

Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen wissenschaftlich begutachteten und freigegebenen Fachaufsatz („reviewed paper“).

X261a

Hauptaufsatz

# CNC-gefräste Schwalbenschwanzzinken für die Verbindung von vorgefertigten Bauteilen aus Brettsperrholz

C. Robeller, B. Hahn, P. Mayencourt, Y. Weinand

**Zusammenfassung** Die weit verbreitete automatisierte Vorfertigung im Holzbau, sowie moderne CAD-Software mit Programmierschnittstellen ermöglichen und vereinfachen zunehmend die Herstellung von komplexen Bauteilgeometrien. Diese Entwicklung erfordert und ermöglicht gleichermaßen auch Anpassungen und Neuentwicklungen der Verbindungstechnik.

Analog zu den Entwicklungen im Holzrahmenbau, demonstriert die hier vorgestellte prototypische Schalenkonstruktion aus gekrümmtem Brettsperrholz die Adaption einer klassischen Holz-Holz Zinkungs-technik aus dem Tischlerhandwerk, die mithilfe eines Industrieroboters automatisch hergestellt werden kann. Diese ästhetisch anspruchsvolle, sichtbare Verbindung ermöglicht eine tragfähige geklebte Verbindung und vereinfacht die Fügung der Bauteile durch eine integrierte Positionierlehre.

## CNC-fabricated dovetails for Joints of Prefabricated CLT Components

**Abstract** The widely available automated prefabrication in timber construction companies, as well as modern CAD software with application programming interfaces, allow for the design and production of increasingly geometrically complex building components. This development also enables and demands at the same time advanced joinery techniques. Analog to the developments in timber framing, this article presents the adaptation of a traditional wood-wood joinery technique from cabinetmaking, on the case-study of a shell structure built from curved cross-laminated timber (CLT) panels. The dovetail-joints allow for a load-bearing glued joint between the CLT panels. They provide an aesthetic, visible connection and simplify the assembly through their integrated locator features.

Dipl.-Arch. Christopher Robeller

christopher.robeller@epfl.ch

Dipl.-Ing. Benjamin Hahn

benjamin.hahn@epfl.ch

Paul Mayencourt M.Sc.

paul.mayencourt@epfl.ch

Prof. Dr. Yves Weinand

yves.weinand@epfl.ch

Institut für Holzbau IBOIS

EPF Lausanne

Station 18

1015 Lausanne, Schweiz

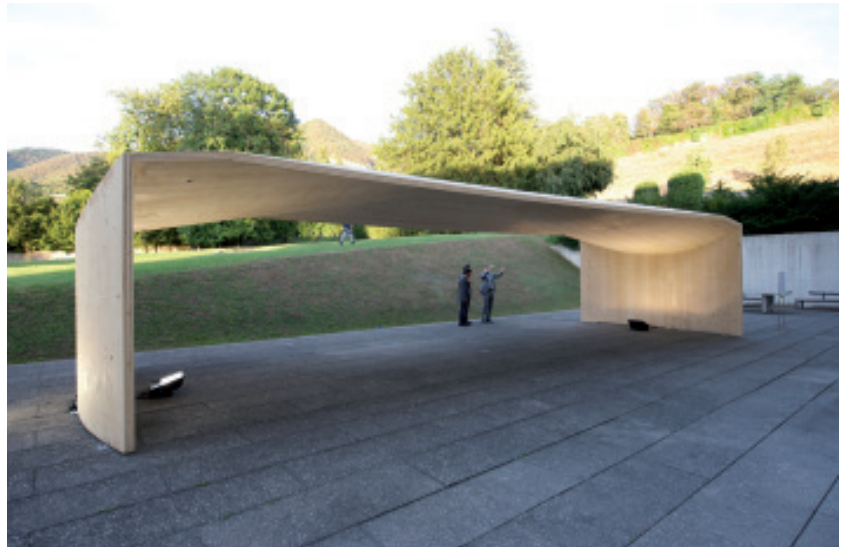


Bild 1. Prototypenbau: gefaltete Schale aus Brettsperrholz  
Fig. 1. Prototype structure: folded CLT shell

## 1 Ausgangssituation

Gekrümmte Brettsperrholzplatten werden derzeit von zwei europäischen Firmen angeboten. Neben den generellen Vorteilen von Brettsperrholz (BSP), wie der Nachhaltigkeit und dem guten Verhältnis von Gewicht und Festigkeit, können die gekrümmten Platten für die Konstruktion von Schalen-tragwerken eingesetzt werden. Somit kann auf einfache Weise eine kombinierte, dreifache Tragwirkung als Stützbo-gen, Scheibe und Platte erreicht werden [1].

