ZUKUNFT
H O L Z

Statusbericht zum aktuellen Stand der Verwendung von Holz und Holzprodukten im Bauwesen und Evaluierung künftiger Entwicklungspotentiale

Auszug bestehend aus:
Kapitel 09 – Holzwerkstoffe, Verbundkonstruktionen

9 Holzwerkstoffe, Verbundkonstruktionen
Inhaltsverzeichnis

9.1 Holzwerkstoffe

Zukunft der Holzwerkstoffe – Holzwerkstoffe haben Zukunft! S. 655
Konstruktive Holzfaserplatten S. 659
DendroLight – leichte Massivholzplatte S. 665
Wabenplatten S. 669

9.2 Verbundkonstruktionen, Materialkombinationen

Konzepte für textile Bewehrungen in der Holzkonstruktion S. 675
Textilverstärkte Formholzrohre S. 687
Charakterisierung der Verbundfestigkeit von textilbewehrtem Holz S. 693
Holz-Beton-Verbund S. 699
Holz-Beton-Platten mit Klebeverbund S. 705
Holz-Beton-Verbund Systeme S. 711
Straßenbrücken in Holz-Beton-Verbundbauweise S. 715
Holz-Beton-Verbundträger im Straßenbrückenbau S. 719
Holz-Stahlfaserbeton-Verbundsystem S. 727
Wandverbundquerschnitte S. 735

9 Holzwerkstoffe, Verbundkonstruktionen
Einleitung

Holzwerkstoffe

Mit dem Sammelbegriff Holzwerkstoffe werden verschiedene plattenförmige und stabförmige Produkte bezeichnet, die durch Zerlegen des Holzes und anschließendes Zusammenfügen entstehen, meist unter Zugabe von organischen oder mineralischen Bindemitteln. Gelegentlich werden im Zusammenhang mit Holzwerkstoffen auch Benennungen wie "Neue Holzwerkstoffe" oder "Engineered Wood Products" verwendet. Diese Bezeichnungen sollen darauf hinweisen, dass im Vergleich zu den alt bekannten Produkten wie Spanplatten und Sperrholzplatten insbesondere die jüngeren Holzwerkstoffe wie zum Beispiel Furnierschicht- und -streifenholz, Langspanholz aber auch Verbundquerschnitte usw. gemeint sind. Mit der Bezeichnung „Engineered Wood Products" soll verdeutlicht werden, dass der Begriffsinhalt erweitert wird auf alle Produkte, die im Gegensatz zum klassischen Vollholz durch eine technische Bearbeitung vergütet und in ihren Eigenschaften homogenisiert wurden.

Während die aus Spänen und Fasern hergestellten Holzwerkstoffe in der Regel niedrigere Festigkeiten als Massivholz aufweisen, können bei den aus Furnieren oder Brettern hergestellten Holzwerkstoffen deutlich höhere Festigkeiten als beim Massivholz erreicht werden. Durch gezielte Anordnung der einzelnen Holzbestandteile kann zusätzlich die Belastbarkeit in einer bestimmten Richtung beeinflusst werden.

Europa lohnt sich langfristig

Auch im Bereich der Holzwerkstoffindustrie hält der Trend zur Entwicklung von Systemlösungen an. Neben einer Beschleunigung der Verarbeitung – nach dem Motto „Zeit ist Geld" – sind Anwendungssicherheit und Dauerhaftigkeit gefragt. Diese Kernaussagen trifft der Beitrag „Zukunft der Holzwerkstoffe – Holzwerkstoffe haben Zukunft" (Jana Sprockhoff). Danach haben die Holzwerkstoffe mit ihrem Leistungsprofil alle Voraussetzung für eine erfolgreiche Zukunft. Dies betrifft das Marktsegment des mehrgeschossigen Bauens ebenso wie den Gewerbebau oder das Bauen in Erdbebengebieten. Den Engpass einer weiteren Markterschließung sieht die Autorin eher im Bereich der anwendungsbezogenen Forschung sowie der Normung und Gesetzgebung; hier müssten Holzindustrie und Forschung weiterhin ihre Ressourcen bündeln, um den Planern und Verarbeitern mit Blick auf den EUROCODE und die EU-Bauproduktenrichtlinie schnellstmöglich standardisierte, einzelnachweisfreie Lösungen anbieten zu können. Die Erfahrung der letzten fünf Jahre seitens der Industrie zeige, dass der europäische Weg zur Erlangung von Prüf- und Klassifizierungsberichten sowie von Zulassungen zwar aufwendig und teuer sei, sich aber mittel- und langfristig lohne.

Im Trend: Leichte und stabile Platten

Wenn Ikea Interesse an einem Produkt oder einer Herstellungsweise bekundet, dann horcht die Fachwelt meistens auf. So äußerte der Hersteller von Mitnahmemöbeln unlängst, dass das Standard-Regal „Billy" mit seinen 36 kg einige Kilogramm zu schwer sei, um vom Kunden problemlos mit einer Hand nach Hause transportiert werden zu können. Daher hat der Möbelhersteller die bereits in den 1950er Jahren verwendete Wabenplatte wiederentdeckt, wie aus dem Beitrag „Wabenplatten" (Institut für Holzbau) hervorgeht. Das Konstruktionsprinzip entspricht dem eines dreischichtigen Sandwichaufbaus, bestehend aus zwei Decklagen und einer Zwischenschicht aus Papier oder Karton. Vor allem für Möbel und den Innenausbau wird dieses Material konstruktiv und optisch in Zukunft wieder interessanter werden.

Einen leichten Holzwerkstoff für den Bereich des konstruktiven Holzbaus beschreibt der Beitrag „DendroLight – leichte Massivholzplatte" (Johann Berger, Johannes Gaisbauer). Die ebenfalls drei-

schichtig aufgebaute Platte besteht aus einer zellenartig aufgebauten Vollholzmittelschicht mit zwei Decklagen. Die Decklagen können je nach Anwendungsbereich aus Dünnspan-, Massivholz-, Sperrholz-, Kunststoff- oder Faserplatten bestehen. Die Mittellage wird aus Seitenware oder auch schlechter Stammhauptware erzeugt, die einseitig eingesägt zu stehenden Lamellenkämmen verarbeitet werden. Die Bretter der Mittelschicht sind um 45° geneigt, wodurch die Produktion vereinfacht wird, ohne die Festigkeit zu reduzieren. Geeignet sind fast sämtliche Holzarten, hauptsächlich wird aufgrund der guten Marktverfügbarkeit jedoch Fichte verwendet. Entwickelt wurde das Bauelement in Österreich, zuerst 2004 für die Ski-Industrie, ein Jahr später für den Baubereich. Mittlerweile nachgewiesen sind seine guten Dauerstandfestigkeiten zusammen mit sehr guten Festigkeiten, ein guter Brandwiderstand sowie eine hohe Wärmedämmung.

DendroLight, ein Beispiel der aktuellen Holzwerkstoffentwicklung

Vom Stab zur Fläche

Ein großes Potenzial für eine steigende Holzverwendung findet sich auch beim Brettsperrholz. Der Beitrag „Konstruieren mit Brettsperrholz" (Jens Jamnitzky) wurde vor allem für den Tragwerkplaner geschrieben, der neben dem generellen Umgang mit diesen verklebten Vollholzelementen auch Details für die Anschlüsse der Wand an die Decke oder das Fundament an die Hand bekommt. Aufgrund der relativ hohen Masse besitzen Vollholzelemente neben dem Schallschutz große Vorteile beim sommerlichen Wärmeschutz. Neben der Möglichkeit, Raumluftfeuchtigkeit in größerer Menge zu puffern, lassen sich mit relativ geringem Aufwand luft- und winddichte Gebäudehüllen schaffen.

Einen Überblick über eine mittlerweile gut bekannte Holzwerkstoff-Gruppe gibt der Beitrag „Holzfaserplatten" (Norbert Rüther). Ihr hohes zukünftiges Potenzial findet sich vor allem in dem umfassenden Rohdichtebereich von 45 kg/m^3 bis über 1000 kg/m^3. Daraus resultieren auch die mannigfaltigen Eigenschaften der Platten, deren Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften, Wärmeleitfähigkeit und Diffusionsoffenheit sehr gut mit der jeweiligen Rohdichte korrelieren. Unterschieden werden die leichteren Holzfaserplatten, die im Bereich der Dämmung eingesetzt werden (vgl. Kapitel 11), und die mitteldichten bis harten Holzfaserplatten für den konstruktiven Einsatz.

Interessant für die Zukunft wird sein, dass sich die Fasern vor der Plattenfertigung so behandeln lassen, dass sich komplett andere Eigenschaften ergeben. Der Beitrag weist auf Versuche des Wilhelm-Klauditz-Instituts hin, wonach eine behandelte Platte zusammen mit einer unbehandelten Referenzplatte einem massiven Wechselklima ausgesetzt wurde; trotz der hohen Feuchtebeanspruchung konnte bei der im Vorfeld behandelten Faserplatte nahezu keine Dickenquellung beobachtet werden, während die Referenzplatte eine Quellung quer zur Fläche von etwa 20 % aufwies. Besonders herausragend ist, dass die Modifizierung der Fasern in einem ökologisch unbedenklichen Verfahren durchgeführt werden konnte, so dass sich in Zukunft viele weitere Möglichkeiten der Anwendbarkeit ergeben könnten.

Verbundkonstruktionen, Verbundwerkstoffe
Nachfolgend sind als Verbundkonstruktionen und Materialkombinationen all jene Produkte zusammengefasst, bei denen aus Holz in der Kombination mit anderen Baustoffen ein neues Anwendungsprodukt entsteht, die verwendeten Baustoffe aber nach wie vor getrennt erkennbar bleiben. So ergibt sich beispielsweise beim Holz-Beton-Verbund zwar ein zusammen wirkendes Produktsystem, die einzelnen Materialschichten aus Beton oben und Holz unten bleiben als solche erkennbar.

Im Gegensatz zu den beschriebenen Verbundkonstruktionen bzw. Materialkombinationen bilden bei Verbundwerkstoffen die enthaltenen Materialen einen neuen homogenen Werkstoff, dessen Stoffkomponenten nicht mehr ohne weiteres trennbar oder ablesbar sind. Die Entwicklung von Baustoffen wie Holzbeton oder thermoplastische Holzverbundwerkstoffe hat sich in den letzten Jahren stark beschleunigt. Diese Baustoffe eröffnen dem Holz neue Möglichkeiten der Bearbeitung und der Anwendung. So können zum Beispiel die Holzfasern im Verbund mit thermoplastischen Bindemitteln in ursprünglich Kunststoff verarbeitenden Maschinen verarbeitet werden und als stranggepresste Profile in einer für Holz gänzlich neuen Form zur Anwendung kommen.

Wirtschaftliche Holz-Beton-Verbindungen
Die Anzahl an Bauwerken, bei denen in den letzten Jahren die Verbindung von Holz und Beton zum Einsatz kam, ist rapide gestiegen. Die Beiträge „Holz-Beton-Verbund" (Leander Bathon, Oliver Bletz) sowie „Straßenbrücken in Holz-Beton-Verbundbauweise" (Antje Simon, Karl Tautenstrauch) zeigen die Anwendungsbereiche dieser Verbundbauweise. Diese liegen vor allem bei der Sanierung von Holzdecken sowie beim Neubau von Geschossdecken, Flachdächer oder Brücken. Der auf Biegung beanspruchte Verbund besteht aus einer oben liegenden Druckzone (Beton) und einer unten liegenden Zugzone (Holz).

Blockverleimter Brettschichtholzträger für eine Holz-Beton-Brücke mit Dübelleisten als Verbindungsmittel

Holzseitig liegt dabei eine ausgesprochen hohe Materialvielfalt vor, so können neben Vollholz auch Konstruktionsvollholz, Duo- und Triobalken eingesetzt werden, aber auch Brettschicht-, Brettsperr- oder Furnierschichtholz. Die großen Vorteile dieser Bauart liegen u.a. in den Sanierungsmöglichen bestehender Holzdecken, deren Tragfähigkeit und Gebrauchsfähigkeit durch Einbringen einer Betonschicht beträchtlich erhöht wird. Vergleichsrechnungen der Forschungsarbeiten von Bathon/Bletz zeigen, dass bei einer Holz-Beton-Verbunddecke trotz des höheren Deckeneigengewichts (durch Einbringen der Betonschicht) im Vergleich zur ursprünglichen Holzdecke eine bis zu 400 % erhöhte Tragfähigkeit vorliegt. Gleichzeitig wird die Steifigkeit der Deckenkonstruktion sowie ihr Schallschutzvermögen durch die Einbringung der zusätzlichen Masse erhöht. Legt man vergleichbare Eigenschaften zugrunde, sind Holz-Beton-Decken im Neubaubereich oft wirtschaftlicher herzustellen als reine Holz- oder Betondecken.

Formschluss ohne Verbindungsmittel
Untersuchungen zum Last-Verformungsverhalten von Holz-Beton-Verbundkonstruktionen haben

weiterhin gezeigt, dass durch einen zusätzlichen Formschluss die notwendige Verbundfestigkeit zwischen Holz und Beton wesentlich erhöht werden kann. Üblicherweise werden vor dem Einbringen des Betons Verbindungsmittel aus Metall (Schrauben, Bolzen, Flachstahl u.ä.) im Holz befestigt. Der Beitrag „Holz-Stahlfaserbeton-Verbundsystem" (Andreas Heiduschke, B. Kasal) zeigt eine Möglichkeit, wie auf diese Verbindungsmittel verzichtet werden kann.

Zum einen wird betonseitig so genannter Stahlfaserbeton eingesetzt, dessen 30 mm lange Stahlfasern zu einer Erhöhung der Zugfestigkeit führt. Dies ermöglicht den Verbund von Holz und Beton allein durch deren Formschluss zu realisieren. Zum anderen wird eine Verbundwirkung erreicht durch zylindrische Ausnehmungen im Holzteil, in die der faserverstärkte Frischbeton einfließt und nach dem Aushärten eine Verzahnung der Druck- und Zugzone bildet. Diese Verzahnung ist ausreichend, um einen dauerhaften und schubfesten Verbund zu gewährleisten. Diese Methode lässt sich sowohl bei neuen als auch bei bestehenden Gebäuden einsetzen. Die Verbindung mit Beton hat für das Holz auch den Vorteil, dass es beim Abriss des Gebäudes problemlos weiterverwendet oder einer thermischen Nutzung zugeführt werden kann (da kein Eintrag von Giftstoffen während der Herstellung bzw. Nutzungsphase).

Sandwichelemente

Eine weitere viel versprechende Verbundkonstruktion bilden die Sandwichelemente. Diese erfreuen sich immer größerer Beliebtheit, da sie rationell hergestellt und den Anforderungen entsprechend gestaltet werden können. Im Holzbau sind bereits Sandwichelemente für lastabtragende Wände im Markt erhältlich, wobei nahezu alle Systeme einen Kern aus Hartschaum – wie Polystyrol oder Polyurethan – aufweisen. Dabei haben Dämmungen aus Holzfasern ebenfalls hervorragende Eigenschaften. Der Beitrag „Wandverbundquerschnitte" (Norbert Rüther) untersucht Wandverbundelemente, bei denen überwiegend Holzwerkstoffe zum Einsatz kommen.

Als Deckschichten wurden dabei sowohl OSB als auch Gipsfaserplatten verwendet, in den Kern wurden Holzfaserdämmplatten mit unterschiedlichen Rohdichten eingebracht. Dabei erwiesen sich solche Deckschichten vorteilhaft, die sowohl hohe Druck- und Zugfestigkeiten aufweisen als auch eine möglichst eingeschränkte Längenänderung bei Feuchte- und Temperaturänderungen. Da der dämmende Kern des Sandwichs ebenfalls tragende Aufgaben zu übernehmen hat, muss er eine ausreichende Festigkeit und Steifigkeit aufweisen. Da Festigkeit verbunden mit der Rohdichte der Platten umgekehrt proportional zur Wärmeleitfähigkeit ist, galt es einen Kompromiss zu finden, der bei einer Rohdichte von etwa 250 kg/m^3 liegt. Insgesamt ist diese Sandwichbauweise eine ernst zu nehmende Alternative zum meist verwendeten Holzrahmenbau, vor allem im industriellen Bereich wie der Fertighausindustrie.

Textile Fasern ertüchtigen Holz

Statische Unterstützung durch einen anderen Werkstoff erfährt der Baustoff Holz nicht nur durch Beton und Glas, auch textile Fasern können als Bewehrung von Holzträgern dienen. Gerade bei größeren Holzträgern – wie bei Brettschichtholz-Trägern größerer Hallentragwerke – findet sich eine Schwachstelle auf der Unterseite der Hölzer, da hier die wirkenden (Zug-) Kräfte zumeist am höchsten sind. Der Beitrag „Charakterisierung der Verbundfestigkeit von textilbewehrtem Holz unter Berücksichtigung von Witterungsfaktoren" (Robert Putzger, Peer Haller) geht auf die Haltbarkeit verschiedener Textilverstärkungen ein, deren Dauerhaftigkeit bei Witterungseinfluss sehr verschieden sein kann. Die noch nicht abgeschlossenen Untersuchungen zeigen, dass auch hier ein wachsendes Potenzial für Holz als Baustoff zu finden sein wird.

9.1 Holzwerkstoffe
Zukunft der Holzwerkstoffe – Holzwerkstoffe haben Zukunft!

Jana Sprockhoff

1 Allgemeines

„Mit Holz dem Klimawandel entgegnen" heißt eine 2006 veröffentlichte Publikation der European Panel Federation (Verband der europäischen Holzwerkstoffhersteller). In guter verständlicher und informativer Form erklärt sie die Vorteile von Holz als

- nachwachsende Ressource (bei nachhaltiger Forstwirtschaft),
- Ressource zur stoffliche Wiederverwertung (Kaskadennutzung),
- Klima- und Sozialfaktor in Waldflächen,
- umweltfreundliche, CO_2-neutrale Energiequelle für die thermische Verwertung,
- Werkstoff, der die Sinne anspricht.

Damit wären schon die wichtigsten Argumente für Holz- und Holzwerkstoffe benannt und man könnte sich entspannt zurücklehnen und einmal mehr „Holz ist Klasse" ausrufen. Doch nur zu bekannt sind uns die Lebenszykluskurven von Produkten – die weisen am Ende nach unten – und das auch bei einem so hervorragenden Werkstoff wie Holz. Denn letzten Endes ist das Holz zumeist der Rohstoff, nicht das fertige Produkt. Das muss sich wie alle anderen Produkte auch täglich auf dem Markt mit Vorteil- und Nutzen-Argumenten bei den Verwendern behaupten, muss sich an verändernde Gegebenheiten anpassen, die aus neuen Bedürfnissen der Endverbraucher, Umwelt und Vorgaben der Gesetzgeber resultieren. Das gelingt durch die Verbindung von Werkstoff, Forschung und Entwicklung sowie ingenieurtechnischem Know-how – es bleibt also viel zu tun – auch in der Zukunft.

2 Die wichtigsten Trends

Im Jahr 2008 wurden in Deutschland etwa 10,5 Mio. m³ Spanplatten, ca. 3,5 Mio. m³ Faserplatten und etwa 1,2 Mio. m³ OSB gefertigt. Hinzu kommen ca. 260.000 m³ Sperrhölzer. Damit ist die deutsche Holzwerkstoffindustrie ein bedeutsamer Teil der Holzkette. Holzwerkstoffe sind aus dem Bauwesen, der Möbelindustrie, dem Innenausbau, dem Messebau, der Verpackung und vielen anderen Bereichen fast nicht weg zu denken. Aber auch in der Holzwerkstoffbranche entscheidet ein hohes Maß an Innovationskraft über den weiteren Erfolg. Aus Sicht der Autorin dominieren folgende Themen auch weiterhin die Entwicklungstrends:

- Ressourcen,
- Design,
- Dauerhaftigkeit / Dimensionsstabilität unter Feuchteeinwirkung,
- Innenraumluft / Umwelt,
- Anwendungseffizienz.

2.1 Einsparung und Schonung der (nachwachsende) Ressourcen

Verstärkt durch Entwicklungen von Möbeldesigns, die große Plattendicken fordern und die Nachteile von Holzwerkstoffplatten mit >650-800 kg/m³ Rohdichte offensichtlich machen, wird sich die Suche nach Technologielösungen weiter fortsetzen.

Entwicklungen wie

- Leichtbau-Platten wie EUROLIGHT® (Wabenkern-Technologie)
- Gewichtsreduktion durch Mehrschicht / Sandwich oder Armierungen,
- Leichtbauplatten aus lamellierten Sägewerks-Nebenprodukten wie Seitenware,
- Gewichtsreduktion durch Additive (Einbau leichter Partikel/Hohlraumbildner)

sind noch nicht ausgereizt.

Richtig erfolgreich können diese Produkte jedoch nur sein, wenn parallel die anwendungstechnische Entwicklung für Verarbeitungslösungen (Verbindungsmittel, Beschläge, Bekantung) Schritt hält.

Das letzte Jahrzehnt war in der Holzwerkstoffindustrie von enormen Investitionen in allen Produktbereichen hinsichtlich Kapazitätserweiterung und Technologie–Neuentwicklung (Herstellung / Umwelttechnologie) gekennzeichnet.

Mit dem Wettbewerb ums Holz werden sich Wissenschaft und Industrie erneut auch Zellulosefasern /-partikel liefernden Ressourcen zuwenden, die bisher aufgrund technologischer Probleme ungenutzt geblieben sind. Die Bandbreite reicht da von Riesengras, Schnellumtriebsbaumarten bis zu den Resten ausgepresster Zitronen.

Für Bauprodukte ist Gewichtsreduktion immer wieder ein Thema, wobei im Kanon von Dauerhaftigkeit, Tragfähigkeit und Brandverhalten ebenfalls noch einige Nüsse zu knacken sind.

Hier können aus Projekten, die sich mit dem flächigen bzw. dreidimensionalen Werkstoffverbund Holz / Beton, Holz / Metall, Holz / Textil befassen, neue Lösungen im Bau und anderen Bereichen erwartet werden. (s. Kap. 9.2 „Verbundkonstruktionen")

2.2 Witterungs- und Alterungsbeständigkeit

Die BAU 2009 hat es bestätigt – Holz im Feucht- und Außenbereich ist nach wie vor ein Trendthema.

Neben Fragen der optischen Gestaltung (Farben, Oberflächen, Formate) ist der Blick der Entwickler auf den Verbraucherwunsch nach Umwelt- und Gesundheitsschutz und die Vermeidung vorbeugender Holzschutzmaßnahmen - wo es sinnvoll baulich möglich ist - gerichtet.

Die Weiterentwicklung von Verfahren wie
- Acetylierung von Holz (s. Kap. 8.2 „Modifiziertes Holz"),
- Weiterentwicklung des Leistungsprofils von Wood-Plastic-Composites (WPC),
- thermische Behandlung (Thermowood®) zur Verbesserung von Alterungsbeständigkeit und Resistenz (s. Kap. 8.2 „Modifiziertes Holz"),
- sowie der Reduzierung der Dickenquellung zur Verbesserung der Formstabilität durch hydrophobierende Additive
- sowie neuartige Beschichtungen

sind auch weiterhin Entwicklungsschwerpunkte.

2.3 Holz und Holzwerkstoffe mit Design-Anspruch

Im Bereich des Möbel- und Innenraumdesigns setzten Holzwerkstoffe immer wieder neue Trends. Neben den Designs (Farbe, Dekor, Struktur, Haptik) wird vor allem an der Optimierung der Trägerplatten und deren Oberflächenqualität gearbeitet. Ziel sind Werkstoffe für neue Beschichtungstechnologien:
- emissionsarme Beschichtungstechnologien (z.B. Pulverlack, ESH),
- Direktdruckverfahren mit hoher Farbbrillianz und Nachbildung haptischer Effekte,
- Digital-Direktdruck mit trendigen Design-Effekten,
- Hochglanz als hoch beanspruchbare Lack bzw. Laminat- oder Folienoberfläche auch im Arbeitsflächenbereich,
- Pulverlacke, die auf beliebig dreidimensionale Flächen aufgebracht werden können und keine Zugabe leitfähig machender Additive in die Trägerplatte erfordern,
- Verbesserung des Brandverhaltens als Voraussetzung für die Verwendung im öffentlichen Raum.

2.4 Weitere Reduktion von Emissionen

Mit der nicht unumstrittenen Neueinstufung des Formaldehyd im Jahr 2004 durch die IARC-Behörde der Weltgesundheitsorganisation (WHO) wurde bei den Leim- und Holwerkstoffherstellern sowie den Prüf- und Forschungsinstituten erneut einen Entwicklungsschub in Gang gesetzt.

Neben dem Trend Formaldehydvernetzte Bindemittel durch PMDI-Leim zu ersetzen (vorrangig im Bereich der tragenden Bauprodukte für Nutzungsklasse 2) wird an der Optimierung etablierter Bindemittel weiter geforscht. Noch kann technologisch und mengenmäßig nicht auf formaldehydhaltige Bindemitteln verzichtet werden. Jedoch gibt es bereits für die Herstellung eines emissionsarmen Leimes auf Basis von Soja ein US-Patent. Es ist zu ahnen, dass es die Gewinnung von Biomasse für Leim im Wettbewerb mit Bio-Energieträgern und Nahrungsmitteln schwer haben wird.

Dennoch - emissionsfreie und wirtschaftliche Alternativen zum PMDI (gerne auch kalt klebend) würden auf breites Interesse stoßen.

Verwirrend ist die Situation allerdings für die Hersteller geworden, da hier einzelne Länder und Organisationen parallel mit viel Druck neue Standards zur Prüfung und Zertifizierung installiert haben. Neben bekannten Emissionsklassen wie E1 (EN 13986 – Holzwerkstoffe für das Bauwesen) und mittlerweile auch bekanntem japanischem F****- Standard müssen sich Hersteller mit dem amerikanischen CARB- sowie dem europäischen EPF-S-Standard auseinandersetzten. Das bindet viele Ressourcen und es bleibt zu wünschen, dass die Beteiligten in Zeiten weltweiten Warenverkehrs in absehbarer Zeit ein (globales) vereinheitlichtes System finden.

Im Zuge der Erarbeitung von Regelwerken zur Verbesserung der Innenraumluftqualität ergeben sich für Holz und Holzwerkstoffe neue Anforderungen. Gesetzliche Regelwerke zur Energieeinsparung und Luftdichtheit der hoch gedämmten Gebäudehülle verschärfen die Anforderungen.

Mit seinen natürlichen Inhaltstoffen beinhaltet das Holz auch leicht flüchtige Substanzen (VOC's). Deren Wirkmechanismus auf Wohlbefinden und Gesundheit des Menschen sowie Verfahrenstechniken zur Reduktion von VOC-Emissionen sind aktuell und zukünftig Forschungsgegenstand der Holzwirtschaft und Prüfinstitute.

Wichtige neue Erkenntnisse sind aus laufenden Forschungsprojekten zu erwarten. Die Thematik ist bei der Vielzahl der zu betrachtenden Substanzen und Substanzgemische äußerst komplex. Ein ganzheitlicher Lösungsansatz, der Produkt und Gebrauchssituation berücksichtigt und vor allem für Planer und Gebäudenutzer handhabbar ist, sollte angestrebt werden.

Dann steht einer weiterhin erfolgreichen Entwicklung des Baustoffs Holz nichts im Wege, wo auch gerade die Januar 2009 publizierte Studie „Öko-Pot – Ökologische Potentiale der Holznutzung" die Sinnhaftigkeit einer steigenden Verwendung des Werkstoffs Holz aufgezeigt hat.
(www.oekopot.de).

2.5 Anwendungstechnik und Effizienz – „Vom Produkt zum System"

Die enorm gewachsenen Schnittholzkapazitäten in Deutschland, Österreich und der Schweiz haben zu einer vielfältigen Entwicklung von Massivholz-Produkten und Systemlösungen beigetragen.

Die Entwickler von Balkenschichtholz, Brettsperrholz inklusive Bau-Systemlösungen, Holz-Beton-Verbund-Elementen und Brettstapel-Bauweisen arbeiten an der weiteren Optimierung der Gebrauchseigenschaften.

Auch im Bereich der Holzwerkstoffe hält der Trend zur Entwicklung von Systemlösungen an.

Neben einer Beschleunigung der Verarbeitung – „Zeit ist Geld" – sind Anwendungssicherheit und Dauerhaftigkeit gefragt.

Die Situation insbesondere im Wohnungsbau (Einfamilienhaus) drängt zur Erschließung neuer Marktsegmente (mehrgeschossige Holzbauten, Holzbau in Erdbebengebieten, Gesellschafts- und Gewerbebau).

Holzwerkstoffe haben mit ihrem Leistungsprofil alle Voraussetzungen für eine erfolgreiche Entwicklung in diesem Bereich.

Eine weiterhin erfolgreiche Zukunft für Holz- und Holzwerkstoffe setzt voraus, dass neben der Produkt- und Systementwicklung auch in der anwendungsbezogenen Forschung sowie der Normung und Gesetzgebung aktiv mitgearbeitet wird.

Holzindustrie und Forschung müssen weiterhin ihre Ressourcen bündeln, um den Planern und Verarbeitern mit Blick auf EUROCODE und EU-Bauproduktenrichtlinie schnellstmöglich standardisierte einzelnachweisfreie Lösungen anzubieten, wie es bisher zum Beispiel DIN 4102-4: 2001 „Brandverhalten von Bauteilen“ oder DIN 1052-3: 1988 – „Holzbau“ konnten.

Denn die Erfahrung der letzten fünf Jahre zeigt: Der europäische Weg zur Erlangung von Prüf- und Klassifizierungsberichten und Zulassungen ist aufwendig und teuer – aber er lohnt sich.

Quellen

[1] „Mit Holz dem Klimawandel entgegnen“ 2006, Publikation der European Panel Federation (Verband der europäischen Holzwerkstoffhersteller).
[2] Stellungnahme des BfR vom 29.11.2004 „Formaldehyd – gefährlicher als bisher angenommen?“
[3] Entwurf zur Holzwerkstoffbroschüre des VHI und HAF (Publikation geplant 2009)

9.1 Holzwerkstoffe
Konstruktive Holzfaserplatten

Norbert Rüther

1 Allgemeines

Die Familie der Holzfaserplatten zählt zur großen Gruppe der Holzwerkstoffe und stellt innerhalb dieser Gruppe die wahrscheinlich größte und vielfältigste Familie dar. Holzfaserplatten werden als einzige Holzwerkstoffe mit einer Rohdichte von ca. 45 kg/m³ bis über 1000 kg/m³ hergestellt. So umfassend der Rohdichtebereich ist, so mannigfaltig sind die Eigenschaften, wobei viele Eigenschaften, wie z.B. Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften, Wärmeleitfähig- und Diffusionseigenschaften sehr gut mit der Rohdichte korrelieren.

Alle Holzwerkstoffe sind Ingenieursprodukte, die mit den Eigenschaften hergestellt werden können, die der jeweilige Anwendungsbereich verlangt. Aufgrund der besonders umfangreichen Gestaltungsmöglichkeiten bei den Holzfaserplatten, sind auch deren Anwendungsgebiete vielfältig:

Dämmung
WF nach DIN 13171; Anwendungsgebiete nach DIN 4108: Dach/Decke DAD, DAA, DZ, DI, DEO, DES, Wand WAB, WAA, WAP, WH, WI, WTH, WTR,

Konstruktiv
Rohdichtebereiche nach DIN EN 622: HB, MBL, HBH, UL-MDF, L-MDF, MDF, SB
Anwendungsgebiete nach DIN EN 622: H, E, LA, LS, HLA1 und 2, HLS1 und 2,

Das Kürzel bei den konstruktiven Platten nach DIN EN 622 bedeutet beispielhaft Folgendes:

HB-E = harte Platte (hardboard)– Anwendung im Außenbereich (external)

UL-MDF = Ultraleichte MDF

MBH-HLS = schwere mittelharte Platte (medium-density board, heavy) – Anwendung tragend im Feuchtbereich (humidity, load)

Im konstruktiven Bereich sind neben den Normplatten zudem noch Platten mit einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung (abZ) im Markt erhältlich. Diese werden in der Regel übergreifend mit bautechnischer MDF bezeichnet und finden überwiegend im klassischen Holztafelbau Verwendung.

Zudem gibt es noch vielfältige Werksnormen von großen Möbelherstellern, in denen zudem noch diverse Eigenschaften für den Möbelbau definiert sind.

In diesem Artikel wird ausschließlich auf die konstruktiven Holzfaserplatten eingegangen. Dämmungen werden an anderer Stelle behandelt. Die Übergänge zwischen Dämmung und konstruktiver Anwendung sind jedoch wiederum fließend, da auch konstruktive Holzfaserplatten dämmen und Dämmplatten tragen können. So sind z.B. die Dämmungen in den Wärmedämmverbundsystemen durch Eigengewicht und Wind mechanisch beansprucht, so dass diese problemlos beiden Bereichen zugeordnet werden können. Diese Produkte fallen jedoch in den Anwendungsbereich WAP nach DIN 4108, müssen somit Anforderungen nach DIN EN 13171 erfüllen und gelten als Dämmstoffe. Somit werden im Folgenden die durch diese Normen gesetzten Grenzen übernommen.

2 Konstruktive Holzfaserplatten

2.1 Materialeigenschaften

2.1.1 Mechanische Eigenschaften

Konstruktive Holzfaserplatten werden gemäß DIN EN 622 nach ihrer Fertigungstechnik, Rohdichte, Feuchtebeständigkeit und Festigkeit eingeteilt (Tab. 1).

Tab. 1: Einteilung von Holzfaserplatten gemäß DIN EN 622

	Nicht tragend				Tragend		Hoch belastbar	
	Trockenbereich		Feucht-bereich	Außen-bereich	Trockenbereich	Feucht-bereich	Trocken-bereich	Feucht-bereich
	Leichte Verklei-dung	- Innen-ausbau						
harte	HB		HB-H	HB-E	HB-LA	HB-HLA1		HB-HLA2
mittelharte	MBL (light)	MBH (heavy)	MBL-H MBH-H	MBL-E MBH-E	MBH-LA1	MBH-HLS1	MBH-LA2	MBH-HLS2
mittel-dichte	L-MDF UL-MDF	MDF	MDF-H MDF-RWH L-MDF-H		MDF-LA	MDF-HLS		
poröse	SB		SB-H	SB-E	SB-LS	SB-HLS		

Es sind jedoch nicht alle in DIN EN 622 genannten Produkte in Deutschland im Baubereich verwendbar. Die Verwendbarkeit und somit die baurechtliche Anwendbarkeit wird für die Normprodukte über DIN 1052 geregelt. Hier sind im Anhang F der Norm die charakteristischen Materialeigenschaften für die Plattentypen HB.HLA2 und MBH.LA2 aufgeführt (Tab. 2).

Tab. 2: Rechenwerte für die charakteristischen Festigkeits- und Steifigkeitskennwerte für Faserplatten der technischen Klassen HB.HLA2 und MBH.LA2 nach DIN EN 13986: 2002-09 (aus DIN 1052)

	1	2	3	4	5
1	Technische Klasse	HB.HLA2 (harte Platten)		MBH.LA2 (mittelharte Platten)	
2	Nenndicke der Platten in mm	> 3,5 bis 5,5	> 5,5	<= 10	>10
Festigkeitskennwerte in N/mm²					
Plattenbeanspruchung					
3	Biegung $f_{m,k}$	35	32	17	15
4	Druck $f_{c,90,k}$	12		8	
5	Schub $f_{v,k}$	3	2,5	0,3	0,25
Scheibenbeanspruchung					
6	Biegung $f_{m,k}$	26	23	9	8
7	Zug $f_{t,k}$				
8	Druck $f_{c,k}$	27	24		
9	Schub $f_{v,k}$	18	16	5,5	4,5
Steifigkeitskennwerte in N/mm²					
Plattenbeanspruchung					
10	Elastizitätsmodul E_{mean}	4800	4600	3100	2900
11	Schubmodul G_{mean}	200		100	
Scheibenbeanspruchung					
12	Elastizitätsmodul E_{mean}	4800	4600	3100	2900
13	Schubmodul G_{mean}	2000	1900	1300	1200
Rohdichtekennwerte in kg/m³					
14	Rohdichte r_k	850	800	650	600

Tab. 3: Rechenwerte für Modifikations- und Verformungsbeiwerte (aus DIN 1052)

Nutzungsklasse		1	2
Modifikationsbeiwerte			
HB.HLA2	ständig	0,30	0,20
	lang	0,45	0,30
	mittel	0,65	0,45
	kurz	0,85	0,60
	sehr kurz	1,10	0,80
MBH.LA2	ständig	0,20	nicht erlaubt
	lang	0,40	
	mittel	0,60	
	kurz	0,80	
	sehr kurz	1,10	
Verformungsbeiwerte			
HB.HLA2		2,25	3,00
MBH.LA2		3,00	nicht erlaubt

Alle Holzfaserplatten sind relativ empfindlich gegenüber dauerhafter Belastung und gleichzeitiger Feuchteeinwirkung. Diese Eigenschaft wird durch die relativ niedrigen Modifikationsbeiwerte berücksichtigt. So ist z.B. für Holzfaserplatten des Typs MBH.LA2 selbst in Nutzungsklasse 1, jedoch bei ständiger Lasteinwirkung, ein Modifikationsbeiwert von k_{mod} = 0,20 anzusetzen. Vollholz oder Sperrholz ist unter gleichen Bedingungen mit einem Modifikationsbeiwert von k_{mod} = 0,60 zu berücksichtigen. Die in DIN 1052 im Anhang F aufgeführten Modifikations- und Verformungsbeiwerte für Faserplatten gibt Tab. 3 wieder.

Die Materialeigenschaften der Faserplatten mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung sind in der Regel in der Größenordung der Normplatten des Typs MBH.LA2. Die tatsächlichen Werte müssen den jeweils gültigen allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen entnommen werden.

2.1.2 Bauphysikalische Eigenschaften

Allen Faserplatten gemein ist, dass sie gegenüber der Diffusion von Wasserdampf einen relativ geringen Widerstand bieten. Der sogenannte µ-Wert korreliert jedoch auch wiederum stark mit der Plattenrohdichte. Da es Faserplatten in nahezu allen Rohdichten gibt, sind bei diesen Platten die Beziehungen zwischen Rohdichte und µ-Wert relativ gut bekannt. Abb. 1 zeigt beispielhaft die Abhängigkeit des µ-Wertes von der Plattenrohdichte bei einem Faserplattentyp. Während der untere Grenzwert des µ-Wertes gegen 1 tendiert, beträgt der obere zurzeit bekannte Grenzwert etwa 70.

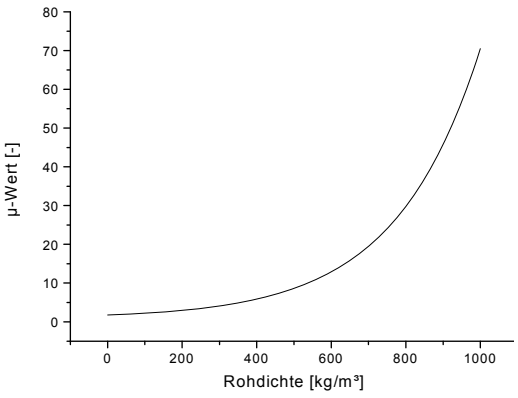


Abb. 1: µ-Werte von Faserplatten und interpretierte Exponentialfunktion in Abhängigkeit von der Rohdichte [WKI]

Im Baubereich mit Anforderungen an die Eigenschaften hinsichtlich des Widerstandes gegenüber Wasserdampfdiffusion finden vorrangig Fa-

serplatten mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung Verwendung. Diese sind alle mit einem µ-Wert um ca. 10 bis 15 relativ diffusionsoffen. Der praktische Schwankungsbereich ist dabei aus baupraktischer Sicht auch weitestgehend unrelevant.

