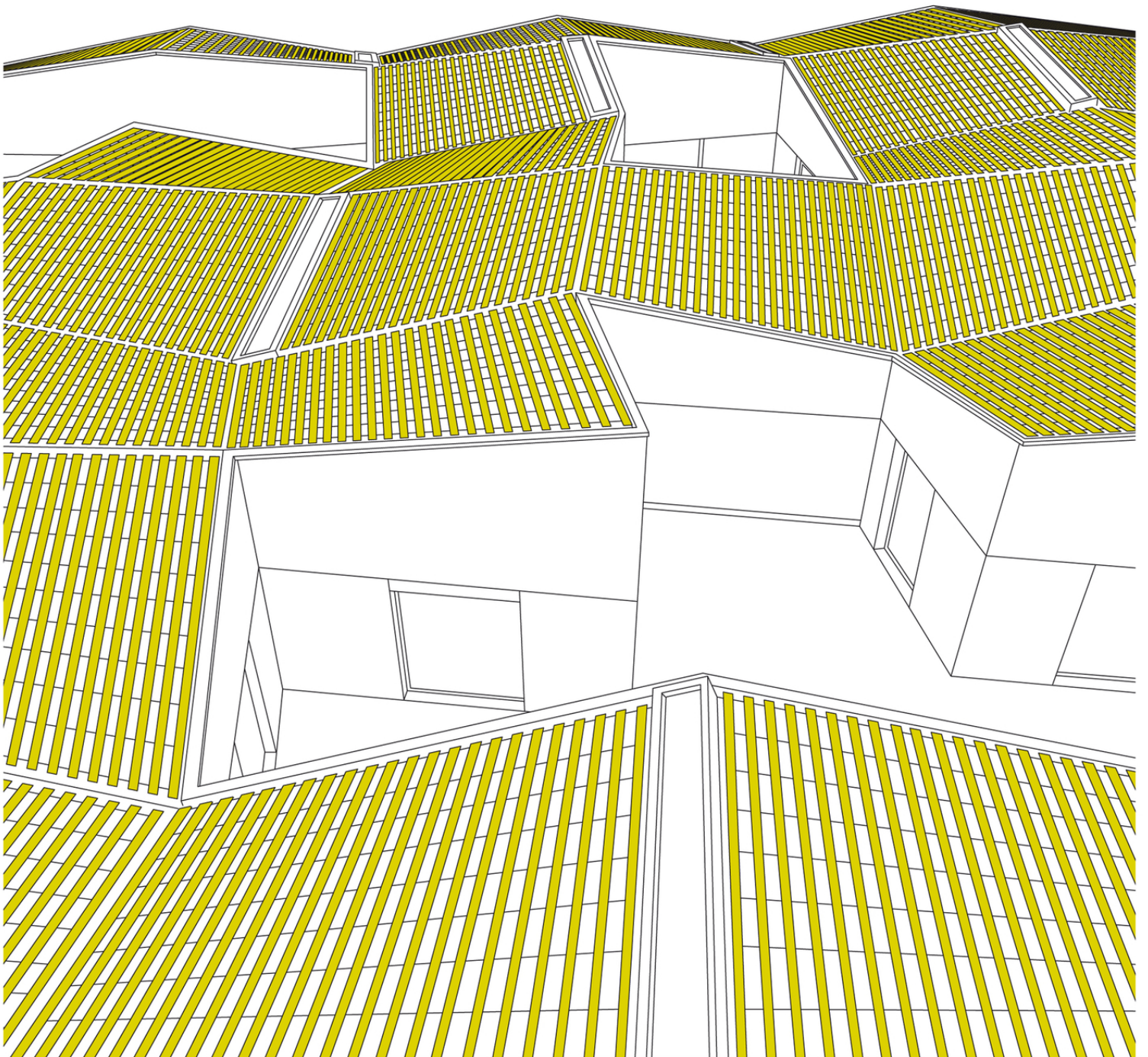


- Gestiegene Anforderungen im Holzbau
- Innerstädtisch, mehrgeschossig, kostengünstig, modular
- Intelligente Fügeverfahren und Konstruktionen

DETAIL

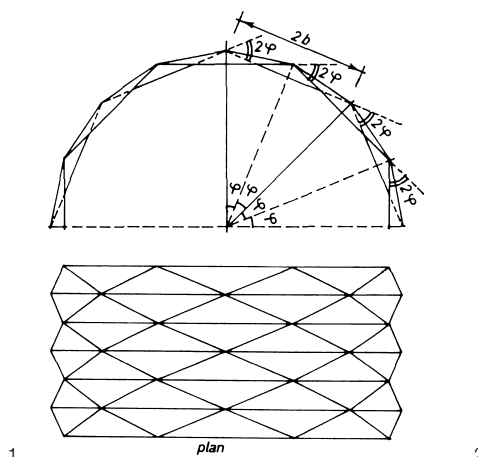
Zeitschrift für Architektur + Baudetail · Review of Architecture · Revue d'Architecture
Serie 2016 · **1/2** · Bauen mit Holz · Timber Construction · Construire en bois