In dem hier vorgestellten Prototypenbau (Bild 1) wird eine zusätzliche „Faltung“ zwischen Elementen aus gekrümmtem Brettsperrholz erzielt, indem jeweils ein konkaves Element mit einem konvexen Element verbunden wird. Durch die Verbindung Zweier gegensätzlich gekrümmter Elemente wird die Querschnittssteifigkeit dieses Verbundes deutlich erhöht [2].

Ein weiterer Vorteil dieser Technik ist, dass sich der Verbund mit zwei Elementen gleicher Krümmung herstellen lässt, somit kann dieselbe Form für die Herstellung der Platten verwendet werden. In dem speziellen, hier vorgestellten Fall, handelt es sich zudem um eine abwickelbare Fläche, bei der sich die einzelnen Elemente praktisch ohne Verschnitt aus einer großen Brettsperrholzplatte herstellen lassen.

Um das beschriebene Tragverhalten einer gefalteten Schale zu erreichen, wird eine steife Verbindung zwischen den beiden gekrümmten Brettsperrholzplatten benötigt. Aufgrund der Krümmung der Platten lässt sich diese Verbindung schlecht mit Metallplattenverbindern lösen, da diese vorgefertigt nur im rechten Winkel und auch nur für flache Platten verfügbar sind. Die Fügung selbst stellt eine weitere Herausforderung dar. Eine passgenaue Positionierung von gekrümmten Bauteilen erfordert meist zusätzliche Positionierhilfen oder Lehren.

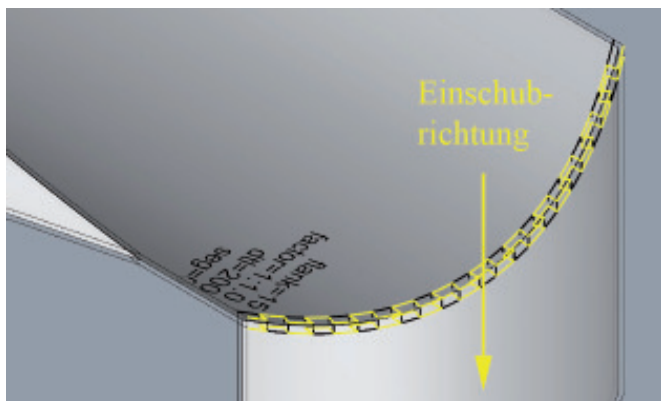


Bild 2. Algorithmische Generierung der Verbindungen  
Fig. 2. Algorithmic generation of the joints



Bild 3. Automatische Herstellung der Schwalbenschwanzzinkung mithilfe eines Industrieroboters  
Fig.3. Automatic fabrication of the dovetail joints with an industrial robot

## 2 Inspiration / Entwicklung im Holzrahmenbau

Als Inspiration für eine integrierte Lösung dieser Verbindung diente der zunehmende Einsatz CNC-gefertigter Holz-Holz Verbindungen im Holzrahmenbau. Vorangetrieben durch die Entwicklung von Abbundautomaten, wie z. B. der Firma Hundegger Maschinenbau, haben sich klassische, zimmermannsmäßige Holzverbindungen, wie etwa verschiedene Zapfenverbindungen wieder etabliert. Die automatisierte Herstellung solcher Verbindungen bietet dabei, neben der hohen Präzision und der Einsparung von Lohnkosten bei der Herstellung, entscheidende Vorteile im heutigen Kontext der zunehmenden Vorfertigung: Die formschlüssige Verbindung ermöglicht es eine Positionierhilfe in das Bauteil zu integrieren, wodurch vor Ort eine schnelle und präzise Verbindung gewährleistet wird.

Solche komplexen Bearbeitungen erfordern allerdings auch eine zeitaufwändigere und anspruchsvollere Programmierung der Maschine. Im Holzrahmenbau wurde dieses Problem durch spezielle Software gelöst, mit der typische, formschlüssige Holzverbindungen anhand weniger entscheidender Parameter einfach und zeitsparend programmiert werden können.

## 3 Kantenverbindungen für Holzwerkstoffplatten

Die Bearbeitung von Holzplattenwerkstoffen im Holzbau erfolgt heute ebenfalls zunehmend automatisch, mithilfe von Portalfräsmaschinen (CNC) oder Industrierobotern. Analog zu der Entwicklung im Holzrahmenbau können somit auch traditionelle, handgefertigte Kantenverbindungen aus dem Möbelbau, wie Fingerzinken oder Schwalbenschwanzzinken für die maschinelle Fertigung von Plattenverbindungen angepasst und genutzt werden.

