Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 117 (1999)
Heft: 43

Artikel: Hochfeste Fasern für Zug- und Biegestösse im Holzbau
Autor: Meierhofer, Ulrich A.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-79814

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 13.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Ulrich A. Meierhofer, Dübendorf

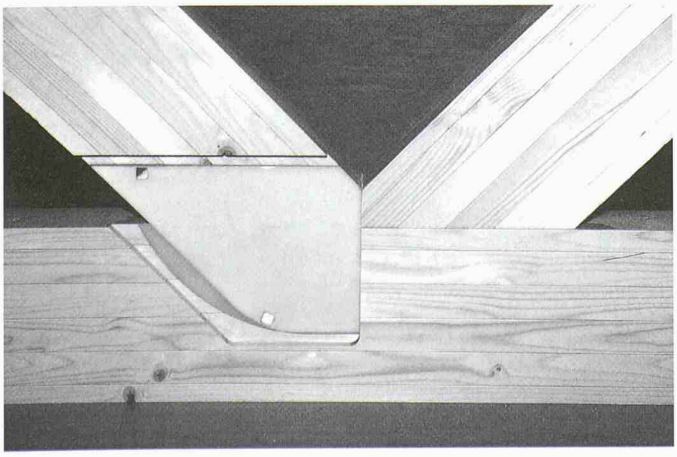
Hochfeste Fasern für Zug- und Biegestösse im Holzbau

Anhand von Zug- und Biegeversuchen wurden Holzverbindungen mit plattenförmigen, kohlen- und glasfaserverstärkten Kunststofflamellen entwickelt, die eine hohe Tragfähigkeit und Verbindungssteifigkeit aufweisen. Besonders wichtig war der Abbau der sekundären Querzugspannungen im Stossbereich, was vor allem durch eine geeignete Geometrie des Anschlusses erzielt werden kann. Weitere Faktoren, die die Leistungsfähigkeit beeinflussen, sind z.B. die Wahl und Kompatibilität von geeigneten Materialien, Qualität der Verarbeitung und Steifigkeit der Verbindungslamelle.

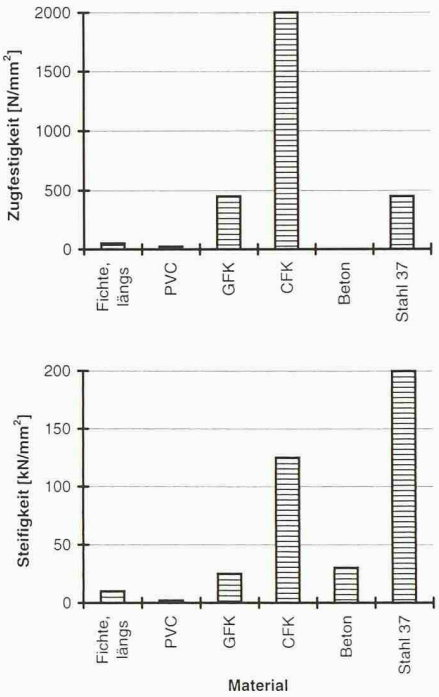
Seit rund fünfzehn Jahren hat die Beliebtheit des Holzbaus in erstaunlichem Masse zugenommen. Verschiedene, teilweise spektakuläre Ingenieurholzbauten haben neue Marksteine gesetzt. Diese Entwicklung ist auf verschiedene Ursachen zurückzuführen. Einer der wichtigsten Faktoren ist der verbreitete Einsatz von Lagenhölzern, insbesondere von Brettschichtholz, mit dem verschiedene, dem Massivholz naturgemäss gegebene Grenzen durchbrochen werden konnten (Dimensionen, Homogenität). Verbindungen bilden sowohl im handwerklichen als auch im Ingenieurholzbau einen dominierenden und begrenzenden Faktor. Erneuerungen im Verbindungsbereich haben deshalb stets auch die Gesamtkonzeption von Tragwerken beeinflusst. So konnte sich beispielsweise der Ingenieurholzbau nur durch den in der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts sich verbreitenden Einsatz von Stahl im Holzbau etablieren.

Seit einigen Jahren sind nun manchenorts Forschungsarbeiten und Entwicklungen im Gang, um das Potential von hochfesten Fasern im Holzbau nutzbringend einzusetzen. Die hohe Festigkeit und Steifigkeit solcher Fasern, ihre Korrosionsbeständigkeit und ihre vergleichsweise geringe Wärmeleitfähigkeit versprechen neue Einsatzmöglichkeiten. 1994 wurde in den USA die Verstärkung von Brettschichtholz mit hochfesten Fasern patentiert. Das verbreitete Interesse an der Kombination von Holz mit hochfesten Fasern lässt sich auch an der Tatsache ablesen, dass im US-Staat Maine kürzlich ein entsprechendes spezialisiertes Labor (Advanced Engineered Wood Composites Facility) eingerichtet wurde, das im vergangenen Juli eine internationale Tagung zur Thematik durchführte.

