

# IGF-Vorhaben-Nr. 19417 N - Wirtschaftliches Herstellen hochwertiger Holz-Beton-Verbundelemente durch Schnellklebtechnik und Einsatz von Laubholz

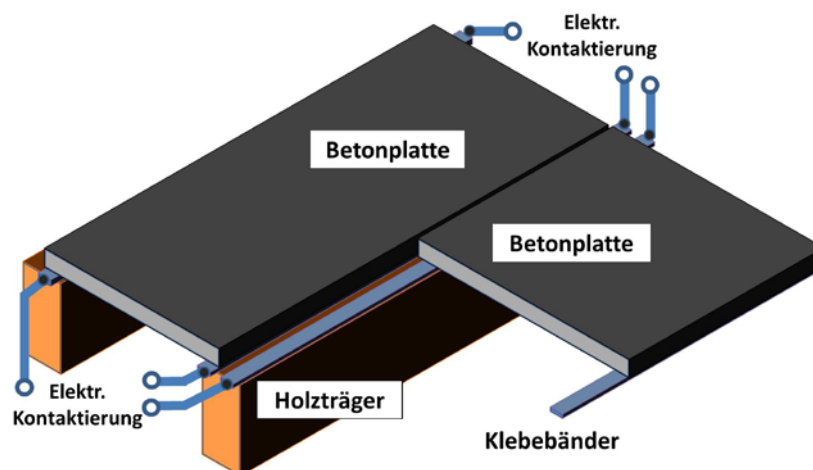
G. Wisner, E. Stammen, K. Dilger, M. Mérono, B. Kasal, J. Frohnmüller, W. Seim

Holz-Beton-Verbundbauweisen (HBV) erfahren zunehmende Nachfrage im Bauwesen, um die Vorteile der Einzelbaustoffe kombinieren zu können. Mit verschiedenen Füge-Techniken können zudem in Werken vorgefertigte Bauteile in Schnellbau-Konzepten realisiert werden. In einem Anwendungsforschungsprojekt der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) wurde eine Schnellklebtechnik mit beheizter Klebfuge für Holz-Beton-Verbund-Bauweisen untersucht. Eine elektrisch beheizte Klebfuge auf der Baustelle erlaubt das Kleben in einem erweiterten Umgebungstemperaturbereich und erzielt eine deutlich schnellere Anfangsfestigkeit des HBV, was sich günstig auf die Bauzeiten auswirkt. Die beheizte Klebfuge wurde innerhalb des Projektes einerseits mit einer für den Holztafelbau (Holz-Holz-Klebung) entwickelten vorbeschichteten Klebebandlösung (Schmelzklebstoff) und andererseits auch als einfache Fugenheizung, eingelegt in konventionelle 2K-Konstruktionsklebstoffe, untersucht, um auch die im Bauwesen schon zugelassenen Klebstoffe für HBV nutzen zu können. Die parallel zu Nadelholz betrachteten leistungsfähigen Laubholz-Werkstoffe sollten zudem am Beispiel der Buche die Möglichkeiten dieser höherfesten Werkstoffe im HBV-Verbund aufzeigen.

## 1 Einführung

Holz-Beton-Verbund (HBV) Konstruktionen erfahren speziell als Deckenelemente oder Dachelemente im Industriebau eine zunehmende Nachfrage im Bauwesen. Dabei können insbesondere Vorteile, wie hohe Tragfähigkeit bei geringem Eigengewicht, der verbesserte Schall- und Brandschutz in Holzbauten sowie kurze Bauzeiten – wenn vorgefertigt – genutzt werden. Auch der Aspekt der Nachhaltigkeit durch sparsamen Materialverbrauch und Einsatz nachwachsender Rohstoffanteile wird zunehmend wichtiger erachtet. Holz-Beton-Verbund-Bauweisen sind schon in verschiedenen Varianten seit den 20er Jahren des letzten Jahrhunderts bekannt und werden entweder durch direkten Aufguss des feuchten Betons auf eine bleibende Holzschalung erstellt oder es werden vorgefertigte Elemente mechanisch gefügt. Im Rahmen der Systematisierung der verschiedenen Zulassungsnormen aus den Einzelwerkstoffbereichen – Holzbau und Betonbau – wird im Rahmen des EUROCODE 5-3 eine einheitliche Vorgehensweise in Europa für den HBV angestrebt [1].

