

# Hochfeste Fasern für Zug- und Biegestösse im Holzbau

Autor(en): **Meierhofer, Ulrich A.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **117 (1999)**

Heft 43

PDF erstellt am: **27.06.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-79814>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ulrich A. Meierhofer, Dübendorf

## Hochfeste Fasern für Zug- und Biegestösse im Holzbau

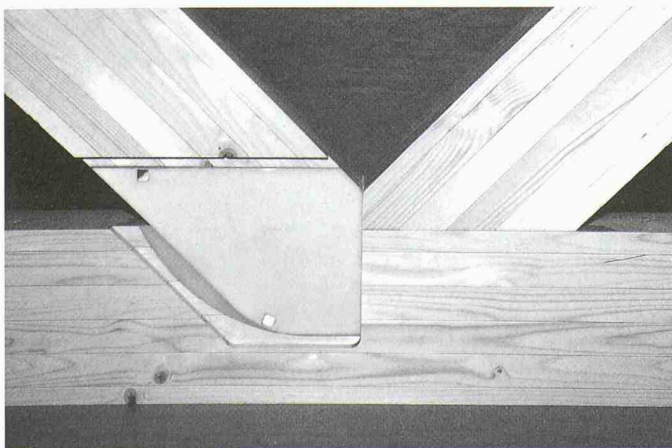
**Anhand von Zug- und Biegeversuchen wurden Holzverbindungen mit plattenförmigen, kohlen- und glasfaserverstärkten Kunststofflamellen entwickelt, die eine hohe Tragfähigkeit und Verbindungssteifigkeit aufweisen. Besonders wichtig war der Abbau der sekundären Querspannungen im Stossbereich, was vor allem 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

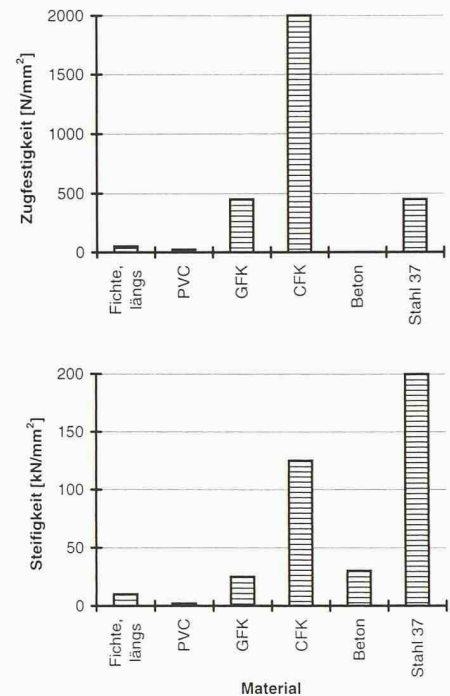
der Ingenieurholzbau nur durch den in der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts sich verbreitenden Einsatz von Stahl im Holzbau etablieren.

Seit einigen Jahren sind nun mancherorts 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 Schlitzte 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]. Nach-



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

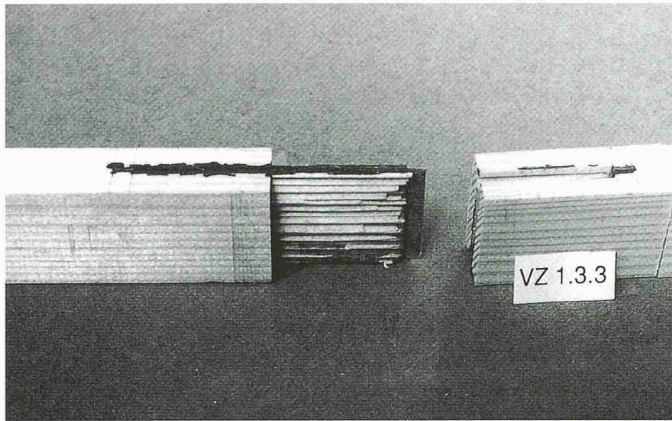
folgend sind einige Ergebnisse zusammengefasst sowie zusätzliche Resultate von Langzeitversuchen dargestellt.

### 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 Verbindungsstrukturen 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 Schlitzte eingelegt und die Hohlräume nachträglich mit giessfähigen Kunststoffen verfüllt werden. Die Verbindungs-

mittel 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.