Die Verwendung von hochfesten Fasern im Verbindungsbereich stand bei einem 1990 gestarteten Forschungs- und Entwicklungsprogramm der Abteilung Holz der Empa Dübendorf im Vordergrund [1]. Die Grundidee bestand darin, Holzteile durch Platten aus faserverstärkten Kunststoffen (FVK) zu verbinden, indem diese in Schlitze eingelegt und die Holzräume mit giessfähigen Kunststoffen, i.A. Epoxidharze, verfüllt werden (Bild 1). Die bisherigen Resultate von entsprechenden Versuchen finden sich im Detail in verschiedenen Berichten [2, 3]. Nachfolgend sind einige Ergebnisse zusammengefasst sowie zusätzliche Resultate von Langzeitversuchen dargestellt.



1
Versuchsmässige Ausführung eines Fachwerkknotenpunkts mit einer geöffneten Verbindung zum Sichtbarmachen der GFK-Verbindungsplatten

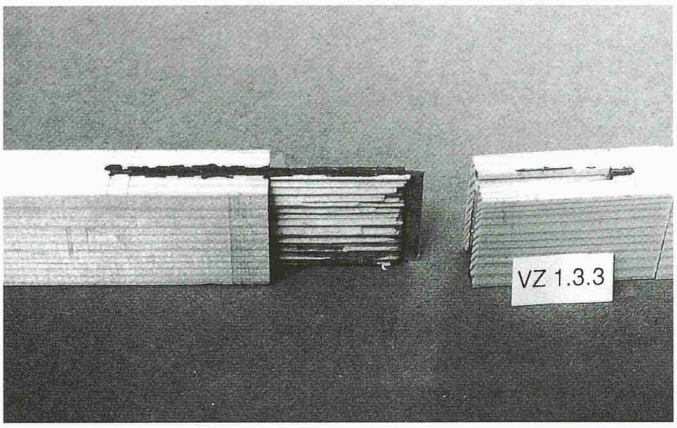


2
Gegenüberstellung von Festigkeiten und Steifigkeiten (E-Moduln) verschiedener Werkstoffe
CFK: Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
GFK: Glasfaserverstärkter Kunststoff
PVC: Polyvinylchlorid

Faserverstärkte Kunststoffe

Die Entwicklung hochfester Fasern aus Kohlenstoff, Glas, Bor, Aramid usw. sowie diejenige ihrer Anwendung in den letzten Jahrzehnten ist äusserst bemerkenswert; sie wurde durch Arbeiten der Empa Dübendorf massgeblich unterstützt [4, 5]. Diese hochfesten Fasern gelangen üblicherweise in einer Kunstharzmatrix - z.B. Polyester oder Epoxide - zur Anwendung. In dieser Form weisen FVK eine Struktur auf, die derjenigen von Holz ähnlich ist (Cellulosefibrillen in einer Ligninmatrix). Die Festigkeiten und Steifigkeiten unterscheiden sich jedoch stark (Bild 2).

Die Eigenschaften von FVK sind in weiten Grenzen, je nach Fasergehalt und Beschaffenheit der Fasern, variierbar. Sie werden als Drähte, als Litzen oder als Platten in einem Endlos-Verfahren hergestellt. Die Drahtdurchmesser reichen bis zu einigen Millimetern, die Plattendicken variieren von rund 0,5 mm bis 10 mm.



3
Prüfkörper für Zugversuche (nach dem Versuch)

Holzverbindungen mit hochfesten Fasern

Holzverbindungen mit hochfesten Fasern können auf verschiedene Arten ausgebildet werden. Auch Kombinationen mit den üblichen metallischen Verbindungsmitteln (Schrauben, Nägel, Bolzen) sind möglich. In dem durch das Projekt vorgegebenen Rahmen werden die Kräfte jedoch allein durch das Holz, die hochfesten Fasern und die Kunststoffe als Kleber und Trägermaterial übertragen. Zwei Typen von Verbindungskonstruktionen bieten sich dabei an. Bei einer sichtbaren Variante werden auf der Aussenseite der Tragelemente Laschen aus FVK aufgeklebt. Andererseits können FVK-Stäbe oder -Platten auch in Löcher oder Schlitze eingelegt und die Hohlräume nachträglich mit giessfähigen Kunststoffen verfüllt werden. Die Verbindungsmittel sind dann überdeckt und weisen hinsichtlich Ästhetik, Brandsicherheit und Korrosionsbeständigkeit Vorteile auf.

Bei den Entwicklungsarbeiten an der Empa wurden für die Stossverbindung von Holzbauteilen den FVK-Platten oder -Lamellen gegenüber den -Stäben der Vorzug gegeben: Die Lamellen lassen sich einfacher einfügen, das Ausgiessen der Hohlräume ist einfacher und für die Übertragung der Kräfte steht eine grössere Ober- bzw. Scherfläche zur Verfügung.