Ein geklebter HBV weist im Vergleich zu einem mit mechanischen Verbundmitteln gefügten HBV oder einem als feucht vergossenem Beton im HBV mit Schrumpfeffekten beim Abbinden eine höhere Steifigkeit auf. Die Herstellungstechnik eines geklebten HBV mit konventionellen 2K-Konstruktionsklebstoffen und das Langzeitverhalten der Verbunde wurden schon im Rahmen eines Anwendungsforschungsprojektes der IGF untersucht [2]. Zur Erweiterung des Applikationstemperaturbereichs auf Baustellen speziell hin zu tieferen Umgebungstemperaturen und der Erhöhung des Glastemperaturbereichs im ausgehärteten Zustand der Klebschicht wurde ein Konzept für den Holztafelbau [3,4] jetzt aufgegriffen und die beheizte Fuge im Holz-Beton-Verbund untersucht. Ziele waren, den Verbund des HBV mittels konduktiver Schnellklebtechnik (elektrischer Widerstandseffekt eines stromdurchflossenen Leiters) zu realisieren und dessen Kurz – und Langzeitverhalten zu untersuchen. Dabei sollten sowohl die im Bauwesen etablierten Nadelholz-Bauprodukte (hier: Fichte, zum Teil als Brettschichtholz-Produkt) als auch in jüngerer Zeit entwickelten Laubholz-Bauprodukte (hier: Buche, zum Teil als Furnierschichtholz-Produkt) betrachtet werden. Im Bereich des Betons wurden typische im Hochbau bzw. Fertigteiltbau verwendete mittel- bis leicht höherfesteste Stahlbeton-Güten betrachtet. Eine Beispiel-Baugruppe als Zwischendecke mit den neuen beheizbaren Klebfugen ist im Bild 1 dargestellt.



**Bild 1.** Beispiel-Baugruppe als Zwischendecke mit elektrisch beheizbaren Klebfugen (Illustration: © TU Braunschweig)

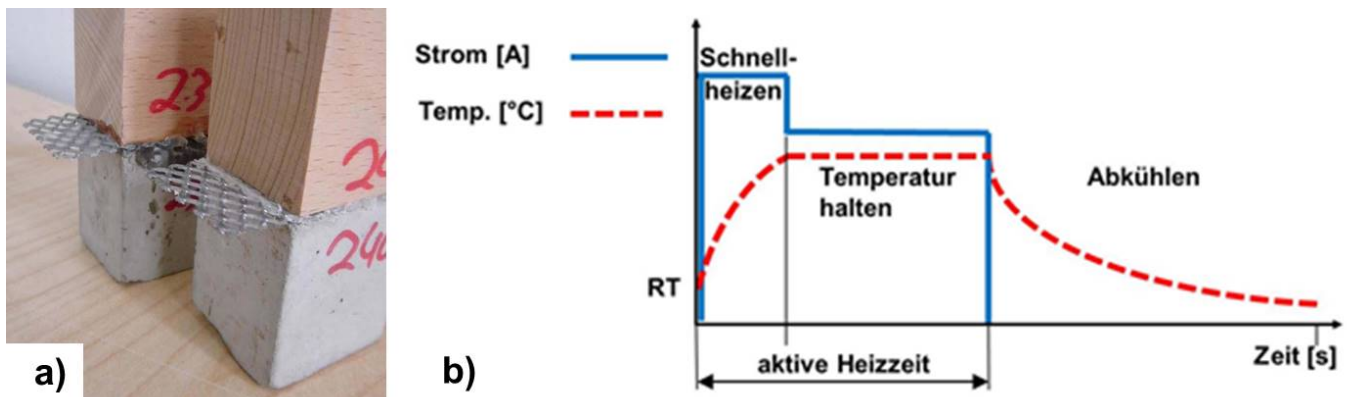
Vorgefertigte Stahlbetonplatten liegen auf Holzträgern aus Brettschichtholz oder Furnierschichtholz auf. Der Verbund durch Kleben wird erst auf der Baustelle erzeugt. Die Klebfuge wird durch elektrisches Kontaktieren der Klebandenden mit einer Baustellenstromquelle (analog einem Baustellen-Lichtbogenschweißgerät) beheizt. Im Nachfolgenden werden die Technik und die Randbedingungen der elektrisch beheizten Klebfuge an Beispielen im Labor-, über den Technikums- hin zum vollen Baustellen-Maßstab erläutert und abschließend ein kurzer Überblick über Ergebnisse der Kurz- und Langzeituntersuchungen im Projekt gegeben.

## 2 Konduktive Klebebandtechnik

Im Hochbau werden vielfach geometrisch einfache Elemente in Rechteck-, Quader- oder Stabform verwendet, die sich auch gut in ihren Abmessungen systematisieren lassen. Die Verbindung dieser Elemente untereinander zu Baugruppen erfolgt häufig punktförmig (Stifte, Schrauben, etc.) in Beanspruchungs-angepassten Abständen zueinander oder linienförmig über Nuten (Nut und Feder). Klebtechnisch interessant für solche langen und schmalen Fugen sind doppelseitig beschichtete Klebebänder, die als Rollenware abgerollt werden können. Die Klebstoffbeschichtung müsste jedoch im ausgehärteten Zustand mindestens semistrukturale bis voll strukturelle Eigenschaften aufweisen. Der weit überwiegende Anteil der derzeit am Markt verfügbaren Klebebandprodukte erfüllt diese Festigkeitsanforderung jedoch nicht. Nur wenige Klebebandprodukte sind durch verschiedene Aushärtungsmechanismen vernetzbar.