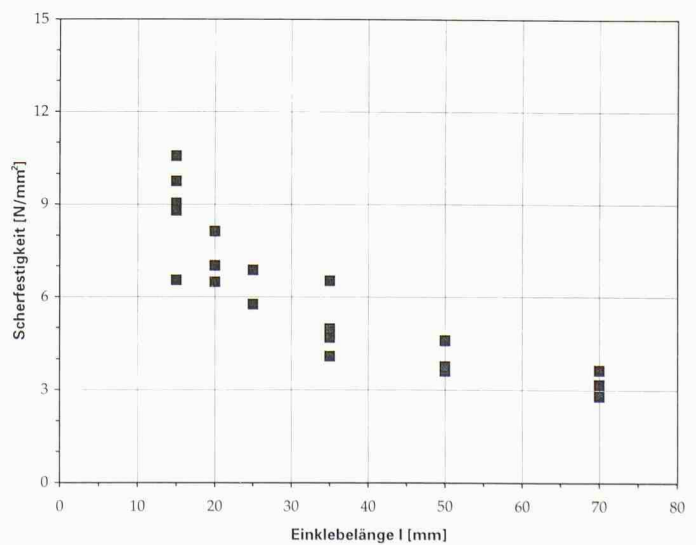
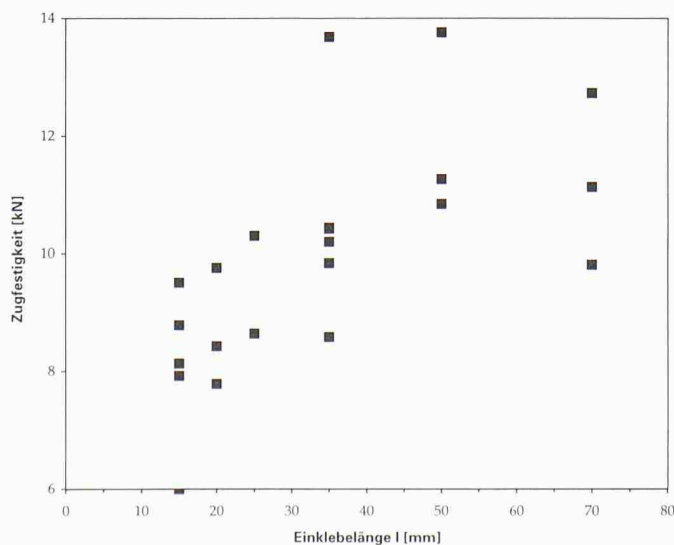
Mit dem Ausgiessen der Hohlräume ist eine direkte und problemlose Übertragung der Druckkräfte von entsprechenden Querschnittsteilen gewährleistet. Für die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten stand deshalb die Zugübertragung im Vordergrund; bei den Biegeversuchen richtete sich das Augenmerk im Wesentlichen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

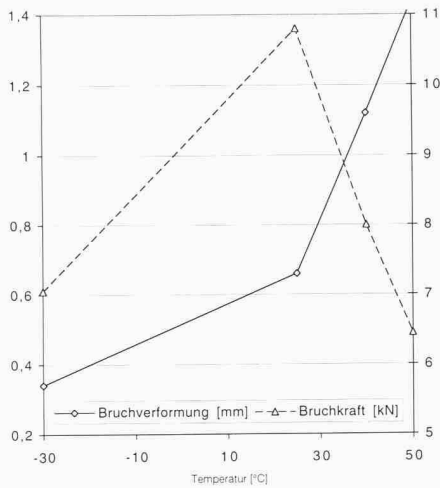
**Zugversuche an kleinen Prüfkörpern**

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 Verankerungsschlitzte 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 ( $l = \frac{1}{2}$  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/mm<sup>2</sup> erreicht. Dies bedeutet, dass die Scherfestigkeit des Holzes zur massgebenden Grösse in der Verbindung wird (Bild 4).

