

# Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern in Abhängigkeit von den festigkeitsrelevanten Einflußgrößen \*

## Entwicklung eines statistischen Modells

F. Colling

Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen der Universität Karlsruhe, Kaiserstraße 12, D-7500 Karlsruhe

Ein statistisches Modell zur Berechnung der Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern wurde entwickelt. Dieses Modell teilt die Gesamtheit aller Brettschichtholzträger in zwei Gruppen auf: die Träger mit Keilzinkenversagen und die Träger mit Holzversagen. Ausgehend von den „echten“ Festigkeitsverteilungen dieser Trägergruppen ist es mit Hilfe dieses Modells möglich, die Festigkeitseigenschaften der fertigen Brettschichtholzträger zu berechnen.

### Bending strength of glulam beams. Development of a statistical model

A statistical model for the determination of the strength of glulam beams was developed. This model divides the totality of glulam beams into two groups: beams with wood failure (knots) and beams with a failure due to finger joints. On the basis of the "true" strength distributions of these two groups, it is possible to calculate the strength of the resultant glulam beams.

### 1 Allgemeines

Ziel eines z. Z. noch laufenden Forschungsvorhabens<sup>1</sup> ist es, die Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern in Abhängigkeit von den festigkeitsrelevanten Holzeigenschaften Ästigkeit, Rohdichte und Elastizitätsmodul der Brettlamellen sowie den Festigkeitseigenschaften der Keilzinkenverbindungen im Hinblick auf Normungsvorschläge zu untersuchen. Aufgrund der vielfältigen Kombinationsmöglichkeiten der o. a. Einflußgrößen war es nicht mehr möglich, diese Untersuchungen ausschließlich mit Hilfe von Trägerversuchen durchzuführen. Aus diesem Grund wurde ein Rechenmodell auf der Basis der Finiten Elemente entwickelt (Ehlbeck et al. 1985a; Colling 1988), mit dessen Hilfe die Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern auf rechnerischem Wege abgeschätzt werden kann. Die Anwendbarkeit dieses sog. „Karlsruher Rechenmodells“ wurde in der Vergangenheit wiederholt überprüft (Ehlbeck et al. 1985b; Ehlbeck, Colling 1987), wobei in allen Fällen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Versuch und Rechnung festgestellt werden konnte.

Mit Hilfe dieses Rechenmodells ist es z. B. möglich, die Auswirkungen von unterschiedlichen Verfahren der Holzsortierung – visuell, maschinell und kombiniert visuell/ma-

schinell – oder einer veränderlichen Keilzinkenfestigkeit auf die Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern abzuschätzen. Mit dem „Karlsruher Rechenmodell“ stand somit ein Werkzeug zur Verfügung, mit dem es möglich erschien, die Zielsetzung des o. a. Forschungsvorhabens zu erfüllen.

Bei den Simulationsrechnungen zeigte sich jedoch, daß die Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern ein sehr vielschichtiges (mehrdimensionales) Problem darstellt, bei dem es nur sehr schwer möglich ist, den Einfluß eines einzigen Parameters rechnerisch zu erfassen. Mit Hilfe des Rechenmodells war es zwar möglich, die verschiedenen Tendenzen richtig zu beschreiben, das Problem bestand jedoch darin, die ermittelten Abhängigkeiten im Hinblick auf Normungsvorschläge zahlenmäßig darzustellen.

Daraufhin wurde ein statistisches Modell (Colling 1990) entwickelt, in dem die Gesamtheit aller Brettschichtholzträger in zwei Gruppen, die Träger mit Keilzinkenversagen und die Träger mit Holzversagen, aufgeteilt wird. Diese Aufteilung ermöglicht es, das ganze Problem in zwei kleinere Problembereiche aufzuteilen, innerhalb derer der Einfluß jedes einzelnen Parameters auf die Tragfähigkeit der zugehörigen Träger eindeutig erfaßt werden kann. Die Auswirkungen eines einzelnen Einflußparameters auf die Biegefestigkeit der fertigen Brettschichtholzträger können dann mit Hilfe dieses statistischen „Mischverfahrens“ ebenfalls eindeutig beschrieben werden.

In der ersten Folge dieser dreiteiligen Veröffentlichungsreihe werden die Grundlagen dieses statistischen Modells dargestellt.

In der zweiten Folge wird der Einfluß der Trägergröße und der Belastungsart (Volumeneffekt) auf die Tragfähigkeit der beiden o. a. Trägergruppen mit Hilfe des „Karlsruher Rechenmodells“ untersucht.

In der dritten Folge wird die Anwendbarkeit und die Zuverlässigkeit des statistischen Modells und der durchgeführten Simulationsrechnungen mit Hilfe von insgesamt 42 Biegeversuchen mit Brettschichtholzträgern überprüft.

### 2 Das statistische Modell

#### 2.1 Aufteilung des Endproduktes Brettschichtholz in die beiden „Materialien“ Keilzinkenverbindung und Holz

Führt man Biegeversuche mit Brettschichtholzträgern in Bauteilgröße durch, so tritt bei diesen Trägern das Versagen i. d. R. sowohl im Bereich von Ästen als auch im Bereich von Keilzinkenverbindungen auf. Die Festigkeitsverteilung die-

\* Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Ehlbeck zum 60. Geburtstag gewidmet

<sup>1</sup> Ehlbeck, J.; Colling, F.: Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern in Abhängigkeit von den Eigenschaften der Brettlamellen im Hinblick auf Normungsvorschläge. Forschungsvorhaben im Auftrag der Entwicklungsgemeinschaft Holzbau, finanziert vom Institut für Bautechnik, Berlin

ser Träger läßt sich in zwei kleinere Häufigkeitsverteilungen aufteilen, und zwar in jeweils eine für die Träger mit Keilzinkenversagen und die Träger mit Holzversagen. Diese beiden Verteilungen können je nach Holzigenschaften der Brettlamellen und Festigkeit der Keilzinkenverbindungen eng beieinanderliegen, sie können sich aber auch z. T. erheblich voneinander unterscheiden.

Führt man eine zweite Versuchsreihe mit Brettschichtholzträgern durch, die im Vergleich zu den o. a. Trägern bei gleicher Holzqualität eine geringere Keilzinkenfestigkeit aufweisen, so tritt häufiger ein Keilzinkenversagen auf, was sich auch auf die einzelnen Festigkeitsverteilungen auswirkt. So liegen z. B. die Tragfähigkeiten dieser Träger im Mittel unter denen der ersten Versuchsreihe, was darauf zurückzuführen ist, daß nur noch selten hohe Tragfähigkeiten erzielt werden können, weil die Träger oft vorzeitig aufgrund eines Keilzinkenversagens zu Bruch gehen. Eine Unterscheidung nach der Versagensart zeigt, daß sich auch die Verteilungen der beiden Trägergruppen von den zugehörigen Verteilungen der ersten Versuchsreihe unterscheiden. So weisen z. B. die Träger mit Keilzinkenversagen aufgrund der geringeren Keilzinkenfestigkeit geringere Tragfähigkeiten auf, so daß sich die Verteilung dieser Träger im Vergleich zur ersten Versuchsreihe weiter von der Verteilung der Träger mit Holzversagen entfernt.

Diese Ausführungen zeigen, daß das Endprodukt Brettschichtholz eigentlich ein Mischprodukt darstellt, dessen Tragfähigkeit nicht nur von den absoluten Festigkeiten des Holzes und der Keilzinkenverbindungen abhängig ist, sondern auch vom gegenseitigen Verhältnis dieser Festigkeiten: je stärker sich die jeweiligen Festigkeitseigenschaften voneinander unterscheiden, um so häufiger tritt der schwächere Faktor als Bruchursache auf und um so eher wird die Tragfähigkeit der Brettschichtholzträger von diesem Faktor bestimmt. Im Extremfall tritt nur eine Versagensursache auf, und die Festigkeitsverteilung aller Brettschichtholzträger ist mit der so ermittelten „echten“ Festigkeitsverteilung des schwächeren „Materials“ identisch.

Im Rahmen des im nächsten Abschnitt beschriebenen theoretischen Modells werden nun folgende Definitionen festgelegt:

das Brettschichtholz besteht aus zwei voneinander unabhängigen „Materialien“, dem Holz und der Keilzinkenverbindung. Hierbei ist allerdings unter dem „Material“ Keilzinkenverbindung nicht die Verbindung selbst zu verstehen, sondern die Brettschichtholzträger, die aufgrund eines Keilzinkenversagens zu Bruch gehen. Das gleiche gilt für das „Material“ Holz, mit dem die Träger gemeint sind, die im Bereich eines Holzfehlers (Ast) versagen; die „echte“ Festigkeitsverteilung des „Materials“ Keilzinkenverbindung entspricht der Verteilung der Brettschichtholzträger, unter der Voraussetzung, daß alle Träger aufgrund eines Keilzinkenversagens zu Bruch gehen. Analog hierzu entspricht die „echte“ Festigkeitsverteilung des „Materials“ Holz der Verteilung aller Brettschichtholzträger, unter der Annahme, daß *kein* Träger im Bereich einer Keilzinkenverbindung versagt.

Im nächsten Abschnitt wird nun gezeigt, daß es mit Hilfe eines einfachen statistischen Modells möglich ist, die Tragfähigkeit des Endproduktes Brettschichtholz zu berechnen, wenn die so definierten „echten“ Festigkeitsverteilungen der beiden beeinflussenden „Materialien“ Keilzinkenverbindung und Holz bekannt sind.

Da aber diese Verteilungen *nicht* mit den Festigkeitsverteilungen identisch sind, die sich für die beiden o. a. Trägergruppen anhand von Biegeversuchen mit „normalen“ Brettschichtholzträgern ergeben (weil hier i. d. R. beide Versa-

gensarten auftreten), stellte sich die Frage, wie diese geforderten Festigkeitsverteilungen ermittelt werden können.

Die „echte“ Festigkeitsverteilung des „Materials“ Holz könnte z. B. mit Hilfe von Brettschichtholzträgern ohne Keilzinkenverbindungen ermittelt werden. Will man jedoch die Biegefestigkeit dieser Träger in Abhängigkeit von der Trägergröße bestimmen, so steht man vor dem Problem, daß ab einer bestimmten Trägergröße die Brettlamellen aufgrund der begrenzten Brettlängen keilgezinkt werden müssen, und ein Versagen im Bereich einer Keilzinkenverbindung somit nicht mehr ausgeschlossen werden kann. Eine versuchsmäßige Bestimmung der geforderten Festigkeitsverteilung beschränkt sich somit auf Brettschichtholzträger mit kleinen Trägerabmessungen.

Im Falle des „Materials“ Keilzinkenverbindung könnte die erforderliche Festigkeitsverteilung nur bei sehr schlechten Keilzinkenverbindungen und gleichzeitig hoher Holzfestigkeit ermittelt werden, weil nur dann ein Holzversagen ausgeschlossen werden kann. Da aber mit steigender Holzqualität (Rohdichte und Elastizitätsmodul) auch die Keilzinkenfestigkeit zunimmt, ist eine versuchsmäßige Bestimmung dieser Festigkeitsverteilung ebenfalls kaum möglich.

Im Rahmen des „Karlsruher Rechenmodells“ jedoch ist es möglich, sowohl die Keilzinkenfestigkeit als auch die Holzqualität „künstlich“ so zu verändern, daß eine gewünschte Versagensart erzwungen werden kann. Somit ist es mit Hilfe dieses Rechenmodells möglich, die geforderten „echten“ Festigkeitsverteilungen der beiden „Materialien“ Holz und Keilzinkenverbindung zu ermitteln.

## 2.2 Bestimmung der Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern in Abhängigkeit von den „echten“ Festigkeitsverteilungen der „Materialien“ Keilzinkenverbindung und Holz

Aus den bisherigen Ausführungen ist zu entnehmen, daß in einem Brettschichtholzträger nur dann ein Holzversagen eintritt, wenn nicht vorher ein Keilzinkenversagen auftritt und umgekehrt. Ein Brettschichtholzträger hat somit zwei Versagensarten zur Auswahl, und er wird sich naturgemäß für die mit der geringeren Tragfähigkeit entscheiden, weil er sich so früher der Belastung entziehen kann. Die Wahrscheinlichkeit, daß ein Brettschichtholzträger eine bestimmte Spannung  $\sigma$  „überlebt“, entspricht somit der Wahrscheinlichkeit, daß weder ein Holzversagen noch ein Keilzinkenversagen eintritt.

Für diese Überlebenswahrscheinlichkeit gilt folgende Beziehung:

$$1 - H(\sigma) = (1 - F(\sigma)) \cdot (1 - G(\sigma)) \quad (1)$$

mit

$H(\sigma)$  = Wahrscheinlichkeit, daß der Brettschichtholzträger bei der Spannung  $\sigma$  versagt;

$G(\sigma)$  = Wahrscheinlichkeit, daß das „Material“ Holz bei der Spannung  $\sigma$  versagt;

$F(\sigma)$  = Wahrscheinlichkeit, daß das „Material“ Keilzinkenverbindung bei der Spannung  $\sigma$  versagt.

$F$  und  $G$  werden als Verteilungsfunktionen der Biegefestigkeit der zugehörigen „Materialien“ bezeichnet und entsprechen den „echten“ Festigkeitsverteilungen dieser „Materialien“.  $H$  ist die Verteilungsfunktion der Biegefestigkeit der Brettschichtholzträger, die sich auf der Grundlage von  $F$  und  $G$  ergibt.

Die Versagenswahrscheinlichkeit eines Brettschichtholzträgers bei einer bestimmten Spannung  $\sigma$  ergibt sich somit zu:

$$H(\sigma) = F(\sigma) + G(\sigma) - F(\sigma) \cdot G(\sigma). \quad (2)$$

Im weiteren Verlauf der Berechnung wird die vereinfachende Annahme getroffen, daß die Verteilungen  $F$  und  $G$  der beiden „Materialien“ jeweils mit einer Gauß-Normalverteilung mit den Mittelwerten  $m_1$  und  $m_2$  und den zugehörigen Variationskoeffizienten  $v_1$  und  $v_2$  beschrieben werden können.

Somit ergibt sich Gl. (2) zu:

$$H(\sigma) = \Phi\left(\frac{\sigma/m_1 - 1}{v_1}\right) + \Phi\left(\frac{\sigma/m_2 - 1}{v_2}\right) - \Phi\left(\frac{\sigma/m_1 - 1}{v_1}\right) \times \Phi\left(\frac{\sigma/m_2 - 1}{v_2}\right), \quad (3)$$

wobei  $\Phi$  der Verteilungsfunktion der standardisierten Normalverteilung mit dem Mittelwert 0 und der Standardabweichung 1 entspricht.

Für die charakteristische Biegefestigkeit  $\sigma_5$  der Brettschichtholzträger (5%-Fraktile) gilt dabei folgende Bedingung:

$$0,05 = \Phi\left(\frac{\sigma_5/m_1 - 1}{v_1}\right) + \Phi\left(\frac{\sigma_5/m_2 - 1}{v_2}\right) - \Phi\left(\frac{\sigma_5/m_1 - 1}{v_1}\right) \times \Phi\left(\frac{\sigma_5/m_2 - 1}{v_2}\right), \quad (4)$$

Zur Bestimmung des Mittelwertes der Brettschichtholzbiegefestigkeit, der ja bekanntlich dem Schwerpunkt der zugehörigen Verteilung entspricht, läßt sich keine so einfache Beziehung mehr angeben, weil die zugehörige Verteilung nicht zwangsläufig normalverteilt ist, sondern je nach Kennwerten der Verteilungen der beiden beeinflussenden „Materialien“ unterschiedliches Aussehen annehmen kann.

