

Brettschichtholz unter Biegebeanspruchung

F. Colling

1 Einleitung

Die Brettschichtholzbauweise kann als eine der bedeutendsten Entwicklungen des Holzbaus überhaupt bezeichnet werden. Bedingt durch den Herstellungsprozess besitzt Brettschichtholz eine Reihe von Vorteilen gegenüber dem Vollholz, was dazu geführt hat, daß neue Einsatzmöglichkeiten für das Bauen mit Holz geschaffen werden konnten.

Dank intensiver Forschungsarbeiten in den letzten Jahren steht die Brettschichtholzbauweise an der Schwelle eines neuen Zeitalters, in dem sich ihr insbesondere im Wettbewerb mit dem konkurrierenden Werkstoff Stahl neue Möglichkeiten eröffnen. Maßgeblichen Anteil hieran haben Untersuchungen, die am Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen der Universität Karlsruhe durchgeführt wurden. Diese Untersuchungen und deren wichtigsten Ergebnisse werden nachfolgend beschrieben.

Da Brettschichtholz vorwiegend in biegebeanspruchten Konstruktionen eingesetzt wird, wird dabei das Hauptaugenmerk auf die Faktoren gerichtet, welche die Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern beeinflussen. Die gemachten Aussagen gelten jedoch qualitativ auch für Brettschichtholz unter Zugbeanspruchung.

2 Festigkeitsbestimmende Einflußfaktoren

Erst nach dem 2. Weltkrieg wurde damit begonnen, die Eigenschaften des vergleichsweise neuen Werkstoffes Brettschichtholz systematisch zu untersuchen. Die fortschreitende Industrialisierung und das Bestreben, Träger mit möglichst hoher Festigkeit herzustellen, führte dabei zu einem schrittweisen Erkennen der festigkeitsrelevanten Einflußfaktoren. Einen Überblick über die durchgeführten Untersuchungen und die dabei gewonnenen Erkenntnisse werden in COLLING (1990a) gegeben. Die wichtigsten Einflußfaktoren sind nachfolgend zusammengefaßt.

2.1 Holzeigenschaften

Ästigkeit

Daß die Tragfähigkeit von Vollholz maßgeblich von der Größe der auftretenden Äste bestimmt wird, ist eine altbekannte Tatsache und bedarf keiner weiteren Erläuterungen. Daß die Ästigkeit auch auf die Tragfähigkeit von Brettschichtholz einen Einfluß ausübt, wurde bereits in sehr frühen Untersuchungen bestätigt, wobei festgestellt wurde, daß durch die Verteilung der Äste über den Träger einzelne Äste an Bedeutung verlieren. Dies führte zu der Überzeugung, daß Brettschichtholz infolge der erzielten Homogenisierung eine höhere Tragfähigkeit besitzt als Vollholz.

Rohdichte

Daß ein schweres Holz "besser" ist als ein leichtes Holz, wußten bereits unsere Vorfahren, die sich dieses Wissen auch bei der Auswahl geeigneter Hölzer zunutze machten. Solange die Rohdichte aber nicht gemessen (z.B. Bestimmung der Masse bezogen auf das Volumen) wird, bleibt sie eine subjektive Größe, deren Aussagekraft mit Vorsicht zu genießen ist. Daher basiert die Sortierung von Holz derzeit nahezu ausschließlich auf Kriterien, die visuell bestimmt werden können (z. B. Äste).

Untersuchungen mit Brettschichtholzträgern zeigten jedoch eindeutig, daß Brettschichtholz, das aus Lamellen mit hoher Rohdichte zusammengesetzt ist, höhere Tragfähigkeiten besitzt als Brettschichtholz mit Lamellen geringer Rohdichte. Die jüngsten Entwicklungen im Bereich der maschinellen Holzsortierung verleihen dieser Erkenntnis neues Gewicht.

Elastizitätsmodul

Mit der Rohdichte sehr eng verknüpft ist der Elastizitätsmodul des Holzes. Untersuchungen zeigten, daß der Elastizitätsmodul enger mit der Festigkeit korreliert ist als die Rohdichte und selbst die Ästigkeit. Dies bedeutet, daß mit der Kenntnis des Elastizitätsmoduls eine zuverlässigere Vorhersage der Festigkeit möglich ist als mit der Rohdichte oder der Ästigkeit. Diese Erkenntnis bildete die Grundlage und den Anreiz für die Entwicklung der maschinellen Holzsortierung.

2.2 Decklamellen im Zugbereich

Bereits sehr früh wurde erkannt, daß der innere Bereich eines Brettschichtholzträgers für die Tragfähigkeit ohne große Bedeutung ist. Dies wurde durch zahlreiche Untersuchungen bestätigt.

Weiterhin zeigten Versuche, daß der Druckzone eines Brettschichtholzträgers eine geringere Bedeutung zukommt als der Zugzone: die Lamellen in der Druckzone dürfen eine geringere Qualität (Festigkeit) aufweisen als die Lamellen in der Zugzone, ohne daß dabei die Tragfähigkeit der Brettschichtholzträger beeinträchtigt wird.

Das Hauptaugenmerk ist somit auf die Zuglamellen zu richten, wobei insbesondere die äußeren zwei bis drei Lamellen von Bedeutung sind.

2.3 Keilzinkenverbindungen

Die ersten Untersuchungen mit Brettschichtholzträgern wurden aus versuchstechnischen oder finanziellen Gründen vorwiegend mit kleinen Brettschichtholzträgern mit Höhen bis zu 300 mm durchgeführt. Diese Träger wiesen oftmals keine Keilzinkenverbindungen auf, so daß die Bedeutung der Keilzinkenverbindung auf das Tragverhalten von Brettschichtholzträgern entweder nicht erkannt oder einfach unterschätzt wurde.