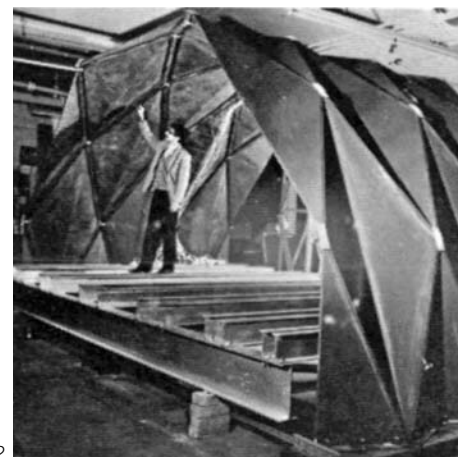
Integrale Verbindungen für Faltwerke aus Holzwerkstoffplatten

Integral Mechanical Attachments for Folded Plates of Composite-wood Panels

Christopher Robeller, Yves Weinand



1



2

Die Disziplinen von Architekt und Ingenieur überschneiden sich bei bestimmten Konstruktionsarten auf besondere Weise. Als gleichzeitig raumbildende und Kräfte ableitende Systeme stellen gefaltete Flächen-tragwerke das Ergebnis einer Synthese von Architekten- und Ingenieurstätigkeit dar. Bei sogenannten flächenaktiven Tragsystemen werden mehrere als Scheiben oder Platten wirkende Träger zu einem zusammenhängenden System kombiniert, wobei die Verbindungen entlang der Kanten eine besonders wichtige Rolle spielen.

Georg Ehlers beschreibt das Prinzip des »freitragenden Flächentragwerks« erstmals im Jahr 1930. Bei der Konstruktion von Brennstoffspeichern aus Eisenbetonplatten war aufgefallen, dass aufgrund ihrer gefalteten Form im Querschnitt auf zusätzliche aussteifende Elemente völlig verzichtet werden konnte. Eine ausreichende Steifigkeit ergab sich bereits durch die Form, bei der die relativ dünnen und leichten Flächenträger nicht jeweils einzeln, sondern als zusammenhängendes System wirkten. Vor allem die von Hermann Craemer als »monolithisch« bezeichnete Ortbetonbauweise machte dies möglich.

In den folgenden Jahrzehnten, insbesondere in den 1960- und 1970er-Jahren, entstanden zahlreiche gefaltete Flächentragwerke aus Beton, vor allem für freitragende, stützenfreie Konstruktionen wie etwa Sport- oder Lagerhallen.

Eine zunehmende Konkurrenz zum Ortbeton stellten damals neuartige, vorgefertigte und vorgespannte Betonteile dar. Gegenüber der aufwändigen Schalung der Ortbetonbauweise konnte hierbei ein entscheidender Teil der Arbeit von der Baustelle in die Vorfertigung verlagert werden. Dieses Prinzip ließ sich auch auf die Konstruktion gefalteter Flächentragwerke übertragen, wobei gefaltete Module in Serie vorgefertigt und zur Baustelle transportiert wurden. Dies erforderte erstmals separate Verbindungen zwischen den Bauteilkanten. Zu diesem Zweck verschweißte man zumeist eine überstehende Bewehrung vor Ort und goss die Lücken anschließend aus.

Neue Materialien, neue Formen

Vor allem in der Forschung wurde zu dieser Zeit auch mit neuen, alternativen Materialien experimentiert. So wurden beispielsweise leichte und temporäre Konstruktionen aus glasfaserverstärkten Kunststoffplatten untersucht, die den Vorteil der Transluzenz besitzen. Wieder lag der Fokus auf einer Vereinfachung des Auf- und eventuell auch Abbaus der Konstruktion vor Ort, ermöglicht durch Leichtbau, Vorfertigung und die Serienfertigung von Modulen.

Erstmals kommen hierbei in zwei Richtungen gefaltete Flächentragwerke aus einer Vielzahl kleiner Module zum Einsatz. Zygmunt Stanislaw Makowski und Pieter Huybers untersuchten sogenannte »antiprismatische Faltwerksgewölbe«, bei denen durch die Triangulation einer Zylinderfläche statisch günstige diagonale Aussteifungen im Querschnitt entstehen (Abb. 1, 2). Auch hierbei stellte die mit der Anzahl der Module zunehmende Anzahl der Kantenverbindungen eine Herausforderung dar. Neben der zeitaufwändigen Laminierung wurden oftmals Verschraubungen eingesetzt. Letztendlich konnten sich die Konstruktionen mit glasfaserverstärkten Kunststoffplatten jedoch nicht in größerem Umfang durchsetzen.