Die thermische Vernetzbarkeit einer Klebebandbeschichtung kann mit einer Beheizbarkeit der Klebfuge günstig kombiniert werden, welche den Wärmeabfluss in die Bauteile mindestens überkompensieren kann. Die direkte Fugenbeheizung ist auf einer Baustelle erforderlich, da die häufig großen Abmessungen der Bauelemente und die schwankenden klimatischen Verhältnisse eine thermische Behandlung von außen (d.h. durch die Substrate hindurch) sehr erschweren oder unmöglich machen. Damit sind die in Werkstätten oder Werken häufig angewendeten Erwärmungseinrichtungen als Heizpressen, Heizgebläse, Heizstrahler oder Induktionsspulen im Baustelleneinsatz zur thermischen Vernetzung von Klebstoffen ungeeignet. Die direkte elektrische Fugenbeheizung hingegen erzeugt die erforderliche Wärme nur dort, wo sie gebraucht wird und stellt damit eine energiesparende Technologie dar.

Die direkte elektrische Fugenbeheizung kann durch dünne metallische Leiter, wie dünne Bleche oder Folien, in eine Klebschicht eingebettet werden. Untersuchungen in [2,3] empfehlen eine gelochte oder gitterartige metallische Struktur, wobei sogenannte Streckmetallgitter die wirtschaftlichsten Halbzeuge hierfür darstellen. Zur Kontaktierung mit einer Baustellenstromquelle sollten die Band- oder Streckgitterenden aus dem HBV wenige Millimeter herausstehen, siehe Bild 2.



**Bild 2.** a) herausstehende Klebebandenden zur elektrischen Kontaktierung der Klebfugen im HBV (Foto: © Fraunhofer WKI), b) Heizprofil für das Schnellkleben (Illustration: © TU Braunschweig)

Die Widerstandserwärmung kann prinzipiell mit verschiedenen Stromarten erzielt werden: Wechselstrom mit üblicher Netzfrequenz, gleichgerichtet als Gleichstrom oder auch als mittelfrequenter Wechselstrom, wie er in der Induktionserwärmung üblich ist. Mangels zuverlässigem Berührschutz unter Baustellenbedingungen dürfen die Nennspannungen den Kleinspannungsbereich nicht überschreiten, daher wird, wie beim Lichtbogenschweißen, mit niedrigen Spannungen und hohen Strömen gearbeitet, um die erforderliche Heizleistung auch bei sehr langen Klebfugen bereitstellen zu können. Diesen geometrischen und sicherheitstechnisch Randbedingungen angepasst sind dann auch die metallischen Werkstoffe für die Streckmetallbänder auszuwählen, welche einen relativ niedrigen spezifischen elektrischen Widerstand im Temperaturbereich zwischen 0 °C und 200 °C aufweisen sollten [3]. Als günstig bezüglich des spezifischen Widerstandes haben sich verschiedene Kohlenstoff-arme Stahlsorten (unlegiert als Tiefzieh-Stähle der DC- oder DX-Reihen und auch hochlegiert z.B. als 18Cr9Ni) sowie Messingwerkstoffe mit relativ hohem Zinkgehalt (z.B. CuZn37) erwiesen, die sich auch umformtechnisch sehr gut zu Streckmetallen verarbeiten lassen (Kaltwalzen, Lochen, Ausstrecken).

Eine kontrollierte Beheizung der Klebfuge erfordert es, die ständig aktuelle Temperatur innerhalb dieser Klebfuge zu messen, um den Heizvorgang steuern und regeln sowie Übertemperaturen zuverlässig vermeiden zu können, da im Holz ab 160°C bereits Umwandlungsprozesse beginnen und über 200 °C eine Verkohlungs- und Brandgefahr droht. Temperaturfühler in Form dünner Thermoelemente (z.B. Typ K, Ni/CrNi, elektrisch isoliert gegenüber dem Hochstrom-führenden Heizelement) werden im einfachsten Fall punktförmig in die Klebfuge eingelegt und die dünnen Drähte seitlich herausgeführt. Durch die Verwendung von Streckmetallen und weiteren zu beachtenden Randbedingungen können sehr gleichmäßige Temperaturverteilungen in den Klebfugen erzielt werden. Dabei sind auch für große Bauteile sind nur einzelne Temperaturfühler in den langen linienförmigen Klebfugen erforderlich, um die Temperaturinformationen zu erhalten.

