzeit arbeitet er bei Bollinger+Grohmann ZT GmbH und ist Teil des Entwicklerteams von *Karamba3d*, einem interaktiven parametrischen Finite-Elemente-Plugin für *Grasshopper*. Sowohl in seiner beruflichen als auch in seiner akademischen Arbeit konzentriert sich seine Forschung auf interdisziplinäre digitale Entwurfsstrategien und deren mögliche Herstellungsmethoden im Kontext des strukturellen Entwurfs.

Studium der Mathematik, Europäischen und Ostasiatischen Kunstgeschichte und Ethnologie. Promotion: *Modelle der Zeit. Künstlerische Positionen der Gegenwartskunst*. Assistenz der Ausstellung *Zeit – Die Vierte Dimension* u.a. in Brüssel, Wien, Lyon und London. 1986 Gründung der Zeitschrift *FrauenKunstWissenschaft*. Assistentin an der Universität Heidelberg. Stipendium vom Bund für Wissenschaftlerinnen in der Forschung. Seit den 1990ern Dozentin für zeitgenössische Kunst, Videokunst und Ästhetik an Kunsthakademien und Kunsthistorischen Instituten. Aktuelle Buchprojekte: *Gegenwart oder Unendlichkeit – Visualisierung von Zeit in der Gegenwartskunst*; *Walter De Maria, Vertikaler Erdkilometer*.

Jun Sato ist außerordentlicher Professor an der Universität Tokio und Leiter von Jun Sato Structural Engineers Ltd. in Tokio, Japan. In seiner akademischen Arbeit und seiner Praxis in Zusammenarbeit mit Architekten wie Kengo Kuma, Riken Yamamoto, Toyo Ito, Sou Fujimoto und Junya Ishigami konzentriert er sich auf morphogenetische Formen, die auf Geometrie, Materialien, Dynamik, Handwerkskunst, Standortfragen und dem Geist der Technik basieren.

Er arbeitete von 1995 bis 1999 im Ingenieurbüro von Toshihiko Kimura und wurde 2009 mit dem Japan Structural Design Award ausgezeichnet.

Karolin Schmidbaur studierte Architektur an der Technischen Universität in München, Deutschland. Seit 1992 internationales Architekturbüro bei COOP HIMMELB(L)AU in Wien, Österreich, Los Angeles, Kalifornien, und Guadalajara, Mexiko.

From 2003 to 2017, she was the Director of COOP HIMMELB(L)AU Los Angeles. Since 2009, she has been Partner and Head of Research of the firm. Since 2017, she has been a professor at the Institute of Experimental Architecture, Building Construction and Technology at the University of Innsbruck. She was a design studio instructor at the University of Southern California (1997–1998), the Southern California Institute of Architecture (SCI-Arc, 1998–1999, 2014) and the Urban Strategies Program at the University of Applied Arts Vienna (2010–2012).

2003–2017 Direktorin von COOP HIMMELB(L)AU Los Angeles. Seit 2009 Partnerin und Leiterin der Forschungsabteilung des Büros. Seit 2017 Professorin am Institut für experimentelle Architektur, Baukonstruktion und Technologie an der Universität Innsbruck. Zuvor Lehrbeauftragte für Designstudios an der University of Southern California (1997–1998), am Southern California Institute of Architecture (SCI-Arc, 1998–1999, 2014) und am Urban Strategies Program an der Universität für angewandte Kunst Wien (2010–2012).

ALFRED TEISCHINGER:

Alfred Teischinger was a full professor for wood technology at BOKU from 2000 - 2019. As the scientific director of *Wood K plus*, Competence Centre for Wood Composites and Wood Chemistry from 2001-2015, he was responsible for the strategic direction and scientific development. He is still active in various wood technology-related national and international committees and research boards. He has (co-)authored about 500 scientific and technical papers, reports and book chapters, and is currently editing a book on wood science and technology featuring about 50 contributing authors from all over the world.

Alfred Teischinger war seit 2000 Universitätsprofessor für Technologie des Holzes an der BOKU Wien bis zur Pensionierung 2019. Von 2001 bis 2015 wissenschaftlicher Leiter des neu aufzubauenden Kompetenzzentrums für Holzverbundwerkstoffe und Holzchemie, *Wood K plus*. Er war und ist Mitglied in verschiedensten nationalen und internationalen Gremien und Beiräten im Bereich der Holztechnologie. Er ist (Co-)Autor von ca. 500 wissenschaftlichen und technischen Publikationen, Berichten und Buchkapiteln. Derzeit fungiert er als Mitherausgeber eines Buches zur Holzwissenschaft und Holztechnologie mit etwa 50 weltweit mitwirkenden Autor*innen.