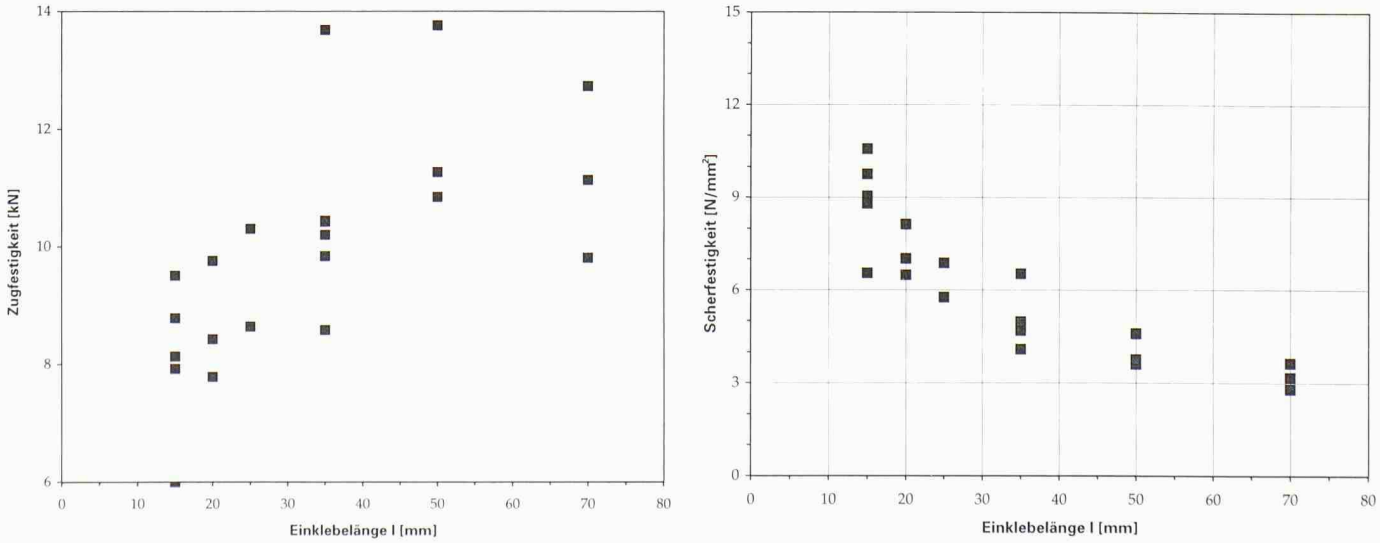
Mit dem Ausgiessen der Hohlräume ist eine direkte und problemlose Übertragung der Druckkräfte von entsprechenden Querschnittsteilen gewährleistet. Für die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten stand deshalb die Zugübertragung im Vordergrund; bei den Biegeversuchen richtete sich das Augenmerk im Wesentlichen auf das Verhalten auf der Zugseite.

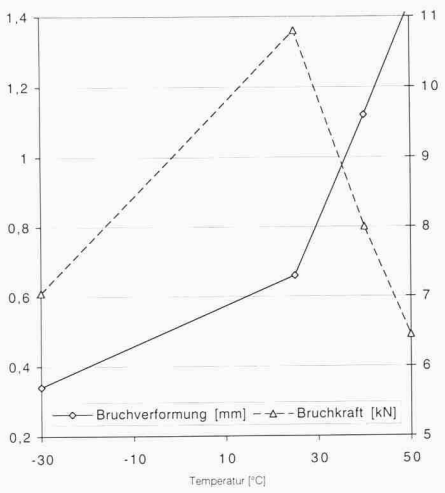
Zugversuche an kleinen Prüfkörpern

Erste Erfahrungen wurden an Zugversuchen bei verhältnismässig kleinen Schulterproben aus strukturstörungsfreiem Fichtenholz mit einem Prüfquerschnitt von h = 30 und b 30 mm, einem mittigen Stoss und einer eingeklebten Lamelle (Kohlenstofffasern und Epoxidharzkleber) gesammelt (Bild 3). Neben der Variation der Materialien für Lamellen und Kleber ging es darum, erste Erfahrungen über geeignete und praktikable Abmessungen und Geometrien von Holz- und Lamellenquerschnitt sowie Schlitztiefe und -dicke zu erhalten [2]. Weitere Versuchsparameter waren Einklebelänge, Dicke und Dehnsteifigkeit der Lamellen, Netto-Holzdicke, Tragfähigkeit und Verarbeitbarkeit des Klebers, Klebfugendicke, Oberflächengüte der Verankerungsschlitze und Temperatur. Auch wurden verschiedene Massnahmen für den Abbau von sekundären Querzugspannungen im Bereich des mittigen Stosses ausprobiert.

Neben all den erwähnten Faktoren hat auch die Herstellung (Art und Weise, Sorgfalt) einen wesentlichen Einfluss auf die Festigkeit der Verbindung. In diesem Zusammenhang ist die Verarbeitbarkeit des Klebers sehr wichtig: Niedrigviskose Klebstoffe sind naheliegenderweise gut giessbar, haben aber verschiedene andere nachteilige Eigenschaften: sie können durch kleinste Fugen leicht ausfliessen und weisen ein grösseres Volumenschwinden sowie einen oftmals geringeren Grad der Vernetzung bei der Polymerisation auf.