Für den Medianwert  $\sigma_{50}$ , d. h. die Spannung, die in der Hälfte aller Fälle über- bzw. unterschritten wird, gilt hingegen folgende Beziehung:

$$0,5 = \Phi\left(\frac{\sigma_{50}/m_1 - 1}{v_1}\right) + \Phi\left(\frac{\sigma_{50}/m_2 - 1}{v_2}\right) - \Phi\left(\frac{\sigma_{50}/m_1 - 1}{v_1}\right) \times \Phi\left(\frac{\sigma_{50}/m_2 - 1}{v_2}\right), \quad (5)$$

Dieser Wert, der bei einer Gaußschen Normalverteilung mit dem Mittelwert identisch ist, erlaubt eine Abschätzung des Mittelwertes der Brettschichtholzbiegefestigkeit, die um so genauer ist, je symmetrischer die zugehörige Verteilung ist.

Wie bereits angedeutet, orientiert sich die Verteilung des Endproduktes Brettschichtholz sehr stark an der Verteilung des schwächeren „Materials“. Aus der in Gl. (1) angegebenen Beziehung für die Verteilungsfunktion des Brettschichtholzes geht hervor, daß ein Fraktilewert der Brettschichtholzverteilung höchstens den entsprechenden Wert der schlechteren Verteilung annehmen kann. Somit liegen sowohl die 5%-Fraktile  $\sigma_5$  als auch der Medianwert  $\sigma_{50}$  der Brettschichtholzträger unter den entsprechenden Werten des schwächeren „Materials“. In Bild 1 ist diese Tendenz qualitativ dargestellt.

Daher ist es naheliegend, die o. a. charakteristischen Festigkeitswerte des Brettschichtholzes auf die entsprechenden Werte des schwächeren „Materials“ zu beziehen.

Als schwächeres „Material“ wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit das „Material“ bezeichnet, das die kleinere 5%

-Fraktile  $x_{5,1}$  aufweist, auch wenn der zugehörige Mittelwert  $m_1$  über dem Mittelwert  $m_2$  des anderen „Materials“ liegt.

Da die Verteilungsfunktion des Brettschichtholzes davon abhängig ist, wie eng die Verteilungen der beiden „Materialien“ Keilzinkenverbindung und Holz ineinanderliegen und wie groß der Bereich ist, in dem sich diese beiden Verteilungen überschneiden, gilt es, das Verhältnis dieser beiden Verteilungen zueinander treffend zu beschreiben. Hierzu wurden im Rahmen dieser Arbeit das Verhältnis  $x_{5,1}/x_{5,2}$  der beiden 5%-Fraktile, das Verhältnis  $m_1/m_2$  der beiden Mittelwerte sowie der Variationskoeffizient  $v_1$  des schwächeren „Materials“ als beschreibende Kenngrößen gewählt.

Mit Hilfe der Beziehungen

$$x_{5,1} = m_1 \cdot (1 - 1,645 \cdot v_1) \quad (6a)$$

und

$$x_{5,2} = m_2 \cdot (1 - 1,645 \cdot v_2) \quad (6b)$$

zur Bestimmung der 5%-Fraktile der beiden „Materialien“ ergeben sich nach einigen Umformungen folgende Gleichungen zur Bestimmung der 5%-Fraktile  $\sigma_5$  und des Medianwertes  $\sigma_{50}$  der Brettschichtholzbiegefestigkeit:

$$0,05 = \Phi\left(\frac{(1 - 1,645 \cdot v_1) \cdot \sigma_5/x_{5,1} - 1}{v_1}\right) + \Phi\left(1,645 \cdot \frac{(1 - 1,645 \cdot v_1) \cdot \sigma_5/x_{5,1} \cdot m_1/m_2 - 1}{1 - \frac{m_1/m_2}{x_{5,1}/x_{5,2}} \cdot (1 - 1,645 \cdot v_1)}\right) - \Phi\left(\frac{(1 - 1,645 \cdot v_1) \cdot \sigma_5/x_{5,1} - 1}{v_1}\right) \times \Phi\left(1,645 \cdot \frac{(1 - 1,645 \cdot v_1) \cdot \sigma_5/x_{5,1} \cdot m_1/m_2 - 1}{1 - \frac{m_1/m_2}{x_{5,1}/x_{5,2}} \cdot (1 - 1,645 \cdot v_1)}\right) \quad (7)$$

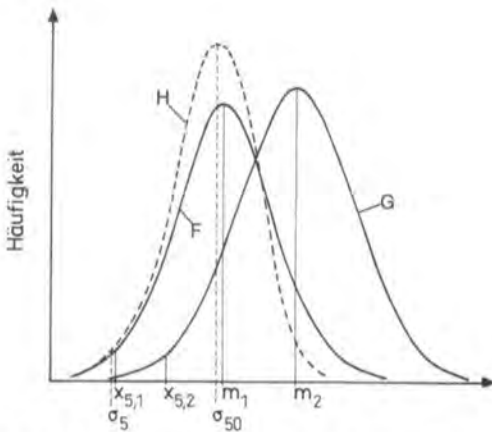
und

$$0,5 = \Phi\left(\frac{\sigma_{50}/m_1 - 1}{v_1}\right) + \Phi\left(1,645 \cdot \frac{\sigma_{50}/m_1 \cdot m_1/m_2 - 1}{1 - \frac{m_1/m_2}{x_{5,1}/x_{5,2}} \cdot (1 - 1,645 \cdot v_1)}\right) - \Phi\left(\frac{\sigma_{50}/m_1 - 1}{v_1}\right) \times \Phi\left(1,645 \cdot \frac{\sigma_{50}/m_1 \cdot m_1/m_2 - 1}{1 - \frac{m_1/m_2}{x_{5,1}/x_{5,2}} \cdot (1 - 1,645 \cdot v_1)}\right). \quad (8)$$

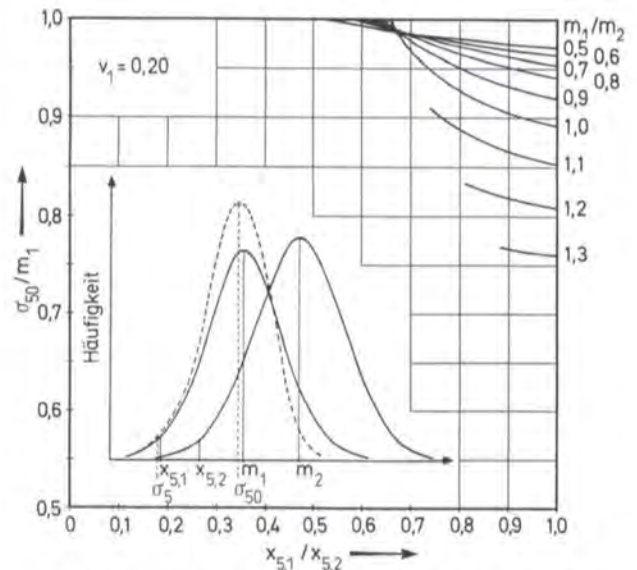
In Bild 2 und 3 ist der Verlauf der Verhältniswerte  $\sigma_5/x_{5,1}$  und  $\sigma_{50}/m_1$  für einen Variationskoeffizienten von  $v_1 = 0,20$  in Abhängigkeit von den o. a. Kenngrößen dargestellt.

Aus diesen Bildern wird deutlich, daß sich die 5%-Fraktile  $\sigma_5$  und der Medianwert  $\sigma_{50}$  der Brettschichtholzträger sehr stark an den entsprechenden Werten des schwächeren „Materials“ orientieren, und daß sich die Verhältniswerte  $\sigma_5/x_{5,1}$  und  $\sigma_{50}/m_1$  für  $x_{5,1}/x_{5,2} < 0,7$  praktisch zu 1 ergeben.

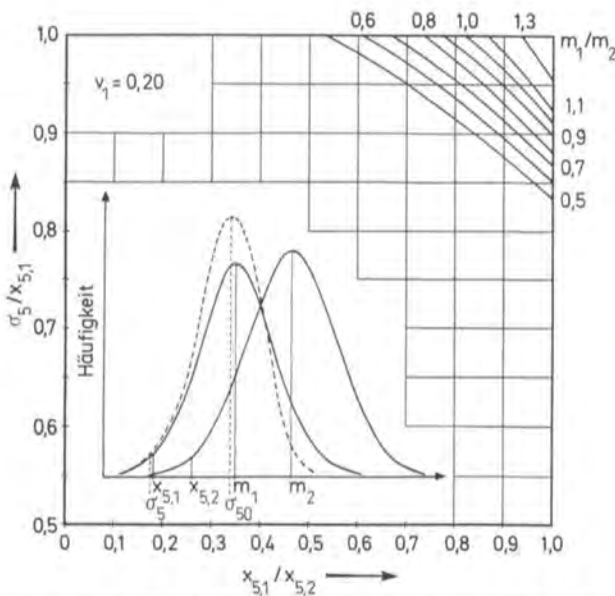
Weiterhin ist zu erkennen, daß der Verlauf der beiden charakteristischen Festigkeitswerte des Brettschichtholzes verhältnismäßig unempfindlich bezüglich der Eingangswerte  $x_{5,1}/x_{5,2}$ ,  $m_1/m_2$  und  $v_1$  reagiert, d. h. Fehler oder Ungenauigkeiten bei der Bestimmung eines dieser Werte wirken sich nicht in gleichem Maße auf die 5%-Fraktile oder den Medianwert des Brettschichtholzes aus.



**Bild 1.** Verteilungen der Biegefestigkeit für das „Endprodukt“ Brett-schichtholz und die beiden „Materialien“ 1 und 2  
**Fig. 1.** Bending strength distributions of the "final product" glulam and the two "materials" 1 and 2



**Bild 3.** Medianwert  $\sigma_{50}$  des Brett-schichtholzes (bezogen auf den Mittelwert  $m_1$  des schwächeren „Materials“) in Abhängigkeit vom Verhältnis der 5%-Fraktile und der Mittelwerte der „Materialien“ 1 und 2;  $v_1 = 0,20$   
**Fig. 3.** Median value  $\sigma_{50}$  of glulam (related to the mean value  $m_1$  of the weaker "material") depending on the ratios of the 5%-percentiles and the mean values of the "materials" 1 and 2;  $v_1 = 0.20$



**Bild 2.** 5%-Fraktile  $\sigma_5$  des Brett-schichtholzes (bezogen auf die 5%-Fraktile  $x_{5,1}$  des schwächeren „Materials“) in Abhängigkeit vom Verhältnis der 5%-Fraktile und der Mittelwerte der „Materialien“ 1 und 2;  $v_1 = 0,20$   
**Fig. 2.** 5%-percentile  $\sigma_5$  of glulam (related to the 5%-percentile  $x_{5,1}$  of the weaker "material") depending on the ratios of the 5%-percentiles and the mean values of the "materials" 1 and 2;  $v_1 = 0.20$

Es folgen nun einige Erläuterungen, die zu einem besseren Verständnis dieser Diagramme bzw. des hier vorgestellten theoretischen Modells führen sollen.

Ein steigender Wert des Verhältnisses  $x_{5,1}/x_{5,2}$  bedeutet, daß sich die 5%-Fraktile der beiden „Materialien“ annähern. Dies hat zur Folge, daß sich das bessere „Material“ des öfteren für das Versagen eines Brett-schichtholzträgers verantwortlich zeigt, bevor die Festigkeit des eigentlich schwächeren „Materials“ überschritten wird. Die Tragfähigkeit der Brett-schichtholzträger nimmt somit im Vergleich zum schwächeren „Material“ weiter ab, weil die Tragfähigkeit des vermeintlich schwächeren „Materials“ nicht mehr in allen Fällen ausgenutzt werden kann.

Entspricht das Verhältnis  $m_1/m_2$  gerade dem Verhältnis  $x_{5,1}/x_{5,2}$ , so geht aus Gl. (6a) und Gl. (6b) hervor, daß dann auch der Variationskoeffizient  $v_2$  des besseren „Materials“ dem Variationskoeffizienten  $v_1$  entspricht.

Ist das Verhältnis  $m_1/m_2$  größer als  $x_{5,1}/x_{5,2}$ , so ist der Variationskoeffizient  $v_2$  kleiner als  $v_1$ . Dies wirkt sich günstig auf die 5%-Fraktile des Brett-schichtholzes aus, weil das bessere „Material“ weniger „ausstrahlt“, so daß sich die charakteristische Biegefestigkeit des Brett-schichtholzes dem entsprechenden Wert des schwächeren „Materials“ annähern kann. Eine geringere Streuung des besseren „Materials“ bewirkt jedoch auch, daß nicht mehr so viele hohe Festigkeitswerte zu erwarten sind, so daß der Medianwert des Brett-schichtholzes im Gegensatz zur 5%-Fraktile abnimmt.

Aus Bild 3 ist ersichtlich, daß für Verhältnisswerte  $m_1/m_2 > 1$  die Kurven für den Medianwert ab einem bestimmten Verhältnis  $x_{5,1}/x_{5,2}$  plötzlich aufhören. Diese Endpunkte kennzeichnen den Fall, bei dem sich der Variationskoeffizient  $v_2$  des besseren „Materials“ gerade zu null ergibt. Eine Fortführung dieser Kurven ist somit nicht möglich, weil sich dann aufgrund der Kombination „kleines  $x_{5,1}/x_{5,2}$ “ und „zu großes  $m_1/m_2$ “ ein negativer Variationskoeffizient  $v_2$  ergäbe.

Ist das Verhältnis  $m_1/m_2$  jedoch kleiner als  $x_{5,1}/x_{5,2}$ , so ist der Variationskoeffizient  $v_2$  größer als  $v_1$ . In diesem Fall „strahlt“ das bessere „Material“ weiter aus, was zu einer Abnahme der 5%-Fraktile und einer Zunahme des Medianwertes des Brett-schichtholzes führt.

Mit Hilfe des hier beschriebenen „Mischverfahrens“ ist es also möglich, die charakteristischen Festigkeitswerte des Endproduktes Brett-schichtholz in Abhängigkeit von den Kenngrößen der „echten“ Festigkeitsverteilungen der beiden beeinflussenden „Materialien“ Holz und Keilzinkenverbindung zu bestimmen.

**2.3 Bestimmung der Auftretenshäufigkeit einer bestimmten Versagensart**

In Analogie zur Versagenswahrscheinlichkeit im Rahmen eines probabilistischen Sicherheitskonzeptes ist es möglich, die

Wahrscheinlichkeit zu bestimmen, mit der das Versagen in einem der beiden „Materialien“ eintritt. So ergibt sich nach Steck (1982) die Wahrscheinlichkeit  $P_2$  eines Versagens im besseren „Material“ zu:

$$P_2 = \Phi\left(\frac{m_1 - m_2}{\sqrt{s_1^2 + s_2^2}}\right) \quad (9)$$

Hierin bedeuten

$\Phi$  = Verteilungsfunktion der standardisierten Normalverteilung,

$m_1, s_1$  = Mittelwert und Standardabweichung des schlechteren „Materials“,

$m_2, s_2$  = Mittelwert und Standardabweichung des besseren „Materials“.

