

2019

Ernst & Sohn Special
April 2019
A 61029

Sonderdruck S. 23-28

Flachdächer



- Flachdach – Neubau und Sanierung
- Flachdächer aus Holz
- Flachdachplanung
- Abdichtungstechnik
- Gebäudebegrünung
- Flachdachentwässerung
- Tageslichtsysteme
- Brandschutz

Alexander Stahr ■ Cristoph Dijoux ■ Martin Dembski ■ Lukas Franke

Zollinger – ein Flachdach der etwas anderen Art



Bild 1. Denkmalgeschütztes Scheunendach mit Zollinger-Konstruktion

Können die Möglichkeiten der Digitalisierung einer (fast) in Vergessenheit geratenen Konstruktion eine neue Zukunft eröffnen? Architekten und Ingenieure der interdisziplinären Forschungsgruppe FLEX an der HTWK Leipzig haben neue Lösungen zum Bau ressourceneffizienter Holzdächer nach dem „Zollinger-Prinzip“ entwickelt. Diese zielen darauf, zwei systembedingte Schwächen der Original-Konstruktion zu eliminieren und gleichzeitig ihre Einfachheit zu bewahren. Im Ergebnis eröffnen sich ganz neue Möglichkeiten für die praktische Anwendung, weit über Prestigeobjekte und Sonderbauten hinaus.

Die sich abzeichnende Verknappung materieller Ressourcen und die starke Abfallbelastung (52 % des gesamten Abfallvolumens in Deutschland allein durch die Bauindustrie) beschreiben große Herausforderungen für alle am Bau Beteiligten. In Verbindung mit dem weiteren Anwachsen der Weltbevölkerung ist schon in naher Zukunft mit spürbaren Konsequenzen für die Umwelt, die Wirtschaft und letztendlich für die Gesellschaft zu rechnen. Ein weltweit und in maßgeblichen Mengen zur Verfügung stehender Baustoff ist Holz. Im Kontext eines zunehmend spürbaren Bewusstseinswandels hin zu einer auf Nachhaltigkeit ausgerichteten Wirtschaft ist der verantwortungsvolle und innovative Umgang mit dem zwar nachwachsenden, aber ebenfalls erschöpfbaren Rohstoff von höchster Wichtigkeit.

Schlank und relativ kurz – aber nicht parallel!

Friedrich Zollinger schuf um 1920 ein formal und strukturell einzigartiges Konstruktionssystem, mit dem er sich über die Jahrhunderte alten Basisprinzipien von Parallelität und Orthogonalität im Holzbau hinwegsetzte. Es basiert auf der Kernidee, stabförmig-gerade Bauteile rautenförmig so anzuordnen, dass an den Verbindungsstellen immer ein Bauteil „durchläuft“ und zwei Bauteile spitzwinklig anschließen. Die Verbindungen werden als Knoten und die Bauteile als Lamellen bezeichnet. Da die anstoßenden Lamellen nicht eben, sondern räumlich ausgerichtet werden, ergibt sich in

der gebräuchlichsten Anwendung die einfach gekrümmte Konstruktionsform eines tonnenförmigen Gewölbes.

Durch die geometrisch-konstruktive Aktivierung der Krümmung gelang es Friedrich Zollinger, mittels vergleichsweise kurzer Stäbe große bzw. größere Spannweiten als

LEISTER
PLASTIC WELDING

zum Download Leitfaden

Leitfaden
Sichere Nahtfügung von Kunststoff-Dichtungsbahnen

swiss made

Leister garantiert höchste Geräte-Zuverlässigkeit sowie einen Top-Rundum-Service.
www.leister.com

We know how.