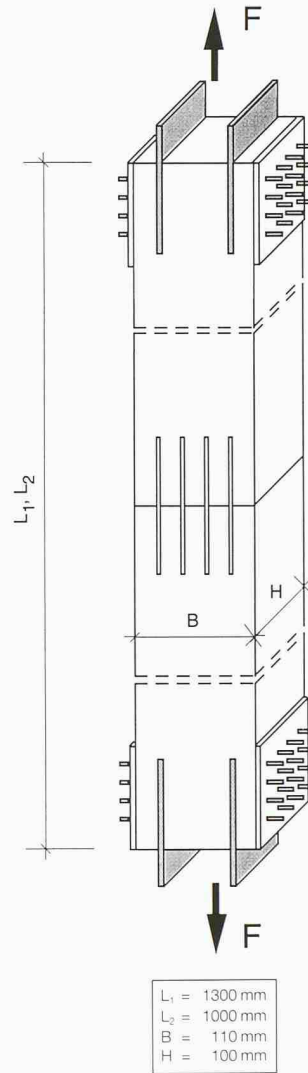
Entsprechende Zugversuche zeigten, dass die Prüftemperatur das Bruchverhalten deutlich beeinflusst (Bild 5 und [6]). Dies dürfte nicht zuletzt auf die unterschiedlichen Temperaturendeckungskoeffizienten der verschiedenen beteiligten Materialien zurückzuführen sein, die fes-

tigkeitsmindernde 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**

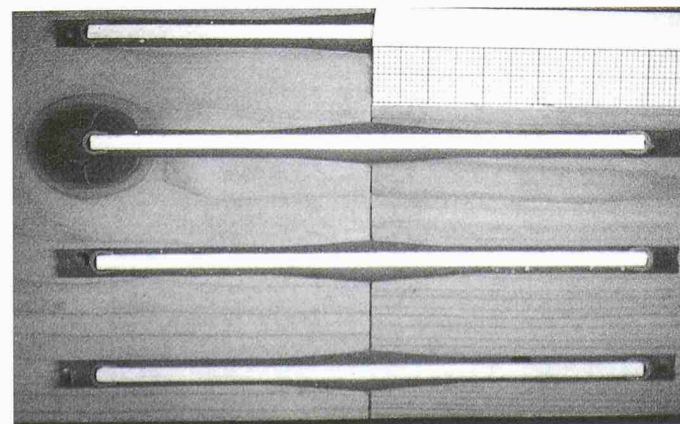
Bei anschliessenden Versuchen an grösseren Proben aus kommerziellem Fichten-Brettschichtholz mit einem Querschnitt von 110×100 mm<sup>2</sup> (Bild 6) wurde der mittige Stoss aus praktischen Gründen überwiegend mit Lamellen aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) hergestellt (die Tragfähigkeit der 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