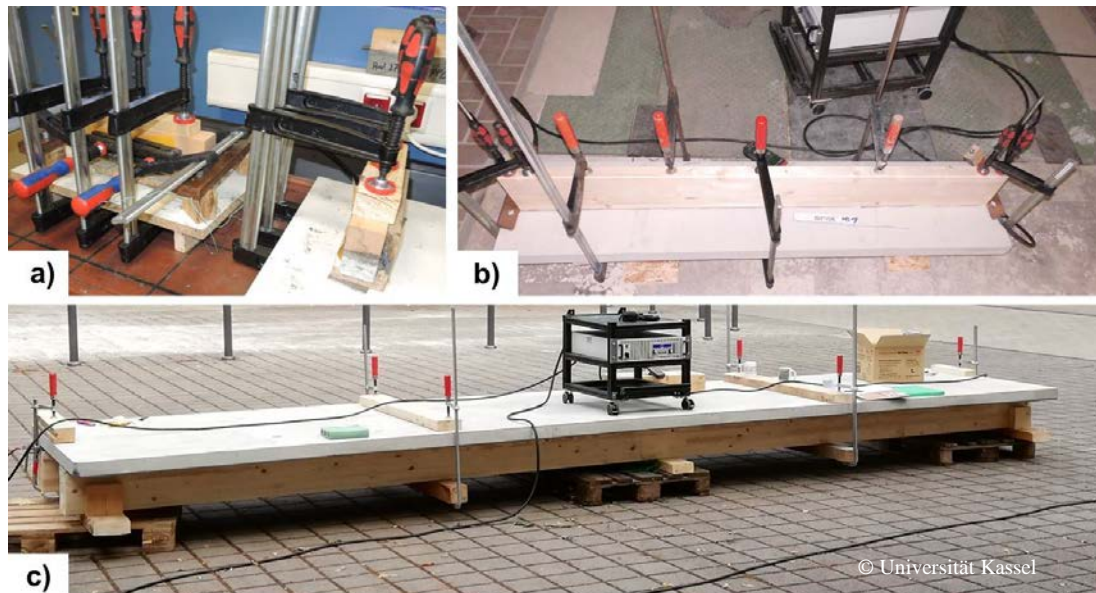
Wesentliche geometrische Randbedingungen für eine homogene Temperaturverteilung in der Klebfuge sind die Ebenheit und eine geringe Rautiefe der Fügeteilerflächen im Kontakt zum Heizband. Durch die hohe Energiedichte bei der Widerstandserwärmung im Streckmetall und den asymmetrischen Wärmeabfluss in die beiden sehr unterschiedlichen Substrate Holz und Beton stellen mögliche lokal unterschiedliche Kontaktbedingungen eine Gefahr durch die sogenannte Hotspot-Bildung dar. Dabei konzentriert sich die Stromdichte auf einen Bereich mit starkem Wärmestau und heizt diesen zusätzlich auf, wobei andere umliegende Bereiche kaum Erwärmung zeigen. Im Hotspot besteht Verkohlungs- und Brandgefahr für die Holzsubstrate und den Klebstoff. Daher sind in allen Bereichen der Klebfuge möglichst homogene Kontaktbedingungen anzustreben.

Bei den Kontaktbedingungen im Klebspalt können prinzipiell drei unterschiedlich wärmeleitende Bedingungen unterschieden werden: Festkörperkontakt, Flüssigkeitskontakt und fehlender Kontakt (Luftspalte, Gasblasen). Der Festkörperkontakt (Metallband auf Holz, Metallband auf ebenem Beton, mechanisch angepresst) sorgt für die homogenste Wärmeverteilung und stellt den robustesten Prozess dar. Der Flüssigkeitskontakt durch Klebstoffvolumen (auch als Spaltüberbrückung) hat einerseits sehr gute Kontaktbedingung, wenn gute Benetzung vorausgesetzt werden kann, jedoch können hohe Metalltemperaturen bei hohem Leistungseintrag die Klebstoffe schnell in einen Siedebereich mit Freisetzung niedermolekularer Bestandteile bringen (Bläschenbildung, Gasporen). Diese Gasporenbildung verringert die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  der Klebstoffschicht deutlich und kann Hotspotbildung begünstigen. Luftspalte in der Klebfuge weisen hohe thermische Widerstände auf, so dass sehr schnell eine Hotspotbildung bei den sehr hohen elektrischen Leistungsdichten induziert wird.

Zur Sicherstellung günstiger Kontaktbedingungen für das konduktiv beheizte Kleben von Fertigteilen aus Holz und Beton auf Baustellen müssen daher die Spaltmaße gering gehalten werden, damit der Klebstoffauftrag mindestens einen ausreichenden Flüssigkeitskontakt zwischen den Substraten und dem Heizband herstellen kann. Die Verwendung von Fertigteilen schafft grundsätzlich günstige Voraussetzungen für enge Maß-Toleranzen bei den als wesentlich erachteten geometrischen Parametern „Ebenheit“ und „Rautiefe“ der zu klebenden Oberflächen. Weitere geometrische Parameter wie Verwindungen und Durchbiegungen der Fertigteile kommen bei den oft schlanken stabförmigen oder flächigen Bauteilen hinzu. Jedoch sorgen die kontrollierten Fertigungsbedingungen in den Fertigteilwerken der Beton- und Holz-Industrie für günstige Randbedingungen und können in den Anforderungen oder Klassifizierungen für die Fertigung entsprechend berücksichtigt werden.

