

BRETTSCHICHTHOLZ
IN
FORSCHUNG, NORMUNG UND PRAXIS

François Colling¹

1 Einleitung

Die Brettschichtholzbauweise geht auf eine Patentanmeldung des Weimarer Zimmermeisters Otto Hetzer zurück, der Ende des letzten Jahrhunderts Bohlen untereinander verleimte und so gekrümmte Bauteile herstellte. Diese Bauart wurde zunächst hauptsächlich von schweizer Betrieben aufgegriffen, setzte sich dann aber auch in Deutschland und später in Nordamerika durch und ist heute in der ganzen Welt verbreitet.

Wegen der damals verwendeten, nicht wetterbeständigen Kaseinleimen war das Hauptaugenmerk anfänglich auf die Festigkeit und Haltbarkeit der Verleimung der Bretter ausgerichtet. Schon bald aber wurden die Vorteile dieser Bauweise auch in Bezug auf das Trag- und Verformungsverhalten der Träger deutlich.

Die Amerikaner waren die ersten, die nach dem zweiten Weltkrieg den neuen Werkstoff systematisch zu untersuchen begannen. Heute jedoch stehen die Europäer, und insbesondere die Deutschen aufgrund der intensiven Forschungsarbeiten, die in Karlsruhe und München durchgeführt wurden, an der Spitze.

Im Verlauf dieses Vortrages will ich einen Überblick geben über die bisher gewonnenen Erkenntnisse, und will auf die theoretischen Hintergründe eingehen, mit denen man die festgestellten Tendenzen erklären kann. Weiterhin will ich die Schlußfolgerungen für die Normung ziehen und zur Diskussion stellen und die Folgen für die Leimbeubetriebe aufzeigen.

¹ Dr.-Ing. F. Colling ist Mitarbeiter der Entwicklungsgemeinschaft Holzbau (EGH) in der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung e.V. (DGfH), München

2 Forschungsergebnisse

2.1 Einflußfaktoren auf die Tragfähigkeit

2.1.1 Einfluß der Versagensart

Bei der Auswertung der nationalen und internationalen Literatur habe ich weit über 1500 Versuchswerte (Einzelwerte) mit allen verfügbaren Informationen bzgl. Holzart, Trägerabmessungen, Versagensart, Vorhandensein von Keilzinkenverbindungen u.a.m. gesammelt.

Die Auswertung nach der Auftretenshäufigkeit einer Versagensart ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Versagensarten, Auftretenshäufigkeiten

	Anzahl	Träger mit	
		Holzversagen	KZ-Versagen
Alle	1767	1183 (878 ohne KZV)	333
Träger mit KZV in 1. Zuglamelle	482	187	295
KZV im hochbean- spruchten Bereich	277	57	220
KZV außerhalb des hoch- beanspruchten Bereiches	205	130	75

Diese Tabelle verdeutlicht das hohe Bruchrisiko einer Keilzinkenverbindung, d.h. die hohe Wahrscheinlichkeit, daß ein Brettschichtholzträger infolge eines Keilzinkenversagens zu Bruch geht.

In Bild 1 sind die Versuchsergebnisse für drei verschiedene Holzarten dargestellt. Hierbei wird nach der Versagensart unterschieden.

Aus diesem Bild geht hervor, daß die Träger mit Keilzinkenversagen im Mittel etwa 20% geringere Tragfähigkeiten besitzen als die Träger mit Holzversagen.

Trotz dieser eindeutigen Tendenzen und Ergebnisse blieb der Einfluß der Keilzinkenverbindungen auf die Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern im Rahmen der Normung und der Produktionsanforderungen weitgehend unberücksichtigt. Erst jetzt im Zuge der Harmonisierung der Europäischen Baubestimmungen ist vorgesehen, bestimmte Mindestanforderungen an die Keilzinkenqualität zu stellen.

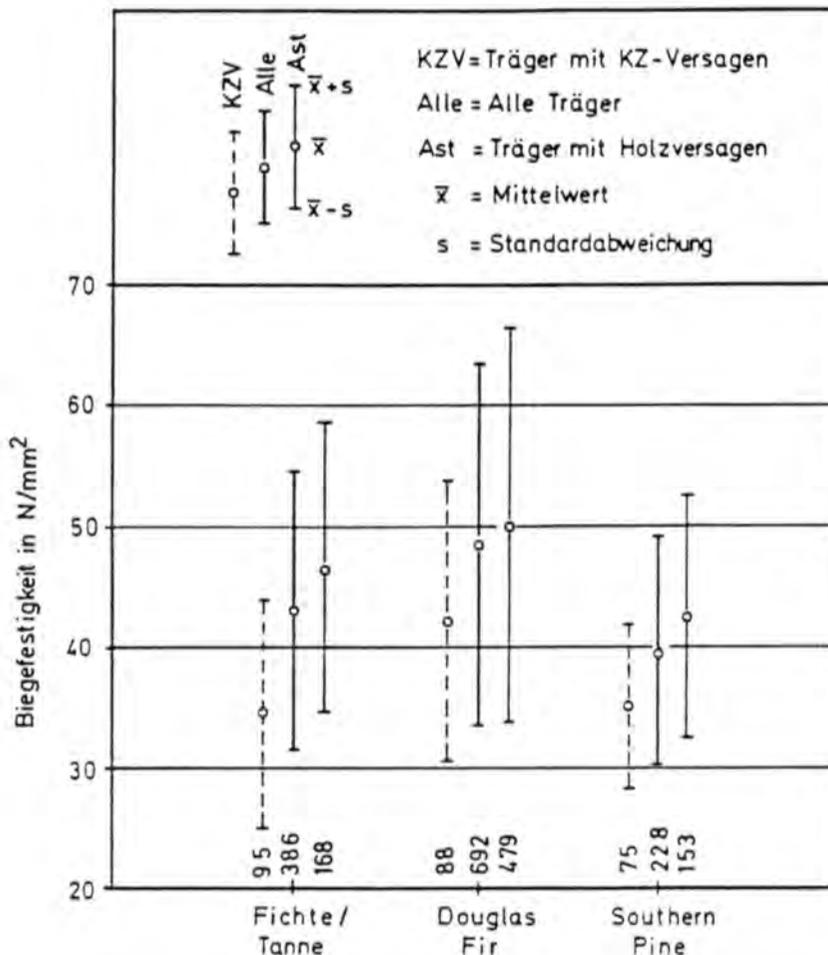


Bild 1: Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern; Unterscheidung nach Holzart und Versagensart

2.1.2 Erhöhtes Bruchrisiko einer Keilzinkenverbindung

Auf der Grundlage von zahlreichen Versuchen, die in München und Karlsruhe durchgeführt wurden, kann die Zugfestigkeit einer Keilzinkenverbindung in etwa gleichgesetzt werden mit einem Brettabschnitt, dessen Äste ca. 30% des Querschnittes einnehmen ($KAR = 0,3$). Trotzdem ist das Versagen eines Brettschichtholzträgers eher auf den Bruch einer Keilzinkenverbindung zurückzuführen als auf einen Bruch im Bereich von Ästen mit o.a. Größe. Dies kann mit dem unterschiedlichen Tragverhalten der beiden Brettabschnitte im Brettschichtholzträger erklärt werden.

Eine Keilzinkenverbindung ist eine sehr steife Verbindung, und der Elastizitätsmodul eines Brettabschnittes mit Keilzinkenverbindung entspricht dem des fehlerfreien Holzes ($E_{KZV} = E_0$). Ein Brettabschnitt mit Ästen hingegen weist aufgrund der Querschnittsschwächung und der schräg verlaufenden Fasern einen geringeren Elastizitätsmodul auf ($E_{Ast} \approx 0,7 \cdot E_0$). Werden diese Brettabschnitte mit einer anderen Lamelle verleimt, so entsteht ein Verbundquerschnitt, in dem die