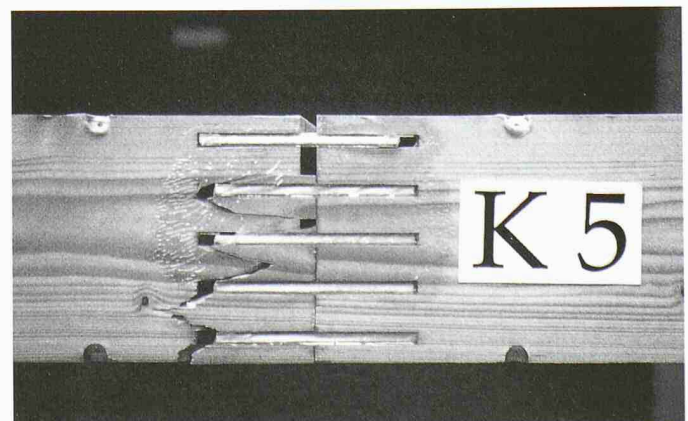


6 Probendisposition für Zugversuche an grossen Prüfkörpern

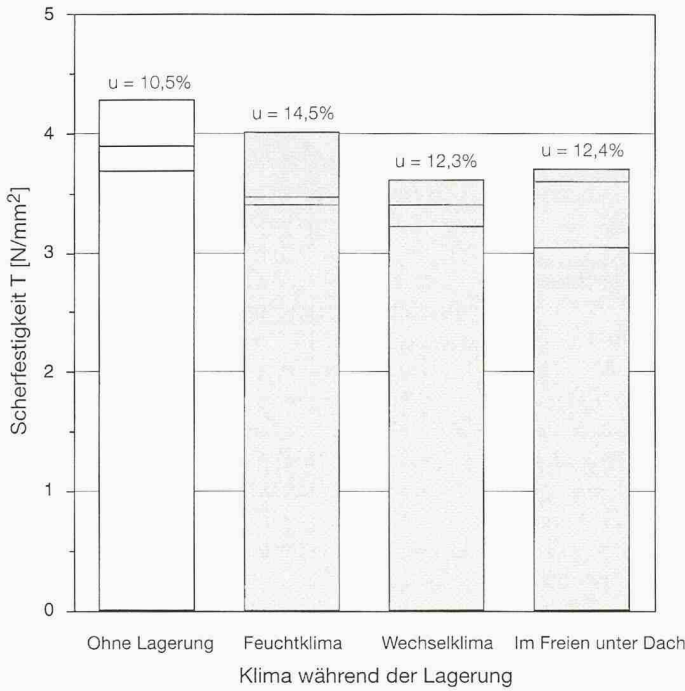
7 Die Anordnung einer Fase bei den Lamellenschlitzten (im Winkel 1:15) bewirkt durch eine dickere Leimfuge beim Stoss einen «weicheren» Übergang und reduziert damit die Spannungsspitzen und sekundären Querzugspannungen im Stossbereich. Dies führte zu einer Steigerung der Scherfestigkeiten von bis zu 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 Querspannungen 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/mm<sup>2</sup> entspricht.

Analog zu den kleinen Proben wurden auch bei den grossen eine Zunahme der Zug- und eine Abnahme der nominal-

len Scherfestigkeit mit zunehmender Einklebelänge beobachtet. Bezogen auf den Nettoholzquerschnitt wurden Zugfestigkeiten von gegen 40 N/mm<sup>2</sup> 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 begrenzte 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 Quellungsbewegungen des Holzes. Dadurch werden sekundäre Spannungen in der Verbindungsfuge induziert, die je nach Umständen höhere Werte annehmen und die Tragfähigkeit beeinträchtigen können.

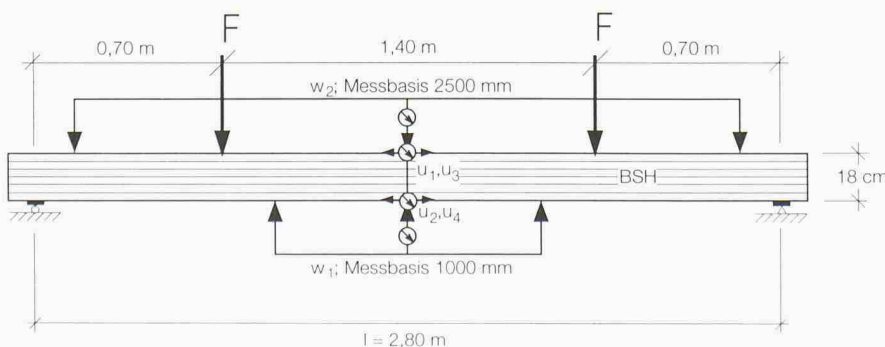
Um einige Hinweise über allfällige Schwächungen zu erhalten, wurden während über einem Jahr verschiedene Klimaversuche durchgeführt und zwar durch Lagerung im:

- 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

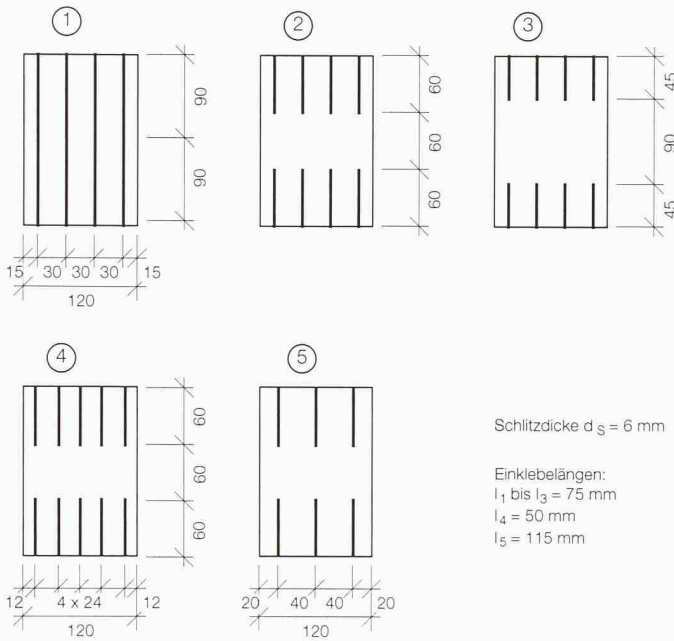
Versuchsdisposition der Kurz- und Langzeit-Biegeversuche mit einem GFK-Stoss in der Längsmittle