Ein alternatives Material für die Konstruktion von Faltwerken sind großformatige Holzwerkstoffplatten, die, angetrieben durch ein

zunehmendes ökologisches Bewusstsein um die Jahrtausendwende, verstärkt für Bauanwendungen zum Einsatz kamen. So entstand beispielsweise im Jahr 2001 ein Musikprobensaal in Thannhausen als Faltwerk aus Brettschichtholzplatten (Architektin: Regina Schineis, Augsburg). Auch die Idee des »Faltwerksgewölbes« wurde neu interpretiert: Im Jahr 2006 untersuchte das Holzbauinstitut IBOIS an der EPF Lausanne ein zylindrisches Faltwerk-gewölbe aus plattenförmigen Furniersperrholzelementen. Das Faltmuster dieses Prototyps war durch die japanischen Origami-Papierfaltungen inspiriert und die Platten entlang ihrer auf Gehrung geschnittenen Kanten mit Holzschrauben verbunden. Statische Untersuchungen und Belastungsversuche dieser Holzfaltwerke zeigten interessante Tragfähigkeiten, mit besonderem Verbesserungspotenzial im Bereich der Verbindungen (Abb. 3).

Rückkehr integraler Befestigungstechniken im Holzbau

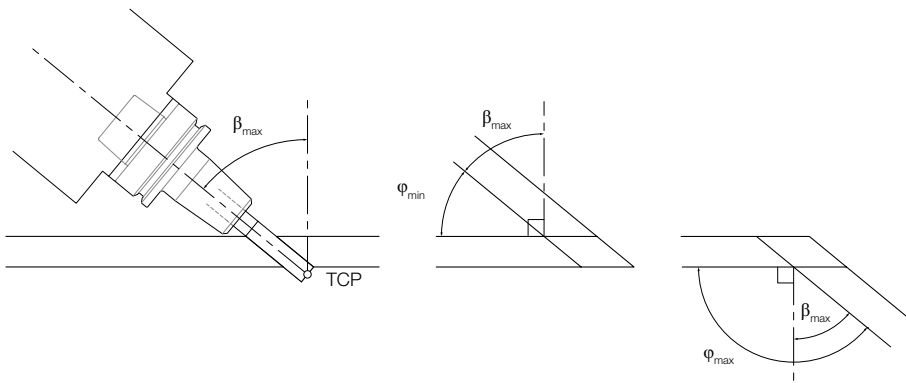
Über einen langen Zeitraum wurden im Zimmererhandwerk Holzverbindungen mit Handwerkzeugen wie Beilen, Sägen und Stemmeisen hergestellt. Diese traditionellen Verbindungen nutzten die Form der Bauteile, um Kräfte zu übertragen. Das Konzept wird auch als »integrale mechanische Befestigung« bezeichnet.

Die Verbreitung der Maschinenteknologie während der Industrialisierung machte diese integralen Techniken zunehmend unwirtschaftlich. Mechanische Befestigungsmittel wie Schrauben oder Metallwinkel, die sich mit den neuen Technologien massenfertigen ließen, ersetzten die traditionellen Verbindungen zum großen Teil.

Einen erneuten Wandel brachte die oftmals als »zweite industrielle Revolution« bezeichnete Verbreitung der numerisch gesteuerten Maschinenwerkzeugtechnik, die die Fertigung komplexer Bauteilgeometrien und individualisierter Bauteilserien ermöglicht. Die Verbreitung von CNC-Abbundanlagen im Holzrahmenbau führte zu einer Wiederbelebung integraler Befestigungen, wie



3



- 1, 2 gefaltetes Zylindergewölbe aus GFK-Platten, 1965
- 3, 5 gefaltetes Zylindergewölbe aus Sperrholzelementen, 2006
- 4 Begrenzung der Falzwinkel durch die Werkzeugneigung

- 1, 2 *Folded barrel vault of GRP panels, 1965*
- 3, 5 *Folded barrel vault of plywood elements, 2006*
- 4 *The angle of the fold is limited by the tool's angle.*

4

beispielsweise Zapfen- und Loch-Verbindungen. Holz ist dank seines guten Verhältnisses von Gewicht zu Festigkeit ideal für die zunehmende Vorfertigung geeignet. Bei der Herstellung der Verbindungen und bei der Fügung der Bauteile vor Ort bietet die maschinelle Fertigung solcher Verbindungen deutliche Vorteile gegenüber händischer Ausführung.

Im Gegensatz zum Holzrahmenbau mit stabförmigen Elementen stellt sich die Situation im Holzplattenbau anders dar. Im traditionellen Holzbau existierten keine plattenförmigen Werkstoffe, Holzrahmenelemente wurden stattdessen mit diagonalen stabförmigen Elementen ausgesteift. Später setzte man zu diesem Zweck Sperrholzplatten ein, was lediglich zwischen dem Rahmen und den Platten Verbindungen erforderte. Kantenverbindungen zwischen den Platten wurden erst mit der Einführung der modernen Platten- und Modulbauweise mit Brettsperrholz und Furniersperrholz benötigt.

Hierbei kommen nach aktuellem Stand der Technik mechanische Befestigungsmittel wie Schrauben und Metallwinkel zum Einsatz, unterstützt durch die Verwendung von Klebstoffen in der Vorfertigung.

Entwicklung integraler Verbindungen für Holzfaltwerke

Während diese Verbindungstechniken für Standardanwendungen mit rechtwinkligen und geraden Kantenverbindungen eine probate Lösung darstellen, erfordern gefaltete Flächentragwerke speziellere Verbindungen.