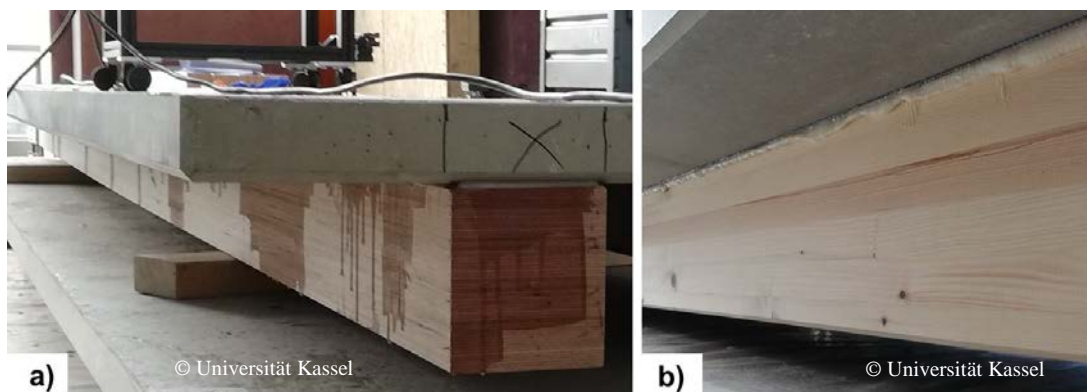
Im Holzbau ist die Oberflächenqualität bei den Anforderungen „Ebenheit“ und „Rautiefe“ relativ einfach erreichbar, da sich selbst die härteren Laubhölzer sehr gut sägen und ggf. grob hobeln lassen. Beim Betonfertigteil wird die Ebenheit“ und „Rautiefe“ durch den Schalungsbau geprägt. Stahlschalungen oder Holzwerkstoff-Schalungen aus vielen Einzelblechen oder -brettern bergen grundsätzlich die Gefahr von Stufen an den Stößen in langgestreckten Oberflächen, wenn diese im Schalungsbau nicht sorgfältig vermieden werden. An den Stufen kommt es geometrisch zu Spaltmaßsprüngen, die beim späteren kleben der abgeformten Fertigteile nur durch ausreichendes Klebstoffvolumen verfüllbar sind. Verwundene und durchgebogene Fertigteile können durch ausreichende Klemmwirkung von außen in die gewünschte Geometrie mit minimalen Spaltmaßen gezwungen werden. Die Klemmwirkung kann durch unterschiedliche Maßnahmen erzielt werden, für den Fall der Geschossdecken-Klebung kommt jedoch hauptsächlich ein Beschweren mit geeigneten Teilen (z.B. identisch große Fertigteile/Betonplatten) und sinnvoll ausgewählten Auflagerungen in Betracht, da die Zugänglichkeit für Schraubklemmen bei Geschossdecken oft stark eingeschränkt ist, im Gegensatz zu Labor- oder Technikumsklebungen, siehe Bild 3. Eine Substrat-Paarung von starren Holzträgern und dünnen und damit relativ biegeweichen Betonplatten kann die spaltarme Pressung gut unterstützen.

Der erforderliche Anpressdruck innerhalb der Fuge, welcher nur für vorbeschichtbare Hotmelt Klebstoffe erforderlich ist, wird durch Bauteilgewichte (Betonplatte) und Zusatzgewichte durch Auflagerung erzielt. Ein Mindest-Anpressdruck ist neben der Überwindung von Bauteilverzügen auch von der Viskosität des Klebstoffs abhängig. Bei der Verwendung von niedrigviskosen 2K-Klebstoffen mit Direktapplikation vor dem Kleben spielen seitliche Abdichtungsmaßnahmen an der Klebfuge eine wichtige Rolle, da insbesondere die Holzträger als Untergurte leicht durch austretenden Klebstoff verschmutzen können, siehe Bild 4.



**Bild 3.** HBV-Probekörperfertigung mit elektrisch beheizbaren Klebfugen in unterschiedlichen Längen und Umgebungsbedingungen: a) 300 mm im Labor, b) 1700 mm im Technikum, c) 6150 mm auf Freigelände/Baustelle (Fotos: © Fraunhofer WKI (a, b), Universität Kassel (c))

Maßnahmen zur Vermeidung von seitlichem Klebstoffaustritt sind u.a. das Anbringen von elastischen Dichtbändern (z.B. Quellbänder oder Dichtstoffraupen) oder Dichtleisten. Werden vorbeschichtbare Klebstoffe auf Streckmetallbändern verwendet, hängt der Mindestanpressdruck in der Klebfuge vom Viskositätsprofil im Schmelz- und Benetzungsbereich des Klebstoffs ab, welcher experimentell ermittelt werden muss.



**Bild 4.** HBV-Probekörper ohne seitliche Abdichtungen, a) 2K-Epoxidharzklebstoff mit Originalviskosität b) rheologisch höherviskos modifiziert (Fotos: © Universität Kassel)

Eine weitere wesentliche physikalische Randbedingung ist die „Rautiefe“ der Betonoberflächen. Zum Betonkleben mit konventionellen Kaltklebstoffen wird häufig eine möglichst raue Oberfläche empfohlen. Dabei ist Sandstrahlen eines der wirtschaftlichsten Verfahren zur Klebvorbehandlung von Betonoberflächen [2]. Hierbei wird die zementreiche Randschicht von Fertigteilen entfernt und auch das Größtkorn freigelegt. Dies resultiert in einer Größtkorn-abhängigen Rautiefe, bei Betonfertigteilen von deutlich mehr als 1 mm. Solche großen Rautiefen sind für die Methode der elektrisch beheizten Klebfuge ungeeignet, da sie kaum Festkörperkontakt zum Heizband bereitstellen und eine Hotspotbildung begünstigt. Im Projekt wurden daher verschiedene schalungsglatte Betonoberflächen mit ausgewählten Klebstoffen zu HBV geklebt und ausgewählte schalungsglatte Betonoberflächen mit der Zusatzanforderung „Trennstofffrei“ als geeignet beurteilt. Hier sind insbesondere Schalungen aus diversen Holzwerkstoffplatten mit festen Kunststoffbeschichtungen zu nennen, die eine ausreichende Trennwirkung beim Entschalen bereitstellen, ohne die Betonoberfläche mit entnetzenden Substanzen zu kontaminieren.