Vorgenanntes gilt sinngemäß auch für die Wärmeleitfähigkeit. Die üblichen Faserplatten für den Holzhausbau weisen bei einer Rohdichte zwischen ca. 550 und 650 kg/m³ eine Wärmeleitfähigkeit von 0,09 bis 0,11 W/mK auf. Bei den schweren Platten mit einer Rohdichte zwischen 800 und 1000 kg/m³ beträgt die Wärmeleitfähigkeit etwa 0,13 bis 0,17 W/mK.

2.2 Anwendungsgebiete

Wie aus den aufgeführten Materialeigenschaften ersichtlich ist, ist der vorrangige Anwendungsbereich der der Aussteifung von Rahmentragwerken. Diese Anwendung ist auch schon aus dem Möbelbau bekannt, wo die Rückwand aus „Hartfaserpatten" dafür sorgt, dass der Möbelkorpus ausgesteift wird. Da alle Holzfaserplatten ein zähelastisches und kein sprödes Tragverhalten aufweisen, sind sie als Bauprodukte sehr beliebt. Die Tatsache, dass Faserplatten jedoch ein relativ ausgeprägtes Kriechverhalten haben, schränkt die Anwendbarkeit unter Plattenbeanspruchung wiederum ein.

Wahrscheinlich mehr als 90 % aller konstruktiven Holzfaserplatten werden als äußere, hinterlüftete Beplankung von Dach- und Wandtafeln im klassischen Holztafel- oder Holzrahmenbau verwendet (Abb. 2). Die sehr gute Kombination zwischen bauphysikalischen und mechanischen Eigenschaften machen sie für diesen Einsatzbereich ideal.

Ein weiterer Anwendungsbereich ist in der industriellen Fertigung von Doppel-T-Trägern aus Holz (I-Joists). Zwischen die beiden Gurte aus Vollholz wird ein Steg aus Holzwerkstoffen eingeklebt. Wegen der sehr guten Eigenschaften von Faserplatten auf Schubbeanspruchungen, werden die Stege häufig aus dünnen (ca. 6 bis 8 mm dick) Hartfaserplatten hergestellt (Abb. 3).

Abb. 2: Klassischer Anwendungsbereich einer konstruktiven Holzfaserplatte, hier als hinterlüftete äußere Wandbeplankung im Holzbau (im Foto noch ohne Fassade) [WKI]

Abb. 3: Hartfaserplatten als hoch belastbarer Steg in Doppel-T-Trägern aus Holz [Steico]

Weitere konstruktive Anwendungen sind der Schalungsbau (Betonschalung) und sehr häufig auch der Theaterbau, die jedoch beide nicht mehr zum klassischen Holzbau zählen und somit in der Regel auch nicht in den Statistiken erfasst werden, so dass es keine verlässlichen Zahlen über die Menge der in diesen Bereichen verwendeten Platten gibt. In beiden Anwendungsbereichen werden in der Regel dünne Hartfaserplatten als Verbrauchsmaterial verwendet, da sie auf-

grund ihres Preis-Leistungsverhältnisses anderen dünnen Holzwerkstoffen wie z.B. Sperrholz gegenüber klar im Vorteil sind.

3 Ausblick

Holzfaserplatten bieten ein nahezu unüberschaubares Potential an Entwicklungen. Alleine die Tatsache, dass nahezu der gesamte Rohdichtebereich zwischen ca. 40 kg/m³ und über 1000kg/m³ gefertigt werden kann, lässt erahnen, wie viele Möglichkeiten der ingenieurmäßigen Fertigung gegeben sind. Die Fasern können vor der Plattenfertigung zudem noch eingefärbt, acetyliert oder irgendwie anders behandelt werden, so dass sich komplett andere Eigenschaften ergeben. Abb. 4 zeigt beispielsweise besondere Faserplatten, die im Technikum des Fraunhofer WKI hergestellt worden sind. Die Platte links in der Abbildung ist massiv mit klimatischen Wechseln (Wasserlagerung und Trocknung) beansprucht worden – die Platte rechts in der Abbildung ist unbeansprucht. Es ist trotz der massiven Feuchtebeanspruchung nahezu keine Dickenquellung oder sonstige Veränderung zu erkennen. In Abb. 5 ist vergleichend dazu eine Faserplatte (Anwendung als Fassadenplatte – Typ HB.HLA2) gezeigt, die den gleichen Beanspruchungen unterzogen wurde. Obwohl der Typ HB.HLA2 den am stärksten beanspruchbaren Plattentyp darstellt, quillt sie um ein wesentliches mehr, als die in Abb. 4 gezeigte Platte, deren Fasern vor der Plattenherstellung einem besonderen Verfahren unterzogen wurden. Besonders herausragend ist, dass die Modifizierung der Fasern auch mit ökologisch unbedenklichen Verfahren durchgeführt werden kann, so dass sich in Zukunft viele weitere Möglichkeiten der Anwendbarkeit ergeben können.

Abb. 4: Faserplatten mit besonderer Behandlung der Fasern vor (rechts) und nach (links) extremer klimatischer Beanspruchung [WKI]

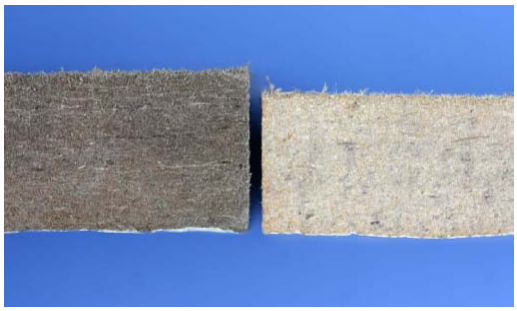


Abb. 5: Faserplatten des Typs HB.HLA2 vor (rechts) und nach (links) extremer klimatischer Beanspruchung [WKI]

Quellen

[1] Informationsdienst Holz – holzbau handbuch Reihe 3, Teil 3, Folge 3

[2] Informationsdienst Holz – holzbau handbuch Reihe 4, Teil 5, Folge 2

[3] Informationsdienst Holz – holzbau handbuch Reihe 3, Teil 4, Folge 1

[4] Informationsdienst Holz – holzbau handbuch Reihe 4, Teil 5, Folge 2

[5] Herlyn, J.W.; Rüther, N.: Gefährdung von Holzkonstruktionen bei Verzicht auf wasserableitende Schichten in Außenwänden ohne vorbeugenden chemischen Holzschutz nach DIN 68800-2. Abschlussbericht 2006. Fraunhofer IRB-Verlag

[6] Herlyn J.W., Kessel M., Rüther N. und Schönhoff T. „Verbundquerschnitte aus Holzwerkstoffen für lastabtragende Wände" Schlussbericht des Forschungsvorhabens 2004

[7] Herlyn, J.W.; Rüther, N.: Ermittlung des Gefährdungsrisikos von Holzaußenbauteilen mit Plattenwerkstoffen infolge Schwind- und Quellverformungen anhand praxisnaher Untersuchungen. Abschlussbericht 2007. Fraunhofer IRB-Verlag

[8] DIN 1052: ab Ausgabe 2004 Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken

[9] DIN 622 Teile 1 bis 5 Faserplatten - Anforderungen

[10] Schlussbericht „Neue Einsatzmöglichkeiten von Holzfaserdämmplatten im Holzbau". VDI/VDE-IT Verbundprojekt Nr. IN-5027. Fraunhofer WKI und Universität Karlsruhe. Dezember 2008.

9.1 Holzwerkstoffe
DendroLight – leichte Massivholzplatte

Johann Berger

1 Einleitung

Die DendroLight Massivholzplatte ist eine neue Innovation im Bereich der plattenförmigen Holzwerkstoffe. „Dendrolight" setzt sich aus den Wörtern déndros = Baum (aus dem Griechischen) und light = leicht (aus dem Englischen) zusammen. Frei übersetzt bedeutet Dendrolight also der „leichte Baum".

Bereits 2004 wurde diese neuartige Stirn-Längsholzverklebung für die Ski Industrie entwickelt und ein Jahr später auf Leichtbauplatten übertragen.

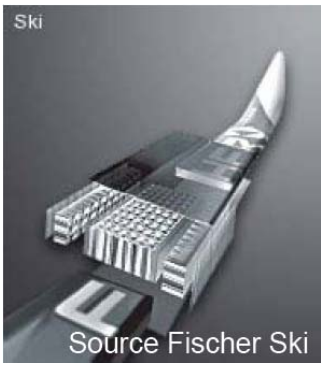


Abb. 1: neuartige Stirn-Längsholzverklebung

Auch wenn stirnseitige Verklebungen in der Praxis und Fachkreisen der Holztechnologie als nicht mechanisch belastbar gelten, so haben mechanische Prüfungen gezeigt, dass die Klebeverbindung zwischen Deck- und Mittelschicht eine hohe Festigkeit aufweist, was möglicherweise auf die Ausbildung einer „Kehlnaht" aus Klebstoff zurückzuführen ist. Diese Erkenntnisse sind unter Umständen auch auf andere Anwendungen übertrag- und nutzbar.

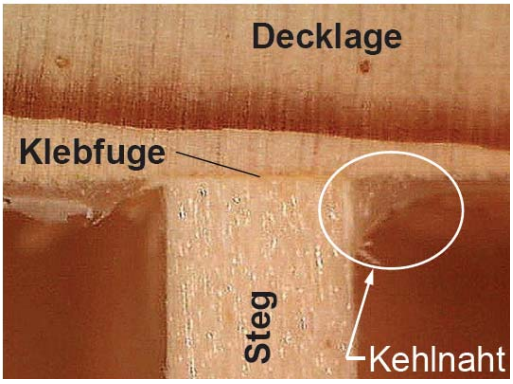


Abb. 2: Stirnseitige Klebefuge für die Verbindung Mittelschicht – Deckschicht

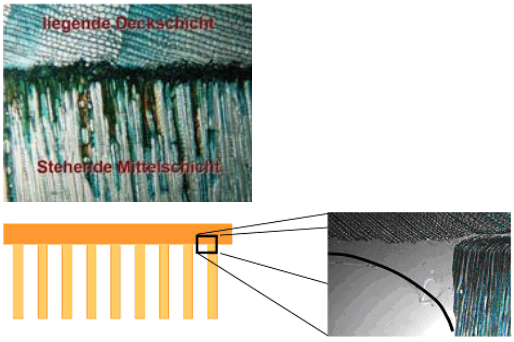


Abb. 3: mikroskopische Darstellung der stirnseitige Klebefuge (oben), Ausbildung der „Kehlnaht" (unten, rechts)

Die dreischichtig aufgebaute Platte besteht aus einer zellenartig aufgebauten Vollholzmittelschicht mit zwei Decklagen. Die Decklagen sind variabel, je nach Anwendungsbereich. Diese können z.B. Dünnspan, Massivholz, Sperrholz, Kunststoff, Faserplatten, etc. sein. Die Mittellage wird aus Seitenware oder auch schlechter Hauptware erzeugt, die einseitig eingesägt zu stehenden Lammellenkämmen verarbeitet werden. Die Bretter der Mittelschicht sind um 45° geneigt, wodurch die Produktion vereinfacht wird, ohne die Festigkeit zu reduzieren. Dazu sind sämtliche Holzarten (Nadel- oder Laubholz) geeignet, hauptsächlich wird jedoch auf Grund der besten Marktverfügbarkeit Fichte verwendet.

Durch diese Verarbeitung erfährt der eingesetzte Rohstoff Holz eine höhere Wertschöpfung zu einem innovativem Hightech Werkstoff.

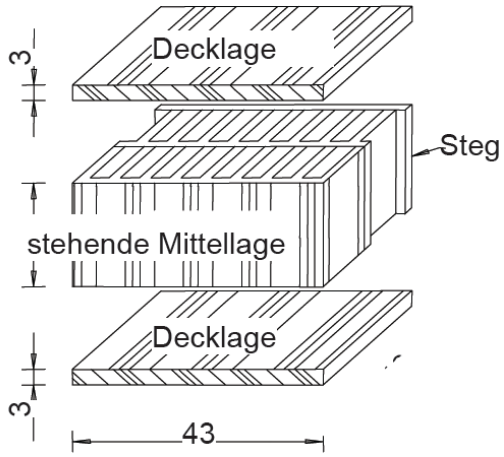


Abb. 4: Schema der einzelnen Lagen

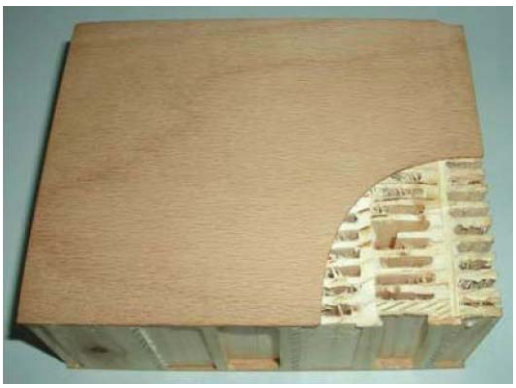


Abb. 5: DendroLight

Auch Holzfehler, wie Bux, Bläue, Braunfäule (nagelfest), Astigkeit der Rohware können ohne Probleme verarbeitet werden. Die Innovation liegt in der Anordnung der Mittellage und in der Idee, aus einem Sägenebenprodukt (Seitenware) einen hochwertigen Hightech Baustoff für zahlreiche Verwendungsmöglichkeiten zu produzieren. Bei der Produktion der Mittellage fallen zusätzlich noch ca. 50 % des Rohstoffeinsatzes als Reststoff – trockene Sägespäne an. Diese können stofflich (z.B. Spanplatte, Pellets oder Brickets) oder thermisch (z.B. Energie und Strom) verwertet werden. Eine Innovation nach dem Prinzip der Kreislaufwirtschaft.

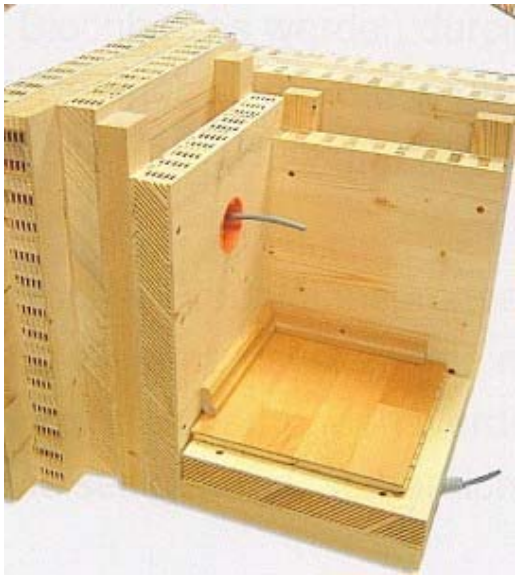


Abb. 6: fertiges DendroLight - Bauelement

2 Eigenschaften

Durch den verleimten Aufbau der DendroLight Platten sind diese ebenso verarbeitbar wie Massivholz (sägen, nagelbar, schraubbar) und weisen auch bei wechselnden Klimaverhältnissen eine hohe Dimensionsstabilität auf.

2.1 Festigkeit

Die DendroLight- Platten zeigen sehr gute Festigkeitseigenschaften, die vergleichbar mit Sperrholz sind. Die Biegesteifigkeit liegt mit 8000 N/mm² im Bereich von Sperrholz und auch die Biegefestigkeit von 28 N/mm² ist vergleichbar mit C24 Brettschichtlamellen.

Durch die spezielle Konstruktion der Mittellage ist eine sehr hohe Energieaufnahme möglich, was das Bruchverhalten der Platten stark verbessert.

Die Querzugsfestigkeit beträgt ca. 2,5 N/mm² (4- bis 5-mal soviel wie Spanplatte), die Schubfestigkeit liegt im Bereich einer OSB oder Sperrholz-

platte, wobei eine DendroLight Platte eine deutlich geringere Dichte (ca. 250 – 300 kg/m³ - was 40 – 50 % einer massiven Fichte bzw. ca. 45 % von OSB oder Sperrholz entspricht) besitzt. Das sehr gute Schubverhalten zeigt, dass die stirnseitige Verklebung moderner Kleber deutlich leistungsfähiger ist, als angenommen. Zudem ist der Klebstoffanteil ist mit < 4 % deutlich geringer als bei vielen anderen Holzwerkstoffen.

Kriechversuche über mehrere Monaten zeigten, analog zu Massivholz, sehr gute Kriecheigenschaften.

2.2 Bauphysikalische Eigenschaften

Durch die geringere Dichte ergibt sich im Vergleich zu massiven Werkstoffen eine sehr gute Wärmedämmung. und

Auch die Brandbeständigkeit der DendroLight Platten ist sehr gut. Bei einer Plattendicke von 50 mm wird bereits ohne Brandschutzmittel die Feuerwiderstandsklasse F30 erreicht, mit Brandschutzmittel sogar F60. Durch den Hohlkammeraufbau ist das einbringen von Brandschutzmitteln oder auch Fungiziden einfach möglich.

3 Anwendungen

Bei der innovativen Mittellage können unterschiedliche Decklagen verwendet werden. Ob Massivholz, Spanplatte, Faser-, Sperrholz oder auch andere Materialien wie Glas und Metall. Diese Variabilität öffnet ein weites Spektrum der Anwendung.

Anwendungsbereiche sind zum Beispiel:

- Möbelbau, Regalsysteme, Palettenlager:
  Gewichtsersparnis (ca. 1/3 von Spanplatte), Reduktion von Transportkosten, Einsatzmöglichkeiten im Do- it- yourself Bereich.
- Innenausbau, Türen, Wandelemente, Deckenelemente, Fußbodenkonstruktionen:
  geringes Gewicht, hohe Wärmedämmung, guter Brandwiderstand, hohe Energieaufnahme bei Zerstörung
- Fahrzeugbau (Zug/LKW), Schiffsbau:
  gute Wärmedämmung, geringes Gewicht, hohe Energieaufnahme bei Zerstörung, gute Witterungsbeständigkeit und hohe mechanische Kennwerte
- Tragende Bauteile, Fertigteilhaus, Wandelemente:
  gute Dauerstandfestigkeiten, sehr gute Festigkeiten, guter Brandwiderstand und hohe Wärmedämmung

4 DendroLight für den Einsatz in Katastrophengebieten

Zahlreiche Katastrophenfälle in den letzten Jahren haben die dringende Notwendigkeit von rasch, sicher, billig, und einfach zu errichtenden Gebäuden und Wohneinheiten gezeigt. Dies zeigt auch die aktuelle Auseinandersetzung der Holzforschung mit dieser Thematik.

Die Errichtung von Gebäuden in herkömmlicher Bauweise (Stein, Ziegel, Beton, Holz) beinhalten hohe Kosten und große logistische Probleme.

Abb. 7

Ziel der zu entwickelnden Bauelemente war eine einfache Logistik, geringe Produktionskosten und sehr kurze Produktionsdauer sowie die Möglichkeit der Lagerung von zerlegten Einheiten. Außerdem sollte durch ein geringes Gewicht der gesamten Einheit sowie der Einzelteile (max. 120 kg pro Element), und die Montage von Hand ohne Montagegeräte auch durch ungelernte Kräfte eine Möglichkeit geschaffen werden, innerhalb

weniger Stunden Notunterkünfte zu errichten. Durch eine hohe Dauerhaftigkeit, gute Wärmedämmung, einfache Bearbeitbarkeit, Erdbebensicherheit und Klimabeständigkeit sind die Elemente universell einsetzbar.

4.1 Mobile Emergency Unit – Grundeinheiten

Die Mobile Emergency Unit (MEU) besteht aus einer 20 m² Wohn- bzw. Grundeinheit mit 2,60 m Raumhöhe (Gesamthöhe inkl. Dach 3,80 m) die beliebig erweiterbar ist (jeweils in Schritten von 20 m²). Die Elemente ermöglichen eine weitgehend variable Innen- und Außengestaltung (Fensterdurchbrüche, Türen, Innenwände).

Durch das geringe Verpackungsvolumen (<10 m³) und ein Gesamtgewicht der MEU von ca. 2,5t, inkl. der Fundamente (die gesamte Gebäudeeinheit ruht auf 9 Porenbeton-Steinen) und Bodenverankerung, ist es möglich, 6 Grundeinheiten in einem EURO-Normkontainer zu transportieren.

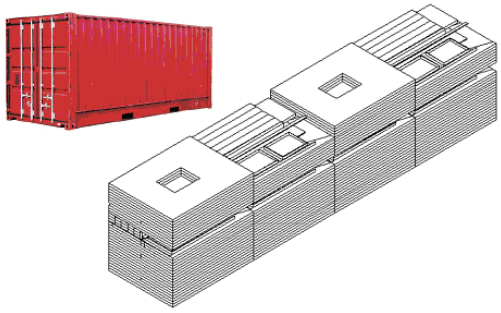


Abb. 8: Transport

Die 20 m² große Gebäudeeinheit (4x5m) besteht aus 2,60 x 2,05 m großen Grundelementen aus 75 mm starken DendroLight- Platten. So ergeben sich ca. 105 m² Platten pro Gebäudeeinheit. Durch die Produktion aus Ganzplattenformaten (5,6 x 2,1 m) entsteht ein minimaler Verschnitt. Insgesamt besteht die Konstruktion (exkl. Kleinteile) aus ca. 110 Einzelteilen.

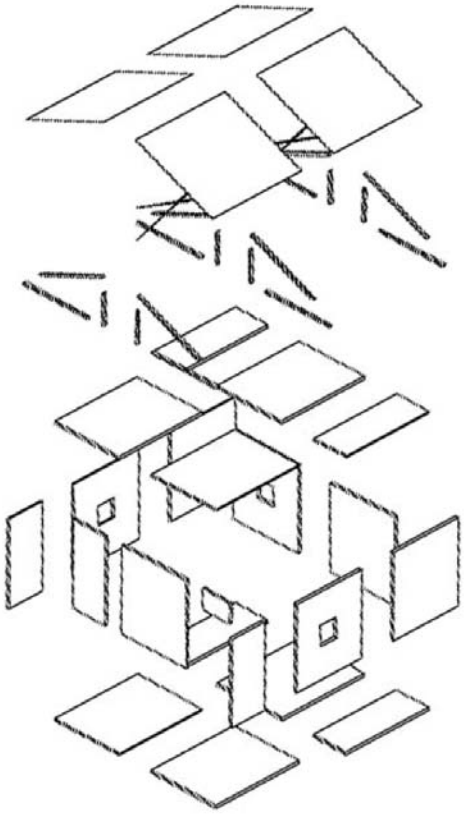


Abb. 9: Einzelteile für eine Grundeinheit

Eine weitere, geometrisch ausgefallene Bauart von Notunterkünften unter der Verwendung von DendroLight-Massivholzplatten ist mit einer preisgekrönten Arbeit aus dem Studentenwettbewerb „Zukunft Holz“ in Kapitel 1.2 dokumentiert.

9.1 Holzwerkstoffe
Wabenplatten

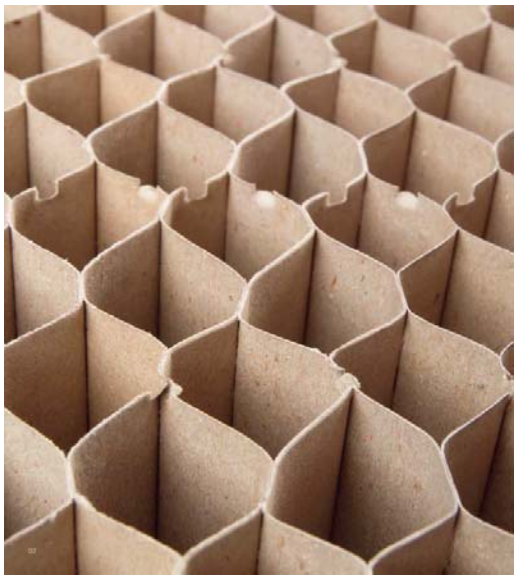


Abb. 1: Papierwabe [1]

1 Allgemeines

Der Leichtbau hat sich als technische Disziplin aus dem Bereich der Luft- und Raumfahrt entwickelt. Aus funktionalen und ökonomischen Gründen muss Gewicht reduziert werden, ohne die Tragfähigkeit, die Steifigkeit oder andere Funktionen der Konstruktion einzuschränken.

Knapper werdende Rohstoffvorkommen und somit auch steigende Preise werden in Zukunft dem Leichtbau als Konstruktionsprinzip zunehmend wirtschaftliche Vorteile einräumen.

Die erhöhte, gesellschaftlich bedingte Mobilität, verlangt nach umzugskompatibel gestalteten Möbeln. Im Bausektor haben leichte Produkte Vorteile hinsichtlich Transport, Verarbeitungsfreundlichkeit und nicht zuletzt statisch z.B. im Bauen im Bestand, wo die mögliche Lasteinleitung in bestehende Gebäude begrenzt ist.

Die Wabenplatte an sich ist keine neue Entwicklung, denn sie wird schon seit Jahrzehnten in der Türenindustrie eingesetzt, und selbst in der Möbelindustrie ist sie noch aus einer Zeit bekannt, als die Spanplatte noch nicht zu ihrem Siegeszug angetreten war. So wurden in den 50er und 60er Jahren Serienmöbel zum Teil nicht mehr aus der sonst üblichen Tischlerplatte gefertigt, sondern aus Sandwichmaterialien. Diese hatten damals schon Papierwabenfüllungen, oder ein hohler Kern wurde durch sporadisch eingesetzte Massivholzleisten unterstützt. Zu der Zeit bestand ein großer Mangel an Baurohstoffen, und die Preise für Holz waren entsprechend hoch. Über die resultierende Materialeinsparung konnten die Kosten gesenkt werden.

Es sind die Mitnahmemöbelhersteller, allen voran IKEA, die die Wabenplatte, kombiniert mit einem internen umlaufenden Rahmen, als so genanntes „Board-on-Frame"-Verfahren für sich wiederentdeckt haben. Neben den geringeren Materialkosten bei großen Materialstärken, den niedrigeren Transport- und Verpackungskosten, spielen hier auch unter ökologischen Aspekten nutzbare Marketingvorteile eine Rolle.

2 Aufbau

Das Konstruktionsprinzip der Wabenplatten entspricht dem eines dreischichtigen Sandwichaufbaus bestehend aus den beiden Decklagen, die paarweise die tragende Struktur bilden und aus entsprechend festem und steifem Material sind, und der Zwischenschicht, dem Kern, der die Aufgabe übernimmt, die Decklagen zu stützen, Querkräfte aufzunehmen und vor allem mit hohem spezifischen Volumen und kleinem spezifischen Gewicht für einen großen Abstand der Decklagen zu sorgen.

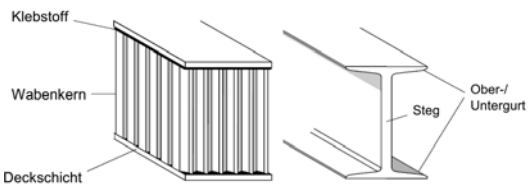


Abb. 2: Vergleich Wabenplatte mit T-Träger [2]

Eine Sandwichstruktur wirkt statisch wie ein Doppel-T-Träger. Die Deckschichten entsprechen den Gurten, sie übertragen die unter Biegebeanspruchung auftretenden Zug- und Druckspannungen. Die Kernschicht nimmt, entsprechend dem Steg des Doppel-T-Trägers, die Schubbeanspruchungen und die Biegequerkräfte auf. Damit werden in einer Sandwichbauweise verschiedene Materialien nach ihren spezifischen Eigenschaften sinnvoll kombiniert.

Das Spektrum der Anwendungen, in denen Wabenplatten zum Einsatz kommen, ist vielfältig. Dementsprechend groß ist die Bandbreite der Materialien und Zellstrukturen, die den Wabenkern bilden. Die Form der Zellen muss dabei nicht unbedingt an die von Bienen angelegten Honig-Waben erinnern. Die Zellen können quadratisch, rechteckig, dreieckig, gewellt oder sogar rund sein, bilden aber immer eine Fläche aus sich wiederholenden, identischen Strukturen. Als Materialien kommen je nach Einsatzort und Beanspruchung Metalle, Kunststoffe, Keramiken oder Papier zum Einsatz.

2.1 Deckschicht

Als Decklagen für Wabenplatten kommen verschiedene Materialien zum Einsatz. Je nach Zweck und Belastung der Platten reicht die Spanne von plattenförmigen dünnen Holzwerkstoffen, Furnieren, dicken Papierlagen bis hin zu HPL-Dekorlaminaten. Die meisten Wabenplatten sind mit dünnen Holzwerkstoffen als Decklagen versehen. Waren es in den Anfängen der Wabenplatten in den dreißiger Jahren des letzten Jahrhunderts meist dünne Sperrholzplatten, so sind es heute entweder Dünnspan- oder MDF/HDF-Platten. Als Decklage für Wabenplatten werden sie meist in einem Bereich von 3 mm bis 8 mm Dicke eingesetzt. Entscheidend für die Auswahl des Materials ist die zu erwartende Belastung der Wabenplatte und deren Beschichtung bzw. Oberflächenbehandlung.

Die Decklagen bedingen mit ihren Festigkeiten die Eigenschaften der Wabenplatte. Bei geringen Decklagenstärken kommt es auf ein optimales Zusammenspiel zwischen Wabenkern und Decklagen an. Je geringer die Festigkeiten der Decklagen, desto größer muss die Unterstützung durch die Waben sein. Da Wabenplatten im Möbelbau meist weitmaschige Wabenkerne besitzen, müssen die Decklagen ein Mindestmaß an Biege- und Stoßfestigkeit besitzen, um die geringe Unterstützung der Waben auszugleichen. Im Hinblick auf Verankerung von Verbindungselementen und Beschlägen ist eine hohe Querzugfestigkeit des Decklagenmaterials von großer Wichtigkeit.

Bei den derzeit eingesetzten Wabenplatten für den Möbelbau wird in der Regel nur noch zwischen Dünnspannplatten und HDF/MDF-Platten ausgewählt. Dabei werden alle Wabenplatten, die direkt lackiert werden aus HDF/MDF-Platten hergestellt. Wabenplatten, die mit Furnier, HPL oder Folien beschichtet werden, können auch, bei leichter Abnahme der Festigkeiten, aus Dünnspanplatten produziert werden. Vorteil ist dann der geringere Preis. Bei statisch nicht belasteten Bauteilen wie Türfüllungen oder Verkleidungen können die Waben auch direkt mit HPL- Dekorschichtstoffen oder starken Papieren beschichtet werden.

2.2 Wabenkern

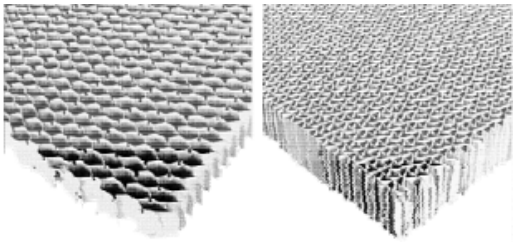


Abb. 3: Endlos-Honigwaben (Honicel) (links), Wellstegeinlage (SWAP) (rechts) [2]

Im Bereich der Wabenkerne gibt es zahlreiche Materialien und Strukturen, die im Laufe der Zeit

entwickelt wurden. Das erste Patent zur Herstellung von Kraftpapier-Waben ist das Budwig Patent, das 1905 in Deutschland angemeldet wurde. In den dreißiger Jahren wurden einfache Papierwaben erstmals in Möbeln eingesetzt, die dort mit dünnen Sperrhölzern oder Furnieren beplankt waren. Erst nach dem zweiten Weltkrieg folgte die Entwicklung von Wabenmaterialien aus Aluminium und Kunstoffen, die dann vornehmlich in der Luft- und Raumfahrt eingesetzt wurden. Für Anwendungen in der Möbelindustrie kommt abgesehen von Spezialanwendungen weiterhin nur Papier als Wabenmaterial zum Einsatz. Im Bereich der Papierwaben gibt es zwei verschiedene Systeme, die sich bezüglich ihrer Herstellung als auch ihrer Eigenschaften stark unterscheiden. Es ist einmal die aus Zimmertüren seit Jahrzehnten bekannte Endlos-Wabe mit klassischer hexagonaler Zellform sowie die Wellstegeinlagen mit einer sinusförmigen Wabe.

Herstellung Wellstegeinlage

Die Wellstegeinlage wird aus einseitig beschichteten Wellpappen hergestellt. Diese bestehen aus der eigentlichen Welle, einer Papierbahn, die mit Hilfe von gezähnten Doppelwalzen ihre charakteristische Welle erhält, und einer Absperrung aus einem hochfesten Liner. Als Papierrohstoff wird Recyclingpapier verwendet. Die einzelnen Pappbögen werden auf der Seite der Absperrung beleimt und dann übereinander angeordnet und zu einem Block verpresst. Von diesem Block können dann die Wellstegeinlagen in der gewünschten Stärke vom Stirnende her abgetrennt werden.

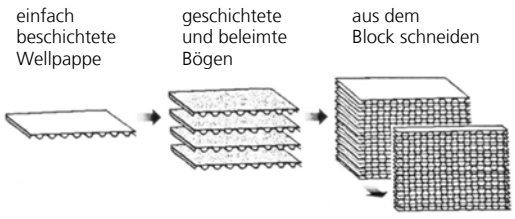


Abb. 4: Herstellung von Wellstegeinlagen [2]

Bei Verwendung von Standard Wellpappen ergibt sich eine Zellgröße von 5 mm. Der führende Hersteller dieser Wellstegeinlagen bietet diese in Formaten bis 3050 mm Länge und 1250 mm Breite an. Die Stärke kann beliebig zwischen 6 bis 95 mm gewählt werden. Bei Verwendung eines Papiers mit 115 g/m², liegt das Gewicht bei ca. 85 g/m² pro Millimeter Dicke.

Außer im Möbelbereich wird dieses Material noch für Displays im Messe-, Laden- und Kulissenbau, als Verpackungsmaterial in Form von Paletten und Schutzbehältern und als Kernmaterial für Verkleidungsteile im Automobilbereich verwendet.

Herstellung Endlos-Honigwaben

Wie die Wellstegeinlage, werden auch die Endlos-Honigwaben aus günstigem Recyclingpapier hergestellt. Dazu wird ein Klebstoff, Wasserglas oder PVAc-Leim in mehreren Linien auf eine Papierbahn aufgebracht. Der Abstand der Klebstofflinien bestimmt dabei die spätere Zellgröße. Anschließend werden mehrere Blätter von dieser Papierbahn versetzt übereinander zu einem Stapel verleimt. Die Stapel werden dann in Streifen geschnitten. Die Streifenbreite entspricht dabei der gewünschten Höhe des Wabenmaterials. Schließlich werden die streifenförmigen Stapel um 90° gedreht und zu einer Endlosmatte miteinander verleimt.

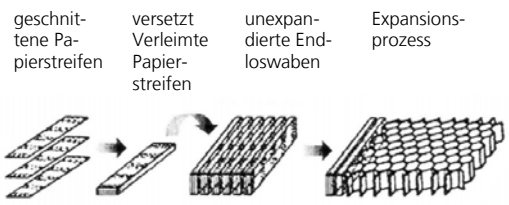


Abb. 5: Herstellung von Endlos-Honigwaben [2]

Die Endloswaben werden in der Regel auf Paletten platzsparend verpackt, so dass sich ca. 30.000 m² Wabenmatte auf einem LKW trans-

portieren lassen. Erst beim Kunden wird die Wabenmatte expandiert, wodurch die typische hexagonale Form der Zellen entsteht. Die expandierte Matte durchläuft dann eine Trockenstufe, in der das Papier auf ca. 3 % Feuchte getrocknet wird. Durch die Wärmeeinwirkung werden Spannungen, die durch das Auseinanderziehen der Waben entstanden sind, abgebaut. Dadurch wird die Wabenmatte in dieser expandierten Form fixiert.

Endlos-Honigwaben sind in verschiedenen Abmessungen und unterschiedlichen Zellweiten zu beziehen. Die minimale Zellgröße und Wabenhöhe liegt dabei gewöhnlich bei 10 mm. Das Verleimen und Schneiden wird bei kleineren Größen zu zeit- und damit kostenaufwändig. Die Stärke des Wabenmaterials kann zwischen 10 mm und 100 mm frei gewählt werden. Zellgröße und Grammatur des Papiers richten sich nach dem Verwendungszweck und der zu erwartenden Belastung. Die Zellweiten liegen zwischen 10 mm und 30 mm und können sowohl aus 140 g/m², als auch 170 g/m² schwerem Papier hergestellt werden. Für jeden Wabentyp ergeben sich damit unterschiedliche Festigkeiten und auch Raumgewichte. Für waagerecht angeordnete Möbelteile werden Zellweiten von 15 mm bis 21 mm empfohlen, für stehende Teile Zellweiten von 25 mm bis 30 mm (Honicel).

Für Wabenplatten mit internem Rahmen werden ausschließlich Endlos-Honig-Waben eingesetzt. Sie haben verglichen mit Wellstegeinlagen entscheidende Vorteile beim Preis, sind aufgrund ihrer größeren Zellgrößen wesentlich leichter und die Transportkosten sind geringer.

3 Klebstoffe

Der Klebstoff dient dazu, Decklagen und Kernschicht schub- und zugfest miteinander zu verbinden. Die hauptsächlich auf Abreißen gefährdete Verbindung zwischen Wabenkern und Decklagen verlangt einen Klebstoff, der in der Lage ist, Kehlnähte auszubilden.

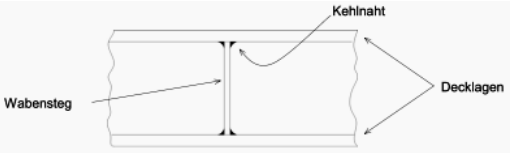


Abb. 6: Ausbildung einer Kehlnaht [2]

Kommt es nicht zur Ausbildung einer Kehlnaht, besteht die Klebefläche einzig aus der geringen Oberfläche des Wabensteges. Aus diesem Grund werden in vielen Fällen die Waben an ihrer Oberfläche aufgeraut bzw. gestaucht, um die effektive Fläche zu vergrößern. Problematisch bei der Verleimung zum Sandwich ist immer die Klebeverbindung zur oberen Decklage. Die Viskosität des Klebstoffs darf nicht zu gering sein, andernfalls läuft er durch die Schwerkraft an den Wabenstegen hinab und steht der Verklebung nicht mehr zur Verfügung. Für die Herstellung von Wabenplatten im Möbelbau werden in den meisten Fällen einer der drei Klebstoffarten eingesetzt:

- Dispersionsklebstoffe, z.B. Polyvinylacetat (PVAc)
- Polykondensationsklebstoffe, z.B. Harnstoff-Formaldehydharz-Klebstoffe (UF)
- Polyadditionsklebstoffe, reaktive Polyurethan-Schmelzklebstoffe (PUR).

Die Beleimung kann je nach verwendetem Leim ganz unterschiedlich gestaltet sein. Herkömmliche Anlagen arbeiten mit PVAc-Leimen oder UF-Harzen. In diesem Fall werden die Decklagen beleimt. Der Leimauftrag geschieht in der Regel durch Walzenauftragsmaschinen. Bei Einsatz von PUR-Hotmelts in modernen hochautomatisierten Anlagen, wird der Klebstoff direkt auf die Wabenmatte aufgegeben, entweder durch einen Walzen- oder Düsenauftrag. [2]

4 Bekantung von Leichtbauplatten

Mit dem weichen Kern stellen Wabenplatten hohe Anforderungen an die Bekantung, da verhindert werden muss, dass die aufgebrachten Kanten eingedrückt werden können.