Erst als man dazu überging, Brettschichtholzträger in Bauteilgröße zu prüfen, traten zwangsläufig Keilzinkenverbindungen auf, die dann auch des öfteren für das Versagen der Träger verantwortlich waren.

Abb. 1 zeigt eine Auswertung aus COLLING (1990a) von insgesamt 482 Trägerversuchen, von denen bekannt war, daß eine Keilzinkenverbindung in der äußeren Lamelle vorhanden war. Aus dieser Abbildung ist ersichtlich, daß bei den Trägern, bei denen die Keilzinkenverbindungen im Bereich der größten Momente auftraten, etwa 80% in Folge eines Keilzinkenversagens zu Bruch gingen. Selbst bei Trägern, bei denen die Keilzinkenverbindungen außerhalb

des Bereiches der maximalen Momentenbeanspruchung lagen, ging jeder dritte Träger in einer Keilzinkenverbindung zu Bruch.

482 Träger mit KZV in äußerer Lamelle

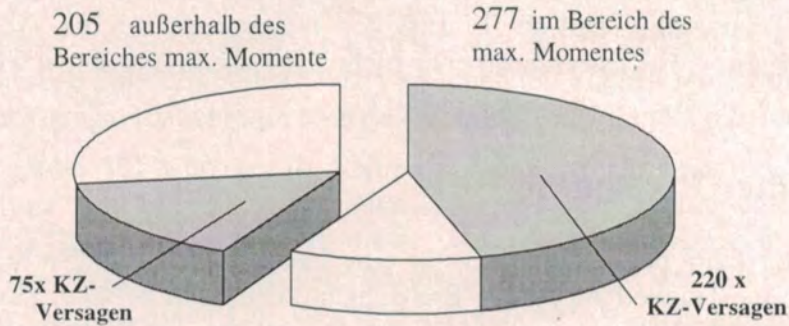


Abb. 1 Versagensrisiko einer Keilzinkenverbindung.

In Abb. 2 sind für drei verschiedene Holzarten die in COLLING (1990a) ausgewerteten Versuche getrennt nach der Versagensart dargestellt. Aus dieser Abbildung ist deutlich zu erkennen, daß die Träger, die auf Grund eines Keilzinkenversagens zu Bruch gingen, zum Teil deutlich geringere Festigkeiten aufweisen als die Träger, bei denen das Versagen von einem Ast ausging (Holzversagen).

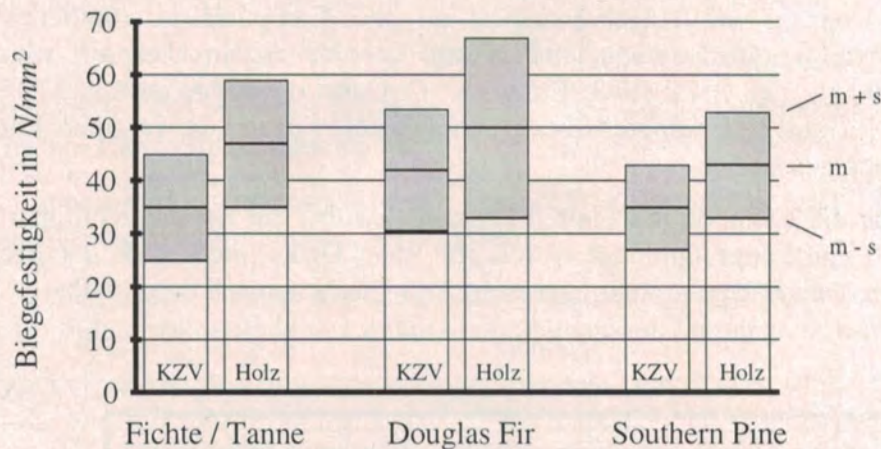


Abb. 2 Auswertung von Biegeversuchen nach der Versagensart (m = Mittelwert, s = Standardabweichung, KZV = Keilzinkenversagen, Holz = Holzversagen).

Dies zeigt eindeutig, daß die Keilzinkenverbindung ein wesentlicher festigkeitsbestimmender Faktor ist, der nicht (mehr) vernachlässigt werden darf.

2.4 Trägergröße

Zahlreiche Versuche haben gezeigt, daß die Tragfähigkeit eines Materials mit zunehmender Probengröße abnimmt. Man spricht hier vom sogenannten Volumeneffekt, der anschaulich damit erklärt werden kann, daß mit zunehmender Größe eines Trägers auch die Anzahl der

Fehlstellen (Äste, Keilzinkenverbindungen) zunimmt. Damit hat ein Träger eine größere Auswahl an potentiellen Bruchstellen, und er wird sich mit dem Ziel, sich möglichst frühzeitig der Belastung zu entziehen, naturgemäß die Stelle mit der geringsten Festigkeit aussuchen.

Der Einfluß der Trägergröße wird in den nordamerikanischen Ländern im Gegensatz zu Deutschland bereits seit vielen Jahren bei der Bemessung berücksichtigt. Im Eurocode 5 ist dies ebenfalls so vorgesehen, auch wenn diese Regelung nicht unumstritten ist. Als Grund für diese Zweifel wird angeführt, daß der Einfluß der Trägergröße auf die Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern versuchstechnisch noch nicht ausreichend untersucht wurde.