### 3 Klebstoffe für das konduktive Schnellkleben von HBV

Die beheizte Klebfuge für das Baustellenkleben kann auf zwei verschiedene Arten realisiert werden: als doppelseitig vorbeschichtete Klebebänder mit beheizbarem Träger oder durch frisch angemischte mehrkomponentige Konstruktionsklebstoffe, in die ein Heizgitter eingelegt wird. Als vorbeschichtbare Klebebandlösung wurde ein Co-Polyamid Schmelzklebstoff (Hotmelt) an den HBV untersucht, der bei reinen Holz-Holz-Klebgungen für den Holztafelbau gute

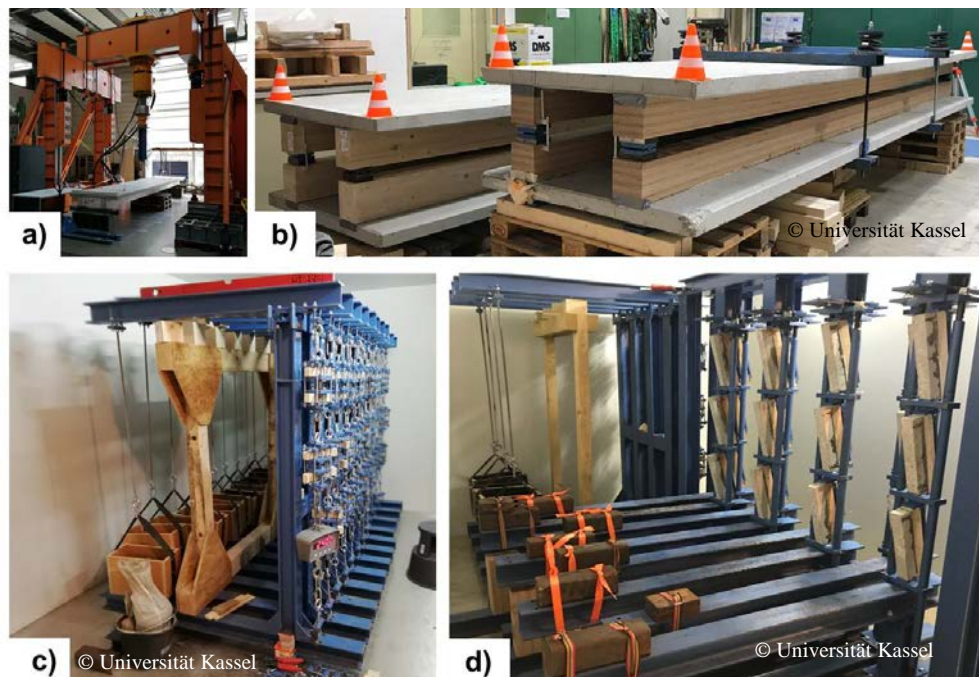


Ergebnisse zeigte [2]. Beim Kleben von HBV mit Hotmelt-Klebstoffen wirkt sich jedoch die Betonseite mit einer Reihe von ungünstigen Eigenschaften negativ auf die Klebqualität aus. Hier sind insbesondere die hohe thermische Leitfähigkeit des Beton-Substrats und die damit verbundene schwierige Benetzungsfähigkeit durch unzureichende Viskositätserniedrigung im Schmelzzustand zu nennen. Vergleichbare Ergebnisse zeigten auch weitere Hotmelt-Klebstoffe mit verschiedenen Nachvernetzungsmöglichkeiten (Wärme und/oder Feuchte) aus der Polyurethan-Familie.

Abseits von einer Hotmelt-Lösung stellen sich vorbeschichtbare Klebstoff-Alternativen mit hohem Vernetzungspotenzial durch Heißhärtung jedoch schwierig dar. Im Projekt wurden potenzielle Klebstoffkandidaten immer im Vergleich mit einem für den Holzbau bauaufsichtlich zugelassenen Klebstoff beurteilt, der als 2K-Epoxidharz auch auf Betonoberflächen sehr gut haftet und üblicherweise kalt aushärtet. Die Aushärtung kann prinzipiell durch Wärmezufuhr beschleunigt und auch auf einen erhöhten Vernetzungszustand gebracht werden, was zu einem erhöhten Glasübergangsbereich führen kann. Daher wurde dieser Klebstoff und ähnliche 2K-Konstruktionsklebstoffe ebenfalls mit der wärmeunterstützten Härtung als HBV geklebt. Dabei besteht jedoch nicht die Möglichkeit, „Klebebandhalbzeuge“ nutzen zu können, sondern hier wurde das Streckmetall als Heizelement in den viskosen Klebstoff eingelegt. Durch die niedrige Mischungsviskosität der 2K-Klebstoffe konnte die Betonseite sehr gut benetzt werden und Blockscherprüfungen nach DIN EN 14080 [5] von heißgeklebten HBV erfüllten die gestellten Anforderungen in der Regel sehr gut. Das Versagensbild waren meist Substratbrüche im Beton.

