



Abbildung 1: Denkmalgeschütztes Scheunendach mit Zollinger-Konstruktion

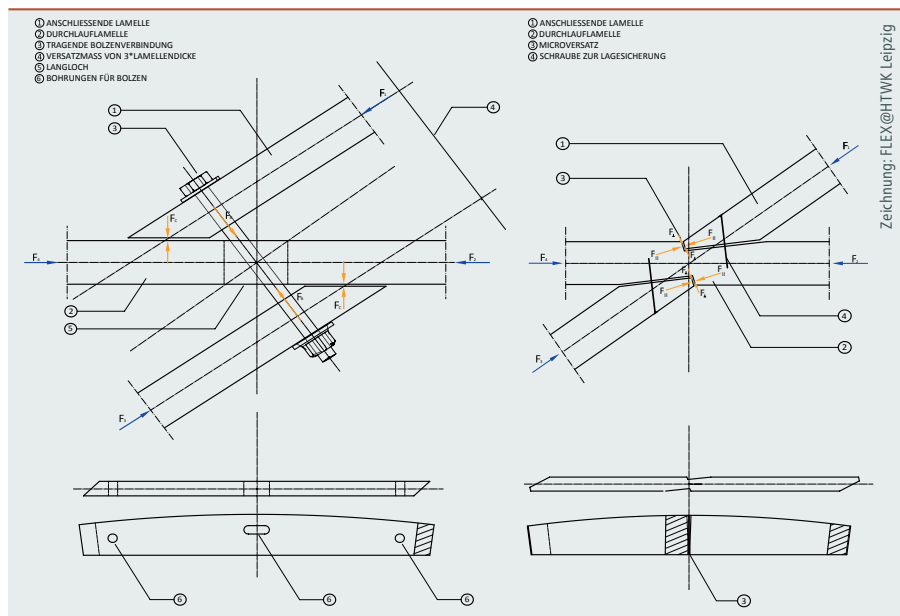
Der Mikroversatzknoten – eine innovative Holzverbindung

Zollinger-Dach Kann eine (fast) in Vergessenheit geratene Konstruktion dank der Möglichkeiten der Digitalisierung ein Comeback erleben? Sie kann! Das ressourceneffiziente Konstruktionsprinzip zum Bau freispannender Dächer von Friedrich Zollinger definiert seit vier Jahren eine wissenschaftliche Herausforderung für die interdisziplinäre Forschergruppe FLEX an der HTWK Leipzig. Die Architekten und Ingenieure haben in zwei Forschungsprojekten in Zusammenarbeit mit Partnern aus der Praxis Lösungen entwickelt.

Alexander Stahr, Cristoph Dijoux, Lukas Franke, Matthias Tremel, Jürgen Bialozyt

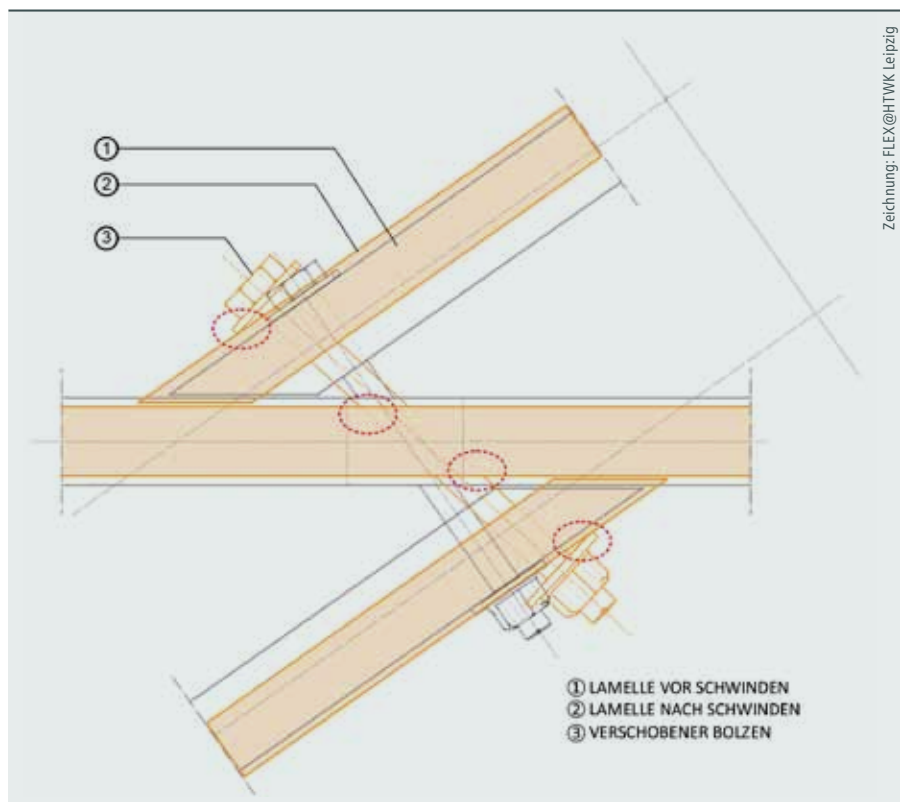


Bild: FLEX@HTWK Leipzig



Zeichnung: FLEX@HTWK Leipzig

Abbildung 2: Der Mikroversatzknoten (rechts) im Vergleich zur traditionellen Zollinger-Verbindung.



Zeichnung: FLEX@HTWK Leipzig

Abbildung 3: Prinzipdarstellung der Auswirkungen des Schwindens auf die Zollinger-Verbindung. An den markierten Stellen treten Spannungsspitzen auf.