3 Karlsruher Rechenmodell

Zu Beginn der 80er Jahre begann in Karlsruhe eine intensive Forschungsarbeit, die sich mit der Untersuchung des Tragverhaltens von Brettschichtholzträgern befaßte. Ziel dieser Untersuchungen war es, die vielfältigen qualitativen Kenntnisse über die Einflußfaktoren quantitativ zu vertiefen, wobei ein Schwerpunkt auf den Einfluß der Keilzinkenverbindung ausgerichtet war.

Aus den früheren Untersuchungen wurde deutlich, daß es nahezu unmöglich ist, die verschiedenen Einflußfaktoren quantitativ in Versuchen zu erfassen. Dies ist darauf zurückzuführen, daß sich diese Faktoren oftmals gegenseitig beeinflussen, so daß der versuchstechnische Aufwand zur getrennten Untersuchung der verschiedenen Einflußfaktoren nicht vertretbar (und auch nicht finanzierbar) ist.

Aus diesem Grunde wurde das sog. "Karlsruher Rechenmodell" entwickelt, mit dem es möglich ist, eine Vielzahl von Trägerversuchen mit dem Computer zu simulieren, wobei die Rechenergebnisse durch eine reduzierte Anzahl von Versuchen überprüft werden können (COLLING, 1990a,b; COLLING, 1988; EHLBECK, COLLING und GÖRLACHER, 1985). Die Voraussetzungen für solche Computer-Simulationen wurden durch die rasanten Entwicklungen im EDV-Bereich geschaffen.

Gewählt wurde die Methode der Finiten Elemente, wobei ein Brettschichtholzträger in Elemente mit 150 mm Länge unterteilt wurde, mit einer Dicke, die gerade der Brettdicke entspricht. Ein entsprechender Modellträger ist in Abb. 3 schematisch dargestellt.

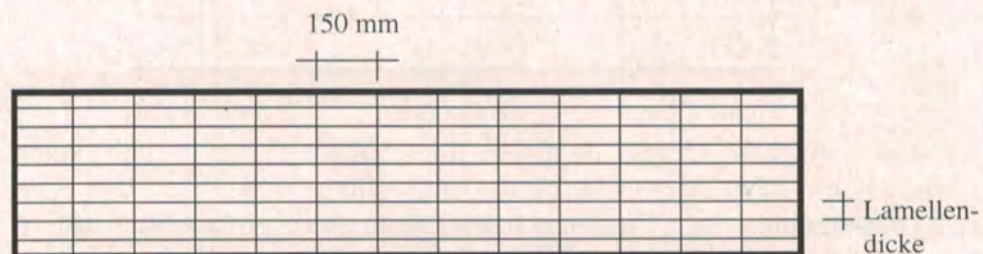


Abb. 3 Zugrundegelegter Modellträger.

Da aber ein Rechenmodell nur so gut sein kann wie seine Eingangsdaten, waren umfangreiche Untersuchungen über folgende Eigenschaften des verwendeten Brettmaterials erforderlich (siehe z.B. COLLING und DINORT, 1987; COLLING und GÖRLACHER, 1989):

- Größe und Auftretenshäufigkeit von Ästen,
- Rohdichte,
- Elastizitätsmodul,

- Länge der Bretter, die ein Maß für die Auftretenshäufigkeit einer Keilzinkenverbindung darstellt.

Diese Untersuchungen waren erforderlich, um den Aufbau eines Brettschichtholzträgers wirklichkeitsnah zu simulieren und dabei jedem Element passende Eigenschaften zuweisen zu können.

Eine wichtige Voraussetzung für realistische Rechenergebnisse ist weiterhin, daß die Eigenschaften, die jedem Element zugewiesen werden, auch auf die gewählte Elementgröße zutreffen. Es macht keinen Sinn, Ergebnisse von Versuchen mit kleinen fehlerfreien Proben für die Beschreibung des Tragverhaltens von fehlerbehafteten Brettabschnitten heranzuziehen.

Daher wurden an der TU München im Rahmen eines Sonderforschungsbereiches eine Vielzahl von Zug- und Druckversuchen mit etwa 150 mm langen Brettabschnitten durchgeführt (HEIMESHOF und GLOS, 1980). Ergebnis dieser Versuche waren Regressionsgleichungen, mit denen die Abhängigkeiten zwischen dem Elastizitätsmodul und der Festigkeit auf der einen Seite, und den Holzeigenschaften, wie Rohdichte oder Ästigkeit auf der anderen Seite, rechnerisch beschrieben werden konnten.

In Karlsruhe wurde die Tragfähigkeit von Keilzinkenverbindungen in Abhängigkeit von den festigkeitsbestimmenden Einflußparametern untersucht, um auch das Tragverhalten von Keilzinkenverbindungen möglichst wirklichkeitsnah beschreiben zu können. Auch hier bildeten Regressionsgleichungen die Grundlage für die weiteren Berechnungen.

Mit Hilfe dieser Regressionsgleichungen konnten für jedes Element des simulierten Brettschichtholzträgers der zugehörige Elastizitätsmodul und die Festigkeit berechnet werden. Da die Versuche mit etwa 150 mm langen Brettabschnitten durchgeführt wurden, waren diese Regressionsgleichungen auch direkt auf die gewählte Elementgröße anwendbar.

Das entwickelte "Karlsruher Rechenmodell" weist dabei folgende Eigenschaften/ Vorteile auf:

- bei der Berechnung der Tragfähigkeit wird die Streuung der Materialeigenschaften berücksichtigt (Monte-Carlo-Simulationen),
- gegenüber anderen Rechenmodellen (wie z.B. von FOSCHI und BARRETT, 1980) wird der Einfluß der Keilzinkenverbindungen berücksichtigt,
- mit dem Rechenmodell können gezielte Parameterstudien durchgeführt werden, mit deren Hilfe der Einfluß einzelner Faktoren qualitativ und quantitativ untersucht werden kann.