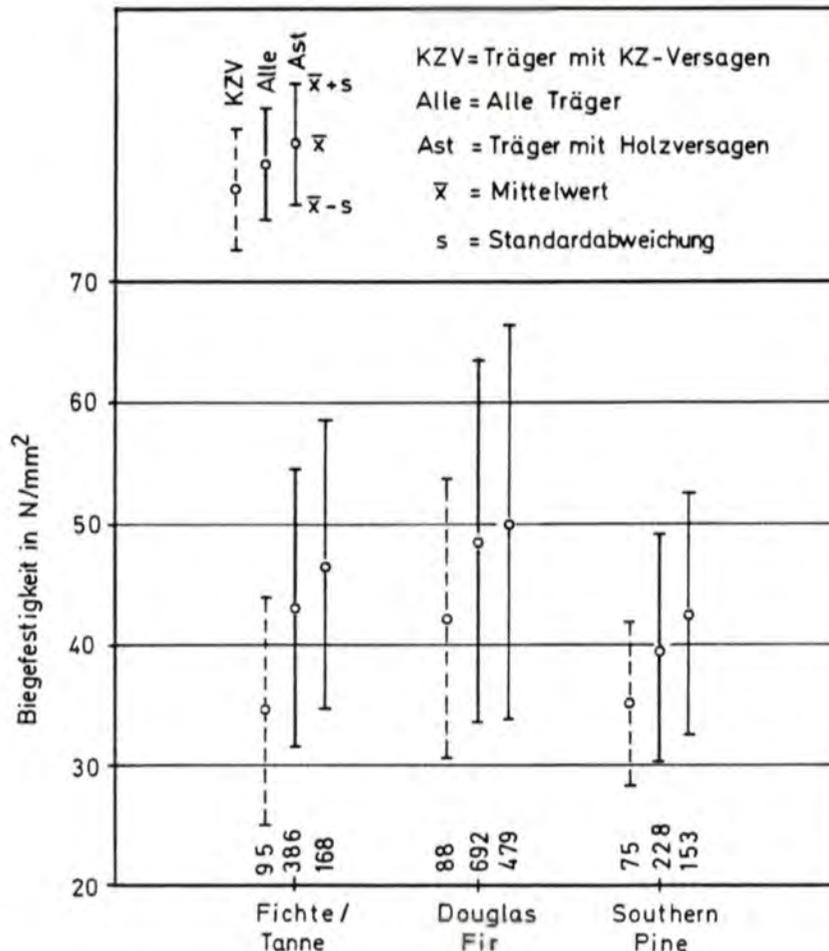


Bild 1: Biegefestigkeit von Brett-schicht-holz-trägern; Unterscheidung nach Holzart und Versagensart

2.1.2 Erhöhtes Bruchrisiko einer Keilzinkenverbindung

Auf der Grundlage von zahlreichen Versuchen, die in München und Karlsruhe durchgeführt wurden, kann die Zugfestigkeit einer Keilzinkenverbindung in etwa gleichgesetzt werden mit einem Brettabschnitt, dessen Äste ca. 30% des Querschnittes einnehmen ($KAR = 0,3$). Trotzdem ist das Versagen eines Brett-schicht-holz-trägers eher auf den Bruch einer Keilzinkenverbindung zurückzuführen als auf einen Bruch im Bereich von Ästen mit o.a. Größe. Dies kann mit dem unterschiedlichen Tragverhalten der beiden Brettabschnitte im Brett-schicht-holz-träger erklärt werden.

Eine Keilzinkenverbindung ist eine sehr steife Verbindung, und der Elastizitätsmodul eines Brettabschnittes mit Keilzinkenverbindung entspricht dem des fehlerfreien Holzes ($E_{Kzv} = E_0$). Ein Brettabschnitt mit Ästen hingegen weist aufgrund der Querschnittsschwächung und der schräg verlaufenden Fasern einen geringeren Elastizitätsmodul auf ($E_{Ast} \approx 0,7 \cdot E_0$). Werden diese Brettabschnitte mit einer anderen Lamelle verleimt, so entsteht ein Verbundquerschnitt, in dem die

einzelnen Teile zusammenwirken und sich nicht mehr unabhängig voneinander verformen können.

In Bild 2 sind verschiedene Fälle dargestellt. Bei der Darstellung der Lastverteilung wurde die Analogie Elastizitätsmodul = Federsteifigkeit zu Grunde gelegt und der Verbundquerschnitt als parallel geschaltete Federn idealisiert.

$$\begin{aligned} E_z(\text{KZV}) &\approx 1,40 \cdot E_z(\text{KAR}=0,3) \approx E_z(\text{KAR}=0) \\ f_z(\text{KZV}) &\approx f_z(\text{KAR}=0,3) \approx 0,57 \cdot f_z(\text{KAR}=0) \end{aligned}$$

Analogie E-Modul $\langle == \rangle$ Federsteifigkeit

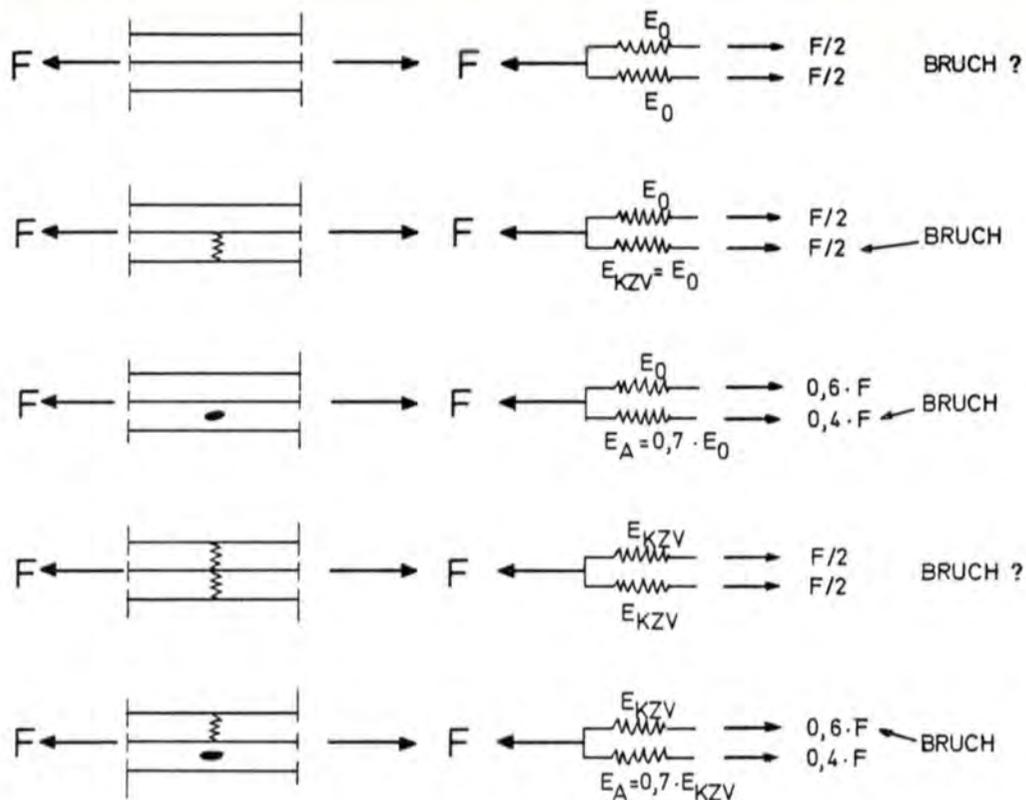


Bild 2: Kräfteverteilung in einem Verbundquerschnitt

Aus diesem Bild ist ersichtlich, daß die Keilzinkenverbindung aufgrund ihrer hohen Steifigkeit genauso viel Kräfte anzieht wie das fehlerfreie Holz, während ein Brettabschnitt mit Ästen "dank" seiner geringeren Steifigkeit Kräfte an den steiferen Nachbarn abgibt. Bei gleicher Zugfestigkeit (im Zugversuch) versagt somit eher die Keilzinkenverbindung als astbehaftetes Holz. Die Keilzinkenverbindung spielt den "starken Mann" und kann dann nicht das halten, was sie verspricht.

Anhand dieser Gegenüberstellungen geht auch hervor, daß die Forderung, daß zwei Keilzinkenverbindungen nicht übereinanderliegen dürfen, die

Keilzinkenproblematik nicht entschärft: der Fall einer Keilzinkenverbindung mit darüberliegendem Ast, der in der Praxis nicht zu vermeiden ist, stellt einen ungünstigeren Fall dar.

Weiterhin wird deutlich, daß eine schärfere visuelle Holzsortierung, d.h. eine Reduzierung der Astgröße nicht zwangsläufig mit einer Erhöhung der Tragfähigkeit der Brettschichtholzträger verbunden ist, da immer häufiger die Keilzinkenverbindung als Versagensursache auftritt und keine weitere Steigerung mehr möglich ist.

2.1.3 Einfluß der Holzeigenschaften der Brettlamellen

Die umfangreichen Untersuchungen zeigten folgende Tendenzen:

- Die inneren Lamellen eines Brettschichtholzträgers sind nur von untergeordneter Bedeutung.
- Die Lamellen im Druckbereich dürfen "schlechter" sein als die Zuglamellen, ohne daß dadurch die Tragfähigkeit beeinträchtigt wird.
- Neben der Ästigkeit beeinflussen auch die Rohdichte und der Elastizitätsmodul die Festigkeit von Brettschichtholzträgern.
- Mit hoher Rohdichte und/oder hohem Elastizitätsmodul der Lamellen sind höhere Tragfähigkeiten zu erreichen als mit geringer Ästigkeit.
- Mit zunehmender Qualität der Bretter nimmt die Auftretenshäufigkeit eines Keilzinkenversagens zu (insbesondere bei visuell sortierten Brettern).