4
Zugfestigkeit der Verbindung und (nominelle) Scherfestigkeit bei der Lamelle in Abhängigkeit der Einklebelänge (l = ½ Lamellenlänge)





5
Einfluss der Prüftemperatur auf die Zugfestigkeit

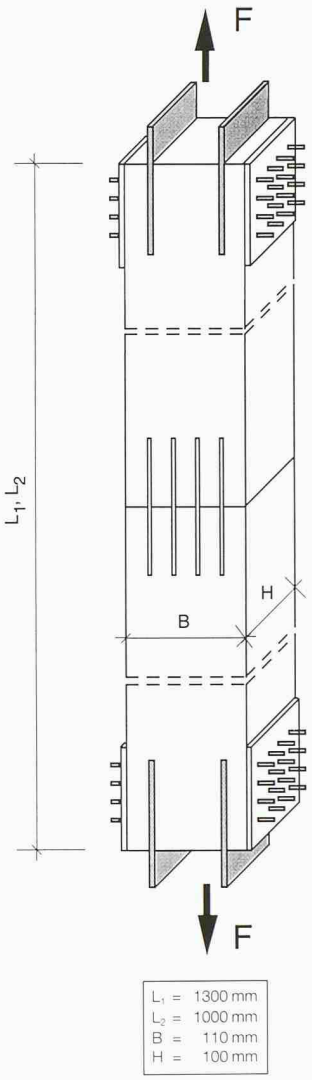
Die in dieser Versuchsphase registrierten Festigkeiten schwankten in einem weiten Bereich; bei den optimierten Proben wurden jedoch beachtliche Tragfähigkeiten bis 14 kN, bzw. (nominelle) Scherfestigkeiten bei der Leimfuge bis über 10 N/mm² erreicht. Dies bedeutet, dass die Scherfestigkeit des Holzes zur massgebenden Grösse in der Verbindung wird (Bild 4).

Entsprechende Zugversuche zeigten, dass die Prüftemperatur das Bruchverhalten deutlich beeinflusst (Bild 5 und [6]). Dies dürfte nicht zuletzt auf die unterschiedlichen Temperaturausdehnungskoeffizienten der verschiedenen beteiligten Materialien zurückzuführen sein, die festigkeitsmindernde Eigenspannungen verursachen. Von Bedeutung ist zudem, dass bei Temperaturen über rund 50 °C sowohl Steifigkeit als auch Festigkeit der meisten Epoxidharze deutlich abnehmen. Wirksame Lösungen und Gegenmassnahmen werden noch gesucht.

Zugversuche an grossen Prüfkörpern

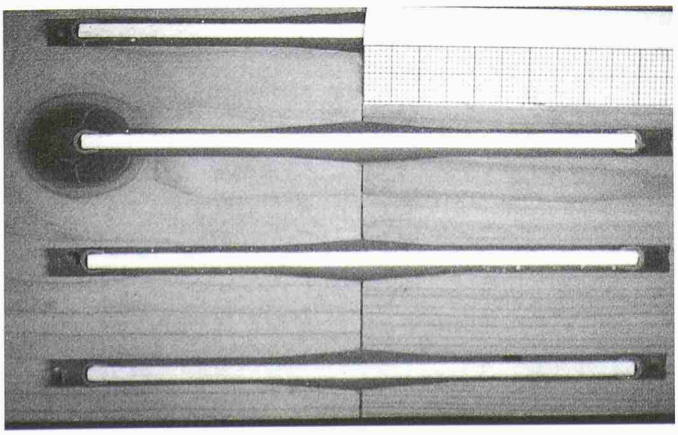
Bei anschliessenden Versuchen an grösseren Proben aus kommerziellem Fichten-Brettschichtholz mit einem Querschnitt von 110×100 mm² (Bild 6) wurde der mittige Stoss aus praktischen Gründen überwiegend mit Lamellen aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) hergestellt (die Tragfähigkeit der Lamellen wurde nur zu einem geringen Teil ausgenutzt). Es zeigte sich, dass der für die kleinen mit Kohlenstofffasern verbundenen Proben optimale Kleber infolge unterschiedlicher Haftungseigenschaften auf GFK ein weniger gutes Verhalten aufwies. Der Kleber musste deshalb erneut optimiert werden; für sämtliche Versuche wurden jedoch weiterhin Epoxidharze verwendet. Zusätzlich zu den bei den kleinen Proben bereits verwendeten Versuchsparametern wurden bei den grossen Proben auch die Anzahl der Lamellen und deren Anordnung variiert. Ausserdem wurden die Einflüsse verschiedener Klimaeinwirkungen getestet.