4.1 Wabenplatten mit Riegel

Abb. 8: Nachträglich eingeleimter Riegel [3]

Es werden zwei Varianten unterschieden. Einleimung des Riegels bei der Plattenherstellung und das nachträgliche Einleimen von Riegeln nach der Konfektionierung. Alle Arten von Kanten können aufgebracht werden. Dieses Verfahren ist zurzeit im Möbelbau gebräuchlich und wirtschaftlich. Ab einer Wabenplattendicke von ca. 25 mm – 30mm in Verbindung mit einer Deckschichtstärke von 4 mm (Spanplatte), ist die Wabenplatte ökonomisch konkurrenzfähig mit einer entsprechenden Vollspanplatte.

4.2 Dickkante

Abb. 9: Dickkante bei riegellosen Platten [3]

Riegellose Wabenplatten mit einer Deckschichtstärke von 8 mm können direkt und ohne zusätzliche Unterstützung mit Dickkanten ab 2 mm Stärke auf Standardmaschinen aufgebracht werden. Alternativ ist eine Stützkante möglich. Eine ausreichende Stabilität ist bei Wabenplatten bis 100 mm Stärke gegeben.

4.3 Stützkante

Abb. 9: Stützkante bei riegellosen Platten [3]

Bei Deckschichten $\leq$ 4 mm sind weitere unterstützende Maßnahmen für die Bekantung notwendig. Das Einleimen einer Stützkante erhöht die Belastbarkeit der Kante und ermöglicht den Einsatz von Dekorkanten $\leq$ 0,5 mm. Es sind automatisierte Fertigungsverfahren anwendbar, welche Stützkante und Dekorkante in einem Arbeitsschritt aufbringen. Max. Plattenstärke je nach Verfahren zwischen 60 mm und 100 mm.

4.4 Extruderkante

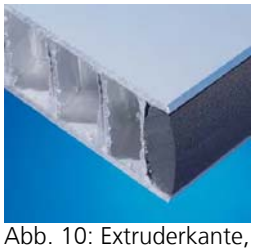


Abb. 10: Extruderkante, EXKA Verfahren [3]

Bei diesem Verfahren der Homag AG wird ein Kunststoffgranulat in den Hohlraum eingebracht. Anschließend wird die Kante plangefräst. Dieses Verfahren ist auch bei Aluminiumdeckschichten anwendbar und erzeugt eine mechanisch hoch beanspruchbare Kante ohne Stoßfuge.

5 Verbindungstechnik

Essentielle Bedeutung im Bereich der Leichtbauplatten hat die Beschlags- und Verbindungstechnik. Speziell bei riegellosen Platten und abnehmenden Deckschichtstärken funktionieren die aus der Möbelkonstruktion mit Vollspanplatten bekannten Verbindungstechniken nicht mehr. Inzwischen stehen, ob mit oder ohne Riegel und

für unterschiedliche Deckschichtstärken, entsprechende Verbindungsmittel zur Verfügung.

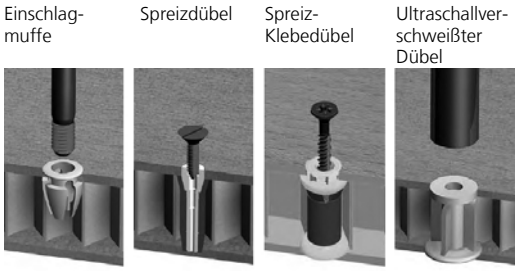


Abb. 11: Dübelarten [3]

5.1 Platten mit Riegel

Bei Leichtbauplatten mit Riegeln werden Standardbeschläge und Standardverbindungsmittel verwendet. Die Lage der Beschläge wird durch die Riegel vorgegeben und muss somit bei der Konfektion berücksichtigt werden. Verbindungstechnisch ist dieser Typ von der Möbelindustrie einfach zu handhaben, da hier auch Nuten (z.B. für Schrankrückwände) eingefräst werden können. Die Verbindungsmittel sind kostengünstig und schnell zu verarbeiten und entsprechen dem gängigen Standard.

5.2 Riegellose Platten, Deckschicht 8 mm

Bei Deckschichtstärken von 8 mm können ebenfalls Standardbeschläge eingesetzt werden. Die Festigkeit ist abhängig von der Verklebung zwischen Deckschicht und Wabe bzw. der Festigkeit der Deckschicht, da die Beschläge hier nur in einer Schicht befestigt werden. Allen riegellosen Platten gemein ist der Vorteil der konstruktionsunabhängigen und somit freien Positionierung der allerdings aufwändigeren Verbindungen und Beschläge.

5.3 Riegellose Platten, Deckschicht 4 mm

Für Verbindungen mit geringen Belastungen sind Einschlagmuffen erhältlich, die lediglich in einer Deckschicht befestigt werden. Für höhere Belastungen werden Spreiz- und Klebedübel verwendet, welche eine Verbindung zwischen beiden Deckschichten herstellen und somit höhere Auszugsfestigkeiten gewährleisten. Die Belastungsgrenze dieser Dübelsysteme ist mit denen von Direktbefestigungsschrauben in Vollspanplatten vergleichbar.

5.4 Riegellose Platten, Deckschicht < 4 mm

Beide Deckschichten müssen benutzt werden. Beim Einsatz von Klebedübeln gelangt der Klebstoff an die obere und untere Deckschicht und verbindet beide zu einer stabilen Konstruktion, die sowohl Zug- als auch Druckkräfte aufnehmen kann. Der von der Firma Hettich entwickelte hettinject Dübel ist für Deckschichtstärken bis 1,5 mm geprüft.

Eine weitere Verbindungsmöglichkeit ist das WoodWelding©, bei dem Kunststoffmuffen mittels Ultraschall mit der Leichtbauplatte verschweißt werden. Geeignet für Deckschichten ab 3mm.

Tab. 1: maschinelle Verarbeitungsmöglichkeiten der Befestigungsmittel in Wabenplatten

Beschlagbefestigungssarten	manuell	maschinell
Konventionelle Befestigungsmittel, Platten mit Riegel	X	X
Modifizierte Beschläge mit Spezialschrauben	X	X
Spreizdübel (Einschlagmuffen)	X	-
Spreizdübel	X	X
Spreiz- / Klebedübel	X	X
Klebedübel	X	X
Ultraschallverschweißter Dübel	-	X

Quellen

[1] EGGER Holzwerkstoffe GmbH & Co. KG
[2] Wabenplatten für den Möbelbau, 2005, Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft + Universität Hamburg Zentrum Holzwirtschaft, Jan Poppensieker, Heiko Thömen
[3] HOMAG Holzbearbeitungssysteme AG, 72296 Schopfloch, www.homag.de

9.2 Verbundkonstruktionen, Materialkombinationen
Konzepte für textile Bewehrungen in der Holzkonstruktion

Peer Haller

1 Allgemein

Dieser Beitrag betrachtet zunächst die Entwicklung von Holzkonstruktionen als Ergebnis des gesellschaftlichen und technologischen Wandels und greift die Nachteile von Holz wie Anisotropie, Verbinden und Dauerhaftigkeit auf.

Technische Fasern und Textilien stellen eine universelle Technologie dar, mit der diese Nachteile in tragenden Anwendungen beseitigt werden können.

Querzug- und Schubfestigkeit des Holzes sind sehr gering. Es werden form- und beanspruchungsgerechte Textilien zur Bewehrung in verschiedenen konstruktiven Kontexten untersucht. Ein besonderer Schwerpunkt liegt auf der Materialeffizienz, die bei der Transformation des Stammholzes in tragende Querschnitte verloren geht. Es wird gezeigt, dass der Verschnitt im Sägewerk und die im Holzbau vorherrschenden Vollquerschnitte im Gegensatz zu Profilen einen hohen Holzverbrauch bedingen. Ein neues Konzept, welches Holz als zelluläres Material auffasst, das in einem thermo-hygromechanischen Prozess die Formung abwickelbarer Profile aus massiven Holzplatten ermöglicht, führt zu deutlichen Materialeinsparungen.

2 Einführung

Holz ist der älteste Baustoff. Abbildung 1 zeigt seine Entwicklung an Hand herausragender Holzkonstruktionen über einen kurzen Zeitraum von etwa 250 Jahren. Obgleich der Bau- und Werkstoff Holz über die betrachtete Zeit unverändert bleibt, hat sich die Konstruktion vom Zimmererhandwerk zum heutigen Ingenieurholzbau in hohem Maße verändert. Zwei Kräfte bewirken diese Veränderung. Einerseits ist sie durch die Werkzeuge und Methoden der Ausführung bestimmt, andererseits treten im Laufe der Zeit neue bauliche Herausforderungen in Erscheinung, welche die Ansprüche und Anforderungen an die Konstruktion verändern.

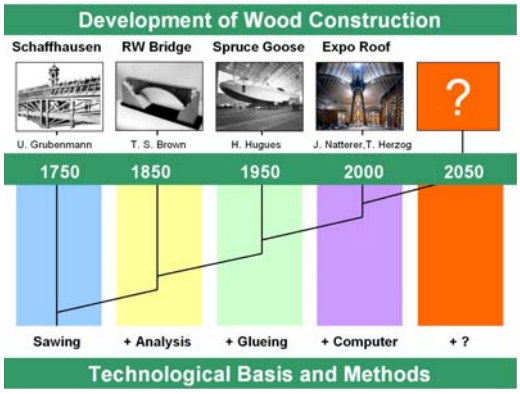


Abb. 1: Entwicklung der Holzkonstruktion seit 1750 (Jahreszahlen auf die Dekade gerundet)

Der schweizerische Zimmermann Ulrich Grubenmann [1] erbaute im Jahr 1756 eine Brücke aus Kantholz über den Rhein bei Schaffhausen. Mit einfachen Werkzeugen und wenig Verbindungsmitteln aus Eisen konnte die Konstruktion gefertigt und gefügt werden. Der Amerikaner Thompson S. Brown entwarf etwa ein Jahrhundert später die Erie-Cascade- Eisenbahnbrücke. Die Form der Brücke ist nun stark verändert, bedingt durch die Fortschritte bei der Berechnung des Bogens. Howard Hughes musste sich mit dem Bau eines Großflugzeuges neuen Herausforderungen stellen, was nur mit Hilfe geeigneter Kleber gelang, und das elegante Schalendach der EXPO-Weltausstellung im Jahre 2000 in Hannover schließlich hätte ohne den Einsatz von Computern zum Berechnen, Zeichnen und Darstellen nicht realisiert werden können [3], [4]. Vor dem Hintergrund dieser Entwicklung kann ein Ende dieses Entwicklungsprozesses kaum in ernst zunehmender Weise angezweifelt werden. Die treibenden Kräfte - Technologie, Wissen und neue Anforderungen - wirken nach wie vor, ja im Gegenteil, die technologischen Neuerungen und die Anforderungen, die das Bauen an die heutige Zeit stellt, sind um-

fangreicher denn je und bergen Keime der Innovation. Eine Prognose des Bauens mit Holz ist schwer zu formulieren. Es scheint jedoch, dass heutiges Bauen in immer stärkerem Maße vom Gedanken der Nachhaltigkeit in einer globalen Weltwirtschaft bestimmt wird, in der Rohstoffe und fossile Energien begrenzt sind. Das Wachstum der Bevölkerung, ökonomische Ungleichheit zwischen Industrie- und Entwicklungsländern und der Ausstoß von Treibhausgasen wie Kohlendioxid, die eine Erwärmung der Atmosphäre wahrscheinlich machen, bilden den sozio-ökonomischen Handlungsrahmen der Politik. Daher müssen Forschung und Entwicklung nach neue Ansätzen in diesem Szenario suchen, in denen Wald und Innovation eine wachsende Bedeutung zukommt.

3 Wald und nachwachsende Rohstoffe für eine nachhaltige Entwicklung

Wälder stellen eine Ressource dar, deren jährliches Stoffaufkommen weltweit dasjenige der Industrie übertrifft. Die gesamte Biomasse wird auf etwa 50 Mia Tonnen pro Jahr geschätzt, die zum überwiegenden Teil in Wäldern in Form von Wurzeln, Stämmen, Ästen und Blattwerk produziert wird [5]. Darüber hinaus besteht durch seine chemische Zusammensetzung über die Photosynthese ein Bezug zum Treibhausgas Kohlendioxid. Die Voraussetzung hierfür, Wasser und Sonne, steht auch kommenden Generationen reichlich zur Verfügung. Wälder und Holzprodukte stellen eine globale Senke für Kohlendioxid dar, welches der Baum vorher der Atmosphäre entzogen hat, und das wiederum nach der Verrottung bzw. Entsorgung freigesetzt wird, so dass die Gesamtbilanz neutral ist. Wälder sind nicht nur einer der größten, sondern auch einer der billigsten Stoffproduzenten der Erde, und es ist schwer einzusehen, dass ein Rohstoff, der auf etwa einem Drittel der Fläche der Erde mit Hilfe von Sonnenenergie nachwächst, von Materialien preislich unterboten werden kann, zu deren Herstellung sehr viel Kapital und Energie aus fossilen Rohstoffen benötigt wird. Ein wesentlicher Grund hierfür ist, dass der Wald nicht als Stoff- sondern als Querschnittsproduzent betrachtet wird. Dieser Aspekt wird später noch genauer beleuchtet.

Darüber hinaus müssen die wesentlichen Nachteile des Baustoffes Holz benannt werden, die der technischen Verwendung entgegenstehen und Vorschläge gemacht werden, in welcher Weise diese behoben werden können. Insbesondere handelt es sich dabei um:

1. Das geringe Festigkeitsspektrum im Vergleich zu anderen Strukturwerkstoffen.
2. Die Richtungsabhängigkeit oder Anisotropie
3. Die geringe Dauerhaftigkeit bewitterter Bauteile.

4 Festigkeit von Holz und Pressholz

Festigkeit und Steifigkeit spielen eine herausragende Rolle bei tragenden Anwendungen. Um den Anforderungen an tragende Baustoffe gerecht zu werden, wird die Festigkeit von Holz für bautechnische Anwendungen apparativ sortiert. In der Tat zeigen Rund- und Schnittholz ungefähr einen Faktor von 5 und 2 bezüglich der Festigkeit beziehungsweise der Steifigkeit.

Verglichen mit anderen Baustoffen weisen die Festigkeitsklassen von Schnitt- und Brettschichtholz ein Verhältnis von 1,7 zwischen der höchsten und der geringsten Klasse auf mit einer Stufung von etwa 1,3.

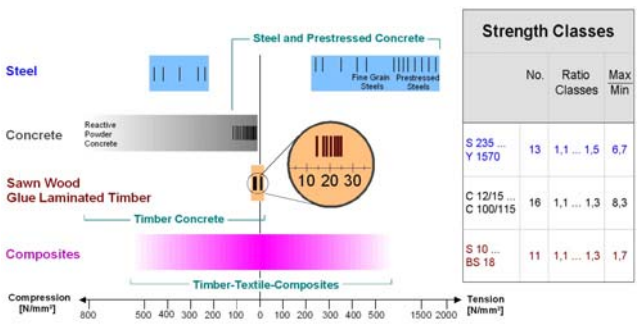


Abb. 2: Festigkeitsklassen von Baustoffen

Untersuchungen zur Holzqualität belegen, dass Festigkeit und Steifigkeit längs zur Faser entscheidend von der Dichte abhängen. Die Unterschiede zwischen einzelnen Holzarten – etwa Balsa verglichen mit Tropenholz oder der reinen Zellwand – belaufen sich auf etwa eine Zehnerpotenz. Die Sortierung von Nadelholz erfolgt in einem schmalen Bereich zwischen 380 und 500 kg/m³. Der Vergleich von Bauholz mit faserparallelem, astfreiem Holz fördert nochmals einen Faktor 2 – 3 zutage, so dass das Festigkeitspotenzial reichlich mehr als eine Zehnerpotenz beträgt.

Es ist allgemein bekannt, dass Holz, insbesondere Laubholz, bei etwa 140°C einer Verdichtung quer zur Faser unterzogen werden kann [8]. Heute wird zum Beispiel Kunstharzpressholz in geringen Mengen aus Furnieren für technische Anwendungen wie etwa elektrischen Anlagen oder dem Transport hergestellt. Voraussetzung hierfür ist das poröse Zellgefüge, das mit einem Druck von etwa 5 MPa zusammengepresst werden kann, nachdem das Lignin thermisch erweicht wurde.

Beim Pressen erhöhen sich Festigkeit und Steifigkeit proportional zur Dichte; grob gesprochen um einen Faktor 2 - 3 für heimisches Nadelholz (Abb. 3 und 4) [9].

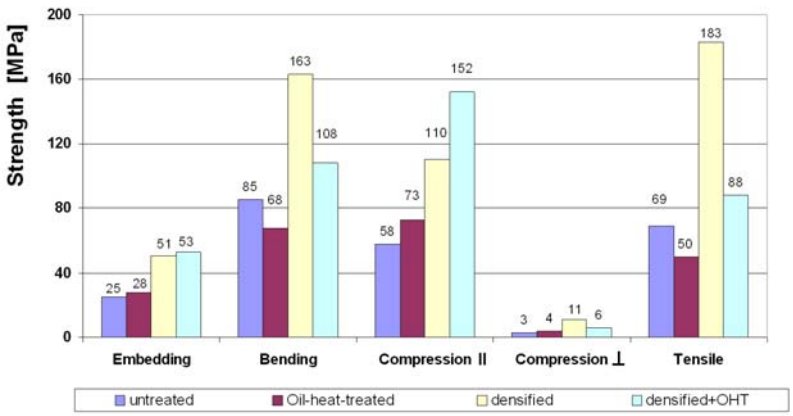


Abb. 3: Festigkeit von Fichte und verdichteter Fichte und Öl-Hitze-Behandlung

Abb. 4: Nadelschnittholz (oben links), gleicher Querschnitt verdichtet (oben rechts bzw. unten)

Abbildung 3 fasst die Festigkeiten des Fichtepressholzes zusammen, welches optional noch ölhitzebehandelt werden kann, um es gegenüber Verrottung dauerhaft zu schützen [10]. Verdichtung in Querrichtung behält die Anisotropie bei und verstärkt den Grad der Richtungsabhängigkeit sogar. Die konstruktiv wichtige Querdruckfestigkeit profitiert in hohem Maße von der Verdichtung.

5 Vorbetrachtungen über Holzquerschnitte

Neben den mechanischen Eigenschaften des Holzes ist die strukturelle und wirtschaftliche Leistungsfähigkeit des Querschnittes wichtig, dessen Herstellung durch traditionelle Bearbeitungsverfahren bestimmt wird [11].

Strukturbauteile übertragen Kräfte und Momente unter Berücksichtigung der Gebrauchstauglichkeit. Dies erfolgt durch ein Produkt aus zwei Faktoren: der Festigkeit, die linear in die Berechnung eingeht und der Geometrie, die sich in der Potenz auswirkt. Auf diese Weise kann die Bemessung tragender Bauteile durch die Vergrößerung des Querschnittes weit wirkungsvoller erfolgen als durch die Wahl einer höheren Festigkeitsklasse.

Standardisierte Querschnitte aus Metall und Kunststoff erzielen hohe Flächenmomente bei geringem Flächeninhalt, was eine sparsame Verwendung des Materials bedeutet. Das Selbstverständnis des runden und rechteckigen Vollquer-

schnitts verstellt den Blick auf dessen geringe Materialeffizienz. In dieser Hinsicht zeigt der Vergleich zwischen Holzquerschnitten mit technischen Profilen ein Verhältnis von 1:15, das sich einerseits aus den Verlusten im Sägewerk und andererseits durch das geringe Flächenmoment des Vollquerschnitts gegenüber dem Profil zusammensetzt (Abb. 5 und 6).

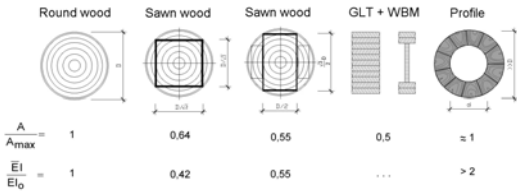


Abb. 5: Vergleich der Flächenmomente und Ausbeute im Sägewerk (A_{max} and EI_o bezogen auf Rohholz, Steigerung der Steifigkeit durch Verdichten berücksichtigt)

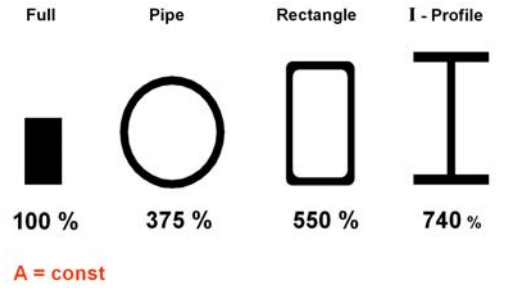


Abb. 6: Vergleich des Flächenmomentes des rechteckigen Vollquerschnitts mit Profilen gleichen Flächeninhalts

Mit anderen Worten, die Wettbewerbsfähigkeit des Rohstoffes ist ausgezeichnet, sie geht jedoch bei der Transformation des Rohholzes in Querschnitte verloren.

Demzufolge muss ein technischer Querschnitt drei Bedingungen erfüllen:

1. Er darf in Längs- und Querrichtung nicht durch die Baummaße begrenzt werden.
2. Er muss effizient sein, das heißt ein großes Flächenmoment bei kleinem Flächeninhalt aufweisen
3. Er muss in einem preiswerten Massenproduktionsverfahren hergestellt werden können.

Schnittholz erfüllt die Bedingung 1 und 2 nicht, Leimholz nicht die Punkte 2 und 3, so dass erst das im Anschluss vorgestellte Formholz (Abb. 7 und 8), welches auf einer neuen Betrachtungsweise des Holzes als zelluläres Material beruht, alle drei Bedingungen erfüllt.

Abb. 7: Formholzring aus verdichtetem Rundholz

Abb. 8: Formholzrohr aus massiver Pressholzplatte

6 Holz als zelluläres Material

Holz sei ein leicht zu bearbeitendes Material ist eine weit verbreitete Meinung. Das Gegenteil trifft jedoch zu! In der Tat kann Holz mit wenig Kraft und Energie leicht gesägt, gehobelt, gefräst und geschliffen werden, die spannende Materialbearbeitung ist aber im Vergleich zu spanlosen Herstelltechnologien wie Walzen, Gießen, Formen, Tiefziehen, Strangpressen etc. weit weniger wirtschaftlich. Voraussetzung für diese Verfahren ist die Verformbarkeit des Materials, die mit Hilfe von Wärme noch gesteigert werden kann. Holz ist sehr spröde bei einer Bruchdehnung von etwa 1%. Sie fällt ein bis zwei Zehnerpotenzen geringer aus als jene von Metallen oder Kunststoffen.

Ist Holz tatsächlich so spröde? Im letzten Abschnitt wurde darauf hingewiesen, dass Holz unter Wärme und Druck um etwa 50 % quer zur Faser verdichtet werden kann, was mit einer Faltung der Zellwände einhergeht. Von nicht geringerer Bedeutung ist die Tatsache, dass die Verdichtung bei geeignetem Prozessregime wieder rückgängig gemacht und fixiert werden kann, so dass unter diesen Bedingungen nunmehr eine Bruchdehnung von 100 % vorhanden ist, was eine Erhöhung um zwei Zehnerpotenzen darstellt. Die Zellstruktur des Holzes fördert eine neue Betrachtungsweise als "schaumstoffartiges" Material, das nun in der Tat leicht bearbeitet werden kann [12]. Nadel- und Laubholz mittlerer Dichte sind gleichermaßen hierzu geeignet.

Heimisches Nadelholz weist ein Porenvolumen von etwa 60 % auf [13]. Ausgehend von diesen Überlegungen wurden am Institut für Stahl- und Holzbau massive Platten aus verdichteter Fichte hergestellt, die danach wiederum unter Wärme und Feuchtigkeit zu Profilen geformt wurden, wobei die Faltung der Zellwände wieder rückgängig gemacht wird (Abb. 9 und 10). Der Krümmungsradius des Profils hängt von der vorherigen Verdichtung ab. Bei einer Verdichtung von 50 % darf die Größe des inneren Krümmungsradius die Wanddicke des Profils nicht unterschreiten. Im Prinzip sind auf diese Weise alle abwickelbaren Formen in beliebiger Länge und Querabmessung herstellbar.

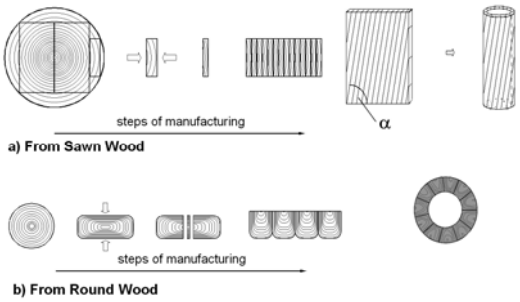


Abb. 9: Herstellung von Formholzrohren aus Rund- und Schnittholz

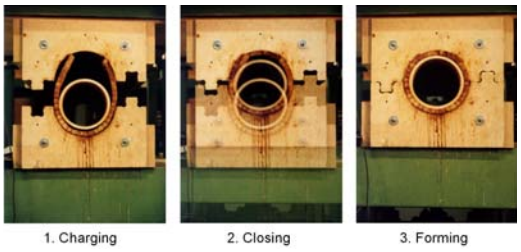


Abb. 10: Herstellung des Formholzrohrs in der Form

Auf diese Weise wird die Ressourcenproduktivität von Holz und damit die Wettbewerbsfähigkeit beträchtlich verbessert. Abbildung 7 zeigt einen Formholzring, der nach diesem Verfahren aus Rundholz hergestellt wurde. Die Ausbeute des Rohholzes beträgt nahezu 100 %. Zusammen mit der effizienten Anordnung im Profil ergeben sich Materialeinsparungen von bis zu 70 %!

7 Holz-Textil-Verbunde

Die Faser ist ein erfolgreiches Prinzip zur Übertragung von Kräften in der Natur, das in der Technik erfolgreich auf Faserverbundwerkstoffe übertragen wurde, deren Festigkeit und Steifigkeit höher als bei legierten Stählen sind bei weniger als einem Drittel des Gewichts [14].

Der hohe Preis zwingt den Konstrukteur zu Material sparender Verwendung. Faserverbundwerkstoffe werden eingesetzt, wo hohe Beanspruchungen bei geringem Gewicht auf kleinem Raum übertragen werden müssen. Trotz wirtschaftlicher Hürden dringen Faserverbundwerkstoffe in das Bauwesen ein, und es ist anzunehmen, dass insbesondere Materialien künftig davon profitieren, die sinnvolle Verbünde mit diesen Werkstoffen eingehen können.

Dieser Verbund schafft Synergien. Das Holz profitiert von den herausragenden mechanischen Eigenschaften und der Dauerhaftigkeit des Komposits sowie der Möglichkeit der beanspruchungsgerechten Orientierung der Fasern; die Faserverbundwerkstoffe gewinnen durch den geringen Preis sowie der Schönheit und Umweltfreundlichkeit des Holzes. Darüber hinaus steift das dicke Formholzrohr die dünne Bewehrung aus und verhindert somit deren Ausbeulen.

Faserverstärkte Laminate werden heute im großen Umfang zur bautechnischen Instandsetzung und Verstärkung verwendet. Wenn man zur besseren Handhabung auf fertige Laminate verzichtet, müssen lose Fäden oder Textilien untereinander zu ebenen oder räumlichen Flächengebilden fixiert werden. Die Herstellung derartiger textiler Strukturen ist Gegenstand der Textiltechnik.

Textilien können hinsichtlich ihrer Struktur eingeteilt werden [15]. Technische Begriffe wie Gewebe, multiaxiales Gelege oder Gestricke kennzeichnen Verlauf und Bindung der Fäden und damit die mechanischen Eigenschaften des Komposites. Um eine hohe Steifigkeit zu erzielen, muss ein gestreckter Faserverlauf angestrebt werden. Gewebe und Gestricke hingegen weisen einen welligen Verlauf von Fäden und Maschen auf.

Die Orientierung der Fasern in biaxial verstärkten Gestricken, Gesticken oder multiaxialen Gelegen erlaubt eine beanspruchungsgerechte Verstärkung. Gelege weisen sich durch hohe Steifigkeit auf, sind jedoch im Gegensatz zu Gestricken nicht drapierbar. Gestricke weisen leicht verschiebliche Maschen auf und haben daher eine gute Drapierbarkeit, so dass diese sich zur Bewehrung räumlicher Strukturen eignen (Abb. 11 und 12). Die Integration gereckter Hochleistungsfäden in die Maschen schafft zusätzliche Steifigkeit, so dass räumliche Gestricke auch zur Verstärkung tragender Anwendungen geeignet sind.

Abb. 11: Dreidimensionale Gestrickverstärkung eines Verbindungsstückes aus gebogener Buche

Abb. 12: Beispiele beanspruchungsgerechter Textilien zur Verstärkung stabförmiger Verbindungen

8 Beispiel – Form- und beanspruchungsgerechte Textilien in der Holzkonstruktion

Das Tragverhalten von Holzkonstruktionen wird häufig von der Verbindung bestimmt, deren Verhalten durch Schlupf, Steifigkeit, Traglast und Duktilität gekennzeichnet ist. Leistungsfähigkeit, Wirtschaftlichkeit und ästhetisches Erscheinungsbild von Holzkonstruktionen sind eng mit der Verbindungstechnik verknüpft.

Heutige Holzkonstruktionen verwenden meist stabförmige Verbindungsmittel, welche die Verbindungstechniken des Zimmererhandwerks ersetzt haben.

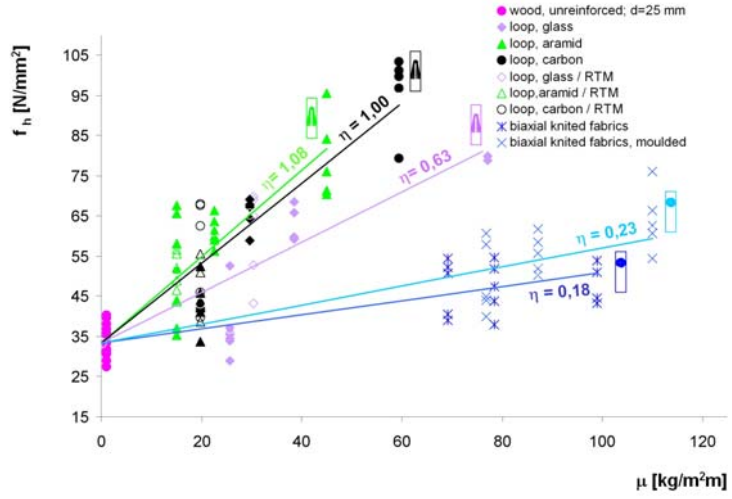


Abb. 13: Lochleibungsfestigkeit von Fichte mit maßgeschneiderten Textilien

Verbindungen von Holz mit stabförmigen Verbindungsmitteln versagen häufig infolge geringer Schub- und Querzugfestigkeit. Das Ergebnis ist ein spröder Bruch bei geringer Traglast. Daher muss die Last durch mehrere Verbindungsmittel übertragen werden unter Einhaltung von Rand-, End-, und Zwischenabständen [7]. Eine weitere Möglichkeit das Tragverhalten der Verbindung zu verbessern, besteht in der Verstärkung des Verbindungsbereiches, wobei die geringe Schub- und Querfestigkeit kompensiert wird. Auf diese Weise sieht sich die Konstruktion der Anisotropie gegenüber, deren Probleme mit Hilfe technischer Fasern und Textilien umfassend gelöst werden können.

Die Ermittlung der Lochleibungsfestigkeit und Bettungssteifigkeit stabförmiger Verbindungsmittel erfolgt in einem Versuch gemäß DIN EN 383. Beide Kennwerte werden in hohem Maße durch die textile Bewehrung günstig beeinflusst.

Beispiele maßgeschneiderter Textilien für stabförmige Verbindungsmittel sind in Abbildung 12 dargestellt. Diese textilen Strukturen wurden mit unterschiedlichen Verfahren der Textiltechnik hergestellt. Der Stern, die Spirale und die Schlaufe eignen sich jeweils in Hinblick auf Kosten, Duktilität und Festigkeit.

Die Lochleibungskennwerte parallel zur Faser wurden an Hand von Proben mit einer Abmessung von 450 x 110 mm und einer Dicke von 10 und 30 mm. Die textilen Bewehrungsstrukturen wurden in Glas, Aramid und Kohle ausgeführt. Die Verhältniszahl μ wurde definiert als textiles Flächengewicht bezogen auf eine Fläche von 310 x 110 mm und die Dicke der Probe. Der Anstieg der Ausgleichsgeraden ausgehend von der Lochleibungsfestigkeit unbewehrter Proben kann in diesem Diagramm als Maß für die Effizienz der Bewehrung betrachtet werden [16] (Abb. 13).

9 Neue Ansätze in der Verbindungstechnik

Der Entwurf von Verbindungen ist untrennbar verknüpft mit der Form des Querschnitts. Das Zimmererhandwerk verfügt über ein umfassendes Repertoire an Verbindungen für Schnittholzquerschnitte, die meist druckbeansprucht sind und bei mäßigen Traglasten spröde versagen.

Leim- und Dübelverbindungen des Ingenieurholzbaus umgehen diese Nachteile. Da der Vollquerschnitt nur eine geringe Oberfläche bezogen auf die Querschnittsfläche aufweist, muss dieses Ver-

hältnis durch zusätzliche Schnitte zur Aufnahme der Stahlbleche vergrößert werden [3].

Die Verwendung von Formholzprofilen, die im vorherigen Abschnitt beschrieben wurden, führt zu anderen Lösungen (Abb. 14). Das große Verhältnis von Oberfläche und Flächeninhalt wirkt sich günstig auf das Verbinden aus. Für Formholzprofile muss ein neues Verbindungskonzept herangezogen werden, das darin bestehen kann, einen massiven Kern in die lichte Weite des Rohres einzuführen, der in der anspruchsvollen Architektur nach dem Vorbild des Möbelbaus aus gebogenem und verleimtem Buchenholz bestehen kann (Abb. 11). Diese Art des Fügens weist Analogien mit Baumverzweigungen auf. Diese haben keine einspringenden Ecken, an denen sich hohe Spannungskonzentrationen ausbilden könnten. Darüber hinaus ist der Querschnittsverlauf dem Biegemoment angepasst; je höher das Moment, desto größer der Querschnitt besonders am Ansatz. Und schließlich ist der Faserverlauf der Beanspruchung optimal angepasst. Dieses Prinzip wird erfolgreich zur Optimierung mechanischer Teile angewandt [17].

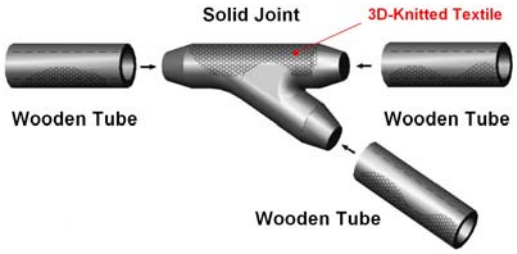


Abb. 14: Verbindungskonzept Formholzrohr-Verbindungsstück aus gebogener Buche

Infolge des Krümmungsradius kann die Verzweigung Querzugspannungen aufweisen. Abb. 11 zeigt die Bewehrung des massiven Verbindungsstückes mit Hilfe räumlicher Gestricke, deren Steifigkeit durch ein- oder biaxiale Verstärkungsfäden oder durch Recken der Maschen erhöht werden kann.

10 Verbundfestigkeit und Dauerhaftigkeit von Holz-Textil-Verbunden

Der Holz-Textil-Verbund erhöht nicht nur Schub- und Querzugfestigkeit sondern schützt das Holz auch gegenüber der Witterung (Abb. 15). Laminat und Verbund mit der Holzoberfläche entstehen durch Aufbringen eines geeigneten Harzes auf die textile Bewehrung. Alle Bestandteile des Verbundes und die Grenzschichten zwischen Holz, Faser und Matrix sind physikalischen, mechanischen und chemischen Einflüssen ausgesetzt, welche die Verbundfestigkeit und Dauerhaftigkeit tangieren (Abb. 17). Um die hohe Festigkeit und Steifigkeit der Fasern oder große textile Flächengewichte nutzen zu können, ist es erforderlich, eine guten Verbund zu erzielen und diesen über die gesamte Lebensdauer der Bauteile zu gewährleisten.

Abb. 15: Beispiele gewebeverstärkter Formholzrohre: Kohlefaser (links), unbewehrt (Mitte), Glasfaser (rechts)

Tab. 1: Bruchenergie für Modus I und II

Specimens	DCB (Mode I)		TENF (Mode II)	
	Max force [N]	Fracture energy [Nm/m^2]	Max force [N]	Fracture energy [Nm/m^2]
Spurce, massive wood	232 (12)	179 (11)	1815 (15)	737 (28)
Epoxy, no textile	223 (11)	185 (10)	1464 (17)	485 (26)
Unsat. polyester, no textile	207 (4)	215 (14)	1928 (7)	870 (22)
Epoxy with glass fabric	270 (23)	235 (39)	1817 (12)	988 (25)
Epoxy with textile-complex	310 (19)	284 (33)	2169 (3)	923 (37)
Unsat. Polyester with glass fabric	252 (13)	247 (17)	1859 (9)	1128 (19)
Epoxy with aramid fabirc	288 (16)	258 (27)	1836 (8)	686 (38)

Coefficient of variation (COV in %)

Tab. 2: Ergebnisse der Schälversuche nach Auslagerung in verschiedenen Klimaten

Peel force			Reference				3 years outdoor exposture			UV = 500 h radiation			UV = 1000 h radiation		
Fibre	Textile	Weight [g/m²]	EP	UP	UP + Pr.	PUR	EP	UP+Pr.	PUR	EP	UP + Pr.	PUR	EP	UP + Pr.	PUR
Flax	Fabric	320	++	– –	++	++	–	– –		++	++			++	
Glass	Fabric	300	+	–	○	++	Strong weath- ered		+	+	○	++	○	○	++
Carbon	Fabric	245	–	– –	○	+	– –	–	○	○	○	○	–	–	–
Aramid	Fabric	170	○	–	+	+	+	+	○	++	+	–	+	○	–
Hybrid	Fabric	205	○	– –	+	++	–	–	+	○	○	○	○	○	
Failure models															
Flax	Fabric	320	RoW	RoT	Mix	RoW	Mix	RoT		Mix	RoW			Mix	
Glass	Fabric	300	Mix	RoT	Mix	Mix	Strong weath- ered		RoW	Mix	RoW	RoW	Mix	RoW	RoW
Carbon	Fabric	245	Mix	Mix	RoW	RoW	RoT	RoW	RoW	Mix	RoW	RoW	RoT	RoW	RoW
Aramid	Fabric	170	RoW	Mix	RoW	RoW	RoW	RoW	RoW	RoW	RoW	RoW	RoW	RoW	RoW
Hybrid	Fabric	205	RoT	RoT	Mix	RoW	RoT	Mix	RoW	RoT	RoW	RoW	Mix	Mix	

Symbol of peel force: – –: 0–3 N/cm; –: 3–6 N/cm; ○: 6–9 N/cm; +: 9–12 N/cm; ++: over 12 N/cm

Symbol of failure modes: RoT: Resin on Textile (Failure between Wood and Resin); RoW: Resin on Wood (Failure between Resin and Textile); Mix: Resin on Textile and Wood (mixed Failure Mode)

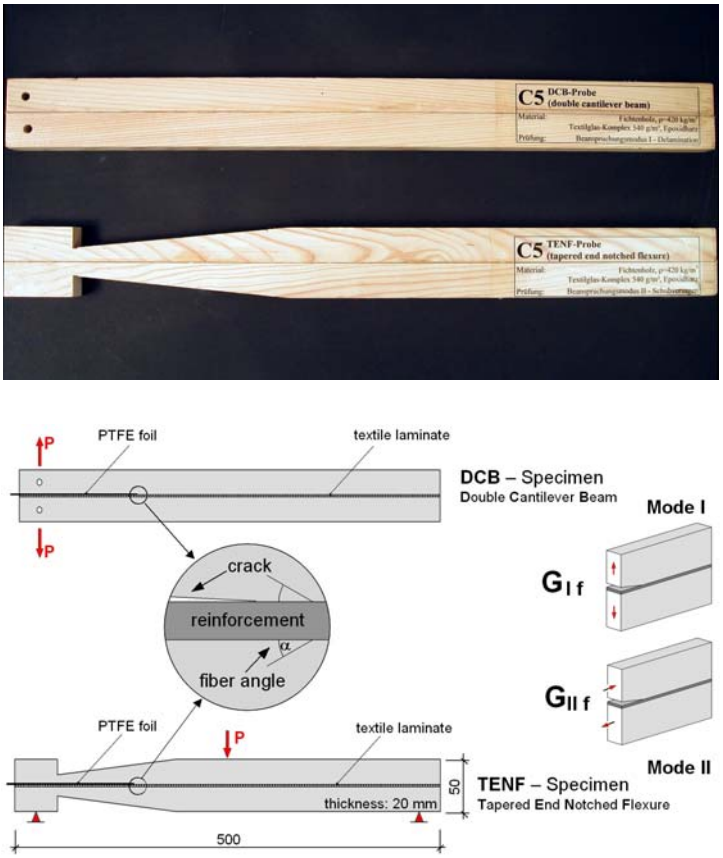


Abb. 16: a) und b) Bruchmechanische Proben für Modus I und II nach Aicher et al.

