Bilder: Flex@HTWK Leipzig, Lukas Franke

Abbildung 1: Die Fertigung in der Werkhalle erlaubt günstige Einbaulagen aller Teile und erleichtert den Herstellungsprozess.

Brettrippendächer in elementierter Bauweise

Dachkonstruktionen Bogenförmige Brettrippendächer nach dem Zollingerprinzip bilden eine konstruktive und materialsparende Alternative zu Brettschichtholzkonstruktionen für Hallendächer mit kleineren und mittleren Spannweiten. In einem kooperativen Forschungsprojekt wurden Untersuchungen zur wirtschaftlich deutlich effizienteren Realisierung von Holzleichtbaudächern in Elementbauweise durchgeführt. In diesem Beitrag werden zunächst Grundlagen und Motive des Projekts sowie im zweiten Teil Ergebnisse erster Fertigungs- und Belastungsversuche vorgestellt.

Alexander Stahr, Cristoph Dijoux, Lukas Franke, Matthias Tremel

Das Zollingersystem ist ein historisches Leichtbauprinzip im Holzbau. Es ermöglicht das Fertigen von tonnenförmigen Dächern mit relativ kleinen Bauteilen und geringem Materialaufwand. Die 1923 patentierte Konstruktion weist aus heutiger Sicht verschiedene Besonderheiten auf, die dazu geführt haben, dass das Prinzip trotz verblüffender Materialeffizienz kaum noch zur Anwendung kommt.

Aus konstruktiver Sicht ist insbesondere die Nachgiebigkeit der Knotenverbindung zu nennen, die die Motivation für die Entwicklung einer neuartigen Verbindungslösung lieferte, die in Heft 3.2019 von bmH bauen mit Holz vorgestellt wurde [1]. Die Forschungsarbeiten zeigen, dass perspektivisch die Errichtung von Brettrippendächern im Sinne Zollingers ohne den Einsatz komplexer Knotenkonstruktionen aus Stahl möglich ist.

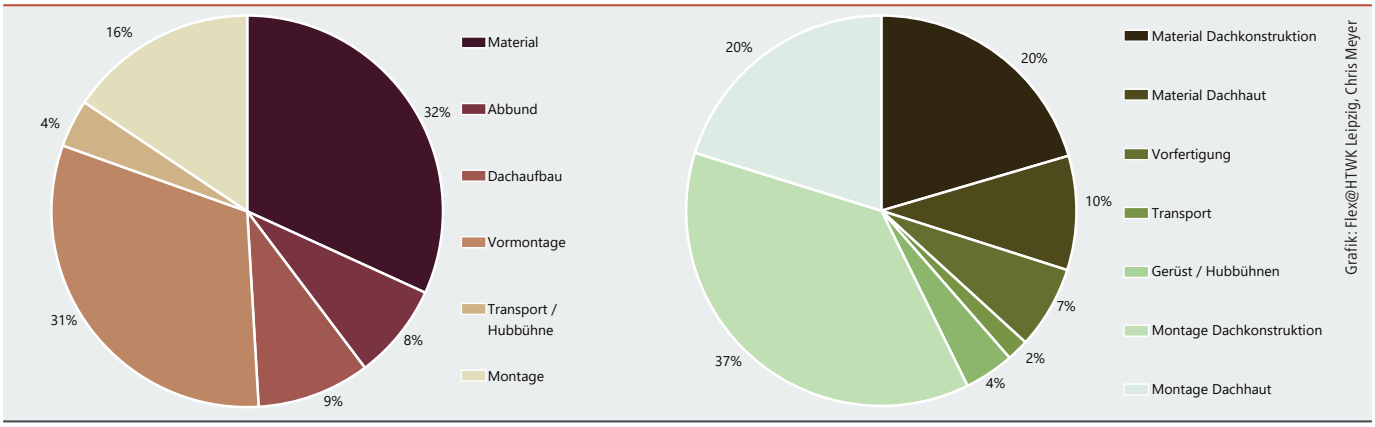
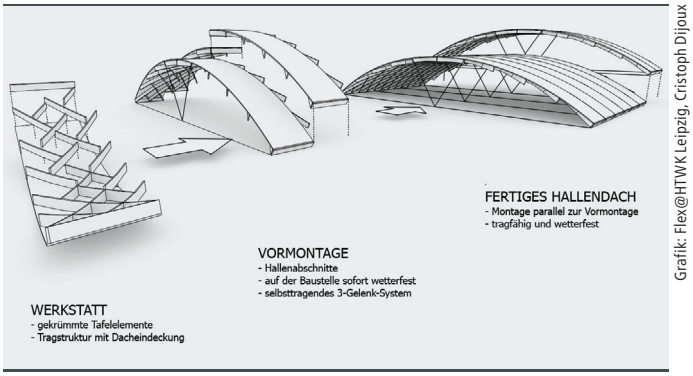


Abbildung 2: Darstellung der Kostenstruktur bei segmentierter Herstellung (links) und bei traditioneller Handmontage (rechts).



