



## Effiziente Holz-Stahl- Klebeverbindungen

### Entwicklungen und Anwendung

*Prof. Dr.-Ing. Leander Bathon  
Dipl.-Ing. Oliver Bletz-Mühdorfer  
B. Eng. Friedemann Diehl  
B. Eng. Philipp Manger  
M. Eng. Dipl.-Ing.(FH) Jens Schmidt  
Dipl.-Ing.(FH) Michael Weil*

*Hochschule **RheinMain**  
Fachbereich Architektur und Bauin-  
genieurwesen, Institut für Baustoffe  
und Konstruktion, Materialprüfanstalt  
für Bauwesen (MPA) Wiesbaden &  
Labor für Holzbau  
Wiesbaden, Deutschland*



# Effiziente Holz-Stahl-Klebeverbindungen

## Entwicklungen und Anwendung

### Einleitung

Unter Holz-Stahl-Klebeverbund wird eine Technologie verstanden, bei der Stahlquerschnitte in Holz eingeklebt werden. Forschungsergebnisse zeigen, dass in Holz eingeklebte Stahlteile einen innovativen und leistungsstarken Lösungsansatz für die Übertragung von Kräften sowie die Kopplung von Holzbauteilen darstellen. Eingeklebte Stahlbauteile besitzen vielfältige Anwendungsmöglichkeiten. Neben der Möglichkeit zum Einkleben von Gewindestangen oder Betonrippenstählen in Holz gemäß DIN 1052:2008, Abschnitt 14.3 existieren auch Ausführungsbeispiele für das Einkleben von nicht stabförmigen Stahlteilen in Holz. Dieser Thematik hat man sich an der MPA Wiesbaden angenommen, wo zahlreiche Untersuchungen zu nicht stabförmigen in Holz eingeklebten Metallteilen durchgeführt wurden. Die aktuellen Entwicklungsansätze werden im Folgenden vorgestellt, wobei im Rahmen dieses Beitrags explizit auf das innovative Verbindungsmittel „eingeklebtes Lochblech“ eingegangen wird.

### Vorteile von Holz-Stahl-Klebeverbindungen

Grundsätzlich wird durch die Verwendung der innovativen Holz-Stahl-Klebeverbundtechnologie die Möglichkeit geschaffen, starre und gleichzeitig duktile Verbindungen auf einfache und kostengünstige Art auszuführen. Ein zusätzlicher positiver Aspekt ergibt sich zudem aus der Eigenschaft, dass Holz-Stahl-Klebeverbindungen beinahe den vollen Holzquerschnitt mit nur minimalen Querschnittsschwächungen aktivieren können. Dies ist bei herkömmlichen nachgiebigen mechanischen Verbindungsmitteln nicht der Fall. Weiterhin sind Holz-Stahl-Klebeverbindungen sehr ästhetisch, da sie von außen in der Regel nicht sichtbar sind. Das Stahlbauteil ist letztlich durch die innen liegende Positionierung im Holzbauteil sowie die umgebende Klebstoffschicht vor Korrosion geschützt.

### Status quo zum Verbindungsmittel „eingeklebtes Lochblech“

An der MPA Wiesbaden wurden in den letzten Jahren zahlreiche Untersuchungen zu in Holz eingeklebten Lochblechen durchgeführt. Lochbleche sind hierbei Stahlformteile mit in Rastern angeordneten Lochungen. Die getesteten Lochbleche besaßen eine Dicke von bis zu 2,5 mm. Sie wiesen Lochdurchmesser von 3 mm bis 12 mm auf und waren verzinkbar und schweißbar. Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen wurden u.a. folgende Versuche durchgeführt:

- Zugversuche unter Normalklima
- Zugversuche unter Temperaturbeanspruchung
- Druckscherversuche
- Rahmeneckenversuche
- Biegeträgerversuche
- Zugschwellenversuche

Ein Teil dieser praktischen Untersuchungen wurde hierbei im Rahmen eines Forschungsvorhabens durchgeführt, welches durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie gefördert wurde. Zudem läuft derzeit an der Hochschule RheinMain ein vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördertes Forschungs- und Entwicklungsvorhaben, das sich zum Ziel gesetzt hat, Fachwerkkonstruktionen zu entwickeln, bei denen die einzelnen Holzquerschnitte (Gurte, Diagonalen) im Bereich der Knotenpunkte über eingeklebte Lochbleche miteinander verbunden werden. Im Folgenden werden ausgewählte Untersuchungsergebnisse vorgestellt.

## Temperaturversuche

Hinsichtlich der Temperaturbeständigkeit von Verbindungen mit in Holz eingeklebten Lochblechen wurden erste Orientierungsversuche durchgeführt. Hierbei kamen unterschiedliche Lochblechgeometrien in Kombination mit variierenden Klebstoffsystemen zum Einsatz. Ziel der Untersuchungen war es, die gemäß DIN 1052:2008 einzuhaltende Temperaturbeständigkeit der Holz-Stahl-Klebeverbindung von mindestens 60°C nachzuweisen. Als Ergebnis der Untersuchungen wurden schließlich so genannte Temperatur-Verformungs-Diagramme für die Verbindung erstellt. Aus diesen kann abgelesen werden, ob und in welchem Maße es unter einer Temperaturbeanspruchung zu Verformungszunahmen (infolge einer wachsenden Nachgiebigkeit der Verbindung) kommt. In Abbildung 1 ist exemplarisch ein im Rahmen dieser Versuchsreihen durchgeführter Zugversuch dargestellt. Bei diesem Versuch wurde das aufgebrachte Zuglastniveau mit 8 kN festgesetzt. Das in Abbildung 2 dargestellte Temperatur-Verformungs-Diagramm zeigt, dass die Funktionsweise der Holz-Stahl-Klebeverbindung mit in Holz eingeklebten Lochblechen bei der gewählten Versuchskonstellation (Klebstoffsystem C) bei Klebefugentemperaturen von 60°C sichergestellt ist. Auf diesem Temperaturniveau traten bei dem Prüfkörper während der ca. 120 Minuten andauernden Haltephase keine wesentlichen Verformungszunahmen auf.

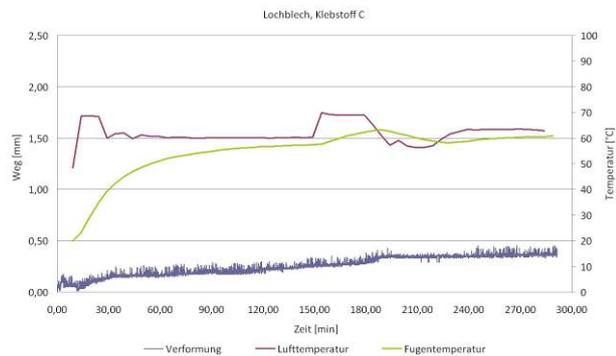


Abbildung 1, 2: Zugversuch zur Ermittlung der Temperaturbeständigkeit von in Holz eingeklebten Lochblechen. Temperatur-Verformungs-Diagramm für in Holz eingeklebte Lochbleche.

