

Zeitschrift: Tec21
Herausgeber: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
Band: 142 (2016)
Heft: [38-39]: Arch_Tec_Lab, ETH Zürich

Artikel: Digitale Fabrikation : das sequenzielle Dach = Digital fabrication : the sequential roof
Autor: Apolinarska, Aleksandra Anna / Knauss, Michael / Gramazio, Fabio
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-825788>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 29.03.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Digitale Fabrikation: Das sequenzielle Dach

Digital Fabrication: The Sequential Roof

Text: Aleksandra Anna Apolinarska, Michael Knauss, Fabio Gramazio, Matthias Kohler

Professur für Architektur und Digitale Fabrikation, ETH Zürich | Chair of Architecture and Digital Fabrication, ETH Zurich



Foto: Andrea Diglas

**Gleichzeitig einfach und komplex:
Das Projekt «Das sequenzielle Dach»
veranschaulicht, wie eine eng verzahnte
computergestützte Konstruktion und
Planung in Verbindung mit Roboter-
fertigung dem Holzbau Auftrieb verleiht.**

≡ Ausgangspunkt dieses Projekts¹ war das Bestreben, einfache Elemente zu verwenden, die sich im Rahmen eines vollautomatisierten Montageprozesses schnell und mit geringstmöglichem Aufwand verarbeiten lassen – dies, um die Möglichkeiten robotergestützter Holzverarbeitungstechniken auszuschöpfen und auf diese Weise massgeschneiderte, nicht standardisierte Bauteile mit komplexen Formen zu fertigen.

Die gesamte Dachstruktur wurde unter Verwendung von speziell für dieses Projekt entwickelter Software als dreidimensionales Modell und als Datenmaterial am Computer erstellt. Aufgrund der hohen Anzahl einzelner Elemente mit individuellen Eigenschaften erforderte die Übertragung des architektonischen Modells in die Strukturanalysesoftware wie auch die Analyse der Ergebnisse ebenfalls eine automatisierte Berechnung. Letztendlich wurden auch die Detailgestaltung der Verbindungen und die Fabrikationsdaten mithilfe von speziell entwickelten Algorithmen erstellt.

Das daraus resultierende «sequenzielle Dach», das eine Fläche von 2308 m² abdeckt, besteht aus 168 einzelnen Holzfachwerkträgern, die jeweils 1.15 m breit sind und aus 23 Schichten von 50 mm dicken Latten bestehen. Insgesamt sind jede der 48624 Holzplatten und jeder Fachwerkträger in Form und Detailgestaltung unterschiedlich, wobei sich ihre Form an die lokalen Gegebenheiten wie Schnittstellen mit Subsystemen oder konstruktiven Berechnungen anpasst. Die Holzträger überspannen bis zu 14.7 m zwischen den Stahlkastenträgern des primären Tragwerks, das auf zwölf akzentuierten Doppelstützen aufliegt. Die Fachwerkträger werden auf der einen Seite von festen und auf der anderen Seite von in Längsrichtung beweglichen Lagern getragen. Die Holzkonstruktion ist fest mit den verschiedenen Subsystemen wie Sprinkleranlage, Rauchabzüge, Oberlichter und Beleuchtung verzahnt. Als Material wurden keilverzinkte zweischichtige Duobalken mit einer reduzierten Restfeuchte von 10 % verwendet.

Da der Montageprozess vorgibt, wie die Elemente zusammengesetzt werden können, und nur die Verbindung von jeweils zwei Elementen gleichzeitig zulässt, wurde das Konstruktionsprinzip eines Fachwerkträgers verändert, indem man die einzelnen Holzteile räumlich auf mehrere Schichten verteilte.

**A marriage of simplicity and complexity:
The “Sequential Roof” project showcases
how tightly linked computer-based design
and planning combined with robotic fabrication can invigorate wood construction.**

≡ The point of departure for the project¹ was the aim to use simple elements which can be processed fast and with minimal effort within a sequential and fully automated fabrication and assembly process, to exploit the possibilities of robotic woodworking techniques to create bespoke, non-standard building elements with complex shapes.

The whole roof structure was computationally generated as a three dimensional model and data set using a bespoke piece of software developed

1 Die vorfabrizierten, vollautomatisiert montierten Holzfachwerkträger im Werk | Prefabricated and fully automatedly assembled timber trusses in the factory

ARCHITEKTENSTATEMENT ZUM DACH (FABIO GRAMAZIO UND MATTHIAS KOHLER)