Das Zollinger-Konstruktionsprinzip

Die Zollinger-Bauweise ist ein Exot unter den Holzkonstruktionen. Benannt ist sie nach ihrem Erfinder Friedrich Zollinger, der sich das Bauprinzip 1923 mit einem Reichspatent schützen ließ [1]. Angesichts einer nach heutiger Deutung strengen Materialknappheit war die Hauptintention des Merseburger Stadtbaurats die Schaffung einer holzsparenden, effizient abzubindenden und leicht zu montierenden Konstruktion für Hausdächer. Sie fügte sich so ideal in die damaligen Verhältnisse und fanden rasch eine weite Verbreitung in ganz Deutschland [2].

Die Zollinger-Konstruktion umfasste ein äußerst hohes Maß an Gleichteilen. Sie stellt ein Musterbeispiel für die Standardisierung einer baulichen Konstruktion dar.

Für ein Dach waren lediglich zwei spiegelbildlich zugeschnittene, sogenannte „Lamellen“-Typen sowie halbierte Lamellen an Traufen und Ortgängen erforderlich.

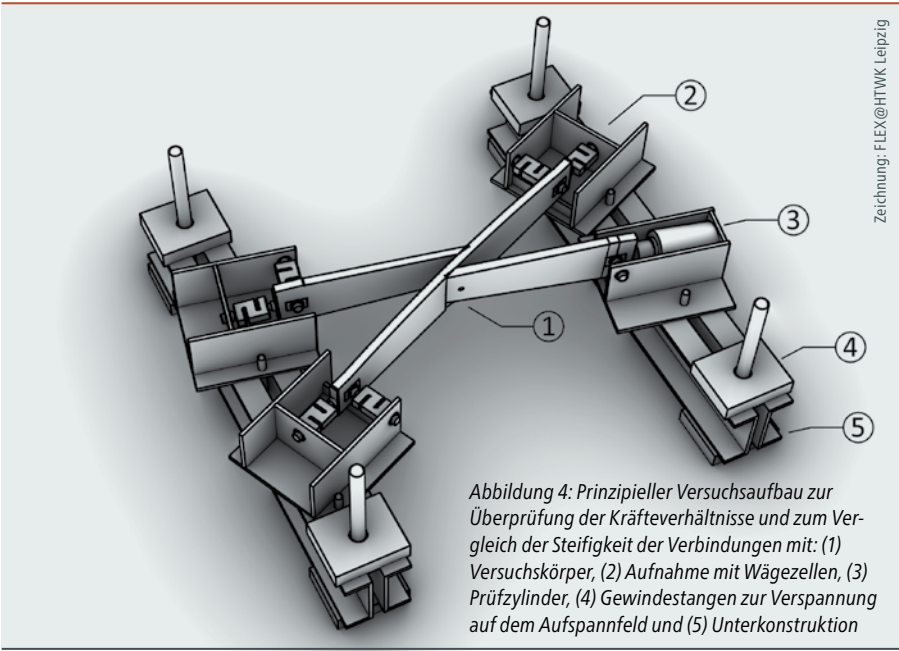


Abbildung 4: Prinzipieller Versuchsaufbau zur Überprüfung der Kräfteverhältnisse und zum Vergleich der Steifigkeit der Verbindungen mit: (1) Versuchskörper, (2) Aufnahme mit Wägezellen, (3) Prüfcylinder, (4) Gewindestangen zur Verspannung auf dem Aufspannfeld und (5) Unterkonstruktion

Durch Schifterschnitte an den Stabenden und einen bogenförmigen Schnitt an den Oberseiten entsteht die kreisbogenförmige Krümmung der Dachkonstruktion (siehe Abb. 1).

In jedem Knotenpunkt des Flächentragwerks sind somit drei schiefwinklig ausgerichtete Brettquerschnitte kraftschlüssig zu verbinden. Die dafür verwendeten Schraubenbolzen waren zur Zeit der Entwicklung und Patentierung des Bausystems schon in großem Umfang verfügbar. Sie markieren im bauzeitlichen Sinne eine weitere Innovation und sind das Herzstück der Konstruktion. Einerseits ermöglichen und garantieren sie die Einfachheit der Montage auf der Baustelle. Andererseits sind sie in Wechselwirkung mit dem Holz die Ursache der nachfolgend beschriebenen, grundlegenden mechanisch-statischen Schwachpunkte der Bauweise [4]–[7].

Tabelle

Bemessungsmodell		V1	V2	V3	V4
Rippenabmessungen im Anschlussbereich	h/b [mm/mm]	300/80	240/80	240/60	200/80
Anschlusswinkel	ϕ [°]	50	50	50	50
Schrauben	[–; mm; mm]	6Ø8×120	7Ø6×120	7Ø6×100	3Ø8×120
Versatztiefe	t_v [mm]	15	15	15	15
Bemessungswiderstände	N [kN]	46,2	37,0	37,0	30,9
	V [kN]	17,5	12,2	12,2	8,7
	M [kNm] *	1,73	1,04	1,04	0,84

* M für 50% N und 90% V

Tabelle 1: Bemessungswiderstände an der Verbindung (N und V) und die dabei aufnehmbaren Momente (M) bei maximal möglicher Schraubenzahl

Dieses stringente konstruktive Prinzip senkte die Stückkosten für die Lamellen erheblich und war Grundvoraussetzung für deren wirtschaftlich effiziente Herstellung. Sowohl aus baukonstruktiver als auch aus bautechnologischer Sicht bedeutete die Konstruktionsidee Zollingers einen bedeutsamen Schritt nach vorn. Sie bedeutete eine Abkehr vom Jahrhunderte alten Prinzip der parallelen beziehungsweise orthogonalen Anordnung langer Hölzer in hierarchisch organisierten Primär- und Sekundärstrukturen, wie Dachstuhl und Dachsparren. Zollinger gelang es, mit vergleichsweise kurzen, schiefwinklig gestoßenen Brettern große Spannweiten stützenfrei zu überbrücken.