Grafik: Flex@HTWK Leipzig, Cristoph Dijoux

Abbildung 3: Die elementierte Vorfertigung von Brettrippendächern erfolgt in drei Phasen.

Bild: Flex@HTWK Leipzig, Lukas Franke

Abbildung 4: Gegenüber den Dachkonstruktionen mit großformatigen BS-Holz-Trägern sind die einzelnen Lamellen bei Brettrippendecken klein dimensioniert.

Aus wirtschaftlicher Sicht bringt diese Bauweise allerdings einen äußerst hohen Aufwand auf der Baustelle mit sich, der maßgeblich darauf gründet, dass für die Montage von Zollingerdächern bisher immer ein räumliches Gerüst benötigt wird. Auf diesem werden die Brettlamellen zu dem charakteristischen rautenförmigen Stabnetzwerk verbunden und zumeist mit parallel zur Traufkante ausgerichteten Brettern verschalt. Erforderlich ist das Gerüst, weil die Zollingerkonstruktion die Lasten nach dem Bogenprinzip abträgt. Dementsprechend ist es notwendig, die Lamellen auch wirklich von Auflager zur Auflager zu verbinden. Erst nach Beendigung der Montage kann das Gerüst entfernt werden. Dieser Prozess ist vor allem zeitaufwendig und daher im aktuellen Baubetrieb nicht wirtschaftlich darstellbar [2], [3].

Entsprechende praktische Erfahrungen beschreibt u. a. Schlaich in Bezug auf die zollingerartige Konstruktion der HanseMesse Rostock: „Nachdem [...] Arbeitskraft teuer und Materialaufwand weniger entscheidend ist, soll also nicht behauptet werden, dass mit den kleinteiligen Lamellen ausgesprochen billig gebaut wurde." [4]. Auch Trabert stellt in Bezug auf den Bau der ToskanaTherme in Bad Sulza fest, dass die Ausführung der Brettschalung (die in diesem Fall sogar verleimt wurde) einen großen Zeit- und damit Kostenaufwand verursacht habe [5].

Um die beschriebenen Beobachtungen auf eine solide wissenschaftliche Grundlage zu stellen, wurden an der HTWK Leipzig in verschiedenen Abschlussarbeiten unterschiedliche Fragestellungen im Überschneidungsbereich von Konstruktion und Wirtschaftlichkeit untersucht. So formulierte Regler ein Systemmodell auf der Basis des traditionellen Zollingerprinzips [2]. Meyer hingegen untersuchte den Einfluss der Elementierung der Dachkonstruktion auf den Fertigungsprozess und die Gesamtkosten [3]. Er konnte (unter Zuhilfenahme diverser Annahmen) feststellen, dass die Montagezeit auf der Baustelle sich signifikant verkürzen lässt. Im Kontext einer Reduktion der Montagekosten um bis zu 75 Prozent ist somit eine signifikante Steigerung der Wirtschaftlichkeit der Konstruktion trotz Mehraufwands für die Vorfertigung möglich (vgl. Abbildung 2). In der Konsequenz dieser Erkenntnis wurde das hier vorgestellte Forschungsprojekt initiiert, das die Entwicklung einer zeitgeistigen Alternative zum unwirtschaftlichen Herstellungsprozesses von Brettrippenschalen thematisierte [6].

Vorfertigung und Montage großformatiger Elemente als zeitgemäßer Herstellungsprozess

Heute ist der Bau von Hallen mit hölzernen Tragwerken nahezu ausnahmslos auf die Anwendung von großformatigen Bindern aus Brettschichtholz abgestimmt. Im Hochbau werden Holzbauten meist in Tafelbauweise ausgeführt.

Bild: Flex@HTWK Leipzig, Lukas Renke

Abbildung 5: Gekrümmt verleimte Platten dienen als Lehre und erlauben eine sehr einfache Montage der Lamellen.

Abbildung 6 zeigt den Versuchsaufbau mit einer Brettschalung respektive Lattung. Auf dem Rahmen im Hintergrund sind die Kameras zur photogrammetrischen Verformungsmessung zu erkennen.

Die Verschiebung des Verarbeitens kleinformatiger Bauteile in die Werkstatt und der Transport großformatiger Bauteile zur Baustelle beschreiben die Kernidee des Forschungsprojekts unter dem Akronym ReFlexRoof. Anstelle einer Fügung aller Bauteile auf der Baustelle werden gekrümmte Segmente in der Werkstatt vorgefertigt. Das ist schneller, weitestgehend gerüstlos möglich, geometrisch weniger fehleranfällig und auf die Möglichkeiten des heutigen Baubetriebs mit seinen niedrigen Transportkosten und der effizienten Hebetechnik abgestimmt.