Besonders bei einer großen Anzahl kleinerer Komponenten, mit entsprechend vielen Kantenverbindungen, spielen neben den »Befestigungsmerkmalen« in der Form einer integralen Verbindung, über die Kräfte übertragen werden, auch die sogenannten »Zentriermerkmale« eine entscheidende Rolle. Hierbei lassen sich die einzig korrekte Position und Ausrichtung der Bauteile zuein-

ander in die Form der Bauteile einbetten, wodurch eine einfache, präzise und schnelle Fügung ermöglicht wird.

Vor allem für die Zentriereigenschaften ist entscheidend, dass die Form der Verbindung alle relativen Bewegungen der Teile zueinander blockiert, mit Ausnahme einer frei bleibenden Einschubrichtung für die Fügung.

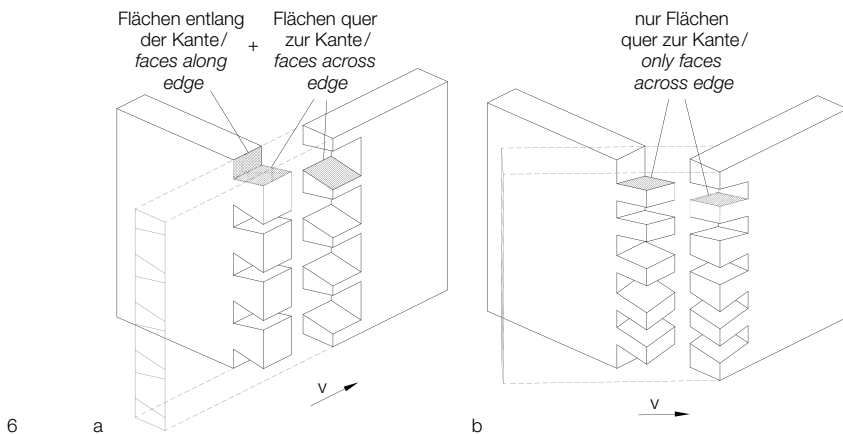
Inspiration für die Entwicklung solcher Verbindungen für plattenförmige Elemente fand sich nicht im Zimmerer-, sondern im traditionellen Tischlerhandwerk. Dort werden seit langer Zeit Zinkungen, bestehend aus mehreren schwalbenschwanzförmigen Zapfen entlang einer Kante, für Möbelverbindungen bei Schränken und Schubladen eingesetzt. Analog zu den Entwicklungen im Holzrahmenbau können mit moderner CNC-Fertigungstechnologie auch solche traditionellen Plattenverbindungen wieder effizient hergestellt werden, wobei einige Anpassungen an moderne Werkstoffe und Werkzeuge erforderlich sind.

Auch wenn die traditionelle Zinkung die Verbindung von Massivholzplatten zum Ziel hat, lässt sich das Prinzip gut auf moderne Furniersperrholzplatten übertragen. Erste Studien wiesen eine hohe Festigkeit auf. Dank der kreuzweisen Verleimung von Furniersperrholz können Zinkungen nicht nur an den zwei Stirnholzseiten quer zur Holzfasern, sondern rundum an beliebig ausgerichteten Kanten angebracht werden. Zudem lässt sich das Prinzip der Zinkungen, die traditionell der Verbindung von rechteckig angeordneten Platten dienen, mit Hilfe mehrachsiger Fräsmaschinen auch auf andere, vom rechten Winkel abweichende Winkel anwenden. Für die Konstruktion von gefalteten Flächenstrukturen wie den Zylindergewölben ist dies essenziell, da hier stets mehrere unterschiedliche Falzwinkel verbunden werden müssen. Die kleinsten und größten herstellbaren Falzwinkel ergeben sich dabei jeweils aus der maximalen Werkzeugneigung (Abb. 4).

Eine der größten Herausforderungen stellt die gleichzeitige Fügung mehrerer, an einer Platte befindlicher Kanten dar. Bei der Ver-



5



6

a

b

- 6 a Schwalbenschwanzzinkung
 b diagonaler Einschub der Nejiri-Arigata-Zinkung
 7 Prototyp aus Sperrholzplatten, 2013
 8 Rotationsfenster
 9 gleichzeitige Fügung mehrerer Kanten
 10–12 Prototyp mit zusätzlicher Längskrümmung, 2014
 13 integrale Verbindung von zwei Schichten

- 6 a Dovetail joint
 b Diagonal insertion of the nejiri arigata joint
 7 Prototype of plywood boards, 2013
 8 Rotation window
 9 Simultaneous jointing of multiple edges
 10–12 Prototype with additional longitudinal curvature, 2014
 13 Integral attachment of two layers



7

wendung einer klassischen Schwalbenschwanzzinkung ergeben sich für mehrere unterschiedlich ausgerichtete Kanten auch mehrere unterschiedliche Einschubrichtungen, die nicht gleichzeitig gefügt werden können.

Eine Lösung dieses Problems fand sich in der traditionellen japanischen »Nejiri-Arigata«-Verbindung. Im Gegensatz zu den europäischen Schwalbenschwanzzinken nutzt diese Verbindungsart mehrere unterschiedlich geformte Zinken, um die relativen Bewegungen der Bauteile auf eine einzige Einschubrichtung einzuschränken. Diese spezielle Form erlaubt eine »diagonale« Fügung der Bauteile, wobei die Einschublinie außerhalb der Ebenen der beiden Platten liegt (Abb. 6b).