#### 2.4 Zahlenbeispiel

Anhand eines Zahlenbeispiels soll die Handhabung des hier vorgestellten Modells veranschaulicht werden.

Gegeben seien die normalverteilten „echten“ Verteilungsfunktionen der Biegefestigkeit der beiden „Materialien“ Holz und Keilzinkenverbindung (KZV) mit den Mittelwerten  $m_{\text{Holz}} = 40 \text{ N/mm}^2$  und  $m_{\text{KZV}} = 36 \text{ N/mm}^2$  und den zugehörigen Standardabweichungen  $s_{\text{Holz}} = 6,0 \text{ N/mm}^2$  und  $s_{\text{KZV}} = 7,2 \text{ N/mm}^2$ . Die zugehörigen 5%-Fraktile ergeben sich nach Gl. (6) zu:

$$x_{5, \text{Holz}} = 40 \cdot \left(1 - 1,645 \cdot \frac{6,0}{40}\right) = 30,1 \text{ N/mm}^2$$

und

$$x_{5, \text{KZV}} = 36 \cdot \left(1 - 1,645 \cdot \frac{7,2}{36}\right) = 24,2 \text{ N/mm}^2.$$

Als schlechteres „Material“ mit der kleineren 5%-Fraktile erweist sich in diesem Beispiel die Keilzinkenverbindung. Die Eingangswerte für das Modell ergeben sich somit zu:

$$x_{5,1}/x_{5,2} = 24,2/30,1 = 0,80,$$

$$m_1/m_2 = 36/40 = 0,90,$$

$$v_1 = 7,2/36 = 0,20.$$

Die erwartete 5%-Fraktile  $\sigma_5$  und der Medianwert  $\sigma_{50}$  der Brettschichtholzträger ergeben sich dann mit Hilfe von Bild 2 und Bild 3 zu:

$$\sigma_5 = 0,99 \cdot 24,2 = 24,0 \text{ N/mm}^2$$

und

$$\sigma_{50} = 0,95 \cdot 36 = 34,2 \text{ N/mm}^2.$$

Die Auftretenswahrscheinlichkeit eines Holzversagens ergibt sich nach Gl. (9) zu:

$$\Phi\left(\frac{36 - 40}{\sqrt{6,0^2 + 7,2^2}}\right) = \Phi(-0,427) = 0,33,$$

d. h. in etwa  $1/3$  aller Fälle wird das Versagen der in diesem Beispiel zusammengesetzten Brettschichtholzträger im Bereich eines Holzfehlers erwartet, während die restlichen Träger aufgrund eines Keilzinkenversagens zu Bruch gehen.

Dieses Beispiel zeigt deutlich, daß sich das Endprodukt Brettschichtholz sehr stark am schwächeren „Material“ orientiert, auch wenn sich die Festigkeitseigenschaften der beiden beeinflussenden „Materialien“ im Mittel nicht zu stark voneinander unterscheiden.

### 3 Zusammenfassung

In diesem ersten Teil einer dreiteiligen Veröffentlichungsreihe wurde ein statistisches Modell zur Berechnung der Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern vorgestellt, in dem das Endprodukt Brettschichtholz in seine beiden festigkeitsbestimmenden „Materialien“ Keilzinkenverbindung und Holz aufgeteilt wird. Ausgehend von den Kenngrößen (5%-Fraktile, Mittelwert und Variationskoeffizient) der „echten“ Festigkeitsverteilungen dieser „Materialien“ ist es mit Hilfe dieses Modells möglich, die charakteristischen Festigkeitswerte (5%-Fraktile und Mittelwert) der fertigen Brettschichtholzträger zu berechnen.

### 4 Literatur

- Colling, F. 1988: Estimation of the effect of different grading criterions on the bending strength of glulam beams by using the "Karlsruhe calculation model". IUFRO, Turku, Finland
- Colling, F. 1990: Tragfähigkeit von Biegeträgern aus Brettschichtholz in Abhängigkeit von den festigkeitsrelevanten Einflußgrößen. Dissertation der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Universität Karlsruhe (noch nicht veröffentlicht)
- Ehlbeck, J.; Colling, F.; Görlacher, R. 1985a: Einfluß keilgezinkter Lamellen auf die Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern. Teil 1: Entwicklung eines Rechenmodells. Holz Roh- Werkstoff 43:333–337
- Ehlbeck, J.; Colling, F.; Görlacher, R. 1985b: Einfluß keilgezinkter Lamellen auf die Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern. Teil 3: Überprüfung des Rechenmodells mit Hilfe von Trägerversuchen. Holz Roh- Werkstoff 43:439–442
- Ehlbeck, J.; Colling, F. 1987: Die Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern in Abhängigkeit von den Eigenschaften der Brettlamellen. Bauen mit Holz 89(10):646–655
- Steck, G. 1982: Die Zuverlässigkeit des Vollholzbalkens unter reiner Biegung. Dissertation der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Universität Karlsruhe

# Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern in Abhängigkeit von den festigkeitsrelevanten Einflußgrößen \*

## Einfluß der Trägergröße und der Belastungsart

F. Colling

Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen der Universität Karlsruhe, Kaiserstr. 12, D-7500 Karlsruhe

Das Tragverhalten von Brettschichtholzträgern in Abhängigkeit von der Trägergröße und der Belastungsart wurde getrennt für die Träger mit Keilzinkenversagen und die Träger mit Holzversagen untersucht. Hierbei zeigte sich, daß der „Volumeneinfluß“ bei den Trägern mit Keilzinkenversagen ausgeprägter ist als bei den Trägern mit Holzversagen, was mit der beim „Material“ Keilzinkenverbindung vorhandenen größeren Streuung der Festigkeitswerte erklärt werden kann. Ausgehend von den Festigkeitswerten der zugehörigen Standardträger ist es mit Hilfe der hier durchgeführten Untersuchungen möglich, die Kenngrößen der „echten“ Festigkeitsverteilungen der beiden „Materialien“ Keilzinkenverbindung und Holz für beliebige Trägergrößen und Lastanordnungen zu berechnen.

### Bending strength of glulam beams. Effect of beam size and load configuration

The bending strengths of glulam beams with wood failure and failure due to finger joints depending on beam size and load configuration was investigated. Size effects are more pronounced in case of beams with finger joint failure. This may be explained by the higher variation of strength values in case of „material“ finger joint. On the basis of the strength values of the corresponding standard beams, these investigations make it possible to determine the „true“ strength distributions of the two influencing „materials“ wood and finger joint for any beam size and load configuration.

### 1 Allgemeines

Im ersten Teil dieser Veröffentlichungsreihe (Colling 1990 a) wurde ein statistisches Modell vorgestellt, in dem die Gesamtheit aller Brettschichtholzträger in zwei Gruppen aufgeteilt wird: die Träger mit Keilzinkenversagen und die Träger mit Holzversagen. Ausgehend von den „echten“ Festigkeitsverteilungen dieser Trägergruppen, kann die Tragfähigkeit der fertigen Brettschichtholzträger mit Hilfe dieses statistischen Modells berechnet werden. Da aber diese Verteilungen definitionsgemäß nur dann ermittelt werden können, wenn alle Träger einer Versuchsreihe aufgrund der gleichen Versagensursache zu Bruch gehen, schied eine versuchsmäßige Bestimmung der geforderten Verteilungen aus. Daher wurden die Kenngrößen dieser Festigkeitsverteilungen mit Hilfe des „Karlsruher Rechenmodells“ (Ehlbeck et al. 1985 a; Colling 1988) ermittelt, weil es innerhalb dieses Rechenmodells möglich ist, sowohl die Holzqualität als auch die Keilzinkenqualität „künstlich“ zu beeinflussen, so daß eine gewünschte Versagensart erzwungen werden kann.

Die im folgenden beschriebenen Simulationsrechnungen wurden auf den in Bild 1 dargestellten Standardträger bezogen, der den Anforderungen nach ISO 8375 entspricht, und dessen charakteristischen Festigkeitswerte somit als Grundwerte einer Bemessung nach Eurocode 5 dienen könnten.

Neben den Trägerabmessungen und der Belastungsart war es für die Simulationsrechnungen noch erforderlich, eine Verteilung für die Länge der eingebauten Bretter festzulegen, mit deren Hilfe die Keilzinkenverbindungen über den Träger verteilt werden können. Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine mittlere „standardisierte“ Brettlänge von  $BL_0 = 4$  m mit einer Standardabweichung von 0,4 m gewählt. Diese Wahl erfolgte mit Blickrichtung auf eine maschinelle Holzsortierung, bei der hauptsächlich ganze Bretter verarbeitet werden.

Das Tragverhalten der beiden beeinflussenden „Materialien“ Holz und Keilzinkenverbindung wurde mit Hilfe einer Vielzahl von Simulationsrechnungen untersucht: für jede Variation der Trägerabmessung, Keilzinkenfestigkeit und Belastungsart wurden 2000 Träger simuliert und deren Biegefestigkeit berechnet.

Bei den Simulationsrechnungen zeigte sich, daß sich die Form der Festigkeitsverteilung je nach Trägergröße, Brettlänge, Belastungsart und Holzeigenschaften veränderte, so daß es nicht immer möglich war, die Ergebnisse mit Hilfe einer Gaußschen Normalverteilung zu beschreiben. So wiesen einige Verteilungen eine positive Schiefe, d. h. einen verlängerten Arm in Richtung der hohen Festigkeitswerte auf, was dazu führte, daß die Abschätzung der 5%-Fraktile unter Annahme einer Normalverteilung zu kleine Werte lieferte. In diesen Fällen lieferte eine Log-Normalverteilung „bessere“ Werte für die 5%-Fraktile, wobei jedoch auch diese Verteilung nicht in der Lage war, alle Simulationsergebnisse treffend zu beschreiben.

Da es aber von großer Bedeutung ist, die 5%-Fraktile der Biegefestigkeit der beiden beeinflussenden Materialien möglichst genau zu kennen, wurde im Rahmen dieser Arbeit darauf verzichtet, die gewünschte 5%-Fraktile mit Hilfe einer theoretischen Verteilung abzuschätzen. Vielmehr wurden die jeweils 2000 Simulationsergebnisse in aufsteigender Reihen-

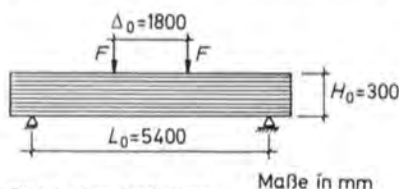


Bild 1. Standardträger  
Fig. 1. Standard beam

\* Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Ehlbeck zum 60. Geburtstag gewidmet

folge geordnet und der 101. Wert als Wert der 5%-Fraktile gewählt. Somit war gewährleistet, daß, unabhängig von der Form der Verteilung, genau der Wert erfaßt wurde, der in 5% aller Fälle unterschritten wird ( $100/2000 = 0,05$ ).

Da in das statistische Modell neben der charakteristischen und der mittleren Biegefestigkeit auch noch der Variationskoeffizient des schwächeren „Materials“ eingeht und weiterhin vorausgesetzt wird, daß die Biegefestigkeiten der beiden „Materialien“ normalverteilt sind, wird durch die abgezählte 5%-Fraktile  $x_5$  und den unverändert übernommenen Mittelwert  $m$  eine Normalverteilung „hineingezwungen“, deren Variationskoeffizient  $v$  sich zu

$$v = \frac{1 - x_5/m}{1,645} \quad (1)$$

ergibt.

Mit Hilfe dieser Näherung werden die wesentlichen Kenngrößen der Verteilung – 5%-Fraktile und Mittelwert – genau erfaßt, während der Verlauf zwischen diesen beiden Werten zumindest näherungsweise beschrieben werden kann.

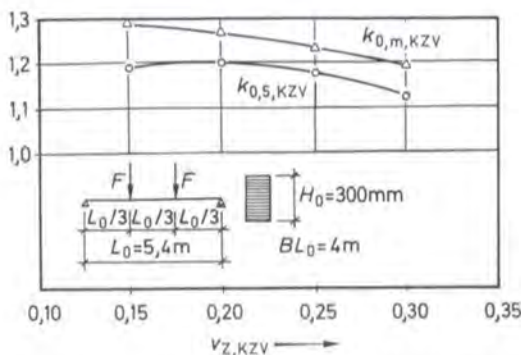
Weibull (1939) entwickelte eine Theorie über das Festigkeitsverhalten von homogenen, isotropen Werkstoffen, die ein sprödes Bruchverhalten aufweisen. Die Gleichungen, die sich mit Hilfe dieser Theorie zur Beschreibung des Volumeneffektes ergeben, haben sich international durchgesetzt und haben auch Eingang in den Entwurf zum Eurocode 5 gefunden. Aus diesem Grunde werden diese Gleichungen auch im Rahmen dieser Arbeit dazu verwendet, die Simulationsergebnisse zu beschreiben.

## 2 Träger mit Keilzinkenversagen

### 2.1 Allgemeines

Ziel dieses Abschnittes ist es, die Tragfähigkeit des „Materials“ Keilzinkenverbindung, d. h. der Brettschichtholzträger mit Keilzinkenversagen in Abhängigkeit von der Auftretenshäufigkeit der Keilzinkenverbindungen sowie der Trägergröße und Belastungsart (Volumeneffekt) zu beschreiben. Hierbei ist der Einfluß der Brettlänge identisch mit dem Einfluß der Trägergröße, weil z. B. eine Halbierung der Brettlängen genauso eine Verdopplung der Auftretenshäufigkeit der Keilzinkenverbindungen bewirkt wie eine Verdopplung der Trägerlänge.

Somit kann das Tragverhalten eines Trägers mit beliebiger Trägergröße und Belastungsanordnung, ausgehend von



**Bild 2.** Faktoren  $k_{0,s,KZV}$  und  $k_{0,m,KZV}$  in Abhängigkeit vom Variationskoeffizienten  $v_{z,KZV}$  der Keilzinkenzugfestigkeit  
**Fig. 2.** Factors  $k_{0,s,KZV}$  and  $k_{0,m,KZV}$  depending on the coefficient of variation  $v_{z,KZV}$  of the tensile strength of finger joints

den entsprechenden Festigkeitswerten des Standardträgers, mit folgenden Beziehungen beschrieben werden:

$$x_{5,KZV} = k_{L,s,KZV} \cdot k_{H,s,KZV} \cdot k_{F,s,KZV} \cdot x_{5,KZV}^0 \quad (2a)$$

und

$$m_{KZV} = k_{L,m,KZV} \cdot k_{H,m,KZV} \cdot k_{F,m,KZV} \cdot m_{KZV}^0 \quad (2b)$$

Hierbei sind

$x_{5,KZV}$  = 5%-Fraktile und Mittelwert der Biegefestigkeit der Träger mit Keilzinkenversagen,

$x_{5,KZV}^0$  = 5%-Fraktile und Mittelwert der Biegefestigkeit des Standardträgers mit Keilzinkenversagen (in Abhängigkeit von der Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindungen),

$k_{L,s,KZV}$  = Faktoren zur Beschreibung des Einflusses und  $k_{L,m,KZV}$  der Trägerlänge,

$k_{H,s,KZV}$  = Faktoren zur Beschreibung des Einflusses und  $k_{H,m,KZV}$  der Trägerhöhe,

$k_{F,s,KZV}$  = Faktoren zur Beschreibung des Einflusses und  $k_{F,m,KZV}$  der Belastungsart.