Der in Anlehnung an die Holztafelbauweise mit ebenen Wandelementen konzipierte Fertigungs- und Montageprozess für tonnenförmige Brettrippendächer nach dem Zollingerprinzip basiert grundlegend auf drei Schritten (vgl. Abbildung 3, Seite 21) die nachfolgend beschrieben werden. Das Konstruktionsprinzip wurde zum Patent angemeldet [7].

Zuerst werden die bogenförmigen Segmente unter Werkstattbedingungen auf einem Tisch bzw. einer Lehre montiert. Dabei sind die Randlamellen auf den gekrümmt verleimten Holzwerkstoffplatten überstehend angeordnet. Der Überstand erlaubt später eine homogene Fügung des Netzes. Die Abmessungen der Segmente sind maßgeblich durch die in der StVZO definierten maximalen Transportmaße für den Straßentransport (13,60 × 2,50 m) begrenzt.

Geometriedaten der Versuchskörper:

Außenabmessungen:	l = 516,7 cm, b = 220 cm, f = 62 cm
Raster:	l = 160 cm, b = 60 cm
Lamellen:	Holz (KVH, C24, Fichte, b/h = 4/12 cm, l = 170 cm, e = 0,7 cm)
Plattenschalung:	Dreischichtplatte (l = 500 cm, b = 200 cm, h = 1,6 cm)
Lattenschalung:	Holz (KVH, C24, Fichte, l = 200 cm, b = 15 cm, h = 1,6 cm)
Spannglied:	Stahl (S235, l = 520 cm, d = 25 mm)

Im zweiten Schritt erfolgt der Transport zur Baustelle. Wenn die geforderte Spannweite die o. g. maximale Abmessung von 13,60 m nicht übersteigt, können die Segmente direkt in ihre Endposition eingehoben und eingebaut werden. Bei größeren Spannweiten ist eine ebenerdige Vormontage von vorzugsweise 2 × 2 Segmenten notwendig, die dann zusammen mittels eines Krans eingehoben werden.

Abbildung 7: Die Lasteinleitung erfolgt gleichmäßig durch zwei gekoppelte hyraulische Druckzylinder und Traversen.

Im Ergebnis entstehen Drei-Gelenk-Bogendachabschnitte, die auf ein in der Praxis übliches Fünf-Meter-Stützenraster abgestimmt sind.
In der Einbauposition des Dachs werden nun die Segmente respektive Bogendachabschnitte an den Montagestößen in Spannrichtung gefügt. Die überstehenden Lamellen wirken dabei als Lehren. In der Dachschale verbleiben orthogonal zu den Auflagern ausgerichtete Fugen.

Prinzipien zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit

Die Umformulierung des konstruktiven Konzepts ist eng mit weiteren prozessbezogenen Veränderungen verknüpft. Diese sollen nachfolgend kurz erläutert werden. Sie bilden die Grundlage für die umfassende Steigerung der wirtschaftlichen Effizienz der Zollingerkonstruktion.
Der Transport großformatiger Bauteile auf die Baustelle und deren Montage stellen das derzeit übliche Vorgehen dar, sodass das neue System ideal in etablierte Bauabläufe passt. Durch die Elementierung werden sowohl eine schnelle Montage auf der Baustelle als auch eine hohe Qualität in der Ausführung erreicht. Außerdem sind die Elemente und das fertige Dach (mit entsprechenden beschichteten Gewebebahnen belegt) sofort wetterfest. Aus der Kombination aller Aspekte erwächst eine neue wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit bei Beibehaltung der materiellen Ressourceneffizienz.

Bei Brettrippendächern kamen bisher zumeist Einzelbretter für die flächige Verschalung zum Einsatz. Dieses Konzept ist sehr arbeitsaufwändig und zeitintensiv. Durch die Verwendung von modernen Holzwerkstoffplatten, die sich einfach gekrümmt verleimen lassen, wird die Herstellungsdauer massiv verkürzt. Zudem dienen die gekrümmten Platten direkt als Bett zur Fügung des Lamellennetzes, und ein Lehrgerüst ist nicht notwendig (vgl. Abbildung 5). Die historischen, uniaxialen Bretterschalungen wirken lediglich als Aussteifung des Rautennetzes. Kommen Holzwerkstoffplatten zum Einsatz, können diese am Lastabtrag in Bogenrichtung teilnehmen. Bei geschickter konstruktiver Verbindung können so zusätzlich große Tragfähigkeitsreserven aktiviert werden.