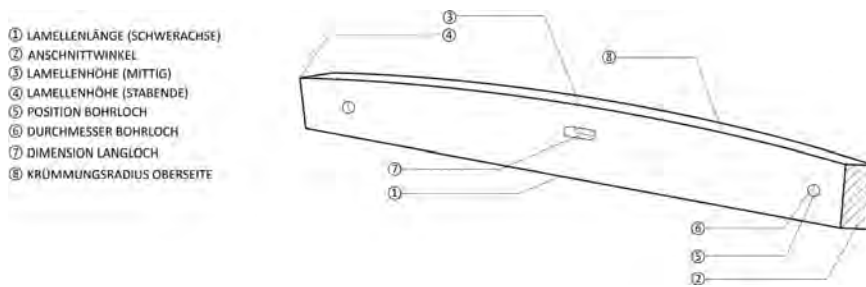


Bild 2. Lamelle mit Geometrieparametern

bisher vollkommen stützenfrei zu überspannen. Grundlage dafür ist ein primärer Lastabtrag über Druckkräfte in den Lamellen infolge der gekrümmten Form der Konstruktion und der beidseitig horizontal wirksamen Auflager. Über die Stichhöhe des Gewölbes lassen sich die inneren Kräfte zudem sehr gut steuern, sodass für die flächig gleichmäßig strukturierte Konstruktion im Normalfall relativ geringe Stabquerschnitte erforderlich waren – also auch einfache Bretter genügten.

Friedrich Zollinger stand konstruktiv vor der Aufgabe, in jedem Knotenpunkt drei stehende, rechteckige Brettquerschnitte kraftschlüssig zu verbinden. Er löste dies, indem er alle Lamellen mit einem Langloch in Stabmitte sowie je einer Bohrung und schiefwinkligen Schifterschnitten an den beiden Stabenden versah. Bei einer versetzten Anordnung der anstoßenden Lamellen am Knoten genügte so ein einfacher Schraubenbolzen, um alle drei Hölzer zu verbinden. Die in den Lamellen wirkenden Normalkräfte wurden somit in der Verbindung über Kontaktpressung am Schifterschnitt und einen indirekten Rückhängeeffekt mittels des Bolzens übertragen.

Friedrich Zollinger bekam für seine Konstruktionsidee im Jahr 1923 ein Patent zugesprochen. Das im Kern aus lediglich zwei spiegelsymmetrischen Brettlamellen und einem Schraubenbolzen bestehende Bausystem definiert ein Meisterstück der Standardisierung. Neben den geringen Stückkosten durch die Herstellung in großen Mengen ließen sich im Fertigungsprozess sogar kurze Restholzquerschnitte verwenden, was die Wirtschaftlichkeit weiter steigerte. Dazu konnte die Montage auf der Baustelle von ungelernten Hilfskräften ausgeführt werden.

Unser Weg zu Friedrich Zollinger

Das Zollinger-Prinzip kam in den vergangenen Dekaden nur noch für Sonderbauten und Prestigeobjekte zur Anwendung. Im Gegensatz dazu prägt die zweite große Innovation der 1920er-Jahre, das „Leimholz“ (heute: Brettsperrholz) von Otto Hetzer den Holzbau bis heute nachhaltig. Wie konnte es dazu kommen und welche Alternativen bieten sich dem Struktur-Holz-Leichtbau heute?

Den Einstieg der Leipziger Forscher in das Thema Zollinger markierte eine Exkursion mit Studierenden nach Berlin im Herbst 2013. Ziel der Reise war eine Scheune aus dem Jahr 1923 in einer heute kulturell und gastronomisch genutzten, ehemaligen Fourage-Handlung in Berlin-Wannsee. Das denkmalgeschützte Zollinger-Dach der Halle mit ca. 12 m freier Spannweite ist aus Brettlamellen in den Abmessungen ca. 2.500 mm × 23 mm × 230 mm (L × B × H) konstruiert und trotz seit über 90 Jahren allen äußeren Einwirkungen.

Aus der Faszination dieser ebenso einfachen wie eleganten Konstruktion erwuchs ein studentisches Projekt außerhalb des regulären Studienprogramms. Darin beschäftigten sich angehende Architekten und Bauingenieure mit der selbst gestellten Aufgabe, ein großmaßstäbliches Modell einer Zollinger-Konstruktion zu konzipieren, zu planen und zu bauen. Die digitalen Möglichkeiten der Gegenwart nutzend, entstand ein parametrisches digitales Modell, bei dem sowohl die Spannweite, die Breite, der Stich als auch die Strukturdicke variable Parameter darstellen. Aus dem Digitalmodell konnte die konstruktive Geometrie aller Bauteile abgeleitet werden. Diese diente als Grundlage für die Fertigung der Lamellen in den Werkstätten der Hochschule. Anschließend wurde die Konstruktion in der Versuchshalle der HTWK Leipzig montiert und verschiedenen Belastungstests unterzogen.