Die Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern, die aufgrund eines Keilzinkenversagens zu Bruch gehen, wird bekanntlich in erster Linie von der Zugfestigkeit der in den äußeren Zuglamellen auftretenden Keilzinkenverbindungen bestimmt.

Zur Beschreibung des Tragverhaltens des Standardträgers in Abhängigkeit von der Keilzinkenzugfestigkeit wurden folgende Beziehungen gewählt:

$$x_{5,KZV}^0 = k_{0,s,KZV} \cdot f_{z,s,KZV} \quad (3a)$$

und

$$m_{KZV}^0 = k_{0,m,KZV} \cdot f_{z,m,KZV} \quad (3b)$$

Hierbei sind

$x_{5,KZV}^0$  = 5%-Fraktile und Mittelwert der Biegefestigkeit des Standardträgers,

$f_{z,s,KZV}$  = 5%-Fraktile und Mittelwert der Keilzinken- und  $f_{z,m,KZV}$  zugfestigkeit,

$k_{0,s,KZV}$  = Faktoren zur Beschreibung der Biegefestigkeit und  $k_{0,m,KZV}$  des Standardträgers mit Keilzinkenversagen in Abhängigkeit von den Festigkeits-eigenschaften der Keilzinkenverbindungen.

Unter der Zugfestigkeit einer Keilzinkenverbindung ist hierbei die Festigkeit zu verstehen, die unter Aufbringung eines ebenen Verformungszustandes ermittelt wurde, weil diese Art der Beanspruchung der eines Brettabschnittes in einem Brettschichtholzträger am nächsten kommt (s. hierzu Heimshoff, Glos 1980).

Der Verlauf der beschreibenden Faktoren  $k_{0,s,KZV}$  und  $k_{0,m,KZV}$  aus Gl. (3) ist für verschiedene Werte des Variationskoeffizienten  $v_{z,KZV}$  der Keilzinkenzugfestigkeit in Bild 2 dargestellt.

Aufgrund der Untersuchungen von Colling (1990 b) ist für den Variationskoeffizienten  $v_{z,KZV}$  der Keilzinkenzugfestigkeit ein Wert von etwa 0,2 zu erwarten.

Aus Bild 2 ist zu erkennen, daß für diesen Wert die 5%-Fraktile der Biegefestigkeit des Standardträgers mit Keilzinkenversagen etwa 20% über der charakteristischen Keilzinkenzugfestigkeit liegt. Die mittlere Biegefestigkeit der Standardträger hingegen liegt dann etwa 27% über der mittleren Keilzinkenzugfestigkeit.

### 2.2 Einfluß der Trägerlänge

Wird von den getroffenen Annahmen bzgl. Trägerlänge und/oder Brettlänge des Bezugsträgers abgewichen, so wirkt sich dies auf die Tragfähigkeit dieser Träger aus. Dies ist darauf zurückzuführen, daß bei kleineren Brettängen und größeren Trägerlängen häufiger Keilzinkenverbindungen in den hochbeanspruchten Bereichen auftreten.

Der Längeneffekt für das „Material“ Keilzinkenverbindung reduziert sich also auf einen Auftretenshäufigkeitseffekt der Keilzinkenverbindungen, zu dessen Beschreibung im Rahmen dieser Arbeit die Kennzahl  $(L/L_0) \cdot (BL_0/BL)$  verwendet wird. Hierbei entsprechen  $L_0$  bzw.  $BL_0$  der Träger- bzw. Brettlänge des Bezugsträgers und  $L$  bzw.  $BL$  der Träger- bzw. Brettlänge eines beliebigen Trägers.

Zur Beschreibung der Simulationsergebnisse wurden folgende Gleichungen verwendet:

$$k_{L,5,KZV} = \left( \frac{L}{L_0} \cdot \frac{BL_0}{BL} \right)^{-\beta_{L,5,KZV}} \quad (4a)$$

und

$$k_{L,m,KZV} = \left( \frac{L}{L_0} \cdot \frac{BL_0}{BL} \right)^{-\beta_{L,m,KZV}} \quad (4b)$$

In Bild 3 ist der Verlauf der Faktoren  $k_{L,5,KZV}$  und  $k_{L,m,KZV}$  für einen Variationskoeffizienten der Keilzinkenzugfestigkeit von  $v_{z,KZV} = 0,2$  dargestellt.

Hierbei kann  $k_{L,5,KZV}$  über den gesamten Bereich mit einem Exponenten  $\beta_{L,5,KZV} = 0,15$  in ausreichender Näherung beschrieben werden. Im Falle von  $k_{L,m,KZV}$  ist für  $(L/L_0) \cdot (BL_0/BL) < 2$  ein überproportionaler Anstieg zu erkennen, so daß eine befriedigende Beschreibung dieses Verlaufes mit Gl. (4b) nicht mehr möglich war.

Dieser Anstieg ist darauf zurückzuführen, daß bei kleinen Trägerlängen und großen Brettängen die Auftretenswahrscheinlichkeit einer Keilzinkenverbindung im hochbeanspruchten Bereich gering ist, so daß auch überproportional hohe Festigkeitswerte auftreten können. Hierdurch erhält die Verteilung eine starke positive Schiefe, die sich eher auf den Mittelwert dieser Verteilung als auf die zugehörige 5%-Fraktile auswirkt.

Für  $(L/L_0) \cdot (BL_0/BL) \geq 2$  ist eine Beschreibung der Simulationsergebnisse mit folgender Gleichung möglich:

$$k_{L,m,KZV} = 0,933 \cdot \left( \frac{L}{L_0} \cdot \frac{BL_0}{BL} \right)^{-\beta_{L,m,KZV}} \quad (4c)$$

mit  $\beta_{L,m,KZV} = 0,15$ .

### 2.3 Einfluß der Trägerhöhe

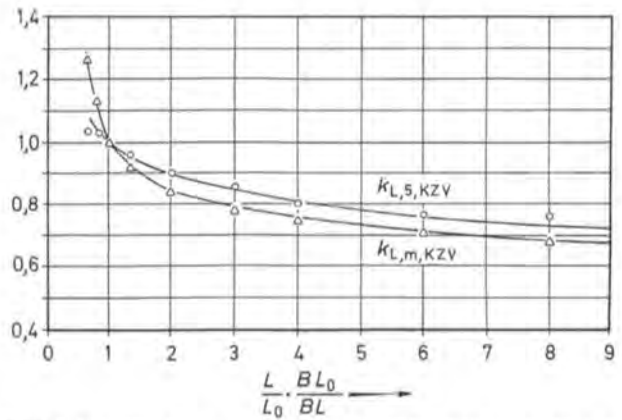
Für die Faktoren  $k_{H,5,KZV}$  und  $k_{H,m,KZV}$  zur Beschreibung des Einflusses der Trägerhöhe auf die Biegefestigkeit der Träger mit Keilzinkenversagen ergeben sich in Anlehnung an Gl. (4) folgende Beziehungen:

$$k_{H,5,KZV} = \left( \frac{H}{H_0} \right)^{-\beta_{H,5,KZV}} \quad (5a)$$

und

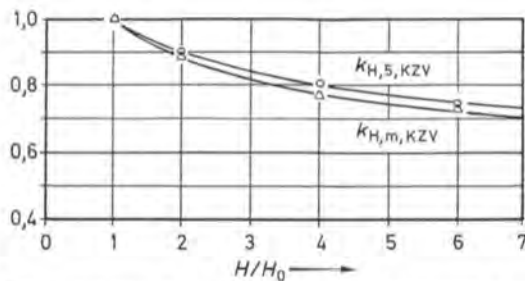
$$k_{H,m,KZV} = \left( \frac{H}{H_0} \right)^{-\beta_{H,m,KZV}} \quad (5b)$$

wobei  $H_0$  der Höhe des Bezugsträgers ( $H_0 = 300$  mm) entspricht und  $H$  der Höhe eines beliebigen Trägers.



**Bild 3.** Faktoren  $k_{L,5,KZV}$  und  $k_{L,m,KZV}$  in Abhängigkeit von der Trägerlänge  $L$  und der Brettlänge  $BL$  (Längeneffekt)

**Fig. 3.** Factors  $k_{L,5,KZV}$  and  $k_{L,m,KZV}$  depending on beam length  $L$  and board length  $BL$  (length effect)



**Bild 4.** Faktoren  $k_{H,5,KZV}$  und  $k_{H,m,KZV}$  in Abhängigkeit von der Trägerhöhe  $H$  (Höheneffekt)

**Fig. 4.** Factors  $k_{H,5,KZV}$  and  $k_{H,m,KZV}$  depending on beam height  $H$  (depth effect)

In Bild 4 ist der Verlauf der Faktoren  $k_{H,5,KZV}$  und  $k_{H,m,KZV}$  für einen Variationskoeffizienten der Keilzinkenzugfestigkeit von  $v_{z,KZV} = 0,2$  dargestellt.

Während der Verlauf der 5%-Fraktile in Abhängigkeit von der Trägerhöhe bei allen Träger- und Brettängen der gleiche ist ( $\beta_{H,5,KZV} = 0,16$ ), gilt die für die mittlere Biegefestigkeit eingezeichnete Kurve ( $\beta_{H,m,KZV} = 0,18$ ) nur für  $(L/L_0) \cdot (BL_0/BL) \geq 2$ . Dies ist wiederum auf die Tatsache zurückzuführen, daß bei kleinen Träger- und großen Brettängen die Verteilungen eine z. T. beträchtliche Schiefe aufweisen, deren Einfluß auf den Mittelwert erst ab einem Wert von  $(L/L_0) \cdot (BL_0/BL) \approx 2$  abklingt.

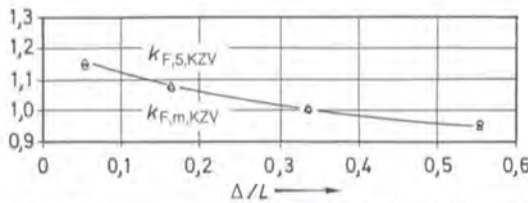
Ein Vergleich mit Abschn. 2.2 zeigt, daß der Einfluß der Trägerhöhe etwas stärker ausgeprägt ist, als der Einfluß der Trägerlänge.

### 2.4 Einfluß der Belastungsart

Nach Weibulls Sprödbbruchtheorie ist die Tragfähigkeit eines Materials von der Größe des beanspruchten Volumens abhängig, wobei hierunter nicht nur die absolute Trägergröße zu verstehen ist. So besitzt z. B. ein Träger mit Einzellast in Feldmitte (bei gleicher Trägergröße) eine höhere rechnerische Biegefestigkeit als ein Träger mit Drittelpunktbelastung, weil beim letztgenannten Träger ein größerer Bereich einer hohen Beanspruchung ausgesetzt ist.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Einfluß der Belastungsart auf die Biegefestigkeit der Träger mit Keilzinkenversagen durch Variation des Lastabstandes  $\lambda$  untersucht.





**Bild 5.** Faktoren  $k_{F,5,KZV}$  und  $k_{F,m,KZV}$  in Abhängigkeit vom Abstand  $\Delta$  der Einzellasten (Einfluß der Belastungsart)

**Fig. 5.** Factors  $k_{F,5,KZV}$  and  $k_{F,m,KZV}$  depending on load distance  $\Delta$  (load configuration effect)

Für den Fall einer Belastung mit zwei Einzellasten kann der Einfluß der Belastungsart nach Colling (1986) mit folgenden Gleichungen beschrieben werden:

$$k_{F,5,KZV} = \left( \frac{\beta_{F,5,KZV} + \Delta/L}{\beta_{F,5,KZV} + 1/3} \right)^{-\beta_{F,5,KZV}} \quad (6a)$$

und

$$k_{F,m,KZV} = \left( \frac{\beta_{F,m,KZV} + \Delta/L}{\beta_{F,m,KZV} + 1/3} \right)^{-\beta_{F,m,KZV}} \quad (6b)$$

Hierbei entspricht der Wert  $1/3$  dem Verhältnis des Lastabstandes  $\Delta_0$  zur Trägerlänge  $L_0$  des Bezugsträgers (Belastung in den Drittelpunkten).

In Bild 5 ist der Verlauf der Faktoren  $k_{F,5,KZV}$  und  $k_{F,m,KZV}$  für einen Variationskoeffizienten der Keilzinkenzugfestigkeit von  $v_{z,KZV} = 0,2$  dargestellt. Aus diesem Bild ist zu erkennen, daß sowohl der Verlauf der 5%-Fraktile als auch des Mittelwertes mit dem gleichen Exponenten  $\beta_{F,5,KZV} = \beta_{F,m,KZV} = 0,15$  beschrieben werden kann. Für den Fall der mittleren Biegefestigkeit gilt allerdings die Einschränkung, daß die eingezeichnete Kurve wiederum nur für  $(L/L_0) \cdot (BL_0/BL) \geq 2$  gilt.

Ein Vergleich mit Abschn. 2.2 zeigt, daß der Einfluß der Belastungsart mit den gleichen Exponenten beschrieben werden kann, wie der Einfluß der Trägerlänge.

### 3 Träger mit Holzversagen

#### 3.1 Allgemeines

In Abschn. 2.1 wurde die Tragfähigkeit der Träger mit Keilzinkenversagen in Abhängigkeit von der Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindungen beschrieben. Somit wäre es naheliegend, die Biegefestigkeit der Träger mit Holzversagen in Abhängigkeit von der Zugfestigkeit der Brettlamellen anzugeben.

Während jedoch die dort geforderte Zugfestigkeit einer Keilzinkenverbindung mit Hilfe von etwa 15 cm langen keilgezinkten Brettabschnitten unter Aufbringung eines ebenen Verformungszustandes ermittelt werden kann (s. Ehlbeck et al. 1985 b), stößt die Bestimmung der Lamellenzugfestigkeit auf versuchstechnische Probleme. So treten z. B. in einem Zugversuch mit großer Prüfkörperlänge infolge struktureller Imperfektionen (Äste mit Schrägfaserigkeit) seitliche Verformungen auf, die eine zusätzliche Momentbeanspruchung des Prüfkörpers bewirken und dessen rechnerische Zugfestigkeit herabsetzen.

Während solche Verformungen, z. B. bei Zugdiagonalen eines Fachwerkträgers, auch während der späteren Nutzung auftreten, werden sie in einem Brettschichtholzträger durch das Verleimen der einzelnen Brettlamellen unterbunden. Die so ermittelten Zugfestigkeiten von Brettlamellen sind daher

nicht auf die Verhältnisse in einem Brettschichtholzträger übertragbar.

Da weiterhin die Zugfestigkeit von der Prüfkörperlänge abhängig ist und die Länge der in einem Brettschichtholzträger eingebauten Bretter nicht konstant ist, wäre eine so ermittelte Zugfestigkeit auch nicht für alle Bretter repräsentativ. Daher wurde im Rahmen dieser Arbeit darauf verzichtet, die Lamellenzugfestigkeit als Kenngröße zur Beschreibung der Biegefestigkeit der Träger mit Holzversagen heranzuziehen. Die Festigkeitswerte des Standardträgers werden vielmehr direkt in Abhängigkeit von den Holzeigenschaften Ästigkeit, Rohdichte und Elastizitätsmodul der Bretter, die ja als Kriterium für die Einteilung der Bretter in die verschiedenen Güte- bzw. Festigkeitsklassen dienen, mit Hilfe des „Karlsruher Rechenmodells“ berechnet.