Das Rechenmodell wurde mit Eingangsdaten gefüttert und schrittweise mit gezielten Versuchen überprüft. Die Übereinstimmung zwischen berechneter und versuchsmäßig ermittelter Tragfähigkeit war hierbei sehr gut: die Unterschiede zwischen berechneter und tatsächlich ermittelter Tragfähigkeit betragen weniger als 10%.

Die systematischen Simulationsrechnungen zeigten hierbei folgende Ergebnisse:

- zum einen wurde die bereits angedeutete Tendenz bestätigt, daß die Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern sowohl von der Festigkeit der Bretter, als auch von der Festigkeit der Keilzinkenverbindungen abhängig ist;
- weiterhin zeigte sich, daß Brettschichtholz folgendes Bruchverhalten aufweist: wird ein Träger belastet, so versucht er sich möglichst frühzeitig dieser Belastung zu entziehen. Hierzu sucht er sich unter den potentiellen Bruchstellen die schwächste Stelle aus, und das kann entweder ein Brettabschnitt mit Ast oder eine Keilzinkenverbindung sein. Die wesentliche Folgerung, die man hieraus ziehen kann, ist die, daß Brettschichtholz nur so gut sein kann, wie der schwächere der beiden beeinflussenden Parameter Holz und Keil-

zinkenverbindung. Es macht daher wenig Sinn, z.B. durch eine Auswahl von astfreien Brettern (wenn es die gäbe) die Holzfestigkeit drastisch zu erhöhen, wenn man gleichzeitig schlechte Keilzinkenverbindungen produziert. Will man hochwertiges Brettschichtholz mit hoher Tragfähigkeit herstellen, so muß man beide Faktoren verbessern.

4 Bedeutung der maschinellen Holzsortierung

Die Versuche von HEIMESHOF und GLOS (1980) zeigten, daß die Festigkeit von Brettabschnitten im wesentlichen von

- der Astgröße,
- der Rohdichte, und in besonderem Maße
- vom Elastizitätsmodul

bestimmt wird. Andere Faktoren, wie z.B. die Jahrringbreite, treten demgegenüber deutlich zurück, und dies nicht nur, weil ihr Einfluß geringer ist, sondern auch weil diese Faktoren im Zuge einer Holzsortierung nur sehr schwer zu bestimmen sind.

Untersuchungen von EHLBECK, COLLING und WENZ (1989) zeigten, daß die Festigkeit einer Keilzinkenverbindung

- vom Keilzinken-Profil, d.h. der Geometrie der Zinken,
- der Rohdichte und
- dem Elastizitätsmodul der miteinander verbundenen Bretter, sowie
- von produktionsabhängigen Faktoren

bestimmt wird. Zu den produktionsabhängigen Faktoren zählen z.B. die Schärfe der Fräser, das Alter des Leimes, der aufgebrachte Preßdruck und die klimatischen Bedingungen in den Produktionsräumen.

Betrachtet man die Einflußgrößen genauer, so erkennt man einen gemeinsamen Nenner in der Rohdichte und dem Elastizitätsmodul der Bretter. Anders ausgedrückt bieten die Rohdichte und der Elastizitätsmodul der Bretter einen gemeinsamen Ansatzpunkt zur Beeinflussung beider Faktoren, während die anderen Parameter nur jeweils den einen oder den anderen beeinflussen. Die Rohdichte und der Elastizitätsmodul können visuell jedoch nicht bestimmt werden, sondern hierzu sind spezielle Geräte/Maschinen erforderlich. In diesem Falle spricht man von einer maschinellen Holzsortierung.

Die Bedeutung einer maschinellen Holzsortierung für die Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern soll nachfolgend anhand von einigen Versuchsergebnissen dargestellt werden.

4.1 Versuche mit Brettschichtholzträgern

Um abzuschätzen, wie sich Veränderungen im Bereich der Holzsortierung auf die Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern auswirken, wurden insgesamt 6 Versuchsreihen mit je 7 Trägern durchgeführt (COLLING, 1990a,b). Hierbei wurden unterschiedliche Sortierkriterien angewandt, d.h. an die Bretter wurden unterschiedliche Anforderungen bezüglich ihrer Holzeigenschaften gestellt (vgl. Tabelle 1).

- Bei den **Reihen I bis III** wurden die Bretter rein visuell sortiert, wobei zunehmend strengere Anforderungen an die größte zulässige Ästigkeit gestellt wurden. Bei Reihe I wurden gezielt Bretter mit großen Ästen ausgesucht, wobei die jeweils größte Ästigkeit eines Brettes mindestens 35% des Brettquerschnittes betragen sollte. Bei Reihe III hingegen wurden nur Bretter mit sehr kleinen Ästen ausgesucht. Hier durfte die größte Querschnittschwächung infolge von Ästen höchstens 20% betragen. Die visuelle Qualität der Bretter stieg somit von Reihe I bis III an.
- Bei **Reihe IV** wurde lediglich eine Mindestrohichte für die Bretter gefordert, unabhängig von der Größe der vorhandenen Äste.
- Bei **Reihe V** wurde, ebenfalls ohne Rücksicht auf die Ästigkeit, ein Mindest-Elastizitätsmodul der Bretter gefordert.
- Bei **Reihe VI** wurden sowohl an den Elastizitätsmodul als auch an die Ästigkeit der Bretter Mindestanforderungen gestellt, d.h. hier wurde eine kombinierte visuelle/maschinelle Holzsortierung vorgenommen.

Tabelle 1 Anforderungen an die Holzeigenschaften der Bretter.