2.1.4 Einfluß der Trägergröße (Volumeneffekt)

Die Bezeichnung "Volumeneffekt" sagt aus, daß mit zunehmender Größe eines Trägers dessen Festigkeit abnimmt. Dieser Effekt, der in Expertenkreisen unumstritten ist, kann statistisch damit erklärt werden, daß mit zunehmender Trägergröße auch die Anzahl der potentiellen Bruchstellen (Keilzinkenverbindungen, Äste) zunimmt. Und je größer diese Zahl, umso größer ist auch die Wahrscheinlichkeit, daß ein Element mit geringer Festigkeit dabei ist.

Der Volumeneffekt ist somit nichts anderes als ein Einfluß der Anzahl der auftretenden Fehlstellen. Somit ist es fraglich, ob eine übertriebene visuelle Holzsortierung, im Zuge derer viele Äste herausgeschnitten und durch Keilzinkenverbindungen ersetzt werden die gewünschte Wirkung hat. In Anbetracht des ungünstigeren Tragverhaltens einer Keilzinkenverbindung im Brettschichtholzträger ist dies eher zu verneinen. Hier ist eine Sortierung, bei der die Bretter als Ganzes verarbeitet werden, anzustreben.

2.2 Rechenmodelle

2.2.1 Finite-Elemente-Modell

Die Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern wird von einer Vielzahl von Parametern beeinflusst, die sich auch gegenseitig beeinflussen, so daß sich die jeweiligen Tendenzen sogar aufheben können. So ist es durchaus möglich, daß große Brettschichtholzträger mit hochwertigen Brettlamellen eine höhere Biegefestigkeit besitzen als kleine Brettschichtholzträger mit nur mittelmäßigen Lamellen (Volumeneffekt durch Holzqualität aufgehoben).

Dies bedeutet, daß zur Untersuchung des Einflusses eines einzelnen Parameters alle übrigen konstant gehalten werden müssen. Dies ist versuchstechnisch kaum durchführbar und ist auch eine Erklärung dafür, daß es bisher noch nicht gelungen ist, die Einflüsse der verschiedenen Parameter zahlenmäßig zu erfassen.

Aus diesem Grunde hat man sich dazu entschlossen, ein Rechenmodell auf der Grundlage der Methode der Finiten Elemente zu entwickeln, mit dessen Hilfe es möglich ist, das Tragverhalten von Brettschichtholzträgern rechnerisch zu beschreiben. Ein Rechenmodell kann aber immer nur so gut sein, wie die Daten mit denen man es füttert. Daher wurden in München unter Leitung von Prof. Glos mehr als 1000 Zug- und Druckversuche mit etwa 15cm-langen Brettabschnitten einschließlich Keilzinkenverbindungen durchgeführt (DIN 4074: alle Äste, die innerhalb von 15cm auftreten, werden zu einer Kenngröße für die Ästigkeit zusammengefaßt).

Die Auswahl der Prüfkörper erfolgte nach rein zufälligen Gesichtspunkten, so daß diese als repräsentativ für das in den Leimbaubetrieben verarbeitete Schnittholz angesehen werden können (große und kleine Äste, hohe und niedrige Rohdichte, mit und ohne Markröhre usw.).

Mit diesen Versuchen konnte man das Verhalten von 15cm-Brettabschnitten beschreiben, während die Methode der Finiten Elemente uns sagt, wie sich ein Träger verhält, der aus lauter 15cm-Elementen zusammengesetzt ist (vgl. Bild 3).

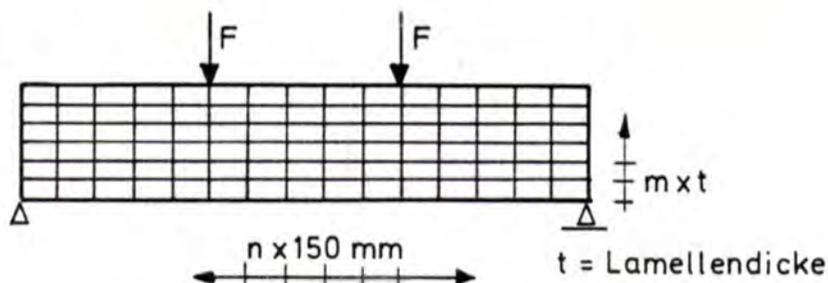


Bild 3: FE-Modellträger

Um den Trägeraufbau, d.h. die Lage von Ästen und Keilzinkenverbindungen simulieren zu können, waren umfangreiche Untersuchungen in den Leimbaubetrieben erforderlich.

In Karlsruhe wurden die hierzu benötigten Programme (Simulations- und Finite Elemente Programm) geschrieben, mit denen es möglich ist, einzelne Parameter zu variieren und andere Parameter konstant zu halten. Das sogenannte "**Karlsruher Rechenmodell**" ermöglicht es auch, eine Vielzahl von Versuchen auf rechnerischem Wege durchzuführen und die für die Bemessung maßgebende 5%-Fraktile einfach zu bestimmen.

2.2.2 Statistisches Modell

Die Berechnungen mit dem "Karlsruher Rechenmodell" zeigten eine Vielzahl von komplexen und ineinander verflochtenen Tendenzen, so daß es nicht einfach war, diese zu deuten und in einfacher Form darzustellen. Hier schaffte ein einfaches statistisches Modell Abhilfe, das im folgenden kurz beschrieben wird.

Nimmt man an, daß alle Träger infolge eines Keilzinkenversagens zu Bruch gehen, so erhält man eine Verteilung F der Festigkeitswerte mit einer 5%-Fraktile $x_{5,1}$ und einem Mittelwert m_1 (siehe Bild 4). Nimmt man hingegen an, daß alle Träger infolge eines Holzversagens zu Bruch gehen, so erhält man eine Verteilung G mit den charakteristischen Werten $x_{5,2}$ und m_2 . In der Realität wird jetzt weder ausschließlich die eine noch ausschließlich die andere Versagensart auftreten, sondern beide zusammen, wenn auch mit unterschiedlicher Häufigkeit. Die Verteilung H der reellen Brettschichtholzträger wird jetzt nicht, wie man geneigt ist anzunehmen, zwischen den Verteilungen F und G liegen, sondern links (d.h. unterhalb) von F . Dies kann damit erklärt werden, daß ein Brettschichtholzträger zwei Versagensarten zur Auswahl hat, und er wird sich naturgemäß für die mit der geringeren Tragfähigkeit entscheiden, weil er sich so früher der Belastung entziehen kann. Das Endprodukt Brettschichtholz kann daher höchstens so gut sein, wie das schwächere seiner beiden "Materialien" Holz und Keilzinkenverbindung.

Es hat somit keinen Sinn, z.B. im Rahmen einer Holzsortierung nur die Festigkeit eines dieser beiden "Materialien" zu erhöhen, weil dann das andere verstärkt als Versagensursache auftritt und die Verbesserungsursache somit nur bedingt zu einer Erhöhung der Brettschichtholztragfähigkeit führt.

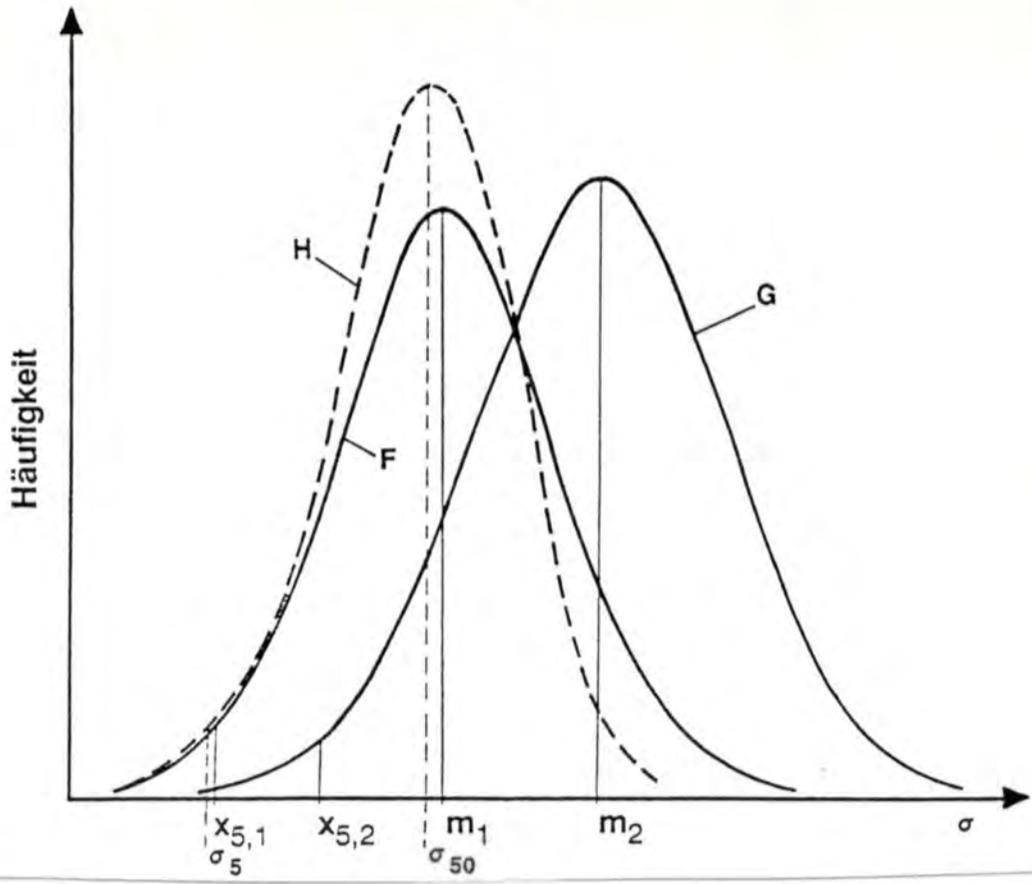


Bild 4 : Festigkeitsverteilungen für das Endprodukt Brett-schichtholz (H) und die beiden "Materialien" F und G

2.3 Ergebnisse

2.3.1 Rechenergebnisse

Einfluß der Holzeigenschaften

Im Bild 5 sind die Ergebnisse von Simulationsrechnungen mit 300 mm-hohen Trägern getrennt für die Träger mit Holzversagen und die Träger mit Keilzinkenversagen dargestellt. Hierbei entspricht jeder eingezeichnete Punkt der 5%-Fraktile, die aus 2000 Simulationsrechnungen bestimmt wurde.