Anzeige

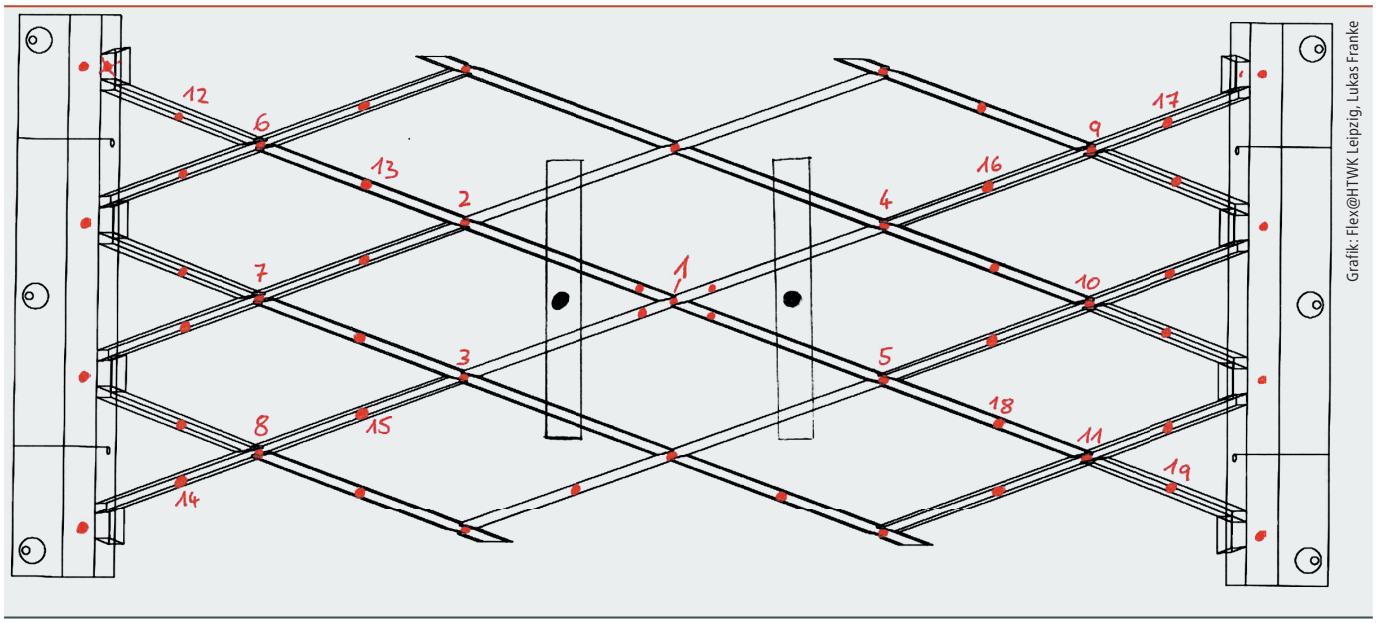


Abbildung 8: Für die Verformungsmessung mittels Photogrammetrie wurde die Lage der Messpunkte exakt bestimmt.

Die tragende Gitterstruktur wird weiterhin aus einzelnen, vergleichsweise kurzen Lamellen zusammengebaut. Bei geschickter Anordnung sind dafür lediglich zwei unterschiedliche Typen von Lamellen nötig, was die Fertigung signifikant vereinfacht und beschleunigt. Im Kontext der Nutzung NC-gesteuerter Fertigungstechnik sind geometrisch hochgradig genaue Konstruktionen für die formsensitiven Flächentragwerke möglich.

Rechenmodelle und Einfluss der flächigen Schalungen aus Holzwerkstoffplatten im Versuch

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden neben dem Herstellungsprozess auch Rechenmodelle entwickelt, und der Einfluss der Dachschalung auf den Lastabtrag wurde experimentell untersucht. Aus herstellungstechnischer und statischer Perspektive standen dabei die Vor- und Nachteile einer flächigen Schalung aus Holzwerkstoffplatten im Fokus.

Grundsätzlich werden bei Zollingerkonstruktionen die Lasten maßgeblich über die rautenförmig angeordneten Brettlamellen zu den Widerlagern hin abgetragen. Das Stabnetz ist dabei aufgrund der vier gelenkigen Verbindungen in den Knotenpunkten innerlich statisch überbestimmt und muss daher ausgesteift werden. Durch das Aufbringen der Bretterschalung werden die Rauten quer zur Spannrichtung gedeckelt. Die Dachschale übernimmt somit die Querausteifung der Konstruktion. Bei einer Eindeckung mit Holzwerkstoffplatten wird das Rautennetz zusätzlich zu den genannten Effekten auch in Spannrichtung unterstützt. Die sich so ausbildende Schalenwirkung hat daher auch Einfluss auf den Lastabtrag von Biegemomenten und Normalkräften. Der Einfluss der Schalung auf das Trag- und Verformungsverhalten wurde in einer umfangreichen Versuchsreihe untersucht.