Traditionell wurden Schwalbenschwanzzinken für die Verbindung von planaren Elementen und rechtwinkligen Kantenverbindungen genutzt, das Prinzip lässt sich aber auch auf nicht-rechtwinklige Kantenverbindungen und gekrümmte Platten anwenden. Eine Voraussetzung dafür sind Bearbeitungsanlagen, die zusätzlich zu den Translationsbewegungen des Werkzeugs auch Rotationsbewegungen ausführen können (5-Achs Simultanbearbeitung). Bereits heute beherrscht ein Großteil der verwendeten Maschinen diese Technik.

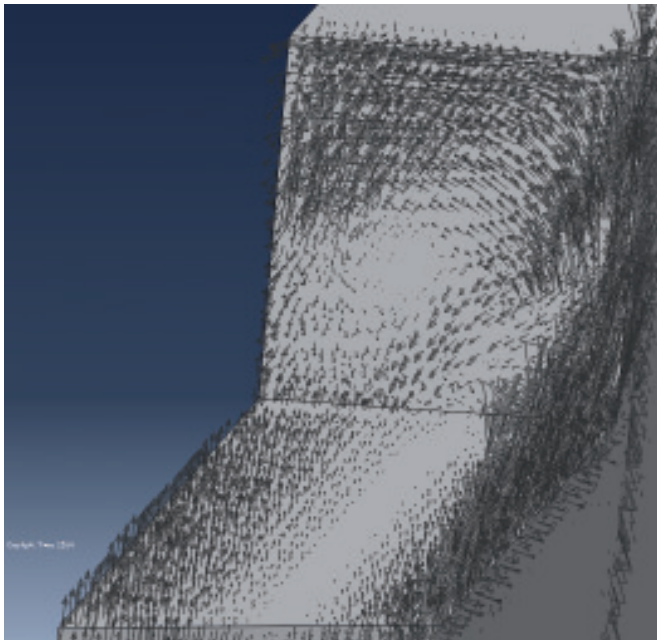
## 4 Automatische Datenverarbeitung

Auch wenn moderne Maschinen grundsätzlich in der Lage sind formschlüssige Kantenverbindungen für Holzplatten herzustellen, stellt die Programmierung eine weitere Herausforderung dar.

Die manuelle Programmierung der Maschinenanweisungen für die Herstellung von Schwalbenschwanzzinken mit branchenüblicher Software (CAM) ist zeitaufwändig und wenig praktikabel. Eine Voraussetzung für die Herstellung einer parametrischen Verbindung war daher die Entwicklung eines Programmgenerators, der sowohl die Verbindungsgeometrie, als auch die für die Fertigung benötigten Maschinenanweisungen automatisch, anhand weniger entscheidender Parameter erzeugt. **Bild 2** zeigt, wie die Geometrie einer Schwalbenschwanzverbindung zwischen zwei gekrümmten Brettsperrholzplatten generiert wird. Als Anwendereingaben werden lediglich die Kante eines einfachen Flächenmodells und die Einschubrichtung der Kantenverbindung ausgewählt.

## 5 Herstellungsverfahren und Details

Das Formatieren von Holzwerkstoffplatten erfolgt in der Regel auf einem Frästisch, welcher eine flächige Aufnahme für Platten verschiedener Größe bietet. Eine feste Bauteilfixierung und eine große Auflagefläche tragen hierbei entscheidend zur Reduktion von Vibrationen, und somit zu schnellen, produktiven Vorschüben bei gleichzeitig hochwertiger Schnittqualität bei. Aus diesem Grund wurden die Zinkenverbindungen mit einem Seitenschnitt gefertigt (**Bild 5**). Diese Fertigungstechnik erfordert lediglich einen Zugang zur Platte von oben und kann somit auf den üblichen Maschinen ohne technische Modifikationen hergestellt werden. Veränderungen sind lediglich bei der Geometrie der Zinkenverbindung erforderlich: Die Herstellung mittels Seitenschnitt und rotierenden Schaftfräsern ermöglicht keine Herstellung von spitzwinkligen Innenkanten, wie sie bei der traditionellen Herstellung von Zinken mit Handwerkzeugen üblich sind. Als Lösung für dieses Problem generiert unser Programm an den entsprechenden Innenkanten automatisch zusätzliche Kerbschnitte (**Bild 5**), welche einerseits das Zusammenfügen der Verbindung ermöglichen, gleichzeitig aber auch die Kerbspannungen an diesen kritischen Punkten reduzieren.