Unter dem Projekttitel ZoLinkR fanden die Realisierung des Versuchsbogens, Geometriestudien, der Bau spezieller Werkzeuge für die Fertigung der Lamellen, tieferer Einblick in das Tragverhalten durch Versuche sowie das Sammeln von Erfahrungen zum Aufbau der Struktur statt. Die Präsentation des Versuchsbogens auf der DENKMAL-Messe 2016 in Leipzig brachte der Forschungsgruppe FLEX eine Goldmedaille für „Herausragende Leistungen in der Denkmalpflege in Europa“ ein. Diese motivierte das Team zur Intensivierung der praktischen Forschungsarbeit am Thema.

Nachgiebigkeit und Montage

Im Ergebnis der zuvor dargestellten, grundlegenden Auseinandersetzung mit der Zollinger-Konstruktion und ihren Eigenschaften konnten zwei wesentliche Schwachpunkte herausgearbeitet werden, die bisher eine breitere Anwendung entscheidend verhinderten.



Bild 3. Belastungstests am ZoLinkR. Versuchsbogen mit sandgefüllten Eimern

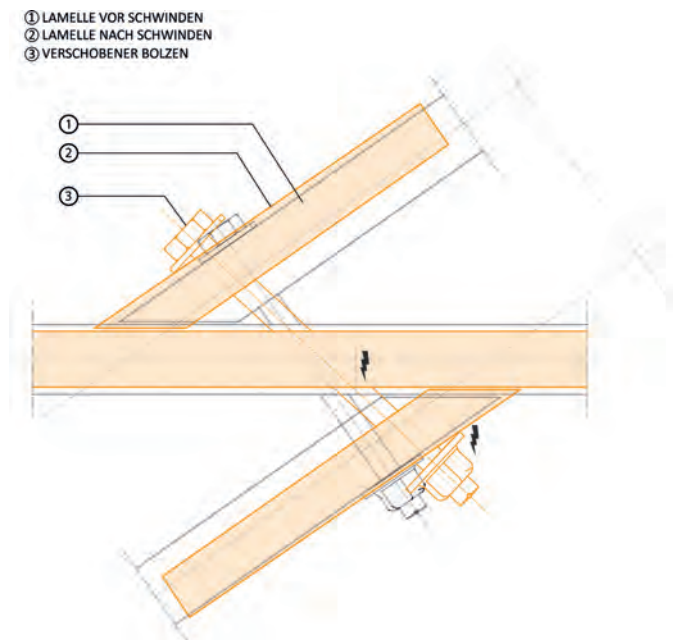


Bild 4. Prinzipdarstellung der Auswirkungen des Schwindens auf die Zöllinger-Verbindung. An den markierten Stellen treten Spannungsspitzen auf

Zum einen markiert die von Friedrich Zöllinger konzipierte Knotenverbindung nach heutigen Maßstäben eine entscheidende statisch-konstruktive Schwachstelle der Dachkonstruktion. Ursächlich verantwortlich dafür sind drei Dinge: Zum einen führt das Schwinden des Holzes zu einer Lockerung der Verschraubung. Zum anderen lösen die exzentrischen Stabanschlüsse zusätzliche Beanspruchungen im Kontaktbereich aus. Darüber hinaus drückt sich der Verbindungsbolzen aus Stahl insbesondere bei Kraftwirkung rechtwinklig zur Faser in die Holzstruktur ein. Die unerwünschten lokalen Verformungen addieren sich im Kontext der großen Anzahl von Verbindungsstellen und führen zu häufig zu nicht tolerablen Deformationen der Gesamtkonstruktion.