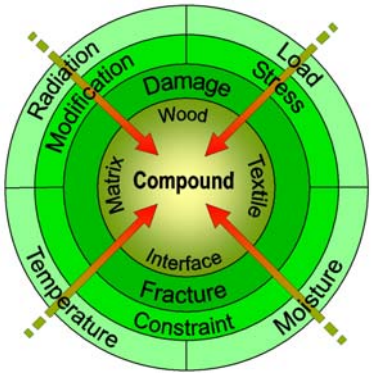


Abb. 17: Beanspruchung von Holz-Textil-Verbunden nach der Bewitterung

Zwei Versuchsmethoden [18], [19] wurden herangezogen, um die Verbundfestigkeit von Holz-Textil-Verbunden und deren zeitliche Veränderung zu ermitteln. Schälversuche nach ASTM D 3167 dienen zur Bestimmung der Verbundfestigkeit verschiedener Verbundsysteme gegenüber Witterungseinflüssen und nach künstlicher Bewitterung.

Bruchmechanische Versuche nach Empfehlungen von RILEM TC-133 [20] wurden zur Bestimmung der Bruchenergie des Modus I und II jeweils mit Hilfe von Proben vom Typ DCB (double cantilever beam) und von TENF (tapered end-notched flexure) durchgeführt (Abb. 16). Als Matrices wurde das Epoxid EP LN-1 und das ungesättigte Polyester Vicovoss i 25 B mit dem Polyurethan Primer VOSSCHEMIE G4 verwendet, die jeweils als Zwei-Komponenten-System vorliegen. Folgende Textilien wurden als Bewehrung verwendet: Glasgewebe 200 g/m², uniaxiales Glasgelege 540 g/m² und Aramidgewebe 170 g/m².

Die Proben wurden mit einer Faserneigung von ungefähr 3° ausgeführt, um den Rissfortschritt in der Verbundfuge zu halten. Die Versuchswerte der Bruchenergie sind in Tabelle 1 und 2 aufgeführt.

11 Zusammenfassung

Der Baustoff Holz weist neben vielen Vorzügen einige Nachteile aus, denen die Tragwerksplanung systematisch begegnen muss. Mechanische und biologische Eigenschaften des Holzes können in weitem Umfang durch thermo-mechanische Verfahren verbessert werden.

Die Materialeffizienz der Holzkonstruktion ist entscheidend für die Wettbewerbsfähigkeit. Es wurde gezeigt, dass jene infolge des hohen Verschnitts im Sägewerk und der Verwendung von Vollquerschnitten im Vergleich zu technischen Materialien sehr gering ist und ein Zusammenhang mit den eingeschränkten Produktionsverfahren besteht, die sich auf spannende Bearbeitung beschränken. In diesem Beitrag wird das Formen von Profilen vorgestellt, dem ein neues Konzept zugrunde liegt, das Holz als zelluläres Material betrachtet, das unter Wärme, Druck und Feuchtigkeit verdichtet und geformt werden kann. Beträchtliche Materialeinsparungen von bis zu 70% können auf diese Weise realisiert werden.

Die geringe Schub- und Querzugfestigkeit des Holzes ist limitierender Faktor in der Holzkonstruktion. Zahlreiche Alternativen im Umgang mit der Anisotropie haben zu einem unübersichtlichen Spezialwissen geführt. Technische Fasern und Textilien sind neue Materialien mit hoher Akzeptanz im Ingenieurwesen. Sie können universell im Holzbau eingesetzt werden, um dessen Nachteilen wie vor allem Anisotropie, Verbinden und Dauerhaftigkeit zu begegnen.

Form- und beanspruchungsgerechte Textilien machen Gebrauch von Hochleistungsfasern. Der Verbund von Formholzprofilen mit technischen Fasern und Textilien schafft Synergien, bei welchen das Holz von der Festigkeit und Steifigkeit, der Orientierung sowie der Dauerhaftigkeit der Fasern und Textilien profitieren und diese wiederum durch den geringen Preis, der Umweltfreundlichkeit und den ästhetischen Vorzügen des Holzes.

Das Traglastverhalten textilbewehrter Verbindungen und Bauteilen ist hinsichtlich Festigkeit, Steifigkeit und Duktilität deutlich besser und ermutigt zu weiterführenden Untersuchungen und Entwicklungen. Die äußere Beschichtung stellt einen wirksamen Schutz vor der Witterung dar.

Quellen

[1] Killer, J.; Die Bauwerke der Baumeister Grubenmann; Lignum/Baufachverlag; 4. Auflage 1998

[2] Zimmer, P.; Die Konstruktionsgeschichte hölzerner Brücken zwischen 1750 und 1850; Interner Forschungsbericht; Fakultät Architektur der TU Dresden, 2002

[3] Herzog, Th.; Natterer, J.; Schweitzer, R.; Volz, M.; Winter, W.; Holzbauatlas; Edition DETAIL; Inst. f. internationale Architektur-Dokumentation, München; Vierte Auflage, neu bearbeitet, 2003

[4] Herzog, T. (Hrsg.); Expodach – Roof Structure at the World Exhibition Hanover 2000; Prestel, Munic, London, New York, 2000

[5] Steinlin, H.; The world's forests – Ecological and economical problems; in: Les constructions en bois, Cycle d'études postgrades 1994-95, IBOIS, EPF Lausanne

[6] Sell, J.; Eigenschaften und Kenngrößen von Holzarten; Baufachverlag AG Zürich; 1989

[7] DIN 1052; Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken; Sonderdruck, Beuth Verlag GmbH, DIN 1052:2004-08

[8] Kollmann, F.; Kuenzi, E.; Stamm, A.; Principles of Wood Science and Technology, Vol. 1 and 2; Springer Verlag, Berlin; 1975

[9] Haller, P.; Wehsener, J.; Festigkeitsuntersuchungen an Fichtenpressholz, Holz als Roh- und Werkstoff, Volume 62, Number 6, 2004, pp. 452-454

[10] Welzbacher, C. R.; Rapp, A. O.; Haller, P.; Wehsener, J.; Biological and mechanical properties of densified and thermally modified Norway spruce; In: Proceedings of Second European Conference on Wood Modification, Göttingen, Germany, 2005

[11] Lohmann, U.; Holz Handbuch, DRW-Verlag, 4. Auflage 1990/1993

[12] Gibson, L.; Ashby, M.; Cellular solids – Structure and Properties; 2nd edition; Cambridge Solid State Science Series; Cambridge University Press, 1997

[13] Wagenführ, R.; Scheiber, Chr.; Holzatlas; 3. Auflage, VEB Fachbuchverlag Leipzig, 1989

[14] Gay, D.; Matériaux composites; 3rd edition; édition Hermès, Paris; 1991

[15] Offermann, P.; Abdkader, A.; Engler, Th.; Schierz, M.; Grundlagen textiler Bewehrungsstrukturen zur Verstärkung bestehender Bauwerke; Research Report of SFB 528 „Textile reinforcement in civil engineering"; Faculty of Civil Engineering; Dresden University; 2002, pp. 25-74

[16] Haller, P.; Birk, T.; Putzger, R.; Physikalische und mechanische Untersuchungen an textilbewehrtem Holz und Holzbauteilen; Research Report of SFB 528 „Textile reinforcement in civil engineering"; Faculty of Civil Engineering; Dresden University; 2002, pp. 283-322

[17] Mattheck, C.; Engineering Components Grow like Trees; Research report KfK 4648; Kernforschungszentrum Karlsruhe; 1989

[18] Haller, P.; Putzger, R.; Fracture energy in mode I and mode II of reinforced wood; in: Abstract book, 11th International Conference on Fracture, Turin, Italy, March 20-25, 2005; p. 1224

[19] Aicher, S.; Gustafsson, J. (ed.); Haller, P.; Petersson, H.; Fracture mechanics models for strength analysis of timber beams with a hole or a notch – A report of RILEM TC-133; Structural Mechanics, LTH, Sweden, 2002

[20] Aicher, S.; Boström, L.; Gierl, M.; Kretschmann, D.; Valentin, G.; Determination of Fracture Energy of Wood in Mode II; RILEM TC 133 Report; SP Swedish National Testing and Research Institute; SP Report 1997:13

9.2 Verbundkonstruktionen, Materialkombinationen
Textilverstärkte Formholzrohre

Peer Haller, Ralf Menzel

1 Einleitung

Im Bauwesen dominieren seit Jahren der Stahlbeton- und Stahlbau die tragenden Konstruktionen, insbesondere dort, wo Tragfähigkeits- und Dauerhaftigkeitsdefizite des Holzes kompensiert werden müssen. Eine Auseinandersetzung mit diesen Gegebenheiten führt daher zu der Frage, wie die Vorzüge von Holz gezielter genutzt, seine Einsatzfelder vergrößert und nicht zuletzt seine Wertschöpfung verbessert werden können. Es wird daher ein Ansatz verfolgt,

(1) Holz im tragenden Bauteilquerschnitt beanspruchungsgerecht anzuordnen;
(2) die Anwendbarkeit von Holz im Bauwesen durch Bereitstellung höhere Festigkeits- und Steifigkeitswerte auszudehnen;
(3) durch Verbund mit technischen Textilien die statischen und funktionellen Eigenschaften zu verbessern.

2 Herstellung textilbewehrter Formholzrohre

2.1 Thermomechanische Verdichtung von Holz

Als poröser zellulärer Festkörper lässt sich Holz in einem definierten Wärme- und Feuchtebereich ähnlich wie ein Schwamm zusammendrücken. Je nach Porengehalt – bei Nadelholz beträgt das Porenvolumen etwa 60% – ist demzufolge eine Verdichtung des Materials in dieser Größenordnung möglich. Das bedeutet z.B. bei einem Verdichtungsgrad von 50 % für den Ausgangsquerschnitt eine Halbierung seines Volumens, zugleich erhöhen sich mechanische Eigenschaften wie Festigkeiten, Steifigkeiten oder Dichte etwa um den Faktor 2 (Abb. 1).

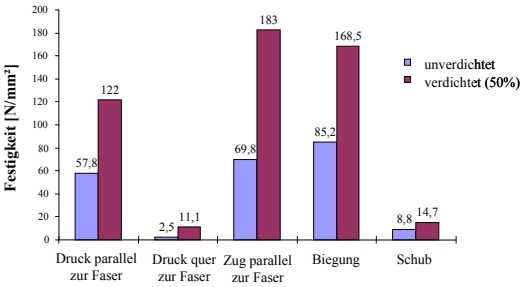


Abb. 1: Vergleich der Bruchfestigkeiten von unverdichtetem und verdichtetem Fichtenholz [1]

2.2 Formung der Rohre

Im verdichteten Material verbleibt ein großes Potential für weitere Umformungen. Als Ausgangsmaterial eignen sich Bohlen oder Kanthölzer, auch Rundhölzer sind prinzipiell für das Verdichten geeignet [2]. Die Presshölzer werden zu einer Platte verleimt, die sich unter erneuter Wärme- und Feuchtigkeitszufuhr vergleichbar mit einem zuvor zusammen geschobenen Fächer formen und fixieren lässt (Abb. 2).

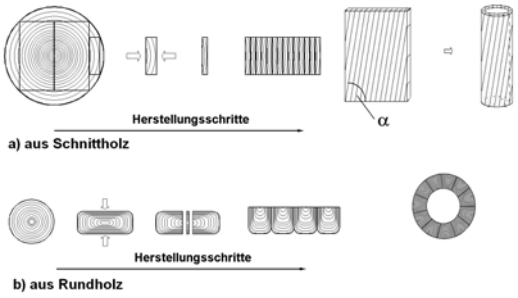


Abb. 2: Prinzipielle Schritte der Plattenherstellung und Rohrformung

Mit dieser patentierten Technologie [3] lassen sich Rohre als auch andere offene oder geschlossene prismatische Querschnitte formen. Als Fachbezeichnung wurde der Begriff Formholz eingeführt.

2.3 Bewehrung von Formholzrohren

Mit Wickel- und Laminierverfahren lassen sich Bauteile mit technischen Textilien ummanteln (Abb. 3). Hierfür eignen sich beispielsweise Glas-, Aramid- oder Kohlefasern, deren Verbund durch eine Matrix aus synthetischem Harz realisiert wird (Abb. 4). Man spricht auch von faserverstärkten Kunststoffen (FVK), wobei vor allem Glasfasern wegen ihres geringen Preises bei hoher mechanischer Festigkeit wirtschaftlich sind.

Abb. 3: Wickelmaschine mit eingespanntem Formholzrohr

Abb. 4: Formholzrohre mit Kohlefaserbewehrung, unbewehrt und lackierter Glasfaserbewehrung (von links nach rechts)

Durch gezielte Anordnung der textilen Fäden, z.B. als Gewebe oder Gelege, werden die Eigenschaften des Endproduktes beeinflusst. Mit speziellen Textilmaschinen ist es möglich, die Fäden in gewünschte Richtungen zu orientieren, so dass zwischen uni-, bi- und triaxialen Strukturen unterschieden wird. Auf dem Bauteil können mehrere Lagen eines Gewebes oder Geleges appliziert werden.

Die textile Bewehrung erschließt weitere Tragreserven der Formholzrohre. Zudem können Eigen-, Schwind- und Quellbeanspruchungen aufgefangen und weitere funktionelle Eigenschaften positiv beeinflusst werden.

2.4 Leistungsfähigkeit von Rohrquerschnitten

Der Einschnitt von Baumstämmen im Sägewerk zu Kanthölzern, Brettern usw. ist nicht nur mit hohen Materialverlusten verbunden, sondern führt auch zu Vollquerschnitten, die aus statischer Sicht wenig leistungsfähig sind [4]. Insbesondere bei Biege- und Druckbeanspruchung werden hohe Flächenträgheitsmomente benötigt. Statisch günstige Kasten- oder I-Profile werden im Holzbau gegenwärtig durch aufwändiges Zusammenfügen von Schnittholz und Holzwerkstoffen hergestellt.

In einer 2002 vorgenommenen internen Studie des Instituts für Stahl- und Holzbau der TU Dresden wurden marktübliche Preise von Stützen unterschiedlicher Materialien verglichen (Abb. 5). Für die gewählten Druckkräfte und eine Knicklänge von 3 Metern wurden dazu statisch erforderliche Rohrquerschnitte für Stahl bzw. quadratische Querschnitte für C 24 und GL 28 ermittelt. Bei Beton wurde eine quadratische Stütze mit 30 cm Seitenlänge und lastabhängigem Bewehrungsgrad zugrunde gelegt.

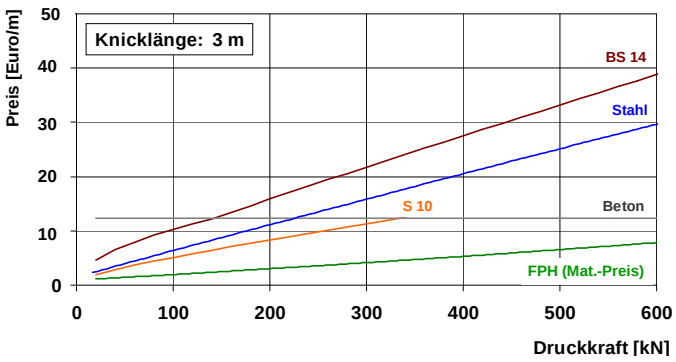


Abb. 5: Herstellungskosten von Stützen

Für Formprofilholzrohre (FPH) wurden lediglich Materialpreise verwendet, da keine Angaben über Herstellungskosten unter industriellen Fertigungsbedingungen vorliegen. Trotzdem dürfte die Grafik deutlich machen, dass Formholz gegenüber Stahl und Brettschichtholz ein hohes wirtschaftliches Potential besitzt.

Rohrquerschnitte besitzen gegenüber flächengleichen Kanthölzern mit praxisnahen Abmessungen etwa zwei- bis vierfache Flächenträgheitsmomente. Bei Knickbeanspruchung kann sich die Schlankheit günstigstenfalls halbieren, so dass schlanke Stützen nach DIN 1052: 2004-08 entsprechend der Knickbeiwerte k_c mit einer etwa dreimal höheren Knickfestigkeit bemessen werden dürfen.

2.5 Druckversuche

Am Institut für Stahl- und Holzbau der TU Dresden wurde die Tragfähigkeit von insgesamt 6 bewehrten und unbewehrten Rohrstützen aus Fichten-Formholz mit Durchmessern von 27,5 cm, Wandstärken von 1,8 cm sowie Längen von 2,45 m überprüft (Abb. 6). Die Stützen waren am oberen Ende mit einer gelenkig gelagerten Druckplatte versehen, der Stützenfuß entsprach einer nachgiebigen Einspannung. Als Bewehrung kam bidirektionales Glasseidengewebe (E-Glas) der Fa. VOSS-Chemie mit einem Flächengewicht von 160 g/m² zum Einsatz. Es wurde 3-lagig unter Verwendung von Epoxydharz LN-1 mittels Handlaminierung aufgebracht.

Abb. 6: Druckversuche an unbewehrten und bewehrten (rechtes Bild) Formholzrohren

Für die unbewehrten Stützen wurde eine durchschnittliche Bruchspannung von 36,7 N/mm² ermittelt, wobei sprödes Versagen mit großflächigen Bruchstücken auftrat. Versagensursache waren hohe Querzugspannungen in Ringrichtung. Die bewehrten Rohrstützen zeigten dagegen ein duktileres Verhalten und die Traglast erhöhte sich um ca. 40 %.

Eine Auswertung des Verformungsverhaltens [5] ergab, dass es bei den unbewehrten Stützen zu einer Ovalisierung des Querschnittes kam (Abb. 7), währenddessen die Querschnittsform der bewehrten Stützen weitestgehend erhalten blieb. Die äußere Bewehrung verhindert demnach lokales Ausbeulen und sprödes Versagen.

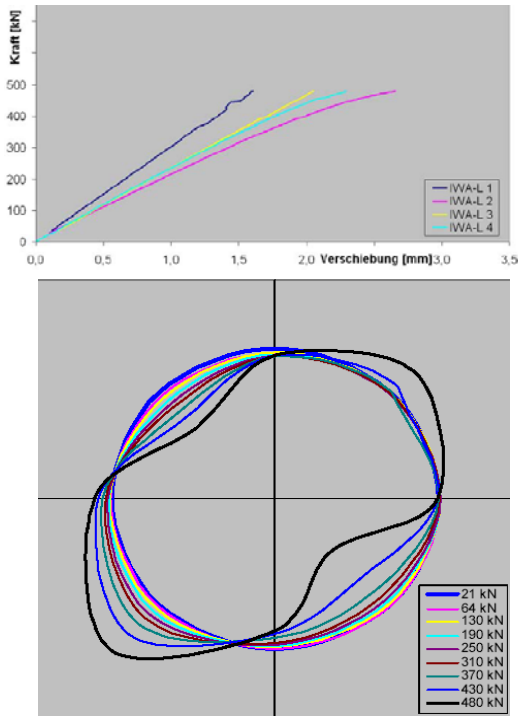


Abb. 7: Kraft-Verschiebungs-Diagramm in Längsrichtung und Querschnittsverformung (stark überhöht dargestellt) einer unbewehrten Formholzrohrstütze (l= 2,45 m, t= 1,8 cm, D= 27,5 cm)

2.6 Bemessungsansätze

Die vorangegangenen Ausführungen haben gezeigt, dass der Einsatz von Formholzrohren für baupraktische Anwendungen zweckmäßigerweise unter Einbeziehung einer äußeren textilen Bewehrung erfolgen sollte. Die Tragfähigkeit wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst und führt bei der Rohrdimensionierung zu einer wesentlich komplexeren Herangehensweise als bei normalen Schnittholzquerschnitten.

- Für die Festlegung eines günstigen Verbundquerschnittes aus Formholz und Bewehrung sind der Verdichtungsgrad, die Wandstärke des Formholzes sowie Material und Art des Laminates zu berücksichtigen
- Der minimal realisierbare Krümmungsradius des Rohrquerschnittes hängt vom Verdichtungsgrad und der Wandstärke ab, da eine Dehnung der äußeren Randfasern über das Niveau des unverdichteten Holzes hinaus auszuschließen ist
- Geeignete Ausrichtung der Bewehrung, um die Verstärkungswirkung in Umfangs- und Längsrichtung sowie ggf. in lokalen Bereichen gezielt zu steuern
- Berücksichtigung des Aufbringverfahrens des Laminates; dies ist nicht nur ein Kostenfaktor, sondern beeinflusst wesentlich den statisch relevanten Faservolumengehalt

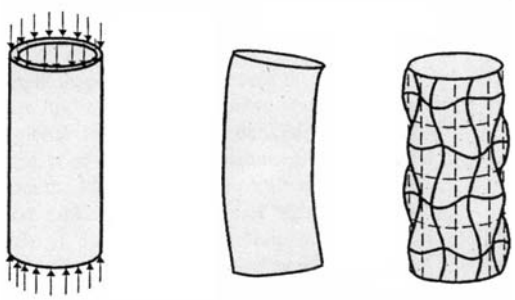


Abb. 8: Axialbelastetes Rohr als Knickfigur und mit „schachbrettartiger" Beulverformung [6]

Die Tragfähigkeit von mehrschichtigen Zylinderschalen ergibt sich nach [6] einerseits aus den durch das Material aufnehmbaren Längsdruck- bzw. Knickspannungen, andererseits führt eine geringe Wanddicke des Profils zu lokalen Beulbeanspruchungen, die in der Holzbaunorm nicht geregelt sind. Wesentlich ist hierbei das Verhältnis von Krümmungsradius zu Wanddicke. Zudem ist von hohen Querzug- und Schubbeanspruchungen auszugehen, wie das Bruchbild der unverstärkten Prüfkörper zeigte. Für die bemessungsseitige Erfassung dieses komplexen Beanspruchungszustandes sind weitere Untersuchungen notwendig.

3 Einflussfaktoren auf die Entwicklung und Anwendung von Formholzprofilen

Formholzquerschnitte in Verbindung mit einer geeigneten Bewehrung aus FVK sind aus statischer Sicht vorzugsweise als hoch belastbare Stützen einsetzbar. Hier stoßen die erforderlichen Abmessungen herkömmlicher Schnitt- oder Rundholzquerschnitte an ihre Grenzen oder werden unwirtschaftlich.

Im Gegensatz zu Vollquerschnitten ist Formholz aber wesentlich empfindlicher gegenüber Rissen, die beispielsweise durch Querzug-, Schub- oder Torsionsbeanspuchungen bzw. Feuchte- und Temperaturbelastungen hervorgerufen werden können. Die Bewehrung dient daher sowohl der Vermeidung tragfähigkeitsmindernder Risse als auch dem Schutz vor abiotischen Einwirkungen.

Die geringen Wandstärken und der Hohlraum der Rohre sind auch hinsichtlich des Brandschutzes wesentliche, nicht zu vernachlässigende Aspekte. Hierzu müssen weitere Untersuchungen durchgeführt und ggf. Schutzmaßnahmen diskutiert werden.

Der Einsatz von Formholzprofilen im Hochbau setzt die Verfügbarkeit einfacher Verbindungsmittel für Knotenpunkte und Anschlüsse voraus. Dazu sind Konstruktionslösungen zu erarbeiten.

Weiteres Entwicklungspotential besteht in der Verwendung anderer Holzarten. Fichtenholz ist zwar sehr preiswert, aber speziellen Holzarten in der Formbarkeit unterlegen. Auch die Eignung von schnellwüchsigem Holz, wie z.B. Pappelholz, ist weiter zu verfolgen.

4 Fazit und Ausblick

Aus wirtschaftlichen und ökologischen Gründen ist es ein Gebot der Zeit, durch Einführung innovativer Produkte und Technologien die bisherigen Einsatzgebiete von Holz auszubauen und neue Märkte zu erschließen. Die Verdichtung und Formung von Fichtenholz kombiniert mit einer äußeren textilen Bewehrung stellt dafür einen viel versprechenden Ansatz dar.

Formholzprofile sind auf Grund ihrer Querschnittsgeometrie statisch sinnvoll und sehr tragfähig. Von der Verbundwirkung mit sehr zugfesten Glas- oder Kohlefasern profitiert nicht nur das geformte Holz, sondern auch der faserverstärkte Kunststoff, welcher gegen Ausbeulen stabilisiert wird. Zur komplexen Beurteilung des Tragverhaltens druckbeanspruchter Formholzrohre sind weitere experimentelle Untersuchungen mit Prüfkörpern unterschiedlicher Längen, Abmessungen und Bewehrungsgrade erforderlich. Spezielle Materialkennwerte sind an Kleinproben zu verifizieren. Das Brandverhalten und das Langzeitverhalten unter Witterungseinflüssen sind wichtige noch zu bearbeitende Themen, um den praktischen Einsatz nachzuweisen bzw. zu beschränken.

Die Verwendung anderer Holzarten und von Naturfasern ist technologisch möglich und besitzt Entwicklungspotential. Neben der Verwendung im Bauwesen dürfte Formholz auch für den Leicht- und Anlagenbau sowie für nicht tragende Teile wie Möbel oder Ausbauelemente interessant sein, zumal eine äußere Bewehrung auch zur Verbesserung von Gebrauchseigenschaften führt.

Quellen

[1] Haller, P. und Wehsener, J.: Entwicklung innovativer Verbindungen aus Pressholz und Glasfaserarmierung für den Ingenieurholzbau. Abschlussbericht des AiF-Vorhabens Nr. 11164 B / Dresden 2000. (Hrsg.) Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.

[2] Schrepfer, V.: Technik der Verdichtung von Fichtenrundholz. ETH Zürich. Holz-Zentralblatt Nr. 122 vom 10.10.97.

[3] „Profil aus Holz und Verfahren zu seiner Herstellung"; Patent-Nr.: 02745122.8-2316-DE0202030 der TU Dresden vom 30.05.2002.

[4] Haller, P.: Vom Baum zum Bau oder die Quadratur des Kreises. Proceedings der 11. Internationalen Tagung „Stoffliche Verwertung nachwachsender Rohstoffe", 14.-15.10.2004 Chemnitz.

[5] Birk, T., Cabi, L.: Druckversuche an Formprofilholzrohren. Interner Bericht des Instituts für Stahl- und Holzbau der TU Dresden 2005.

[6] Weaver, P. M.: Design of laminated composite cylindrical shells under axial compression. Composites Part B: Engineering, 31 (2000), pp. 669-679.

9.2 Verbundkonstruktionen, Materialkombinationen
Charakterisierung der Verbundfestigkeit von textilbewehrtem Holz unter Berücksichtigung von Witterungsfaktoren

Robert Putzger, Peer Haller

1 Überblick und Einleitung

Der Haftverbund zwischen Holz und Textil ist, wie in Abb. 1 schematisch dargestellt, einer komplexen Beanspruchung ausgesetzt. Besonders bei Anwendungen im Außenbereich sind zusätzlich zu den mechanischen Beanspruchungen auch Witterungseinflüsse zu berücksichtigen.

Die Untersuchungen zur Verbundfestigkeit insbesondere zur Dauerhaftigkeit greifen neben den Schälversuchen auch auf bruchmechanische Versuche zurück. Dies ist möglich, da die Untersuchungen zur Bruchmechanik im Modus I und II, entsprechend den Empfehlungen von RILEM TC-133 ein stabiles Risswachstum auch für textile Zwischenschichten bestätigt haben [1]. Die Übersicht in Abb. 2 zeigt zusammenfassend noch einmal die mit beiden Versuchsmethoden bestimmten Kennwerte.

	Dichte [g/cm³]	Zug-festigkeit [N/mm²]	E-Modul [kN/mm²]	Bruch-dehnung [%]	Temperatur-ausdehnung [10⁻⁶/K]	Feuchtigkeits-aufnahme [%]
Faser (längs)						
Leinen	1,53	1100	50	3,0	10	10
Hanf	1,50	800	30	2,0	30	10
E-Glas	2,56	2500	73	4,0	5,0	0
Aramidfaser HM	1,45	2900	125	2,2	-3,0	3,5
Kohlefaser HM	1,80	3000	450	0,6	-1,0	0
Vollholz (EC 5: S 10)	0,38	14	11	1,0	3,5	> 10
Harz / Matrix (ausgehärtet)						
Epoxid (EP)	1,2	90	3,5	6,0	50	
ungesät. Polyester (UP)	1,2	60	4,0	2,0	80	0,1
Polyurethan (PUR)	1,2	40	10	> 50	150	
Laminat (50 % Faservol.)						
GFK (E-Glas Gewebe 200 g/m²+ EP-Harz)	1,8	220	12	2	6,0	0,3

Abb. 1: Wechselwirkung des Haftverbundes mit seiner Umwelt und Eigenschaften der eingesetzten Materialien

Die hier vorgestellten Ergebnisse basieren auf Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit von textilverstärkten Schälproben. Die Exposition der Probekörper erfolgte sowohl in der Freibewitterung als auch im Global-UV-Schrank bei künstlicher Bewitterung mit getrennter und kombinierter Beanspruchung ausgewählter Bewitterungsfaktoren.

Ein Vergleich der Ergebnisse zeigt schnell, dass zum Beispiel die Freibewitterung gegenüber der künstlichen Bewitterung mit intensiver UV-Bestrahlung die wesentlich schärfere Beanspruchung darstellt. Bei einer Vielzahl von Proben konnten bereits im Bewitterungsgestell Ablöseerscheinungen beobachtet werden. Dies gilt besonders für die Glasfaser- und transluzenten Bewehrungen, welche ohne wetterfesten Schlusslack hergestellt wurden. Dagegen sind Laminate aus Kohle- oder Aramid-Fasern sowie aus natürlichen Fasern nach Augenscheinnahme auch nach einer längeren Bewitterung intakt.

Die Bewitterungsversuche belegen, dass nicht nur das Laminat, sondern sämtliche der Witterung ausgesetzte Oberflächen des Holzes mit einer abschließenden Oberflächenbeschichtung behandelt werden müssen. In Abhängigkeit von der Klebstoffmatrix ist ein Schlusslack (Topcoat) auf Epoxid- oder Polyesterbasis allseitig auf die der Witterung ausgesetzten Bauteile aufzutragen und regelmäßig zu warten.

2 Material

Die Probekörper für die Schälversuche wurden aus gehobelten Fichtenholzbrettern mit einer durchschnittlichen Holzfeuchte von 9 % hergestellt. Die Holzbrettchen für die Freibewitterung hatten eine Geometrie von 375 x 100 x 20 mm. Die Probekörper für die künstliche Bewitterung waren aus Gründen der begrenzten Prüfraumabmessungen mit 50 mm nur halb so breit.

Als Bettungsmatrix für die Textilien aus natürlichen und synthetischen, organischen und anorganischen Fasern wurden mehrere, im Kunststoff- und Holzbau übliche Kleber eingesetzt. Die Übersicht in Abb. 1 zeigt für die in den Versuchen eingesetzten Fasern und Matrices einige ausgewählte Materialeigenschaften.

3 Herstellung der Probekörper

Die Probekörper der Schälversuche wurden mit dem Handlaminier- sowie einzelne Versuchsserien mit dem RTM- oder mit dem Vakuumverfahren hergestellt. Bei dem Vakuumverfahren wird im Gegensatz zum RTM-Verfahren das Textil von Hand „nass in nass" auf das Holz aufgetragen. Im Anschluss an das Laminieren härtet das Harz unter Anlegen eines Vakuums aus.

Die in den Versuchen standardmäßig eingesetzten Matrix Produkte Epoxid- Harz LN-1, ungesättigtes Polyesterharz i25B und im Besonderen das Polyurethan Harz Helimpur 700T sind auf Grund ihrer Konsistenz für das RTM-Verfahren eher ungeeignet. Diese Harze wurden aber zur besseren Vergleichbarkeit mit den von Hand laminierten Versuchsreihen beibehalten.

4 Beanspruchung der Probekörper

Die Probekörper für die Freibewitterung wurden auf einem Versuchsfeld bei Dresden, bestehend aus 30 Bewitterungsständern nach DIN 53166, der Witterung ausgesetzt. Dabei wirken sämtliche Umweltfaktoren wie zum Beispiel:

- Wasser (Wasserdampf, Niederschlags- und Kondenswasser)
- Globalstrahlung der Sonne (energiereiche UV-Strahlung)
- Frost-Tauwechsel oder extreme Temperaturen im Sommer und Winter
- im Niederschlag gelöste Schadstoffe

auf die Probekörper ein.

In den Versuchsreihen zur künstlichen Bewitterung wurden folgende Beanspruchungskombinationen untersucht:

1) Zyklus UV-Strahlung (8 Stunden UV-Bestrahlung, 0,5 Stunde Pause)
2) Zyklus Klima (4 Stunden UV-Bestrahlung, 1 Stunde Beregnung, 3 Stunden feucht-warmes Raumklima)

Die Bewitterung der Schälproben erfolgt in einem Gerät der Firma Weiss Umwelttechnik GmbH (Typ UV200). Das erzeugte Spektrum der UV-Strahlung deckt dabei die Wellenlängen 290 nm bis 450 nm ab. Je nach Versuchsreihe betrug die Gesamtdauer der UV-Bestrahlung bis zu 1000 Stunden beziehungsweise bis zu 2000 Stunden bei Beanspruchung durch den Klimazyklus.

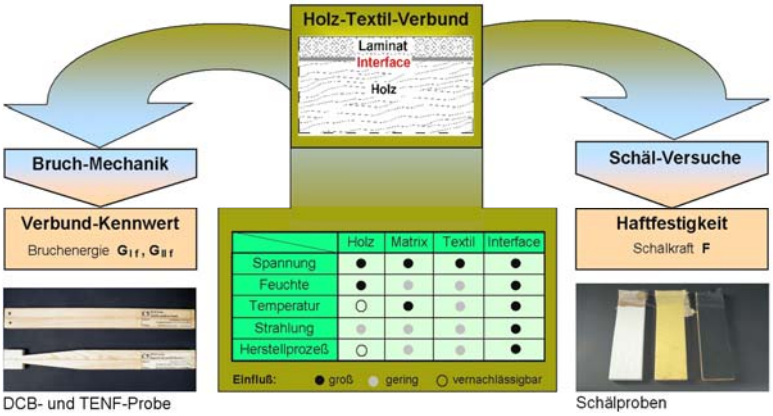


Abb. 2: Testmethoden zur Charakterisierung des Holz-Textil-Verbundes

5 Prüfung der Probekörper

Nach der Bewitterung werden die textilbewehrten Holzbrettchen im Schälversuch nach ASTM D 3167 in einer Zugmaschine (Zwick Z250) geprüft. Das Laminat wird dabei, wie in Abb. 3 gezeigt, über eine Vorrichtung, bestehend aus 3 Walzen, abgeschält. Die dazu erforderliche Zugkraft wird über einen Gesamtschälweg von ca. 300 mm aller 0,5 s aufgezeichnet, wobei für die Mittelwertbildung der Schälkraft die ersten und die letzten 25 mm Schälung nicht berücksichtigt werden.

Die gemessene Schälkraft wird anschließend auf die Probenbreite bezogen, um für die weitere Auswertung einen geeigneten Vergleichswert zu erhalten. Die Prüfung erfolgt weggesteuert mit einer Geschwindigkeit von 50 mm/min.

Die Ergebnisse der Schälversuche dienen hauptsächlich der vergleichenden Einschätzung von Verbundarten und ihren Beanspruchungen. Eine alleinige Schälbeanspruchung tritt bei der Lastabtragung von textilbewehrten Holzkonstruktionen selten auf.

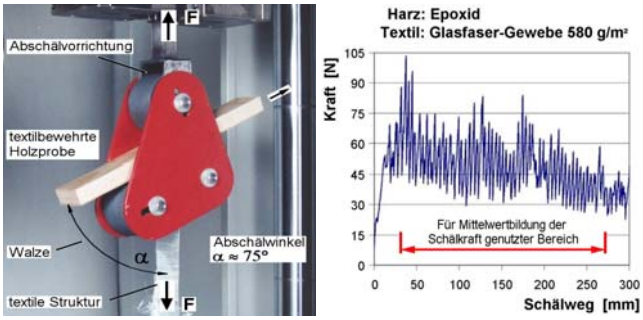


Abb. 3: Prüfung einer Schälprobe mit der Zugmaschine

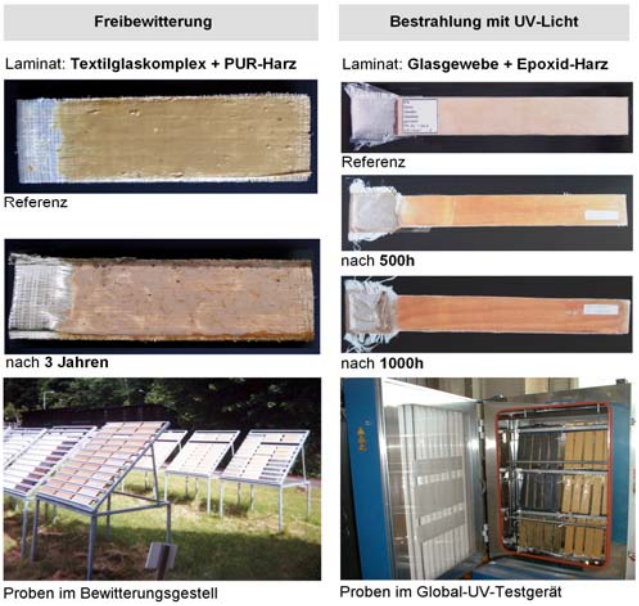


Abb. 4: Beanspruchung der Schälproben

6 Ergebnisse

Es wurden insgesamt über 1200 Schälproben mit Verbunden hergestellt, die sich hinsichtlich ihrer Bestandteile in den Faserarten und der eingesetzten Leime zum Teil stark unterscheiden. Davon befinden sich aktuell ca. 400 Proben in der Freibewitterung und 800 Probekörper wurden im Schälversuch geprüft. Von den geprüften Proben dienen 300 Stück als unbewitterte Referenzproben. Von ca. 100 Proben liegen nach 3 Jahren Exposition erste Ergebnisse aus der Freibewitterung vor. Über 400 Proben wurden nach einer künstlichen Bewitterung im Global-UV-Testgerät geprüft.

Der Probenumfang liegt je nach Versuchsreihe zwischen 5 und 15 Probekörpern, wobei einzelne Proben auf Grund ihres starken Verwitterungszustandes oder eines gerissenen Textils bzw. Laminates von der Auswertung ausgeschlossen werden mussten.