**Bild 4.** Von-Mises Kräfteverteilung an den geklebten Kontaktflächen der Schwalbenschwanzzinken (vereinfachtes FE Modell ohne Kerbschnitte)  
 Fig. 4. Von-Mises force distribution at the glued contacts of the dovetail joints (simplified FE model without notch cuts)

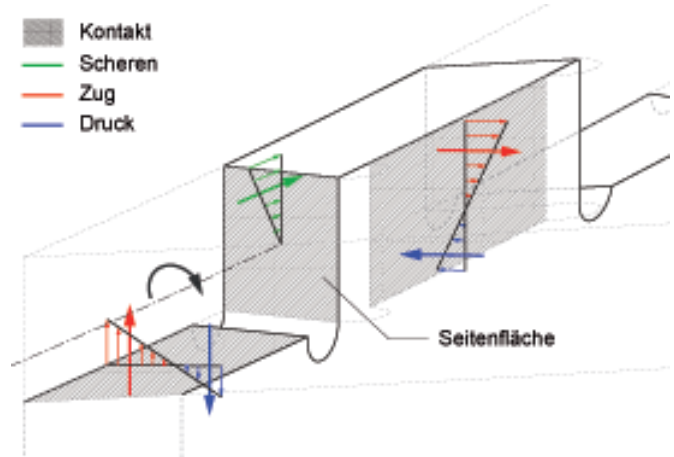
## 6 Vorteile von CNC-gefertigten Zinkenverbindungen für Brettsperrholz

Die Schalenkonstruktion des Prototypenbaus erforderte eine steife, materialschlüssige Verbindung zwischen den Brettsperrholzplatten, die mittels eines 1-komponentigen Polyurethan Klebstoffes ausgeführt werden sollte. Bei einer stumpf gestoßenen Verklebung der Bauteile entlang der Schmalflächen ergeben sich dabei zwei grundsätzliche Probleme: Tragende, verklebte Verbindungen im Holzbau sind in der modernen Vorfertigung realisierbar, jedoch können diese Verbindungen keine Kräfte normal zur Klebefuge aufnehmen [3], wie sie in dem Prototypenbau auftreten. Zudem erfolgt die Kräfteinleitung in jeweils eine der beiden stumpf gestoßenen Platten quer zur Faser, wodurch ebenfalls nur eine sehr geringe Festigkeit zu erzielen ist.

Die Verbindung mit Schwalbenschwanzzinken bietet hierbei entscheidende Vorteile: Zusätzlich zu den parallel zur Kante verlaufenden Kontaktflächen einer stumpf gestoßenen Wand-Deckenverbindung des Prototypenbaus, entstehen je Zinken zwei Seitenflächen quer zur Kante zwischen den zwei Bauteilen. Im vorliegenden Fall ergibt sich daraus, abzüglich der bereits erwähnten Kerbschnitte, eine um 30 Prozent höhere insgesamt Kontaktfläche zwischen den Bauteilen.

Dies ist ein deutlicher Gewinn, da im Holzbau die Querschnittsdimensionierung häufig nicht durch Bauteiltragfähigkeit, sondern durch die Größe der Anschlussflächen bestimmt wird [4]. Entscheidend für die Verbindungen des Prototypenbaus ist aber vor allem die unterschiedliche mechanische Beanspruchung dieser Seitenflächen (**Bild 4**).

Während an den parallel zur Kante befindlichen Flächen Kräfte normal zur Klebefuge auftreten, entstehen an den Seitenflächen lediglich Scherkräfte aus dem Drehmoment und Druckkräfte, welche gut mit einer geklebten Verbindung aufgenommen werden können (**Bild 5**).



**Bild 5.** Schematische Darstellung der unterschiedlichen Beanspruchungen der verschiedenen Kontaktflächen  
 Fig. 5. Schematic drawing of the different forces on the individual contacts

Weitere entscheidende Vorteile bieten solche formschlüssigen Verbindungen bei der Fügung der einzelnen Elemente. Gerade bei nicht-rechtwinkligen und gekrümmten Kanten erleichtern formschlüssige Verbindungen die Fügung der Elemente deutlich. Durch die abwechselnd verdrehten Seitenflächen der Zinkung entsteht, schon bevor die Teile verklebt werden, eine Verbindung mit nur einem Translations-Freiheitsgrad. Die Information für die korrekte Position der Teile zueinander ist somit in der Verbindung integriert: Die Zinken dienen als integrierte Lehre für die Fügung. **Bild 6** zeigt das Einsetzen der mit Zinkenverbindung gefertigten Dachteile des Prototypenbaus.