Der zweite große Nachteil der Konstruktion ist wirtschaftlicher Natur. Eine genauere Analyse der gesamten Prozesskette von der Planung bis zur Fertigstellung des Daches offenbarte den dominanten Einfluss des Gerüstbau- und Montagezeitaufwands auf der Baustelle. Das geniale Konstruktionsprinzip ist somit auf gewisse Art und Weise ein Opfer der wirtschaftlichen Randbedingungen und ihrer geschichtlichen Entwicklungen. Stark vereinfacht formuliert ist die Konstruktion gemäß dem Prinzip „Arbeit ist teurer als Material“ zu kostenträchtig und zu langsam – insbesondere aufgrund der händischen Montage.

Der Mikroversatzknoten

Zumeist projektbezogene Weiterentwicklungen des Zöllinger-Prinzips in der jüngeren Vergangenheit zielten i. d. R. auf eine biegesteife Verbindung der Lamellen ab. Im Ergebnis wurden meist sehr aufwendig herzustellende Konzepte mit hohem Stahlanteil realisiert. Diese führen zwar zu höheren Tragfähigkeiten und beeindruckenden Tragwerken, ziehen aber ebenfalls einen hohen Fertigungsaufwand nach sich.

Die Idee der Leipziger Wissenschaftler basiert im Gegensatz dazu darauf, das zimmermannsmäßige Prinzip des

Formschlusses zur materialgerechten Kraftübertragung zu nutzen. In Überlagerung mit der Verwendung technisch getrockneter Hölzer und Nutzung numerisch gesteuerter Abbundmaschinen entstand das Verbindungskonzept des Mikroversatzknotens. Dieses eliminiert die zuvor beschriebenen konstruktiven Schwachstellen des traditionellen Zöllinger-Prinzips. Gleichsam sichert es die Ressourceneffizienz, das geringe Transportvolumen und die geometrische Adaptierbarkeit der Holzleichtbaukonstruktion und nutzt schlussendlich die Potenziale des NC-gesteuerten Abbunds mit seiner Präzision und großen formalen Vielfalt.

Die konstruktive Ausformulierung des Verbindungskonzepts basiert auf der Integration eines Stirnversatzes in die Geometrie der Brettrippen. So werden die Stabenden der Brettlamellen mit einem „gebrochenen“ Schifterschnitt nach der Art eines Stirnversatzes bearbeitet. Eine im Bereich der Stabmitte mit Längsversatz in beide Seitenflächen der Lamellen eingearbeitete Kerbe bildet die zugehörige Negativ-Form. Aufgrund des geringen Querschnitts der Brettlamellen ist dabei ein Maßstabssprung erforderlich. Die Einschnitttiefe der Kerbe beträgt im Regelfall nur einige Millimeter. Metallische Verbindungsmittel sind lediglich zur Lagesicherung und zum Querkraftabtrag notwendig. Durch die formschlüssige Fügung gelingt eine direkte Kraftübertragung im Holz-Holz-Kontakt.

Zur konsequenten digitalen Planung wurde eine durchgängige digitale Systembeschreibung entwickelt. Sie basiert auf nur drei Eingabeparametern zur Erzeugung der


lindab | vereinfachtes Bauen



Die Dachrinnen vom skandinavischen Marktführer jetzt auch in Deutschland!

Bekennen Sie Farbe mit den Dachrinnen von Lindab

- Erhältlich in 13 Farbtönen
- Langlebige Oberflächenbeschichtung
- Aus robustem und witterungsbeständigem Stahl
- Beständig gegenüber Bitumensäuren, Gerbsäuren, Säuren aus Kunststoffbahnen