## Druckscherversuche

Zur Ermittlung der Systemkennwerte der Holz-Lochblech-Klebeverbindungstechnologie wurden weiterhin an in Holz eingeklebten Lochblechen mehrere Druckscherversuche durchgeführt [1]. Abbildung 3 zeigt den Versuchsaufbau bei Druckscherversuchen der Versuchsreihe HSK-100-2x65. Zwei Holzbalken, GL24h, l/b/h = 118/16/16 cm wurden eingesetzt und jeweils über zwei eingeklebte Lochbleche l/b/d = 100/6,5/0,25 cm – die gegenüberliegend auf ein 10 mm dickes Stahlblech geschweißt waren – verbunden. Abbildung 5 zeigt das Last-Verformungs-Diagramm der Versuche. Nach einem nahezu linearen Verlauf bis zu einer Last von ca. 140 kN gehen die Kurven in einen flacheren Teil über, der durch überproportionale Verschiebungszunahmen gekennzeichnet ist. Auf einem Lastniveau von ca. 200 kN beginnt ein sehr lang gezogenes Fließverhalten des Lochbleches, das mit einem Versagen des Prüfkörpers bei Bruchlasten zwischen 292,84 kN und 316,17 kN und einer Verschiebung von ca. 3,20 mm bis 7,76 mm endet. Einhergehend mit dem deutlich erkennbaren, gleichmäßigen Fließverhalten des Lochbleches in der unteren Lochreihe (Abbildung 4) – ursprünglich runde Lochungen verformen sich unter Scherbeanspruchung zu Ovalen – ist eine Aufweitung der Scherfuge zwischen den beiden Holzquerschnitten zu beobachten. Der mittlere Verschiebungsmodul der Versuchsreihe berechnet sich zu 1371,92 kN/mm.

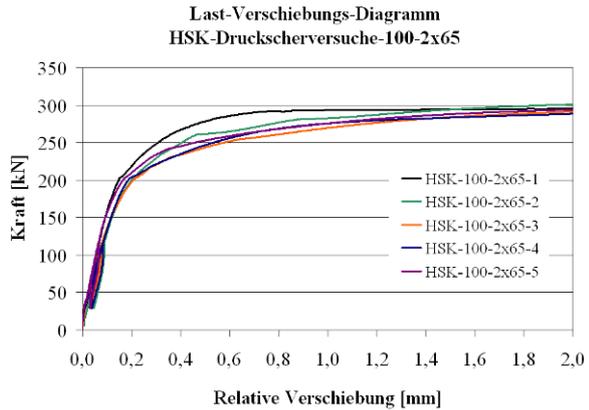


Abbildung 3, 4, 5: Versuchsaufbau. Detail Lochblech nach dem Versuch mit deutlicher Verformung der unteren Lochreihe zu Ovalen. Last-Verschiebungs-Diagramm.

Tabelle 1: Zusammenstellung der Ergebnisse der Versuchsreihe HSK-100-2x65.

| Versuchskörper | Last                     |                          | Verschiebungen           |                         |                         |                            | Scherspannung             | Verschiebungsmoduln       |                           |
|----------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
|                | F <sub>est</sub><br>[kN] | F <sub>max</sub><br>[kN] | v <sub>max</sub><br>[mm] | v <sub>01</sub><br>[mm] | v <sub>04</sub><br>[mm] | v <sub>i,mod</sub><br>[mm] | τ<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | k <sub>i</sub><br>[kN/mm] | k <sub>s</sub><br>[kN/mm] |
| HSK-100-2x65-1 | 290                      | 303,44                   | 7,650                    | 0,009                   | 0,065                   | 0,074                      | 0,2334                    | 1794,32                   | 1576,30                   |
| HSK-100-2x65-2 | 290                      | 316,17                   | 7,760                    | 0,020                   | 0,088                   | 0,089                      | 0,2432                    | 1325,00                   | 1296,24                   |
| HSK-100-2x65-3 | 290                      | 298,14                   | 3,882                    | 0,011                   | 0,078                   | 0,089                      | 0,2293                    | 1484,50                   | 1303,37                   |
| HSK-100-2x65-4 | 290                      | 292,84                   | 3,199                    | 0,009                   | 0,083                   | 0,098                      | 0,2253                    | 1404,24                   | 1178,97                   |
| HSK-100-2x65-5 | 290                      | 313,28                   | 6,971                    | 0,007                   | 0,065                   | 0,077                      | 0,2410                    | 1793,60                   | 1504,70                   |
| Ø              |                          | 304,77                   | 5,89                     | 0,01                    | 0,08                    | 0,09                       | 0,2344                    | 1560,33                   | 1371,92                   |
| s              |                          | 8,84                     | 1,95                     | 0,00                    | 0,01                    | 0,01                       | 0,0068                    | 197,31                    | 146,32                    |
| v [%]          |                          | 2,90                     | 33,12                    | 41,68                   | 12,39                   | 10,55                      | 2,90                      | 12,65                     | 10,67                     |
| 5%-Fraktile    |                          | 283,35                   | 5,06                     | 0,01                    | 0,07                    | 0,08                       | 0,23                      | 1476,48                   | 1309,73                   |

**Rahmeneckenversuche**

Basierend auf den Ergebnissen der Druckscherversuche wurden in den letzten Jahren an der MPA Wiesbaden inzwischen ca. 15 Großversuche zu Rahmenecken durchgeführt ([1], [7]). Die Rahmenecken wurden jeweils durch schließende Biegemomente beansprucht. Abbildung 6 und Abbildung 7 zeigen die Systemskizzen der beiden ersten Versuche, wobei der wesentliche Unterschied zwischen den Versuchen im Lamellenverlauf innerhalb der Brettschichtholzträger lag. Während die angeschnittenen Lamellen bei Versuch 1 sowohl beim Stiel als auch beim Riegel auf der inneren Druckseite lagen, waren diese bei Versuch 2 auf der äußeren Zugseite angeordnet. Bei der Werksfertigung der Prüfkörper wurden Sonderbauteile aus Stahl – bestehend aus drei auf einem Stahlflansch aufgeschweißten Lochblechen, einer abgewinkelten Kopfplatte sowie den Augenstäben – in Riegel und Stiele im Bereich der Kontaktstöße auf Zug- und Druckseite eingeklebt. Die Kopplung von Stiel und Riegel erfolgte über durch die Augenstäbe hindurchgeführte Bolzen.