Biegesteifigkeit der Knotenpunkte

Die Beschreibung respektive rechnerische Definition der Steifigkeit der Verbindungen stellt eine besondere ingenieurtechnische Herausforderung dar, da sie von einer Vielzahl geometrischer, materieller und struktureller Faktoren abhängig ist. Mit den Versuchen, die auf den Tests im Projekt Mikroversatzknoten [1] aufbauten, wurde insbesondere der Frage nachgegangen, ob die Annahme einer gelenkigen Knotenverbindung in den Rechenmodellen auch bei Betrachtung eines komplexen Systemausschnitts stimmt und welche Tragfähigkeitsreserven das System in diesem Fall bietet.

Versuchsaufbau

Auf dem Boden des Aufspannfelds der Versuchshalle der HTWK Leipzig wurde ein Versuchsaufbau für einen Bogen mit rund fünf Metern Spannweite realisiert. Die Befestigung der Auflagerbalken erfolgte in vertikaler Richtung mittels GEWI-Stangen durch die massive Decke hindurch. Parallel zum Boden schlossen Spannglieder die Widerlager kurz. Insgesamt wurden fünf Versuchskörper untersucht. Das Netz dieser Versuchskörper bestand aus je fünf unterschiedlichen Bauteiltypen (zwei Auflagerrippen, zwei Feldrippen und einer Giebelrippen) und einer Dachdeckung aus Lattung oder Platte (Dreischichtplatte, 16 mm).

Versuchsdurchführung

Die Lasteinleitung erfolgte über zwei hydraulische Zylinder (max. Druckkraft: 400 kN, max. Hub: 7 cm). Der Abstand der Lasteinleitung betrug 100 cm und erfolgte in Querrichtung mittig. Unter den Druckzylindern war je eine Kraftmessdose mit einem Messbereich von 400 kN angeordnet.

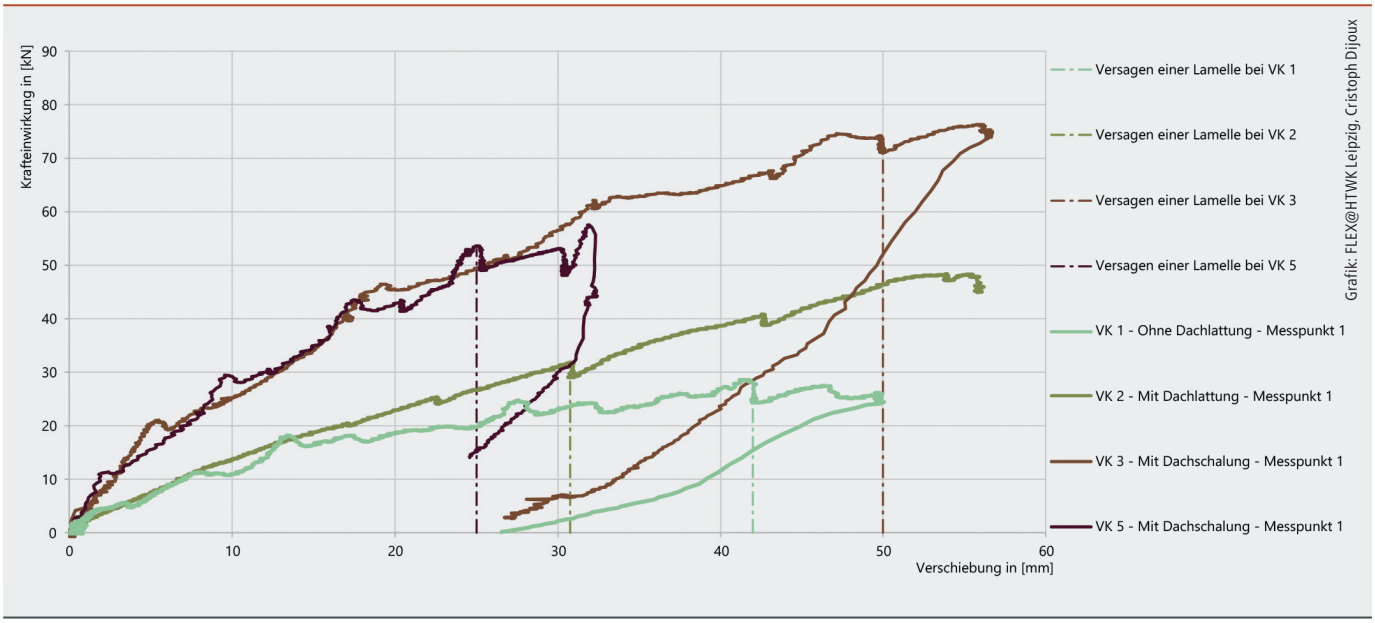


Abbildung 9 zeigt die ermittelten Kraft-Weg Diagramme von vier Versuchen.