Tabelle 1 enthält für ausgewählte Versuchsreihen neben der Schälkraft auch die beim Schälvorgang beobachtete Versagensart. Zwischen beiden Versuchsdaten besteht eine Abhängigkeit, so dass eine genaue Betrachtung der Versagensart in der Grenzschicht von Bedeutung ist. Dazu ist aus makroskopischer Sichtweise eine stärkere Differenzierung der Grenzschicht in zwei Versagensebenen Holz-Matrix und Matrix-Textil notwendig.

Bei einem Versagen der Grenzschicht Holz-Matrix haftet der Leim überwiegend am abgeschälten Textil (abgekürzt LaT: Leim auf Textil, Abb. 5 links). Teilweise kommt es zur Abspaltung oberflächennaher Holzfasern. Das Versagen der Grenzschicht zwischen Holz und Laminat führt zu vergleichsweise geringen Schälkräften bei großen Streuungen der Versuchsergebnisse.

Abb. 5: Versagensarten von CFK-Schälproben nach 3 Jahren Freibewitterung, links: Leim auf Textil (LaT), rechts: Leim auf Holz (LaH)

Anders verhält es sich bei einem Versagen der Grenzschicht zwischen Leim und Textil. In diesem Fall löst sich das Textil von der Matrix, so dass ein Großteil des Leimes auf der Holzoberfläche haften bleibt (abgekürzt LaH: Leim auf Holz, Abb. 5 rechts). Dieses Versagen führt zu hohen Schälkräften bei vergleichsweise geringen Streuungen der Versuchsergebnisse. Das Bruchbild der Versagensart LaH ist charakteristisch für ein Laminat mit einer Klebstoffmatrix aus Polyurethan- oder ungesättigtem Polyester-Harz in Verbindung mit einem Haftvermittler. Eine Abhängigkeit vom verwendeten Textil oder der Faserart konnte dabei nicht beobachtet werden.

Beide betrachteten Versagensarten können als Adhäsionsbruch interpretiert werden, da der Schälvorgang jeweils in der Grenzschicht zweier Verbundmaterialien erfolgt. Besonders beim Schälvorgang von Laminaten mit einer Epoxid-Harz Matrix traten beide Versagensarten zusammen auf (abgekürzt: Mix).

Wie die in Tabelle 1 verwendeten Symbole gibt auch die in Abb. 6 dargestellte Trendlinie eine Orientierung zur Beurteilung des Schälverhaltens bzw. der Verbundqualität. Aus den Versuchsdaten ist zu erkennen, dass zum Beispiel das textile Flächengewicht oder eine Bewitterung durch reine UV-Bestrahlung nur einen geringen Einfluss auf die Schälkraft und die Dauerhaftigkeit der Probekörper ausüben.

Die Prüfung von unbewitterten Referenzproben mit Laminaten aus Naturfasern führte zu hohen Schälkräften. Dagegen konnten mit Laminaten aus hochfesten Kohle- oder Aramid-Geweben nur durchschnittliche Schälkräfte erzielt werden.

Schälversuche an unbewitterten Referenzproben, die mit dem Vakuumverfahren hergestellt wurden, zeigten im Vergleich zu Proben, welche mit dem Handlaminierverfahren hergestellt wurden, keine Verbesserung der Haftfestigkeit. Das Vakuumverfahren bewirkt in erster Linie einen höheren Faser-Volumen Gehalt des Laminates und weniger eine bessere Verbundqualität zwischen Holz und Laminat.

Nach ca. 3,5 Jahren wurde ein Teil der Proben aus der Freibewitterung im Schälversuch geprüft und ein unterschiedlicher Einfluss der Witterung auf die Haftfestigkeit der Laminate beobachtet. Laminate aus Kohle- und Aramid-Gewebe zeigten eine vergleichsweise geringe Abnahme der Schälkraft. Anders verhalten sich Laminate aus Natur- und Glasfasern. Diese Faserarten sind in Kombination mit einer Klebstoffmatrix aus Epoxid- oder Polyesterharz sehr witterungsanfällig und zeigten schon nach ca. 1,5 Jahren deutlich sichtbare Alterungserscheinungen. Das Laminat dieser Versuchskörper, insbesondere von transparenten Glasfaserlaminaten, löste sich stellenweise bereits selbständig vom Holz. Unabhängig vom verwendeten Textil zeigten Laminate aus Polyurethan hohe Haftfestigkeiten.

Grundsätzlich konnte nach 3 Jahren Freibewitterung nach in Augenscheinnahme bei allen Laminaten eine deutliche Änderung des Erscheinungsbildes festgestellt werden, wie auch die Probenfotos in Abb. 4 belegen. Neben Farbveränderungen konnte Erosion an der Laminatoberfläche beobachtet werden, so dass das Textil stellenweise direkt der Witterung ausgesetzt war. Feuchteaufnahme über die unbehandelten Oberflächen der

Probekörper führte neben Verfärbungen auch zum Quellen des Holzes. Aufgrund der einseitigen Beschichtung wölbte sich das Holz und der Holz-Textilverbund wurde neben den Witterungsfaktoren zusätzlich mechanisch beansprucht. Um einer Wasseraufnahme an den Stirn- und Rückseiten vorzubeugen, erhielten Proben nachfolgender Versuchsserien neben der textilen Verstärkung an der Oberfläche zusätzlich eine allseitige abschließende Beschichtung.

Dieses so genannte Topcoating ist ein Wetterschutzlack auf Epoxid- oder Polyesterbasis, welches zusätzlich mit Farbpasten eingefärbt werden kann. So zeigten weiß oder schwarz angefärbte Coatings auf einem Laminat aus UP-Harz und Glasfaser Gewebe nach 1500 Stunden Klimabeanspruchung um ein Drittel höhere Schälkräfte. Bei Epoxid-Harz Laminaten konnte kein messbarer Unterschied der Haftfestigkeit im Vergleich zu transparenten Coatings festgestellt werden

Tab. 1: Schälkraft und Versagensart textiler Bewehrungen (ohne Topcoating)

Schälkraft			Referenz				3 Jahre Freibewitterung			UV=500 h Bestrahlung			UV=1000 h Bestrahlung		
Faser	Flächengewicht	[g/m²]	EP	UP	UP-HV	PUR	EP	UP-HV	PUR	EP	UP-HV	PUR	EP	UP-HV	PUR
Flachs	Gewebe	320	++	--	++	++	-	--		++	++			++	
Glas	Gewebe	300	+	--	o	++	stark verwittert		+	+	o	++	o	o	++
Kohle	Gewebe	245	-	--	o	+	--	-	++	o	o	o	-	-	-
Aramid	Gewebe	170	o	-	+	+	+	+	o	++	+	-	+	o	-
Hybrid	Gewebe	205	o	--	+	++	-	-	+	o	o	o	o	o	

Symbolik für Schälkraft: -- : 0 bis 3 N/cm; - : 3 bis 6 N/cm; o : 6 bis 9 N/cm; + : 9 bis 12 N/cm; ++ : > 12 N/cm

Versagensart			Referenz				3 Jahre Freibewitterung			UV=500 h Bestrahlung			UV=1000 h Bestrahlung		
Faser	Flächengewicht	[g/m²]	EP	UP	UP-HV	PUR	EP	UP-HV	PUR	EP	UP-HV	PUR	EP	UP-HV	PUR
Flachs	Gewebe	320	LaH	LaT	Mix	LaH	Mix	LaT		Mix	LaH			Mix	
Glas	Gewebe	300	Mix	LaT	Mix	Mix	stark verwittert		LaH	Mix	LaH	LaH	Mix	LaH	LaH
Kohle	Gewebe	245	Mix	Mix	LaH	LaH	LaT	LaH	LaH	Mix	LaH	LaH	LaT	LaH	LaH
Aramid	Gewebe	170	LaH	Mix	LaH	LaH	LaH	LaH	LaH	LaH	LaH	LaH	LaH	LaH	LaH
Hybrid	Gewebe	205	LaT	LaT	Mix	LaH	LaT	Mix	LaH	LaT	LaH	LaH	Mix	Mix	

Symbolik für Versagensart: **LaT**: Leim haftet auf Textil; **LaH**: Leim haftet auf Holz; **Mix**: Leim haftet auf Textil und Holz

7 Schälproben aus Global-UV-Testgerät

Die UV-Strahlung übt eine physikalische Wirkung auf die polymere Matrix aus, was unter anderem ein Nachhärten und eine damit verbundene höhere Sprödigkeit der Harzmatrix zur Folge hat.

Dies belegen auch Versuche an Laminaten, welche 24 Stunden bei 70 °C in der Temperaturkammer nachbehandelt wurden.

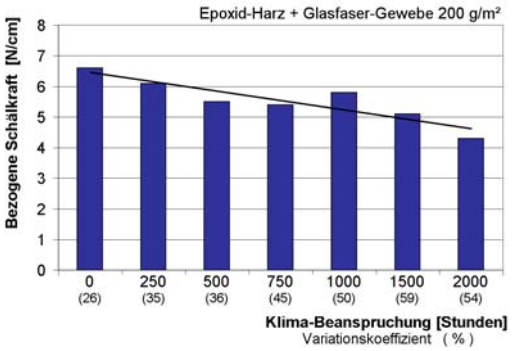


Abb. 6: Schälkraft nach 0 bis 2000 Stunden Klima-Beanspruchung

Diese Proben zeigten im Vergleich zu den Referenzproben eine Abnahme der Schälkraft nach intensiver UV-Bestrahlung. Bei Proben ohne Temperung konnte über den untersuchten Zeitraum von 1000 h kein systematischer Einfluss auf die Schälkraft erkannt werden.

An allen mit UV-Strahlung beanspruchten Probekörpern wurden schon nach kurzer Expositionszeit äußerliche Veränderungen wie Eintrübung der Matrix oder Dunkelfärbung angrenzender Holzschichten beobachtet.

8 Schlussfolgerungen und Ausblick

Für zahlreiche Verbundarten und Bewitterungsbeanspruchungen wurden Schälversuche durchgeführt. Die Interpretation der Ergebnisse erweist sich angesichts der natürlichen Streuungen und der mit anhaltender Bewitterung ebenfalls zunehmenden Variationskoeffizienten (Abb. 6) als schwierig, so dass das umfangreiche und weiterhin wachsende Datenmaterial mit Hilfe statistischer Methoden ausgewertet werden muss.

Nach einer künstlichen Bewitterung durch reine UV-Bestrahlung konnte kein eindeutiger Einfluss auf das Verbundverhalten abgeleitet werden. Die Versuche aus einer Kombination der UV-Strahlung mit künstlicher Beregnung und hoher Luftfeuchte zeigten dagegen bereits nach kurzer Beanspruchungsdauer einen schädigenden Einfluss auf den Holz-Textil-Verbund.

Schälproben die im Vakuumverfahren hergestellt wurden, befinden sich aktuell noch in der Freibewitterung. Eine Beurteilung des Bewitterungsverhaltens und damit der Dauerhaftigkeit dieses im Leichtbau bewehrten Herstellungsverfahrens steht dadurch noch aus.

Unter Berücksichtigung der zahlreichen Materialien ermöglicht das umfangreiche Versuchsprogramm die Auswirkungen der Witterungsfaktoren auf den Holz-Textilverbund detailliert zu erfassen. Die gewonnenen Versuchsdaten bilden zugleich eine gute Grundlage für die Verifikation nummersicher Simulationen und können damit zukünftig langwierige Versuche zur Dauerhaftigkeit vereinfachen.

Quellen

[1] Haller, P; Birk, T.; Putzger, R.: Physikalische und mechanische Untersuchungen an textilbewehrtem Holz und Holzbauteilen. Technische Universität Dresden: Eigenverlag, 2002 – Arbeitsbericht des SFB 528, S. 283-322

[2] Creemers, J.; de Meijer, M.; Zimmermann, T.; Sell, J.: Influence of Climatic Factors on the Weathering of Coated Wood. In: Holz als Roh- und Werkstoff. 60 (2002), Nr. 6, S. 411-420

9.2 Verbundkonstruktionen, Materialkombinationen
Holz-Beton-Verbund

Leander Bathon, Oliver Bletz

1 Allgemeines

Die Anzahl an Bauwerken, bei denen in den letzten Jahren Holz-Beton-Verbundkonstruktionen zum Einsatz gekommen sind, ist rapide gestiegen. Anwendungsbeispiele finden sich vor allem bei der Sanierung von Holzdecken sowie beim Neubau von Geschossdecken, Flachdächern, Massivdächern, Wänden oder Brücken. Für einige Verbindungsmittel liegen allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen vor. Zudem existieren vielfältige wissenschaftliche Forschungserkenntnisse.

2 Technische Prinzipien

Bei der Holz-Beton-Verbundbauweise wird ein Holzquerschnitt mit einer flächigen Betonschicht zu einem Verbundquerschnitt verbunden. Holzseitig liegt dabei eine ausgesprochene Materialvielfalt vor. In Abhängigkeit der Planungsvorgaben können Querschnitte aus KVH, Vollholz, Duobalken, Triobalken, Brettschichtholz, Brettsperrholz, Brettstapel oder Furnierschichtholz eingesetzt werden. Als Verbindungsmittel werden z.B. verwendet:

- aus dem Holzbau bekannte Verbindungsmittel wie Schrauben, Bolzen, Nagelplatten oder eingeklebte Gewindestangen,
- Spezialbauteile aus Stahl wie auf Stahlplatten aufgeschweißte Kopfbolzendübel (System Tecnaria), massive Flacheisen (Flachstahlschlösser) oder eingeklebte Streckmetalle (HBV-Schubverbinder),
- Kerven, Einschnitte oder Versätze im Holzquerschnitt.

Die Systemkennwerte für die Schubtragfähigkeit und den Verschiebungsmodul von Verbindungssystemen (als Basis für statische Berechnungen) müssen im Vorfeld durch Versuche ermittelt werden. Bei Verbindungssystemen mit vorliegender allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung sind diese im Rahmen von Zulassungsversuchen bereits ermittelt worden und in den Zulassungen hinterlegt.

Tab. 1: Verbindungssysteme mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung

Z.-Nummer	Verbindungssystem
Z-9.1-331	EW-Holz-Beton-Verbundelement
Z-9.1-342	SFS Verbundschraube
Z-9.1-445	Timco II Verbundschraube
Z-9.1-473	Brettstapel-Beton-Verbunddecke mit Flachstahlschlössern
Z-9.1-474	Dennert Holz-Beton-Verbundelement
Z-9.1-557	HBV-System mit eingeklebtem HBV-Schubverbinder
Z-9.1-603	TCC Schrauben
Z-9.1-648	Würth ASSY VG plus Schraube

Weiterhin werden in den allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen die Anwendbarkeiten der einzelnen Verbindungssysteme geregelt (z.B. Bauteile, Holzarten, Betongüten, etc). Tabelle 1 nennt die in Deutschland bauaufsichtlich zugelassenen Verbindungssysteme im Holz-Beton-Verbundbau.

Sofern keine Kerven oder Versätze als Verbindungsmittel eingesetzt werden, wird betonseitig der aus dem Holz herausragende Teil der eingesetzten Verbindungsmittel im gegossenen Frischbeton verankert. Ein Beton, der mindestens der Druckfestigkeitsklasse C20/25 entsprechen muss, darf eingesetzt werden. Eine Risse verteilende Mattenbewehrung sowie ggf. zusätzliche Bewehrungsquerschnitte (zur Aufnahme von Zugspannungen) werden in der Betonplatte angeordnet. Die Dicke des Betonquerschnitts beträgt in Abhängigkeit der äußeren Randbedingungen (Lasten, Stützweite, Schallschutzanforderungen, Deckensteifigkeit, Schwingungsverhalten) in der Regel zwischen 6 cm und 20 cm. Zwischen Holz und Beton wird zum Schutz des Holzes in der Regel ein Feuchtigkeitsschutz (z.B. Folie, Pappe, Imprägnierung, Papier) angeordnet. Auf eine ausreichende Überlappung und Verbindung (z.B.

Kleben, Schweißen) der einzelnen Bahnen ist zu achten.

Aus statischer Sicht bewirkt der Verbund der beiden Teilquerschnitte Holz und Beton eine Aufteilung der äußeren Beanspruchungen auf beide Querschnitte. Bei biegebeanspruchten Bauteilen übernehmen in der Regel die Holzquerschnitte die auftretenden Zugspannungen, während der Beton in der Druckzone angeordnet ist. Die zwischen den Teilquerschnitten angeordneten Verbindungsmittel stellen zum einen die Verbindung der Teilquerschnitte her, zum anderen übertragen sie die auftretenden Schubkräfte zwischen Holz und Beton.

3 Holz-Beton-Verbund aus der Sicht der Forschung

Die Holz-Beton-Verbundbauweise kann inzwischen auf eine recht beachtliche Geschichte zurückblicken. Die ersten Untersuchungen, die Werkstoffe Holz und Beton in einem Verbundbauteil miteinander zu verbinden, sind in den 1920er und 1930er Jahren ausgeführt worden (Patentanmeldung durch O. Schaub). Den Durchbruch der Holz-Beton-Verbundbauweise bewirkte dieses Patent jedoch nicht. Stattdessen geriet die Holz-Beton-Verbundbauweise in den folgenden Jahren weitgehend in Vergessenheit. Erst seit den 1980er Jahren wird die Holz-Beton-Verbundbauweise wieder zunehmend erforscht. Forschungsschwerpunkte waren und sind dabei u.a.:

- Untersuchung und Entwicklung geeigneter Verbindungsmittel zwischen Holz und Beton. Zusammenstellungen finden sich z.B. in [1] und [2] .
- Ermittlung der Ermüdungsfestigkeit der Verbindungsmittel für die Anwendung im Brückenbau.
- Verwendung spezieller Betone (z.B. Stahlfaserbeton, Leichtbeton, ultrahochfester Beton oder selbstverdichtender Beton). Zudem liegen Untersuchungen mit speziellen Deckschichten vor, wie z.B. mit Calciumsulfatestrich oder mit Polymerbeton.
- Untersuchung des Langzeittragverhaltens von Holz-Beton-Verbundkonstruktionen unter Berücksichtigung des unterschiedlichen Kriech- und Schwindverhaltens von Holz und Beton.
- Herleitung und Evaluierung von Berechnungs- und Modellierungsansätzen (γ-Verfahren nach DIN 1052:2008, analytische Lösung über Differentialgleichungen, Differenzenverfahren, Schubanalogie nach DIN 1052:2008, Stabwerksmodellierungen, numerische Modellierungen nach der Finite Elemente Methode)
- Ermittlung der bauphysikalischen Eigenschaften (Brandverhalten, Schallschutz, Wärmeschutz, Dampfdiffusion, Schwingungsverhalten, Verlauf der Ausgleichsfeuchte innerhalb des Holzquerschnitts)
- Entwicklung von Energie- und Strom erzeugenden Holz-Beton-Verbundbauteilen durch Nutzung der Solarthermie und der Photovoltaik.

Wie deutlich wird, sind mit der Zeit vielfältige Aspekte im Bereich der Holz-Beton-Verbundforschung thematisiert worden. In der Summe führten diese Forschungsaktivitäten zu einem Wissensstand, der es heute ermöglicht, die Holz-Beton-Verbundbauweise guten Gewissens in der Baupraxis einzusetzen. Dennoch besteht in einigen Themengebieten noch Forschungsbedarf für die Zukunft.

4 Anwendungsgebiete

4.1 Ertüchtigung von Holzdecken

In den letzten Jahren wurden für die Ertüchtigung von bestehenden Holzdecken innovative Verfahren und Systeme entwickelt, die inzwischen konkurrenzfähige Alternativen für die gängigen Standardverfahren darstellen. Eines dieser Verfahren ist der Holz-Beton-Verbund. Dabei wird auf das bestehende Holztragwerk eine Betonschicht aufgebracht und über speziell einge-

brachte Verbindungsmittel der Verbund zwischen diesen beiden Werkstoffen hergestellt.

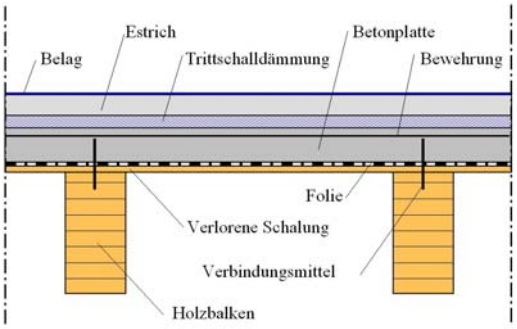


Abb. 1: Holz-Beton-Verbund zur Ertüchtigung von Holzbalkendecken

Durch die Herstellung des Verbundes zwischen den Werkstoffen Holz und Beton wirkt der Beton nicht nur als das Tragwerk beanspruchende Auflast – wie es z.B. bei Sanierungen in Trockenbauweise üblich ist – sondern bewirkt eine Erhöhung der Tragfähig- und Gebrauchstauglichkeit der Decke, die im wesentlichen vom Wirkungsgrad des eingesetzten Verbindungsmittels abhängig ist. Vergleichsberechnungen zeigen, dass bei einer Holz-Beton-Verbunddecke trotz des höheren Deckeneigengewichts (durch die Einbringung der Betonschicht) im Vergleich zur ursprünglichen Holzdecke eine bis zu 400% erhöhte Tragfähigkeit vorliegt. Gleichzeitig wird die Steifigkeit der Deckenkonstruktion erhöht, was zu geringeren Deckendurchbiegungen und reduzierter Schwingungsanfälligkeit führt. Durch die Einbringung zusätzlicher Masse in die Deckenkonstruktion wird zudem der Schallschutz erhöht. Die durch die Betonplatte kreierte Deckenscheibe sorgt für eine zusätzliche Aussteifung des Gebäudes.

4.2 Neubau von Holz-Beton-Verbunddecken

Im Bereich des Deckenneubaus haben Holz-Beton-Verbunddecken die Palette an Deckenvarianten in Holzbauweise erweitert. Holz-Beton-Verbunddecken vereinigen grundsätzlich die positiven Eigenschaften der massiven Stahlbetondecken mit den Vorteilen von reinen Holzdecken. Folgende Eigenschaften und Charakteristika besitzen Holz-Beton-Verbunddecken im Allgemeinen:

- Deckenelemente mit sehr hohem Vorfertigungsgrad möglich
- kurze Bauzeiten, da Rohbau der Decke = Ausbau der Decke
- freie Raumgestaltung durch freie Deckenspannweiten bis 15 m
- wirtschaftlichere Systemansätze im Vergleich zu Deckensystemen aus Stahlbeton oder reinen Holzdecken bei vergleichbarem Ausführungsniveau
- Vielseitigkeit bei statischen Systemansätzen (Einfeldsysteme, Mehrfeldsysteme, Kragarmsysteme)
- Deckenansichten mit natürlicher Ästhetik und Gestaltungsvielfalt
- hervorragende Bauphysik der Decke in Bezug auf Schwingungsverhalten, Brandschutz, Rauchdichtigkeit, Luftschall- und Trittschallschutz
- hohe Systemsteifigkeit und -festigkeit durch integrierten Beton
- aussteifende Wirkung durch Betonplatte (Scheibenwirkung)
- hohe Biegesteifigkeit mit nur geringen Deckenverformungen
- geringeres Eigengewicht im Vergleich zu massiven Stahlbetondecken
- optimales Ausnutzen der spezifischen Werkstoffeigenschaften (Holz: Zugkräfte, Beton: Druckkräfte)
- Sicherheit im Bruchzustand durch duktile Verbindungsmittel

Drei grundsätzliche Ausführungsvarianten für Neubaudecken in Holz-Beton-Verbundbauweise sind denkbar (in Bezug auf den Vorfertigungsgrad).

- Variante 1: Vorgefertigte Holzelemente in Verbindung mit auf der Baustelle aufgebrachtem Ortbeton
- Variante 2: Vorgefertigte Holzelemente in Verbindung mit im Werk aufgebrachter Betonschicht
- Variante 3: Vorgefertigte Holzelemente in Verbindung mit vorgefertigten Stahlbetonelementen

Abb. 2: HBV-Fertigteil als Deckenelement

4.3 Neubau von Wänden und Dächern in Holz-Beton-Verbundbauweise

Neben statischen und konstruktiven Anforderungen infolge der zu überbrückenden Spannweite und des gewählten Tragwerks werden an diese Bauteile insbesondere funktionelle und bauphysikalische Anforderungen gestellt. Die Eigenschaften, die Wände und Dächer in Holz-Beton-Verbundbauweise aufweisen müssen, um den auftretenden Beanspruchungen entgegenzuwirken, lassen sich i.A. unter den Schlagwörtern Regensperre, Wind- und Luftdichtigkeit, Wärme-, Kälte- und Schallschutz, Wärmespeicherkapazität und Raumakustik zusammenfassen.

Abb. 3: HBV-Massivdach

Wand- und Dachkonstruktionen in Holz-Beton-Verbundbauweise sind in der Regel voll- oder teilvorgefertigt und können auf der Baustelle schnell und leicht verlegt werden. Im Fall der Vollvorfertigung von Dachelementen bedarf es zur Ausbildung von Dachscheiben einer Kopplung der einzelnen Dachelemente. Im Fall der Teilvorfertigung von Dachelementen, bei der nur die Holzelemente vorproduziert werden und die Ortbetonschicht auf der Baustelle aufgebracht wird, übernimmt die gegossene Betonplatte bereits die Funktion der Dachscheibe. Folgende statische, konstruktive und bauphysikalische Aspekte liegen bei Wänden und Dächern in Holz-Beton-Verbundbauweise vor:

- Für Wände in Holz-Beton-Verbundbauweise mit der innen liegenden Betonscheibe und den außen angeordneten Holzrippen können grundsätzlich die im Holzbau bewährten Dämmsysteme (Dämmstoffplatten, Einblasdämmstoffe) verwendet werden.
- Durch die Möglichkeit der direkten Auflagerung von HBV-Dächern auf Stahlbeton- oder Mauerwerkswänden über die oberseitige Betonplatte lässt sich auf einfache Art und Weise die geforderte Wind- und Luftdichtigkeit der Gebäudehülle sicherstellen.
- Durch Verwendung von Stahlbeton als Teil der Tragstruktur wird die Masse der Konstruktion

erhöht und somit der Luftschallschutz verbessert.
- Die schwere Stahlbetonplatte besitzt ein großes Wärmespeichervermögen. Sie wirkt sich regulierend auf den Wärmehaushalt in angrenzenden Räumen aus (sommerlicher Wärmeschutz und winterlicher Kälteschutz).
- Herkömmliche aus dem Massivbau und dem Holzbau bewährte Dachaufbauten und Abdichtungssysteme für Dächer stellen einen ausreichenden Wärme- und Regenschutz her.
- Spezielle Dachaufbauten mit unterseitig angeordneten Akustikelementen bewirken eine gute Raumakustik.
- Durch bauteilintegrierte Solarthermie- und Photovoltaiksysteme besteht die Möglichkeit zur Gewinnung von Energie- und Strom.

Abb. 4: Modell eines HBV-Daches mit integrierter Solarthermie und Photovoltaik

4.4 Neubau von Holz-Beton-Verbundbrücken

Bei Brückenkonstruktionen werden die gestalterischen Vorzüge des Holzbaus mit den aus dem Holz-Beton-Verbundbau resultierenden Vorteilen bezüglich der Tragfähigkeit, der Gebrauchstauglichkeit und des Holzschutzkonzeptes kombiniert. Bei Holz-Beton-Verbundbrücken werden von der Betonplatte im Allgemeinen mehrere Funktionen gleichzeitig übernommen. Die oben liegende Betonplatte wird als Fahrbahn genutzt. Durch die Einbindung in das Verbundtragwerk – über die schubsteife Verbindung mit dem Holz – wird sie zum Lastabtrag herangezogen. Eine Querlastverteilung ist innerhalb der Betonplatte leicht herstellbar. Durch die seitliche Auskragung schützt die Betonplatte die Holzkonstruktion vor direkter Bewitterung. Die eingesetzten Holzquerschnitte übernehmen ihrerseits im Wesentlichen Funktionen hinsichtlich der Tragfähigkeit, der Ästhetik und der Natürlichkeit. Durch die Anordnung in der Zugzone übernimmt der Holzquerschnitt hierbei einen wesentlichen Anteil der auftretenden Zugspannungen, wobei Bewehrungszulagen in der Betonplatte reduziert werden können. Als Ganzes verringern sich durch den Hybridansatz auftretende Verformungen, die Schwingungsanfälligkeit sowie die Konstruktionshöhe der Brücke. Für Holz-Beton-Verbundbrücken liegen aus der Vergangenheit einige eindrucksvolle Ausführungsbeispiele vor.

Abb. 5: Unidobrücke bei Wien

5 Fazit

Die seit den 1980er Jahren an verschiedenen europäischen Forschungseinrichtungen intensiv erforschte Holz-Beton-Verbundbauweise hat den Sprung zur etablierten Bauweise geschafft. Für einige Verbindungssysteme liegen seit geraumer Zeit allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen vor. Die Vorteile, die durch Holz-Beton-Verbundkonstruktionen erzielt werden können, sind vielfältig; sie betreffen die Bereiche Tragfähigkeit und Ge-

brauchstauglichkeit in gleichem Maße wie die Aspekte der Bauphysik (Schallschutz, Schwingungsverhalten, Brandschutz). Die Bauweise wird erfolgreich bei Decken-, Wand, und Dachelementen im Hochbau sowie im Brückenbau eingesetzt. Sie gehört zum Stand der Technik.

Literatur

[1] Cecotti, A. (1995): „Holz-Beton-Verbundkonstruktionen", in: Informationsdienst Holz, Holzbauwerke nach Eurocode 5, Bauteile, Konstruktionen, Details, STEP 2, E13, Düsseldorf, Fachverlag Holz der Arge Holz

[2] König, Holschemacher, Dehn (2004): „Holz-Beton-Verbund, Innovationen im Bauwesen, Beiträge aus Praxis und Wissenschaft", Bauwerk Verlag

Zahlreiche weitere Literaturquellen sind z.B. zu finden unter www.bauchfachinformation.de Stichwort „Holz-Beton-Verbund"

Linkliste

www.holzbetonverbund.info
www.dennert.de
www.groeber.de
www.hbv-systeme.de
www.lignotrend.de
www.sfslocher.biz
www.tecnaria.com
www.timco.de
www.tccintegral.com
www.würth.de

9.2 Kleber, Bindemittel
Holz-Beton-Platten mit Klebeverbund

Maurice Brunner, Marco Schnüriger, Michael Roemer

In einem Projekt an der Berner Fachhochschule wurden Holz und Beton erfolgreich kraftschlüssig miteinander verklebt. Damit erhalten die klassischen mechanischen Verbindungen Konkurrenz von einer Methode, welche die Holzfaser nicht durchtrennt und ohne Schlupf die Steifigkeit verbessert. In der ersten Projektphase wurde die Herstellungstechnik des "Nass-in-Nass-Verfahrens" untersucht und optimiert. Die "Beton-Einbauzeit" - respektive die Zeitspanne zwischen dem Mischen des Klebstoffes und dem Gießen des Betons - hat sich als entscheidender Parameter herausgestellt. In der zweiten Projektphase wurden mehrere Holz-Beton-Platten mit Klebeverbund hergestellt und auf Biegung geprüft.

1 Einführung

In Europa gewinnen Holz-Beton-Verbunddecken generell an Beliebtheit, weil sie gegenüber konventionellen Holzdecken den Schutz gegen Brand und Schall erheblich verbessern und Schwingungsprobleme entschärfen. Statisch übernimmt der Beton die Biegedruckkräfte, während das Holz auf Biegezug beansprucht wird. Bisher werden für die Erreichung der Verbundwirkung zwischen Holz und Beton mechanische Verbindungsmittel – Schubverbinder, Schrauben, Bolzen oder Betonkeile in Holzvertiefungen (Kerven) - eingesetzt. Eine Einleitung der Schubkräfte kann jedoch auch durch den Einsatz von Klebemitteln erreicht werden. Dadurch werden die Schubkräfte gleichmässig über die ganze Fläche verteilt und Kraftkonzentrationen um die mechanischen Verbindungsmittel vermieden. Der schlupffreie Verbund führt zu einer höheren Biegesteifigkeit und somit zu einer Reduktion der Durchbiegung. Zudem ist die Klebefuge wasserdicht.

Erste Marktanalysen für den Holz-Beton-Klebeverbund sind günstig: durch das Wegfallen verschiedener Arbeitsgänge können die Kosten gegenüber der Anwendung mechanischer Verbindungsmittel gesenkt werden.

Grundsätzlich sind verschiedene Produkte wie z.B. Deckensysteme, Brückenkonstruktionen oder Wandelemente möglich. An der Berner Fachhochschule, Architektur, Holz und Bau (BFH-AHB) wurde eine Machbarkeitsstudie durchgeführt. Der flüssige Beton wurde auf den noch nassen Klebstoff gegossen und die Holz-Beton-Platten mit Klebeverbund wurden auf Biegung geprüft. Die meisten Prüfkörper versagten bei den erwarteten Belastungen, allerdings versagte bei einigen Prüfkörpern der Verbund vorzeitig. Die Prüfungen wurden im Rahmen der COST-Aktion C12 in Zusammenarbeit mit Forschungs- und Industriepartnern durchgeführt (EMPA, Schilliger AG, Küng AG, SIKA AG).

2 Experimentelle Untersuchung an Holz-Beton-Platten mit Klebeverbund

2.1 Projektplan

Das Projekt wurde in 4 Hauptphasen unterteilt:

I. Abklärung der optimalen Herstellungsbedingungen, speziell hinsichtlich vorzeitigen Verbundversagens. Verschiedene Parameter wurden bei der Herstellung von kleinen Holz-Beton-Prüfkörpern berücksichtigt, die visuell und experimentell analysiert wurden.
II. Die in der 1. Projektphase optimierten Parameter wurden verwendet, um grosse Holz-Beton-Platten mit Klebeverbund herzustellen und zu prüfen. Wichtig war dabei die Abklärung, ob die Gefahr des vorzeitigen Verbundversagens tatsächlich abgewendet wurde.
III. Untersuchung der Tragfähigkeit bei reduzierter Klebefläche, Anwendung als Plattenbalken (Abbildung 1) und als nicht vollständig verklebte HBV-Platte mit Leitungsöffnungen im Beton (Abbildung 2).
IV. Abklärung des Einflusses der Klebefuge auf das Kriechverhalten.

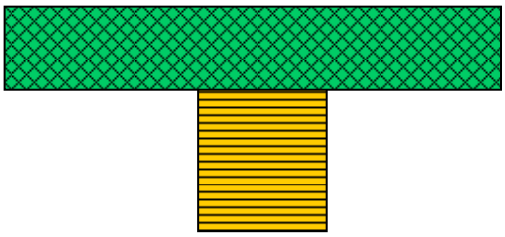


Abb. 1: Plattenbalken

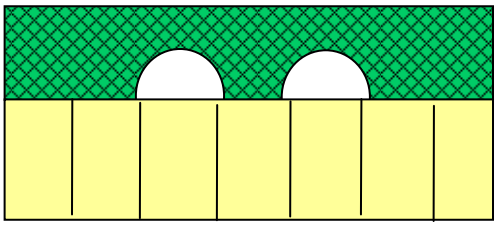


Abb. 2: Plattenelement mit Öffnungen im Beton

2.2 Optimierung der Herstellungsparameter

Zunächst wurden verschiedene Parameter evaluiert, die einen Einfluss auf das mögliche Verdrängen des Klebstoffes haben könnten. Die Prüfkörper wurden unter Berücksichtigung folgender Parameter hergestellt.

– Nicht veränderte Parameter:
  1. Fallhöhe des Frischbetons: 50 cm
  2. Klebstoffmenge: 925 g/m2
  3. Holz: Dreischichtplatte 30mm, C24, vom gleichen Hersteller
– Variablen:
  1. Beton: Normalbeton C25/30 und SCC
  2. (Selbstverdichtender Beton)
  3. Betondicken: 8 cm, 16 cm, 24 cm
  4. Zeitspanne zwischen Klebstoffapplikation und Betongießen: 15 min und 90 min
  5. Klebstoff: Zweikomponenten Epoxid der
  6. SIKA AG.

Abbildung 3 zeigt die Herstellung: Die Stahlschalung wurde auf die Holzplatte fixiert. Für die einfachere Erkennung wurde der sonst farblose Klebstoff rot eingefärbt. Nach der Applikation des Klebstoffes auf die Holzoberfläche wurde – nach Abwarten der Einbauzeit – der Beton gegossen. Nach dem Härten des Betons wurden die Prüfkörper in kleinere Teile für die verschiedenen Untersuchungen gesägt (Abb. 4 und 5).

Abb. 3: Herstellung der Prüfkörper, um die Herstellungsparameter zu optimieren.

Abb. 4: Erhärtete Prüfkörper

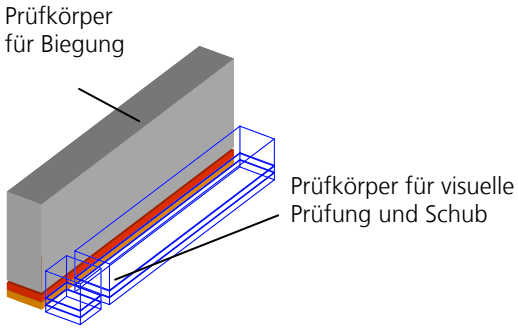


Abb. 5: Aufteilen der Prüfköper

Die Prüfkörper wurden sorgfältig visuell untersucht. Die wichtigsten Befunde waren:

– Der Klebstoff wurde an den Eingießstellen des Betons markant verdrängt.

– Sowohl bei Normalbeton C25/30 als auch bei SCC war die Verdrängung des Klebstoffes bei einer Einbauzeit von 15 min markant grösser, als bei 90 min (Abb. 6).

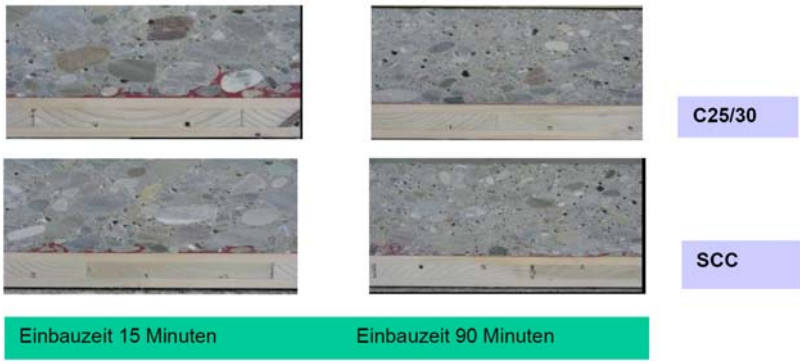


Abb. 6: Bei längerer Einbauzeit wurde der Klebstoff weniger verdrängt!

Die kleinen Prüfkörper wurden auf Biegung und Schub geprüft. Während die Biegeversuche wegen der grossen Streuung der Resultate keine klaren Aussagen ermöglichten, zeigten die Schubversuche (Abb. 7), dass mit Normalbeton die höhere Schubfestigkeit erreicht wird. Die visuelle Untersuchung der gebrochenen Prüfkörper zeigte, dass beim Normalbeton die Bruchlinie durch den Beton ging, während beim SCC oft die Klebefuge versagte. Möglicherweise gibt es eine chemische Reaktion zwischen dem Klebstoff und den Zusätzen des SCC. Die zwei wichtigsten Herstellungsparameter sind identifiziert worden. Erstens die Betonsorte: Mit Normalbeton wird der bessere Verbund erreicht. Zweitens ist es besser, erst 90 Minuten nach der Klebstoffapplikation den Beton zu gießen.