Nach Ansicht der Autoren stellt seine Dachstuhlkonstruktion, die später auch bei Hallen mit großen Spannweiten angewendet wurde, heute nach wie vor die wohl am häufigsten zur Anwendung gekommene Bauweise für gekrümmte Flächentragwerke überhaupt dar. Zur Orientierung mögen die 1.250 Wohnungen im Zollbauverfahren dienen, die allein zwischen 1922 und 1929 durch die Merseburger Baugesellschaft errichtet wurden [3]. Das Grundprinzip der Konstruktion gleicht einer Auffächerung eines De l’Orme’schen Bogens. So bilden stehende Lamellen, die wechselweise in ihrer Mitte gestoßen werden, ein rautenförmiges Netz.

Flaschenhals Knotenverbindung

Äußere Einwirkungen bewirkten elastische Verformungen in jeglichen Konstruktionen und Bauteilen. Bei Holzkonstruktionen überlagern sich diese mit den zusätzlichen Langzeitdeformationen, die infolge des Kriechens auftreten. Darüber hinaus verursachen Quellen und Schwinden der Holzbauteile im besonderen Fall der Zollinger-Konstruktion eine Relativverschiebung der anstoßenden Lamellen in den Knoten: Sie „rutschen nach“. Dies hat insbesondere aufgrund der großen Knotenzahl zur Folge, dass die Bogenkonstruktion sich immer weiter senkt, was wiederum zu einer Erhöhung der inneren Beanspruchungen der Bauteile und einer weiteren Zunahme der Deformationen führt. Neben den zuvor beschriebenen material-spezifischen Zusammenhängen besitzt das primär unter konstruktiven Gesichtspunkten entworfene Verbindungskonzept Zollingers einen weiteren, im statisch-mechanischen Sinne essenziellen Nachteil (siehe Abbildung 2). Zunächst ist leicht erkennbar, dass sich die Lamellenachsen und damit die Wirkungslinien der darin wirkenden Druckkräfte nicht in einem Punkt schneiden. Die Kräfte F1 und F3 können daher selbst bei gleicher Kraftgröße nicht im Gleichgewicht stehen, denn sie weisen einen Versatz zum Knotenmittelpunkt auf. Das daraus resultierende Moment erzeugt zusätzliche Beanspruchungen in den Endbereichen der Lamellen.

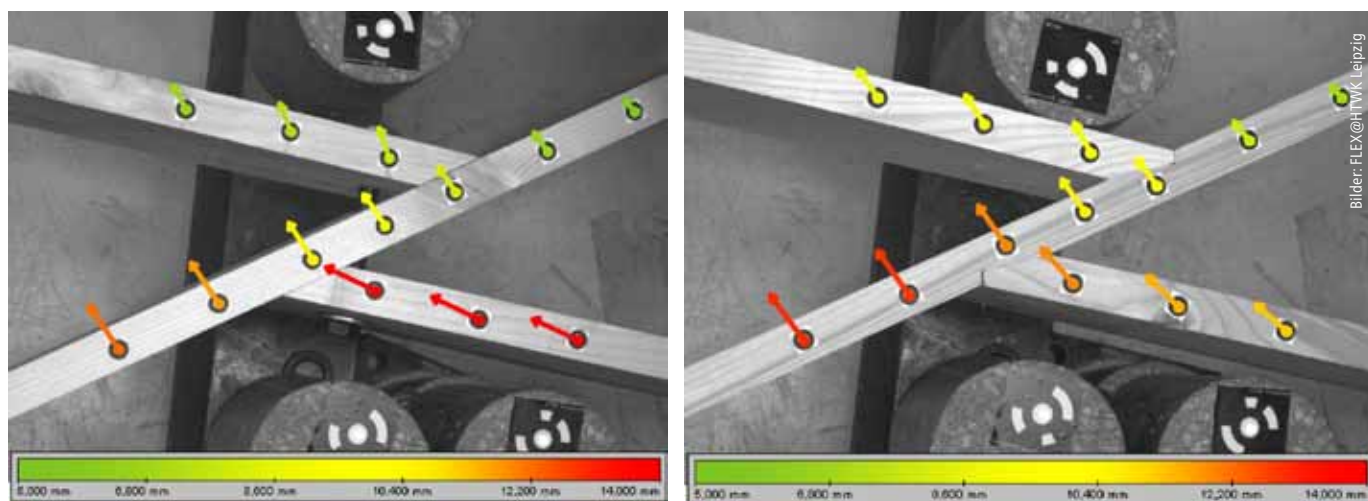


Abbildung 5: Verformungen der Zollinger- und MVK-Versuchskörper unter 8 kN beziehungsweise 10 kN Lasteintrag

Die in den Lamellen L1 und L3 wirkenden Normalkräfte F_1 und F_3 können am schrägen Kontaktstoß nicht übertragen werden. Dort ist lediglich eine Übertragung von F_C (orthogonal zu L2) möglich, da der Reibungswiderstand zwischen den Lamellen zu gering ist, um ein Kräftegleichgewicht zu ermöglichen. Daraus folgt im Wesentlichen, dass die Kräfte im Bolzen (FB) und am Stoß (FC) im Gleichgewicht zur Normalkraft (F_1) stehen müssen. Die Normalkraft wird also indirekt über einen Rückhängeeffekt übertragen. Dieser führt dazu, dass die Kräfte FB und FC deutlich größer als die eigentlich zu übertragende Kraft sind! Diese schräg und quer zur Faserichtung des Holzes wirkenden Kräfte haben große lokale Beanspruchungen am Knoten zur Folge – verstärkt durch den Steifigkeitsprung zwischen dem Stahl des Schraubenbolzens und dem Holz der Lamellen.