Lindab

www.lindab.com

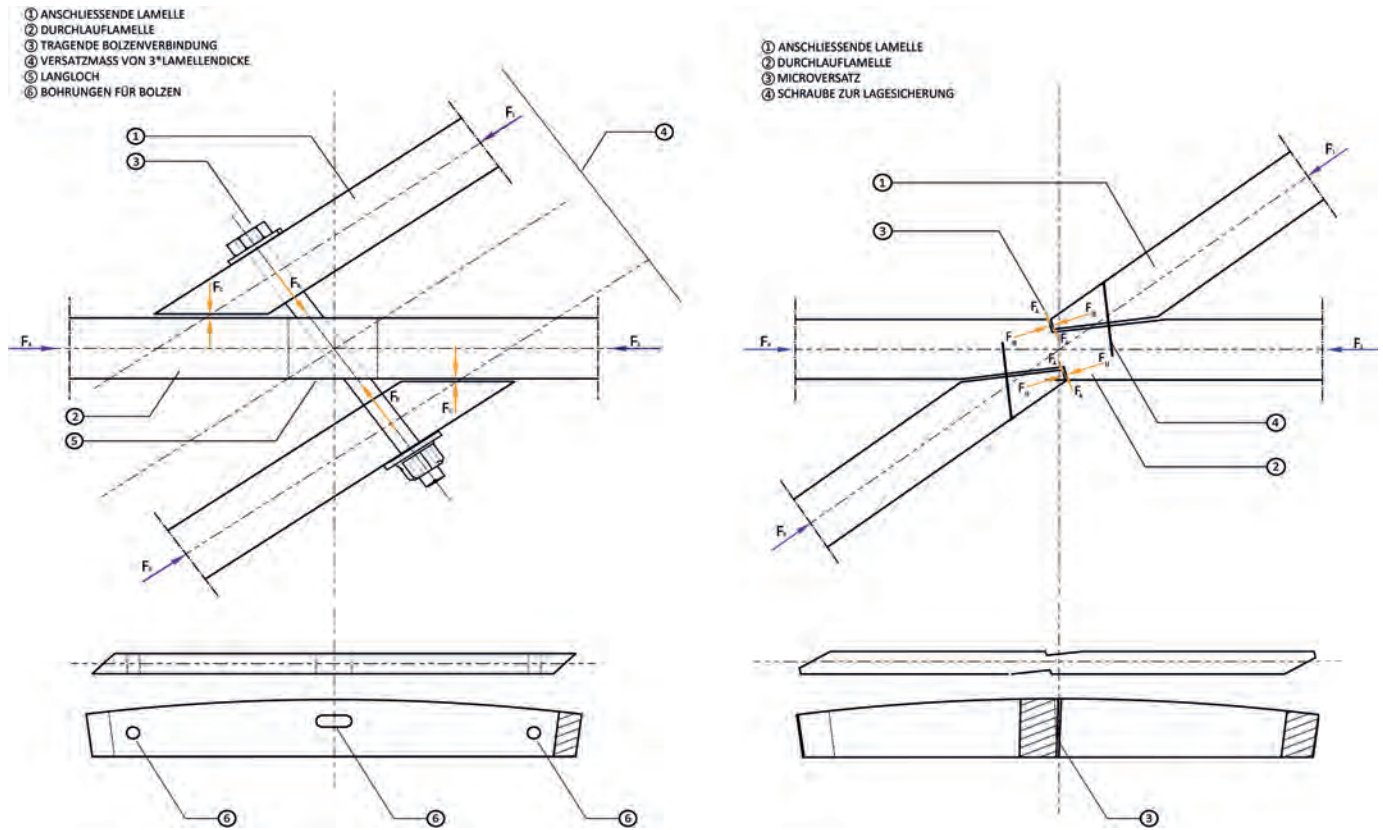


Bild 5. Prinzipdarstellung des Mikroversatz-Knotens im Vergleich zur traditionellen Zöllinger-Verbindung