Abb. 7: Schubversagen der Klebefuge, lokale Verdrängung des Klebstoffes beim Betonieren

3 Grossversuche auf Biegung

Optimierte Herstellungsparameter wurden für die Herstellung aller Prüfkörper eingesetzt:

- Beton: C25/30, 90 min Wartezeit zwischen Klebstoffapplikation und Betongießen
- Holz: GL24, horizontal gelegt als Platte
- Klebstoff: Zweikomponenten SIKA- Epoxid-Klebstoff

Verschiedene Abmessungen des Betons und des Holzes wurden getestet. Bei einer Betonschicht von 80 mm wurden zwei Holzdicken von 36 mm und 120 mm verwendet. Bei einer Betonschicht von 240 mm wurden Holzdicken von 120 mm und 350 mm verwendet. Die Ergebnisse der Biegeversuche sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Die gemessenen Bruchlasten entsprachen weitgehend den Erwartungen. Bis zum Bruch konnte keine relative Verschiebung des Betons gegenüber dem Holzträger festgestellt werden, was ei-

ne starre und funktionierende Verklebung bestätigt.

4 Platten mit reduzierter Klebefläche

Durch die im Verhältnis zum Holz reduzierte Betonbreite wird in Längsrichtung Platz für die Leitungsführung geschaffen. Mit den zusätzlichen Öffnungen quer zur Längsrichtung, Serie PQ, können somit Leitungen in beide Richtungen geführt werden. Die Elemente der Serie PL erlauben die Führung von mehreren Leitungen in Längsrichtung (Abb. 8).

Abb. 8: Prüfkörper vor den Betonierarbeiten. Links die Prüfkörper der Serie PQ mit quer verlaufenden Kanälen; rechts die Prüfkörper der Serie PL mit längs verlaufenden Kanälen

Tabelle 1: Ergebnisse der Biegeversuche der Platten mit vollflächiger Verklebung

Serie	Theoretisches Bruchmoment kNm	Experimentelles Bruchmoment kNm	Bruchursache
Beton: 80mm Holz: 120mm	108.0	103.0 (-6.4%)	Beton auf Druck
Beton: 80mm Holz: 36mm	30.0	31.9 (+6.3%)	Holz auf Zug
Beton: 240mm Holz: 350mm	525.5	444.8 (-15.3%)	Beton auf Schub
Beton: 240mm Holz: 120mm	183.0	201.7 (+9.8%)	Beton auf Schub

Die Ergebnisse der Biegeversuche sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Die gemessenen Bruchlasten der Serien PL und PQ entsprachen den erwarteten Rechnungswerten.

Tab. 2: Ergebnisse der Biegeversuche der Platten mit reduzierter Klebefläche

Serie	Theoretisches Bruchmoment kNm	Experimentelles Bruchmoment kNm	Bruchursache
PL (Leitungen längs) Beton: 80mm, Holz: 120mm	81.0	80.4 (-0.7%)	Beton auf Druck
PQ (Leitungen quer) Beton: 80mm, Holz: 120mm	64.0	74.8 (+16.9%)	Beton auf Schub und Druck

Zwei Verbundbalken wurden mit Betonklötzen belastet und die Deformation über mehrere Jahre beobachtet. Die Messungen sind noch im Gang. Die Ergebnisse zeigen eine Kriechdeformation, die vergleichbar ist mit der eines konventionellen Holz-Beton-Verbundelements mit starrem Klebeverbund. Dies ist ein wichtiger Hinweis, dass die Klebefuge keine grössere Kriechdeformation aufweist.

5 Schlussfolgerungen

Die Versuchsergebnisse bestätigen das Potential des Klebeverbundes für Holz-Beton-Verbundtragelemente. In der 1. Projektphase wurden die Herstellungsparameter dahingehend optimiert, dass ein geeigneter Zweikomponeten- Epoxid-Klebstoff ausgewählt wurde und das Betongießen erst 90 min nach der Klebstoffapplikation erfolgen soll. In der 2. Projektphase wurden Großversuche mit Holz-Beton-Platten mit Klebeverbund durchgeführt. Sowohl Platten mit vollflächiger Verklebung wie auch mit ca. 50 % Verklebung wurden getestet. Die gemessenen Bruchlasten entsprachen weitgehend den berechneten Werten, und bis zum Bruch konnte keine relative Verschiebung des Betons gegenüber dem Holzträger festgestellt werden, was eine starre und funktionierende Verklebung bestätigt.

Auf Basis der beschriebenen Untersuchungen wäre im weiteren Vorgehen der Bau eines Pilotprojektes ein nächster wichtiger Schritt hin zur Praxiseinführung.

Quellen

[1] Blass H.J, Schlager M.: Trag- und Verformungsverhalten von Holz-Beton-Verbundkonstruktionen, Bauen mit Holz, Hefte 5 und 6, 1996.

[2] Brunner M., Gerber C.: Holz-Beton-Verbunddecken mit Klebeverbindung, 31. SAH-Fortbildungskurs Weinfelden, 1999.

[3] Brunner M., Schnüriger M., Römer M.: Timber-concrete-composites with an adhesive connector (wet on wet process), RILEM, Materials and Structures, 2006.

[4] Gisel Peter: Holz-Beton-Verbund-Elemente: alternative Anwendungen mit Klebesystemen, Diplomarbeit der SH-Holz, 1997.

[5] Kenel A.: Zur Berechnung von Holz-Beton-Verbundkonstruktionen, Forschungs- und Arbeitsbericht, EMPA-Dübendorf, 1999

[6] Kuhlmann U., Gerold M., Schänzlin J.: Brettstapel-Beton-Verbund - Berücksichtigung von Kriechen und Schwinden, Bauingenieur 77, 6/2000, S. 281-288

[7] Kuhlmann, U.; Gerold, M. und Schänzlin, J.: Trag- und Verformungsverhalten von Brettstapel-Beton-Verbunddecken, Bauingenieur, Band 77, Januar 2002, S. 22-34

[8] Natterer J., Hoeft M: Zum Tragverhalten von Holz-Beton-Verbundkonstruktionen, Forschungsbericht CERS Nr. 1345, IBOIS, EPFL, 1987.

9.2 Verbundkonstruktionen, Materialkombinationen
Holz-Beton-Verbund Systeme

Rainer Bahmer

1 Holz-Beton-Verbund mit eingeklebten Streckmetallen

In diesem Beitrag wird ein innovatives Holz-Beton-Verbundsystem vorgestellt, das sich aus einem Holzquerschnitt, einer Betonplatte und einem Streckmetall (HBV-Schubverbinder) zusammensetzt. Der HBV-Schubverbinder ist zur einen Hälfte in den Holzquerschnitt eingeklebt, zur anderen Hälfte in die Betonplatte einbetoniert und verbindet auf diese Weise die beiden Querschnitte. Das HBV-System mit eingeklebten Schubverbindern ist bauaufsichtlich zugelassen (Z-9.1-557), einfach herzustellen, äußerst ökonomisch und erreicht nahezu volle Verbundwirkung bei gleichzeitig duktilem Verhalten.

Das Verbundsystem setzt dort an, wo die bisherigen Verbundsysteme (Schrauben, Dübel, Aussparungen im Holz) an ihre Grenzen stoßen, denn der HBV-Schubverbinder als neueste Entwicklung im Bereich der Holz-Beton-Verbindungsmittel hebt sich grundsätzlich von der Palette punktförmiger Verbindungsmittel ab: er wird in eine über die Länge des Holzquerschnitts eingeschlitzte Nut kontinuierlich eingeklebt. Der Moderator „Stahl" kann sehr fein auf die Festigkeiten der beiden Materialien „Holz" und „Beton" abgestimmt werden. Der relativ große Schlupf, der bei den punktförmigen Verbindungsmitteln zwischen Holz und Beton auftritt, wird durch die Klebeverbindung und den kontinuierlichen Lasteintrag aufgehoben. Entsprechend liegt der Verschiebungsmodul, der die Effektivität des Verbindungsmittels beschreibt, im Vergleich zu den punktförmigen Verbindungssystemen um ein Vielfaches höher. Gemäß allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung Z.9.1-557 kann für einen HBV-Schubverbinder mit einer Streifenlänge von 100 cm ein Verschiebungsmodul K_{ser} zum Zeitpunkt t = 0 von 825 kN/mm sowie eine charakteristische Schubtragfähigkeit T_k von 160 kN angesetzt werden.

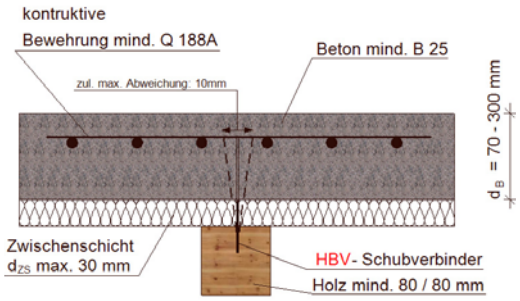


Abb. 1: Holz-Beton-Verbundsystem mit eingeklebten HBV-Schubverbindern

2 Anwendungsgebiete für die Holz-Beton-Verbundbauweise

Die Einsatzmöglichkeiten der Holz-Beton-Verbundbauweise sind im wesentlichen abhängig vom Potential des Verbindungsmittels. Je leistungsstärker die Verbundwirkung zwischen den Werkstoffen Holz und Beton ist, d.h. je starrer der Verbund hergestellt wird, desto größer ist das Einsatzgebiet. Relativ weiche Verbindungen werden vor allem in der Sanierung bestehender Balkendecken bei relativ geringen Spannweiten angewandt, während steifere Verbindungsmittel auch bei größeren Spannweiten im Geschossdeckenneubau- bzw. Fertigteilbereich Anwendung finden.

Beim Holz-Beton-Verbundsystem mit eingeklebten HBV-Schubverbindern sind grundsätzlich weitgespannte und hochbelastete Tragkonstruktionen mit Spannweiten von 15 m und mehr ausführbar. Die Beschränkung der Holz-Beton-Verbundbauweise auf einfache statische Einfeldsysteme ist aufgehoben; auch komplexere statische Systeme, wie Durchlauf- oder Kragsysteme sind mit dem HBV-System ausführbar. Weiterhin bieten sich neue Anwendungsgebiete außerhalb des Geschossdeckenbaus an, z.B. bei Wänden, Dächern oder Brücken.

3 HBV-Systemkonstruktionen in der Baupraxis

Der eingeklebte HBV-Schubverbinder als Verbindungsmittel bei Holz-Beton-Verbundlösungen wird in der Praxis in diversen Anwendungen eingesetzt. Im Folgenden werden einzelne Einsatzmöglichkeiten und Konstruktionen vorgestellt:

3.1 HBV-Sanierungssystem

Das HBV-Sanierungssystem wird bei erforderlichen Ertüchtigungen von Holzbalkendecken eingesetzt. Es bedient sich des vorhandenen Balkentragwerks; die bestehende, oftmals bauhistorisch wertvolle Bausubstanz bleibt erhalten und wird weiterhin genutzt. Die ins Holz eingeklebten HBV-Schubverbinder ermöglichen das schubsteife Verbinden der Werkstoffe Holz und Beton, wodurch die im Vergleich zur bestehenden Holzdecke bzw. zu einer herkömmlichen Ertüchtigung in Trockenbauweise deutlich verbesserten Eigenschaften in den Bereichen Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit – Reduzierung der Durchbiegungen um bis zu 70 % – realisiert werden. Durch die Holz-Beton-Verbundbauweise wird ein kompletter Abbruch der alten Holzdecken bzw. das Erstellen aufwendiger, neuer Deckenkonstruktionen aus Beton vermieden. Unter bestimmten Vorraussetzungen werden die Auflagerlasten nicht höher, die Fundamente müssen nicht verstärkt werden.

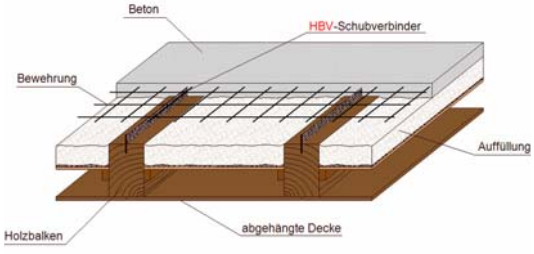


Abb. 2: HBV-Sanierungssystem

3.2 HBV-Balkendecke

Die HBV–Balkendecke wurde mit dem Ziel entwickelt, eine sichtbare Holzbalkendecke herstellen zu können, die bei gleichen statischen Kapazitäten annähernd die gleichen bauphysikalischen Eigenschaften wie eine Stahlbetondecke aufweisen kann (d.h. eine geringe Schwingungsanfälligkeit und einen guten Schallschutz). Gleichzeitig besitzt die HBV-Balkendecke im Vergleich zur Stahlbetondecke jedoch ein verringertes Eigengewicht und somit eine reduzierte Verformungsanfälligkeit.

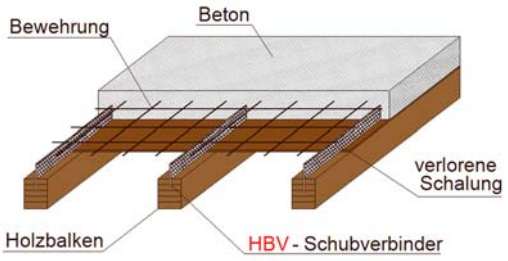


Abb. 3: HBV-Balkendecke

3.3 HBV-Rippendecke

Die HBV–Rippendecke besteht aus einer oben liegenden Betonplatte sowie unten liegenden, im Raster angeordneten Holzbalken. Die Deckenelemente werden im Werk komplett vorgefertigt und lassen sich auf der Baustelle schnell und leicht verlegen. Die Kopplung der einzelnen Elemente zum Erzielen der Scheibenwirkung geschieht über das Ausbetonieren von speziellen Vergusstaschen. Die Betonoberseite der HBV–Rippendecke ist belagsfertig. Auf das Glätten oder Bearbeiten der Oberfläche in einem weiteren Arbeitsgang kann verzichtet werden. Die Auflagerung der HBV–Rippendecke kann über den Holzbalken oder auch über die oben liegende Betonplatte erfolgen. Installationsleitungen werden zwischen den Holzrippen verlegt. Im Wandbereich sind die Holzrippen bei Auflagerung über die Betonplatte zurückgestellt, um die Installationsleitungen vorbeiführen zu können. Die HBV–Rippendecke sollte mit einer federnd abgehäng-

ten Unterdecke geschlossen werden, um Vorteile hinsichtlich des Schallschutzes (entkoppelte Ebene) nutzen zu können.

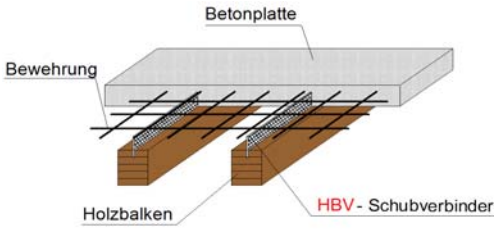


Abb. 4: HBV-Rippendecke

3.4 HBV-Kastendecke

Eine interessante Lösung für weit gespannte Deckentragwerke in Holz-Beton-Verbundbauweise stellt die HBV-Kastendecke dar. Die HBV-Kastendecke ist eine Weiterentwicklung der HBV-Balkendecke, aufgewertet durch ein an der Unterseite angebrachtes statisch wirksames Zugband. Das Bewehren und Betonieren der HBV-Kastendecke erfolgen in der Regel auf der Baustelle. Es besteht jedoch auch die Möglichkeit, die HBV-Kastendecke bereits im Werk zu betonieren und als Fertigteil auf die Baustelle zu bringen.

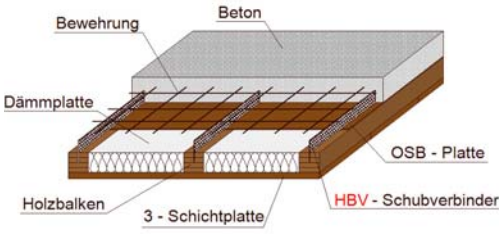


Abb. 5: HBV-Kastendecke

3.5 HBV-Plattendecke

Seit etwa fünfzehn Jahren werden Flachdecken aus Brettschichtholz oder Brettsperrholz in Gebäuden aus Holz aber auch in Massivbauweise erfolgreich eingesetzt. Bei einem direkten Vergleich zwischen reiner Massivholzdecke und Stahlbetondecke hinsichtlich Kosten und Bauphysik schneidet die Holzdecke deutlich schlechter ab. Die Wettbewerbsfähigkeit wird erst durch die Hybridbauweise erreicht.

Bei der HBV-Plattendecke werden in die flach liegenden, massiven Holzelemente aus Brettschichtholz oder Brettsperrholz nach den statischen Erfordernissen die HBV-Schubverbinder werkseitig eingeklebt. Die Feuchtigkeitssperre für den Schutz des Holzes wird ebenso im Werk aufgebracht wie eine Lasierung der Holzoberfläche. Auf der Baustelle lassen sich die auf diese Weise vorgefertigten, großformatigen Bauteile schnell verlegen. Bewehren und Betonieren der HBV–Plattendecke erfolgen auf der Baustelle.

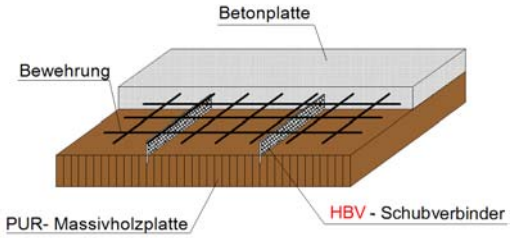


Abb. 6: HBV-Plattendecke

3.6 HBV-Akustikdecke

Als Sonderausführung kann die HBV-Akustikdecke angesehen werden. Hierbei werden die HBV-Schubverbinder in die Stege von vorgefertigten Akustikdeckenelementen eingeklebt. Wesentliche Vorteile der HBV-Akustikdecke liegen neben den bekannten Vorzügen bezüglich der Raumakustik in der freien Gestaltbarkeit der Unteransicht, wodurch auch exklusive Ansichten, z.B. in Weißtanne, ausgeführt werden können.

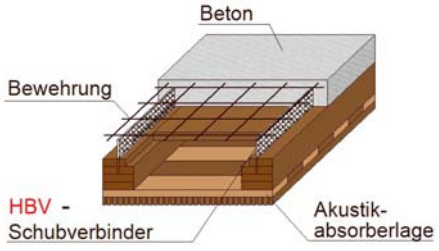


Abb. 7: HBV-Akustikdecke

3.7 Weitere Anwendungen

Neben geraden Bauteilen wurden in der Vergangenheit auch gekrümmte Bauteile in Holz-Beton-

Verbundbauweise ausgeführt. Abb. 8 zeigt exemplarisch ein Carport mit einer gekrümmten Holz-Beton-Verbunddachkonstruktion.

Abb. 8: HBV-Carport

Mit dem Holz-Beton-Verbundsystem mit eingeklebten HBV-Schubverbindern wurden auch Wand- und Brückenkonstruktionen erstellt.

Abb. 9: HBV-Wände in einer Wohnanlage in der Schweiz [Holzbau Gröber GmbH]

Die HBV-Wand und das HBV-Dach bieten bauphysikalische Vorteile: Massespeicher innen – Wärmedämmung außen, besserer Schallschutz in exponierten Lagen wie Flughäfen oder Autobahnen.

Auch für Brückenkonstruktionen jeglicher Art ist der Holz-Beton-Verbund ideal: Die Betonplatte bildet das Dach für das zu schützende Holz. Die statischen Nachweise für die Holzbauteile können somit in der Nutzungsklasse 2 geführt werden.

Abb. 10: Die Unidobrücke in Österreich

Hohe architektonische Ansprüche können mit Sonderlösungen auch bei Dächern erfüllt werden.

Abb. 11: HBV-Unterzug in einem Golfclub

4 Ausblick

Die Erfolgsgeschichte der HBV-Decken begann mit einer über 10 m frei gespannten HBV-Plattendecke in einem Bürogebäude im Jahr 2001. Für die unterschiedlichsten Anforderungen von Architekten, Unternehmen, Bauherren und Ingenieuren wurden neue Varianten entwickelt, getestet und ausgeführt. HBV-Konstruktionen wurden mehrfach auch in der Schweiz, Österreich, Luxemburg, Norwegen, Italien und den USA erstellt. Interessante Projekte sind aus dem osteuropäischen Raum zu erwarten.

(Wenn nicht anders vermerkt, alle Abbildungen TiComTec GmbH.)

9.2 Verbundkonstruktionen, Materialkombinationen
Straßenbrücken in Holz-Beton-Verbundbauweise

Antje Simon, Karl Rautenstrauch

1 Einleitung

Der Einsatz von Holz als Haupttragelement beim Bau von Straßenbrücken ist in Deutschland von untergeordneter Bedeutung. Massiv- und Stahlverbundbauweisen dominieren das Baugeschehen. Interessante Zukunftsperspektiven für den Holzbrückenbau eröffnen sich durch die Anwendung der im Hochbau entwickelten Holz-Beton-Verbundbauweise im Brückenbau.

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens [1] wurde das Trag- und Verformungsverhalten von Straßenbrücken in Holz-Beton-Verbundbauweise detailliert untersucht. Dabei standen differenzierte Parameteranalysen sowie die Entwicklung eines geeigneten Verbundelementes im Vordergrund.

Ziel des Forschungsvorhabens war es, die wissenschaftlich-technischen Grundlagen für einen innovativen, neuartigen Prototyp von Holz-Beton-Verbund-Brückenkonstruktionen zu erarbeiten. Die baupraktische Umsetzung im Brückenbau erforderte die Klärung der prinzipiellen Anwendbarkeit und der Konkurrenzfähigkeit der neuen Hybridbauweise im Vergleich zu konventionellen Beton- und Stahlverbundbrücken.

2 Aspekte der Planung und Technik

Ein Brückenüberbau in Holz-Beton-Verbundbauweise besteht aus einer Betonfahrbahnplatte, die mit den darunter angeordneten Holzhauptträgern nachgiebig verbunden ist (Abb. 1).

Die Anwendung dieser Hybridbauweise ist besonders für die Errichtung von Einfeldbrücken interessant. Im Einfeldbauwerk werden die Teilquerschnitte entsprechend ihrer positiven Festigkeitseigenschaften beansprucht, da bei diesen der Beton in der Druckzone und das Holz in der Zugzone des Verbundquerschnittes angeordnet sind. Holz-Beton-Verbundbrücken bieten im Vergleich zu reinen Holz- oder Massivbrücken wesentliche Vorteile.

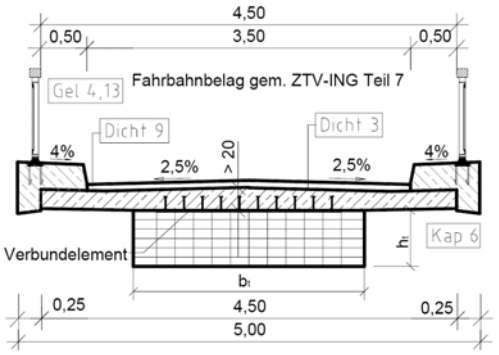


Abb. 1: Querschnitt einer Holz-Beton-Verbundbrücke (Einspurige Wirtschaftswegüberführung)

Abb. 2: Blockverleimter Brettschichtholzträger mit dem Verbundelement Dübelleiste

Neben den aus dem Hochbau bekannten Vorteilen der hohen Tragfähigkeit bei geringer Bauteilhöhe, der guten Lastquerverteilung und einfachen Scheibenausbildung zur Bauwerksstabilisierung ergeben sich für den Brückenbau zusätzliche Vorteile hinsichtlich der konstruktiven Ausbildung. Im Betonbrückenbau bewährte Anschlussdetails für Schrammborde, Geländer, Fahrbahnübergänge und die Ausführung der bituminösen Abdichtung können ohne zusätzlichen Planungsaufwand übernommen werden. Im Vergleich zu normalen Holzüberbauten bietet die Betonplatte infolge ihrer großen Steifigkeit in Holz-Beton-

Verbundbrücken zusätzlich Vorteile bei der Abtragung horizontaler Lasten aus Bremsen und Seitenstoß. Zudem stellt die Betonfahrbahnplatte einen idealen konstruktiven Holzschutz für die Brettschichtholzkonstruktion dar.

Deutliche Vorteile von Holz-Beton-Verbundstraßenbrücken liegen im geringen Eigengewicht der Hauptträger und dem hohen Vorfertigungsgrad. Bei Einsatz von Betonfertigteilen können kurze Montage- und Sperrzeiten erreicht werden, weshalb sich Holz-Beton-Verbundbrücken insbesondere für die Überführung von Wirtschaftswegen über stark frequentierte Bundesautobahnen, Bundesfernstraßen und Strecken der DB AG eignen.

Der wissenschaftlich-innovative Charakter des Forschungsprojektes bestand in der Adaption der Holz-Beton-Verbundbauweise vom Hochbau auf den Brückenbau. Im Rahmen einer Weiterentwicklung der Hybridbauweise wurden u.a. die Problematiken der Verbundfuge und des Langzeittragverhaltens detailliert untersucht.

Zur Schubübertragung in der Verbundfuge wurde das Verbundelement Dübelleiste entwickelt. Dieses Element besteht aus einem im Holz eingelassenen Flachstahlstreifen mit betonseitig aufgeschweißten Kopfbolzendübeln. Zur Kraftübertragung werden bewährte Prinzipien des Stahlverbundbaus und des Holzbaus genutzt.

In Auswertung umfangreicher Versuchsserien zum Kurzzeit-, Langzeit- und Verhalten unter dynamischer Beanspruchung sowie zusätzlich durchgeführter rechnerischer Simulationen konnte eingeschätzt werden, dass das Verbundelement Dübelleiste eine hohe Steifigkeit und Tragfähigkeit besitzt und daher für den Einsatz im Hybridbrückenbau hervorragend geeignet ist.

Anhand einer umfangreichen Parameterstudie konnte zudem nachgewiesen werden, dass Holz-Beton-Verbundbrücken eine technisch konkurrenzfähige, ökologische Alternative zu herkömmlichen Massivbrücken darstellen. Die Hybridbrücken sind tragfähiger und dauerhafter als einfache Holzdeckbrücken.

Die Ergebnisse des Forschungsprojektes wurden im Jahr 2008 mit dem Bau einer Pilotbrücke in beispielgebender Weise in der Praxis umgesetzt. In der Gemeinde Wippra im Bundesland Sachsen-Anhalt entstand mit der Birkbergbrücke über die Wipper die erste, basierend auf den Einwirkungsklassen nach DIN Fachbericht 101 für Schwerlastverkehr konzipierte, Straßenbrücke Deutschlands in Holz-Beton-Verbundbauweise (Abb.3).

Abb. 3: Birkbergbrücke Wippra

3 Ökologische Aspekte

In Holz-Beton-Verbundbrücken werden im Vergleich zu herkömmlichen Massivbrücken die wesentlichen Haupttragelemente des Brückenquerschnitts größtenteils durch den ökologischen Baustoff Holz substituiert. Im Vergleich zu den bisher international errichteten Hybridbrücken erweist sich bei denjenigen mit blockverleimten Holzhauptträgern der massive, mengenmäßig erhöhte Einsatz von Holz als ökologischer Vorteil. Diese Konstruktionsart zielt auf eine deutliche Steigerung der bisher im Verkehrsbrückenbau eingesetzten Holzmengen ab.

Am Ende der Lebensdauer der Brücke kann das Holz dem natürlichen Stoffkreislauf zugeführt werden (thermische Verwertung – gebundenes CO_2 wird wieder frei). Holz ist ein Plusenergieprodukt!

Die für das Recycling notwendige einfache Trennbarkeit der verschiedenen Materialien ist bei blockverleimten Hybridbrücken mit Dübelleisten gegeben. Der zu Beginn der Lebensdauer vorhandene adhäsive Verbund in der Kontaktfläche zwischen Holz und Beton wird im Laufe der Zeit durch die unterschiedlichen Deformationen unter variablem Klima aufgehoben. Eine die Recyclierbarkeit erschwerende Vermischung der Materialien ist nicht vorhanden.

Die Überbauplatte aus Beton, sowie die Betonkappen können als Betonrecyclingmaterial aufbereitet werden. Im Vergleich zu herkömmlichen Massivbrücken fällt dieses Material in wesentlich geringerem Umfang an, da die Konstruktion so optimiert ist, dass der Querschnittsanteil des Holzes im Gesamtquerschnitt sehr hoch, der Betonanteil jedoch auf das statisch notwendige Minimum reduziert ist.

4 Ökonomische Aspekte

Fast die Hälfte aller Brücken in Deutschland liegt im Stützweitenbereich zwischen 5 und 30 m. Die im Rahmen des Forschungsprojektes durchgeführten Analysen ergaben, dass die Errichtung von Straßenbrücken in Holz-Beton-Verbundbauweise im Stützweitenbereich zwischen 10 m und 30 m unter Berücksichtigung statisch-konstruktiver und wirtschaftlicher Aspekte sinnvoll und konkurrenzfähig ist. Mit der Entwicklung der Holz-Beton-Verbundbauweise im Straßenbrückenbau wird also einerseits der Holzeinsatz in diesem Bausektor überhaupt initiiert, zum anderen besteht ein immenses, neues Marktpotential sowohl für den Holzabsatz als auch für das Holzbaugewerbe.

Der Einsatz der großformatigen massiven Blockträger erhöht den Holzabsatz im Vergleich zu den bisher üblichen Brettschichtholzkonstruktionen erheblich. In ökonomischer Hinsicht vorteilhaft erweist sich bei dieser Hybridbauweise zudem, dass der immer teurer werdende Stahl durch einen einheimischen, in ausreichenden Mengen verfügbaren, ökologischen Baustoff substituiert wird. Wenn es gelingt, die Holz-Beton-Verbundbauweise auf dem Brückenbaumarkt als gleichwertig zu den bisher üblichen Massivbauweisen zu etablieren, besteht in dieser Bauweise ein enormes Entwicklungspotential für die einheimische Forst- und Holzwirtschaft.

Durch den idealen konstruktiven Holzschutz kann mit einer langen Lebensdauer der Holz-Beton-Verbundbrücken gerechnet werden. Australische Forschungsergebnisse beweisen, dass sich die Lebensdauer einer Holz-Beton-Verbundbrücke im Vergleich zu einer ungeschützten Holzbrücke verdoppelt bis verdreifacht.

Aktuelle Studien zeigen zudem, dass die Wartungs- und Instandhaltungskosten für geschützte Holzbrücken nicht höher sind als diejenigen für massive Brücken. Durch den bei Holz-Beton-Verbundbrücken vorhandenen hervorragenden konstruktiven Holzschutz sind folglich auch keine höheren Instandhaltungskosten zu erwarten als für vergleichbare Betonbrücken

5 Rechtliche Aspekte

In Deutschland scheiterte die praktische Umsetzung von Straßenbrücken in Holz-Beton-Verbundbauweise bisher daran, dass keine bauaufsichtlichen Zulassungen für geeignete Verbindungsmittel existieren. Die derzeit zugelassenen Verbindungsmittel für Holz-Beton-Verbundkonstruktionen sind aufgrund zu geringer Steifigkeitskennwerte und Traglasten für die Anwendung im Brückenbau ungeeignet. Holz-Beton-Verbundbrücken können in Deutschland derzeit nur mit einer Zustimmung im Einzelfall errichtet werden, woraus ein erheblicher Wettbewerbsnachteil resultiert.

Das mit der Birkbergbrücke verwirklichte Pilotprojekt soll dazu beitragen, potentielle Auftraggeber von den Vorteilen der innovativen Holz-Beton-Verbundbauweise zu überzeugen und Vorurteile bzw. Bedenken abzubauen. Eine bauaufsichtliche Regelung wird angestrebt, um die baupraktische Umsetzung zu erleichtern.

6 Zusammenfassung

Die Entwicklung von Straßenbrücken in Holz-Beton-Verbundbauweise stellt eine Innovation im Brückenbau dar.

Zur Etablierung der Holz-Beton-Verbundbauweise im Brückenbau erfolgte im Rahmen eines Forschungsvorhabens eine detaillierte Analyse des Trag- und Verformungsverhaltens solcher hybrider Straßenbrücken. Um die Anwendung der Holz-Beton-Verbundbauweise in der Brückenbaupraxis zu erleichtern, wurden Berechnungsmethoden und Konstruktionsrichtlinien, wie sie für Stahlbeton- sowie Stahlverbundbrücken bereits seit langem existieren, erarbeitet. Mit den Ergebnissen der Arbeit ist es möglich, für eine zu überbrückende Stützweite die optimale Konstruktionshöhe zu ermitteln sowie eine geeignete Materialauswahl für den Beton, das Holz und das Verbindungselement zu treffen.

Neben der Erarbeitung statisch-konstruktiver Lösungen stand die Entwicklung eines geeigneten Verbundelementes für den Straßenbrückenbau im Vordergrund.

Der bei diesem neuen Hybridbrückentyp realisierte massive Einsatz von Holz ist ein wesentlicher Schritt auf dem Weg zum umweltbewussten, nachhaltigen Straßenbrückenbau.

Mit der Verwirklichung des Pilotprojektes der Birkbergbrücke wurden die innovative Idee und der ökologische Vorteil dieser Hybridkonstruktionen dokumentiert und damit ein wichtiger Beitrag geleistet, um zukünftig Holz-Beton-Verbundbrücken als moderne Systemlösungen für den Verkehrswegebau zu etablieren.

Quellen

Eine umfangreiche Zusammenstellung weiterführender Literatur zum Thema enthalten die folgenden Veröffentlichungen:

[1] Rautenstrauch, K.; Simon, A.: Weiterentwicklung der Holz-Beton-Verbundbauweise unter Einsatz von blockverleimten Brettschichtholzquerschnitten bei Straßenbrücken, AIF-Forschungsvorhaben 14275 BR, 2008

[2] Simon, A.: Analyse zum Trag- und Verformungsverhalten von Straßenbrücken in Holz-Beton-Verbundbauweise. Dissertation, Bauhaus- Universität Weimar, 2008

9.2 Verbundkonstruktionen, Materialkombinationen
Holz-Beton-Verbundträger im Straßenbrückenbau: experimentelle Ermittlung der Ermüdungsfestigkeit

Ulrike Kuhlmann, Pietro Aldi

1 Einleitung

Die bisher sehr wenig erforschten und praktisch unbekannten Ermüdungsfestigkeitswerte der Verbundfuge stellen ein Hindernis zur Verbreitung der Holz-Beton-Verbundbauweise für gewöhnliche Straßenbrücken (im Allgemeinen und besonders in Deutschland) dar. Laut verbindlichen Belastungsmodellen des DIN FB 101 [1] sind jedoch Ermüdungsnachweise in der Planungsphase einer Brücke unbedingt zu führen. Ziel dieses Forschungsvorhabens ist das Ermüdungsverhalten der Verbundfuge in Holz-Beton-Verbund-Trägern zu untersuchen und eine erste Wöhlerlinie für geeignete Verbindungstechniken zu ermitteln, um die Anwendung der Holz-Beton-Verbundbauweise für Brücken kleiner und mittlerer Spannweite voranzubringen.

Abb. 1a: Uusisalmi Bridge (Finnland) Belastungstest [2]

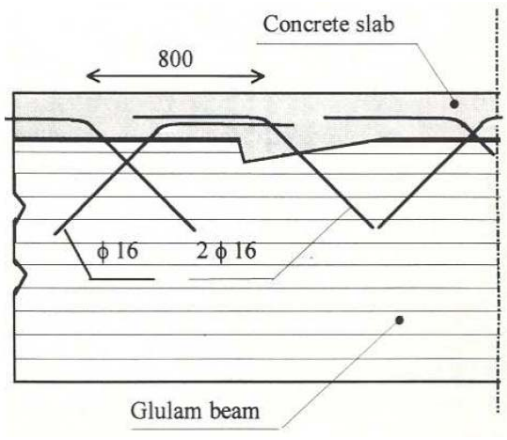


Abb. 1b: Uusisalmi Bridge Verbindungsdetails [2]

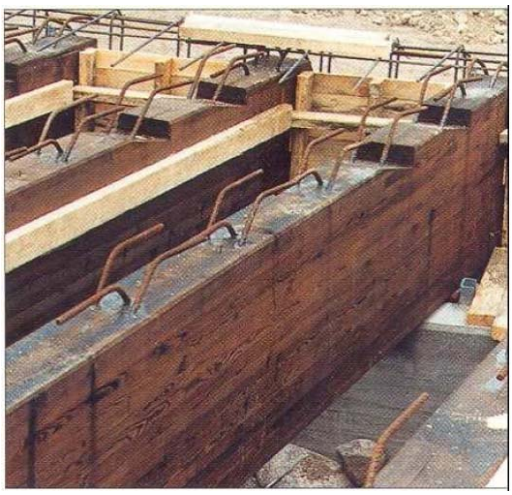


Abb. 1c: Uusisalmi Bridge (Finnland) Verbindungsdetails [2]

2 Verbindungsmöglichkeiten für HBV-Brücken

2.1 Allgemeines

Eine ursprüngliche Verbindungsmöglichkeit zwischen Holz und Beton war die Anwendung von Gewindestäben, die im Holzteil befestigt wurden. Die Übertragung der Schubkraft durch die Holz-Beton-Verbundfuge wurde von diesen stählernen Stäben, nach dem Erhärten des Betons, gewährleistet. Bei dieser Methode sind die stiftförmigen Verbindungsmittel vorwiegend auf Biegung und Schub beansprucht und versagen duktil. Eine Änderung in der geometrischen Anordnung der Verbindungsmittel stellt eine Verbesserung dieses Systems dar. Werden die Stahlstäbe unter einer Neigung von 45° (bezüglich der Verbundfuge) eingebracht, sind diese vorwiegend durch Zug- und Druckkräfte beansprucht. In manchen Veröffentlichungen wird dieses Verbindungsmittel als „X - Connector" beschrieben [3]. Diese geometrische Anordnung führt zu vergleichweisen hohen Tragfähigkeitswerten der Verbundfuge. Eine andere Möglichkeit zur Herstellung eines wirksamen Verbundes kann durch das Ausfräsen von Kerven in den Holzträger erfolgen. Die Schubkräfte werden dann unmittelbar über die Kontaktfläche an

der Kervenflanke weitergeleitet. Mit dieser Methode sind hohe Steifigkeitswerte erreichbar, das Versagen kann jedoch schlagartig und spröde erfolgen. Aus diesem Grund wurde eine Kombination von diesen beiden Systemen vorgeschlagen, und in einigen HBV-Brücken (mit bis zu 42 m Spannweite und 11 m Breite) verwendet [4].

2.2 Ermüdungsfestigkeit von HBV-Strukturen

In einigen Veröffentlichungen wird das Thema der Tragfähigkeit und der Steifigkeit der erwähnten Verbindungsmöglichkeiten betrachtet, aber nur in wenigen Literaturstellen sind Angaben über die Ermüdungseigenschaften von Holz-Beton-Verbund-Trägern enthalten. Die experimentellen Ergebnisse der vorliegenden Scherversuche werden im Folgendem zusammengefasst. In [3] werden einige Ermüdungsversuche von asymmetrischen Holz-Beton-Scherkörpern mit „X-connectors" präsentiert. Eingeklebte Bewehrungsstäbe mit Durchmesser von 20 mm wurden als Verbindungsmittel zwischen Brettschichtholz der Festigkeitsklasse L40 (dies entspricht eine Festigkeitsklasse GL32 nach [5]) und Beton (C40) eingesetzt. Es wurden zwei verschiedene Klebstoffe verwendet und drei unterschiedliche geometrische Anordnungen gewählt, um die bestmögliche Lösung für eine Anwendung im Brückenbau herauszufinden. Insgesamt wurden 4 unterschiedliche Prüfkörper mit verschiedenen aufgebrachten Lastwechsel (zwischen 10^6 und $2{,}1 \cdot 10^6$) untersucht. In [6] sind Ergebnisse von Ermüdungsversuchen an symmetrischen Scherkörper enthalten. Die Holzteile dieser Prüfkörper wurden zusätzlich mit Faserverbundkunststoff verstärkt und mit eingeklebten Bewehrungsstäben senkrecht zur Faser versehen. Als Klebstoff wurde ein Epoxidharz verwendet. Es wurden drei Prüfkörper mit $2{,}0 \cdot 10^6$ Lastwechsel belastet. Die wichtigsten Versuchsergebnisse sind in der Tab. 1 dargestellt. Keiner von den hier aufgelisteten Versuchen hat infolge Ermüdungsbeanspruchung versagt. Die Prüfkörper wurden mit mehr als 10^6 Lastwechsel belastet (teilweise mit mehr als $2{,}0 \cdot 10^6$) und es wurde kein Bruchzustand erreicht. Dies wurde wahrscheinlich von der verhältnismäßig kleinen maximalen Kraft (F_{max}/F_{ult}= 0,17 …0,27) oder von dem relativ großen Kräfteverhältnis „R" (R = 0,17…0,43) verursacht.