Die Knotenverbindung Friedrich Zollingers ist somit nach heutigen Maßstäben eher von minderer Qualität. Die vorgenannten Zusammenhänge blieben bei Hausdächern mit geringen Spannweiten meist folgenlos. Bei mehreren weitspannenden Hallendächern führten sie jedoch bis zum Versagen der Konstruktion. Krabbe und Niemann haben diesen Umstand am laut ihnen größten jemals gebauten „Zollinger“, dem Dach der Münsterlandhalle von 1947, ausführlich dokumentiert [8]. So erreichten die stetig anwachsenden Setzungen im Jahre 1981 ein maximales Maß von 70 cm, sodass zum Erhalt der historischen Konstruktion ein Stahlfachwerk errichtet und die Holzkonstruktion daran aufgehängt werden musste.

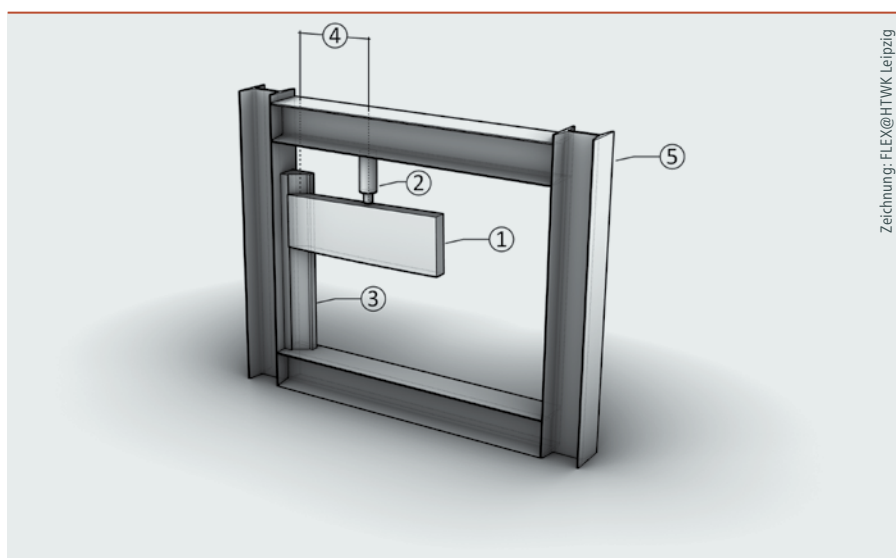


Abbildung 6: Prinzip des Versuchsaufbaus zur Rotationskapazität des MVK mit (1) Prüfkörper, (2) Prüfzylinder, (3) repräsentativer Verbindungssituation, (4) veränderlichem Lastenleitungspunkt und (5) steifem Stahlrahmen

Ein neuer Ansatz für eine materialgerechte Verbindung

Basierend auf der zuvor beschriebenen, eingehenden Analyse des Konstruktionsprinzips wurde eine Verbindung konzipiert, die versucht, die positiven Aspekte der Knotenverbindung zu bewahren respektive zu stärken und deren Nachteile zu eliminieren. Die von den Leipziger Forschern auf den Namen „Mikroversatzknoten“ (MVK) getaufte Idee fußt auf drei Grundlagen:

- der Verwendung technisch getrockneter Hölzer mit deutlich reduzierte Schwindverformungen
- der Nutzung des Formschlussprinzips zur materialgerechten Kraftübertragung

- der Präzision numerisch gesteuerter Abbundmaschinen

Die Jahrhunderte alte konstruktive Typologie des zimmermannsmäßigen Stirnversatzes wurde dabei maßstäblich skaliert und auf die Dimensionen der Brettlamellen abgestimmt. In Bezug auf den Abbund bedeutet dies die Notwendigkeit von im Mittelbereich angeordneten Kernen mit geringer Einschnitttiefe. Passend dazu erfolgen zusätzliche, gegenläufige Schifter Schnitte an den Brettenden. Der Bolzen kann als kraftübertragendes Bauteil entfallen, da die in den Lamellen wirkenden Normalkräfte direkt über Kontaktpressung übertragen werden können.