«Mit dem Holzdach unterstreichen wir die offene Räumlichkeit des Gebäudes: Ausgehend von der vertikalen Tragstruktur aktiviert das Dach durch seine hochauflösende Form und seine konstruktive Tiefe den darunterliegenden Raum. Dort zeigt sich die sinnliche Wechelseitigkeit zwischen digital-kontinuierlichen Logiken und der eigenständigen Materialisierung, die sich je nach Betrachtungswinkel immer wieder aufs Neue einstellt. Tatsächlich stand für uns im gesamten Entwurfs- und Ausführungsprozess die direkte Verknüpfung von algorithmischen und konstruktiven Prozessen im Vordergrund, von der digitalen Planung bis hin zur roboterbasierten Assemblierung. Insbesondere im Ausdruck des algorithmisch generierten Fügungsdetails der einzelnen Holzschichten wird dies deutlich, denn diese quer laufenden «Nahtstellen» fungieren als wesentliches Gestaltungselement der Dachuntersicht. Bei Nacht verlagern sich die sinnliche Qualitäten der Dachkonstruktion jeweils radikal – denn hier spielt sich die Dachform durch die eingebetteten Lichtmittel frei und schwebt über dem Gebäude, ganz so wie in seiner virtuellen Umgebung, aus der es ursprünglich kommt.»

ARCHITECTS' STATEMENT REGARDING THE ROOF (FABIO GRAMAZIO AND MATTHIAS KOHLER)

“The timber roof underscores the open character of the building. Resting on a vertical load-bearing structure, its complex geometry and constructive depth activate the space below, highlighting the sensual interaction between digital continuous logic and autonomous materialisation, which assumes different forms depending on the angle from which it is viewed. In actual fact, the emphasis for us throughout the design and execution phases was on directly linking algorithmic and constructive processes, from digital planning right through to robotic assembly. This is especially clear from the expression of the algorithmically generated details for interweaving the individual layers of timber, for these transversal ‘interfaces’ constitute a key element in the design of the underside of the roof. At night, the sensual perception of the roof structure changes radically, because the embedded lighting delineates its shape, making it seem to hover above the building, exactly like it did in the virtual environment in which it originated.”

- 2 Kontaktflächen der Latten. Die elliptische «Einflussfläche» eines Nagels darf die benachbarten Nägel nicht tangieren, um den erforderlichen Nagelmindestabstand einzuhalten. | Where the slats meet, the elliptical "influence surface" of one nail must not affect its neighbour. This way the required minimum distance between nails can be maintained.

Die oberen und unteren Gurte wurden daher durch das Verbinden dreier Schichten von sich an den Enden überlappenden Latten mit diagonalen Schichten hergestellt, die in Sandwich-Bauweise dazwischen eingebracht wurden. Hier musste die Verbindungsmethode geometrisch flexibel sein, um der grossen Bandbreite unterschiedlicher Winkel, Positionen und konstruktiver Anforderungen jeder einzelnen der 94 380 Nagelverbindungen Rechnung zu tragen. Denn jede Verbindung erforderte (je nach den wirkenden Kräften) 4 bis 20 Nägel und musste einer individuellen Detailauslegung genügen. Bei 815 984 Nägeln erforderte dies die Entwicklung von für diese Aufgabe spezialisierten Optimierungsmethoden für Algorithmen durch ROB Technologies AG.²

Jeder Träger wurde von ERNE AG Holzbau³ durch einen grossen Portalroboter vorgefertigt, der mit einem mechanischen Handgelenk und auswechselbaren Endeffektoren ausgestattet war und in Kombination mit Peripherieausrüstungen wie CNC-Holz Sägen arbeitete. Die Träger wurden sequenziell Schicht für Schicht gebaut. Das bedeutet, dass jedes einzelne Element auf seine Grösse geschnitten, an seinen Ort gebracht und direkt mit dem Rest der Konstruktion verbunden wurde. Nach jeder Schicht dokumentierte der Prozess automatisch jede einzelne Verbindung, was ein umfassendes und konsistentes Qualitätsmanagement ermöglichte.

for the project. Due to the high amount of unique elements with individual properties, transferring the architectural model into the structural analysis software, as well as analysis of the results, also required computational automation. Last but not least, the detailing of the connections as well as fabrication data were produced with the aid of custom-made algorithms.

The resulting "Sequential Roof", covering an area of 2,308 m², consists of 168 individual timber trusses, each 1.15 m wide and consisting of 23 layers of 50-mm thick slats. In general, each of the 48,624 timber slats and each truss is unique in form and detail, with their shape adapting to local requirements, such as interfaces with subsystems or structural calculations. The timber trusses span up to 14.7 m between curved steel box beams of the primary structure, which rest on the twelve main, accentuated double-columns. The trusses are supported with a fixed bearing on one side and the other movable in longitudinal direction. The timber structure is tightly integrated with various subsystems such as sprinklers, smoke exhausts, skylights and lighting. With respect to the material, finger-joined two-layer Duobalken were used, with a reduced moisture content of around 10%.