KLAUS ZWERGER:

Klaus Zwerger is Associate Professor at TU Wien and Professor at SEU Nanjing as of 2021. Three scholarships at Todai and a guest professorship at Hosei University have provided him ample opportunity to become familiar with Japan. Extensive field research in China, Europe and Southeast Asia have resulted in lecture series, seminars and workshops in China and Europe. He specializes in comparing historic East Asian and European wood building traditions and has published widely on this topic. Following his seminal book *Wood and Wood Joints: Building Traditions in Europe, Japan and China* currently being translated into Chinese, his recent monograph *Cereal Drying Racks. Culture and Typology of Wood Buildings in Europe and East Asia* was published in 2020.

Klaus Zwerger ist ao. Univ.-Prof. an der TU Wien und seit 2021 Professor an der SEU Nanjing. Drei Stipendienaufenthalte an der Todai und eine Gastprofessur an der Hosei Universität ermöglichen einen profunden Einblick in Japan. Ausgedehnte Feldforschungen in China, Europa und Südostasien mündeten in Vorlesungsserien, Seminaren und Workshops in China und Europa. Seine Spezialisierung liegt im Vergleich der historischen Holzarchitektur Europas und Ostasiens. Auf sein grundlegendes Buch *Das Holz und seine Verbindungen: Bautraditionen in Europa, Japan und China*, das zurzeit ins Chinesische übersetzt wird, folgte 2020 die jüngste Monografie *Cereal Drying Racks. Culture and Typology of Wood Buildings in Europe and East Asia*.

ACKNOWLEDGMENTS

DANKSAGUNG

We would like to thank all the experts, institutions and companies involved in this project! The numerous discussions, meetings and support have helped make both this research project and the present book so comprehensive.

In the course of our study tour through the DACH region, we were able to visit the Felder Group in Hallein, the Tyrolean Vocational School for Wood Technology in Absam and the Werkraum Bregenzerwald. In Philipp Reinsberg's training company, the carpentry and joinery Adi Hummel GmbH in Heiligenberg, the Hummel family gave us a warm welcome and showed us their work. We continued via Hans Hundegger AG in Hawangen to Switzerland. There we were welcomed by ETH Zurich – Gramazio Kohler Research and companies like Design-to-Production GmbH in Erlenbach/Zurich and Blumer-Lehmann AG in Gossau.

On the study trip to Japan we were able to meet many great people, and visit exciting institutions and buildings thanks to Professor Klaus Zwerger's contacts and recommendations. Special thanks go to Professor Shigeatsu Shimizu from the Kyoto Institute of Technology, who devoted a lot of time to us and gave us deep insights into the wood culture in and around Kyoto; Gergely Péter Barna spontaneously accompanied us as a local guide and quickly became a new friend; Prof. Kazuyo Sejima warmly welcomed us to her office SANAA and organized various visits to her projects. Further thanks go to Prof. Jun Sato from Tokyo University, who showed us his work and later visited us in Vienna as a collaborator. Special mention should be given to Kanade Nagata, who helped us organize the excursion in advance and accompanied us through Japan with her expert translations and assistance, thus giving us a deeper insight into this fascinating culture. Among others, we met carpenter Keisuke Taguchi in Gero, Gifu, and made a factory visit to Miyagawa-Koki Precutting Machines and Systems in Hanada, Aichi. Also thanks to Miwa Nagasu for organizing the company visit to Shimizu Furniture/ SHMZ, Tokyo.

Wir möchten uns bei allen beteiligten Expert*innen, Institutionen und Firmen sehr herzlich bedanken! Die vielen Gespräche, Treffen und Unterstützungen haben sowohl dieses Forschungsprojekt als auch das vorliegende Buch so umfangreich gemacht.

Im Verlauf unserer Studienreise durch die DACH-Region konnten wir die Firma Felder Group in Hallein, die Tiroler Fachberufsschule für Holztechnik in Absam und den Werkraum Bregenzerwald besuchen. In Philipp Reinsbergs Lehrbetrieb, der Zimmerei und Schreinerei Adi Hummel GmbH in Heiligenberg, hat uns die Familie Hummel herzlichst empfangen und uns ihre Arbeiten gezeigt. Weiter ging es über Hans Hundegger AG in Hawangen in die Schweiz. Dort empfingen uns die ETH Zürich – Gramazio Kohler Research und Firmen wie die Design-to-Production GmbH in Erlenbach/Zürich und die Blumer-Lehmann AG in Gossau.