Verbindungsmittel sind nun lediglich zur Weiterleitung von Querkraften (in Abb. 2 senkrecht zur Zeichnungsebene) notwendig. Zudem ist es möglich, die stoßenden Lamellen axial zum Knotenmittelpunkt auszurichten, was die Beanspruchungen der Lamellen signifikant reduziert, da Biegemomente um ihre schwachen Achsen vermieden werden. Dank der neuartigen Verbindungstechnik ist kein Setzen oder „Nachrutschen“ mehr möglich und eine dauerhafte Tragfähigkeit garantiert. Infolge der vorgenannten Veränderungen des Verbindungsprinzips ändert sich das Kräfte-spiel am Knoten maßgeblich. Abbildung 2 stellt die Situation dar und ermöglicht einen Vergleich mit dem Original-„Zollinger-Knoten“. Die einwirkenden Kräfte F_1 bzw. F_3 werden direkt an der Stirnfläche des Versatzes in Form der Komponenten F_L und $F_{||}$ übertragen. In der Ebene der „Wurzel“ der Kerne treten relativ große Schubspannungen auf. Diese können jedoch problemlos über die praktisch unendlich große Vorholzlänge abgetragen werden. Dank der im Holzbau gebräuchlichen Abbundmaschinen ist es möglich, die Lamellen effizient und äußerst genau herzustellen. Die Geometrie der Versätze kann mittels Walzenfräser mit geringen Laufzeiten realisiert werden. Der Mehraufwand für das Herstellen der Kerne und das Brechen der Schifterschnitte an den Lamellenenden wird durch das Entfallen der Bohrlöcher im Endbereich und des Langlochs im Mittelbereich der Lamellen praktisch aufgewogen. Die Abbunddaten können, dank einer algorithmischen Beschreibung der Konstruktion, sowohl im nativen .bvn-Format für die weitverbreitete Abbundmaschinen Hundegger K2i als auch in Form von CAD-Daten ohne manuelle Zwischenschritte erzeugt werden. Neben den zuvor beschriebenen 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. Für Neubauten sind dennoch größer dimensionierte Lamellen als bei den Originalkonstruktionen erforderlich. Ursächlich verantwortlich dafür sind die veränderten Ansprüche an die Sicherheit von Bauwerken sowie insbesondere normative Limitierungen in Bezug auf die Randabstände von Verbindungsmitteln zur kraftschlüssigen Befestigung der zur Aussteifung notwendigen Dachschale.

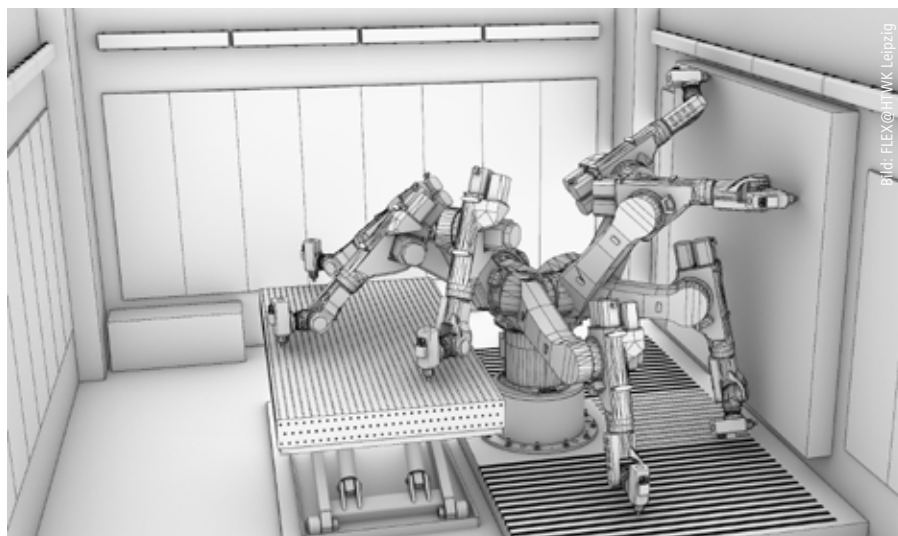


Abbildung 7: Das FLEX Smart Manufacturing Lab (SML) ermöglicht die direkte prototypische Umsetzung anwendungsbezogener Konzepte mit einem 6-Achs-Industrieroboter.

Was ist die Forschergruppe FLEX?

Die Forschungsgruppe FLEX (Forschung.Lehre.Experiment) arbeitet disziplin-, werkstoff- und technologieübergreifend an innovativen Lösungen im Überschneidungsbereich von Architektur, Bau- und Informationstechnik. Stark praxisorientiert, stehen dabei digital basierte Strategien für ressourceneffiziente Konstruktionen sowie die zugehörigen Planungs- und Fertigungsprozesse im Fokus des Interesses der Architekten sowie Bau- und Wirtschaftsingenieure. Rechnergestützte Analysen komplexer Konstruktions- und Bauteilgeometrien sowie die informationelle Modellierung von Prozessketten unter Berücksichtigung technologischer und wirtschaftlicher Randbedingungen bilden die Kernkompetenzen des Teams. In einem modern und flexibel ausgestatteten eigenen Labor (Smart Manufacturing Lab) können ab Mai 2019 prototypische Fertigungsabläufe mithilfe eines leistungsstarken Industrieroboters simuliert und getestet werden. Übergeordnetes wissenschaftliches Ziel der Forscher ist die Entwicklung adaptiver Methoden und Modelle zur signifikanten Beschleunigung baulicher Planungs- und Ausführungsprozesse bei gleichzeitiger Reduktion des materiellen Ressourcenverbrauchs auf der Basis flexibler Daten- sowie Kooperationsmodelle. Prof. Dr.-Ing. Alexander Stahr ist Gründer und Vordenker der Forschungsgruppe, die organisatorisch an der HTWK Leipzig angesiedelt ist.

flex.htwk-leipzig.de

Vergleichende Plausibilitätsprüfung im Modellmaßstab

Zur Klärung des prinzipiellen Lastabtrags und der Kräfteverteilung im Original-Zollinger-Knoten und zur Überprüfung des Konzepts des Mikroversatzknotens wurde eine Versuchsreihe konzipiert (siehe Abbildung 4). Die Querschnitte der Prüfkörper (Lamellenquerschnitt: 12,5/2 cm) orientierten sich im Maßstab 1:2 an den Dimensionen der Lamellen des rund 12 m spannenden Zollinger Daches der Mutter Fouflage in Berlin (siehe Abbildung 1). Zur besseren Vergleichbarkeit wurden die MVK-Versuchskörper mit derselben, aber prinzipiell nachteiligen exzentrischen Anordnung der Brettlamellen der historischen Konstruktion eingebaut.