Eine darunterliegende Kugelkalotte glich die leichte Schiefstellung infolge der Bogenkrümmung aus. Über eine Druckverteilungsplatte (d = 3 cm) aus Stahl wurde die Kraft in zwei verschraubte Doppel-T-Profile (IPE 200, l = 99 cm) eingeleitet. Diese wiederum verteilten die Einwirkung über untergelegte Hartgummiplatten (zur Homogenisierung der Lasteinleitung) in je vier Brettlamellen. Die Messung der Verformungen erfolgte mithilfe eines hochpräzisen fotogrammetrischen Messsystems (Aicon DPA) (siehe Abbildung 8).
Um mit den fünf großformatigen Versuchskörpern eine möglichst große Variantenvielfalt und Aussagekraft zu erreichen, wurden jeweils mehrere Eindeckungsvarianten untersucht. Die geschickte Festlegung der Reihenfolge der Tests ermöglichte es dabei, jede konstruktive Ausführung einmal bis zum Bruch zu belasten. Weiterhin waren drei Versuchskörper baulich identisch. Einer davon wurde asymmetrisch-halbseitig belastet. Bei einem anderen wurden fast alle metallischen Verbindungsmittel entfernt.

Gutmütiges Tragverhalten

Im Ergebnis der Versuchsreihe konnte gezeigt werden, dass Brettrippendächer in elementierter Bauweise ein hohes Lastumlagerungsvermögen und ein sehr gutmütiges Versagensverhalten aufweisen. Während der Versuche zeigten laute Knackgeräusche lokale Überbeanspruchungen an und manifestierten sich in sichtbaren Rissen, ein Lastabfall war dabei jedoch kaum zu verzeichnen. Wie bei den entfernt verwandten Brettrippenschalen von Natterer konnte ein „soziales Tragverhalten" identifiziert werden. Bei diesem können die Lasten geschwächter Bauteile von benachbarten anteilig übernommen werden [8, S. 5]. Zudem bestanden zwischen dem theoretischen Erreichen der elastischen Grenzspannungen und den Bruchlasten große Reserven (vgl. Abbildung 9).

Anzeige

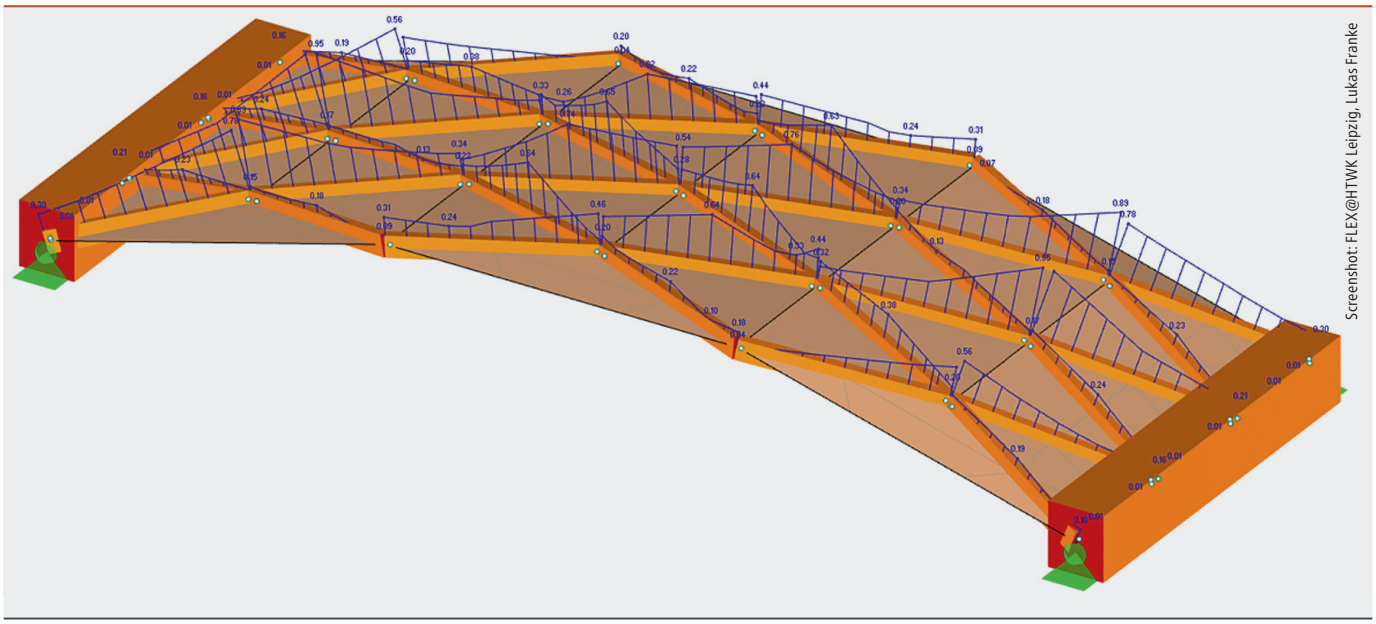


Abb. 10: Rechenmodell mit dreidimensionaler Darstellung der Auslastung der Balkenquerschnitte bei einer Bemessung nach EC5.