With the assembly process dictating constraints on how the elements can possibly be joined together, allowing for joining only two elements at a time, the structural principle of a truss was modified by spatially distributing the individual timber pieces into multiple layers. Top and bottom chords are thus created by concatenating three layers of slats that overlap at their ends, with diagonal layers sandwiched in-between. Here, the connection method had to be geometrically flexible in order to respond to the large variance in angles, positions and structural requirements of every single of the 94,380 (nail-) connections. In fact, each connection required between 4 and 20 nails (depending on the forces), and had to be detailed individually. With the total number of 815,984 nails, this necessitated the development of bespoke algorithmic optimization methods by ROB Technologies AG².

Each truss was pre-fabricated by ERNE AG Holzbau³ using a large-scale gantry robot with a mechanical wrist and exchangeable end-effectors, and integrated with peripheries such as a CNC joinery saw. The trusses were built layer by layer, sequentially, which means that each single element was cut to size, put in place and directly joined with the rest of the structure. After each layer, the process automatically documented each individual connection allowing for an overall consistent quality management.

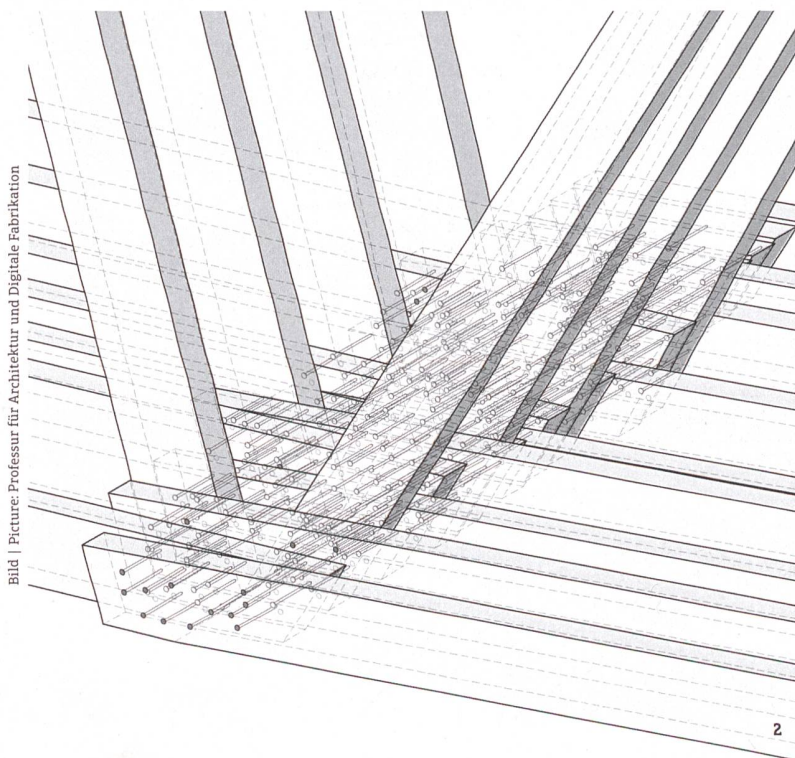


Bild | Picture: Professur für Architektur und Digitale Fabrikation



Foto: Andrea Diglas

Beim Projekt des «sequenziellen Dachs» steht das Zusammenspiel von computergestützter Konstruktion und Roboterfabrikation ebenso im Mittelpunkt der endgültigen Architektur wie auch der Fertigungsprozess. Dadurch wird das traditionelle Spektrum des Holzbaus beträchtlich erweitert und das Gebiet der Roboterfabrikation auf einen neuen Massstab gebracht.⁴

Overall, in the "Sequential Roof" project, the amalgamation of computer-based design and robotic construction is at the centre of both the final architecture and also the process of its fabrication, substantially expanding the traditional spectrum of timber construction while introducing a radical shift in scales of robotic fabrication.⁴

3 Montage der Holzfachwerkträger | Assembling the timber trusses

ANMERKUNGEN

1 Die ausführliche Projektbeschreibung und Informationen zu den beteiligten Partnern können abgerufen werden unter: <http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/d/forschung/201.html>

2 Siehe auch: www.rob-technologies.com/start/index.html

3 Siehe auch: www.erne.net/de/startseite/

4 Bei dem vorliegenden Artikel handelt es sich um die gekürzte Version des folgenden Beitrags: Aleksandra Anna Apolinarska, Michael Knauss, Fabio Gramazio, Matthias Kohler: The Sequential Roof, in: Achim Menges, Tobias Schwinn, Oliver David Krieg (Hrsg.): Advancing Wood Architecture, London: Routledge, 2016, S. 45–57.

NOTES

1 A detailed description of the project and information on the partners involved can be downloaded from: <http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/d/forschung/201.html>

2 See also: www.rob-technologies.com/start/index.html

3 See also: www.erne.net/de/startseite/

4 This article is a shortened version of the following paper: Aleksandra Anna Apolinarska, Michael Knauss, Fabio Gramazio, Matthias Kohler: The Sequential Roof, in: Achim Menges, Tobias Schwinn, Oliver David Krieg (ed.): Advancing Wood Architecture, London: Routledge, 2016, p. 45–57.