Versuchsreihe	Anforderungen
I	$0,35 < KAR$
II	$0,20 < KAR < 0,35$
III	$KAR < 0,20$
IV	$500 \text{ kg/m}^3 < \rho$
V	$10\,000 \text{ N/mm}^2 < E$
VI	$15\,000 \text{ N/mm}^2 < E$ und $KAR < 0,20$

Die Versuchsergebnisse sind in Abb. 4 dargestellt und nachfolgend erläutert.

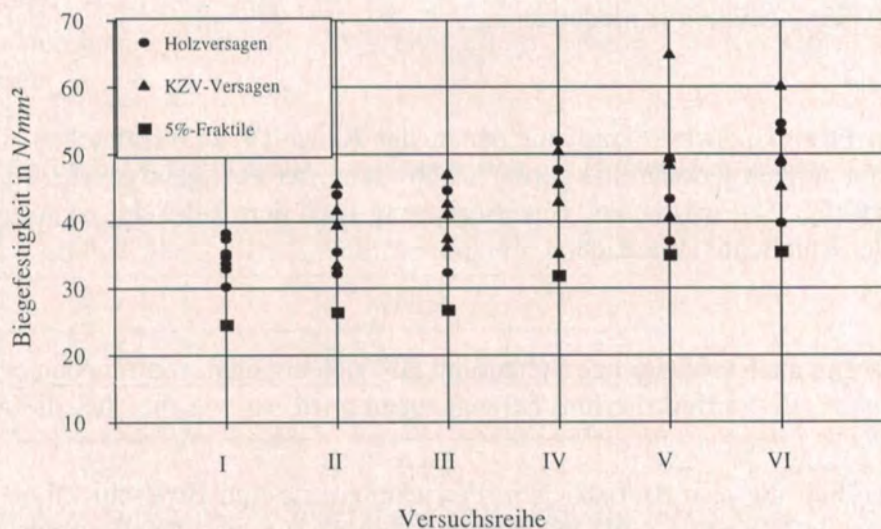


Abb. 4 Versuchsergebnisse.

Reihen I bis III

Man erkennt einen Anstieg der Festigkeitswerte von Reihe I nach Reihe III, auch wenn er bei Reihe III nicht mehr sehr bedeutend ist. Bei einer Bemessung nach den Eurocodes wird die 5%-Fraktile (d.h. der Festigkeitswert, der nur in 5% aller Fälle unterschritten wird) zugrundegelegt, so daß Einzelwerte und Mittelwerte nur eine untergeordnete Rolle spielen. Da es aber nicht möglich ist, aus 7 Versuchen einen zuverlässigen Wert für die 5%-Fraktile abzuschätzen, wurden die einzelnen Versuchsreihen zusätzlich mit dem "Karlsruher Rechenmodell" gegengerechnet, wobei von jeder Versuchsreihe 2000 Träger simuliert wurden. Die Übereinstimmung zwischen berechneten und in Versuchen ermittelten Festigkeitswerten war hierbei sehr gut: die mittleren Festigkeiten jeder Versuchsreihe wurden mit einer Abweichung von max. 5% vorhergesagt. Die berechneten 5%-Fraktile sind ebenfalls in Abb. 4 eingetragen. Anhand dieser Werte ist zu erkennen, daß die 5%-Fraktile asymptotisch einem Grenzwert zustreben. Dies bedeutet, daß eine weitere Verschärfung der visuellen Sortierung über das Maß der Reihe III hinaus, keine weitere Festigkeitserhöhung mehr bewirkt.

Auf der Grundlage der in Abschnitt 2 beschriebenen Simulationsergebnisse war dieses Ergebnis auch nicht anders zu erwarten, weil eine Reduzierung der Ästigkeit zwar die Festigkeit der Bretter erhöht, nicht jedoch die der Keilzinkenverbindungen (im Bereich einer Keilzinkenverbindung darf kein Ast vorhanden sein). Damit wird nur einer der beiden Einflußfaktoren verbessert, mit dem Ergebnis, daß sich das Endprodukt Brettschichtholz immer stärker am anderen Faktor, in diesem Fall der Keilzinkenverbindung orientiert. Dies ist auch ganz deutlich aus den Versuchen zu erkennen: bei Reihe I mit ausgesucht großen Ästen ging der Bruch auch immer von diesen Ästen aus. Bei Reihe II hingegen ist ein ausgewogeneres Verhältnis zwischen Holzversagen und Keilzinkenversagen zu beobachten. Bei Reihe III hingegen ist zu erkennen, daß durch die geringere Ästigkeit noch häufiger ein Keilzinken-Versagen eintritt. Die visuelle Holzsortierung stößt somit auf ihre Grenzen und scheidet als alleinige Maßnahme zur Tragfähigkeitserhöhung von Brettschichtholzträgern aus.

Reihe IV

Hier ist ein deutlicher Sprung sowohl bei den Einzelwerten, als auch bei den 5%-Fraktilwerten zu erkennen. Auch dieses Ergebnis ist wiederum logisch, weil durch die Erhöhung der Brett-Rohdichten nicht nur eine Steigerung der Holzfestigkeit, sondern auch der Keilzinkenfestigkeit erreicht wurde. Hier wurde die Qualität beider Faktoren angehoben, was sich auch im Endprodukt Brettschichtholz niederschlägt.

Reihe V

Die erreichten Festigkeitswerte sind mit denen der Reihe IV zu vergleichen. Die Simulationsrechnungen zeigten jedoch eine geringere Streuung der Festigkeitswerte, und dies wirkt sich günstig auf die 5%-Fraktile aus. Eine Sortierung nach dem E-Modul ist somit einer Sortierung nach der Rohdichte vorzuziehen.