Statische Verbesserung durch Holzwerkstoffplatten

Die Hypothese des Tragfähigkeitszuwachses durch den Einsatz von Holzwerkstoffplatten zur Dacheindeckung konnte indes durch die Versuchsreihe ohne Einschränkungen bestätigt werden. Die Schalung aus Holzwerkstoffplatten erhöhte die Bruchlast im Vergleich zu einer Bretterschalung bzw. Lattendeckung um 26 bis 63 Prozent! Der systemimmanente Zusammenhang spiegelt sich auch in der Steifigkeit wider. Auf der Basis eines elastisch-elastischen Berechnungsmodells wurden die zulässigen Grenzdehnungen bei einer Verformung des Versuchskörpers von rund 5 mm erreicht. Die dafür benötigten Kräfte sind mit der Schalung aus Holzwerkstoffplatten sowohl im Versuch als auch im Rechenmodell um den Faktor 2 größer als bei der Bretterschalung bzw. Lattendeckung (siehe Abbildung 11).

Ergebnisse Rechenmodell vs. Messwerte

Im Ergebnis der Versuche kann resümiert werden, dass die rechnerisch ermittelten Verformungsparameter im Wesentlichen mit den an den großformatigen Probekörpern gemessenen Werten übereinstimmen (vgl. Abbildung 11). Die Annahme gelenkiger Verbindungen zwischen den Stäben lag leicht „auf der sicheren Seite". Eine – im Holzbau ohnehin kaum zu realisierende – steife Verbindung der Lamellen würde hingegen die Systemsteifigkeit dramatisch überschätzen. Die Schalung aus Holzwerkstoffplatten wurde in Bezug auf den Normalkraftabtrag in Ansatz gebracht, wenngleich die Verbindung nicht als schubfester Verbundquerschnitt zur Momentenaufnahme mit den Rippen angesetzt wurde (siehe Abbildung10). Die Mitwirkung einer Dachschalung aus flächigen Elementen konnte somit rechnerisch gut abgebildet werden.

Elementierung steigert Wirtschaftlichkeit und statische Eigenschaften

Mit dem Forschungsprojekt konnte gezeigt werden, dass die Elementierung von Brettrippendächern inklusive der Nutzung von Holzwerkstoffplatten für die Dachschalung mehrere Vorteile vereint, aber auch neue Herausforderungen schafft. Neben einer signifikanten Steigerung der Effizienz in Vorfertigung und Montage können auch die statischen Eigenschaften der Dachkonstruktion maßgeblich verbessert werden. Doch bedarf es noch weiterer Forschungsbemühungen, um insbesondere das konstruktiv-statische Zusammenwirken von Dachschale (aus Holzwerkstoffplatten) und Brettrippen (aus BSH, KVH oder Schnittholz) unter Berücksichtigung fertigungs- und montagetechnischer Randbedingungen praxisorientiert zu beschreiben.

Forschungsprojekt mit vielen Förderern und Unterstützern

Die Forschungsarbeit wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der Förderlinie „KMU-innovativ" finanziell unterstützt. Die beteiligten Kooperationspartner STRAB Ingenieurholzbau Hermsdorf GmbH, Diplomingenieure Schneider Heidenreich GmbH und die Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig (HTWK Leipzig) bedanken sich beim Fördermittelgeber und dem Projektträger Jülich (ptj) für die produktive Zusammenarbeit.
Ein besonderer kollegialer Dank gilt der Versuchseinrichtung der HTWK Leipzig (Prof. Dr.-Ing. Volker Slowik, Dr.-Ing. Thomas Klink) sowie dem Lehrbereich Vermessungskunde (Prof. Dr.-Ing. Ulrich Weferling, Dipl.-Ing. (FH) Holger Evers, M. Sc.). ■