Mit Hilfe computergestützter Entwurfswerkzeuge und Fertigungstechnik lässt sich dieses Prinzip nicht nur auf einen diagonalen Einschub, sondern auf eine Vielzahl möglicher Einschubrichtungen anwenden. Die Einschublinie kann dabei sowohl um die Kante als auch quer zur Kante rotiert werden. Dabei sind beide Drehungen durch Fügungs- und Fertigungsparameter begrenzt, wodurch sich ein pyramidenförmiges »Rotationsfenster« ergibt, das alle möglichen Einschubrichtungen der Verbindung visualisiert (Abb. 8).

Mit dieser Methode kann überprüft werden, ob mehrere Kanten gleichzeitig mit derselben Zinkungsart gefügt werden können. Hierzu werden Rotationsfenster für die Kanten berechnet und anschließend überlagert. Wenn sich dabei eine Schnittmenge ergibt, kann das Bauteil gefügt werden. Eine gemeinsame Einschubrichtung für die gleichzeitig gefügten Verbindungen kann innerhalb der Schnittmenge frei gewählt werden (Abb. 9).

Die Umsetzung solcher automatisch berechneter und gefertigter Details wird durch Programmierschnittstellen in modernen CAD-Anwendungen ermöglicht. So konnten neue »algorithmische Entwurfswerkzeuge« für die Konstruktion von Prototypen entwickelt werden, die der Überprüfung des neuen Fügungsprinzips dienen (Abb. 7). Mit diesen Werkzeugen können auf der Basis eines einfachen Flächenmodells und zusätzlicher Parameter wie der Plattendicke sowohl die Geometrie der Platten als auch der Maschinencode für die Fertigung automatisch generiert werden.

Neben der Einschubrichtung der einzelnen Platten muss auch eine »Fügungssequenz« geplant werden. Dabei können die unterschiedlichen Einschubrichtungen der einzelnen Platten genutzt werden, um die Bauteile gegenseitig gegen Lösen zu blockieren. Ein

Abbau der Konstruktion ist daher nur in der genau umgekehrten Aufbaureihenfolge möglich.

Vor allem bei der Verarbeitung »individualisierter Bauteilserien« eröffnen sich durch den Einsatz automatisch generierter, integraler Verbindungen neue Möglichkeiten. Eine gefaltete Flächenstruktur mit zusätzlicher Längskrümmung, bei der alle Platten unterschiedlich geformt sind, demonstriert dies (Abb. 10–12).

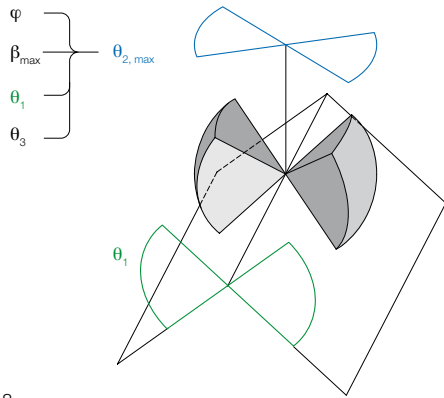
Im Vergleich zu einem nur einfach gekrümmten Falterwerkgewölbe konnten die Verformungen unter einer simulierten, asymmetrischen Last durch die leichte zusätzliche Krümmung um bis zu 39% reduziert werden.

Zweischichtige Falterwerkstrukturen

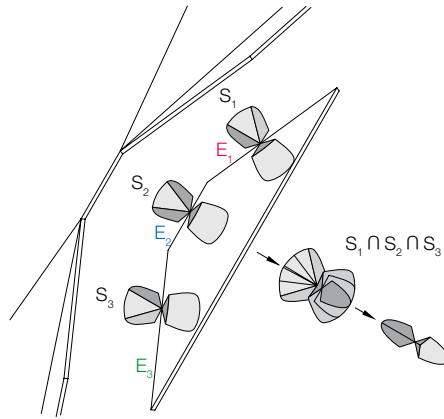
Ein besonderer Vorteil der integralen Plattenverbindungen ist die Möglichkeit, mit relativ dünnen Platten zu konstruieren, die bereits eine hohe Festigkeit aufweisen, jedoch mit üblichen Befestigungsmitteln nur schwer entlang ihrer Kanten zu verbinden sind. Bei der Verwendung von Schraubverbindungen in den Schmalflächen müssen, wie häufig im Holzbau, die Querschnitte aufgrund der Anschlussflächen oftmals größer bemessen werden, damit ausreichende Randabstände eingehalten werden können.

Anstelle einer einzelnen Schicht dicker Platten können mit integralen Verbindungen auch zweischichtige Konstruktionen mit dünnen Platten hergestellt werden. Bei Kantenverbindungen in zwei Ebenen, wie sie in Falterwerken üblich sind, ist es zudem möglich, die beiden Schichten, die an einer Kante zusammentreffen, durch verlängerte Zinkenverbindungen kreuzweise zu fügen. So lässt sich ohne zusätzliche Befestigungsmittel eine direkte Verbindung zwischen allen vier Platten herstellen (Abb. 13).