Reihe VI

Eine weitere, wenn auch sehr geringe Steigerung läßt sich erzielen, wenn neben dem E-Modul auch die Ästigkeit als Sortierkriterium herangezogen wird, so wie dies bei dieser Reihe der Fall war.

Vergleicht man nun die charakteristischen Festigkeitswerte von Brettschichtholz aus visuell sortierten Lamellen (Reihen I - III) mit Brettschichtholz aus maschinell sortierten Lamellen (Reihen IV - VI), so ist zu erkennen, daß mit einer maschinellen Holzsortierung ein Steigerungspotential von 30% und mehr vorhanden ist.

Das wichtigste Ergebnis dieser Untersuchungen ist somit die eindeutige Aussage, daß hochwertiges Brettschichtholz nur möglich ist mit Hilfe einer maschinellen Holzsortierung auf der Basis der Rohdichte und/oder des Elastizitätsmoduls.

4.2 Versuche mit Keilzinkenverbindungen

In Abb. 5 sind die Ergebnisse von Zugversuchen mit Keilzinkenverbindungen dargestellt (siehe EHLBECK und COLLING, 1992). Dieses Bild zeigt einen deutlichen Anstieg der Keilzinken-Zugfestigkeit mit steigender Brett-Rohdichte. Ebenfalls zu erkennen ist, daß das 15 mm-Profil, d.h. das Keilzinken-Profil mit einer Länge von 15 mm, im Schnitt höhere Festigkeitswerte aufweist, als das 20 mm - Profil. Dies ist auf die günstigeren Profileigenschaften des 15 mm - Profils zurückzuführen und hat dazu geführt, daß z.Zt. immer mehr Leimbaubetriebe auf dieses Profil umsteigen.

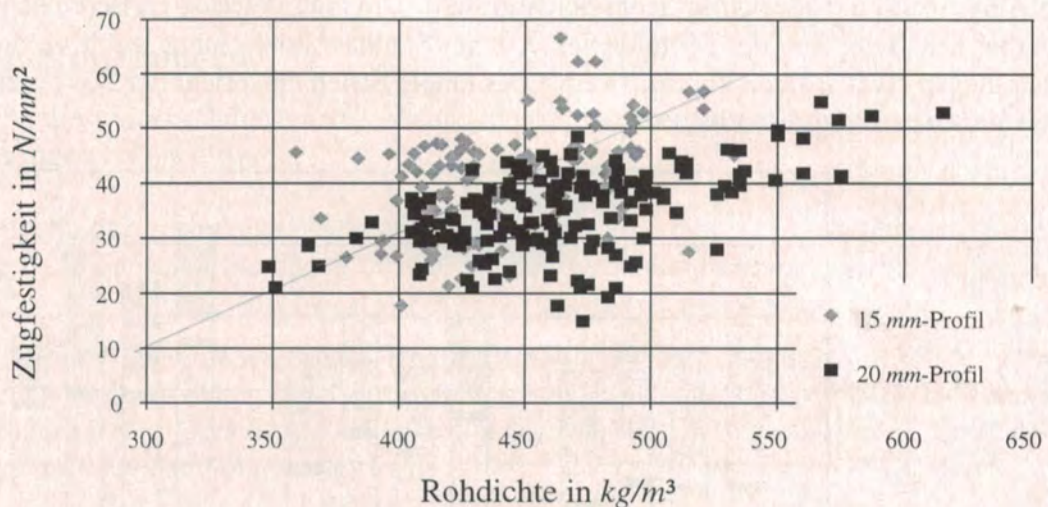


Abb. 5 Zugfestigkeit von Keilzinkenverbindungen in Abhängigkeit von der Rohdichte.

Um abzuschätzen, welche Auswirkungen eine maschinelle Holzsortierung auf die Tragfähigkeit von Keilzinkenverbindungen hat, wurden gezielte Versuche durchgeführt (EHLBECK und COLLING, 1992). Hierbei wurden drei Versuchsreihen untersucht, wobei an die Holzeigenschaften der miteinander verbundenen Bretter die in Tabelle 2 angegebenen Anforderungen gestellt wurden.

Tabelle 2 Anforderungen an die Holzeigenschaften der Bretter (E in N/mm^2).

Reihe	Anforderungen
A	keine
B	$11\,500 < E < 13\,500$
C	$15\,000 < E$

- Bei **Reihe A** wurden keine Anforderungen an die Holzeigenschaften gestellt, d.h. hier wurden die Keilzinkenverbindungen mit zufällig entnommenen Brettern hergestellt, so wie das derzeit auch in den Betrieben gehandhabt wird.

- Bei **Reihe B** wurden nur Bretter verwendet, deren Elastizitätsmodul zwischen 11500 und 13500 N/mm^2 lag. Da der mittlere Elastizitätsmodul aller Bretter bei etwa 12500 N/mm^2 liegt, entsprachen die Proben der Reihe B somit im Mittel denen der Reihe A, jedoch mit geringerer Streubreite der Holzeigenschaften, da Bretter mit allzu hohem und allzu geringem Elastizitätsmodul ausgeschlossen wurden.
- Bei **Reihe C** wurde ein Mindest-Elastizitätsmodul von 15000 N/mm^2 gefordert, d.h. hier wurden die Keilzinkenverbindungen aus hochwertigen Brettern hergestellt.

Für jede Versuchsreihe wurden 2 Keilzinken-Profile (15 mm- und 20 mm-Profil) aus jeweils zwei Betrieben geprüft. Von jeder Firma wurden für jede Versuchsreihe jeweils 30 Zug- und Biegeproben entnommen, so daß insgesamt 360 Zug- und 360 Biegeversuche durchgeführt werden konnten.