Geprüft wurden je fünf Versuchskörper unter Messung der Verformungen und Kräfte mittels Fotogrammetrie, Kraftmessung an den Auflagern und dem Lasteinleitungspunkt sowie Dehnmessstreifen auf dem Schraubenbolzen im Fall der Zollinger-Verbindung. Während an den unterschiedlichen Verschiebungsrichtungen der einzelnen Bauteile bei der Zollinger-Verbindung deutlich das Nachrutschen der Lamellen beobachtet werden konnte, wies die MVK-Verbindung ein homogenes Verformungsbild auf (Abbildung 5). Zudem war diese insgesamt steifer und das Versagen trat deutlich später auf: Die mittlere Bruchlast bei der MVK-Verbindung (14,4 kN) war um das 1,8-Fache größer als bei der Zollinger-Verbindung (8 kN) [10].

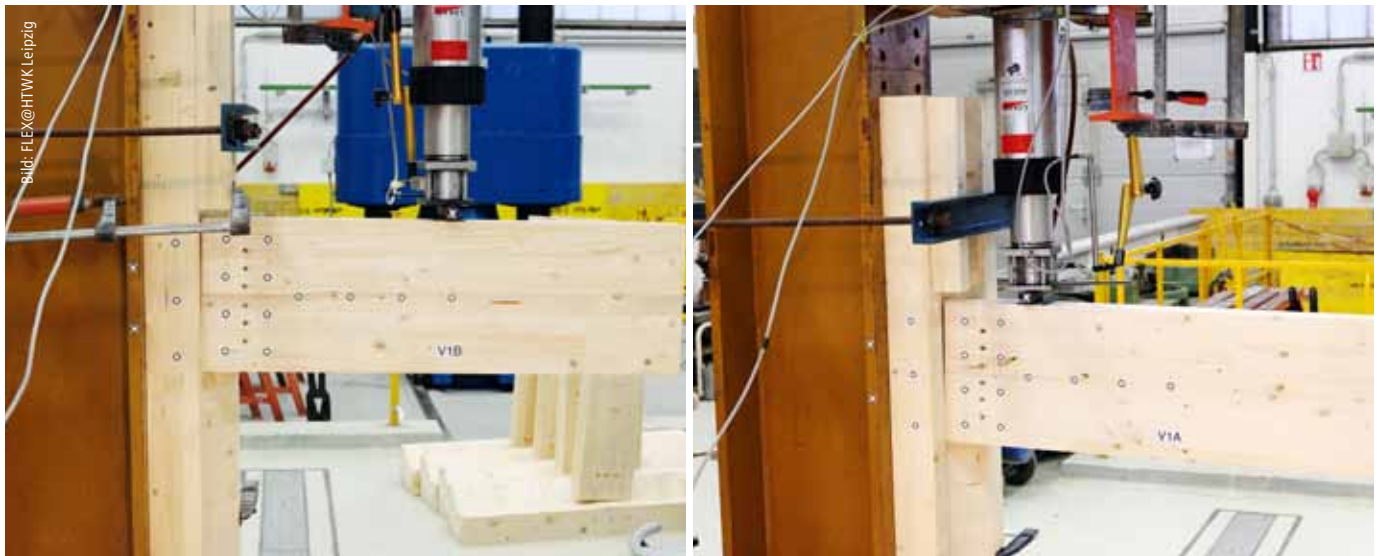


Abbildung 8: Die unterschiedlichen Lasteintragungsorte der Varianten „A“ (links) und „B“ (rechts)



Abbildung 9: Die mittels Photogrammetrie gemessenen Verformungen zur Ermittlung der Verdrehung in der Verbindung.