Die integrale Verbindung zweischichtiger Konstruktionen erfordert auf der von den verlängerten Zinken durchdrungenen Schicht geschlossene Zapfenlöcher, die sich durch einen leichten Überstand der Platten auch an den Außenkanten anwen-



8



9



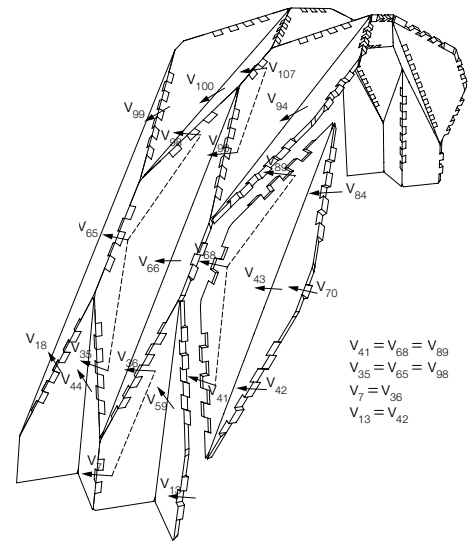
10

den lassen. Im Belastungsversuch hat diese Verbindung im Vergleich mit anderen Typen eine besonders hohe Festigkeit gezeigt. Ein weiterer Gegenstand der aktuellen Forschung ist das Faltmuster. Neben dem Einfluss auf die Übertragung der Kräfte und die Festigkeit des Faltwerks müssen auch Einschränkungen bei der Verbindung der Platten und der Anwendung auf verschiedene »Zielflächen« berücksichtigt werden. So sind beispielsweise die antiprismatischen Faltwerke nur auf Flächen mit einer vergleichsweise hohen Flächenkrümmung anwendbar. Der in Abbildung 14–17 gezeigte Prototyp nutzt ein alternatives Faltmuster, mit dem sich auch Flächen mit einer geringeren Krümmung als Faltwerk realisieren lassen.

Integrale Details

Die in diesem Artikel vorgestellten »Integralen Plattenverbindungen« stellen einen

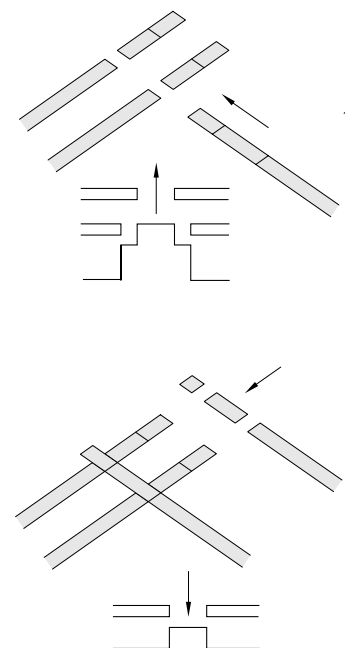
wichtigen weiteren Schritt in der Entwicklung gefalteter Flächentragwerken aus Holzwerkstoffplatten dar. Für den Einsatz in großmaßstäblichen Konstruktionen sind noch weitergehende mechanische Untersuchungen nötig, wie sie derzeit am IBOIS durchgeführt werden. Automatisierte Fertigungstechnologien, wie etwa mehrachsige Abbundanlagen, Bearbeitungszentren und Industrieroboter sind in modernen Holzbaubetrieben vielfach vorhanden. Dies ermöglicht die effiziente Herstellung von funktional und ästhetisch integrierten Details, insbesondere in Verbindung mit dem leicht und energiesparend zu bearbeitenden Werkstoff Holz. Inspiration für die Entwicklung neuer Techniken bieten dabei die ausgeklügelten Verbindungen des traditionellen europäischen und asiatischen Zimmerer- und Tischlerhandwerks, die für moderne Materialien und Anwendungen entsprechend angepasst werden können.



12



11



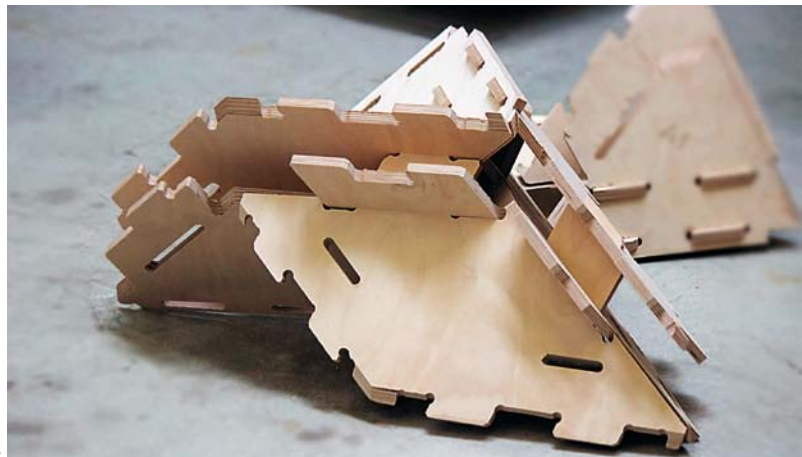
13

14–17 Prototyp mit zwei Schichten, 2015

14–17 Prototype with two layers, 2015

Christopher Robeller ist Architekt und Postdoktorand am Holzbauinstitut IBOIS der EPF Lausanne. Seine Doktorarbeit behandelt das Thema »Integrale Verbindungen für gefaltete Flächentragwerke aus Holz«. Yves Weinand ist Architekt und Bauingenieur. Er ist Gründer des Bureau d'Etudes Weinand in Liège/Belgien und seit 2004 Professor und Institutsleiter des Holzbauinstituts IBOIS an der EPF Lausanne.