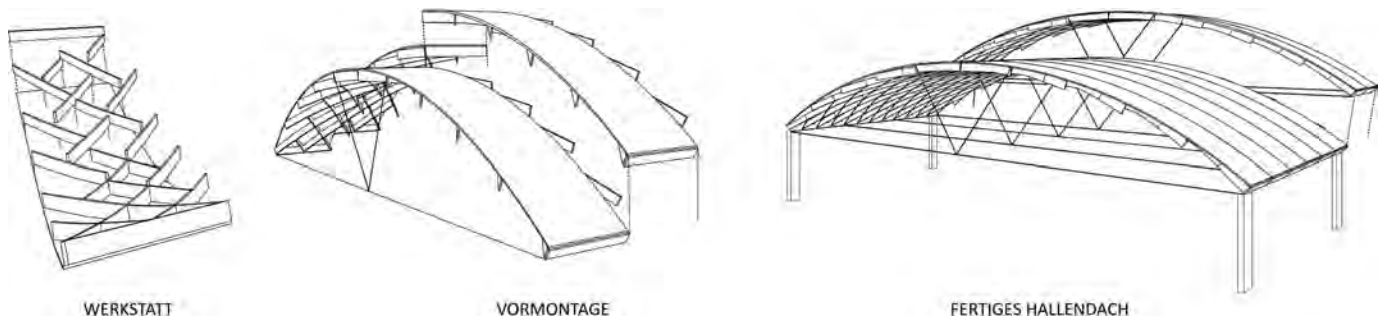


Bild 6. Systemansatz zum Bau von Tonnendächern aus Bogendachsegmenten

Systemachsen und wenigen, wahlweise automatisierbaren Angaben zur Dimensionierung der Bauteile und Verbindungsdetails. Im Ergebnis können native Daten zur Ansteuerung der Abbundmaschinen generiert werden. Diese bilden die Grundlage für einen automatisierten Fertigungsprozess und das effiziente sowie geometrisch präzise Herstellen der Lamellen. Neben den statischen Vorteilen wird die Montage der Dachkonstruktion durch den innovativen Mikroversatzknoten deutlich vereinfacht, da die Einbaulage der Lamellen durch den Versatz eindeutig definiert ist. Beim Einbau der hochpräzise gefertigten Bauteile stellt sich die richtige Geometrie der Konstruktion quasi „von selbst“ ein.

Zwei im Rahmen des Forschungsprojekts durchgeführte Versuchsreihen zur Überprüfung des Basiskonzepts der Knoten und zur Rotationskapazität der Verbindung zeigten zudem, dass die neuartige Knotenverbindung ein wesentlich homogeneres Verformungsverhalten bei einer signifikanten Erhöhung der Bruchlast aufweist als die Kon-

struktion mit dem herkömmlichen Knoten. Im Versuchsmaßstab konnte die Versagenslast immerhin fast verdoppelt werden!



Bild 7. Herstellen der Segmente unter Werkstattbedingungen

Das gekrümmte Dachelement

Die Vorfertigung von Bauteilen unter Werkstattbedingungen wird im Holzbau seit Jahrhunderten praktiziert. Durch die stetig wachsenden Möglichkeiten des modernen Straßentransports konnte das Prinzip auf Bauelemente ausgeweitet werden. Die Tafelbauweise für Wand- und Deckenelemente definiert dabei den Stand der Technik. Die Adaption dieser Kompetenzen rund um Vorfertigungs- und Montageprozesse auf gekrümmte Dachelemente beschreibt die Grundüberlegung für ein weiteres Forschungsprojekt mit dem übergeordneten Ziel, die wirtschaftlichen Defizite des Zollinger-Konstruktionsprinzips signifikant zu reduzieren.

Die Kernidee des Projekts bestand darin, die kreisbogenförmige Dachkonstruktion in Segmente zu gliedern, die unter Werkstattbedingungen vorgefertigt werden können sowie gestapelt einfach zu transportieren und auf der Baustelle schnell und gerüstfrei zu montieren sind. Die geometrischen Limitierungen des Straßentransports definieren dabei die maximale Größe der Elemente. Mit zwei gegenüberstehenden Bogendachsegmenten sollten somit Hallen mit Spannweiten von 27 m ohne Sondertransporte realisierbar sein.

Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und der Nachhaltigkeit orientiert das Konzept auf die Verwendung nicht verleimter Querschnitte für die Lamellen sowie großformatiger Holzwerkstoffplatten aus Stab- oder Stäbchensperholz (Tischlerplatte) für die Dachschalung. Das von der For-



Bild 8. Belastungstests auf der Baustelle (Fotos/Grafiken: HTWK Leipzig, Forschungsgruppe FLEX)

schungsgruppe entwickelte parametrische Konstruktionsmodell wurde dementsprechend um den Segmentierungsansatz erweitert. Auf der Basis der damit zur Verfügung stehenden vollständigen digitalen Strukturbeschreibung konnten Datensätze für die Fertigung der Lamellen und den Zugschnitt der Dachschalung generiert werden. In verschiedenen Entwicklungsschritten wurden daraufhin unterschiedliche Varianten zum Zusammenbau der Fertigteilelemente konzipiert und in Werkstattversuchen evaluiert.

Die Evaluierung und Kalibrierung eigens entwickelter statischer Rechenmodelle erfolgte im Rahmen zweier Ver-



Lichtkuppeln
essertop® eckig



Lichtkuppeln
essertop® rund



Lichtbänder
esserlux®



Flachdachfenster
essersky® eckig



Flachdachfenster
essersky® rund



Rauch- und Wärme-
abzüge fumilux®



Jugendclub „Betonoase“ Berlin | Gruber + Popp Architekten
Foto: Alexander Blumhoff

TAGESLICHT- UND RAUCHABZUGSYSTEME

für Industrie-, Büro-, Gewerbe- oder Wohngebäude

- ✓ Passgenaue Komplettprodukte für Neubau und Sanierung im Bestand
- ✓ Höchste Energieeffizienz nach EN 1873:2014
- ✓ Planungssicherheit durch zertifizierte Systeme
- ✓ Professionelle Beratung, Montage und Wartung



ESSERTEC GmbH, Neuss
Telefon 02131 183-0, info@essertec.de
www.essertec.de

suchsreihen. Für die erste Serie wurde auf der Baustelle ein Belastungsversuch an einem aus drei Dachsegmenten zusammengesetzten Demonstrator mit ca. 6 m × 6 m Grundfläche durchgeführt. Mit Hilfe von Sandsäcken konnten dabei unterschiedliche, auch ungleichmäßig verteilte Einwirkungen simuliert werden. Die gemessenen Vertikalverformungen bestätigten die rechnerischen Simulationen im Grundsatz und lagen erfreulicherweise alle auf der „sicheren Seite“.

Um den Einfluss unterschiedlicher Dachschalungen auf die Tragfähigkeit der Zollinger-Konstruktion zu untersuchen, wurden im Anschluss unter Laborbedingungen an einem größeren Modell mit größeren Stabquerschnitten diverse Tests ausgeführt. Qualitativ konnte dabei das bedeutende Potenzial einer mittragenden Dachschale nachgewiesen werden. Erwähnenswert ist weiterhin die große Redundanz des Systems, die zu einem äußerst gutmütigen Bauteilversagen führte. Die umfangreichen Versuchsergebnisse werden derzeit detailliert ausgewertet.

Dank

Das Forschungsprojekt „Entwicklung einer Mikroversatz-Knotenverbindung für Brettriipenkonstruktionen zur Realisierung ressourceneffizienter, verformungsarmer und vollständig recycelbarer Hallentragwerke (MVK)“ wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) im Rahmen der Förderlinie ZIM gefördert und in Zusammenarbeit mit den Praxispartnern STRAB Ingenieurholzbau Hermsdorf GmbH und Lehmann – Block & Partner Ingenieurgesellschaft mbH (LBP) aus Erfurt realisiert.

Das Forschungsprojekt „Gekrümmte Hallendächer aus Holz – Ressourceneffizient, Flexibel, Recycelbar (ReFlexRoof)“ wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der Förderlinie KMU-innovativ gefördert und in Zusammenarbeit mit den Praxispartnern STRAB Ingenieurholzbau Hermsdorf GmbH und DSH Ingenieure GmbH aus Halle (Saale) realisiert.

Die Forschungsgruppe FLEX der HTWK Leipzig bedankt sich bei den Fördermittelgebern und Projektträgern (AiF und PtJ) sowie bei den o.g. Praxispartnern für die inspirierende und produktive Zusammenarbeit.