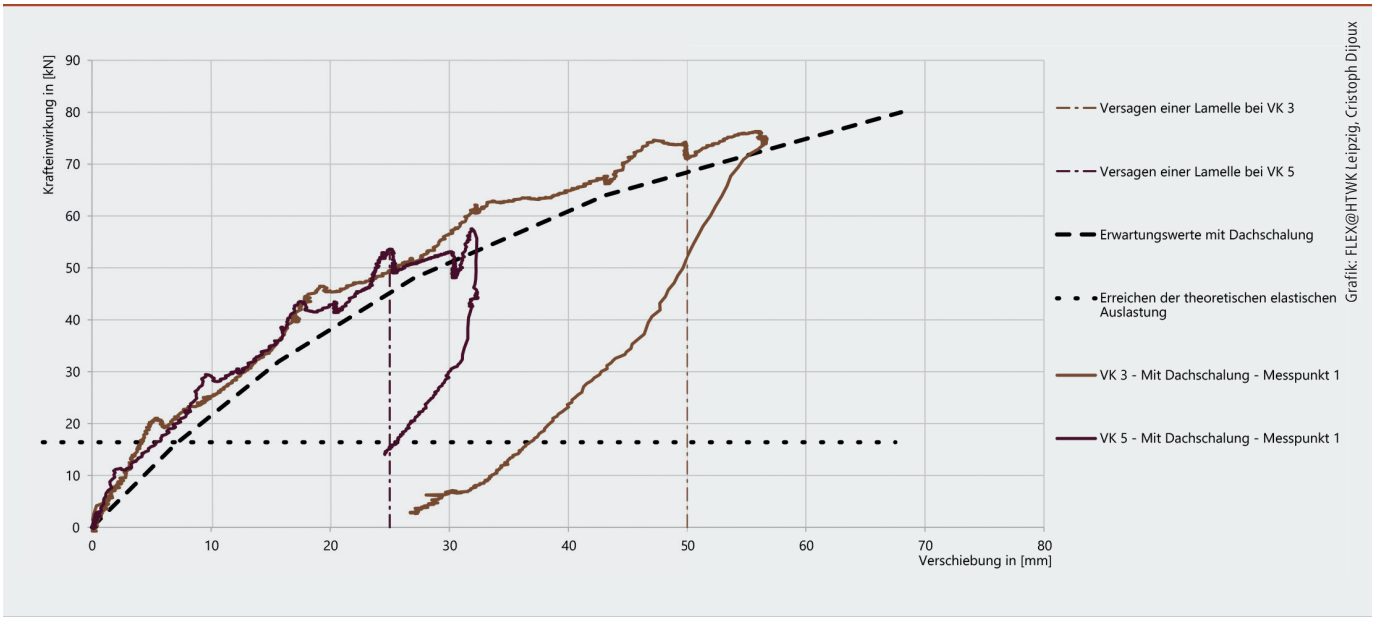


Abbildung 11: Kraft-Weg-Diagramme mit flächigen Schalungselementen im Vergleich zum Rechenmodell (vgl. Abbildung 9).

Literatur

[1] A. Stahr, C. Dijoux, L. Franke, M. Tremel, und J. Bialozyt, „Der Mikroversatzknoten – eine innovative Holzverbindung", Bauen mit Holz Fachz. für Konstr. Entscheider, Nr. 3, S. 22–29, 2019.

[2] T. Regler, „Entwicklung eines systembezogenen Kalkulationsmodells für Dachkonstruktionen nach dem Brettrippenprinzip – Masterarbeit". HTWK Leipzig, 13-Jan-2017.

[3] C. Meyer, „Entwicklung eines Prozess- und Kalkulationsmodells für elementierte Brettrippendächer – Masterarbeit". HTWK Leipzig, 31-Jan-2018.

[4] M. Schlaich, L. Stavenhagen und G. Krüger, „Die HanseMesse in Rostock – Zollinger mit moderner Technik", Bautechnik, Bd. 80, Nr. 5, S. 279–284, 2003.

[5] Dr.-Ing. J. Trabert, „Zweimal Werbung für den Holzleimbau – Die Therme in Bad Sulza – Die Eisschenllaufhalle in Erfurt", gehalten auf dem 3. Holzbauforum, Leipzig, 2003, S. 13.

[6] A. Stahr, C. Dijoux, M. Dembski und L. Franke, „Zollinger – ein Flachdach der etwas anderen Art", Flachdächer, S. 23–28, Apr. 2019.

[7] A. Stahr, „Mikroversatzknoten und Herstellung eines Lamellendaches unter deren Verwendung";

[8] C. Pirazzi, „Zur Berechnung von Holzschalen in Brettrippenbauweise mit elastischem Verbundquerschnitt", Dissertation, École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Lausanne, 2005.

Autoren

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 Freivorbaupotenzialen segmentierter Schalentragwerke aus Holz.

Lukas Franke, M.Sc.
war wissenschaftlicher Mitarbeiter bei FLEX.

Dipl.-Ing. Matthias Tremel
ist geschäftsführender Gesellschafter der STRAB Ingenieurholzbau Hermsdorf GmbH.

Prof. Dr.-Ing. Christian Heidenreich
ist Geschäftsführer der Diplomingenieure Schneider Heidenreich GmbH und Inhaber der Professur Statik/Tragwerksanalyse an der HTW Dresden.