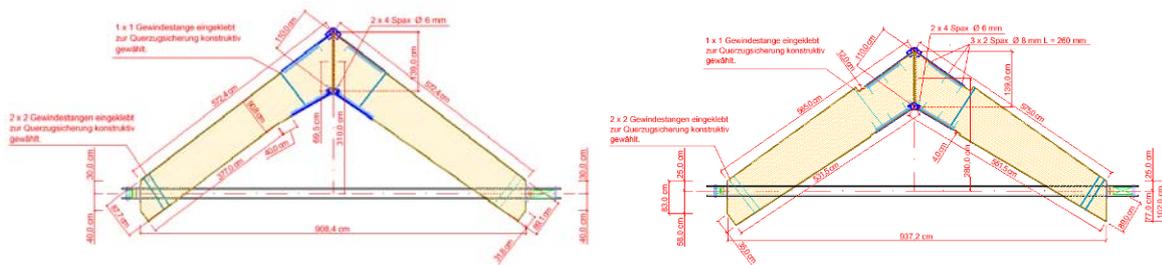


Abbildung 6, 7: Systemskizzen der Versuchsaufbauten.



Abbildung 8, 9, 10: Stahlformteil auf der Zugseite. Stahlformteil auf der Druckseite. Eingesetztes Stahlformteil auf der Zugseite.



Abbildung 11, 12, 13: Versuchsaufbau. Detail Druckseite. Detail Zugseite.

Abbildung 11 zeigt den Versuchsaufbau bei Versuch 1 mit dem applizierten hydraulischen Zylinder zur Aufbringung der äußeren Lasten. In Abbildung 12 ist die innere Druckseite von Versuch 2 dargestellt. Deutlich erkennbar sind die beiden Stahlflansche der innen liegenden Stahlteile sowie der eingesetzte innere Bolzen zur Kopplung von Stiel und Riegel. Abbildung 13 zeigt die äußere Zugseite des Versuchs 2 mit angedeutetem Lamellenverlauf nach dem Versuchsende. Das Bruchbild zeigt ein Abscheren des Holzes entlang des Lamellenverlaufs. Ein ähnlicher Versagensmechanismus ergab sich bei Versuch 1. Auch hier kam es zu einem Holzversagen entlang der angeschnittenen Lamelle – aufgrund der Prüfkörpercharakteristik jedoch auf der inneren druckbeanspruchten Seite. Basierend auf den Untersuchungsergebnissen konnte ein Bemessungsvorschlag für eingeklebte Lochbleche abgeleitet werden. Bei der Anwendung bei Rahmenecken sind danach z.B. nachzuweisen und zu dimensionieren:

- Abmessungen der Stiele und der Halbriegel
- Anzahl und Länge der eingesetzten Lochblechstreifen, wobei ein eingeklebter Lochblechstreifen der Länge 100 cm unter einer Druckscherbeanspruchung eine charakteristische Tragfähigkeit in Bezug auf die Bruchkapazität von ca. 280 kN aufweist
- Abmessungen (Dicke, Länge, Breite) und Materialgüte der Stahlflansche in Abhängigkeit der vorliegenden Zugkraft
- Blockscheren des durch die eingeklebten Lochbleche bewehrten Holzes
- Übertragung der Querkräfte an der Innenseite der Rahmenecke über Kontaktpressung
- Vorholzlänge
- Druckstab in der Fuge zwischen Stiel und Riegel (Knicknachweis)
- Gelenkbolzen, der in die Augenstäbe eingeführt wird (Abscheren)
- Fließmoment der Stahlplatte
- Selbstbohrende Schrauben auf der Außenseite zur Quersugsicherung

Infolge der Erkenntnisse der dargestellten Versuche sowie weiteren praktischen und theoretischen Untersuchungen konnten inzwischen erste Hallen erbaut werden, bei denen die HSK-Technologie eingesetzt wurde. Dabei handelt es sich um Hallentragwerke in der Schweiz [2], in Deutschland [9] und in Island. Bei allen Konstruktionen wurden im Werk vorgefertigte Stiele und Riegel als Einzelteile auf die Baustelle gebracht und vor Ort – dank HSK-Technologie –

zu biegesteifen Rahmenecken zusammengeführt. Während die Halle in Island als F0 Konstruktion mit frei liegenden Stahlteilen ausgeführt ist, ist die in der Nähe Erfurts erbaute Halle eine F30 Konstruktion, bei der die Stahlteile durch hölzerne Überdeckungen vor einer direkten Brandbeanspruchung geschützt sind. Auch Stützeinspannungen wurden bereits mit der HSK-Technologie ausgeführt.



Abbildung 14, 15, 16: Rahmenecke F0. Rahmenecke F30. Stützeinspannung (Fotos: Ticomtec, Schaffitzel, Gröber).

Neben der oben dargestellten Möglichkeit zur Herstellung von Rahmenecken mit vorgefertigten Einzelbauteilen Stütze und Riegel wurde an der MPA Wiesbaden auch eine Möglichkeit zur Herstellung von komplett vorgefertigten Rahmenecken mittels Holz-Stahl-Klebeverbindungen entwickelt und getestet. Bei dieser Rahmenecke, die eine Weiterentwicklung der herkömmlichen keilgezinkten Rahmenecken aufzeigt, werden die Teilquerschnitte Stütze und Riegel über eingeklebte Lochbleche, die als Art Metallzinken wirken, verbunden.

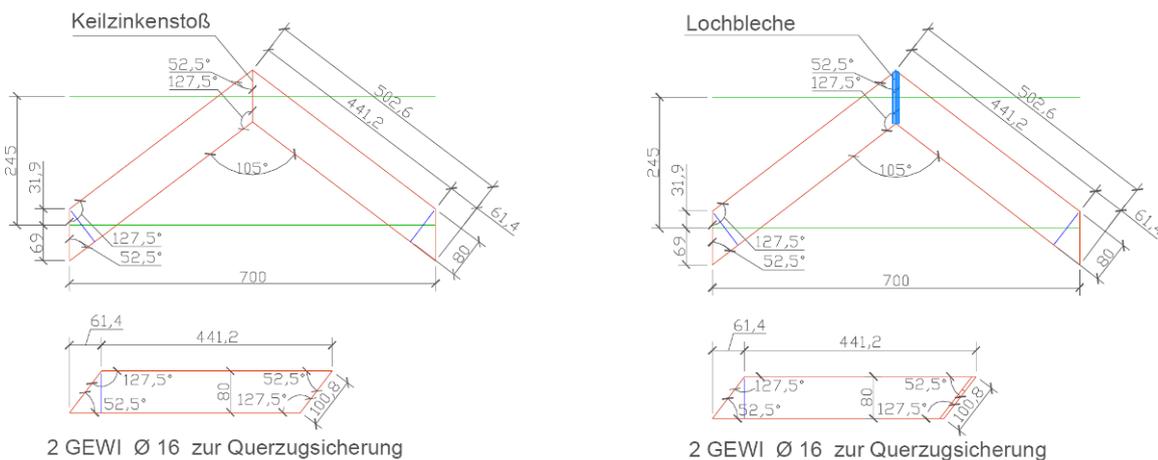


Abbildung 17, 18: Versuchsaufbau der Traglastversuche an keilgezinkten Rahmenecken. Versuchsaufbau der Traglastversuche an Rahmenecken mit Holz-Stahl-Klebeverbindungen.