Ein Hauptziel dieser Versuchsphase war die geometrische Optimierung der Verbindung, um die verschiedenen massgeblichen Kriterien zu berücksichtigen: Zug- und Scherfestigkeit des Holzes in den

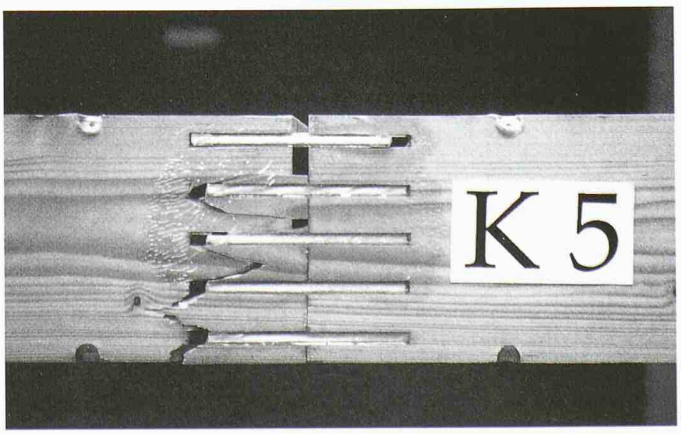


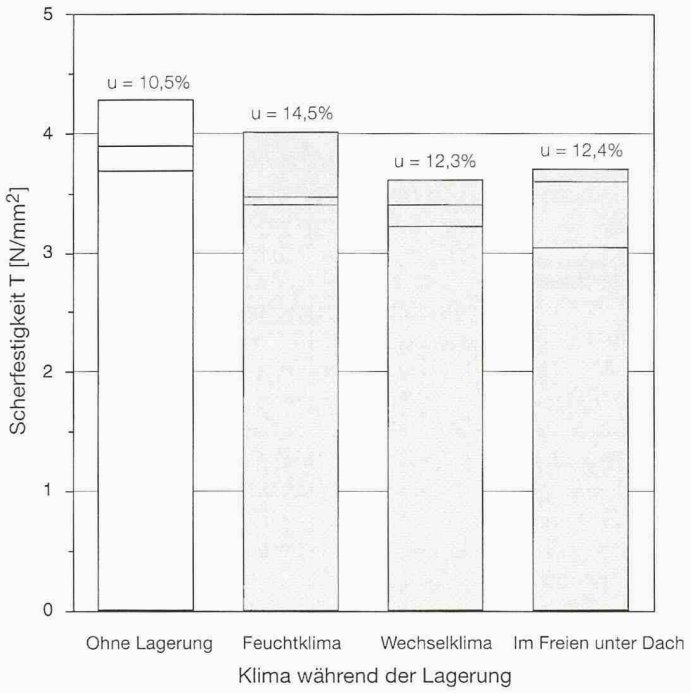
6
Probendisposition für Zugversuche an grossen Prüfkörpern

7
Die Anordnung einer Fase bei den Lamellenschlitzen (im Winkel 1:15) bewirkt durch eine dickere Leimfuge beim Stoss einen «weicheren» Übergang und reduziert damit die Spannungsspitzen und sekundären Querzugspannungen im Stossbereich. Dies führte zu einer Steigerung der Scherfestigkeiten von bis zu 25%



8
Bruch- bzw. Stossbereich einer Probe mit fünf Anschlusslamellen nach Erreichen der Zugfestigkeit. Die Probe weist sowohl Zug- als auch Scherbrüche auf





Feuchtklima: 20 °C/95% r.F.
Wechselklima: 20 °C/95% r.F. – 20 °C/35% r.F.
Im Freien unter Dach: Jahreszeitliche Schwankungen

9
Einfluss diverser Klimalagerungen auf die Zugfestigkeit (jeweils drei Proben)

jeweils kritischen Zonen sowie die Minimierung der sekundären Querzugspannungen bei der Krafteinleitung. Eine der wirksamsten Massnahmen in dieser Hinsicht war das Anfasen der Schlitze (Bild 7), womit die Tragfähigkeit um rund 25% gesteigert werden konnte.

Drei bis fünf Lamellen mit einer Einklebelänge zwischen 50 und 100 mm wurden in verschiedenen Anordnungen im Querschnitt gruppiert. Die Leistungsfähigkeit eines Anschlusses stieg generell mit zunehmender Anzahl der Lamellen, wobei sich ein Lamellenabstand von rund 20 mm und eine Lamellenlänge von 100 bis 150 mm als optimal erwiesen. Die leistungsfähigsten Verbindungen übernahmen eine Tragkraft von nahezu 25 t, was, bezogen auf den Bruttoholzquerschnitt, einer Zugspannung von 22,7 N/mm² entspricht.