Aus diesem Bild sind folgende Tendenzen zu erkennen:

- eine Verschärfung der visuellen Holzsortierung durch Reduzierung der zulässigen Astgröße führt erwartungsgemäß nur zu einer Erhöhung der Tragfähigkeit der Träger mit Holzversagen, während die Biegefestigkeit der Träger mit Keilzinkenversagen hiervon unbeeinflusst bleibt;

- mit steigender Rohdichte und Elastizitätsmodul nimmt sowohl die Tragfähigkeit der Träger mit Holzversagen zu als auch die der Träger mit Keilzinkenversagen;
- die Tragfähigkeit der Träger mit Keilzinkenversagen ist geringer als die der Träger mit Holzversagen (etwa 20% geringere Festigkeit).

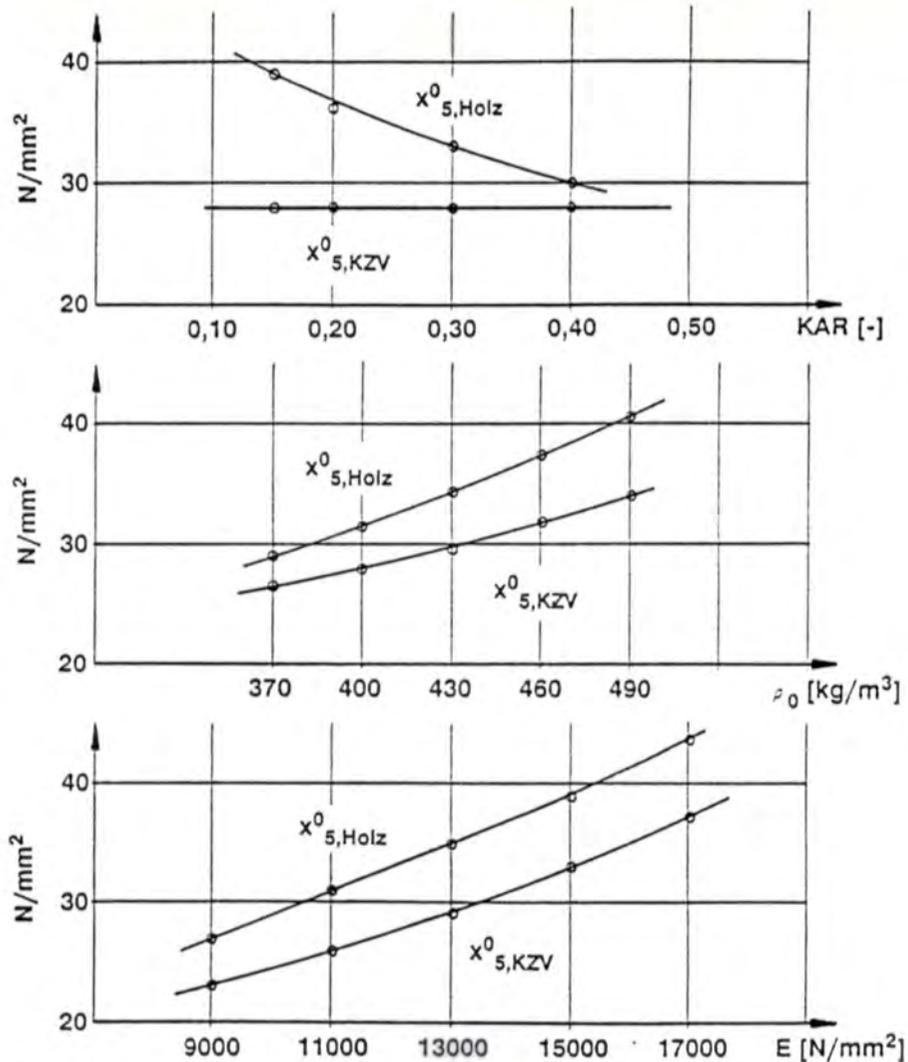


Bild 5: charakteristische Biegefestigkeit von 300 mm BSH-Trägern in Abhängigkeit von KAR-Wert, Darr-Rohdichte und E-Modul der Lamellen

Einfluß der Trägergröße

Im Bild 6 ist die Abnahme der charakteristischen Biegefestigkeit der Träger mit Keilzinkenversagen mit zunehmender Trägerlänge L (Länge $L_0 = 5,4$ m) und abnehmender Brettlänge BL ($BL_0 = 4,0$ m) für verschiedene Variationskoeffizienten v_{KZV} der Keilzinkenzugfestigkeit dargestellt. Ein ähnliches Bild ergibt sich für die Abhängigkeit Biegefestigkeit - Trägerhöhe. Auf eine Darstellung wird an dieser Stelle verzichtet.

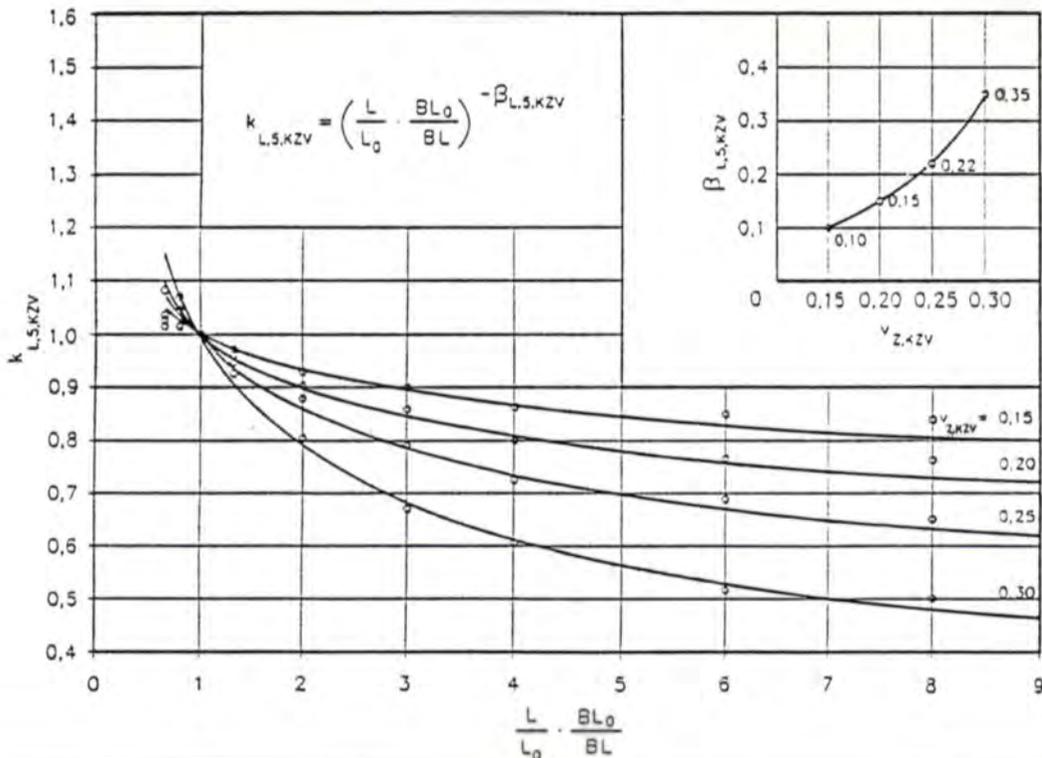


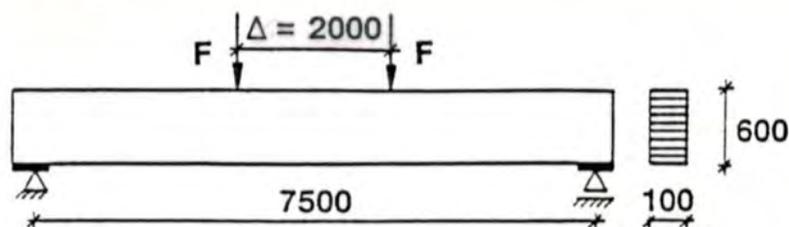
Bild 6: Einfluß der Träger- und Brettlänge auf die 5%-Fraktile der Biegefestigkeit der Träger mit Keilzinkenversagen