In Anlehnung an Abschn. 2.1 ergeben sich zur Bestimmung der charakteristischen und der mittleren Biegefestigkeit der Träger mit Holzversagen folgende Beziehungen:

$$x_{S,Holz} = k_{L,5,Holz} \cdot k_{H,5,Holz} \cdot k_{F,5,Holz} \cdot x_{S,Holz}^0 \quad (7a)$$

und

$$m_{Holz} = k_{L,m,Holz} \cdot k_{H,m,Holz} \cdot k_{F,m,Holz} \cdot m_{Holz}^0 \quad (7b)$$

Hierbei sind

$x_{S,Holz}$  = 5%-Fraktile und Mittelwert der Biegefestigkeit der Träger mit Holzversagen,

$x_{S,Holz}^0$  = 5%-Fraktile und Mittelwert der Biegefestigkeit des Standardträgers mit Holzversagen (in Abhängigkeit von den Holzeigenschaften der Brettlamellen),

$k_{L,5,Holz}$  = Faktoren zur Beschreibung des Einflusses und  $k_{L,m,Holz}$  der Trägerlänge,

$k_{H,5,Holz}$  = Faktoren zur Beschreibung des Einflusses und  $k_{H,m,Holz}$  der Trägerhöhe,

$k_{F,5,Holz}$  = Faktoren zur Beschreibung des Einflusses und  $k_{F,m,Holz}$  der Belastungsart.

Auf der Grundlage von zahlreichen Simulationsrechnungen (s. Colling 1990 b) sind für den Variationskoeffizienten der Biegefestigkeit der Brettschichtholzträger mit Holzversagen Werte zwischen 0,11 und 0,16 zu erwarten.

Aufgrund der geringen Streubreite dieses Wertes wurde der Einfluß der Trägergröße und der Belastungsart (der bekanntlich vom Variationskoeffizienten abhängig ist) am Beispiel eines Trägertyps untersucht, der mindestens der Sortierklasse S10 (Gkl II) nach DIN 4074 angehört, und an dessen Lamellen außer der Bedingung  $KAR \leq 0,50$  keine besonderen Anforderungen bzgl. der Holzeigenschaften gestellt wurden. Für diesen Trägertyp ist ein Variationskoeffizient von  $v_{Holz}^0 = 0,13$  zu erwarten, so daß er geeignet erscheint, den „Volumeneinfluß“ im Mittel gut zu beschreiben.

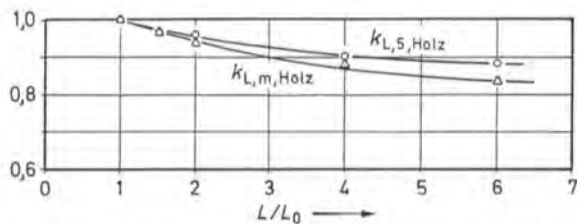
#### 3.2 Einfluß der Trägerlänge

In Anlehnung an Abschn. 2.2 ergeben sich für die Faktoren  $k_{L,5,Holz}$  und  $k_{L,m,Holz}$  zur Beschreibung des Längeneffektes folgende Beziehungen:

$$k_{L,5,Holz} = \left( \frac{L}{L_0} \right)^{-\beta_{L,5,Holz}} \quad (8a)$$

und

$$k_{L,m,Holz} = \left( \frac{L}{L_0} \right)^{-\beta_{L,m,Holz}} \quad (8b)$$



**Bild 6.** Faktoren  $k_{L,5,Holz}$  und  $k_{L,m,Holz}$  in Abhängigkeit von der Trägerlänge L (Längeneffekt)

**Fig. 6.** Factors  $k_{L,5,Holz}$  and  $k_{L,m,Holz}$  depending on beam length L (length effect)

wobei L der Länge eines beliebigen Trägers und  $L_0$  der Länge des Standardträgers nach Bild 1 entspricht ( $L_0 = 5400$  mm).

In Bild 6 ist der Verlauf der Faktoren  $k_{L,5,Holz}$  und  $k_{L,m,Holz}$  in Abhängigkeit vom Verhältnis  $L/L_0$  dargestellt.

Aus diesen Bildern ist zu erkennen, daß sich eine Vergrößerung der Trägerlänge stärker auf den Mittelwert der Biegefestigkeit ( $\beta_{L,m,Holz} = 0,10$ ) auswirkt als auf die zugehörige 5%-Fraktile ( $\beta_{L,5,Holz} = 0,07$ ).

Ein Vergleich mit Bild 3 zeigt, daß der Einfluß der Trägerlänge auf die Biegefestigkeit der Träger mit Holzversagen geringer ist als im Falle der Träger mit Keilzinkenversagen. Diese Tendenz kann mit der geringeren Streuung des „Materials“ Holz erklärt werden.

### 3.3 Einfluß der Trägerhöhe

Für die Faktoren  $k_{H,5,Holz}$  und  $k_{H,m,Holz}$  zur Beschreibung des Einflusses der Trägerhöhe auf die Biegefestigkeit der Träger mit Holzversagen ergeben sich in Anlehnung an Gl. (5) folgende Beziehungen:

$$k_{H,5,Holz} = \left(\frac{H}{H_0}\right)^{-\beta_{H,5,Holz}} \quad (9a)$$

und

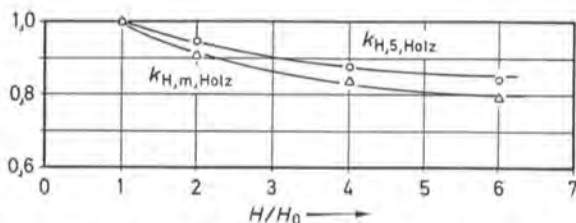
$$k_{H,m,Holz} = \left(\frac{H}{H_0}\right)^{-\beta_{H,m,Holz}} \quad (9b)$$

Hierbei entspricht  $H_0$  wiederum der Höhe des Bezugsträgers ( $H_0 = 300$  mm) und H der Höhe eines beliebigen Trägers.

In Bild 7 ist der Verlauf der Faktoren  $k_{H,5,Holz}$  und  $k_{H,m,Holz}$  in Abhängigkeit vom Verhältnis  $H/H_0$  dargestellt.

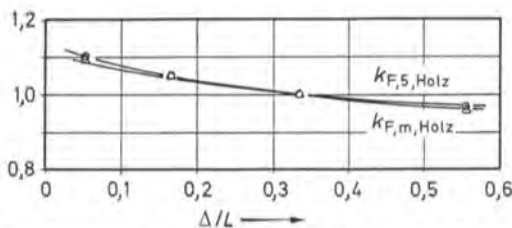
Auch hier ist die Tendenz zu erkennen, daß sich eine Veränderung der Trägergröße stärker auf den Mittelwert der Biegefestigkeit ( $\beta_{H,m,Holz} = 0,13$ ) auswirkt als auf die zugehörige 5%-Fraktile ( $\beta_{H,5,Holz} = 0,09$ ).

Ein Vergleich mit Abschn. 3.2 zeigt weiterhin, daß eine Vergrößerung der Trägerhöhe einen stärkeren Festigkeits-



**Bild 7.** Faktoren  $k_{H,5,Holz}$  und  $k_{H,m,Holz}$  in Abhängigkeit von der Trägerhöhe H (Höheneffekt)

**Fig. 7.** Factors  $k_{H,5,Holz}$  and  $k_{H,m,Holz}$  depending on beam depth H (depth effect)



**Bild 8.** Faktoren  $k_{F,5,Holz}$  und  $k_{F,m,Holz}$  in Abhängigkeit vom Abstand  $\Delta$  der Einzellasten (Einfluß der Belastungsart)

**Fig. 8.** Factors  $k_{F,5,Holz}$  and  $k_{F,m,Holz}$  depending on load distance  $\Delta$  (load configuration effect)

abfall bewirkt als eine Erhöhung der Trägerlänge. Diese Tendenz war auch bei den Trägern mit Keilzinkenversagen zu beobachten.

### 3.4 Einfluß der Belastungsart

In Anlehnung an Gl. (6) ergeben sich für die Faktoren  $k_{F,5,Holz}$  und  $k_{F,m,Holz}$  zur Beschreibung des Einflusses der Belastungsart (mit zwei Einzellasten) folgende Beziehungen:

$$k_{F,5,Holz} = \left(\frac{\beta_{F,5,Holz} + \Delta/L}{\beta_{F,5,Holz} + 1/3}\right)^{-\beta_{F,5,Holz}} \quad (10a)$$

und

$$k_{F,m,Holz} = \left(\frac{\beta_{F,m,Holz} + \Delta/L}{\beta_{F,m,Holz} + 1/3}\right)^{-\beta_{F,m,Holz}} \quad (10b)$$

wobei der Wert  $1/3$  wiederum dem Verhältnis des Lastabstandes  $\Delta_0$  zur Trägerlänge  $L_0$  des Standardträgers (Belastung in den Drittelpunkten) entspricht.

In Bild 8 ist der Verlauf der Faktoren  $k_{F,5,Holz}$  und  $k_{F,m,Holz}$  in Abhängigkeit vom Verhältnis  $\Delta/L$  dargestellt.

Ein Vergleich mit Abschn. 3.2 zeigt, daß der Einfluß der Belastungsart mit den gleichen Exponenten ( $\beta_{F,m,Holz} = 0,10$  und  $\beta_{F,5,Holz} = 0,07$ ) beschrieben werden kann wie der Einfluß der Trägerlänge. Diese Tendenz wurde bereits in Abschn. 2.4 für die Träger mit Keilzinkenversagen festgestellt.

## 4 Zusammenfassung

In diesem Teil der Veröffentlichungsreihe wurde der Einfluß der Trägergröße und der Belastungsart auf die Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern getrennt für die Träger mit Keilzinkenversagen und mit Holzversagen untersucht. Als Bezugsträger diente hierbei ein Standardträger mit festgelegten Trägerabmessungen.

Die Beschreibung des „Volumeneffektes“ erfolgte mit Hilfe der sog. Weibull-Theorie. Die Exponenten, mit denen die Simulationsergebnisse am besten beschrieben werden konnten, sind in Tabelle 1 und 2 zusammengefaßt.

Hieraus sind folgende Tendenzen zu entnehmen:

- eine Veränderung der Trägergröße wirkt sich stärker auf das Tragverhalten der Träger mit Keilzinkenversagen aus als auf das der Träger mit Holzversagen. Dies kann mit der größeren Streuung der Festigkeitswerte beim „Material“ Keilzinkenverbindung erklärt werden,

- der Einfluß der Trägerhöhe ist ausgeprägter als der Einfluß der Trägerlänge und der Belastungsart,

- der Einfluß der Belastungsart kann mit den gleichen Exponenten beschrieben werden wie der Einfluß der Trägerlänge,

- der „Volumeneinfluß“ auf die charakteristische Biegefestigkeit der Träger mit Keilzinkenversagen kann in ausrei-

**Tabelle 1.** Weibull-Exponenten zur Beschreibung des Einflusses der Trägergröße und der Belastungsart; Träger mit Keilzinkenversagen

$\beta_{L, 5, KZV}$	$\beta_{H, 5, KZV}$	$\beta_{F, 5, KZV}$	$\beta_{L, m, KZV}$	$\beta_{H, m, KZV}$	$\beta_{F, m, KZV}$
0,15	0,16	0,15	0,15	0,18	0,15

**Tabelle 2.** Weibull-Exponenten zur Beschreibung des Einflusses der Trägergröße und der Belastungsart; Träger mit Holzversagen

$\beta_{L, 5, Holz}$	$\beta_{H, 5, Holz}$	$\beta_{F, 5, Holz}$	$\beta_{L, m, Holz}$	$\beta_{H, m, Holz}$	$\beta_{F, m, Holz}$
0,07	0,09	0,07	0,10	0,13	0,10

chender Näherung mit einem einzigen Exponenten  $\beta_{5, KZV} = 0,15$  beschrieben werden.

Mit Hilfe der hier durchgeführten Untersuchungen ist es somit möglich, die Kennwerte (5%-Fraktile, Mittelwert und Variationskoeffizient) der „echten“ Festigkeitsverteilungen der beiden „Materialien“ Keilzinkenverbindung und Holz in Abhängigkeit von der Trägergröße und der Belastungsart zu berechnen. Als Grundwerte für diese Berechnungen dienen die Festigkeitswerte der zugehörigen Standardträger, die von der Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindungen und den Holzigenschaften der Brettlamellen abhängig sind.

Im nächsten und abschließenden Teil dieser Arbeit wird die Anwendbarkeit und die Zuverlässigkeit des statistischen Modells sowie der hier durchgeführten Simulationsrechnungen mit Hilfe von Biegeversuchen mit Brettschichtholzträgern überprüft.

## 5 Literatur

- Colling, F. 1986: Einfluß des Volumens und der Spannungsverteilung auf die Festigkeit eines Rechteckträgers. Holz Roh- Werkstoff 44:121–125 und 179–183
- Colling, F. 1988: Estimation of the effect of different grading criteria on the bending strength of glulam beams using the „Karlsruhe calculation model“. IUFRO, Turku, Finland
- Colling, F. 1990 a: Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern. Entwicklung eines statistischen Modells. Holz Roh- Werkstoff 48:269–273
- Colling, F. 1990 b: Tragfähigkeit von Biegeträgern aus Brettschichtholz in Abhängigkeit von den festigkeitsrelevanten Einflußgrößen. Dissertation der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Karlsruhe
- DIN 4074 Sortierung von Nadelholz nach der Tragfähigkeit, Ausgabe September 1989
- Ehlbeck, J.; Colling, F.; Görlacher, R. 1985 a: Einfluß keilgezinkter Lamellen auf die Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern. Entwicklung des Rechenmodells. Holz Roh- Werkstoff 43:333–337
- Ehlbeck, J.; Colling, F.; Görlacher, R. 1985 b: Einfluß keilgezinkter Lamellen auf die Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern. Eingangsdaten für das Rechenmodell. Holz Roh- Werkstoff 43:369–373
- Eurocode Nr. 5 (Entwurf) 1987: Gemeinsame einheitliche Regeln für Holzbauwerke. Bericht EUR 9887 der Kommission der Europäischen Gemeinschaften
- Heimeshoff, B.; Glos, P. 1980: Zugfestigkeit und Biege- E-Modul von Fichten-Brett lamellen. Holz Roh- Werkstoff 38:51–59
- ISO 8375, 1985: Solid timber in structural sizes – Determination of some physical and mechanical properties
- Weibull, W. 1939: A statistical theory of the strength of materials. Ing. Vetensk. Akad. Handl. No. 151

## Zeitschriftenreferate

**Ehlbeck, J.: Berechnung der Zuverlässigkeit des ein- und mehrteiligen Druckstabes im Hinblick auf Normungsvorschläge auf der Basis eines wahrscheinlichkeitsorientierten Sicherheitskonzeptes.** DGfH-Nachrichten Nr. 44 (1989): 39–40.