Die Abbildungen 17 und 18 zeigen hierzu die gewählten Versuchsaufbauten. Die Rahmenecken weisen jeweils eine Schenkellänge von ca. 5 m und einen Öffnungswinkel von  $105^\circ$  auf. Die beiden Schenkel der Rahmenecke besitzen Querschnitte  $b/h = 16/80$  cm und bestehen aus Brettschichtholz der Klasse GL24h. An den beiden Lasteinleitungspunkten links und rechts sind zur Querszugsicherung zwei Gewindestangen mit einem Durchmesser von jeweils 16 mm senkrecht zum Faserverlauf eingeschraubt. Während bei Prüfkörpertyp I als Verbindungsart eine Keilzinkenverbindung gewählt wurde, werden die Schenkel bei Prüfkörpertyp IV stumpf gestoßen und über 2 Varianten von eingeklebten Lochblechen miteinander gekoppelt. Zu Prüfkörpertyp I und Prüfkörpertyp IV wurden jeweils 3 Traglastversuche durchgeführt, wobei hierzu die Schenkel der Rahmenecken über Stahlstangen zusammengezogen wurden.



Abbildung 19, 20, 21: Versuchsaufbau. Applizierte Messtechnik. Eingeklebte Lochbleche bei PK IV-12.

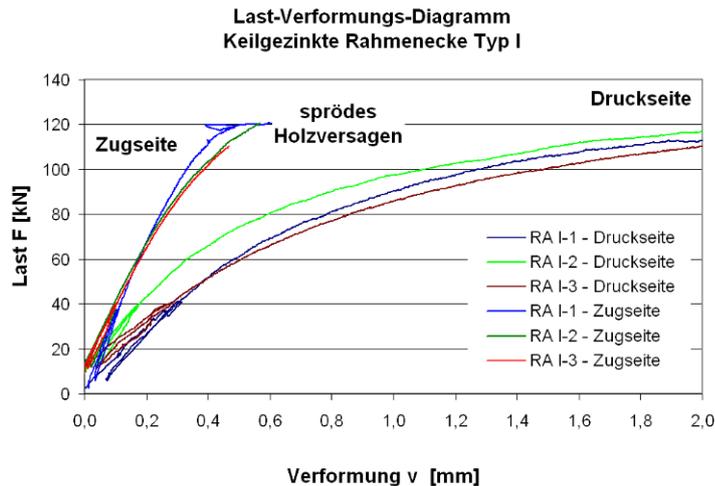


Abbildung 22: Last-Verformungs-Diagramm der Traglastversuche an keilgezinkten Rahmenecken (Prüfkörpertyp I).

Abbildung 22 zeigt das ermittelte Last-Verformungs-Diagramm zu den keilgezinkten Rahmenecken der Versuchsreihe I. Es zeigt sich, dass die ermittelten Last-Verformungs-Kurven grundsätzlich ein sehr gleichmäßiges Verhalten aufweisen. Auf der äußeren Zugseite liegt bis zum Versagen der Prüfkörper ein annähernd lineares Last-Verformungs-Verhalten vor. Auf der inneren Druckseite nehmen dagegen die Verformungen – nach einem anfänglichen nahezu linearen Verlauf – ab einer Last von ca. 40 kN überproportional zu. Es zeigt sich zudem, dass die Verformungen auf der Druckseite signifikant höher sind im Vergleich zu den Verformungen auf der Zugseite. Das Versagen der Prüfkörper erfolgt infolge sprödes Holzversagens auf der Zugseite der Rahmenecke. Die Verformungen auf der Zugseite der Rahmenecke zum Zeitpunkt des Versagens liegen bei ca. 0,5 mm. Die mittlere Bruchlast der keilgezinkten Rahmenecken beträgt 117,25 kN (bei Einzelbruchlasten von 120,92 kN, 120,62 kN und 110,20 kN). Unter Berücksichtigung des vorliegenden Hebelarms von 2,45 m beträgt das durchschnittliche Bruchmoment 287,25 kNm. Die Analyse der Versuche zeigt, dass das Versagen der keilgezinkten Rahmenecken in zwei Phasen unterteilt werden kann. In der ersten Phase findet im Druckbereich ein duktiler Druckversagen statt, wodurch die Verformungen überproportional anwachsen. Durch dieses Plastifizieren verringert sich der innere Hebelarm, wodurch die resultierende Zugkraft größer wird. Dadurch versagt in der zweiten Phase der Zugbereich der Rahmenecke. Das Versagen im Zugbereich tritt spröde auf und ist mit großen Rissbildungen verbunden. Hierbei liegt entweder eine Kombination aus Blockscheren, Querkzugversagen und Zugversagen vor oder die Keilzinkenverbindung versagt mit einhergehendem Querkzugversagen. Als besondere Schwachstelle stellten sich bei den getesteten keilgezinkten Rahmenecken die Bohrungen heraus, die im Holzbauleimbetrieb verwendet wurden, um die Keilzinkenverbindung zusammenzupressen. Bei allen drei Prüfkörpern verlaufen die Rissbildungen durch diese Bohrungen.

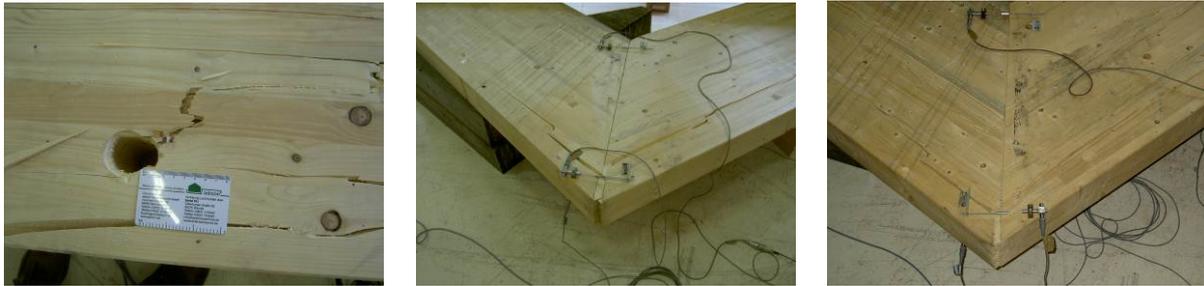


Abbildung 23, 24, 25: Rahmenecke I-1 mit Kombination aus Blockscheren und Zugversagen im Zugbereich sowie Rissverlauf durch Bohrung. Rahmenecke I-2 mit aufgerissener Keilzinkung und großen Querschnittsrissen in der Zugzone. Rahmenecke I-3 mit Aufreißen der Keilzinkenverbindung im Zugbereich und großem Querschnittsrisse im linken Schenkel der Rahmenecke.