Aufgrund zahlreicher Zugversuche mit Keilzinkenverbindungen ist ein Variationskoeffizient von $v_{KZV} \approx 0,20$ und somit ein Exponent von $\beta = 0,15$ zu erwarten. Unter der Annahme, daß der Variationskoeffizient der Keilzinkenzugfestigkeit von Betrieb zu Betrieb schwankt und kleiner sein kann, als betrachte man die Grundgesamtheit aller Betriebe, wurde vorgeschlagen, mit einem Exponenten von $\beta = 0,1$ zu rechnen. Dies erscheint auch im Hinblick auf eine maschinelle Holzsortierung, die eine deutliche Reduzierung der Streuung der Festigkeitswerte bewirkt (siehe hierzu auch Abschnitt 4.3) gerechtfertigt. Unter Annahme eines Exponenten von $\beta = 0,1$ ist aus Bild 6 zu erkennen, daß eine Verdopplung der Trägerlänge oder eine Halbierung der Brettlängen eine Abnahme der charakteristischen Biegefestigkeit um etwa 7% bewirken. Wird sowohl die Trägerlänge verdoppelt als auch die Brettlänge halbiert, so führt dies zu etwa 13% geringerer Tragfähigkeit.

2.3.2 Versuchsergebnisse

Einfluß der Holzeigenschaften

Zur Überprüfung der Rechenergebnisse wurden insgesamt 42 Biegeversuche mit 600 mm hohen Trägern durchgeführt. Die Versuchsvorrichtung ist in Bild 7 dargestellt.



Maße in mm

Bild 7: Abmessungen und Belastung der Versuchsträger

An die jeweils drei äußeren Decklamellen der Träger wurden hierbei die in Tabelle 2 angegebenen Anforderungen bzgl. der Holzeigenschaften gestellt.

Tabelle 2: Anforderungen an die Holzeigenschaften der drei äußeren Lamellen

Versuchsreihe	Anforderungen
I	$0,35 \leq \text{KAR}$
II	$0,20 \leq \text{KAR} \leq 0,35$
III	$\text{KAR} \leq 0,20$
IV	$500 \text{ kg/m}^3 \leq \text{RHO}^1$
V	$15000 \text{ N/mm}^2 \leq \text{E}$
VI	$15000 \text{ N/mm}^2 \leq \text{E}$ und $\text{KAR} \leq 0,20$

¹ Rohdichte bei einer Holzfeuchte von 12 - 14%

Die Versuchsergebnisse sind in Bild 8 den Rechenergebnissen gegenübergestellt. Aus diesem Bild sind folgende Tendenzen zu erkennen:

- eine Verschärfung der visuellen Sortierung (Reihe I - Reihe III) führt zu einem häufigeren Keilzinkenversagen; die mittlere Biegefestigkeit nimmt zwar etwas zu, die 5%-Fraktile strebt jedoch einem asymptotischen Endwert zu (keine weitere Steigerung mehr zu erwarten);

- erst mit bestimmten Mindestanforderungen an die Rohdichte und/oder den Elastizitätsmodul der Bretter (Reihe IV - Reihe VI) ist sowohl bei der mittleren Biegefestigkeit als auch bei der 5%-Fraktile ein deutlicher Sprung zu erkennen. Dies ist darauf zurückzuführen, daß mit steigender Rohdichte und Elastizitätsmodul die Festigkeit beider Einflußfaktoren (Holz und Keilzinkenverbindung) zunimmt.

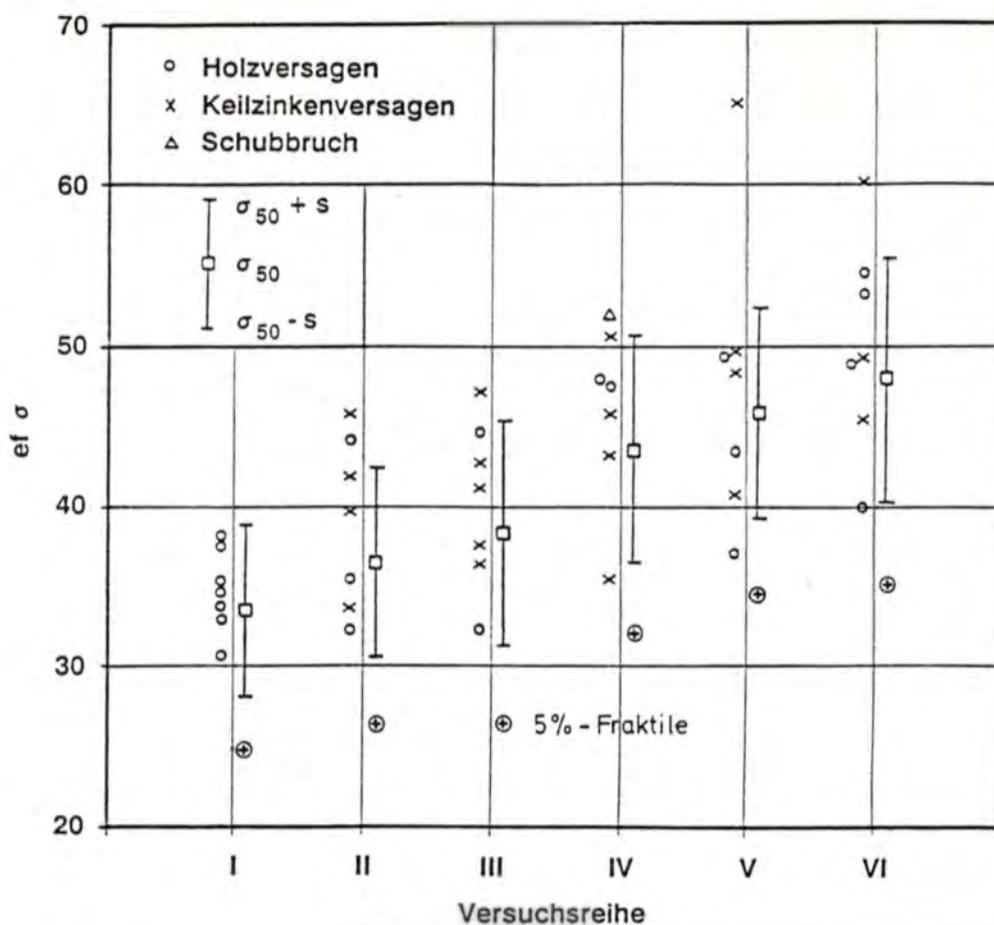


Bild 8: Vergleich zwischen den Versuchswerten und den Rechenergebnissen

Diese Versuche zeigen somit eindeutig die Möglichkeiten bzw. das Potential der maschinellen Holzsortierung auf.

Einfluß der Trägergröße

In Bild 9 sind die Ergebnisse von Biegeversuchen mit Brettschichtholzträgern dargestellt, die alle in ein und demselben Leimbaubetrieb hergestellt wurden.