Christopher Robeller is an architect and post-doctoral fellow at the Laboratory for Timber Constructions IBOIS at the EPF Lausanne. His doctorate deals with integral attachments for folded-plate structures in wood. Yves Weinand is an architect and structural engineer. He established the Bureau d'Etudes Weinand in Liège/Belgium. Since 2004 Weinand has served as professor and head of the department at the Laboratory for Timber Constructions IBOIS at the EPF Lausanne.



14

In certain types of structures, architecture and engineering overlap in a special way. As a system that both defines space and directs loads, folded-plate structures are the result of a synthesis of the two disciplines. In so-called surface-active load-bearing systems several beams that function as slabs or panels were combined as an interdependent system, whereas the connections along the edges play an especially important role.

In 1930, G. Ehlers is the first to describe the principle of "self-supporting folded-plate structures". He had noticed that on account of the folded shape of its cross-section, fuel reservoirs of reinforced concrete slabs required no additional bracing elements. The form itself, in which the relatively thin and lightweight planar structural members did not act individually, but as a coherent system, provided sufficient stiffness. Above all the in-situ concrete construction method, which

H. Craemer referred to as "monolithic", made this possible.

In the following decades, particularly in the 1960s and 1970s, a large number of folded plate structures were realised, above all for self-supporting structures that must be column-free – for example in sports halls or warehouses. At the time, pre-tensioned concrete components were increasingly becoming competitive with in-situ concrete. In comparison to the labour-intensive formwork necessary for in-situ concrete, it shifts a significant amount of on-site labour to the prefabrication hall. This principle can also be transferred to planar structures with folds, whereas folded modules are produced serially and transported to the building site. This was the first time separate connections were required between the building component edges. For this reason, typically the reinforcement extending beyond the edge of the modules was welded together and the openings were filled in.

New materials, new forms

At the time, the experiments that were made placed emphasis on alternative materials. For example, trials were made with lightweight temporary structures of GRP – a translucent material. The focus was again on simplification of assembly – and, in some cases, disassembly – of the structure on site, made possible through the lightweight construction method, prefabrication and the serial production of modules.

This was the first trial with folded-plate structures with folds in two directions and consisting of a large number of small modules. Z. S. Makowski and P. Huybers made studies of so-called "anti-prismatic folded-plate vault", in which through the triangulation of a barrel surface, structurally efficient stiffening diagonals were created in cross-section (ill. 1). Here too, as the number of modules grew, the increasing number of edge connections posed a challenge. Next to elaborate laminations, bolted connections were often employed. In the end, however, structures employing GRP panels did not gain a foothold. The large-format composite-wood panel is an

alternative material for folded plate structures; since the turn of the millennium, due to ecological concerns they have increasingly been employed. For example, the music rehearsal hall in Thannhausen, Germany (2001) is a folded-plate structure made of glue-laminated timber (Architect: Regina Schineis, Augsburg). The concept of the folded-plate vault was also reinterpreted: in 2006, IBOIS, a Swiss wood construction institute, studied a folded-plate barrel vault made of veneer plywood panels (ill. 4). The folding patterns of this prototype was inspired by Japanese origami, and the panels were connected along their mitred edges by means of wood bolts. Structural tests and loading tests of these folded plates demonstrated an interesting load-bearing capacity, with particular potential for improvement in the connections (ill. 3).

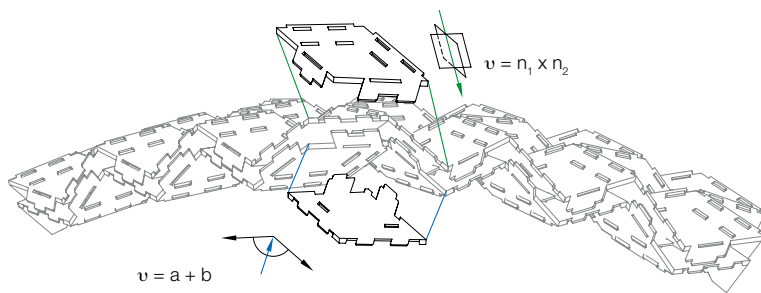
The return of integral mechanical attachments in wood construction

Over a long period of time, carpentry connections were made with hand tools such as axes, saws and chisels. These traditional connections used the form of the building component itself to transfer loads. This concept is referred to as "integral mechanical attachment". The spread of machine technology during industrialisation made these integral connection techniques increasingly uneconomical. To a large degree, mechanical means of attachment such as screws or metal angles that could be mass-produced with the new technologies replaced the traditional connections.