Analog zu den kleinen Proben wurden auch bei den grossen eine Zunahme der Zug- und eine Abnahme der nominellen Scherfestigkeit mit zunehmender Einklebelänge beobachtet. Bezogen auf den Nettoholzquerschnitt wurden Zugfestigkeiten von gegen 40 N/mm² und damit auch die Zugfestigkeit des Fichtenholzes erreicht. Dies ist eine Limite, die – ebenso wie die Scherfestigkeit des Holzes – bei der Dimensionierung eines Anschlusses eine begrenzende Grösse darstellt. Bei einem optimal dimensionierten und hergestellten Anschluss übersteigt die Scherfestigkeit der Klebfuge diejenige des angrenzenden (Fichten-)Holzes, und die Scher- und Zugfestigkeit des Holzes werden gleichermassen ausgeschöpft. Dies ist beispielsweise bei der in Bild 8 dargestellten getesteten Verbindung der Fall.

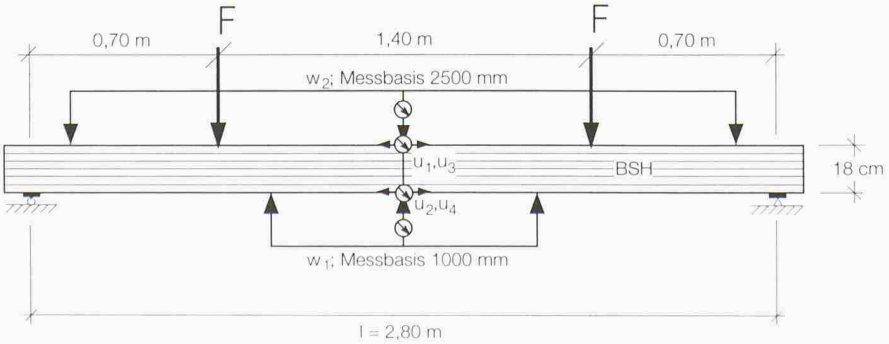
In den praktischen Anwendungen treten zwischen Holz und FVK-Teilen zeitabhängige differentielle Längenänderungen auf, in erster Linie aufgrund der feuchtebedingten Schwind- und Quellbewegungen des Holzes. Dadurch werden sekundäre Spannungen in der Verbindungsfuge induziert, die je nach Umständen höhere Werte annehmen und die Tragfähigkeit beeinträchtigen können.

Um einige Hinweise über allfällige Schwächungen zu erhalten, wurden während über einem Jahr verschiedene Klimaversuche durchgeführt und zwar durch Lagerung im:

- Feuchtklima: 20 °C und 95% r. F.
- Wechselklima: im Sechswochenrhythmus bei 20 °C und 95% r. F. bzw. 20 °C und 35% r. F.
- im Freien unter Dach: natürliche Wechsel der Luftfeuchte und -temperatur.

Bild 9 zeigt die ermittelten Scherfestigkeiten der klimagelagerten Proben bei leicht unterschiedlicher Prüffeuchte im Vergleich zu den Versuchsergebnissen der Prüfkörper ohne Alterung. Die Scherfestigkeit der gealterten Proben erwies sich als durchschnittlich 15% niedriger. Hervorzuheben ist insbesondere die nicht wesentlich grössere Schwächung durch die scharfe Wechsellagerung.

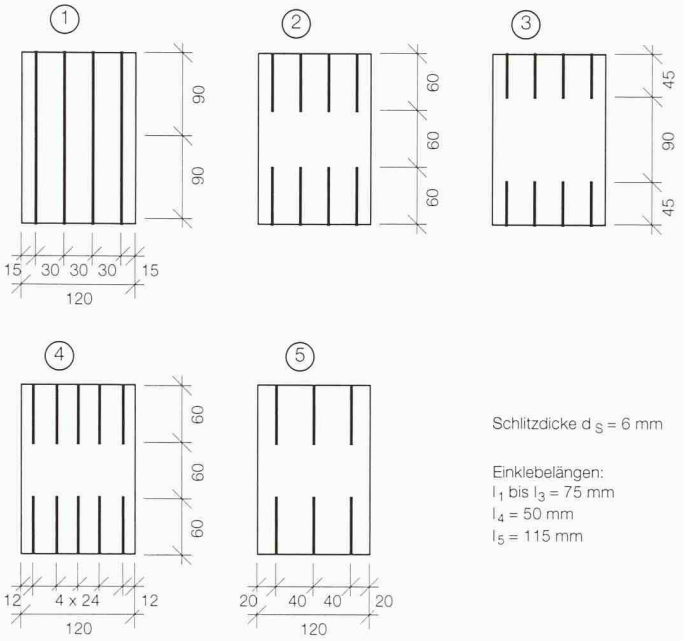
10
Versuchsdisposition der Kurz- und Langzeit-Biegeversuche mit einem GFK-Stoss in der Längsmitte



u_i: Messung der Längenänderung an der Verbindung; Messbasis 200 mm
w_i: Messung der Durchbiegung am BSH-Balken