Bei den Rahmenecken des Prüfkörpertyps IV, die über eingeklebte Lochbleche miteinander verbunden sind, werden zwei unterschiedliche Lochblechkonstellationen untersucht. Die Bleche werden hierbei jeweils in vier übereinander liegenden Schichten eingeklebt. Bei den Rahmenecken IV-10 und IV-11 sind in der ca. 100 cm langen Schmiege jeweils zwei Lochbleche des Typs B eingeklebt, die über die komplette Fugenlänge verlaufen. Außerdem werden zusätzlich zwei Lochbleche des Typs C eingeklebt, die von der äußeren Spitze der Rahmenecke bis zum Schnittpunkt der Schenkelachsen in der Zugzone verlaufen. Die Herstellung der Rahmenecke erfolgt so, dass die beiden Schenkel in der Druckzone direkten Kontakt haben und so eine ausreichende Druckkraft übertragen werden kann. Bei der Rahmenecke IV-12 werden zudem zusätzliche zwei Lochbleche des Typs D in der Druckzone eingeklebt

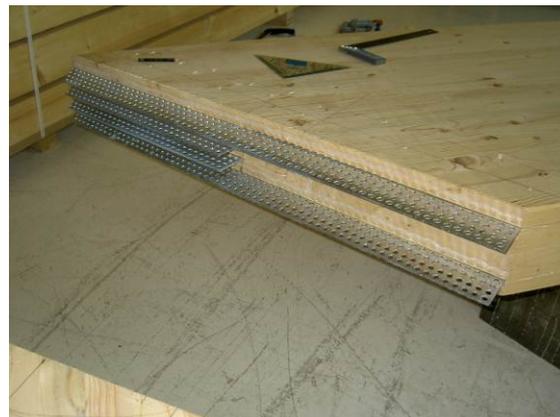
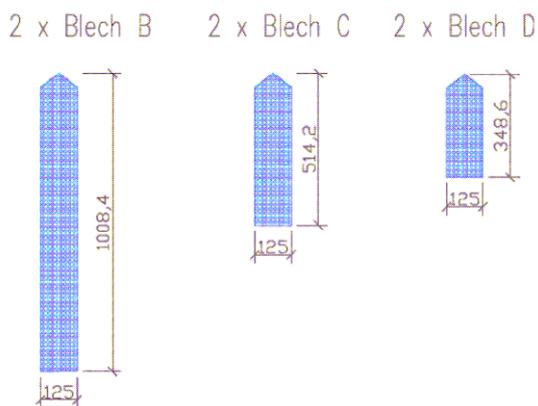


Abbildung 26, 27: Schematische Darstellung der eingesetzten Lochbleche. Rahmenecke IV-10 mit eingeklebten Lochblechen.

Abbildung 28 zeigt die zugehörigen Last-Verformungs-Kurven dieser Versuchsreihe. Es zeigt sich, dass bei allen drei Rahmenecken auf der Zugseite bis zu einer Last von 120 kN nahezu identische Last-Verformungsverläufe vorliegen. Sie steigen hierbei bis zu einer Last von ca. 100 kN linear an und gehen anschließend in einen flacheren Anstieg über. Im Gegensatz hierzu zeigen die Last-Verformungs-Kurven auf der Druckseite der Rahmenecke ein solches lineares Verhalten nur bis zu einer Last von ca. 50 kN auf. Anschließend sind die Last-Verformungs-Kurven auf der Druckseite der Rahmenecken von überproportionalen Verformungszunahmen gekennzeichnet. Die Verformungen auf der Druckseite der Rahmenecke sind zudem wesentlich größer als die Verformungen auf der Zugseite. Auffallend bei den Verformungen auf der Druckseite der Rahmenecke ist zudem die Tatsache, dass durch die Einbindung der Lochbleche auf der inneren Druckseite bei der Rahmenecke IV-12 die Verformungen ca. um den Faktor 2 im Vergleich zu den Verformungen bei den Rahmenecken IV-10 und IV-11 reduziert werden konnten.

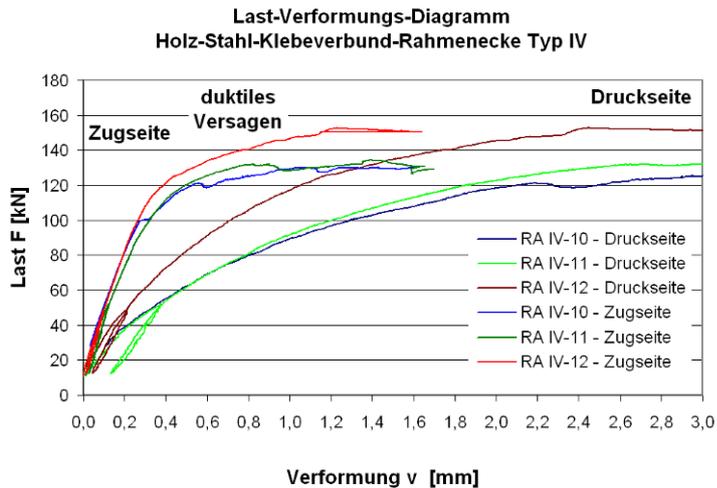


Abbildung 28: Last-Verformungs-Diagramm der Traglastversuche an Holz-Stahl-Klebeverbund-Rahmenecken (Prüfkörpertyp IV).

Das mittlere Bruchlastniveau der Rahmenecken IV-10 und IV-11 liegt bei 132,98 kN (bei Einzelwerten von 131,61 kN und 134,34 kN). Hieraus ergibt sich ein durchschnittliches Bruchmoment von 325,80 kNm. Die Bruchlast der Rahmenecke IV-12 liegt bei 152,70 kN. Daraus ergibt sich ein Bruchmoment von 374,12 kNm. Bei allen drei Rahmeneckenversuchen der Versuchsreihe IV tritt das Versagen auf der Zugseite der Rahmenecke auf. Es kündigt sich durch ein duktiles Verhalten an, ist jedoch dann gekennzeichnet durch Holzversagen.



Abbildung 29, 30, 31: Rahmenecke IV-12 mit Kombination aus Blockscheren und Zugversagen im Zugbereich sowie Rissverlauf durch Bohrung. Rahmenecke IV-12 mit Detailaufnahme von Rissen in der Zugzone. Rahmenecke IV-12 mit großen Verformungen und Aufwölbungen in der Druckzone.