A further change was ushered in during the phase that has been dubbed the "second industrial revolution": the spread of numerically controlled techniques that make it possible to produce building components with complex geometry. The spread of CNC equipment for platform frame construction has revitalised integral mechanical attachments – for example, mortise-and-tenon joints. Thanks to its favourable weight-to-strength ratio, wood is ideally suited to prefabrication. With regard to the components' attachments and assembly on site, machine production has a number of advantages over manual production.



15



16

Timber platform frame construction employs studs and sheathing; the situation is different when it comes to multi-layered wood products. In traditional wood construction there were no materials in panel format: diagonal studs were employed to stiffen the frames. Later plywood was employed for this purpose: it was simply a matter of connecting the frame to the boards. Edge connections between the boards first became necessary with the advent of modern panel and module construction methods employing cross-laminated timber and veneer plywood. And so the state-of-the-art in mechanical means of attachment – bolts and metal angles – come into play, aided by adhesives.

Development of integral attachments

While these attachment techniques for folded-plate structures can be considered an effective solution for standard applications with orthogonal edge connections, folded plate structures require special connections. Precisely when there are large number of smaller components with a corresponding number of edge connections that, not only connection characteristics – in the form of the integral attachment, through which the loads are transferred – but also so-called alignment characteristics play a decisive role. In this manner the sole correct position and orientation of the building components, thereby facilitating a simple, quick, precise assembly.

Decisive factor in aligning characteristics Fine woodworking is the inspiration for the development of such connections. Dovetail connections, for example, have long been employed in furniture. Analogous to the developments in timber platform frame construction, with CNC production technology such traditional panel connections can again be executed economically, whereby some adaptations to modern materials and tools are necessary. Although the purpose of traditional dovetailing was to form a connection between solid wood boards, the principle can be transferred to modern veneer plywood. In initial testing it has exhibited high strength. Thanks to the crosswise gluing of veneer plywood, all



17

edges are suited to having dovetails. In addition, multiple-axis milling machines also make it possible to produce angles that deviate from the conventional 90 degrees. This is essential in the realisation of folded-plate structures such as the barrel vault, because to arrive at the fold geometry, several different angles are required (ill. 4).

Simultaneously jointing multiple edges of one panel is one of the greatest challenges. When classic dovetail joints are employed, the differently oriented edges yield different insertion directions, and these cannot be jointed simultaneously. The traditional Japanese “nejiri arigata” connection offered a solution to this problem. In contrast to the dovetail joints this type of connection uses dovetailing of different shapes to limit the relative movements of the building component to a single insertion direction. This special form allows “diagonal” jointing of the building components, whereby the insertion vector lies outside the levels of two boards (ill. 6). With computer-aided design tools and production techniques, this principle can be applied not only to diagonal insertion, but also to a variety of possible insertion directions. In the process, both rotations are limited by connection and production parameters, which yield a pyramidal “rotation window” which visualises all of the insertion directions present in the connection (ill. 8). This method can be used to test whether multiple edges can be jointed simultaneously with the same type of dovetailing. To this end rotation windows are calculated for the edges and are superimposed. If this yields an intersection the building component can be jointed. A shared insertion direction for simultaneous jointing can be chosen freely from the intersection (ill. 9). Next to the insertion direction of the individual panels, an assembly sequence must also be planned. And in the process the different insertion directions of the individual panels can be used to reciprocally block the components so that they do not become unattached. For this reason such structures can only be taken apart in exactly the reverse order in which they were assembled. Above all, processing of “individualised building component series”

opens up new possibilities for automatically generated, integral attachments. This is demonstrated by a folded planar structure with longitudinal curvature in which all of the panels are shaped differently (ills. 10–12). In comparison to a single-curved folded-plate vault, the additional curve reduced the deformations wrought by simulated, asymmetrical loading by up to 39%.

Double-layer folded plate structures

A particular advantage of integral panel attachments is the possibility to work with relatively thin panels that already exhibit high strength, but which are difficult to assemble with the standard means of connection. When screw connections are used in the narrow parts of the panels, as is often the case in wood construction, the cross-sections must be dimensioned more thickly to maintain sufficient distance to the edge. A single layer consisting of a thicker panel is one possibility; an alternative is a double layer structure with thin panels and integral connections. As is common in folded-plate structures, for edge connections in two levels it is also possible to connect the two layers that come together at an edge crosswise by means of elongated dovetail joints. In this way a direct connection between all four panels is brought about without additional means of attachment (ill. 13).

Integral details

The integral panel connections presented in this article constitute an important step in the development of folded-plate structures made of composite-wood panels. Further mechanical studies are necessary before they can be used in large-scale structures. Automated production technology has gained a foothold in wood construction. This facilitates efficient production of functionally and aesthetically integrated details, thanks in large part to wood’s low weight and the relatively low amount of embedded energy. Inspiration for the new techniques can be had in the elaborate details of European and Asian carpentry. New materials and applications trigger innovation and adaptation.