Tab. 1: Ergebnisse von Ermüdungstest ([3], [6], [7])

Literaturquelle	Serie	Anzahl Prüfkörper	Maximale Kraft F_{max}	Kräfteverhältnis $R = F_{min}/F_{max}$	aufgebrachte Lastwechsel
[3]	X_p	1	$0.27 \cdot F_{ult}$	0.06	$1.0 \cdot 10^6$
	X_e	1	$0.23 \cdot F_{ult}$	0.06	$2.1 \cdot 10^6$
	VN	1	$0.17 \cdot F_{ult}$	0.06	$1.2 \cdot 10^6$
	XN	1	$0.17 \cdot F_{ult}$	0.06	$1.7 \cdot 10^6$
[6]		3	$0.44 \cdot F_{ult}$	0.43	$> 2.0 \cdot 10^6$
[7]	S	2	$0.35 \cdot F_{ult}$	0.17	$> 2.0 \cdot 10^6$
	K	2	$0.35 \cdot F_{ult}$	0.17	$> 2.0 \cdot 10^6$
	X	2	$0.35 \cdot F_{ult}$	0.17	$> 2.0 \cdot 10^6$

3 Versuchsprogramm

3.1 Allgemeines

Um die Bestimmung der Ermüdungsfestigkeit von typischen Holz-Beton-Verbindungsmitteln und von ganzen Holz-Beton-Verbundträgern zu erreichen, wird das Verhalten von unterschiedlichen Verbundmöglichkeiten erforscht. Zwei unterschiedliche Verbindungsmöglichkeiten wurden, auf der Grundlage von in der Literatur vorhandenen Untersuchungen, ausgewählt zur Ausbildung der Verbundprüfkörper. Maßgebend für die Auswahl waren die Werte der Tragfähigkeit und der Steifigkeit, die sich für eine Anwendung im Straßenbrückenbau am besten eignen.

Die erste Verbindungsmöglichkeit stellt die Anwendung von im Holzteil ausgefrästen Kerven dar, die nach dem Betonieren und Abbinden des Frischbetons eine wirksame Schubverbindung zwischen Holz und Beton darstellt. Die zweite untersuchte Möglichkeit besteht in der Anwendung von sogenannten „X-Verbindern" (kreuzweise eingeklebte Bewehrungsstäbe).

In der ersten Phase der Untersuchungen wurden statische Versuche zur Ermittlung von Referenzwerten durchgeführt. Diese Versuche dienten der Bestimmung eines Tragfähigkeitsmittelwerts für die jeweils eingesetzten Verbindungsmittel. Zudem wurden Mittelwerte des Anfangsverschiebungsmoduls nach [8] ermittelt und mit Werten aus der Literatur verglichen. In einer zweiten Phase des Forschungsprojektes wurden Ermüdungsversuche an Scherkörpern durchgeführt. Ziel war hier die Ermittlung von Wöhlerlinien für die untersuchten Holz-Beton-Verbindungen.

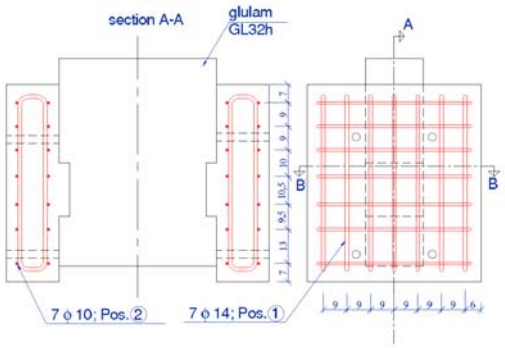


Abb. 2a

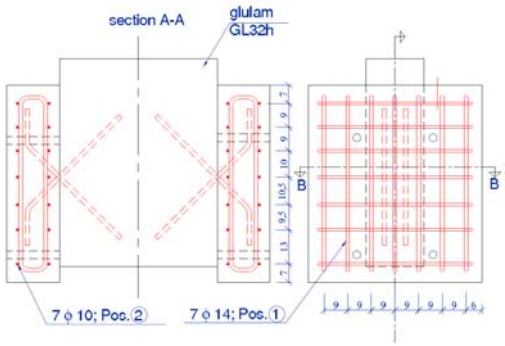


Abb. 2a und 2b: Geometrie der Prüfkörper für die Push–Out–Tests

3.2 Materialeigenschaften

Für die Holzteile wurde Brettschichtholz der Festigkeitsklasse GL32h verwendet. Für Betonteile kam ein Beton mit der Betongüte C30/37 zum Einsatz. Für die eingeklebten stiftförmigen Verbindungsmittel der Serie „X – Verbinder" wurde die Verwendung von Stäben aus BSt 500 S mit Nenndurchmesser d = 16 mm vorgesehen.

3.3 Referenzversuche an Scherkörper

Die Ermittlung von Orientierungswerten der Tragfähigkeit und der Anfangssteifigkeit der Verbindungsmittel ist notwendige Grundlage für die nachfolgenden Schwellendruck-Ermüdungstests. Zwei gleiche äußere Stahlbetonbauteile simulierten die Betonplatte der Brücke und ein mittlerer Holzträger simulierte einen Ausschnitt des Tragwerks, in dem die Verbindungsmittel angeordnet

sind. Die äußeren Abmessungen sind in Abb. 2a (Serie „N“) bzw. Abb. 2b (Serie „D“) dargestellt. Die Geometrie der Versuchskörper wurde so gewählt, dass die tatsächliche Situation einer Brücke möglichst gut wiedergegeben ist. Insgesamt wurden 6 Versuche zur Ermittlung der Referenzeigenschaften der Verbundfuge durchgeführt (3x2 = 6 Versuchskörper mit zwei unterschiedlichen Verbindungsmittel). Die Lasteinleitung erfolgte mittig mit einem Prüfzylinder an der Oberkante des Holzteils. Somit wirkte die Kraft parallel zur Faserrichtung. Um die relative Verschiebung zwischen Holz und Beton zu bestimmen, wurden 6 induktive Wegaufnehmer auf jeder Seite des Versuchskörpers aufgebracht (Abb. 3). Zwei im oberen Bereich des Prüfkörpers, zwei im Bereich der Verbindungsmittel und zwei in unterem Bereich. Mit dieser Anordnung wurde es möglich, eventuelle Unterschiede bei der relativen Verschiebung zwischen Holz und Beton in vertikaler Richtung zu bestimmen.

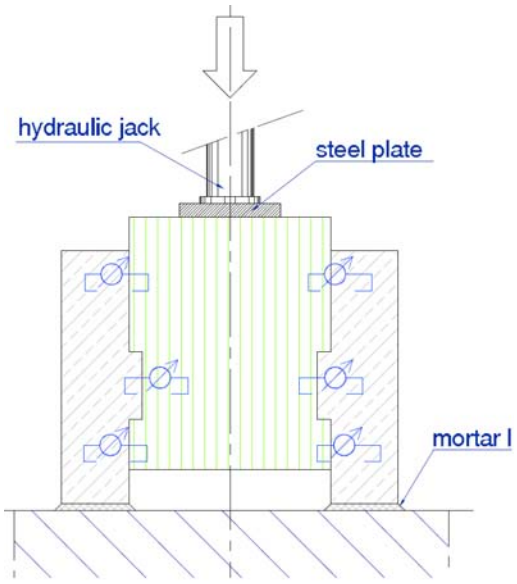


Abb. 3a: Schematische Darstellung von Versuchsaufbau und Messeinrichtung

Abb. 3b: Versuchsaufbau und Messeinrichtung

4 Ermüdungsversuche

4.1 Allgemeines

Nach der Durchführung der Referenzversuche wurden insgesamt 18 Scherkörper unter Schwellendruck (Schwingversuch) bis zum Versagen mit drei unterschiedlichen Lastniveaus belastet, um die Wöhlerlinie für die zwei Verbindungsmöglichkeiten zu bestimmen.

4.2 Belastung

Die Schwingversuche wurden kraftgesteuert gefahren. Die Intensität der Belastung wurde zwischen den in Tab. 2 angegebenen Maximal- und Minimalwerten der Kraft variiert. Die Form der harmonischen Belastung war eine Sinuswelle, mit einer Frequenz von 2,5 Hz. Es wurden lediglich Druckkräfte aufgebracht; eine Wechselbeanspruchung wurde hier nicht weiter untersucht. Um eine Wöhlerlinie mit einer ausreichenden Genauigkeit ermitteln zu können, wurden 3 unterschiedliche Kraftamplituden ΔF untersucht; für jedes dieser Lastniveaus wurden mindestens 3 Versuche durchgeführt. Die Verhältniszahlen R wurden so gewählt, dass die größtmögliche Steigung

Tab. 2: Belastungswerte der Schwingversuche

Bezeichnung Prüfkörper	F_{max}	F_{min}	Kraftbereich $(F_{max} - F_{min})$	Kräfteverhältnis $R = F_{max}/F_{min}$	Anzahl Prüfkörper
N4,N5,N6	$0.75 \cdot F_{ult}$	$0.075 \cdot F_{ult}$	$0.675 \cdot F_{ult}$	0.1	3
D5,D6,D7					3
N7,N8,N9	$0.5 \cdot F_{ult}$	$0.05 \cdot F_{ult}$	$0.45 \cdot F_{ult}$	0.1	3
D8,D9,D10					3
N10,N11,N12	$0.42 \cdot F_{ult}$	$0.042 \cdot F_{ult}$	$0.375 \cdot F_{ult}$	0.1	3
D11,D12,D13	$0.28 \cdot F_{ult}$	$0.028 \cdot F_{ult}$	$0.252 \cdot F_{ult}$		3

der Wöhlerlinie bei einer Druck-Druck-Beanspruchung erreicht wurde [9], [10]. Somit konnte davon ausgegangen werden, dass die größtmögliche Schädigung in den Materialien auftrat. Die in Tab. 2 enthaltenen Werte wurden in Abhängigkeit der in den Referenzversuchen bestimmten statischen Traglasten gewählt (F_{ult}).

5 Erreichte Ergebnisse

5.1 Statische Referenztests

In Abb. 4a ist der typische Verlauf der Kraft-Schlupf-Kurve für das untersuchte Verbindungsmittel Kerve dargestellt. In diesem Diagramm sind die Werte aller auf dem Prüfkörper „N2" aufgebrachten Wegaufnehmer (12 Stück) dargestellt. Abb. 4b zeigt ein Foto eines Prüfkörpers mit der Kerve am Ende des Versuchs vorhanden, in dem die gebrochenen Brettschichtholzteile zu beobachten sind. Während der ganzen Reihe der Versuche wurde immer das gleiche mechanische Verhalten beobachtet. Nach einer kurzen Phase mit kontinuierlicher Aufbringung der Verschiebung an die Oberkante des Prüfkörpers trat das Versagen ein.

Dies wurde von der Ausbildung und plötzlicher Ausbreitung eines Risses zwischen der oberen Flanke der Kerve und der Oberkante des Holzes verursacht. Diese Schub-Bruchfläche ist zunächst an einer Seite des Scherkörpers entstanden und fast gleichzeitig wurde das gleiche Phänomen

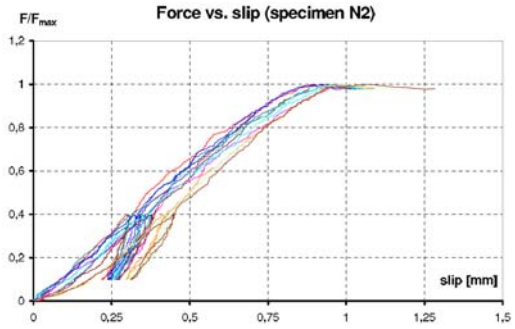


Abb. 4a: Kraft–Schlupf–Kurve (Kerve)

Abb. 4b: Bruchbild (Holz auf Abscheren)

auch auf der anderen Seite beobachtet. Man konnte nur eine sehr kleine relative Verschiebung zwischen Holz und Beton mit den Wegaufnehmer messen, ehe der Prüfkörper spröde versagte. Dies deutet eine sehr hohe Steifigkeit dieses Verbindungsmittelstyps an. Nicht nur die Versagensmechanismen, sondern auch die gemessenen Tragfähigkeitswerte aller untersuchten Referenzversuche lagen eng aneinander.

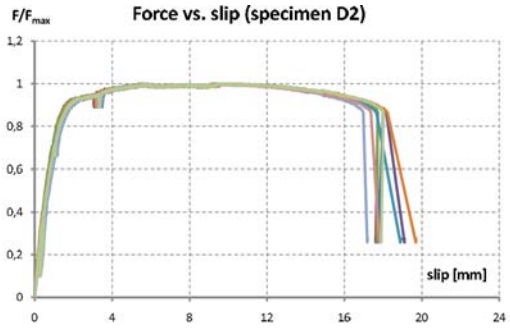


Abb. 5a: Ergebnisse von Referenztest mit X–Verbinder. Kraft–Schlupf–Kurve

Abb. 5b: Ergebnisse von Referenzversuche mit X–Verbinder, Bewehrungsstahlversagen

Ein sehr duktiles Verhalten wurde bei dem anderen getesteten Verbindungstyp (X-Verbinder) festgestellt. Die zugehörige aufgenommene Kraft-Schlupf-Kurve ist in Abb. 5a beispielhaft dargestellt. Die Versagensursache war das Erreichen der Traglast der auf Zug beanspruchten eingeleimten Bewehrungstäbe (Abb. 5b). Es wurde kein Bruch des für die Einklebung der Bewehrungsstangen verwendeten Epoxy-Harzes, der Holzfaser oder des Betons beobachtet. Die Steifigkeitswerte der Verbindung lagen bei allen Referenzversuchen sehr eng zusammen. Die gemessene Steifigkeit dieses Verbindungsmittels betrug etwa die Hälfte des Steifigkeitswerts der Kerve. Auch in diesem Fall konnte man eine geringe Streuung der Tragfähigkeitswerte feststellen.

5.2 Ermüdungsscherversuche

Ein typisches Diagramm des Schlupfverlaufs gegen die Anzahl der aufgebrachten Lastwechsel ist in Abb. 9 dargestellt. Für die Ermüdungsfestigkeitstests wurden 4 Wegaufnehmer in der Mitte der Kerve (bzw. in der Höhe der Kreuzungspunkt der eingeleimten Bewehrungsstäbe) verwendet, deshalb wurden 4 Kurven in Abb. 6a aufgezeichnet. Hierbei sind die maximalen Werte des Schlupfes, entsprechend der korrespondierenden höchsten angreifenden Kraft, dargestellt. Die Anfangswerte der relativen Holz-Beton-Verschiebung entsprechen dem elastischen Kurzzeitverhalten der beanspruchten Materialien. Nach einer Anfangsphase, die von einer relativ raschen Entwicklung des Schlupfs charakterisiert war, nahmen die Verschiebungswerte, bis zu ungefähr $1{,}7 \cdot 10^6$ Lastwechsel, konstant zu. Unmittelbar vor dem Versagen nehmen die Werte der relativen Verschiebung, auf der Seite der Ausbreitung des Risses, sehr schnell zu, während, auf der anderen Seite, die Schlupfwerte praktisch konstant blieben. Man konnte den gleichen Versagensmechanismus wie bei den statischen Referenzversuchen beobachten. Ein Bild des gerissenen Prüfkörpers (nach der Vollendung des Ermüdungsversuche) ist in Abb. 6b gezeigt.

Der gleiche Mechanismus wie bei den Referenzversuchen stellt die Bruchursache auch für den X-Verbinder dar: Die auf Zug beanspruchten Bewehrungsstäbe versagten ohne eine sichtbare Schädigung weder im Holz noch im Beton oder im Epoxy-Harz. Der Unterschied zu den statischen Versuchen liegt jedoch darin, dass ein sprödes Verhalten bei den Ermüdungstests beobachtet wurde, ohne jegliche Vorzeichen von einsetzendem Bruch. In Gegensatz dazu hatte eine lange

duktile Verformungsphase während der statischen Experimente stattgefunden.

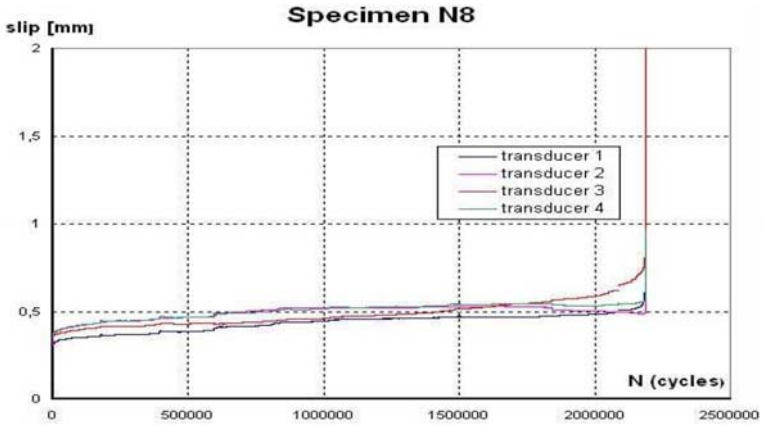


Abb. 6a: Schädigungskurve (Prüfkörper N8)

Abb. 6b: Schubversagen des Holzes (Prüfkörper Nr. 8)

In Abb. 7 ist eine vorläufige Wöhlerlinie des Verbindungsmittels Kerve basierend auf den Ergebnissen von 12 Push–Out-Versuche gezeichnet. Bei der Ermittlung der Steigung wurden auch die Ergebnisse der statischen Referenzversuche berücksichtigt. Einer der getesteten Prüfkörper erwies sich als Durchläufer: Nach etwa $6{,}4 \cdot 10^6$ Lastwechsel wurde der Versuch mit einem sichtbaren Riss aber ohne Versagen abgebrochen.

In diesem Fall wurde die Resttragfähigkeit des Prüfkörpers ermittelt: Keine wesentliche Differenz zwischen den Referenzwerten und der Tragfähigkeit nach mehr als $6{,}0 \cdot 10^6$ aufgebrachte Lastwechsel wurde festgestellt.

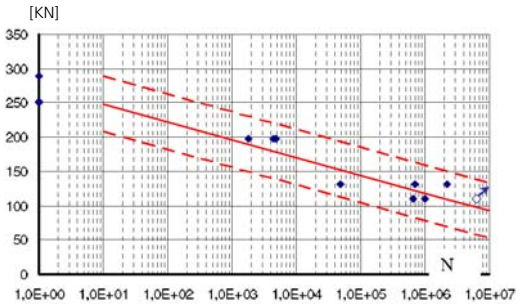


Abb. 7: Wöhlerlinie der Kerve (Push–Out)

6 Versuche an gesamten Trägern

In einer weiteren Phase des Projektes werden Versuche an gesamten Trägern durchgeführt, um durch den Push-Out-Test bestimmten Werten der Ermüdungsfestigkeit zu verifizieren. Um das Verhalten der Fuge zu untersuchen, werden Träger mit einer relativ kleinen Spannweite gewählt. Das Ziel dieser Tests ist die Ermüdungsfestigkeit der Verbundfuge zu betrachten, in denjenigen Bereichen eines statisches System, die große Werte der Querkraft beansprucht sind. Die Versuchseinrichtung entspricht einem Drei-Punkt- Biegeversuch.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Nur in sehr wenigen Veröffentlichungen ist die Ermüdungsfestigkeit von Holz – Beton –Verbundträgern systematisch erforscht. In keiner der erwähnten Arbeiten wurde von einem Ermüdungs-

versagen der untersuchten Prüfkörper berichtet. Dies hängt vermutlich von der verwendeten kleinen maximalen Kraft und vom gewählten großen Kräfteverhältnis ab. Darüber hinaus sind keine Wöhlerlinien oder andere analytischen Methoden vorhanden, um die Lebensdauer von Holz-Beton-Tragwerken unter Wechsellast zu bestimmen. Um eine minimale aber ausreichende Anzahl von Versuchsergebnisse zu erhalten, wurde eine Reihe von symmetrischen Scherversuchen unter Druck-Druck-Schwellenbeanspruchung durchgeführt. Eine erste vorläufige Wöhlerlinie wurde auf der Basis der beobachteten Ermüdungsversagen für die untersuchten Verbindungsmittel bestimmt. Dabei wurde das Kräfteverhältnis so gewählt, dass die größtmögliche Schädigung in den Prüfkörpern auftrat. Weitere Untersuchungen an gesamten Holz–Beton–Verbundträgern sind aber notwendig um die bisher erreichten Ergebnisse zu validieren.

Danksagung

Die hier vorgestellten Untersuchungen wurden durch die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke" e.V. (AiF) aus Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit (BMWA) durchgeführt. Die Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e.V. (DGfH) hat die Arbeiten fachlich und organisiert begleitet. Den Förderern sei für die Unterstützung recht herzlich gedankt.

Quellen

[1] DIN FB 101: Einwirkungen auf Brücken. DIN Deutsche Institut für Normung e. V., 2003

[2] Jutila, A.; Mäkipuro, R.; Salokangas, L.: Testing a Wood - Concrete Composite Bridge. In: Structural Engineering International 7 (1997), S. 275-277

[3] Tommola, J. ; Salokangas, L. ; Jutila, A.: Wood- Concrete Composite Bridges: Tests on Shear Connectors / Helsinki University of Technology, Laboratory of Bridge Engineering. Nordic Timber Bridge ‚Project, 1999. Forschungsbericht

[4] Rantakokko, T.; Salokangas, L.: Design of the Vihantasalmi Bridge, Finland. In: Structural Engineering International, IABSE 10 (2000), S. 150-152

[5] DIN 1052: Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau. DIN - Deutsche Institut für Normung e.V., 2004

[6] Davids, W.G.; Dagher, H.J.; Sanchez, O.; Weaver, C.: Bridge with Composite Concrete Deck and Glued Laminated Girders Stengthened with Fiber-Reinforced-Polymer / Advanced Engineered Wood Composites Center - University of Maine. 2005. Forschungsbericht

[7] Döhrer, A.; Rautenstrauch, K.: Connectors for timber-concrete composite-bridges. In: Proceedings of CIB - W18, 2006 Florence. Florence- Italy, August 2006. Paper N± 39-7-3

[8] DIN EN 26891: Holzbauwerke - Verbindungen mit mechanischen Verbindungsmitteln Allgemeine Grundsätze für die Ermittlung der Tragfähigkeit und des Verformungsverhaltens. DIN - Deutsche Institut für Normung e.V., 1991

[9] DIN 1074: Holzbrücken. DIN - Deutsche Institut für Normung e. V., 2005

[10] Mohr, B.: Zur Interaktion der Einflüsse aus Dauerstands- und Ermüdungsbeanspruchung im Ingenieurholzbau, Berichte aus dem Konstruktiven Ingenieurbau. Technische Universität München, Diss., 2001

[11] Kuhlmann, U.; Aldi, P.: Ermüdungsfestigkeit von Holz-Beton-Verbundträgern im Straßenbrückenbau. Forschungsvorhaben AiF 15052 N (in Vorbereitung)

9.2 Verbundkonstruktionen Materialkombinationen
Holz-Stahlfaserbeton-Verbundsystem

Andreas Heiduschke, Bo Kasal

1 Einleitung

Auf Biegung beanspruchte Verbundbauteile mit einer Druckzone aus Beton und einer Zugzone aus Holz weisen ein gutes Trag-Verformungsverhalten auf. Dies ist auf die effiziente Nutzung der Materialeigenschaften zurückzuführen. Bedingung ist ein möglichst starrer Verbund beider Materialien, Holz und Beton, welcher die Aufnahme der interlaminaren Schubspannungen ermöglicht.

Nahezu alle Holz-Beton-Verbundsysteme (HBV) basieren auf der Verwendung von mechanischen Verbindungsmitteln (z.B. Gewindestäbe, Kopfbolzen, Dübel, Nägel), mit denen ein nachgiebiger Verbund erzielt wird [1, 2]. Von Vorteil ist die schnelle und einfache Montage der ins Holz eingeschraubten oder eingeschlagenen Verbindungsmittel. Nachteilig ist die relativ geringe Schubsteifigkeit des Verbundes sowie die hohe Anzahl der benötigten Verbindungsmittel. Häufig eingesetzt werden deshalb Verbindungstechniken bei denen der Verbund durch Kombination von mechanischen Verbindungsmitteln und profilierten Kontaktflächen (z.B. Einschnitte, Kerven oder Bohrungen im Holz) erreicht wird.

Untersuchungen zum Last-Verformungsverhalten dieser Holz-Beton-Verbunddecken von Gutkowski [3] haben gezeigt, dass durch den zusätzlichen Formschluss die Verbundfestigkeit zwischen Holz und Beton wesentlich erhöht wird. Werner [4] beschreibt eine Holz-Beton-Verbunddecke mit schubfestem Verbund, welcher mittels bewehrter Betonnocken und profilierter Kopfbolzen bzw. Winkelhaken erfolgt. Die beim Betonieren geformten Nocken wirken wie Einlassdübel, welche mittels der Kopfbolzen am Holzbauteil gegen Herausziehen gesichert sind und ein Abscheren der Betonnocken verhindern. Ein ähnlicher Ansatz wird von Glaser [5] verfolgt, der das Trag- und Verformungsverhalten von Polymerbeton- und Konsol-Nocken untersucht hat. Auf Grundlage von umfangreichen Kurzzeit- und Langzeit-Scherversuchen wurden Nachweisverfahren erarbeitet bzw. das Kriechverhalten der Schubverbindungsmittel bestimmt.

Stahlfaserbeton ist ein Material das sich durch große Duktilität, sowohl bei Druck- als auch bei Zugbeanspruchung, auszeichnet. Die Stahldrahtfasern verbessern die Betoneigenschaften insbesondere in Bezug auf Biegezugfestigkeit, Scherfestigkeit, Ermüdungsbeständigkeit und Verminderung der Schwindspannungen. Die Zug- und Scherfestigkeit des Materials ist insbesondere für zug- bzw. schubbeanspruchte Bereiche interessant, in denen eine Einlage von Betonstahlbewehrung große Mühe bereitet und mit entsprechenden Kosten verbunden ist. Die in diesem Beitrag vorgestellten Versuchsergebnisse bezüglich eines HBV-Systems mit stahlfaserverstärkten Betonnocken basieren auf einer Forschungsarbeit der Autoren [6]. Zur Bestimmung des Last-Verformungs-Verhaltens wurden Tastversuche durchgeführt die lediglich Tendenzen und Potentiale der stahlfaserverstärkten Schubverbinder aufzeigen können. Zwischenzeitlich haben sich die Forschungsaktivitäten auf diesem Gebiet deutlich erhöht. Detaillierte Informationen bez. des Tragverhaltens von Holz-Stahlfaserbeton-Verbunddecken einschließlich erster Anwendungen sind [7],[8] zu entnehmen.

In einem Beitrag von Heller [9] werden die grundsätzlichen Parameter bei der Anwendung von Holz-Beton-Verbundkonstruktionen erläutert und ausführlich diskutiert. Schwerpunkt seines Beitrags ist, ähnlich wie in [8], ein HBV-System mit selbstbohrenden Vollgewindeschrauben und Stahlfaserbeton zur Ertüchtigung alter Holzbalkendecken. Analysiert werden die unterschiedlichen Ansätze für Langzeiteinwirkungen (Schwinden, Kriechen) in der gegenwärtigen Praxis sowie neuere Forschungsergebnisse. Ziel des Einsatzes

von Stahlfaserbeton ist, auf herkömmliche Stab- oder Mattenbewehrung zur Rissbreitenbegrenzung zu verzichten [10], um somit möglichst filigrane Betonplatten mit entsprechend geringem Eigengewicht fertigen zu können. Dies ist derzeit noch mit einer Zustimmung im Einzelfall verbunden.

Als schubsteif gelten geklebte Verbindungen [11], die eine lineare Dehnungsverteilung über die Querschnittshöhe zur Folge haben. Das „HBV-System mit eingeklebten HBV-Schubverbindern" besitzt bereits eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (Z.9.1-667) und wird in der Praxis häufig eingesetzt.

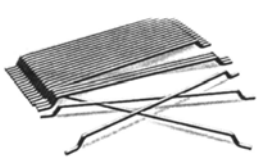
2 Das Verbundsystem

Stahlfaserverstärkter Beton ist eine hochfeste Mixtur aus Beton und Stahldrahtfasern. Die Stahldrähte haben einen Durchmesser von 0,3 – 1 mm und eine Länge von 20 - 100 mm (Abb. in Tab. 1). Der Faservolumenanteil beträgt etwa 1 % - 3 %. Die Fasermenge ist dabei auf die Festigkeit des Betons und den Herstellungsprozess abzustimmen, da dieser zum einen die Orientierung der Fasern beeinflusst und zum anderen ein zu hoher Fasergehalt die Verarbeitbarkeit des Betons verschlechtert.

Die Zug- und Scherfestigkeit der Mixtur resultiert aus der Zugfestigkeit der Einzelfasern von mindestens 1000 N/mm^2. Die über den gesamten Querschnitt gleichmäßig verteilten Stahldrahtfasern führen zu einem homogeneren Material mit erhöhter Duktilität [12]. Die Zusammensetzung des in den Versuchen verwendeten Betons ist Tab. 1 zu entnehmen.

Stahlfaserbeton ist ein Baustoff, der mit Hilfe beigemengter Stahlfasern eine rechnerisch ansetzbare Zugfestigkeit erhält und zudem ein elastoplastisches Materialverhalten aufweist. Dies ermöglicht, den Verbund von Holz und Beton allein durch deren Formschluss zu realisieren; auf zusätzliche Bewehrung oder die Verwendung mechanischer Verbindungsmittel soll verzichtet werden.

Tab. 1: Rezeptur des Stahlfaserbetons

Mischung	[kg/m^3]	Dramix Stahlfasern
Zementart - Portland Zement Typ III	645	
Zuschläge - Kies (Größtkorn 9,5 mm)	654	
- Sand	749	
Wasser	110	
Mikrosilica Slurry 970S	207	
Superplasticizer AVAD100	14	
30/50 Dramix Stahlfasern (Volumenanteil der Stahlfasern 1,5%, Länge 30 mm, Durchmesser 0,6 mm)	121	

Die Verbundwirkung wird durch zylindrische Ausnehmungen im Holzbauteil erreicht, in die der faserverstärkte Frischbeton einfließt und nach dem Aushärten eine Verzahnung der Druck- und Zugzone bildet. Diese Verzahnung ist ausreichend, um einen dauerhaften und schubfesten Verbund zu gewährleisten. Die Scherfestigkeit der so geformten Betonnocken ist besonders wichtig in Systemen mit begrenzter Kontaktfläche zur Schubkraftübertragung (z.B. in Plattenbalkendecken).

In Tab. 2 werden die Materialeigenschaften des Stahlfaserbetons denen herkömmlicher Betone gegenübergestellt. Mit einer im Versuch ermittelten Spaltzugfestigkeit von etwa 12 – 16 N/mm^2 liegen die Festigkeiten deutlich über denen des Normalbetons [13], [14], [15]. Die charakteristischen Biegezug- $f_{ctk,fl}$ und Scherfestigkeit τ_c liegt je nach Betongüte, Fasertyp und Faservolumenanteil bei ca. 5 N/mm^2. Die Zugfestigkeit f_{ctk} bei ca. 2,6 N/mm^2 [16].

Tab. 2: Parameter von herkömmlichem und stahlfaserverstärktem Beton

Festigkeitsklasse/Bezeichnung	C20/25 (ENV 206)	Stahlfaserbeton
Dichte ρ [kg/m^3]	2400	2500
Druckfestigkeit $f_{c,k}$ [N/mm^2]	20	~ 25 [3] 123 [1]
Zugfestigkeit f_{ctm} [N/mm^2]	2,2	~ 2,6 [3] (11-16 [2])
E-Modul E_{cm} [N/mm^2]	30000	30500 [3]

[1] die Druckfestigkeit des stahlfaserverstärkten Betons wurde nach ISO 4012 an Zylindern ermittelt
[2] der Literatur entnommene Versuchswerte [13, 14, 15]
[3] der Literatur entnommene charakteristische Werte [16]

3 Versuchsdurchführung

In ersten mechanischen Prüfungen wurde das Trag-Verformungsverhalten des Verbundsystems ermittelt. Dazu wurden Blockscherversuche an separaten Verbindungen und Biegeversuche an Einfeldträgern durchgeführt. Die Untersuchungen haben aufgrund der geringen Probenanzahl vorerst nur orientierenden Charakter.

3.1 Blockscherversuche

Das Last-Verschiebungsverhalten und die Scherfestigkeiten der Verbindungen wurden an Blockscherprobekörpern bestimmt. Der Versuchsaufbau der Blockscherversuche ist in Abb. 1a schematisch dargestellt. Das verwendete Kiefernholz hatte eine Rohdichte von 450 kg/m^3 und eine mittlere Holzfeuchte von 12%. In die Holzblöcke wurden zylindrische Ausnehmungen mit einem Durchmesser von 50 und 100 mm gefräst. Je Charge wurden jeweils zwei Probekörper geprüft. Die Last wurde weggesteuert mit einer konstanten Belastungsgeschwindigkeit von 3 mm/min aufgebracht. Die vertikalen Verschiebungen der Holz- sowie der Betonschicht wurden mittels induktiven Wegaufnehmern aufgezeichnet und daraus die Relativ-Verschiebung der Schichten bestimmt.

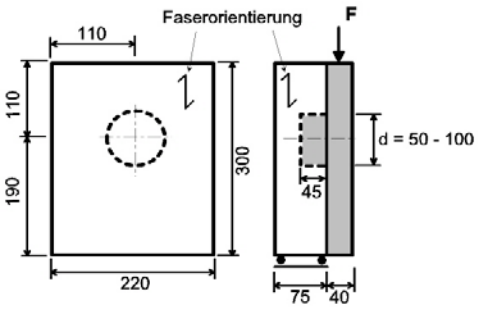


Abb. 1a: Blockscherprobekörper mit Nockendurchmessern von d = 50 oder 100 mm

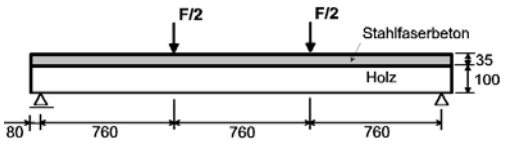


Abb. 1b: Vier-Punkt-Biegeversuch incl. Anordnung der Bohrlöcher im Bauteil

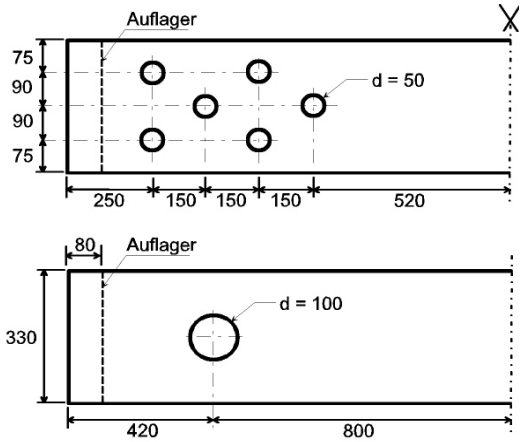


Abb. 1c: Anordnung der Bohrlöcher im Bauteil

3.2 Biegeversuche an Einfeldträgern

Vertikal aneinandergeleimte Brettlamellen aus Kiefernholz bildeten die Zugzone der Biegeträger. Die Brettlamellen (25 x 100 mm) wurden mittels Phenolharz verleimt. Vor dem Bohren der Ausnehmungen wurde der mittlere E-Modul der Schichtholzträger im Biegeversuch zu 12200 N/mm^2 ermittelt. Die Anordnung der Bohrlöcher ist der Abb. 1c zu entnehmen.

Nach dem Aufbringen und Aushärten der 35 mm starken Betonschicht wurden die beiden Einfeldträger im Vier-Punkt-Biegeversuch geprüft (Abb. 1b). Bei diesem Versuch ist die Schubspannungsverteilung über die Randbereiche konstant. Die Verformungen des Bauteils wurden in Trägermitte und den Lasteinleitungspunkten aufgezeichnet.

4 Versuchsergebnisse

4.1 Blockscherversuche

Abb. 2 zeigt die aufgezeichneten Kraft-Relativverschiebungs-Kurven für verschiedene Nockendurchmesser.

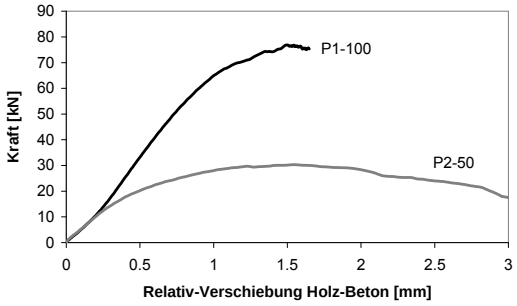


Abb. 2 Last-Verschiebungs-Kurven der Blockscherversuche (P2-50 und P1-100)

Der anhand der Versuchsdaten ermittelte Verschiebungsmodul bildet die Grundlage zur Berechnung der Verformungen von nachgiebig miteinander verbundenen Bauteilen (nach DIN 1052: 2004-08). Der Anfangs-Verschiebungsmodul K_i entspricht dem Sekantenmodul bei 40% der Traglast der Verbindung und K_{ser} dem Anstieg zwischen 10 % und 40 % der Last-Verschiebungs-Kurve (DIN EN 383: 1993). Die in den Versuchen ermittelten Traglasten der Betonnocken und deren Verschiebungsmodule sind in Tab. 3 zusammengefasst.

Auf Grund des formschlüssigen Verbunds von Holz und Beton werden hohe Verschiebungsmodule erzielt. Mit einer mittleren Scherfestigkeit von 11,8 N/mm^2 erreichten die Nocken etwa der Scherfestigkeit des Faserbetons (siehe Tab. 2). Probe P2-50 zeigt zwar eine gute Duktilität, die Traglast ist mit 30,3 kN jedoch relativ gering. Für die praktische Anwendung ist es deshalb sinnvoll Nocken mit größeren Scherflächen zu verwenden, die entsprechend höhere Traglasten erzielen. Bezüglich der Nockengeometrie besteht noch Optimierungsbedarf [5]. Abb. 3 zeigt die abgescherte Betonnocke der Probe P2-50.

Tab. 3: Traglast und Verschiebungsmodule der Betonnocken

Nockendurchmesser d [mm]	Traglast F_{max} [kN]		Verschiebungsmodul K_i (K_{ser}) [kN/mm]	
	P1	**P2**	**P1**	**P2**
50	19,1 (1)	30,3	50,0 (56,6)	47,7 (54,8)
100	76,9	96,2(2)	71,4 (75,1)	72,7 (77,8)

(1) starke Verdrehung des Probekörpers aus der Belastungsebene infolge exzentrischer Lasteinleitung
(2) Limit der Prüfmaschine überschritten

Ein Lochleibungsversagen des Holzes an der Kontaktfläche zur Betonnocke wurde nicht beobachtet. Bei Annahme einer Lochleibungsfestigkeit von etwa 20 N/mm^2, sollten erste plastische Verformungen im Holz bei ca. 45 kN (d= 50 mm) bzw. 90 kN (d= 100 mm) auftreten (DIN 1052:2004-08).