Die Analyse der Ergebnisse lässt insgesamt folgende Rückschlüsse zu:

- Wie durch Traglastversuche gezeigt werden konnte, lassen sich über eingeklebte Lochbleche Rahmenecken herstellen, die mindestens über gleich gute statische Systemkennwerte wie keilgezinkte Rahmenecken verfügen.
- Durch das Einkleben von Lochblechen auf der inneren Druckseite der Rahmenecke kann grundsätzlich eine Erhöhung der dortigen Steifigkeit erzielt werden.
- Im Vergleich zu den keilgezinkten Rahmenecken ( $F_{u,m} = 117,25$  kN) liegt bei den Rahmenecken IV-10 und IV-11 ( $F_{u,m} = 132,98$  kN) eine mittlere Erhöhung der Tragfähigkeit von ca. 15% vor. Das Bruchversagen kündigt sich im Gegensatz zu den keilgezinkten Rahmenecken durch ein duktiles Verhalten an.
- Im Vergleich zu den keilgezinkten Rahmenecken ( $F_{u,m} = 117,25$  kN) liegt bei der Rahmenecke IV-12 ( $F_u = 152,70$  kN) eine Erhöhung der Tragfähigkeit von ca. 30% vor. Das Bruchversagen kündigt sich im Gegensatz zu den keilgezinkten Rahmenecken durch ein duktiles Verhalten an.

Hieraus ergeben sich weiteren folgende Aspekte der Analyse:

- Insbesondere die Rahmenecke IV-12 weist ein großes Potential auf. Es konnte eine deutlich höhere Bruchlast erzielt werden als bei einer herkömmlichen einfach keilgezinkten Rahmenecke.
- Durch Veränderung von verschiedenen Variablen (z.B. Einklebetiefe, Anzahl, Position und Abmessungen der Lochbleche) kann diese Verbindung noch optimiert werden. Darüber hinaus sollten die Lochbleche in der Zugzone fließen, bevor ein sprödes Holzversagen eintritt.
- Für den sinnvollen Einsatz im Ingenieurholzbau müssen weitere Betrachtungen im Hinblick auf Transportfähigkeit, Wirtschaftlichkeit, Tragverhalten und die Aufnahmefähigkeit von positiven (öffnenden) Momenten ins Auge gefasst werden.
- Es sollte auch überprüft werden, wie sich eine solche Holz-Stahl-Klebeverbund-Rahmenecke bei Quellen und Schwinden des Holzquerschnittes verhält und ob die Anforderungen an den Brandschutz erfüllt werden können.
- Durch weitere Forschung mit eingeklebten Lochblechen kann eine leistungsfähige Rahmeneck-Verbindung geschaffen werden, die eine wirtschaftliche Alternative zu herkömmlichen keilgezinkten Rahmenecken darstellt.

Die erste Umsetzung der FuE-Ergebnisse erfolgte vor einiger Zeit in dem Pilotprojekt „Experimentalbau Fahrradunterstand“ ([3], [4]). Dieser zeigt eine Applikation in Holz, die auf diese Weise bisher nur im Stahlbau möglich war. Gelöst wurde diese technologische Herausforderung durch biegesteife Knotenpunktausbildungen mit Hilfe der Klebtechnik.



Abbildung 32, 33, 34: Experimentalbau Fahrradunterstand mit einer Auskrragung der Sparren von 300 cm. Detailansicht des Anschlusses Stütze an Sparren – ästhetisch schlanke Querschnitte (Stütze 4/22 cm, Sparren 8/14 cm) mit nicht sichtbaren, innen liegenden versteckten Verbindungsmitteln. Detailansicht der Ecke im Winter – OSB-Beplankung der Rückwand und des Daches sowie Bitumenbahn als Dachabdichtung.

## Biegeträgerversuche

An der MPA Wiesbaden wurden seit 2006 mehrere Biegeträgerversuche durchgeführt, bei denen jeweils zwei Teilquerschnitte über eingeklebte Lochbleche und z.T. zusätzliche Stahlteile miteinander verbunden wurden. Im Einzelnen wurden u.a. folgende Biegeträger untersucht:

- Biegeträger aus 2 Teilquerschnitten,  $b/h = 16/16$  cm,  $I = 237$  cm, je Teilquerschnitt eingeklebte Lochbleche auf Zug- und Druckseite mit angeschweißten Stahlflanschen, Kopplung der Stahlflansche mit zusätzlichem Stahlprofil in der Trägermitte über Schraubenverbindung
- Biegeträger aus 2 Teilquerschnitten,  $b/h = 16/52$  cm,  $I_{ges} = 437$  cm, je Teilquerschnitt eingeklebte Lochbleche auf Zug- und Druckseite mit angeschweißten Stahlflanschen, Kopplung der Stahlflansche mit zusätzlichem Stahlprofil in der Trägermitte über Schraubenverbindung
- Biegeträger aus 2 Teilquerschnitten,  $b/h = 16/80$  cm,  $I = 688,5$  cm, je Teilquerschnitt eingeklebte Lochbleche auf Zugseite mit angeschweißtem durchgehenden Stahlflansch
- Biegeträger,  $b/h = 16/80$  cm,  $I = 688,5$  cm, Vollstoß, 4 Lochbleche in der Kontaktzone über die Trägerhöhe eingeklebt



Abbildung 35, 36, 37: Versuchsaufbau. Kopplung der beiden Stahlflansche mit dem mittigen Stahlprofil über Schraubenverbindungen. Abscheren der Schrauben als Versagensursache.



Abbildung 38, 39, 40: Versuchsaufbau. Abscheren des Holzes im Bereich der Klebeverbindung. Detailaufnahme des Lochbleches mit einer deutlichen Verformung der ursprünglich runden Lochungen zu Ovalen im Bereich der ersten Lochreihe.



Abbildung 41, 42, 43: Prüfkörper mit 4 Lochblechen in der Kontaktzone während der Herstellung. Versuchsaufbau als 4-Punkt-Biegeversuch. Versagen der Lochbleche als globales Prüfkörperversagen.

Aus technischer Sicht scheint hierbei insbesondere der Ansatz des Vollstoßes von Bedeutung. Hier zeigte sich zu Versuchsbeginn ein nahezu lineares Kraft-Verformungs-Verhalten, welches ab einem Lastniveau von ca. 150 kN von überproportionalen Verformungszunahmen geprägt war. Das Versagen stellte sich bei einer Maximallast von  $F_{\max} = 224,20 \text{ kN}$  ein ( $M_{\max} = 257,27 \text{ kNm}$ ) und wurde durch eine Abreißen der Lochbleche herbeigeführt. Holz und Klebeverbindung wiesen keinerlei Beschädigungen auf.