Eine Lösungsmöglichkeit, den Druckstabnachweis nach einem übergeordneten Sicherheitsmaß auszurichten, bietet die Anwendung wahrscheinlichkeitsorientierter Konzepte. Gleichzeitig bietet sich hierbei die Gelegenheit, auch möglichst wirklichkeitsnahe mechanische Modelle zu untersuchen, wozu für den Holzbau erste Lösungsansätze vorliegen. Ziel ist die Angabe von Teilsicherheitsfaktoren als Normungsvorschlag. Zur Abschätzung des bestehenden Sicherheitsniveaus druckbeanspruchter Brettschichtholz- und Vollholzstäbe wurde ein Rechenmodell entwickelt, das unter Berücksichtigung aller wichtigen Einflußgrößen Traglastberechnungen im Rahmen von „Monte-Carlo-Simulationen“ ermöglicht. Die geometrischen Imperfektionen sowie die Holzfeuchte wurden an dreizehn voneinander unabhängigen Bauwerken durch Messungen ermittelt, wobei zu erkennen ist, daß die gegenwärtig empfohlenen Rechenwerte für Ersatzimperfektionen auf der „sicheren Seite“ liegen. Hierbei zeigt es sich, daß die Traglastkurven der Güteklasse I sich nicht wesentlich von denjenigen der Güteklasse II unterscheiden; erst durch höhere Mindestrohrichte des verwendeten Holzes sind signifikant höhere Traglastspannungen zu erwarten. Der Vergleich der Traglastspannungen mit den zulässigen Spannungen liefert eine Aussage über das bestehende Sicherheitsniveau, das zur Zeit – abhängig von Schlankheit und planmäßiger Exzentrizität – nicht einheitlich ist. Für Druckstäbe mit Rechteckquerschnitt aus mitteleuropäischem Nadelholz werden Knickspannungslinien vorgeschlagen, die eine einfache Be-

messung von Holzdruckstäben auf der Grundlage der Plastizitätstheorie II. Ordnung ermöglichen. Die vorgeschlagenen Knickspannungslinien zeigen den Verlauf der charakteristischen Werte der Traglastspannung – abhängig von den charakteristischen Werten des Elastizitätsmoduls und der Druckfestigkeit – und enthalten den Einfluß sämtlicher struktureller und geometrischer Imperfektionen.

DGfH/EGH

**Becker, K.: Bolzenschweißverfahren im Holzbau.** DGfH-Nachrichten Nr. 44 (1989): 31.

Die Möglichkeit einer Übertragung des Bolzenschweißverfahrens auf den Holzbau zur Herstellung kraftschlüssiger Verbindungen zwischen Holz- und Stahlteilen wurde bereits einmal theoretisch an der Universität Karlsruhe betrachtet. Darauf aufbauend wurden nun erste praktische Schweißversuche durchgeführt. Hauptziel war, festzustellen, ob ein Bolzenschweißen innerhalb eines Holzschlusses mit Stahlplatten überhaupt möglich ist und durch einfache Zugversuche erste Erkenntnisse über die Tragfähigkeit einer solchen Verbindung zu erhalten. Es hat sich gezeigt, daß ein Verschweißen von Bolzen mit Stahlteilen innerhalb eines Holzquerschnittes grundsätzlich möglich ist. Dabei sollte auf einen Schutz der Schweißnaht beim Schweißvorgang vor umliegenden Einflüssen, z. B. durch einen Keramikring, nicht verzichtet werden. Hierbei sind speziell auf den Holzbau zugeschnittene Lösungen denkbar. Da die Herstellung der Verbindungen sehr schnell und kostengünstig erfolgen kann, zudem bei richtiger Ausführung der Schweißung hohe Traglasten erreichbar sind, ist die Anwendung der Bolzenschweißtechnik auch im Holzbau erfolgversprechend.

DGfH/EGH

# Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern in Abhängigkeit von den festigkeitsrelevanten Einflußgrößen \*

## Überprüfung des statistischen Modells mit Hilfe von Trägerversuchen

F. Colling

Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen der Universität Karlsruhe, Kaiserstraße 12, D-7500 Karlsruhe

Die Zuverlässigkeit des im ersten Teil vorgestellten statistischen Modells und der im zweiten Teil ermittelten Faktoren zur Beschreibung des „Volumeneffektes“ wurde mit Hilfe von Trägerversuchen überprüft. Hierbei konnte eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Versuch und Rechnung festgestellt werden. Schärfere Anforderungen an die Ästigkeit der Brettlamellen führen nur bedingt zu höheren Tragfähigkeiten der Brettschichtholzträger; erst mit steigender Rohdichte und/oder Elastizitätsmodul der Lamellen sind höhere Tragfähigkeiten möglich, weil sich diese Holzeigenschaften sowohl auf die Festigkeit der Brettlamellen selbst als auch auf die der Keilzinkenverbindungen auswirken.

### Bending strength of glulam beams – Verification of the statistical model by tests

The reliability of the statistical model of part 1 and of size effect factors of part 2 was verified by bending tests. These tests showed, that more severe visual requirements only partly lead to higher bending strength values of glulam beams. High bearing capacities can only be guaranteed with high density and/or MOE of the laminations, because these wood properties control the strength of wood as well as the strength of finger joints. A very good agreement could be stated between calculation results and test results.

### 1 Allgemeines

Im ersten Teil dieser Veröffentlichungsreihe (Colling 1990 a) wurde ein statistisches Modell entwickelt, mit dessen Hilfe es möglich ist, die Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern in Abhängigkeit von den Festigkeitseigenschaften der Träger mit Holzversagen und der Träger mit Keilzinkenversagen zu beschreiben. Die Anwendbarkeit und die Zuverlässigkeit dieses Modells sollte mit Hilfe von Trägerversuchen überprüft werden.

Die Abmessungen und die Belastungsart der geprüften Träger (s. Bild 1) wichen von den entsprechenden Werten des im Teil 2 (Colling 1990 b) definierten Standardträgers ab, so daß auch eine gewisse Überprüfung der dort ermittelten Faktoren zur Beschreibung des „Volumeneffektes“ möglich war.

### 2 Trägerversuche

Insgesamt wurden 6 Versuchsreihen mit jeweils 7 Trägern geprüft. An die Holzeigenschaften der jeweils drei äußeren

Lamellen dieser Träger wurden dabei die in Tabelle 1 angegebenen Anforderungen gestellt.

Während bei den ersten drei Versuchsreihen die Decklamellen nach rein visuellen Gesichtspunkten ausgewählt wurden, stellten bei den Versuchsreihen IV und V die mittlere Brettrohichte und der mittlere Brett-Elastizitätsmodul die alleinigen Auswahlkriterien ohne Rücksicht auf die Ästigkeit dar. Die Decklamellen der Reihe VI hingegen wurden in Anlehnung an eine mögliche kombinierte visuelle/maschinelle Holzsortierung ausgewählt.

Die mittleren Brettrohichten wurden mittels Wägung bestimmt, während die mittleren Brett-Elastizitätsmoduln mit Hilfe von Längsschwingungen nach Görlacher (1990) ermittelt wurden.

Aufgrund des „nicht homogenen“ Trägeraufbaues, d. h. der planmäßigen Anordnung von Lamellen mit unterschiedlichem Elastizitätsmodul über die Trägerhöhe, wurde als Biegefestigkeit der Träger der Reihen IV–VI die in der äußeren Zuglamelle jeweils auftretende effektive Biege- und Zugspannung  $\sigma_B$  zum Zeitpunkt des Versagens gewählt. Diese Spannung wurde in Anlehnung an die Theorie der Verbundquerschnitte mit Hilfe von folgender Gleichung ermittelt:

$$ef \sigma_B = \frac{\max M}{ef EI} \cdot E_a \cdot H/2. \quad (1)$$

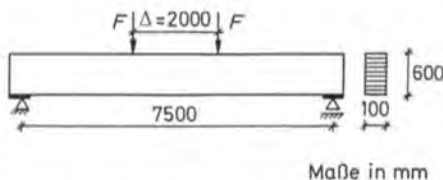


Bild 1. Versuchsträger  
Fig. 1. Test beam

Tabelle 1. Anforderungen an die Holzeigenschaften der drei äußeren Lamellen

Versuchsreihe	Anforderungen
I	$0,35 \leq KAR$
II	$0,20 \leq KAR \leq 0,35$
III	$KAR \leq 0,20$
IV	$500 \text{ kg/m}^3 \leq \rho^a$
V	$15000 \text{ N/mm}^2 \leq E$
VI	$15000 \text{ N/mm}^2 \leq E$ und $KAR \leq 0,20$

\* Rohdichte bei einer Holzfeuchte von 12–14%

\* Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Ehlbeck zum 60. Geburtstag gewidmet

**Tabelle 2.** Mittlerer Brett-Elastizitätsmodul

Versuchsreihe	Mittlerer Brett-Elastizitätsmodul in N/mm <sup>2</sup>	
	Äußere Lamellen	Innere Lamellen
I-III	13000	13000
IV	16200	13000
V-VI	17000	13000

**Tabelle 3.** Versuchsergebnisse

Träger	ef $\sigma_B$ N/mm <sup>2</sup>	Bruch- ursache	Träger	ef $\sigma_B$ N/mm <sup>2</sup>	Bruch- ursache
I-1	32,9	Ast	IV-1	43,1	KZV*
I-2	37,5	Ast	IV-2	47,7	Ast
I-3	33,7	Ast	IV-3	35,4	KZV
I-4	34,7	Ast	IV-4	50,6	KZV
I-5	35,3	Ast	IV-5	45,7	KZV
I-6	30,7	Ast	IV-6	51,9	Schub- bruch
I-7	38,3	Ast	IV-7	47,6	Ast
Mittelwert	34,7		Mittelwert	46,0	
Var.-koeff.	0,08		Var.-koeff.	0,12	
II-1	32,2	Ast	V-1	37,1	Ast
II-2	35,5	Ast	V-2	49,5	KZV
II-3	41,8	KZV*	V-3	43,4	Ast
II-4	45,7	KZV	V-4	49,3	Ast
II-5	44,1	Ast	V-5	40,9	KZV
II-6	33,6	KZV	V-6	48,5	KZV
II-7	39,6	KZV	V-7	65,0	KZV
Mittelwert	38,9		Mittelwert	47,7	
Var.-koeff.	0,15		Var.-koeff.	0,19	
III-1	42,8	KZV	VI-1	53,3	Ast
III-2	37,7	KZV	VI-2	39,8	Ast
III-3	36,4	KZV	VI-3	48,7	Ast
III-4	32,3	Ast	VI-4	45,4	KZV
III-5	41,3	KZV	VI-5	49,3	KZV
III-6	44,7	Ast	VI-6	54,6	Ast
III-7	47,1	KZV	VI-7	60,2	KZV
Mittelwert	40,3		Mittelwert	50,2	
Var.-koeff.	0,13		Var.-koeff.	0,13	

Hierbei sind:

- max  $M$  = Moment zum Zeitpunkt des Versagens,  
 $E_a$  = Elastizitätsmodul der äußeren Zuglamelle,  
 $H$  = Trägerhöhe ( $H = 600$  mm),

$$ef EI = \sum E_i I_i + \sum E_i A_i a_i^2 \quad (2)$$

= effektive Biegesteifigkeit des Trägers,

mit

- $\sum E_i I_i$  = Summe der Biegesteifigkeiten der Einzellamellen,  
 $\sum E_i A_i a_i^2$  = Summe der Steiner-Anteile der Einzellamellen,  
 und  
 $E_i$  = Lamellen-Elastizitätsmodul der  $i$ -ten Lamelle.

Da jedoch von den Versuchsträgern nicht alle Elastizitätsmoduln der Einzellamellen bekannt waren, wurde  $ef \sigma_B$  mit Hilfe der in Tabelle 2 angegebenen Brett-Elastizitätsmoduln berechnet. Diese Werte wurden anhand von

jeweils 1000 simulierten Brettern ermittelt und entsprechen den Elastizitätsmoduln, die bei den jeweils gestellten Anforderungen an die Holzeigenschaften im Mittel zu erwarten sind.

In Tabelle 3 sind für jeden Versuchsträger die effektive Biegeandspannung  $ef \sigma_B$  zum Zeitpunkt des Versagens sowie die festgestellte Bruchursache angegeben. Aus dieser Tabelle sind folgende Tendenzen zu erkennen:

schärfere Anforderungen an die Ästigkeit der Bretter bewirken ein häufigeres Auftreten eines Keilzinkenversagens (vgl. Reihe I-III). Dies kann damit erklärt werden, daß mit geringer werdender Ästigkeit zwar die Festigkeit der Brettlamellen zunimmt, die Tragfähigkeit der Keilzinkenverbindungen bleibt hiervon jedoch unbeeinträchtigt. Dies bewirkt, daß sich die Festigkeitsverteilungen dieser beiden „Materialien“ weiter voneinander entfernen, so daß sich das Endprodukt Brettschichtholz verstärkt am schwächeren „Material“ orientiert;

werden an die Rohdichte oder den Elastizitätsmodul der Bretter bestimmte Mindestanforderungen gestellt, so sind im Mittel höhere Biegefestigkeiten möglich als bei einer rein visuellen Auswahl der Bretter anhand deren Ästigkeit. Dies ist darauf zurückzuführen, daß mit steigender Rohdichte oder steigendem Elastizitätsmodul der Bretter nicht nur die Festigkeit des „Materials“ Holz zunimmt, sondern auch die des „Materials“ Keilzinkenverbindung (s. z. B. Ehlbeck et al. 1989);

die höchsten Tragfähigkeiten sind zu erwarten, wenn bei der Auswahl der Bretter sowohl die Ästigkeit als auch die Rohdichte oder der Elastizitätsmodul als Kriterien herangezogen werden (vgl. Reihe VI).

Aussagen über die charakteristischen Biegefestigkeiten der einzelnen Trägertypen lassen die hier durchgeführten Versuche nicht zu, weil bei einer Probenzahl von jeweils nur 7 Versuchsträgern keine zuverlässige Bestimmung der 5%-Fraktile möglich war.

### 3 Prognosen des statistischen Modells

In diesem Abschnitt werden die Tragfähigkeiten der geprüften Trägertypen mit Hilfe des statistischen Modells abgeschätzt. Die hierzu erforderlichen Kennwerte der „echten“ Festigkeitsverteilungen der beiden „Materialien“ Holz und Keilzinkenverbindung wurden dabei für jeden Trägertyp in Abhängigkeit von den jeweils gestellten Anforderungen an die Holzeigenschaften der Brettlamellen mit Hilfe des „Karlsruher Rechenmodells“ berechnet.

Um die Tragfähigkeit der Träger mit Keilzinkenversagen möglichst zuverlässig abschätzen zu können, wurden an dem Tag, an dem die Versuchsträger hergestellt wurden, insgesamt 15 keilgezinkte Brettabschnitte entnommen und deren Biegefestigkeit ermittelt. Diese Untersuchungen ergaben, daß am Herstellungstag der Versuchsträger etwa 10% höhere Keilzinkenfestigkeiten produziert wurden, als dies sonst im Mittel zu erwarten ist. Diese höhere Keilzinkenqualität wurde bei den Simulationsrechnungen berücksichtigt.

Bei der Auswahl der Decklamellen standen Bretter mit einer Länge von etwa 4 m zur Verfügung, so daß die Abschätzung des „Volumeneffektes“ mit folgenden Größen erfolgte:

$$(L/L_0) \cdot (BL_0/BL) = (7500/5400) \cdot (4/4) = 1,39 = L/L_0$$

$$H/H_0 = 600/300 = 2,0$$

$$\Delta/L = 2000/7500 = 0,267$$

Hierbei entsprechen  $L$  und  $H$  den Abmessungen,  $BL$  der mittleren Länge der eingebauten Bretter und  $\Delta$  dem Lastab-

stand der Versuchsträger und  $L_0, H_0$  und  $BL_0$  den zugehörigen Werten des Standardträgers.