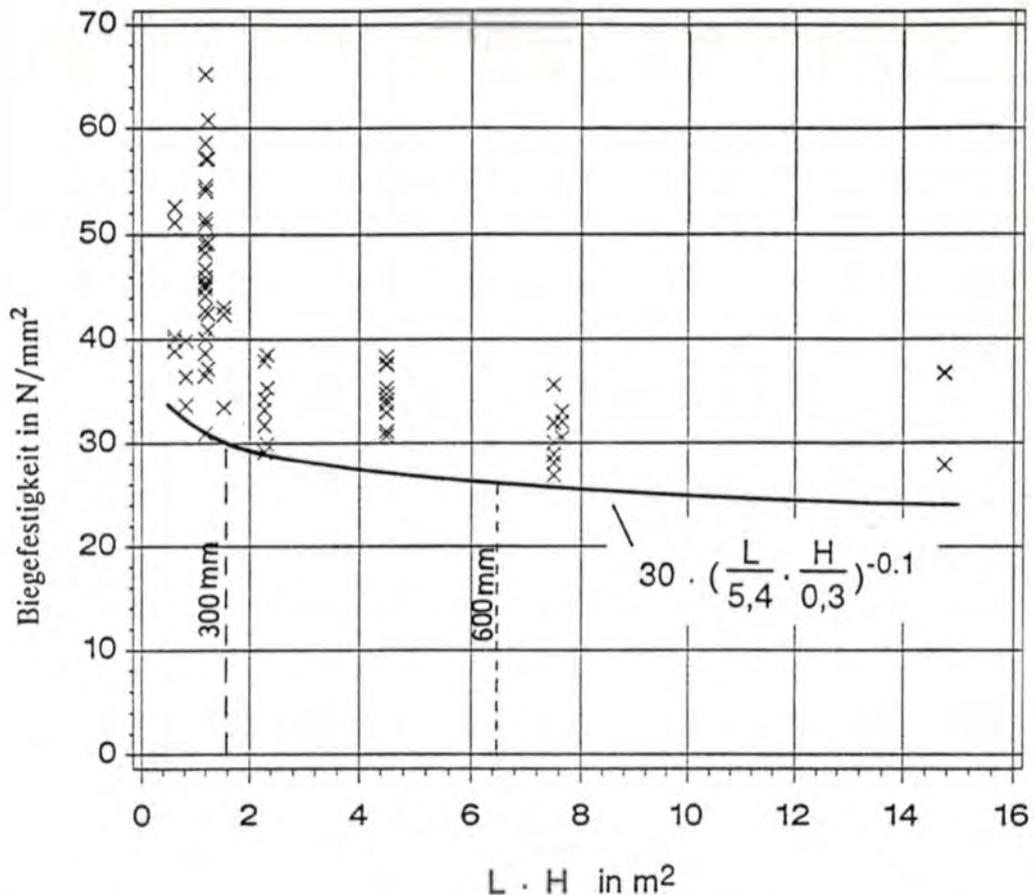


Bild 9: Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern in Abhängigkeit von der Trägergröße

Aus diesem Bild ist zu erkennen, daß die Annahme eines Exponenten von $\beta = 0,1$ gerechtfertigt erscheint.

3 Folgerungen für die Bemessung

Aufgrund der Tatsache, daß die Träger mit Keilzinkenversagen eine geringere Tragfähigkeit aufweisen als die Träger mit Holzversagen, besteht zwischen der charakteristischen Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern $f_{B,5,BSH}$ und der charakteristischen Zugfestigkeit von Keilzinkenverbindungen $f_{z,5,KZV}$ eine enge Abhängigkeit.

Für eine Trägerhöhe von 300 mm und eine mittlere Länge der eingebauten Bretter gilt folgende Beziehung, die anhand von zahlreichen Simulationsrechnungen mit dem "Karlsruher Rechenmodell" ermittelt wurde:

$$f_{B,5,BSH} = 1,20 \cdot f_{z,5,KZV} \quad (1)$$

Aufgrund dieser engen Abhängigkeit wäre es somit wünschenswert, im Rahmen der Qualitätsüberwachung die Zugfestigkeit der

Keilzinkenverbindungen zu prüfen. Da dies in den Betrieben jedoch kaum durchführbar ist, hat man sich entschlossen, die Zugfestigkeit einer Keilzinkenverbindung über deren Biegefestigkeit abzuschätzen. Im Rahmen eines umfangreichen Forschungsvorhabens in Karlsruhe wurde folgende Beziehung zwischen der charakteristischen Keilzinkenzugfestigkeit $f_{z,5,KZV}$ und der charakteristischen Keilzinkenbiegefestigkeit $f_{B,5,KZV}$ ermittelt:

$$f_{z,5,KZV} = 0,65 \cdot f_{B,5,KZV} \quad (2)$$

Um etwaige Unwägbarkeiten bei der Ermittlung der Zugfestigkeit (versuchstechnische Gründe) abzudecken, wurde vorgeschlagen, das Verhältnis zwischen Zug- und Biegefestigkeit der Keilzinkenverbindung etwas "günstiger" anzugeben. Folgende Beziehung wurde vorgeschlagen:

$$f_{z,5,KZV} = 0,7 \cdot f_{B,5,KZV} \quad (3)$$

In Verbindung mit Gleichung (1) ergibt sich somit zwischen der charakteristischen Brettschichtholzbiegefestigkeit $f_{B,5,BSH}$ und der charakteristischen Keilzinkenbiegefestigkeit $f_{B,5,KZV}$ folgende Beziehung:

$$\begin{aligned} f_{B,5,BSH}^0 &= 1,20 \cdot 0,70 \cdot f_{B,5,KZV} \\ f_{B,5,BSH}^0 &= 0,84 \cdot f_{B,5,KZV} \end{aligned} \quad (4)$$

Dies bedeutet, daß bei gegebener charakteristischer Keilzinkenbiegefestigkeit eine charakteristische Biegefestigkeit der Brettschichtholzträger zu erwarten ist, die etwa 84% der Keilzinkenfestigkeit entspricht. Dies bedeutet aber auch, daß bei vorgegebener charakteristischer Brettschichtholzbiegefestigkeit (z.B. aus EUROCODE 5 oder begleitender EN-Norm) die charakteristische Biegefestigkeit der eingebauten Keilzinkenverbindungen mindestens dem $1/0,84 = 1,20$ -fachen dieses Wertes entsprechen muß, damit der Bemessungswert für Brettschichtholz gewährleistet werden kann:

$$f_{B,5,KZV} \geq 1,20 \cdot f_{B,5,BSH}^0 \quad (5)$$

Da die Tragfähigkeit der Brettschichtholzträger im Labor unter Drittelspunktbelastung (d.h. konstantes Moment zwischen den Lasten) ermittelt wurde, in der Praxis im Regelfall jedoch die etwas günstigere Gleichstreckenbelastung (mit ausgerundeter Momentenverteilung) auftritt, erscheint es gerechtfertigt, die Anforderung an die Keilzinkenbiegefestigkeit etwas zu reduzieren. Folgendes wurde vorgeschlagen:

$$f_{B,5,KZV} \geq 1,15 \cdot f_{B,5,BSH}^0 \quad (6)$$

Diese Bedingung gilt, wie bereits erwähnt, für eine der Bemessung zugrunde gelegten charakteristischen Biegefestigkeit eines 300 mm-hohen Brettschichtholzträgers und ist auch bei größeren Brettschichtholzträgern einzuhalten (gleichbleibende Anforderungen für alle Trägergrößen).

Im vorliegenden Fall muß die Abnahme der Festigkeit mit zunehmender Trägergröße berücksichtigt werden. Dies kann mit folgender Beziehung erfolgen:

$$f_{B,5,BSH} = \left(\frac{L}{L_0} \cdot \frac{H}{H_0} \right)^{-0,1} \cdot f_{B,5,BSH}^0 \quad (7)$$

Hierbei entsprechen $H_0 = 300$ mm und $L_0 = 5400$ mm den Abmessungen des zugrundegelegten Standardträgers. In dieser Gleichung wurde eine mittlere Länge der eingebauten Bretter von 4 m angenommen. Diese Annahme setzt die Verarbeitung ungekappter Bretter voraus (wie z.B. im Rahmen einer maschinellen Holzsortierung) und trifft für die derzeit vorgenommene visuelle Holzsortierung mit Herausschneiden von Ästen sicherlich nicht zu.

Eine zwingende Vorschrift, den Volumeneinfluß bei der Bemessung berücksichtigen zu müssen, führt zu einem erhöhten und komplizierteren Berechnungsaufwand und kann somit durchaus ein Entscheidungskriterium gegen die Verwendung von Holz im Bauwesen darstellen. Daher wurde vorgeschlagen, der Bemessung einen Festigkeitswert zugrunde zu legen, der für alle Trägergrößen verwendet werden kann. Als Bezugshöhe wurde $H_0 = 600$ mm vorgeschlagen. Für kleinere Trägergrößen darf dann der Volumeneinfluß mit Hilfe von Gl (7) berücksichtigt werden, wobei für $H_0 = 600$ mm und $L_0 = 10800$ mm einzusetzen sind.

Für die Festigkeitsklassen bedeutet dies, daß die der Bemessung zugrundegelegten Festigkeitswerte gegenüber den Werten der 300 mm hohen Träger um 13% abgemindert werden müssen $(4)^{-0,1} = 0,87$). Da die Anforderungen des Referenzfestigkeitswertes $f_{B,5,BSH}^0$ bleiben müssen, ergibt sich Gl(6) zu:

$$\begin{aligned} f_{B,5,KZV} &= \geq 1,15/0,87 \cdot f_{B,5,KZV}^0 \\ f_{B,5,KZV} &= \geq 1,32 \cdot f_{B,5,KZV}^0 \end{aligned} \quad (8)$$

wobei in diesem Fall $f_{B,5,KZV}^0$ der charakteristischen Biegefestigkeit eines 600 mm - hohen Trägers entspricht.

4 Folgen für die Leimbaubetriebe

4.1 Derzeitiger Stand

In der letzten Entwurfsfassung des Dokumentes CEN-TC-124.207 sind die in Tabelle 3 angegebenen Festigkeitsklassen für Brettschichtholz vorgesehen. Ebenfalls angegeben sind die sich unter der Annahme eines Gesamtsicherheitsbeiwertes von $j_{ges} = 2,3$ ergebenden zulässigen Spannungen sowie die zugehörigen Anforderungen an die charakteristische Keilzinkenbiegefestigkeit.