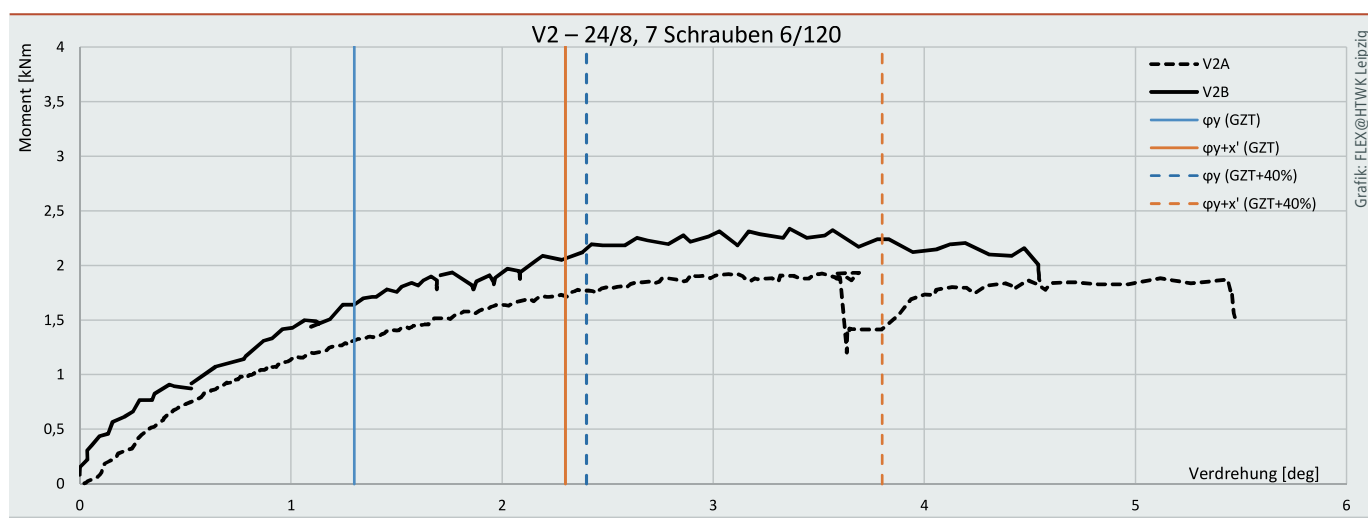


Abbildung 10: Die rückgerechneten Momente im Verhältnis zur Verdrehung der Variante 2 mit Querschnitt 240/80 mm im Vergleich zu den maximalen rechnerisch auftretenden Verdrehungen eines Referenzsystems.

Versuche zur Überprüfung der Annahmen im Rechenmodell

Die neuartige MVK-Verbindung ist nicht auf die Übertragung von Biegemomenten ausgelegt, da dies aufgrund der hebelstabwerksartigen Anordnung der Lamellen nicht notwendig ist. Eine momententragfähige, konstruktive Auslegung der Knotenverbindung erhöht zwar die Steifigkeit der Gesamtkonstruktion, verursacht aber zwangsläufig signifikante Mehraufwände in Fertigung und Montage der Bauteile (vgl. Kloft [11] und Schlaich [12]).

Somit wurde im beschriebenen Forschungsprojekt die Strategie entwickelt, die Bemessung von Zollinger-Konstruktionen mit MVK-Verbindungen auf der Basis gelenkiger Verbindungen zu modellieren. Infolgedessen treten an den Verbindungen in der Theorie Verdrehungen auf. Praktisch werden die Verbindungen jedoch nicht frei verdrehbar sein. Daher verfolgte die nachfolgend kurz beschriebene Versuchsserie das Ziel zu überprüfen, ob die (theoretischen) Verdrehungen praktisch schadlos auftreten können und das vereinfachte Rechenmodell plausibel ist. Im Kontext der Modellierung des Anschlusses wurde davon ausgegangen, dass die Normalkräfte mittels des Mikroversatzes übertragen werden, und dass ein Überdrücken von Momenten dann vernachlässigbar ist. Somit sind die zur Querkraftübertragung und Lagesicherung benötigten stiftförmigen Verbindungsmittel maßgeblich am Auftreten unplanmäßiger Momente beteiligt.

Um diesen kritisch zu bewertenden Effekt möglichst auf der sicheren Seite liegend abzubilden, wurden Prüfkörper mit einer maximal möglichen Zahl an Vollgewindeschrauben konzipiert. Damit war es möglich, Situationen mit maximal ungünstigen, unbeabsichtigten Momenten im Versuch abzudecken.

In der Versuchsreihe wurden acht Probekörper in einer repräsentativen, isolierten Verbindungssituation mit einer Einzellast beansprucht, um eine Rotation um die zu betrachtende Verbindung zu erzeugen.

Literatur

- [1] F. Zollinger, „Raumabschließende, ebene oder gekrümmte Bauteile“, Patent Nr. 387469.
- [2] F. Zimmermann, Hrsg., Das Dach der Zukunft: Zollinger Lamellendächer der 20er Jahre; Konstruktion, Statik, Ästhetik, Verbreitung, Nachfolge, Beispiele in Bayern. München: FH München, 2003.
- [3] K. Winter und W. Rug, „Innovationen im Holzbau – Die Zollinger-Bauweise“, Bautechnik, Bd. 4, S. 190–197, 1992.
- [4] C. Kersten, Freitragende Holzbauten: ein Lehrbuch für Schule und Praxis, 2. Aufl. Berlin: Springer, 1926.
- [5] T. Gesteschi und R. Otzen, Der Holzbau: Grundlagen der Berechnung und Ausbildung von Holzkonstruktionen des Hoch- und Ingenieurbau. Berlin: Springer, 1926.
- [6] H.-J. Meschke, „Baukunst und -technik der hölzernen Wölbkonstruktionen: vom Bogentragwerk zum Stabnetzwerk“, Dissertation, Technische Hochschule, Aachen, 1989.
- [7] Rug, „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, Hrsg. Karlsruhe: Bruder, 2003, S. 412.
- [8] E. Krabbe und H.-J. Niemann, „Tragverhalten eines hölzernen Zollbau-Lamellendaches am Beispiel der Halle Münsterland“, Bauing. Richtungsweisende Z. Im Bauing., Nr. 58, S. 277–284, 1983.
- [9] C. Dijoux, Alexander Stahr, Lukas Franke, und Christian Heidenreich, „Parametric Engineering of a Historic Timber-Gridshell-System“, in Proceedings of the IASS Symposium 2017, Hamburg, 2017.
- [10] L. Franke, A. Stahr, C. Dijoux, und C. Heidenreich, „How Does the Zollinger Node Really Work?“, in Proceedings of the IASS Symposium 2017, Hamburg, 2017.
- [11] H. Kloft, „Aspekte nachhaltigen Bauens. Ressource Bauwerk“, 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] M. Schlaich, L. Stavenhagen, und G. Krüger, „Die HanseMesse in Rostock – Zollinger mit moderner Technik“, Bautechnik, Bd. 80, Nr. 5, S. 279–284, 2003.