#### 4 Kurz- und Langzeitverhalten von schnellgeklebten HBV

Im Projekt wurden systematisch geeignete Werkstoffe (Holz, Beton, Klebstoffe) für den schnellgeklebten HBV ausgewählt und durch Screeningversuche bewertet. Im nächsten Schritt wurden geeignete Kombinationen einem umfassenden Prüfprogramm in Form von verschiedenen Kleinproben als Blockscher- und Schubproben bis 300 mm Kleblänge unterzogen [5]. Parallel dazu wurden schrittweise größere Biegeprüfkörper für Kurzzeit und Langzeit-Prüfungen gefertigt und geprüft. In einer begehbaren Klimakammer an der Universität Kassel, FG Holzbau und Bauwerkserhaltung, konnten umfangreiche Versuche zum Langzeitverhalten unter drei verschiedenen klimatischen Belastungen und Dauerlastbeanspruchungen durchgeführt werden. Hier fanden auch die Fertigungsversuche und die Traglast-Prüfungen der mittleren- (1700 mm Kleblänge) und großen Biegeproben (6150 mm Kleblänge) statt. Vier der Großproben wurden auf einem Kriechprüfstand in 4-Punkt-Biege Konfiguration verspannt und liefern auch über die Projektlaufzeit hinaus Daten zum Langzeitverhalten der neuartig geklebten HBV. Verschiedene Kurzzeituntersuchungen (Schub- und Delaminierungsprüfungen) fanden parallel dazu am Fraunhofer Institut für Holzforschung – WKI in Braunschweig statt. Bild 5 gibt einen Einblick in das umfangreiche Prüfprogramm in diesem Anwendungsforschungsprojekt. Die umfangreichen Ergebnisse werden im Abschlussbericht, der auch einen Vorschlag zu einem Leitfaden für die Herstellung von HBV enthält, veröffentlicht.



**Bild 5.** HBV-Probekörper in Kurzzeit- und Langzeitprüfungen: a) Großprüfmaschine für Tragfähigkeitsprüfung, b) 4 Großproben unter Langzeit-Kriechbelastung, c) begehbare Klimakammer mit Blockscherproben unter Dauerlast, d) Schubproben mit 300 mm Kleblänge unter Dauerlast im Klima (Fotos: © Universität Kassel)

Insgesamt lassen sich an dieser Stelle die Ergebnisse exemplarisch wie folgt zusammenfassen:

### **Kurzzeitverhalten**

- 1K-EP und 2K-EP eignen sich für eine Heißverklebung auf schalglatten Betonoberflächen
- Delaminierungsprüfungen nach DIN EN 302-2, Klebstofftyp I, eignen sich in der Werkstoffkombination Buche/Beton nicht als Nachweismethode für HBV-Bauteile, da Buchenholz zu stark im Wasser aufquillt; hier ist eine Anpassung der Fugengeometrie bzw. der Klebstoffeigenschaften notwendig oder die Bewertung sollte durch eine angepasste Prüfung vorgenommen werden.
- Die Werkstoffkombination Fichte/Beton liefert gute Ergebnisse bei der Prüfung nach DIN EN 302-2, Klebstofftyp I.
- Die Heißverklebung unterliegt verschiedenen Parametern (z.B. Temperatur, Dauer, Klebstoffauftrag), welche exakt beachtet werden müssen

### **Langzeitverhalten**

- HBV-Kombinationen aus Buche und schalglattem Beton zeigen aufgrund des hohen Quell- und Schwindverhalten des Laubholzes und der behinderten Verformung durch die starre Klebfuge vermehrt Risse im Beton. Aus diesem Grund ist auch die Resttragfähigkeit geringer, da die Risse die Festigkeit herabsetzen.
- Die HBV-Kombination aus Fichte und schalglattem Beton, hergestellt mittels 2K-EP, zeigt keine Kriechneigung und zeigt einen geringen Festigkeitsverlust der Klebfuge.
- Die Versagensarten aus den Kurzzeitversuchen konnten bestätigt werden:
  - Oberflächennahes Verbundversagen im Beton
  - Oberflächennahes Schubversagen im Holz
  - Kein adhäsives oder kohäsives Versagen des Klebstoffes

### **Trag- und Verformungsverhalten**

- Die Bauteile sind in ihrem Trag- und Verformungsverhalten sehr gut prognostizierbar.
- Die Klebfuge zeigt eine ausreichende Tragfähigkeit, sofern die Verklebung erfolgreich durchgeführt wird.
- 2K-EP-Klebstoffe mit angepasster Rheologie und hoher Thixotropie sind hierfür besonders geeignet.