Biegeversuche

Holz als tragendes Bauelement ist sehr häufig auf Biegung belastet. Es lag daher nahe, nach diversen grundlegenden Zugversuchen auch das Verhalten von FVK-Stössen im Biegebereich zu testen. Wie bereits erwähnt, bietet die Druckübertragung im entsprechenden Querschnittsteil eines Stosses keinerlei Probleme. Erhöhte Verformungen auf der Zugseite im Stoss könnten jedoch als zusätzliche Durchbiegungen eine unerwünschte Grössenordnung erreichen. Um hierüber Aufschluss



11 Versuchsanordnungen der GFK-Stösse der Biegeproben

zu erhalten, wurden Kurz- und Langzeit-Biegeprüfungen an Brettschichtholzbalken des Querschnitts 12×18 cm (Bild 10) durchgeführt. Die Stösse in Balkenmitte waren zwar frei von Querkräften, doch waren die Spannungen über den Querschnitt nicht mehr gleichförmig verteilt wie bei den Zugversuchen. Von besonderem Interesse waren die Verformungen, die sich als Durchbiegung bei einer Biegebeanspruchung wesentlich deutlicher auswirken als bei einer rein axialen Beanspruchung. Versuchsparameter waren die Anordnung der Lamellen (Bild 11), deren Länge (100 mm bis 230 mm) sowie der zeitliche Belastungsverlauf. Dimensionierung und Herstellung erfolgten aufgrund der in den Zugversuchen gesammelten Erfahrungen.

Gemessen wurden sowohl bei den Kurzzeit- als auch den Langzeitversuchen die Durchbiegungen w_m über eine Messlänge von 1000 mm im querkraftfreien Mitteldrittel und w_l über eine Messlänge von 2500 mm (~ Spannweite). Im unmittelbaren Bereich der Verbindung wurden auch die Längenänderungen mit einem 200 mm langen Deformeter gemessen. Um Klarheit über die Auswirkungen des GFK-Stosses bzw. einen klaren Vergleich zu erhalten, wurden die Steifigkeiten der Versuchsbalken zuvor ohne Stoss ermittelt.

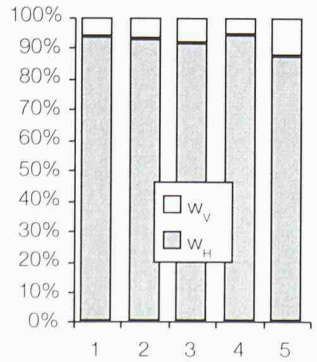
Die bei den fünf Kurzzeit-Biegeversuchen erzielten maximalen Lasten entsprechen Biegerandspannungen zwischen 30 und 34 N/mm² und damit Werten, die nicht wesentlich unter der Biegefestigkeit des Brettschichtholzes liegen.

Erwartungsgemäss versagte bei allen Versuchen die Verbindung in der Biegezugzone, und zwar gleichermassen durch Scher- und Zugbrüche im Holz. Als primäre Ursachen für den Bruchbeginn wurden das Überschreiten der Scherfestigkeit des Holzes, Strukturstörungen im Holz (Ast) und Holzzugbruch im Schlitzgrund beobachtet.

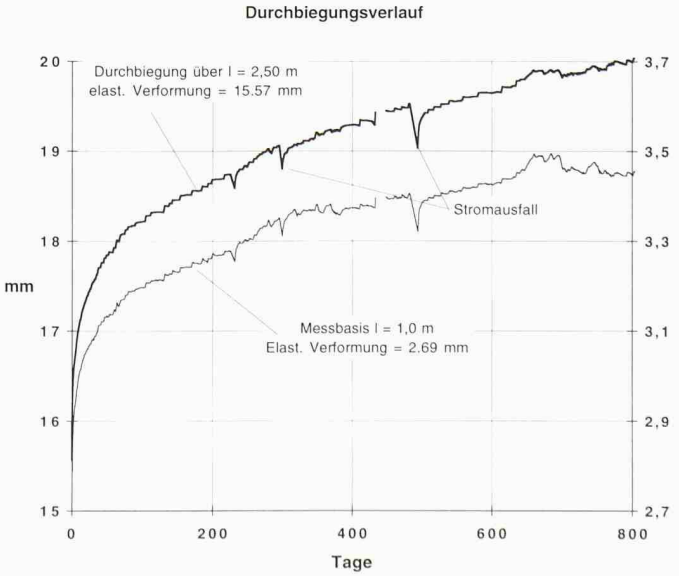
Die Gesamtdurchbiegungen w setzen sich zusammen aus Anteilen des Holzes w_H (Biegung und Schub) und der Verbindung, die durch die Rotation der Verbindung bewirkt wird. Gemäss Bild 12 ist der Durchbiegungsanteil w_V infolge des Stosses verhältnismässig gering.