Unter der Annahme, daß alle Träger aufgrund eines Keilzinkenversagens zu Bruch gehen, sind für jeden Trägertyp die zu erwartende 5%-Fraktile  $x_{5,KZV}$  und der Mittelwert  $m_{KZV}$  der Biegefestigkeit in Tabelle 4a und b angegeben.

**Tabelle 4a.** Berechnung der 5%-Fraktile  $x_{5,KZV}$

Versuchsreihe	$x_{5,KZV}^0$ N/mm <sup>2</sup>	$k_{L,5,KZV}$	$k_{H,5,KZV}$	$k_{F,5,KZV}$	$x_{5,KZV}$ N/mm <sup>2</sup>
I–III	30,8				26,9
IV	37,0	0,952	0,895	1,022	32,2
V–VI	40,4				35,2

**Tabelle 4b.** Berechnung der mittleren Biegefestigkeit  $m_{KZV}$

Versuchsreihe	$m_{KZV}^0$ N/mm <sup>2</sup>	$k_{L,m,KZV}$	$k_{H,m,KZV}$	$k_{F,m,KZV}$	$m_{KZV}$ N/mm <sup>2</sup>
I–III	48,9				40,4
IV	59,1	0,921	0,864	1,037	48,8
V–VI	61,1				50,4

**Tabelle 5a.** Berechnung der 5%-Fraktile  $x_{5,Holz}$

Versuchsreihe	$x_{5,Holz}^0$ N/mm <sup>2</sup>	$k_{L,5,Holz}$	$k_{H,5,Holz}$	$k_{F,5,Holz}$	$x_{5,Holz}$ N/mm <sup>2</sup>
I	28,4				26,4
II	33,3				31,0
III	37,3				34,7
IV	40,9	0,977	0,940	1,013	38,1
V	43,0				40,0
VI	47,4				44,1

**Tabelle 5b.** Berechnung der mittleren Biegefestigkeit  $m_{Holz}$

Versuchsreihe	$x_{Holz}^0$ N/mm <sup>2</sup>	$k_{L,m,Holz}$	$k_{H,m,Holz}$	$k_{F,m,Holz}$	$m_{Holz}$ N/mm <sup>2</sup>
I	39,1				35,2
II	43,7				39,3
III	47,9				43,1
IV	52,0	0,968	0,914	1,017	46,8
V	54,2				48,7
VI	58,2				52,3

**Tabelle 6.** Berechnung der 5%-Fraktile  $\sigma_5$  und des Medianwertes  $\sigma_{50}$  der Biegefestigkeit jeder Versuchsreihe mit Hilfe des theoretischen Modells

Reihe	$\frac{x_{5,1}}{x_{5,2}}$	$\frac{m_1}{m_2}$	$v_1$	$\frac{\sigma_5}{x_{5,1}}$	$\frac{\sigma_{50}}{m_1}$	$\sigma_5$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_{50}$ N/mm <sup>2</sup>	$m_{\text{versuch}}^a$ N/mm <sup>2</sup>
I	0,981	0,871	0,15	0,933	0,953	24,6	33,5	34,7
II	0,868	1,028	0,20	0,985	0,900	26,5	36,4	38,9
III	0,775	0,937	0,20	0,998	0,949	26,8	38,3	40,3
IV	0,845	1,043	0,20	0,991	0,893	31,9	43,6	46,0
V	0,880	1,035	0,20	0,980	0,900	34,5	45,4	47,7
VI	0,798	0,964	0,20	1,000	0,940	35,2	47,4	50,2

<sup>a</sup> Mittelwerte aus Tabelle 3

Hierbei entsprechen  $x_{5,KZV}^0$  bzw.  $m_{KZV}^0$  den 5%-Fraktile bzw. den Mittelwerten der Biegefestigkeit der jeweiligen Standardträger und  $k_i$  den Faktoren zur Berücksichtigung des Längen-, Höhen- und Belastungseinflusses. Für den Fall der mittleren Biegefestigkeit wurden diese Faktoren nach Colling (1990c) berechnet, weil die im Teil 2 dieser Arbeit angegebenen Gleichungen nur für  $(L/L_0) \cdot (BL_0/BL) \geq 2$  gelten.

Nimmt man hingegen an, daß alle Versuchsträger aufgrund eines Holzversagens zu Bruch gehen, so sind die in Tabelle 5a und b angegebenen Festigkeitswerte  $x_{5,Holz}$  und  $m_{Holz}$  zu erwarten.

Bei Versuchen mit „normalen“ Brettschichtholzträgern wird sich aber in der Regel weder ein reines Holzversagen noch ein reines Keilzinkenversagen einstellen, sondern das Endprodukt Brettschichtholz wird je nach Festigkeitseigenschaften der „Materialien“ Keilzinkenverbindung und Holz ein gemischtes Tragverhalten aufweisen. Sind die Festigkeitsverteilungen der beiden „Materialien“ bekannt, so kann dieses Tragverhalten mit Hilfe des in Teil 1 beschriebenen „Mischverfahrens“ abgeschätzt werden.

In Tabelle 6 sind für jede Versuchsreihe der vom statistischen Modell erwartete Medianwert  $\sigma_{50}$  ( $\approx$  Mittelwert) und die zugehörige 5%-Fraktile  $\sigma_5$  der Biegefestigkeit angegeben. Diese Werte wurden auf der Grundlage der in den Tabellen 4 und 5 angegebenen Festigkeitswerte ermittelt.

Als das schwächere „Material“ mit der geringeren 5%-Fraktile erweist sich bei nahezu allen Versuchsreihen die Keilzinkenverbindung. Für diese Fälle erfolgte die Berechnung von  $\sigma_5$  und  $\sigma_{50}$  mit Hilfe von Bild 2 und Bild 3 des ersten Teiles dieser Veröffentlichungsreihe (Colling 1990a). Die hierzu erforderlichen Kenngrößen  $x_{5,1}/x_{5,2}$  und  $m_1/m_2$  sind ebenfalls in Tabelle 6 angegeben.

Lediglich bei Trägertyp I, bei dem in den Decklamellen größere Äste auftraten, liegt die erwartete 5%-Fraktile der Träger mit Holzversagen unter dem entsprechenden Wert der Träger mit Keilzinkenversagen. Für diesen Fall sind die o. a. Diagramme wegen des geringeren Variationskoeffizienten des schwächeren „Materials“ ( $v_1 = 0,15$  anstelle von  $v_1 = 0,20$ ) nicht anwendbar, so daß hier  $\sigma_5$  und  $\sigma_{50}$  ebenfalls nach Colling (1990c) berechnet wurden.

Weiterhin wurde die für jede Versuchsreihe zu erwartende Auftretungshäufigkeit eines Keilzinkenversagens abgeschätzt. In Tabelle 7 sind die berechneten Prozentzahlen angegeben.

Aus Tabelle 6 und 7 ist zu erkennen, daß es mit dem statistischen Modell möglich ist, die bei den Trägerversuchen festgestellten Tendenzen auf rechnerischem Wege zu beschreiben. So wird z. B. die zunehmende Auftretungshäufigkeit eines Keilzinkenversagens mit kleiner werdender Ästigkeit der Brett lamellen genauso erfaßt wie die höhere Tragfähigkeit der Träger, bei denen an die Rohdichte oder an den

**Tabelle 7.** Erwartete Auftretenshäufigkeit  $P_{KZV}$  eines Keilzinkenversagens

Versuchsreihe	$\frac{m_{\text{Holz}} - m_{\text{KZV}}}{\sqrt{s_{\text{Holz}}^2 + s_{\text{KZV}}^2}}$	$P_{KZV}$ %
	I	
II	-0,115	45
III	0,281	61
IV	-0,174	43
V	-0,234	40
VI	0,090	54

Elastizitätsmodul der Lamellen bestimmte Mindestanforderungen gestellt wurden.

Im Gegensatz zu den Trägerversuchen mit begrenzter Probenzahl ist es mit Hilfe des theoretischen Modells aber nicht nur möglich, Aussagen über die mittleren Biegefestigkeiten zu machen, sondern auch über die zugehörigen 5%-Fraktile.

So ist aus Tabelle 6 zu erkennen, daß bei kleiner werdender Ästigkeit der Brettlamellen die 5%-Fraktile dem Verlauf der mittleren Biegefestigkeit nur teilweise folgt: zwischen den charakteristischen Biegefestigkeiten der Reihen II und III ist im Gegensatz zum Mittelwert kein nennenswerter Unterschied mehr festzustellen. Dies ist darauf zurückzuführen, daß bereits beim Trägertyp II das „Material“ Holz soviel besser ist als das „Material“ Keilzinkenverbindung, daß die 5%-Fraktile des Endproduktes Brettschichtholz praktisch identisch ist mit dem entsprechenden Wert des schwächeren „Materials“. Eine alleinige Steigerung der Holzfestigkeit durch eine Verringerung der zulässigen Astgröße ermöglicht daher keine nennenswerte Anhebung der 5%-Fraktile.

Eine merkliche Steigerung der charakteristischen Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern ist nur dann zu erreichen, wenn neben den Festigkeitseigenschaften des „Materials“ Holz auch die des „Materials“ Keilzinkenverbindung verbessert werden. Dies ist z. B. durch bestimmte Mindestanforderungen an die Rohdichte oder den Elastizitätsmodul der Bretter möglich (vgl. Reihe IV–VI).

Weiterhin ist zu erkennen, daß, mit Ausnahme der Reihe I, die erwarteten 5%-Fraktile der Versuchsträger praktisch identisch sind mit den 5%-Fraktile der zugehörigen „Materialien“ Keilzinkenverbindung ( $\sigma_5/x_{5,1} \approx 1$ ). Bei den hier geprüften Trägertypen ist also zu erwarten, daß von jeweils 100 Trägern die 5 Träger mit den geringsten Tragfähigkeiten alle aufgrund eines Keilzinkenversagens zu Bruch gehen.

Dies bedeutet, daß in praktischen Fällen, in denen versucht wird, Brettschichtholzträger mit mittlerer und hoher Tragfähigkeit herzustellen, die bei der Bemessung maßgebende charakteristische Biegefestigkeit nahezu ausschließlich von den Festigkeitseigenschaften der Keilzinkenverbindungen bestimmt wird. Die Holzfestigkeit ist in diesen Fällen nur von untergeordneter Bedeutung und beeinflusst lediglich den zu erwartenden Mittelwert der Biegefestigkeit.

#### 4 Vergleich zwischen Versuch und Rechnung

In Bild 2 sind für jede Versuchsreihe neben den Versuchsergebnissen (Einzelwerte) auch die Streubereiche  $\sigma_{50} \pm s$  angegeben, in denen laut Rechenmodell etwa  $2/3$  aller Werte zu erwarten sind. Hierbei entspricht der Wert  $s$  der Standardabweichung einer durch die 5%-Fraktile  $\sigma_5$  und den Medianwert  $\sigma_{50}$  „hineingezwängten“ Normalverteilung.

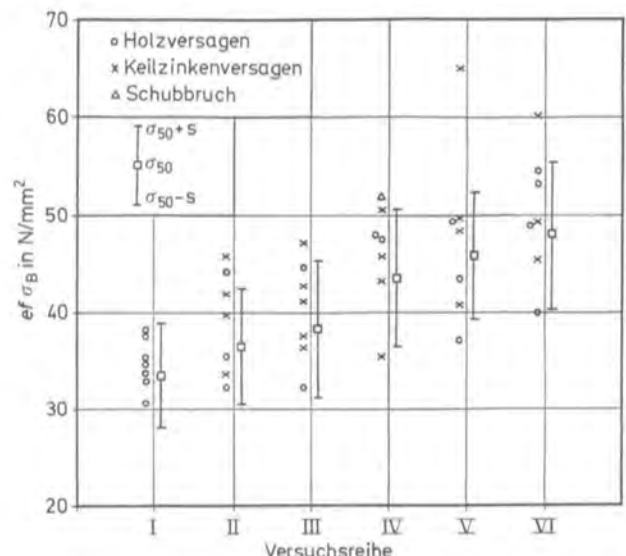
In diesem Bild ist eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den Versuchsergebnissen und den Rechenergebnissen zu erkennen. Bei allen Versuchsreihen wurde das Tragverhalten der geprüften Träger sowohl hinsichtlich der absoluten Festigkeitswerte als auch der Streubreite der Versuchswerte richtig erfaßt.

Aus diesem Bild ist auch zu erkennen, daß der vom Rechenmodell erwartete Medianwert  $\sigma_{50}$  in allen Fällen etwa 5% unter der mittleren Biegefestigkeit der geprüften Träger liegt. Dies deutet auf eine systematische Unterschätzung der Versuchsträger durch das statistische Modell hin.

Ein Grund hierfür könnte sein, daß der Medianwert einer Verteilung nicht mit dem Mittelwert identisch sein muß. Bei rechtsschiefen Verteilungen z. B. mit einem verlängerten Arm in Richtung der hohen Festigkeitswerte ist der Medianwert betragsmäßig kleiner als der Mittelwert, der ja bekanntlich dem Schwerpunkt der Verteilung entspricht.

Weiterhin ist zu berücksichtigen, daß die für jede Versuchsreihe vom Rechenmodell vorhergesagten Festigkeitswerte für die Grundgesamtheit aller in den deutschen Leimbaubetrieben hergestellten Brettschichtholzträger gelten. Die Versuchsträger hingegen wurden alle innerhalb eines Tages in ein und derselben Firma hergestellt. Dies bedeutet, daß die Versuchsergebnisse nur für das im Herstellungszeitraum zur Verfügung stehende Brettmaterial und die am Herstellungstag produzierte Keilzinkenqualität Gültigkeit besitzen. So ist es durchaus möglich, daß die eingebauten Keilzinkenverbindungen eine noch höhere Festigkeit aufwiesen, als dies aufgrund der oben erwähnten Versuche mit 15 Proben zu erwarten war.

Die Möglichkeit eines systematischen „Fehlers“ wurde jedoch in Kauf genommen, da es nur aufgrund dieser Einschränkungen bzgl. der Trägerherstellung möglich war, die vom Rechenmodell vorhergesagten Tendenzen versuchsmäßig auch nachzuweisen. Eine Entnahme bzw. Herstellung der Versuchsträger zu verschiedenen Zeitpunkten bei verschiedenen Leimbaubetrieben (mit unterschiedlicher Keilzinkenqualität) hätte eine zusätzliche, z. T. unerklärte Streuung der Versuchswerte zur Folge gehabt, die eine eigentlich vorhandene Tendenz hätte zunichte machen oder zumindest verwischen können.

**Bild 2.** Vergleich zwischen den Versuchswerten und den Rechenergebnissen

**Fig. 2.** Test results compared with calculation results

Insgesamt gesehen konnte also eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Versuch und Rechnung festgestellt werden. Aufbauend auf den Simulationsrechnungen des „Karlsruher Rechenmodells“ ist das statistische Modell somit in der Lage, das Tragverhalten von Brettschichtholzträgern in Abhängigkeit von den festigkeitsrelevanten Einflußgrößen rechnerisch zu beschreiben.