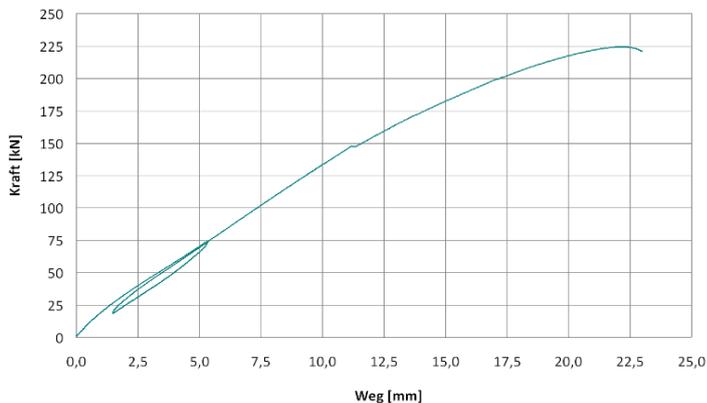


Abbildung 44: Kraft-Verformungs-Diagramm des Biegeversuchs mit dem Vollstoß.

## Zugversuche und Zugschwellenversuche in Verbindung mit Brettsperrholz

Nach positiv verlaufenden Voruntersuchungen, bei denen u.a. die charakteristische Tragfähigkeit sowie die Ermüdungsfestigkeit des Verbindungssystems „eingeklebte Lochbleche“ im Rahmen von Kleinversuchen ermittelt wurde, beschäftigte sich das Ingenieurteam der MPA Wiesbaden zuletzt mit Traglastversuchen an großformatigen Bauteilen unter Zug- und Zugschwellenbeanspruchung. Hierbei wurden Prüfkörper eingesetzt, bei denen jeweils zwei definierte Brettsperrholzquerschnitte über ins Holz eingeklebte Lochbleche miteinander verbunden wurden. Die Lochbleche bestanden aus Stahl S235. Der Durchmesser der Lochungen betrug stets 10 mm. Zum Einkleben der Lochbleche ins Holz wurden die Hölzer stirnseitig geschlitzt (Schlitzbreite ca. 4,2 mm). Die Schlitztiefe variierte in Abhängigkeit der Lochblechdimensionen. Ziel der Untersuchungen war die Bestimmung der Tragfähigkeit und der Ermüdungsfestigkeit der Holz-Lochblech-Klebeverbindung. Hierzu wurden an den Prüfkörpern sowohl Kurzzeitzugversuche als auch Zugversuche unter Zugschwellenbeanspruchung durchgeführt.

Abbildung 45 zeigt exemplarisch für die Kurzzeitzugversuche das Kraft-Verformungs-Diagramm eines Prüfkörpers mit einreihig eingeklebten Lochblechen, aus dem sehr deutlich das „gutmütige“ Traglastverhalten der Brettsperrholz-Lochblech-Klebeverbindung abgelesen werden kann. Bis zu einer Zuglast von ca. 125 kN und einer Relativverformung von ca. 0,4 mm liegt ein sehr steifes und nahezu lineares Kraft-Verformungs-Verhalten des Prüfkörpers vor, ehe es zu überproportionalen Verformungszunahmen kommt. Diese Verformungszunahmen sind auf ein Fließen des Lochblechs zurückzuführen und reichen bis zu einer Relativverformung von ca. 7,5 mm. Das globale Versagen des Prüfkörpers erfolgt auf einem Lastniveau von ca. 145 kN. Es ist gekennzeichnet durch ein Abriss des Stahlquerschnitts zwischen den einzelnen Lochungen des Lochblechs. Die Klebeverbindung selbst weist bei diesem Prüfkörper keinerlei Anzeichen eines Versagens auf. Bezogen auf die vorliegende Querschnittsfläche des Stahls an der Stelle des Versagens liegt auf Bruchlastniveau eine Stahlbruchspannung von 340,21 N/mm<sup>2</sup> vor.

In Abbildung 46 ist exemplarisch für die bisher durchgeführten Zugschwellenversuche die Detaildarstellung eines geöffneten Prüfkörpers dargestellt. Bei diesem Prüfkörper wurde eine Oberlast von  $F_o = 84,00$  kN sowie eine Unterlast von  $F_u = 8,40$  kN aufgebracht. Nach 547.437 Schwingspielen kam es zum Versuchsabbruch. Beim Öffnen des Prüfkörpers konnte ein Lochblechversagen (Ermüdungsbruch) festgestellt werden.

Wie die bisher an der MPA Wiesbaden durchgeführten Untersuchungen gezeigt haben, kann bei richtiger Wahl der Randbedingungen und richtigem Design der Prüfkörper das Traglastverhalten der Brettsperrholz-Lochblech-Klebeverbindung so eingestellt werden, dass sowohl in Kurzzeitzugversuchen als auch in Ermüdungsversuchen das globale Prüfkörperversagen durch den Werkstoff Stahl hervorgerufen wird. Dies ist insofern von Bedeutung, als das hierdurch die Einflüsse von Materialschwankungen reduziert und Bemessungen einfacher durchgeführt werden können. Zudem kündigt sich in das Versagen der Verbindung in Kurzzeitzugversuchen durch die vorliegende Duktilität über einen langen Weg an (im Fall von Stahlversagen).

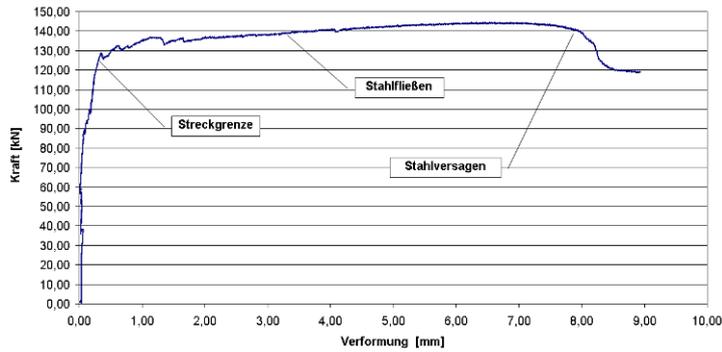


Abbildung 45, 46: Kraft-Verformungs-Diagramm für einen Prüfkörper mit ausgeprägt plastischem Fließverhalten und anschließendem Versagen des eingeklebten Lochblechs. Detaildarstellung eines im Rahmen eines Zugwellenversuchs getesteten Prüfkörpers mit einem Ermüdungsversagen des Lochblechs.

Zu den ersten konkreten Anwendungsgebieten für Lochbleche unter ermüdungsrelevanten Beanspruchungen zählen Windenergietürme aus Holz. Hier sollen Lochbleche für die Koppelung der einzelnen großformatigen Brettsperrholzelemente eingesetzt werden. Nach dem erfolgreichen Bau eines Testturms im Jahr 2010 soll im Jahr 2011 in Hannover der Bau des ersten Pilotturms erfolgen. Dieser weist eine Nabenhöhe von ca. 100 m auf.