Bei den Langzeitversuchen unter statischer Dauerlast wurde der Verbindungstyp 2 (Bild 11) mit einer Einklebelänge (einseitig) von 75 mm eingesetzt. Beim ersten Langzeitversuch A wurde die Belastung in Zeitintervallen von zuerst 28 und anschliessend 7 Tagen bis zu einer rechnerischen Randspannung von 27,5 N/mm² erhöht, wobei sich ab 25,0 N/mm² eine beschleunigte Zunahme der Verformungen abzeichnete. Das Bruchbild entsprach demjenigen der Kurzzeitversuche: Versa-

12 Verformungsanteile w_H (Holz) und w_V (Verbindung) für fünf Versuche über eine Messlänge von 2,5 m bei Kurzzeitbelastung und einer rechnerischen Randspannung von 24 N/mm²



13 Verlauf der Durchbiegungen und Verformungen in Funktion der Zeit beim Langzeit-Biegeversuch B



gen der Biegezugzone durch Scher- und Zugbrüche im Holz.

Beim Langzeitversuch B betrug die Randspannung 22,5 N/mm² über die gesamte Versuchsdauer von 26 Monaten. Nach einer Entlastungszeit von 22 Tagen wurde der Versuchsbalken innert weniger Minuten bis zum Bruch bei 33,4 N/mm² (Randspannung) belastet.

Trotz der sehr hohen Belastung - allerdings bei konstanten Klimaverhältnissen - betrugen die Gesamtdurchbiegungen w_l und w_m nach 804 Belastungstagen 20,04 und 3,46 mm (Bild 13). Der Kriechfaktor, d.h. die relative Durchbiegungszunahme gegenüber der elastischen Anfangsverformung, betrug in beiden Fällen 0,223. Eine grobe Extrapolation des Kriechverlaufs der Durchbiegungen zeigt, dass eine Verdoppelung der Durchbiegungen bzw. ein Kriechfaktor von 1,0 in 100 bis 200 Jahren zu erwarten ist.

Folgerungen

Die Untersuchungen lassen erkennen, dass auf die aufgezeigte Weise mit hochfesten Fasern leistungsfähige, das heisst besonders tragfähige und steife Holzverbindungen mit speziellen Eigenschaften hergestellt werden können, die sich von den bisher üblichen Holzverbindungen unterscheiden. Die Chancen für solche Anwendungen dürften dort liegen, wo eine besonders hohe Effizienz der Kraftübertragung gefragt und wo die Ästhetik der Konstruktion von Bedeutung ist, da die innenliegenden Verbindungslamellen kaum sichtbar sind. Je nach äusseren Gegebenheiten können auch die Korrosionsbeständigkeit oder eine relative Unempfindlichkeit gegenüber Witterungseinflüssen und Feuer eine Rolle spielen. Im Weiteren ist die spezielle Herstellungsweise zu erwähnen, die - etwa im Gegensatz zu Keilzinkenstössen - keinerlei Druck für das Schliessen der Verbindung benötigt und auch einen Anschluss «übers Eck» erlaubt.

Für die Weiterentwicklung des Verbindungstyps sind sowohl das Sammeln von praktischen Erfahrungen in der Anwendung als auch das Vertiefen der bisherigen Kenntnisse wünschenswert. Auch die Tatsache, dass bei den Epoxidharzen bei erhöhten Temperaturen Festigkeit und Steifigkeit deutlich vermindert sind, weist auf einen weiteren Entwicklungsbedarf hin. Zur Suche eines optimalen Klebers wurde deshalb ein umfangreiches Evaluationsprogramm durchgeführt, dessen Resultate derzeit für die Publikation vorbereitet werden.

Adresse des Verfassers:
Ulrich A. Meierhofer, dipl. Ing. ETH, Abteilung Holz, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Überlandstrasse 129, 8600 Dübendorf

Literatur

[1]
Timmermann K. und *Meierhofer U.A.*: Faserverstärkte Kunststoffe in Holztragwerken - Untersuchungen und Entwicklungen zur Erweiterung der Anwendungsmöglichkeiten. I. Ausgangslage und Betrachtungen über Anwendungs- und Entwicklungsmöglichkeiten. Forschungs- und Arbeitsbericht 115/23 der Empa, Abt. Holz, Dübendorf 1992

[2]
Op. cit., II. Vorversuche an kleinen Zugprüfkörpern mit in Schlitzen eingeklebten Lamellen. Forschungs- und Arbeitsbericht 115/26 der Empa, Abt. Holz, Dübendorf 1994

[3]
Op. cit., III. Zug- und Biegeversuche mit Brettschichtholz-Balken. Forschungs- und Arbeitsbericht 115/32 der Empa, Abt. Holz, Dübendorf 1994

[4]
Meier U.: Strengthening of structures using carbon fibre/epoxy composites. Construction and Building Material, 9(1995)6, p. 341-351

[5]
Meier U. (Hrsg.): Nachträgliche Verstärkung von Bauwerken mit CFK-Lamellen. 23 Referate zur Empa/SIA-Studientagung vom 21. September 1995. Dokumentation D 0128, Schweiz. Ing.- und Arch.-Verein, Zürich 1995

[6]
Ehrler M.: Untersuchungen von Holzzugverbindungen mit eingeleimten faserverstärkten Kunststofflamellen. Diplomarbeit ETH Zürich, 1995