## 7 Beurteilung / Nutzungsmöglichkeit für weitere Projekte

Der Einsatz von Schwalbenschwanzzinken für die Verbindung von Bauteilen aus Brettsperrholz lässt sich mit den im Holzbau üblichen Abbundanlagen relativ problemlos umsetzen. Der zusätzliche Zeitaufwand liegt überwiegend in der Programmierung der Maschinenanweisungen, was sich durch den Einsatz eines Programmgenerators ebenfalls automatisieren lässt, ohne jedoch die Variabilität einzubüßen: Parameter wie die individuelle Zinkenlänge und der Winkel zwischen den Bauteilen sind frei konfigurierbar.



**Bild 6.** Fügung der gezinkten Bauteile aus Brettsperrholz  
 Fig. 6. Assembly of the dovetail-jointed CLT components



**Bild 7. Delaminierung der Klebeflächen parallel zur Kante**  
 Fig. 7. Delamination of the contacts parallel to the edge

Neben der automatisierten Herstellung bietet die Verbindung weitere Vorteile: Die Kontakte an den Seitenflächen ermöglichen eine tragende Verklebung zweier Bauteile aus Brettsperrholz. Bei der Herstellung der Zinken muss, gegenüber einem stumpfen Stoß der Platten, zusätzlicher Zeitaufwand eingeplant werden. Bei unserem Prototypenbau zeigte sich jedoch, dass der maschinelle Mehraufwand in der Vorfertigung sich bei der Fügung wieder einsparen lässt. Hierbei vereinfacht die in der Verbindungsgeometrie eingebettete Information für die Position der Bauteile die Montage deutlich.

### 8 Erkenntnisse / Verbesserungen

Die Zinkenlänge, bzw. der Winkel von Schwalbenschwanzzinken stellen zwei variable Parameter dar, die per Kante oder aber auch per Zinken prinzipiell veränderbar sind. Bei klassischen, zimmermannsmäßigen Verbindungen orientieren sich diese Werte üblicherweise an den eingesetzten Handwerkzeugen (Stemmeisen), Einsatzbereichen der Verbindung und den Werkstoffen (Massivholz). Die von uns gewählte Geometrie der Zinken resultierte in einem Seitenflächen-Anteil von 30 Prozent. Durch eine Verkürzung der Zinkenlänge um 50 Prozent lässt sich der Anteil dieser auf Scheerung beanspruchten Flächen verdoppeln.

**Bild 7** zeigt die gefertigte Schwalbenschwanzverbindung nach sechs Monaten im Außenbereich, direkt den Witterungseinflüssen ausgesetzt. Kurz vor dem Abbau des Versuchsbaus ist oberhalb der horizontalen Kontaktflächen eine großflächige Delaminierung zu erkennen, während die Verbindungen an den vertikalen Kontaktflächen nach wie vor intakt sind. In der Folge ist eine leichte konkave Verformung der einzelnen Schwalben zu beobachten. Sofern keine hohen Scherkräfte entlang der zu verbindenden Kante zu erwarten sind, könnte eine solche Verbindung mit schmalen Zinken und somit einem höheren Anteil an seitlichen Kontaktflächen optimiert werden.

### 9 Anwendung ohne Verklebung

Eine weitere mögliche Anwendung der hier vorgestellten, vorgefertigten Schwalbenschwanzzinkung für Brettsperrholzplatten ist die Kombination mit den üblichen, lotrecht zum gegenseitigen Bauteil eingebrachten stiftförmigen Verbindungsmitteln. So ließen sich unter Umständen die positiven Eigenschaften beider Techniken kombinieren, bzw. der Vorteil der integrierten Fügehilfe vollständig ausnutzen, wobei gleichzeitig auch eine Fügung auf der Baustelle möglich ist. Somit würde der Transport großer und sperriger vorgefertigter Bauteile überflüssig. Zugkräfte (Bild 5) könnten in diesem Fall durch die stiftförmigen Verbindungsmittel aufgenommen werden.

#### Projektbeteiligte Prototypenbau

Entwurfskonzept	Hans-Ulrich Buri
Vorfertigung	Merk Timber GmbH, Aichach

#### Literatur

- [1] Engel, H.: Tragsysteme, Hatje Cantz Verlag, 2006, p.186
- [2] Robeller, C. et al.: Curved-Folded Thin-Shell Structure Made from CLT, Springer Engineering, 2014
- [3] Neuhaus, H.: Ingenieurholzbau: Tragende geklebte Verbindungen im Holzbau, Teubner 1994, p. 130
- [4] Blaß, H.J. et al.: Forschung an der Universität Karlsruhe – Stiftförmige Verbindungsmittel in Brettsperrholz, in 5. Grazer Holzbau-Fachtagung 2006, p. 1–16