u<sub>i</sub>: Messung der Längenänderung an der Verbindung; Messbasis 200 mm  
 w<sub>i</sub>: 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 Brettschichtholzbalcken des Querschnitts 12x18 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 Bean-

spruchung. Versuchparameter 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.

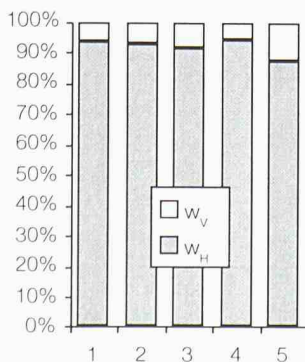
Die bei den fünf Kurzzeit-Biegeversuchen erzielten maximalen Lasten entsprechen Biegerandspannungen zwischen 30 und 34 N/mm<sup>2</sup> und damit Werten, die nicht wesentlich unter der Biegefestigkeit des Brettschichtholzes liegen.

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.

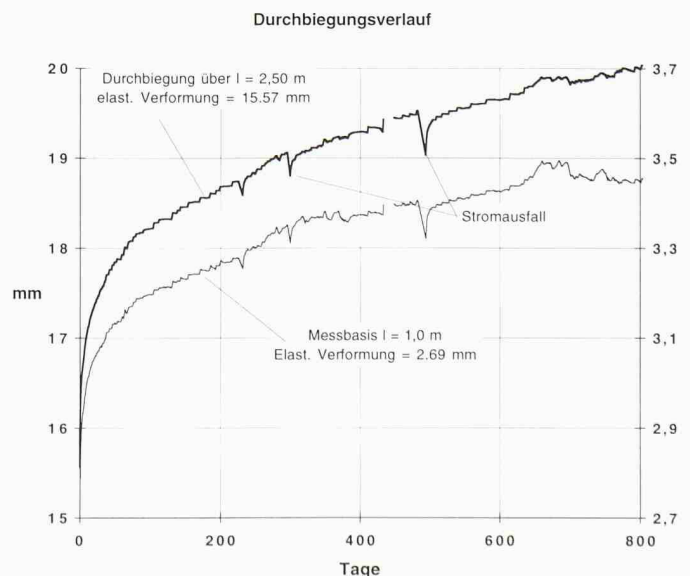
Die Gesamtdurchbiegungen  $w$  setzen sich zusammen aus Anteilen des Holzes  $w_H$  (Biegung und Schub) und der Verbindung, die durch die Rotation der Verbindung bewirkt wird. Gemäss Bild 12 ist der Durchbiegungsanteil  $w_V$  infolge des Stosses verhältnismässig gering.

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/mm<sup>2</sup> erhöht, wobei sich ab 25,0 N/mm<sup>2</sup> 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/mm<sup>2</sup>



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  $22,5 \text{ N/mm}^2$  über die gesamte Versuchsdauer von 26 Monaten. Nach einer Entlastungszeit von 22 Tagen wurde der Versuchsbalken innert weniger Minuten bis zum Bruch bei  $33,4 \text{ N/mm}^2$  (Randspannung) belastet.

Trotz der sehr hohen Belastung - allerdings bei konstanten Klimaverhältnissen - betrug 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 be-

sonders 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 Schlitz eingeklebten Lamellen. Forschungs- und Arbeitsbericht 115/26 der Empa, Abt. Holz, Dübendorf 1994
- [3]  
Op. cit., III. Zug- und Biegeversuche mit Brett-schichtholz-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 Holzverbindungen mit eingeleimten faserverstärkten Kunststofflamellen. Diplomarbeit ETH Zürich, 1995