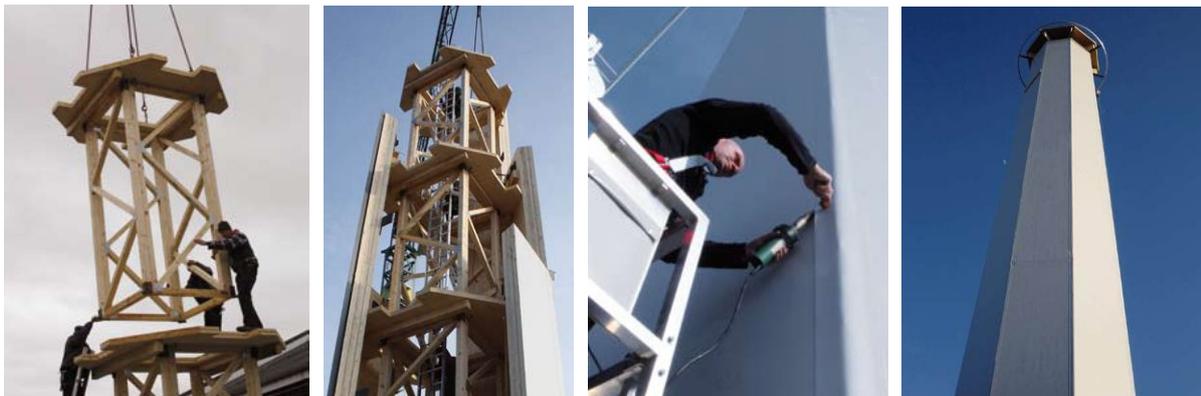


Abbildung 47, 48, 49, 50: Montage des Lehrgerüsts, Montage der vorgefertigten Wandelemente aus Brettsperrholz. Verklebung der Oberflächenbeschichtung mit systemintegriertem Aufzugssystem. Ansicht des fertig gestellten 25 hohen Abschnitt eines Testturms (Fotos TimberTower).

## Zusammenfassung

Die Holz-Metall-Klebetekologie stellt eine neue leistungsstarke Variante zur Ausführung von Verbindungen dar. Die Vorteile dieser neuartigen Verbindungsmitteltechnologie sind eindeutig: starr, duktil und mit nur minimaler Querschnittschwächung des Holzes bei vorhandener Ästhetik und vorliegendem Korrosionsschutz. Gleichzeitig ist das Anwendungspotenzial äußerst weitreichend. Aus Sicht der Autoren sind die Voraussetzungen für eine technisch abgesicherte Anwendung dieser Technologie inzwischen gegeben, da untersuchte Klebstoffsysteme existieren, die die Anforderungen der DIN 1052:2008 nach einer Temperaturbeständigkeit bis 60°C erfüllen. Daher steht einer flächendeckenden Verbreitung dieser Technologie nichts mehr im Wege. Vielfältige Varianten für eingeklebte Metallteile sind denkbar – Streckmetalle, Rohrhülsen sowie die in DIN 1052:2008 behandelten Stahlstäbe stellen erste Anwendungsbeispiele dar. Mit eingeklebten Lochblechen als Verbindungsmittel konnten bereits einige Bauwerke erstellt werden. Die Holz-Metall-Klebetekologie steht am Anfang ihrer Entwicklung. Die Autoren sind davon überzeugt, dass mit der Klebetekologie in der Zukunft neue Märkte für den Ingenieurholzbau erschlossen werden können.

## Literatur

- [1] Bathon, L.; Bletz, O.; Schmidt, J. (2006): „Untersuchungsbericht zum Holz-Stahl-Klebeverbundsystem mit eingeklebten Lochblechen“, Fachhochschule Wiesbaden, Holzbaulabor, unveröffentlicht
- [2] Bathon, L.; Bletz, O. (2008): „Bergehalle bei St. Moritz“, die neue quadriga 6/2008, Seite 26 – 29
- [3] Bathon, L.; Bletz, O. (2009): „Biegesteif und filigran“, bauen mit holz 5/2009, Seite 16 – 19
- [4] Bathon, L.; Bletz, O. (2009): „Fahrradunterstand als Experimentalbau“, die neue quadriga 1/2009, Seite 47 – 50
- [5] Bathon, L.; Bletz, O., Schmidt, J. (2009): „Holz-Stahl-Klebeverbund“, Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben Zukunft Holz, Hochschule Biberach
- [6] Deutsches Institut für Bautechnik (2003): „Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-9.1-557. Holz-Beton-Verbundsystem mit eingeklebten HBV-Schubverbindern“
- [7] Diehl, F. (2009): „Tragfähigkeitsuntersuchung von geklebten Rahmenecken“, Bachelorthesis an der Hochschule RheinMain, Institut für Baustoffe und Konstruktion, Labor für Holzbau, unveröffentlicht
- [8] Fritzen, K. (2006): „Ein bisschen Spaß muss sein“, bauen mit holz 6/2006, Seite 5 – 7
- [9] Jakob, S. (2007): „Rahmenecke spezial“, bauen mit holz 11/2007, Seite 16 – 19
- [10] Kreuzinger, H.; Spengler, R. (2003): „Gutachterliche Stellungnahme zum Tragverhalten eines Holz-Beton-Verbund-Systems mit eingeklebten Schubverbindern im Hinblick auf die beantragte allgemeine bauaufsichtliche Zulassung“, Technische Universität München, Fachgebiet Holzbau
- [11] Schreyer, A.; Bathon, L.; Prion, H.: „Determination of the Capacities of a new Composite Timber-Steel Connector System“, Proceedings of the World Conference on Timber Engineering 2000, Whistler Resort, Vancouver, B.C.
- [12] Spengler, R.; Kelletshofer, W. (2003): „Untersuchungsbericht Nr. 171907/03-1 vom 30.05.2003, Holz-Beton-Verbundsystem, Untersuchung des Tragverhaltens, Zulassungsversuche“, Technische Universität München, Institut für Baustoffe und Konstruktion, MPA Bau, Prüfstelle Holzbau

## Danksagung

Die vorgestellten Ergebnisse wurden u.a. im Rahmen eines Forschungsvorhabens erzielt, das durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie über den Projektträger AiF gefördert wurde. Ein besonderer Dank gilt in diesem Zusammenhang dem Fördermittelgeber sowie dem beteiligten Kooperationspartner Fa. Holzbau Gröber GmbH, 88436 Eberhardzell-Füramoos.

Zudem läuft derzeit an der Hochschule RheinMain ein vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördertes Forschungs- und Entwicklungsvorhaben, das sich zum Ziel gesetzt hat, Fachwerkstrukturen unter Verwendung von Holz-Lochblech-Klebeverbindungen zu entwickeln. Auch hier gilt unser Dank dem Fördermittelgeber sowie den beteiligten Unternehmen und Institutionen.