Auf der Studienreise nach Japan konnten wir dank Professor Klaus Zwergers Kontakten und Empfehlungen viele tolle Menschen, spannende Institutionen und Bauwerke besuchen. Besonderer Dank geht an Professor Shigeatsu Shimizu vom Kyoto Institute of Technology, der sich sehr viel Zeit nahm und uns tiefe Einblicke in die Holzkultur in und rund um Kyoto gab; Gergely Péter Barna hat uns spontan als ortskundiger Reiseführer und schnell als neuer Freund begleitet; Professorin Kazuyo Sejima hat uns herzlich in ihrem Büro SANAA empfangen und diverse Besichtigungen ihrer Projekte organisiert. Weiterer Dank gilt Professor Jun Sato von der Tokyo University, der uns seine Arbeit zeigte und uns dann später in Wien im Rahmen einer Zusammenarbeit besuchte. Besonders hervorzuheben ist Kanade Nagata, die uns bereits im Vorfeld bei der Organisation der Exkursion unterstützte, uns mit ihren fachspezifischen Übersetzungen und Hilfestellungen durch Japan begleitete und somit einen tieferen Einblick in diese faszinierende Kultur gab. Dabei trafen wir unter anderem Zimmermann Keisuke Taguchi in Gero, Gifu, und machten einen Werksbesuch bei Miyagawa-Koki Precutting

Further thanks to all our research and production partners for their support and cooperation: Forester Sandra Tuider for the field trips to her forest to collect branch forks; Florian Fend for his CNC/Hundegger expertise; Kurt Zweifel of proHolz Austria for arranging contacts and collaboration partners several times; Alfred Teischinger and Michael Grabner, BOKU Vienna and Tulln, for their continuous wood expertise; Robert Eibl of Cadworks Austria for their work preparation support for the *Hundegger Robot Solo*; Adam Orlinski and Matthew Tam of Bollinger+Grohmann for their structural expertise; Andrea Rossi and Ben James for their terrific collaboration throughout. The production of the wooden structures would never have turned out so well without the great support of the Landesberufsschule Murau and Philipp Hornung from the Angewandte Robotics Lab. Furthermore, thanks to the many friends, as well as Alexandra Graupner and her team from the AIL, who actively supported us all through the exhibition. And we can't forget the logistics team supporting Ingrid Appel, who mastered the numerous challenging transports of "unusual material" and structures, through all types of weather, with elegance.

For this publication, especially we would firstly like to thank the publisher and in particular Katharina Holas for her careful support, all the contributors, Roswitha Janowski-Fritsch for her help and advice, and of course Caroline Ecker for her sheer endless patience and great graphic design. Furthermore, we would like to thank the copy editors Janima Nam and Fanny Esterházy and the translators Christa Wendl and Mark Wilch, especially for their incredible flexibility and speed.

Further thanks go to the University of Applied Arts Vienna, the Zentrum Fokus Forschung and to all our colleagues who supported us during the process and last but not least to the Austrian Science Fund (FWF), which made this work possible in the first place, and to all those we might have forgotten here.

Machines and Systems in Hanada, Aichi. Ebenso danke an Miwa Nagasu für das Organisieren des Firmenbesuchs bei Shimizu Furniture/SHMZ, Tokio.

Weiterer Dank an alle Forschungs- und Produktionspartner*innen für die Unterstützung und Zusammenarbeit: Forstwirtin Sandra Tuider für die Exkursionen in ihren Wald zum Astgabeln-Sammeln; Florian Fend für seine CNC/Hundegger -Expertise; Kurt Zweifel von proHolz Austria für das mehrmalige Vermitteln von Kontakten und Kollaborationspartner*innen; Alfred Teischinger und Michael Grabner, BOKU Wien und Tulln, für die kontinuierliche Holzexpertise; Robert Eibl von Cadworks Österreich für den Support bei der Arbeitsvorbereitung für die Hundegger Robot solo; Adam Orlinski und Matthew Tam von Bollinger+Grohmann für die statische Expertise; Andrea Rossi und Ben James für die durchwegs tolle Zusammenarbeit. Die Produktion der Holzstrukturen hätte nie so gut geklappt ohne die großartige Unterstützung durch die Landesberufsschule Murau und Philipp Hornung vom Angewandte Robotics Lab. Zudem Dank an die vielen Freunde sowie Alexandra Graupner und ihrem Team vom AIL, die uns alle im Rahmen der Ausstellung tatkräftig unterstützt haben. Nicht zu vergessen das Logistik-Team um Ingrid Appel, das die zahlreichen herausfordernen Transporte an „ungewöhnlichem Material“ und Strukturen bei Wind und Wetter mit Eleganz gemeistert hat.