Tabelle 3: Festigkeitsklassen für Brettschichtholz; Anforderungen an die Keilzinkenverbindungen

$f_{B,5,BSH}$	24	31	37
zul σ ($j_{ges} = 2,3$)	10,4	13,5	16
$f_{B,5,KZV}$	31,7	40,9	48,8

Aus dieser Tabelle ist zu erkennen, daß zur Wahrung des Besitzstandes einer Güteklasse I mit $zul \sigma \approx 14 \text{ N/mm}^2$ eine charakteristische Keilzinkenbiegefestigkeit von etwa 41 N/mm^2 erforderlich ist.

Nimmt man die Auswertungen der im Rahmen der Eigenüberwachung durchgeführten Keilzinkenbiegeversuche zur Hand, so ist festzustellen, daß 9 von 10 Betrieben diese Anforderung nicht erfüllen (siehe Bild 10).

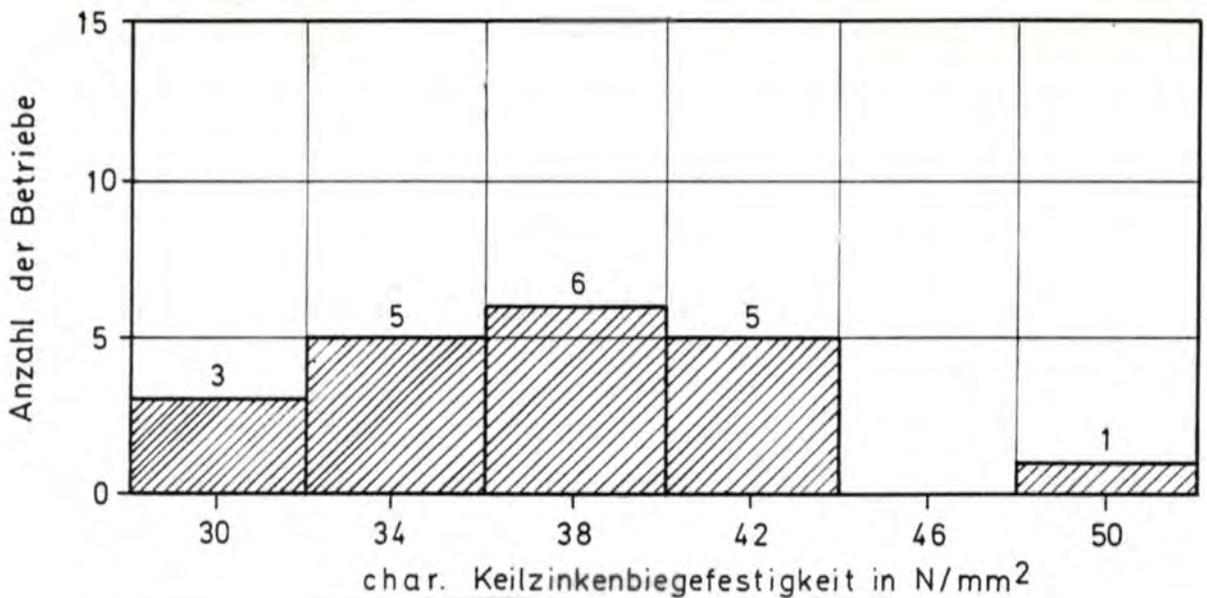


Bild 10: Charakteristische Keilzinkenbiegefestigkeit; 20 Betriebe (1990)

Anhand der durchgeführten Trägerversuche (s. Bild 8) und Simulationsrechnungen ist auch nicht zu erwarten, daß mit Hilfe der visuellen Holzsortierung eine charakteristische Brettschichtholzbiegefestigkeit von 31 N/mm^2 erreicht werden kann. Dies würde aber bedeuten, daß die meisten Güteklasse I-Träger gar nicht den Anforderungen der Güteklasse I genügen.

4.2 Diskussion

Zu denken gibt in diesem Zusammenhang, daß trotz dieser Nicht-Erfüllung der Anforderungen noch so gut wie keine Schäden, die auf mangelnde Keilzinkenqualität zurückzuführen wären, bekannt sind. Da die Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern unter klar definierten Versuchsbedingungen als hinreichend bekannt vorausgesetzt werden kann, müssen die Ursachen hierfür woanders zu finden sein. Als mögliche Ursachen wären zu nennen:

- Die im Bauwerk auftretenden Belastungen sind geringer als angenommen.
- Die Träger stehen mit einer geringeren Sicherheit, als dies mit dem globalen Wert von $j_{ges} = 2,3$ vorausgesetzt wird.
- Das Langzeitverhalten ist "gutmütiger", als dies bei der Bemessung angenommen wird.
- "Altes" Brettschichtholz war besser als das, was mit den heute verarbeiteten Brettern (mit hohem Markanteil) möglich ist.

Da sich die Brettschichtholzbauweise in der Vergangenheit hinreichend bewährt hat und an den Teilsicherheitsbeiwerten allem Anschein nach nicht mehr "gedreht" werden kann, wurde der Vorschlag gemacht, der Bemessung die charakteristische Biegefestigkeit eines 300 mm hohen Trägers zugrunde zu legen und den Volumeneffekt einfach zu "ignorieren". Die Keilzinkenverbindungen hätten dann wieder die Anforderung nach Gl (6) zu erfüllen.

Als mögliche Argumente für diesen Vorschlag wurden genannt:

- auch auf der Lastseite gibt es einen Volumeneffekt, der aber nicht berücksichtigt wird. Diesem Argument stimme ich, was die Verkehrslasten betrifft, zu, nicht jedoch was die Schneelasten angeht;
- auch im Stahlbetonbau wird ein bereits vielfach nachgewiesener Volumeneffekt nicht berücksichtigt.

Diesen Argumenten kann man sich nicht verschließen, ich gebe aber zu bedenken, daß die Festigkeit zweifellos mit zunehmender Trägergröße abnimmt, und daß das Bestreben, das Material immer weiter auszunutzen (optimieren) auch zu Schadensfällen führen kann, insbesondere dann, wenn die zulässigen Spannungen im Bauwerk tatsächlich auftreten.

4.3 Möglichkeiten zur Steigerung der Keilzinkenfestigkeit

Die Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern wird maßgeblich von der Qualität d.h. der Festigkeit der Keilzinkenverbindungen bestimmt. Will man die Brettschichtholzbiegefestigkeit erhöhen, so gilt es zunächst, die Festigkeit der Keilzinkenverbindungen zu erhöhen.

Eine Möglichkeit dies zu erreichen liegt in der Optimierung der Keilzinkengeometrie. Versuche in Karlsruhe und vor allem in Stuttgart haben z.B. gezeigt, daß das 15 mm - Profil dem 20 mm -Profil überlegen ist (etwa 5 - 10% höhere Festigkeit).

Eine andere Möglichkeit besteht in der Verwendung zähelastischerer Leime zur Herstellung von Keilzinkenverbindungen. Untersuchungen der FMPA zeigten hier erfolgsversprechende Ergebnisse, die von neuesten Karlsruher Untersuchungen jedoch zumindest teilweise widerlegt werden.

Eine weitere Möglichkeit liegt in der maschinellen Holzsortierung. In Bild 11 und Bild 12 sind die Ergebnisse von insgesamt 900 Biegeversuchen mit Keilzinkenverbindungen (2 x 15 Proben aus 30 Betrieben) dargestellt. Aus diesen Bildern ist eine deutliche Abhängigkeit der Keilzinkenbiegefestigkeit von der Rohdichte und des Elastizitätsmoduls der Bretter zu erkennen.

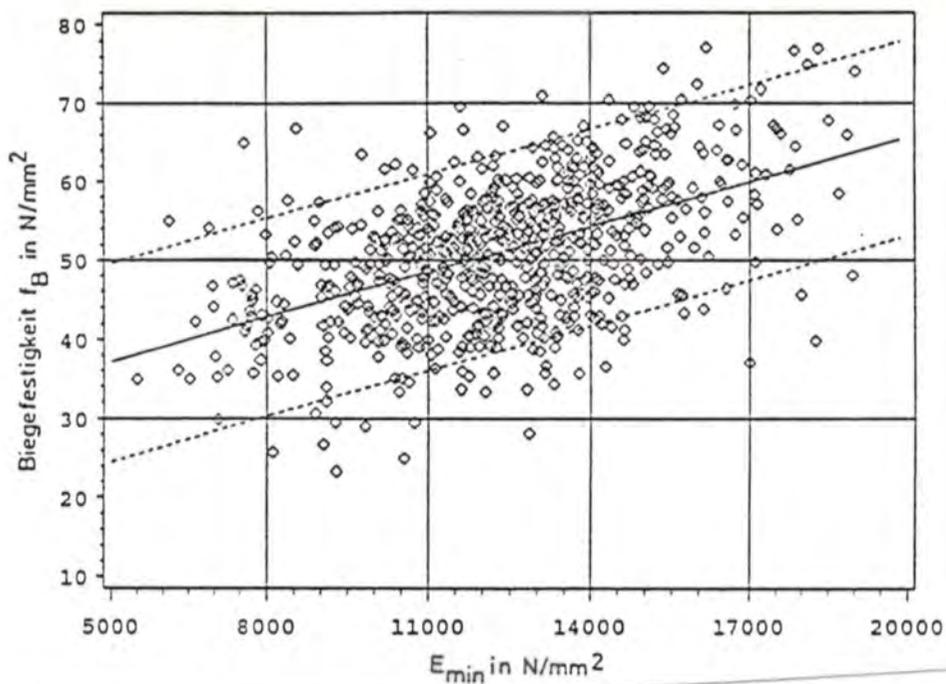


Bild 11: Biegefestigkeit von Keilzinkenverbindungen in Abhängigkeit vom kleineren Elastizitätsmodul E_{min} der beiden Stoßhälften