## 5 Zusammenfassung

Das im Teil I dieser Veröffentlichungsreihe vorgestellte statistische Modell wurde mit Hilfe von insgesamt 42 Biegeversuchen mit Brettschichtholzträgern überprüft, an deren Brett lamellen unterschiedliche Anforderungen bzgl. der Holzeigenschaften gestellt wurden.

Diese Versuche bestätigten hierbei u. a. folgende vom statistischen Modell vorhergesagte Tendenzen:

- schärfere Anforderungen an die Ästigkeit der Brett lamellen bewirken nur bedingt höhere Tragfähigkeiten der Brettschichtholzträger, weil aufgrund des verstärkt auftretenden Keilzinkenversagens die höhere Festigkeit der Bretter nur noch selten ausgenutzt werden kann;
- erst mit höherer Rohdichte und/oder Elastizitätsmodul der Brett lamellen sind höhere Tragfähigkeiten möglich, weil sich diese Holzeigenschaften auch günstig auf die Festigkeitseigenschaften der Keilzinkenverbindungen auswirken.

Die Abweichungen zwischen den Rechenergebnissen und den Versuchsergebnissen waren gering ( $\approx 5\%$ ), so daß eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Versuch und Rechnung festgestellt werden konnte. Aufbauend auf den Simulationsrechnungen des „Karlsruher Rechenmodells“ ist es mit Hilfe des statistischen Modells somit möglich, das Tragverhalten von Brettschichtholzträgern in Abhängigkeit von den festigkeitsrelevanten Einflußgrößen Keilzinkenfestigkeit und Holzeigenschaften der Brett lamellen sowie von der Trägergröße treffend zu beschreiben.

## 6 Ausblick

Auf der Grundlage des statistischen Modells wurde gezeigt, daß sich die Tragfähigkeit des Endproduktes Brettschichtholz sehr stark am schwächeren der beiden „Materialien“ Keilzinkenverbindung und Holz orientiert. Zahlreiche Simulationsrechnungen mit Hilfe des „Karlsruher Rechenmodells“ deuten nun darauf hin, daß, bei gleichen Holzeigenschaften der Brett lamellen, die Träger mit Keilzinkenversagen in den meisten Fällen eine geringere charakteristische Biegefestigkeit (5%-Fraktile) aufweisen als die Träger mit Holzversagen, wobei die Tragfähigkeitsunterschiede mit besser werdenden Holzeigenschaften zunehmen. Da weiterhin der „Volumeneffekt“ aufgrund der größeren Streuung der Festigkeitswerte bei den Trägern mit Keilzinkenversagen ausgeprägter ist als bei den Trägern mit Holzversagen, ist zu erwarten, daß die charakteristische Tragfähigkeit von „guten“ Brettschichtholzträgern mit praxisnahen Abmessungen nahezu ausschließlich von den Festigkeitseigenschaften der Keilzinkenverbindungen bestimmt wird.

Hohe Tragfähigkeiten von Brettschichtholzträgern können somit nur erzielt werden, wenn neben einer bestimmten Holzqualität auch eine bestimmte Mindestfestigkeit der Keilzinkenverbindungen gewährleistet ist. Während hierbei die geforderte Güte des Brettmaterials mit Hilfe einer geeigneten Holzsortierung gewährleistet werden kann, ist dies bei der Keilzinkenfestigkeit wegen des großen Einflusses der produktionsabhängigen Faktoren nur mittels einer laufenden Festigkeitsprüfung in den Leimbaubetrieben möglich.

Da aber eine laufende Überprüfung der für die Tragfähigkeit der Brettschichtholzträger maßgebenden Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindungen in den Leimbaubetrieben praktisch nicht durchführbar ist, verbleibt nur die Möglichkeit, die Qualität der Keilzinkenverbindungen über deren Biegefestigkeit abzuschätzen. Kennt man das Verhältnis zwischen Zug- und Biegefestigkeit der Keilzinkenverbindungen, so kann deren Zugfestigkeit mit Hilfe von Biegeversuchen an keilgezinkten Brettabschnitten abgeschätzt werden. Das Verhältnis zwischen Zug- und Biegefestigkeit der Keilzinkenverbindungen wird z. Z. im Rahmen eines laufenden Forschungsvorhabens untersucht.

Aufgrund des aufgezeigten dominanten Einflusses der Keilzinkenverbindungen auf die Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern dürfte es nach Abschluß dieser Untersuchungen möglich sein, einen Bemessungsvorschlag zu entwickeln, der die charakteristische Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern ausschließlich in Abhängigkeit von der charakteristischen Biegefestigkeit der Keilzinkenverbindungen beschreibt. Der Einfluß der Trägergröße und der Belastungsart (Volumeneffekt) kann dann mit Hilfe der für das Material „Keilzinkenverbindung“, d. h. der Träger mit Keilzinkenversagen, ermittelten Faktoren beschrieben werden.

Unter Berücksichtigung der Untersuchungen von Ehlbeck et al. (1989) über die Tragfähigkeit von Keilzinkenverbindungen deuten die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen somit darauf hin, daß es nur mit Hilfe einer maschinellen Holzsortierung anhand der Rohdichte und/oder des Elastizitätsmoduls der Bretter möglich ist, hohe Keilzinkenfestigkeiten und somit auch hohe Biegefestigkeiten von Brettschichtholzträgern zu gewährleisten.

## 7 Literatur

- Colling, F. 1990a: Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern in Abhängigkeit von den festigkeitsrelevanten Einflußgrößen. Entwicklung eines statistischen Modells. Holz Roh- Werkstoff 48:269–273
- Colling, F. 1990b: Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern in Abhängigkeit von den festigkeitsrelevanten Einflußgrößen. Einfluß der Trägergröße und der Belastungsart. Holz Roh- Werkstoff 48:321–326
- Colling, F. 1990c: Tragfähigkeit von Biegeträgern aus Brettschichtholz in Abhängigkeit von den festigkeitsrelevanten Einflußgrößen. Dissertation der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Karlsruhe
- Ehlbeck, J.; Colling, F.; Wenz, J. 1989: Prüfung der Tragfähigkeit von Keilzinkenverbindungen der Lamellen für Brettschichtholz. Forschungsbericht der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abt. Ingenieurholzbau, Universität Karlsruhe
- Görlacher, R. 1990: Klassifizierung von Brettschichtholz lamellen durch Messung von Longitudinalschwingungen. Dissertation der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Karlsruhe



## Veranstaltungsberichte

### Hat auch die Forschung die Mauer durchbrochen?

*Deutsch/Deutsches Seminar zur Holzforschung/-normung*

Am 30. 5. 1990 fand in Berlin ein Informationsseminar zur künftigen deutsch/deutschen Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Holzforschung statt. Organisiert wurde das Seminar vom Fachausschuß Ingenieurholzbau bei der Kammer der Technik der DDR und der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung, München. Primär zielte das Seminar auf das Kennenlernen der mit der Holzforschung und -entwicklung befaßten Fachgremien und -kollegen in beiden Ländern sowie der Diskussion über die Möglichkeiten, Wege und notwendigen Aktivitäten einer künftigen engeren Zusammenarbeit im Hinblick auf die Vereinigung beider Länder.

Nach der Eröffnung der Veranstaltung durch den Vorsitzenden des Fachausschusses, Dr.-Ing. W. Rug, Bauakademie der DDR, stellte Dipl.-Ing. J. Tebbe, Geschäftsführer der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung, München, Struktur, Ziele und Arbeitsweise dieser traditionsreichen Forschungsvereinigung vor und betonte das große Interesse der Organisation zur Einbeziehung der DDR-Kapazitäten in die Arbeit der Fach- und Arbeitsausschüsse und den Arbeitskreis Entwicklungsgemeinschaft Holzbau.

Die Einführung der DIN-Normen in der DDR beginnt, wie Dipl.-Holzwirt Lorentzen, Geschäftsführer des Normenausschusses Holzwirtschaft und Möbel im Deutschen Institut für Normung e. V., Köln, informierte, im September 1990. Vorgestellt wurden die einzelnen Fachbereiche und Normenausschüsse. Zur aktiven Mitarbeit von DDR-Fachkollegen bei den verschiedensten Normungsarbeiten wurde eingeladen.

Herr Dipl.-Ing. H. J. Irmschler berichtete über die Aufgaben des Institutes für Bautechnik und die Zusammenarbeit des IfBT's mit den verschiedensten Gemeinschaftsorganisationen, wie z. B. der DGfH/EGH und dem Normenausschuß. Da die Bauaufsicht in die Zuständigkeit der Länder fällt, werden Abstimmungen über die Bauordnungen in der Arbeitsgemeinschaft „Bau“ der Länder geregelt. Zu den wesentlichen Aufgaben des Institutes für Bautechnik gehören:

- Zulassungen/Prüfzeichen
- Zulassungsprüfstellen
- Güteschutzgemeinschaft

und Erarbeitung von bautechnischen Richtlinien. Für bauaufsichtlich relevante Forschungen steht ein Etat von 2 Mio DM zur Verfügung. In Vorbereitung ist ein Abkommen zwischen dem Institut für Bautechnik und der Bauakademie. Hierbei ist vorgesehen, die betreffenden DDR-Fachkollegen mit Gästestatus, nach Bestätigung durch das Ministerium für Bauwesen, Städtebau und Wohnungswirtschaft der DDR, in die Sachverständigenausschüsse zu integrieren.

Als erster DDR-Kollege sprach Prof. Dr. Baumann, Technische Universität Dresden, Sektion Forstwissenschaften Tharandt. Diese traditionsreiche Forschungsstätte der TU Dresden ist 1928 aus der Forstakademie hervorgegangen. Sie befaßt sich vor allem mit einem breiten Spektrum forstwissenschaftlicher (Boden- und Standortkunde, Waldbau, Forstschutz, Forsteinrichtungen u. a.) sowie holznutzungstechnischer Fragen (Gewinnung und mechanisch-chemischer Verwertung, Ligninverwertung, Holz-anatomie, Rohholzsartierung, Emissionsauswirkung auf Holzqualität u. a.).

O. Merker, Direktor des wissenschaftlich-technischen Zentrums der holzverarbeitenden Industrie GmbH (i. G.), Dresden, betonte die Orientierung seiner Einrichtung auf die Möbel- und Holzwerkstoffindustrie mit den Schwerpunkten: Rohstoffausnutzung, Werkstoffentwicklung, Möbelentwicklung und Möbelherstellung. Die Integration in die Ausschüsse der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung hat schon begonnen. Geplant ist auch ein größerer Einstieg in die Normung. Die bisherige Abhängigkeit von einem Kombinat wurde aufgehoben, und es ist eine Profilierung zu einem staatlichen Forschungsinstitut geplant. Der Wissenschaftsbereich Holz- und Faserwerkstofftechnik der Technischen Universität Dresden ist ein ma-

schinenbauorientierter Wissenschaftsbereich. Sein Leiter, Prof. Dr. sc. techn. Kühne, skizzierte die Aufgaben. Neben der jährlichen Ausbildung von 35 bis 40 Studenten plus 10 ausländischen Studenten widmet sich der Wissenschaftsbereich vor allem Forschungsaufgaben zur Erhöhung der Wertschöpfung des Holzes, wobei die stofflichen und prozeßtechnischen Belange verknüpft werden (z. B. CAD/CAM-Lösungen, Entwicklung holzanaloger Werkstoffe, Stoffmodifikationen, schnittholzdefektoskopische Probleme und zerstörungsfreie Verfahren von Werkstoffeigenschaften). Die Entwicklung der Holzbauforschung in der DDR wurde bisher durch zwei Aspekte bestimmt: den Anteil des Bauwesens am Schnittholzverbrauch von 15% und das Bemühen, die beschränkten Forschungskapazitäten seit Beginn der 90er Jahre zu erweitern und auf Schwerpunkte zu orientieren. Die koordinierenden Aufgaben hat der vor 10 Jahren gegründete Fachausschuß Ingenieurholzbau, unter der Leitung von Dr.-Ing. W. Rug, Bauakademie der DDR, übernommen. Im wesentlichen wurden 3 Forschungsgebiete bearbeitet:

Neue Konstruktionen, historische Konstruktionen und Grundlagen.

Neuentwicklungen bei Serienkonstruktionen wurden vor allem vom Kombinat Bauфа (jetzt Bauфа AG) und im Auftrag dieses Kombinats von der Bauakademie betrieben.

Das Forschungsgebiet historische Konstruktionen bestritten vor allem die Hochschulen und die Bauakademie.

Bei den Grundlagen wurden neben einzelnen Themen, wie Vorspannung und Bewehrung, Brettschichtholzträger mit Pappelholz, ein großer Komplex gemeinsam erforscht. Das waren den Holzbau der DDR betreffende Fragen der Umstellung der Berechnungs- und Bemessungsnormen auf das teilprobabilistische Sicherheitskonzept.

Dr. Kofent vom Forschungsinstitut Bauфа AG, Leipzig, betonte, daß der größte Betrieb auf dem Gebiet der Baukonstruktionen vielfältige Forschungs- und Entwicklungsaufgaben bearbeitet. Neben statischen und technologischen Untersuchungen standen im Mittelpunkt Normungsfragen (Berechnungs- und Qualitätsnormen) sowie Grundlagenarbeiten für Brettschichtholz- und Holzwerkstoffkonstruktionen. Zahlreiche experimentelle Untersuchungen wurden im eigenen Prüflabor durchgeführt.

Seit 1978 besteht die Dozentur Holzbau an der TH Wismar, die von Dr. sc. techn. Erler geleitet wird. Wesentliche Forschungsaufgaben seit dieser Zeit waren Untersuchungen zur Festigkeit von Bauholz, das Verhalten von Bau- und Brettschichtholz unter dem Einfluß von chemisch aggressiven Medien, der Methodik zur Instandsetzung historischer Holztragwerke sowie spezieller Instandsetzungsmethoden mittels Polyesterharzbeton.

Über die Aufgaben der Dozentur Holz- und Plastbau an der Technischen Universität Dresden, Sektion Bauingenieurwesen, informierte Prof. Dr. sc. techn. Zimmer. Untersucht wurden die Tragfähigkeit von Verbindungsmitteln, das Spannungs- und Verformungsverhalten von Holz- und Holzwerkstoffträgern sowie Rekonstruktion und Sanierung von Holztragwerken.

Die Abteilung Holzschutz und -biologie des Institutes für Forstwissenschaften Eberswalde ist die autorisierte Zentralstelle für Holzschutz in der DDR. Wie Dr. Rafalski betonte, sind ihre wesentlichen Aufgaben die Holzschutzmittelverwertung, die Holzschutzverfahren und die Optimierung der Holzschutzmitteltypen. Weiterhin gibt es 20 Ausbildungsstellen für Holzschutzfachleute. In der DDR wurden bisher ca. 4000 Holzschutzfachleute zugelassen. Außerdem gibt es ca. 70 Sachverständige für Holzschutz.

Zur Förderung dieses Prozesses werden sowohl der Fachverband Holztechnik als auch der Fachausschuß Holzbau als Kontakt- und Koordinierungsstelle zur Deutschen Gesellschaft für Holzforschung und zum DIN-Normungsausschuß Holzwirtschaft und Möbel wirksam werden.

*Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e. V. (DGfH), Schwantaler Straße 79, D-8000 München 2. ☎ (089) 5309199, Fax: (089) 531657*

*Bauakademie der Deutschen Demokratischen Republik, Wiss. Abteilung Ingenieurholzkonstruktionen, Unter den Linden 19, DDR-1080 Berlin*