Für diese Publikation im Speziellen möchten wir uns zuerst beim Verlag und im Besonderen bei Katharina Holas für ihr umsichtiges Engagement bedanken. Weiters bei allen Beitragenden, sowie bei Roswitha Janowski-Fritsch für die Beratung und Hilfe und natürlich Caroline Ecker für ihre schier endlose Geduld und die tolle grafische Gestaltung. Des Weiteren bei den Lektorinnen Janima Nam und Fanny Esterházy und den Übersetzer*innen Christa Wendl und Mark Wilch, im Besonderen für ihre unglaubliche Flexibilität und Schnelligkeit.

Weiterer Dank geht an die Universität für angewandte Kunst Wien, das Zentrum Fokus Forschung und an alle unsere Kolleg*innen, die uns im Verlauf unterstützt haben, und zu guter Letzt natürlich an den österreichischen Wissenschaftsfonds (FWF), der diese Arbeit in erster Instanz möglich gemacht hat, und an alle, die wir hier vergessen haben.

Lukas Allner / Christoph Kaltenbrunner / Daniela Kröhnert / Philipp Reinsberg / Institute of Architecture at the University of Applied Arts Vienna / Institute of Art Sciences and Art Education at the University of Applied Arts Vienna (Eds.)

www.conceptional-joining.com

Printed with financial support of the Austrian Science Fund (FWF) within the "Programme for Arts-based Research (PEEK)": Project AR395-G24.

With additional contributions by Brigitte Felderer, Hélène Frichot, Moritz Heimrath, Philipp Hornung, Anja Jonkhans, Helga Lichtenegger, Ferdinand Ludwig, Ulrich Müller, Adam Orlinski, Hannelore Paflik-Huber, Clemens Preisinger, Karin Raith, Jun Sato, Karolin Schmidbaur, Alfred Teischinger, and Klaus Zwerger.

Project Management "Edition Angewandte" on behalf of the University of Applied Arts Vienna:

Roswitha Janowski-Fritsch, A-Vienna

Content and Production Editor on behalf of the Publisher: Katharina Holas, A-Vienna

Proofreading/Copy editing: Janima Nam (English), Fanny Esterházy (German), A-Vienna

Translation from German into English: Mark Wilch (as mentioned) and the editors, A-Vienna

Translation from English into German: Christa Wendl (as mentioned) and the editors, A-Vienna

Design: Caroline Ecker, ce-design, A-Vienna / Wald a. A.

Printing: Holzhausen, die Buchmarke der Gerin Druck GmbH, A-Wolkersdorf

Images, photos, illustrations: © the editors / Conceptual Joining (unless otherwise indicated)

The editors have made every reasonable effort to obtain the necessary permission to use the works. Errors and omissions can be reported to the editors and will be corrected in subsequent editions.

Library of Congress Control Number: 2021934005

Bibliographic information published by the German National Library

The German National Library lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available on the Internet at <http://dnb.dnb.de>.

This work is subject to copyright. All rights are reserved, whether the whole or part of the material is concerned, specifically the rights of translation, reprinting, re-use of illustrations, recitation, broadcasting, reproduction on microfilms or in other ways, and storage in databases. For any kind of use, permission of the copyright owner must be obtained.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License. For details go to <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>.



ISSN 1866-248X

ISBN 978-3-0356-2435-9

e-ISBN (PDF) 978-3-0356-2437-3 Open Access

© 2022 Lukas Allner / Christoph Kaltenbrunner / Daniela Kröhnert / Philipp Reinsberg /
Institute of Architecture at the University of Applied Arts Vienna /
Institute of Art Sciences and Art Education at the University of Applied Arts Vienna,
published by Birkhäuser Verlag GmbH, Basel
P.O. Box 44, 4009 Basel, Switzerland
Part of Walter de Gruyter GmbH, Berlin/Boston

The book is published open access at

www.degruyter.com.

9 8 7 6 5 4 3 2 1

www.birkhauser.com