### **Herstellungsprozess**

Bei der großen Bauteilserie hat sich das Erreichen eines durchgängigen Kontakts der Fügeteile als Herausforderung erwiesen. Der vollflächige Kontakt konnte durch modifizierte Herstellungsbedingungen erzielt werden. Durch eine angepasste Klebstoffviskosität wurde der Herstellungsprozess verbessert.

### **Werkstoffkombination und Klebstoff**

In der Werkstoffkombination mit Fichten-Brettschichtholz/Beton konnte immer ein Biegezugversagen erzielt werden. Warmgehärteter, rheologisch angepasster 2K-EP Klebstoff hat sich als besonders geeignet erwiesen. Die Werkstoffkombination Buchen-Furnierschichtholz/Beton zeigt ein großes Potential, jedoch auch größere Herausforderungen bei der Herstellung, Optimierungsbedarf ist erforderlich.

### **Berechnungsmodelle**

Die untersuchten Berechnungsmodelle sind zur Prognose der Langzeitverformungen geeignet. Zusätzlich zu den Nachweisen  $t = 0$  und  $t = \infty$  muss der Nachweis zum Zeitpunkt  $T = 3 - 7$  Jahre geführt werden.

## **5 Zusammenfassung**

Die beheizte Klebfuge für das Baustellenkleben von HBV wurde erfolgreich vom Labormaßstab bis in den vollen Fertigteilmäßig experimentell untersucht und ein Auslegungs- und Berechnungsmodell für zukünftige Zulassungsverfahren entworfen und validiert. Die Kombination aus Fichten-Brettschichtholz und Stahlbeton mit schalungsglatte Oberfläche, heiß geklebt mit einem modifizierten 2K-Epoxidharzklebstoff auf eingelegtem Streckmetall, erzielt die beste und reproduzierbarste Bauteilqualität. Mit der beschleunigten Aushärtung kann der Baufortschritt gegenüber der Kaltaushärtung deutlich beschleunigt werden.

## **6 Danksagung**

Das Vorhaben IGF Nr.19417N der Forschungsvereinigung Internationaler Verein für Technische Holzfragen e. V. (iVTH) in Kooperation mit der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e. V. des DVS wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Den genannten Organisationen und den Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschuss sei ausdrücklich gedankt.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Schrifttum

- [1] Dias, A.; Schänzlin, J.; Dietsch, P. (eds.), Design of timber-concrete composite structures: A state-of-the-art report by COST Action FP1402 / WG 4, Shaker Verlag Aachen, 2018. Online verfügbar unter: [https://www.costfp1402.tum.de/fileadmin/w00btl/www/All\\_Members/Dias\\_\\_A.\\_\\_Schaenzlin\\_\\_J.\\_\\_Dietsch\\_\\_P.\\_\\_\\_Design\\_of\\_Timber-Concrete\\_Composite\\_Structures.pdf](https://www.costfp1402.tum.de/fileadmin/w00btl/www/All_Members/Dias__A.__Schaenzlin__J.__Dietsch__P.___Design_of_Timber-Concrete_Composite_Structures.pdf)
- [2] Seim, W.; Eisenhut, L.; Kühlborn, S.; Ulrich, H.: „Neuartige geklebte Bauteile aus Holz und Beton – Untersuchungen zur Verbundfestigkeit bei thermisch-hygrischer Beanspruchung der Klebfuge“. Abschlussbericht IGF-17274 „Beständigkeit von Klebungen verstehen und berechnen (Best-Kleb)“, Universität Kassel, 2015.
- [3] Wisner, G.; Stammen, E.; Dilger, K.; Zillessen, A.; Brodel, M.: Neuartige Schnellklebebänder für den Fertighausbau, Fortschrittsberichte der Materialforschung und Werkstofftechnik des Clausthaler Zentrum für Materialtechnik (CZM) Bd. 1, zum 1. Niedersächsisches Symposium Materialtechnik, 12./13.02.2015, Clausthal-Zellerfeld, S. 289–298. Online verfügbar unter: [https://dokumente.ub.tuclausthal.de/rsc/viewer/clausthal\\_derivate\\_00000015/Tagungsband\\_Wisner.pdf?page=7](https://dokumente.ub.tuclausthal.de/rsc/viewer/clausthal_derivate_00000015/Tagungsband_Wisner.pdf?page=7)
- [4] Wisner, G.; Zillessen, A.; Brodel, M.; Stammen, E. und Dilger, K.: Schnellkleben im Fertighausbau durch neuartige konduktiv beheizte Klebebänder, Große Schweißtechnische Tagung, 15. - 17. September 2015, Nürnberg, DVS-Berichte, Band 315: DVS Congress 2015, ISBN: 978-3-945023-46-4, Verlag für Schweißen und verwandte Verfahren DVS-Verlag GmbH, Düsseldorf 2015, S. 4-9
- [5] Mérono, M.; Link, C.; Wisner, G.; Stammen, E.; Dilger, K.; Frohnüller, J.; Seim, W.: Innovative Heißklebung von tragenden Holz-Beton-Verbundelementen, adhäsion KLEBEN & DICHTEN 12/2019, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2019