In Abb. 6 sind die Versuchsergebnisse dargestellt. Die grau unterlegten Bereiche entsprechen hierbei den Bereichen des Mittelwertes $m \pm$ der Standardabweichung s , d.h. in diesen Bereichen liegen etwa 2/3 der Versuchswerte. Der untere Strich entspricht der 5%-Fraktile, die aus den Versuchswerten berechnet wurde.

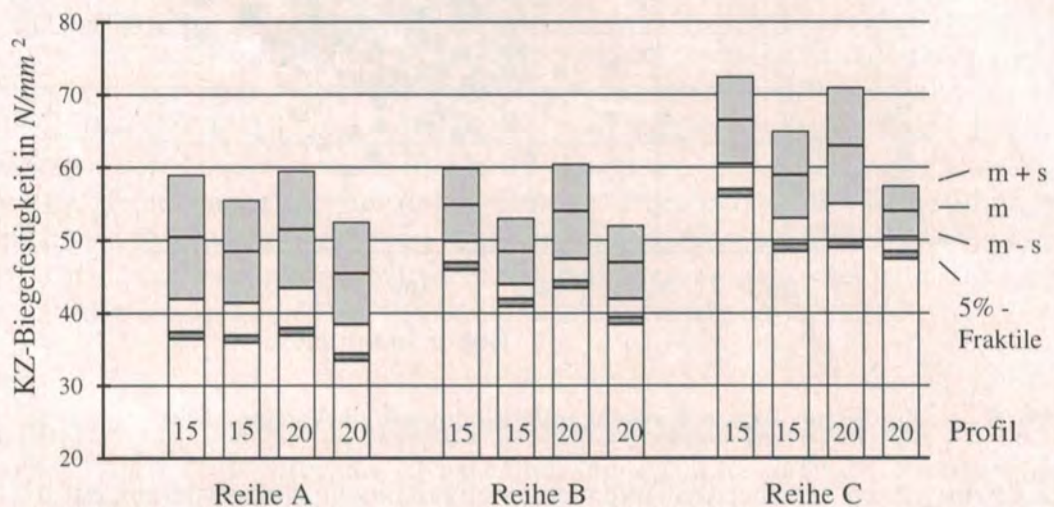


Abb. 6 Ergebnisse von Biegeversuchen mit Keilzinkenverbindungen.

Nachfolgend sind die wichtigsten Ergebnisse zusammengefaßt:

Reihe A

Die mittlere Biegefestigkeit beträgt etwa 50 N/mm^2 , wobei zwischen dem 15 mm-Profil und dem 20 mm-Profil kaum ein großer Unterschied festzustellen ist. Die charakteristische Biegefestigkeit liegt bei etwa 36 N/mm^2 .

Reihe B

Die mittlere Biegefestigkeit liegt ebenfalls bei etwa 50 N/mm^2 , also nicht höher als bei Reihe A. Dieses Ergebnis überrascht nicht, weil bei beiden Versuchsreihen die Keilzinkenverbindungen aus Brettern mit etwa gleichen mittleren Eigenschaften hergestellt wurden. Die 5%-Fraktile der Reihe B hingegen liegt bei etwa 42 bis 43 N/mm^2 , was deutlich über dem Wert von 36 N/mm^2 der Reihe A liegt. Dies zeigt, daß allein schon die Reduzierung der Streubreite der Holzeigenschaften eine deutliche Steigerung der für die Bemessung

maßgebenden charakteristischen Keilzinkenfestigkeit bewirkt. Dies kann aber nur mit Hilfe einer maschinellen Holzsortierung erreicht werden.

Reihe C

Die Bedeutung der maschinellen Holzsortierung wird durch die Ergebnisse der Reihe C noch deutlicher. Hier liegt die mittlere Biegefestigkeit bei etwa 60 N/mm^2 , und die 5%-Fraktile bei etwa 50 N/mm^2 . Die charakteristische Biegefestigkeit liegt somit rund 40% über dem derzeit produzierten Wert (Reihe A).

Vergleicht man die untersuchten Keilzinken-Profile miteinander, so deuten die Ergebnisse der Reihe B und C an, daß die Vorteile des günstigeren 15 mm -Keilzinken-Profiles erst bei besser werdenden Holzeigenschaften richtig zum Tragen kommen (siehe hierzu auch COLLING und EHLBECK, 1992).

4.3 Schlußfolgerungen

Anhand der in diesem Abschnitt beschriebenen Untersuchungen können folgende wesentliche Schlußfolgerungen gezogen werden:

- In Anbetracht der festigkeitsrelevanten Bedeutung der Keilzinkenverbindungen ist es erforderlich, Mindestanforderungen an die Tragfähigkeit der Keilzinkenverbindungen zu stellen.
- Die Herstellung von hochwertigem Brettschichtholz ist nur möglich mit Hilfe einer maschinellen Holzsortierung auf der Grundlage der Rohdichte und/oder des E-Moduls, weil nur hiermit die Qualität d.h. die Festigkeit von beiden Einflußfaktoren Brett und Keilzinkenverbindung erhöht werden kann.