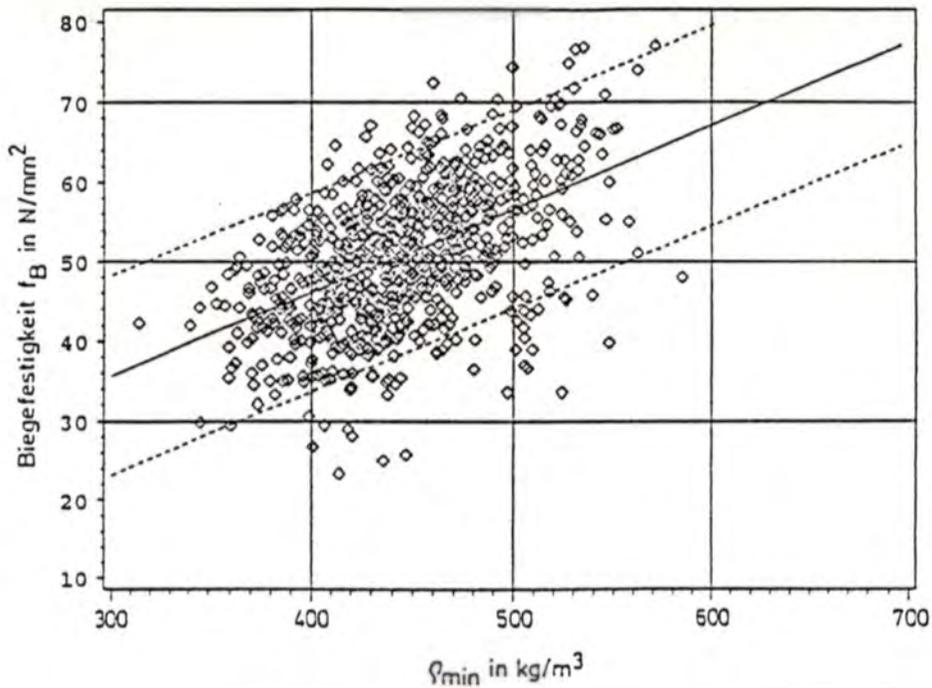


Bild 12: Biegefestigkeit von Keilzinkenverbindungen in Abhängigkeit von der kleineren Rohdichte ρ_{\min} der beiden Stoßhälften

In den vergangenen zwei Jahren wurden weitere 720 Zug- und Biegeversuche mit Keilzinkenverbindungen durchgeführt, wobei an die Holzeigenschaften der Bretter folgende Anforderungen gestellt wurden (Tabelle 4).

Tabelle 4: Anforderungen an die Holzeigenschaften der keilgezinkten Bretter

Versuchsreihe	Anforderungen an die Holzeigenschaften der Bretter
I	keine; beliebige Bretter
II	$11500 \text{ N/mm}^2 \leq E^{1)} \leq 13500 \text{ N/mm}^2$
III	$15000 \text{ N/mm}^2 \leq E^{1)}$

¹⁾ mittlerer Längs-Elastizitätsmodul

Reihe I entspricht hierbei dem, was im Rahmen der derzeit praktizierten visuellen Holzsortierung möglich bzw. üblich ist, während die Reihen II und III eine mögliche maschinelle Holzsortierung simulieren. Für jede Reihe wurden zwei Keilzinkenprofile (15mm und 20mm) aus jeweils zwei Betrieben untersucht, wobei jeweils 30 Zug- und 30 Biegeversuche durchgeführt wurden (2 Profile x 2 Firmen x 3 Reihen x 2 x 30 = 720).

Die Ergebnisse der Biegeversuche sind in Bild 13 dargestellt.

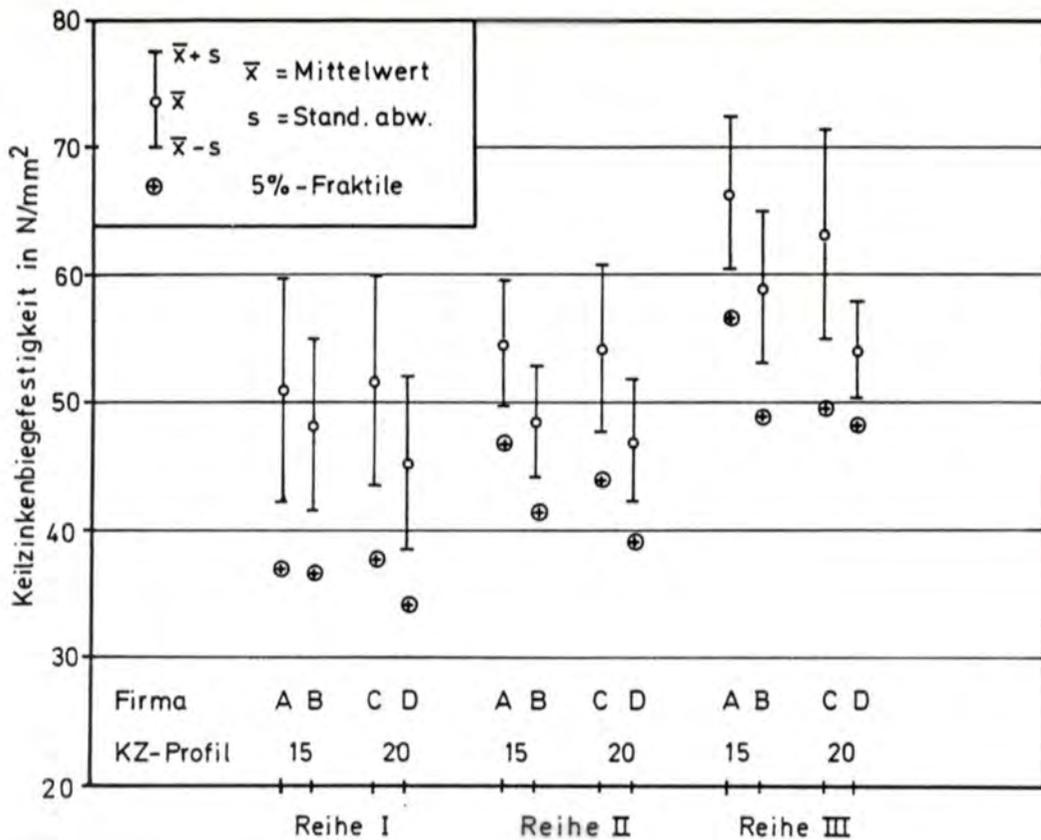


Bild 13: Keilzinkenbiegefestigkeit; Versuchsergebnisse

Aus diesem Bild sind folgende Tendenzen zu erkennen:

- die Proben mit 15mm-Profil haben etwa 5-10% höhere Festigkeiten als die Proben mit 20mm-Profil;
- die mittleren Festigkeitswerte der Reihe I und Reihe II sind ungefähr gleich und liegen auf dem gleichen Niveau wie bei früheren Untersuchungen;
- Reihe III weist gegenüber den Reihen I und II etwa 20% höhere mittlere Festigkeitswerte auf;

- die charakteristischen Festigkeiten der Reihe II liegen deutlich über den entsprechenden Werten der Reihe I, d.h. die alleinige Eingrenzung der Streuung der Holzeigenschaften führt bei gleicher mittlerer Qualität der Bretter zu einer höheren charakteristischen Biegefestigkeit;
- Reihe III weist gegenüber Reihe I (derzeit mögliches Festigkeitsniveau) 30-40% höhere charakteristische Festigkeitswerte auf!!!

Bei den Zugversuchen waren die gleichen Tendenzen zu beobachten.

Diese Versuche bestätigen somit zum wiederholten Male die Möglichkeiten bzw. das Potential einer maschinellen Holzsortierung auf der Grundlage der Rohdichte und/oder des Elastizitätsmoduls der Bretter.

9 Ausblick

In Anbetracht der eindeutigen Erkenntnisse, die aufgrund der sehr intensiven und umfangreichen Untersuchungen gewonnen wurden, kann das Gebot der Stunde nur lauten

“AUF ZUR MASCHINELLEN HOLZSORTIERUNG“