Literatur

- [1] Zollinger, Friedrich: Raumabschließende, ebene oder gekrümmte Bauteile. Patent Nr. 387469.
- [2] Zimmermann, Florian (Hg.): Das Dach der Zukunft: Zollinger Lamellendächer der 20er Jahre; Konstruktion, Statik, Ästhetik, Verbreitung, Nachfolge, Beispiele in Bayern. München: FH München 2003.

- [3] Winter, Klaus; Rug, Wolfgang: Innovationen im Holzbau – Die Zollinger-Bauweise. In: Bautechnik, Bd. 4, 1992. S. 190–197.
- [4] Kersten, Carl: Freitragende Holzbauten: ein Lehrbuch für Schule und Praxis, 2. Aufl. Berlin 1926.
- [5] Gesteschi, Theodor; Otzen, Robert: Der Holzbau: Grundlagen der Berechnung und Ausbildung von Holzkonstruktionen des Hoch- und Ingenieurbaues. Berlin 1926.
- [6] Meschke, Hans-Jürgen: Baukunst und -technik der hölzernen Wölbkonstruktionen: vom Bogentragwerk zum Stabnetzwerk. Diss. Technische Hochschule Aachen 1989.
- [7] Rug, Wolfgang: Teil II: 100 Jahre Holzbau und Holzbau-forschung. In: 100 Jahre Bund Deutscher Zimmermeister: 100 Jahre Verband, Holzbau, Holzbau-forschung 1903–2003, 1. Aufl., Bund Deutscher Zimmermeister (Hg.), Karlsruhe 2003, S. 412.
- [8] Krabbe, Elmar; Niemann, Hans-Jürgen: Tragverhalten eines hölzernen Zollbau-Lamellendaches am Beispiel der Halle Münsterland. Bauing. Richtungsweisende Z. Im Bauing., Nr. 58, 1983. S. 277–284.
- [9] Dijoux, Cristoph; Stahr, Alexander; Franke, Lukas; Heidenreich, Christian: Parametric Engineering of a Historic Timber-Gridshell-System. In: Proceedings of the IASS Symposium 2017. Hamburg 2017.
- [10] Franke, Lukas; Stahr, Alexander; Dijoux, Cristoph; Heidenreich, Christian: How Does the Zollinger Node Really Work? In: Proceedings of the IASS Symposium 2017. Hamburg 2017.
- [11] Kloft, Harald: Aspekte nachhaltigen Bauens. Ressource Bauwerk. In: db deutsche bauzeitung, 30. Juni 2010. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.db-bauzeitung.de/db-themen/db-archiv/ressource-bauwerk/>. [Zugegriffen: 28. März 2017].
- [12] Schlaich, Mike; Stavenhagen, L.; Krüger, G.: Die Hanse-Messe in Rostock – Zollinger mit moderner Technik. In: Bautechnik, Bd. 80, Nr. 5, 2003, S. 279–284.
- [13] Hetzer, Otto: Gebogenes Holzbauteil. DRP. 197773, 1906.
- [14] Hetzer, Otto: Träger aus mehreren Lamellen. DRP. 3239912, 1920.

Weitere Informationen:

Prof. Dr.-Ing. Alexander Stahr
 Tel. (0341) 30 76-62 63, alexander.stahr@htwk-leipzig.de
 Cristoph Dijoux, M.Sc.
 Tel. (0341) 30 76-86 70, cristoph.dijoux@htwk-leipzig.de
 Martin Dembski, M. Sc.
 Tel. (0341) 30 76-86 70, martin.dembski@htwk-leipzig.de
 HTWK Leipzig, Forschungsgruppe FLEX
 Karl-Liebknecht-Straße 132, 04277 Leipzig
flex.htwk-leipzig.de

Lukas Franke, M.Sc. (ehemals Forschungsgruppe FLEX)
 König und Heunisch Planungsgesellschaft mbH Leipzig
 Sebastian-Bach-Straße 4–6, 04109 Leipzig
 Tel. (0341) 462 39-0, www.khp-leipzig.de