An einem vertikal ausgerichteten Balken, mit horizontal ausgerichteten Fasern zur Abbildung der realen Anschlusssituation wurden vier Varianten mit unterschiedlichen Querschnitten und jeweils zwei Exemplaren geprüft.

So konnten je Variante über einen horizontal verschieblich angeordneten Prüfzylinder zwei Momenten/Querkraft-Verhältnisse erzeugt werden. Lasteintragungsort A erzeugt ein Querkraft/Moment-Verhältnis, das dem Verhältnis einer rechnerischen, 90 prozentigen Auslastung der Querkrafttragfähigkeit und der dabei rechnerisch möglichen Momententragfähigkeit des Anschlusses entspricht. Bei Lasteintragungsort B wurde der Hebelarm möglichst genau vervierfacht (Abb. 8 und Tab. 1). Die tatsächlichen Lasteintragungsorte wurden sowohl manuell als auch mittels Fotogrammetrie vermessen. Sowohl der Versuchsstand als auch die Probekörper wurden mit Messpunkten versehen und erfasst. Ergänzend fand eine redundante Messung des Hubs des Prüfzylinders mittels induktiven Wegaufnehmers statt. Die Messdaten der Fotogrammetrie ermöglichen mit der Erfassung der Größe der eingeleiteten Last eine isolierte Betrachtung der vertikalen Verschiebung und der Verdrehung und der diesbezüglichen entstehenden, rückgerechneten Schnittgrößen. Für die einzelnen Versuchskonfigurationen wurde das aufnehmbare Moment bei unterschiedlichen Querkraftbeanspruchungen ermittelt. Die so gewonnenen Bemessungswiderstände wurden mit dem Modifikationsbeiwert und Teilsicherheitsbeiwert auf ein charakteristisches Niveau überführt. Für die Versuchskonfigurationen V1 bis V3 zeigte sich, dass dieses charakteristische Niveau

im Versuch immer übertroffen wurde. Für die Konfiguration V4 mit lediglich drei Schrauben (gegenüber sechs bzw. sieben Schrauben) konnte der ermittelte Bemessungswiderstand nicht erreicht werden. Als Ursache dafür werden unberücksichtigte Lastkonzentrationen in den Schrauben und die im Versuch fehlende Normalkraft identifiziert. Dies kann für die Konfigurationen V1 bis V3 als zusätzliche Sicherheit gewertet werden. Zusammenfassend kann das Bemessungsmodell auf der Basis der Versuche als geeignet eingestuft werden.

In einem zweiten Schritt wurden die Ergebnisse der Versuchskonfiguration V2 mit dem zugehörigen Gesamtsystem verglichen. Als Referenz wurde eine Halle mit einer Breite von 20 m und einem Bogenstich von 4 m mittels Finite-Elemente-Methode analysiert und bemessen. Die auftretenden Verdrehungen im Gesamtmodell entsprechen näherungsweise den lokalen Verdrehungen um die y-Achse der angeschlossenen Rippe. Für die Ermittlung der im Versuch gemessenen Verdrehungen muss zusätzlich Torsion der durchgehenden Rippe um die lokale x-Achse berücksichtigt werden. Konservativ wurden für diese Berechnung die jeweiligen Maximalwerte addiert, wodurch die auftretenden Verdrehungen überschätzt werden. Der Vergleich mit den Versuchen zeigt, dass dieser obere Grenzwert immer erreicht wird, selbst im Bemessungslastfall „Durchschlagen“, der mit einer 40 prozentigen Laststeigerung gegenüber GZT berücksichtigt wurde (Abbildung 10). Die schadlose Verdrehbarkeit der Rippen kann daher für reale Systeme unterstellt werden.

Dank

Die Forschungsarbeit wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) im Rahmen der Förderlinie ZIM gefördert. Die beteiligten Kooperationspartner: Lehmann, Block & Partner Ingenieurgesellschaft mbH (LBP), STRAB Ingenieurholzbau Hermsdorf GmbH und Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig (HTWK Leipzig) bedanken sich beim Fördermittelgeber und dem Projektträger AiF für die produktive Zusammenarbeit. ■

Autor

Prof. Dr.-Ing. Alexander Stahr

ist Inhaber der Professur Tragwerkslehre an der HTWK Leipzig. Er ist Initiator des FLEX-Projekts und Vordenker der gleichnamigen interdisziplinären Forschungsgruppe.

Cristoph Dijoux, M.Sc.

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter bei FLEX und forscht im Rahmen eines kooperativen Promotionsverfahrens in Zusammenarbeit mit der TU Dresden zu Freivorbau Potenzialen segmentierter Schalentragsysteme aus Holz.

Lukas Franke, M.Sc.

war wissenschaftlicher Mitarbeiter bei FLEX.

Dipl.-Ing. Matthias Tremel

ist geschäftsführender Gesellschafter der STRAB Ingenieurholzbau Hermsdorf GmbH.

Dipl.-Ing. Jürgern Bialozyt

ist geschäftsführender Gesellschafter der Lehmann-Block & Partner Ingenieurgesellschaft mbH in Erfurt.

Anzeige