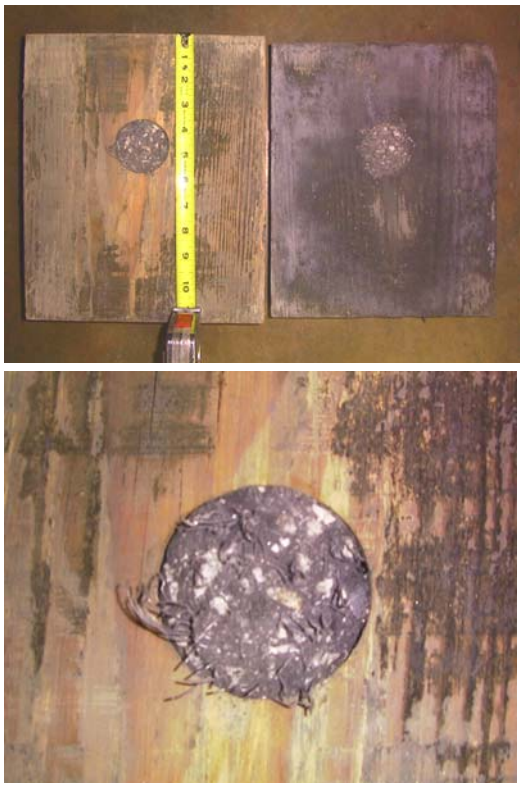


Abb. 3: Typisches Versagensbild der Blockscherversuche (P2-50)

Biegeversuche an Einfeldträgern

Abb. 4 zeigt die Last-Durchbiegungs-Diagramme der Verbundträger. Dargestellt ist (a) das Last-Verformungsverhalten des Trägers mit zwölf Verbindungsmitteln d=50 mm und (b) für zwei Nocken mit d=100 mm. Aufgrund der großen Verbindungsmittelanzahl und des damit verbundenen quantitativ größten Nockenquerschnitts, ist (a) das biegesteifere System. In beiden Fällen ist ein signifikanter Abfall der Traglast bei Durchbiegungen von 12 bis 20 mm zu beobachten. Danach ist ein erneuter Anstieg der Traglast mit einer geringeren, jedoch konstanten, Steifigkeit zu verzeichnen. Der finale Bruch war durch ein plötzliches Versagen des Holzes in der Biegezugzone gekennzeichnet.

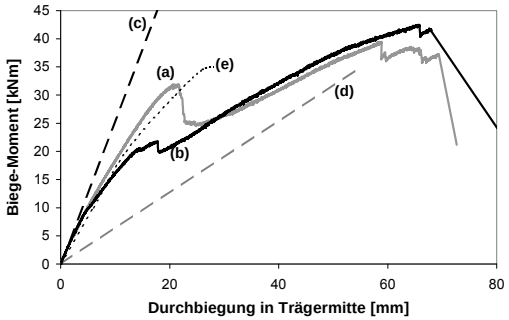


Abb. 4 Last-Durchbiegungs-Kurven der Einfeldträger:
(a) Nockendurchmesser 12x d=50
(b) Nockendurchmesser 2x d=100
(c) voller Verbund
(d) ohne Verbund
(e) nachgiebiger Verbund

Um den Wirkungsgrad des Verbundes bestimmen zu können, wurden drei FE-Modelle generiert. Dies sind Modelle der Träger unter Annahme eines (c) vollständigen, (d) ohne und (e) mit nachgiebigem Verbund. Der nachgiebige Verbund wurde mittels nichtlinearen Federelementen simuliert, deren Steifigkeit der Last-Verschiebungs-Kurve P2-50 aus Abb. 2 entspricht. Gerade (c) zeigt das simulierte Verhalten des Biegeträgers bei vollem Verbund und entspricht der oberen Grenze der Biegesteifigkeit. Für das erste Viertel sind die Steifigkeiten der geprüften Verbundträger mit der numerischen Berechnung nahezu identisch, dann fallen diese bis zum Erreichen der Traglast stetig ab.

Mit dem Abscheren der Nocken ist die Traglast des Trägers erreicht. Der nachfolgende erneute Anstieg beschreibt das Last-Verformungs-Verhalten zweier separater Bauteile, deren Schubkräfte zu einem Teil durch Reibung übertragen werden. Diese Folgerung kann anhand der Gerade (d) getroffen werden, die das Last-Verformungsverhalten eines Trägers ohne Verbund beschreibt. Der Anstieg von (d) ist nahezu identisch dem der Verbundträger (a und b) nach dem ersten Abfall der Festigkeit. Der Vergleich von Simulation (e) und Experiment (a) zeigt eine gute Übereinstimmung der FE- Berechnungen mit dem tatsächlichen Bauteilverhalten. Den Berechnungen zufolge ist bei einem Biegemoment von 34 kNm die Traglast des am höchsten beanspruchten Verbindungsmittels (P2-50 = 30,3 kN) erreicht.

Die Effizienz der Verbundwirkung lässt sich anhand des Vergleichs der im Versuch gemessenen Verformung mit den theoretischen Werten bei vollem und ohne Verbund bestimmen. Der Wirkungsgrad des Verbundes wurde nach folgender Gleichung ermittelt:

$$\text{Wirkungsgrad } \eta\,[\%] = \frac{w_0 - w_{50,100}}{w_0 - w_v} \cdot 100$$

Darin bedeuten, w_o und w_v die Durchbiegung des Probekörpers in Trägermitte ohne bzw. bei vollem Verbund. Die im Versuch ermittelten Verformungen werden mit w_{50} bzw. mit w_{100} bezeichnet. Da der Wirkungsgrad vom jeweiligen Lastniveau abhängig ist, wurde dieser exemplarisch für 40% bzw. 80% der Traglast ermittelt. Demnach beträgt der Wirkungsgrad des Trägers (a) mit

zwölf Verbindungsmitteln bei 40 % der Traglast etwa 87 % und bei 80 % der Traglast etwa 81 %.

Für den Träger (b) mit Nockendurchmessern von 100 mm wurde ein Wirkungsgrad von 91 % bzw. 75 % erreicht. Anzumerken ist, dass Reibungseffekte zwischen Beton und Holz das Tragverhalten beeinflussen und bei der Ermittlung der Verformung bzw. Steifigkeit mit eingegangen sind. Für eine exakte Analyse des Last-Verformungs-Verhaltens der Nocken sind die stützend wirkenden Effekte durch geeignete Maßnahmen, wie z.B. Trennfolien, zu eliminieren, da bei der Bemessung die Reibung zwischen Beton und Holz nicht in Rechnung gestellt werden darf. Die Dimensionierung des HBV-Systems mit stahlfaserverstärkten Betonnocken kann auf dem Verfahren zur Bemessung von nachgiebig miteinander verbundenen Bauteilen basieren (DIN 1052).

Mögliche Berechnungsansätze wurden bereits entwickelt [1, 4] und sind um den Nachweis des Stahlfaserbetons zu erweitern. Diesbezüglich sind die geltenden Normen bzw. Richtlinien (DIN 1045, DBV-Merkblatt Stahlfaserbeton [17], DAfStb-Richtlinie Stahlfaserbeton [18]) zu berücksichtigen.

Schlussfolgerungen

Zur Bestimmung des Last-Verformungs-Verhaltens von Schubverbindern aus stahlfaserverstärktem Beton in HBV-Konstruktionen wurden Kurzzeit-Versuche an Nockenverbindungen und Biegeträgern durchgeführt. Die formschlüssige Verzahnung von Stahlfaserbeton und Holz führt zu einem Verbundsystem mit hoher Biegesteifigkeit und hohem Wirkungsgrad. Im Fall der in diesem Bericht untersuchten Biegeträger wird deren Traglast von der Scherfestigkeit des Stahlfaserbetons limitiert, so dass noch Optimierungsbedarf hinsichtlich Geometrie, Anzahl und Anordnung der Bohrungen besteht. Form und Fertigung der Ausnehmungen lassen genügend Spielraum zur Optimierung des Verbundsystems, wie z.B. Langlöcher oder rechteckige Ausnehmungen mit entsprechend großen Scherflächen und geneigten Lochwandungen zur Sicherung gegen Herausziehen.

Auf Grund der geringen Probenanzahl haben die Versuche nur orientierenden Charakter und können lediglich Tendenzen und Potentiale der stahlfaserverstärkten Schubverbinder aufzeigen. Zur statistischen Absicherung sind umfangreiche Untersuchungen bez. der Verbundeigenschaften und insbesondere des Langzeitverhaltens des HBV-Systems nötig.

Der Einsatz von Stahlfaserbeton ermöglicht neben der einfachen und kostengünstigen Herstellung der Nockenverzahnung gleichzeitig die Fertigung filigraner Betonplatten. Somit lassen sich Konstruktionshöhe und Eigengewicht der HBV-Deckensysteme minimieren. Dies setzt jedoch voraus, dass es möglich bzw. zulässig wird, gänzlich auf herkömmliche Stab- oder Mattenbewehrung zu verzichten.

Quellen

[1] Blass H.J., Schlager M. Trag- und Verformungsverhalten von Holz-Beton-Verbundkonstruktionen. Teil 1 und 2. In: bauen mit holz 5/96 und 6/96, 1996.

[2] Ceccotti A. Holz-Beton-Verbundkonstruktionen. Holzbauwerke nach EC5, STEP 2, Bauteile, Konstruktion, Details, AG Holz e.V., Düsseldorf, E13/1- E13/11, 1995.

[3] Gutkowski R.M., Balogh J., Natterer J., Brown K., Koike E., Etournaud P. Laboratory tests of composite wood-concrete beam and floor specimens. Proceedings of WCTE, Vancouver, Canada, S. 8.2.1. 2000.

[4] Werner H. Holz - Beton - Verbunddecke mit neuartiger Fugenausbildung. Bauen mit Holz 4/92, S. 312-324, 1992.

[5] Glaser R. Zum Kurz- und Langzeitverhalten von Holz-Beton-Verbundkonstruktionen. Dissertation, BTU Cottbus, 2005.

[6] Heiduschke A., Kasal B. Composite cross sections with high performance fiber reinforced concrete and timber. Forest Product Journal 53 (10): 74-78, 2003.

[7] Holschemacher K., Dehn, F. Innovative Betone für Holz-Beton-Verbundkonstruktionen. Bautechnik 81, H. 11 S. 874-879, 2004.

[8] Holschemacher K., Kuhlmann U., Schänzlin J. Holz-Beton-Verbundbau in Forschung und Praxis. 7. Holzbauforum Leipzig, HUSS-Medien GmbH, 2007.

[9] Heller, H. Holz-Beton-Verbunddecken (HBV) Neue Deckensanierungssysteme mit Vollgewindeschrauben, Stahlfaserbeton und Online-Bemessungstools. In: Bautechnik 85 Heft 10; S. 667-677, 2008.

[10] Grunert J.P. Fertigteile aus selbstverdichtendem Stahlfaserbeton ohne Betonstahlbewehrung, Beton und Stahlbetonbau, Vol 100(S2) S. 81.84, 2005.

[11] Bathon L., Bletz O., Kocher, D. Neue Dimensionen beim Holz-Beton-Verbund, mikado, Nr. 10, 2004, S. 54-57, 2004.

[12] Valle M., Buyukozturk O. Behavior of fiber reinforced high-strength concrete under direct shear. ACI Materials Journal, 3/1993, Vol. 90, No. 2, S. 122-133, 1993.

[13] Ramakrishnan V., Wu G.Y., Hosalli G.. Flexural Behavior and Toughness of Fiber Reinforced Concretes. Transportation Research Record, No. 1226, S. 69-77, 1989.

[14] Curbach M., Speck K. Untersuchung der mehraxialen Festigkeit von duktilem Hochleistungsbeton. DAfStb-Forschungsvorhaben V389, TU Dresden, 2000.

[15] Narayanan R., Darwish I. Use of steel fibers as shear reinforcement. ACI Structural Journal, Vol. 84, No. 3, pp. 216-232, 1987.

[16] Wietek B. Stahlfaserbeton – Grundlagen und Praxisanwendung. Vieweg + Teubner, 2008.

[17] DBV-Merkblatt - Stahlfaserbeton, Deutscher Beton- und Bautechnik Verein, 2001.

[19] DAfStb-Richtlinie Stahlfaserbeton, 23. Entwurf , 2007.

9.2 Verbundkonstruktionen, Materialkombinationen
Wandverbundquerschnitte

Norbert Rüther

1 Allgemeines

Sandwichelemente erfreuen sich immer größerer Beliebtheit, da diese rationell hergestellt und den Anforderungen entsprechend gestaltet werden können. Im Holzbau sind bereits Sandwichelemente für Last abtragende Wände im Markt erhältlich, wobei nahezu alle Systeme einen Kern aus Hartschäumen, z.B. Polystyrol oder Polyurethan, aufweisen. Dabei haben Dämmungen aus Holz (in der Regel Holzfasern) hervorragende Eigenschaften. Somit bestehen sehr gute Möglichkeiten, Sandwichelemente ausschließlich aus Holz und Holzwerkstoffen zu fertigen. Die Zuordnung einzelner Funktionen auf einzelne Bauteilschichten wird bei solchen Sandwichelementen aufgehoben, so dass u.a. auch die Wärmedämmschicht im Kern an der Tragwirkung beteiligt ist.

Am Fraunhofer Institut für Holzforschung, Wilhelm-Klauditz-Institut (WKI) in Braunschweig, wurde der Einsatz von Sandwichelementen ausschließlich aus Holz und Holzwerkstoffen für lastabtragende Wände untersucht. Die Ergebnisse zeigen neue Möglichkeiten im Holzbau auf.

Wandelemente wirken statisch sowohl zur Abtragung vertikaler Lasten als auch zur Aussteifung gegenüber Horizontallasten und können Einzelkräfte aus Konsollasten und Horizontalstoß aufnehmen. Das Wandverbundelement ist somit als statisch wirksame Innen- und Außenwand im Holzhausbau verwendbar. Solche Wände werden vor allem durch Vertikallasten aus über den Wänden liegenden Bauteilen wie Decken, Dächern und weiteren Geschosswänden, Horizontallasten, z.B. aus Beanspruchung durch Wind, und Konsollasten z.B. aus Hängeschränken beansprucht.

Bei den Untersuchungen am WKI wurden neben den Materialien für die Deckschichten und den Kern auch die Art des Randabschlusses des Verbundelementes variiert. Neben zwei unterschiedlichen Profilen wurde auch der Einfluss einer Verklebung oder mechanischen Befestigung des Randabschlusses untersucht. In Abb. 1 oben ist das Prinzip einer üblichen Holztafelwand mit ihrer Kleinteiligkeit zu sehen. Abb. 1 unten zeigt das Prinzip eines Verbundelementes: Deckschichten und dämmender Kern sind zu einem Verbundelement miteinander verklebt.

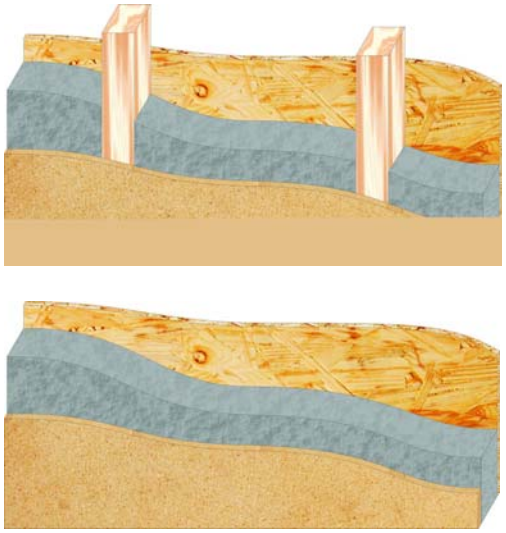


Abb. 1: Prinzipskizze eines Außenwandaufbaus; oben: herkömmliches Holztafelelement mit seiner Kleinteiligkeit; unten: Prinzip eines Verbundelements

In Abb. 2 sind die Bezeichnungen der Elemente verdeutlicht. Als Deckschichten lassen sich weitestgehend alle bekannten Holzwerkstoffe verwenden. In den Untersuchungen am WKI wurden sowohl OSB als auch Gipsfaserplatten in jeweils 12 mm Dicke verwendet. Die Platten wurden streifenförmig mit einem einkomponentigen Polyurethan-Kleber (PU) mit dem Kern verklebt. Als Material für den Kern wurden anfangs Versuche mit Wabenkarton, Wellpappe und Holzfaserdämmplatten mit unterschiedlichen Rohdichten verwendet. Die Randprofile wurden aus handelsüblichem, getrocknetem Fichtenvollholz gefertigt.

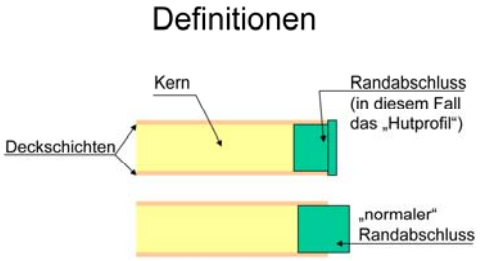


Abb. 2: Definitionen der einzelnen Elemente des Verbundquerschnitts

Für die Untersuchungen wurden folgende Randbedingungen besonders berücksichtigt:

- Beanspruchungen durch Längskräfte und Plattenbiegung,
- Beanspruchungen durch Horizontalkräfte in Tafelebene
- Verbindungen des Randabschlusses mit den Deckschichten
- Auflagerdrehwinkel der Decken
- Beanspruchungen durch Konsollasten
- Wände mit Öffnungen

Das Tragverhalten von Sandwichelementen kann sowohl mit Versuchen, aber auch unter anderem mit einer linearen FE-Simulation mit dem Programmsystem „ANSYS 7" oder „COMSOL Multiphysics" untersucht werden. Das orthogonal-anisotrope Materialgesetz ermöglicht es, die stark richtungsabhängigen Materialeigenschaften des Holzes abzubilden.

Die experimentellen Untersuchungen wurden vorrangig an großformatigen Prüfkörpern durchgeführt. Dabei wurde das Trag- und Verformungsverhalten unter vertikaler und horizontaler Last sowie das Verformungsverhalten bei klimatischer Beanspruchung besonders berücksichtigt. An kleinformatigen Prüfkörpern wurden Materialeigenschaften ermittelt, sowie eine Optimierung des Randabschlusses durchgeführt.

2 Zusammenfassung der Ergebnisse

2.1 Deckschichten

Die Deckschichten erweisen sich als vorteilhafter, je größer die Zug- und Druckfestigkeit sowie -steifigkeit ist. Je nach Anwendungsbereich sind die Werte hinsichtlich der Wasserdampfdiffusionsfähigkeit anzupassen. Eine Optimierung ist durch die Art und die Menge des verwendeten Klebers und die Art und Weise des Kleberauftrages möglich. Eine geschlossene, vollflächige Verklebung mit einem Kleber auf Polyurethan-Basis wirkt je nach Dicke des Klebstofffilmes wie eine Dampfsperre. So ist es durchaus denkbar, die eine Deckschicht mit einem vollflächigen Klebstofffilm auf der Dämmschicht zu verkleben, die andere Seite streifenförmig oder gar nur punktuell. Besonders bei an sich diffusionsoffenen Deckschichten, wie Gipsbauplatten, bieten sich hier interessante Möglichkeiten. Weiterhin muss die Deckschicht ein möglichst stark eingeschränktes Längenänderungsverhalten bei Feuchte- und Temperaturänderungen aufweisen. Dies ist umso wichtiger, je schlanker das Wandbauteil ist. Die Verformungen des gesamten Wandbauteils infolge Dehnungen der Deckschichten steigen überlinear mit der Schlankheit der Wand. Die in den Prüfungen verwendeten OSB können dabei durchaus schon als untere Grenze betrachtet werden. Werkstoffe mit ausgeprägterem Dehnverhalten in Plattenebene unter Feuchte- bzw. Temperaturänderungen können als wenig geeignet betrachtet werden. Gipsplatten sind in dieser Hinsicht sehr gut geeignet. Eine weitere Eigenschaft, die die Deckschicht aufweisen sollte, ist die direkte Beschichtbarkeit z.B. mit Tapeten oder Innenputzen. Auch hier ist das Dehnverhalten in Plattenebene von großer Bedeutung. Die Verwendung von Holzwerkstoffen wird unter dem vorgenannten Gesichtspunkt als eher nachteilig betrachtet. Um bei diesen eine tapezierfähige oder verputzbare Oberfläche zu bekommen, ist eine zusätzliche Bekleidung mit einer Gipsbauplatte erforderlich.

2.2 Kern

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass eine höhere Querzug- und Schubfestigkeit des Kerns vorteilhaft ist, da bei sehr niedriger Querzugfestigkeit unter Vertikalbeanspruchung ein Versagen durch Erreichen der Festigkeit eintreten kann. Weiterhin sind an das Bauteil Anforderungen an die Wärmeleitfähigkeit gestellt. Da diese vor allem bei üblichen Holzfaserdämmplatten in dem nach heutigem Wissen zur Verfügung stehenden Rohdichtebereich nahezu proportional zur Querzugfestigkeit und zur Rohdichte ansteigt, muss ein Optimum gefunden werden. Es stellte sich bei den Untersuchungen heraus, dass sich bei einer Rohdichte von ca. 230 kg/m³ bis ca. 250 kg/m³ eine geeignete Kombination aus ausreichender Wärmeleitfähigkeit und ausreichender Festigkeit und Steifigkeit bildet. Durch weitere Optimierung der Holzfaserdämmplatten bei der Herstellung können noch bessere Ergebnisse erzielt werden.

2.3 Kleber

Der Klebstoff muss in der Lage sein, auch unter Feuchtigkeitseinwirkung dauerhaft den Kern mit den Deckschichten zu verbinden. Für die Verklebung von Holz auf Holz gibt es ausgereifte Klebstoffsysteme auf Kunstharzbasis, die in der industriellen Holzwerkstoffherstellung oder bei der Herstellung von geklebten Holztafeln seit Jahren Verwendung finden. Diese haben aber in der Regel den Nachteil, dass sie Wärme und hohen Druck benötigen, um eine ausreichende Verbindung herstellen zu können. Klebstoffe auf Polyurethan-Basis sind in der Regel kostenintensiver, benötigen aber keinen hohen Druck, um eine funktionsfähige Klebeverbindung realisieren zu können. Wärme beschleunigt die Aushärtung, ist aber nicht zwingend notwendig.

Weiterhin ist die Eigenschaft der Bildung einer Dampfsperre für gewisse Anwendungsbereiche von Vorteil. Somit sind die filmbildenden und Wasserdampfdiffusionseigenschaften von Bedeutung. Je nach Anwendungsbereich und Einsatzgebiet der Wandelemente und nach Fertigungsmöglichkeiten muss eine Optimierung der Klebeverbindung durchgeführt werden. Die in den Versuchen verwendeten Klebstoffe auf Polyurethan-Basis haben sich als grundsätzlich geeignet erwiesen.

2.4 Vergleich Anforderungen – Versuchsergebnisse

Zusammenfassend sind die zu Beginn gestellten Anforderungen an die Verbundelemente den Versuchsergebnissen gegenüber gestellt und in Abb. 3 ist die maximale Vertikallast ausgewählter Wandverbundquerschnitte dargestellt:

- Anforderung an die Tragfähigkeit:
  - 5 kN/m als aufnehmbare Horizontalkräfte sind bei umlaufendem Randabschluss problemlos realisierbar, bei teilweisem Randabschluss können mit konstruktiven Maßnahmen wie z.B. dickeren Deckschichten die geforderten Kräfte aufgenommen werden.
  - 20 kN/m als aufnehmbare Vertikalkräfte sind von nahezu jeder der untersuchten Konstruktion aufnehmbar, mit entsprechenden konstruktiven Maßnahmen können auch noch größere Kräfte aufgenommen werden.
  - Vertikale Einzellasten (aus z.B. Pfetten) sind über Einzeltragglieder aufzunehmen.
  - Konsollasten (aus z.B. Hängeschränken) sind bis zu einer Größe von 0,4 kN/m problemlos realisierbar.
  - Eine kraftschlüssige Verbindung zwischen den Bauteilen ist durch einen umlaufenden Randabschluss realisierbar.

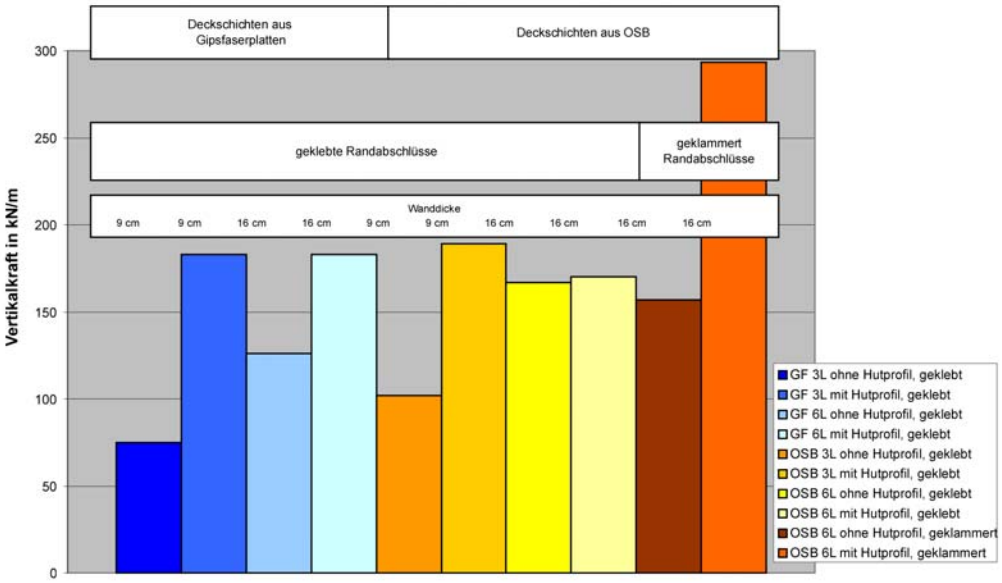


Abb. 3: maximale Vertikalkraft ausgewählter Wandverbundquerschnitte

- Bauphysikalische Anforderungen:
  - Das Verformungsverhalten im Differenzklima ist bei schlanken, freistehenden Wänden unter Umständen größer als maximal zugelassen; bei Außenwänden sind die Forderungen von einer maximalen Verformung von 3 mm realisierbar, da diese in der Regel relativ gedrungen sind; konstruktive Maßnahmen, wie z.B. kraftschlüssige Verbindung mit anderen Bauteilen, sorgen dafür, dass die Verformungen im Differenzklima kleiner als 3 mm sind.
  - Die Anforderungen an den Mindestwärmeschutz können über eine Variierung der Wanddicke erfüllt werden.

3 Nutzung der Ergebnisse

Die Nutzung der Ergebnisse kann sich auf vielfältige Weise ergeben. Das WKI erwartet ein Umdenken in der Sandwichfertigung: Weg von den Hartschäumen und hin zu Kernen aus nachwachsenden Rohstoffen. Die Sandwichbauweise kann aber auch neben den vielen bereits bestehenden Bausystemen eine gleichberechtigte Alternative darstellen und den Holzbau dadurch bereichern. Es sind unterschiedliche Möglichkeiten der Fertigung von Verbundquerschnitten für lastabtragende Wände denkbar. Von der handwerklichen Einzelfertigung bis hin zur vollautomatischen Serienfertigung gibt es ein weites Spektrum. Sehr hohe Investitionen für die vollautomatische Serienfertigung lassen sich nur bei großen Fertigungsmengen rechtfertigen. Die handwerkliche Einzelfertigung ist dagegen recht arbeitsintensiv. Zudem fallen hierbei die Kosten für eine Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung umgerechnet auf einen Quadratmeter gefertigte Wand recht hoch ins Gewicht.

Die nachstehend aufgeführten Möglichkeiten der Nutzung stellen keinen Anspruch auf Vollständigkeit dar. Grundsätzlich muss eine Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für die zu fertigenden Elemente erwirkt werden. Je nach Art der Umsetzung sind spezifische Anforderungen in der Allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung festzulegen.

3.1 Baukastensystem mit vorgegebenen Elementabmessungen und Vertrieb über den Handel

Es ist vorstellbar, dass in industrieller Fertigung Systemelemente mit vorgegebenen Abmessungen hergestellt und über den Handel verkauft werden. Eventuelle Sondermaße müssen auftragsbezogen gefertigt werden. Diese Art der Fertigung und des Vertriebes wird im Möbelbau bereits durchgeführt. Eine Fertigung tragender Wände stellt aber höhere Sicherheitsanforderungen. Wegen der hohen Sicherheitsanforderungen wäre es denkbar, einen verantwortlichen Montageleiter und z.B. die Bereitstellung eines Mobilkranes in einem gewissen Umfang bereits beim Verkauf der Elemente mit anzubieten. Die Montage auf der Baustelle würde dann von angeleiteten Laien erfolgen. Daher müssen die Verbindungen auf der Baustelle mit einfach handhabbaren Verbindungsmittel wie z.B. Schrauben gewährleistet werden. Ähnlich wie bei der Möbelfertigung sind komplett vorgefertigte Elemente mit vorgebohrten Löchern für Schrauben und andere Beschläge denkbar.

3.2 Individuelle Elementfertigung durch die Fertighausindustrie

Eine weitere Möglichkeit der Umsetzung kann von der Fertighausindustrie aufgegriffen werden. Diese kann ihr bisher verwendetes System durch Verbundelemente austauschen. In diesem Fall wäre die Produktion eines Endloselementes denkbar, welches bei den geforderten Elementbreiten gekappt und mit einer Randeinfassung versehen wird. Je nach Größe und Anzahl der Fenster und Türen kann ein Ausschneiden der Öffnungen aus dem Endloselement sinnvoll sein oder die Fertigung von gesonderten Elementen für die Öffnungen. Eine Optimierung kann aber erst dann durchgeführt werden, wenn die Kosten zur Herstellung solcher Elemente bekannt sind. In Abb. 4 ist ein solches Element dargestellt. Die roten Linien sollen die noch zu verwendenden Hölzer darstellen. Ansonsten besteht das Element nur aus Dämmung mit einer beidseitigen Beplankung.

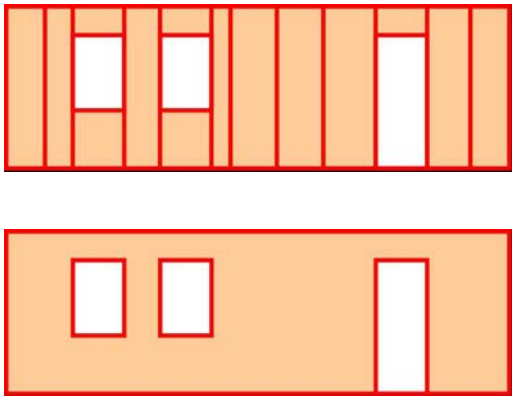


Abb. 4: Skizze einer Außenwand; oben: herkömmliches Holztafelelement; unten: Holztafelelement mit Verbundquerschnitten

3.3 Individuelle Elementfertigung durch handwerklich orientierte Unternehmen

Handwerklich orientierte Unternehmen können z.B. durch Erwerb von Lizenzen die Produktion und Montage von Elementen aus Verbundquerschnitten übernehmen. Inhaber der Allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung könnte in diesem Fall eine externe Stelle sein, die dann durch Vergabe der Lizenzen in unterschiedlichen Produktionsstätten herstellt. Eine Eignung zur Herstellung der geklebten Elemente muss innerhalb einer Fremdüberwachung überprüft werden. Eine vergleichbare Struktur ist bei Herstellung und Vertrieb von Nail-Web-Trägern zu finden. Abb. 5 zeigt ein herkömmliches Giebelelement. Besonders hier wird die Problematik der Kleinteiligkeit deutlich. Die vertikalen Rippen müssen alle schräg angeschnitten und so positioniert werden, dass der Plattenstoß der Beplankung auf diesen zu liegen kommt. Abb. 6 zeigt dagegen das gleiche Giebelelement mit Verbundquerschnitten.

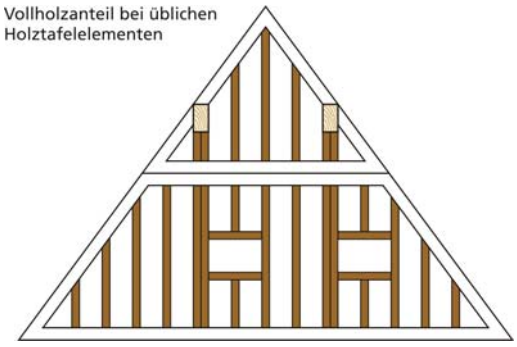


Abb. 5: Vollholzanteil eines herkömmlichen Giebelelementes

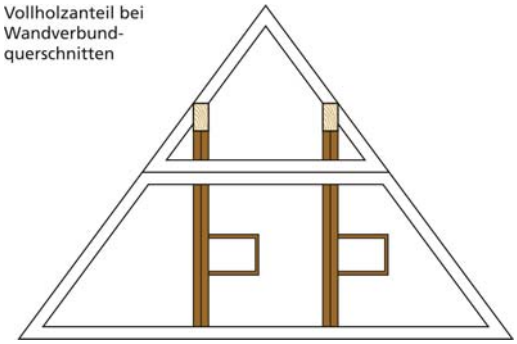


Abb. 6: Vollholzanteil bei Elementen mit Verbundquerschnitten

3.4 Fertigung einer Sandwichplatte

Die Holzwerkstoffindustrie könnte die Möglichkeit aufgreifen, eine z.B. 16 cm oder 20 cm dicke Platte im Großformat zu fertigen, aus welcher dann die einzelnen Elemente in beliebigen Formen geschnitten werden (Abb. 7). Analog zur Möbelfertigung, in der großformatige Platten mit Hilfe einer Verschnittoptimierung in kleine Elemente zerlegt werden, können auch bei dem entwickelten Sandwichelement z.B. Giebeldreiecke, Brüstungselemente und Erkerelemente aus einer großen Sandwichplatte geschnitten werden. Die Ränder der einzelnen Elemente, die nahezu beliebige Abmessungen aufweisen können, werden wie in Abb. 8 angedeutet, mit einem Profil versehen, in welches dann der Randabschluss gesteckt und mit den Deckschichten befestigt wird.

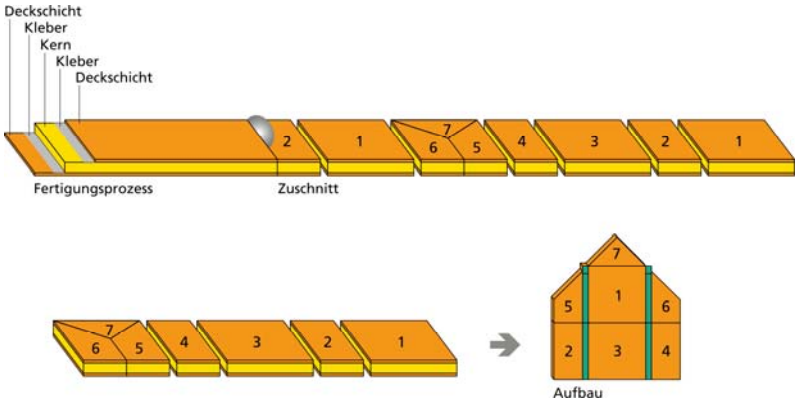


Abb. 7: Prinzipskizze einer möglichen Fertigung von Sandwichelementen

Abb. 8: Prinzipskizze einer möglichen Kantenbearbeitung der Sandwichelemente

3.5 Vollautomatische Fließfertigungen

Die höchstmögliche Automation erscheint nach heutigem Stand wie folgt und ist in Abb. 9 schematisch dargestellt: Eine dünne Holzwerkstoffplatte wird im Endlosverfahren (Kalanderverfahren oder Conti-Roll) gefertigt und direkt nach der Klimatisierung von einer CNC-Maschine bearbeitet. Diese fräst Öffnungen für z.B. Fenster und Türen, aber eventuell auch schon für Steckdosen und andere Installationen. Die ausgefrästen Teile der Fenster und Türen werden entfernt und dem Produktionsprozess wieder zugeführt. Da der Anlage die Abmessungen der Öffnungen für Fenster und Türen bekannt sind, werden auf einer separaten Anlagen die Randabschlüsse auf die entsprechende Länge gekappt. Die abgelängten Randabschlüsse werden auf die Kanten der Holz-

werkstoffplatte gelegt. Drahtklammern oder Nägel sorgen für eine kontinuierliche Verbindung zwischen Platte und Randabschluss. Nachdem alle Ränder mit einem Randabschluss versehen sind, liegt ein fünfseitig geschlossener Kasten vor, in den z.B. beleimte Holzfasern, Hobelspäne o.ä. eingestreut werden können. Mit einer weiteren Platte, die z.B. auch eine Holzwerkstoff-, aber auch eine Gipsplatte sein kann, wird das Dämmmaterial auf die erforderliche Dicke komprimiert. Auch diese Platte wird mit dem Randabschluss kontinuierlich verbunden. Je nach gewähltem Kleber und Dämmmaterial muss das Element eventuell noch gepresst werden.

Quellen

[1] Herlyn J.W., Kessel M., Rüther N. und Schönhoff T. „Verbundquerschnitte aus Holzwerkstoffen für lastabtragende Wände" Schlussbericht des Forschungsvorhabens 2004

[2] Rüther, N., Plinke, B.; Meinlschmidt, P.; Herlyn, J. W.: Klebeverbindungen von Vollholz mit mineralisch gebundenen Plattenwerkstoffen. iVTH Kurzbericht 08/07

[3] Rüther, N.: Eine viel beachtete Verbindung. S. 52 ff Mikado 09/2007

[4] Johann W. Herlyn, Rüther Norbert: Verbundquerstoffe aus Holzwerkstoffen für lastabtragende Wandelemente, bauen mit holz 3/2004, S. 27-30

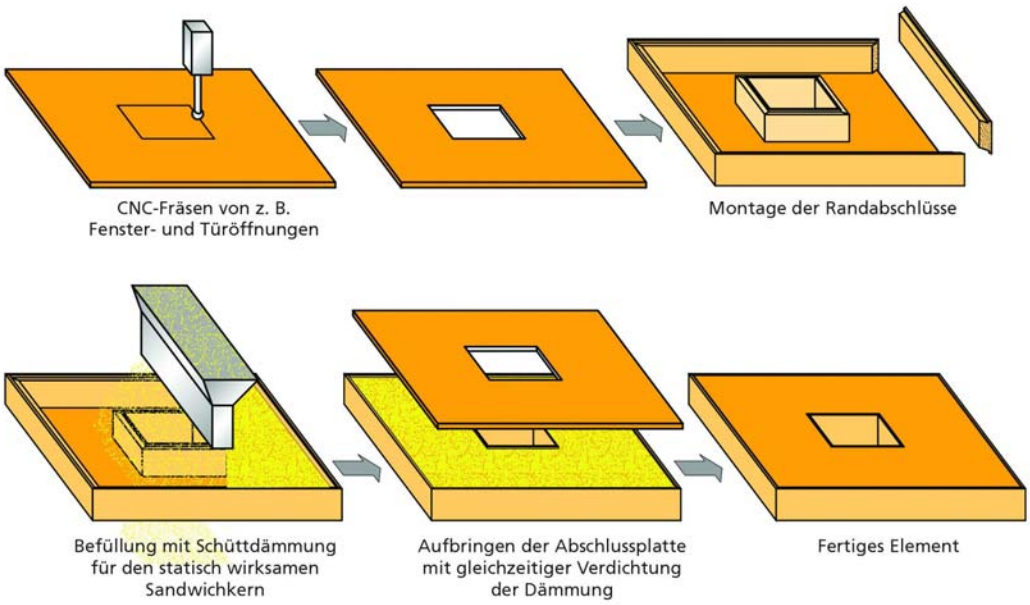


Abb. 9: Prinzipskizze einer möglichen vollautomatischen Fließfertigung