5 Auswertung im Hinblick auf die Normung

Die durchgeführten Untersuchungen und die ermittelten Ergebnisse bildeten eine wichtige Grundlage für die Arbeiten im Zusammenhang mit der europäischen Normung. Die Ergebnisse waren jedoch nicht zuletzt wegen der Vielschichtigkeit der gefundenen Abhängigkeiten kaum für die Ableitung von einfachen und praktischen Anforderungen/Regelungen geeignet. Aus diesem Grunde wurden die vorliegenden Untersuchungsergebnisse nochmals ausgewertet, wobei die Vorgabe bestand, daß die Tragfähigkeit von Brettschichtholz in Abhängigkeit von der Qualität (Sortierklasse) der Bretter unter Berücksichtigung der Festigkeit der Keilzinkenverbindungen bestimmt werden sollte. Diese weiterführenden Auswertungen sind nachfolgend beschrieben.

Hierbei wird ausdrücklich darauf hingewiesen, daß sich die angegebenen Festigkeitswerte für Brettschichtholz auf eine Trägerhöhe von 600 mm beziehen.

5.1 Einfluß der Brettfestigkeit

Schon frühere Untersuchungen zeigten, daß die Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern z.T. deutlich höher ist als die Zugfestigkeit der Lamellen, die zur Herstellung dieser Träger verwendet werden. Dieser Vergütungseffekt, der durch das Verleimen der Lamellen entsteht, wird auch als Laminierungseffekt bezeichnet. Auf der Grundlage vorliegender Versuche und

Simulationsrechnungen wurde dieser Laminierungseffekt analysiert (COLLING und FALK, 1993), wobei die festgestellte Vergütung auf mehrere Einzelfaktoren zurückgeführt werden konnte, die sich z.T. gegenseitig beeinflussen. Mit Hilfe dieser Untersuchung war es möglich, die einzelnen Einflüsse sowohl qualitativ als auch quantitativ abzuschätzen.

In Abb. 7 ist die charakteristische Biegefestigkeit $f_{m,gl,k}$ von Brettschichtholzträgern in Abhängigkeit von der charakteristischen Zugfestigkeit $f_{t,lam,k}$ der Bretter dargestellt.

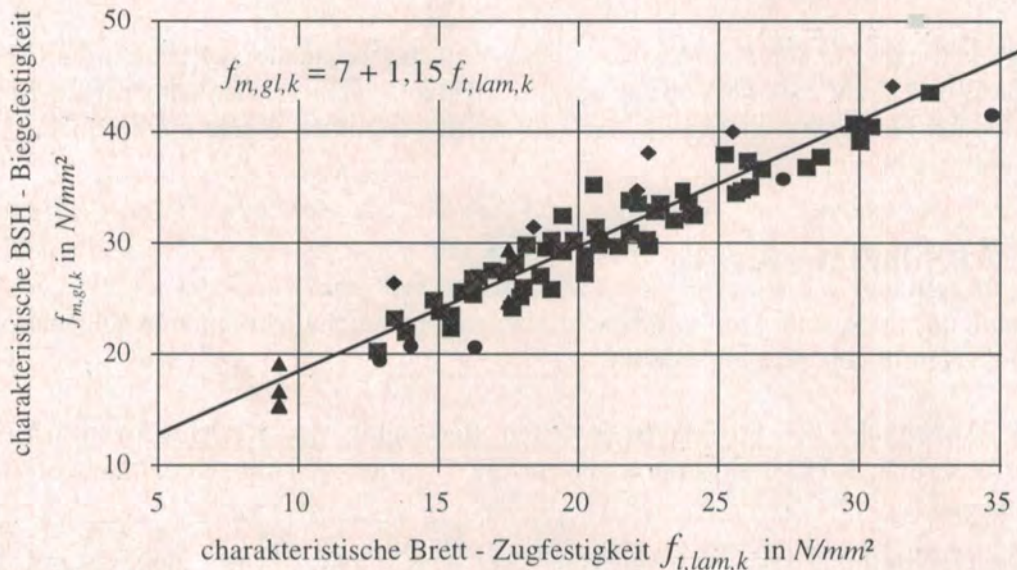


Abb. 7 Charakteristische Brettschichtholz-Biegefestigkeit in Abhängigkeit von der charakteristischen Brett-Zugfestigkeit.

Die charakteristischen Werte entsprechen hierbei den jeweiligen 5%-Fraktile der zugehörigen Verteilungen. Hierbei wurden nur Träger berücksichtigt, die durch Holzversagen zu Bruch gingen, so daß der Einfluß der Keilzinkungen bewußt eliminiert wurde.

Es ist zu erkennen, daß eine recht enge Abhängigkeit besteht, die mit der folgenden linearen Regressionsgleichung beschrieben werden kann:

$$f_{m,gl,k} = 7 + 1,15 f_{t,lam,k} \quad (1)$$

5.2 Einfluß der Keilzinkenfestigkeit

Mit Hilfe des "Karlsruher Rechenmodells" war es möglich, Holzversagen als Bruchursache auszuschalten und somit ein Keilzinkenversagen zu 'erzwingen'. Die durchgeführten Simulationsrechnungen (siehe COLLING, 1990a) ergaben dabei, daß zwischen der char. Biegefestigkeit $f_{m,gl,k}$ eines 300 mm hohen Brettschichtholzträgers und der char. Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindungen $f_{t,j,k}$ folgende Beziehung besteht:

$$f_{m,gl,k} (H = 300 \text{ mm}) \approx 1,20 f_{t,j,k} \quad (2)$$

Unter Ansetzung der im Eurocode 5 angegebenen Gleichung zur Berücksichtigung des Einflusses der Trägerhöhe ergibt sich für einen 600 mm hohen Brettschichtholzträger folgende Beziehung:

$$f_{m,gl,k} (H = 600 \text{ mm}) \approx 1,20 \left(\frac{300}{600} \right)^{0,2} f_{t,j,k} = 1,05 f_{t,j,k} \quad (3)$$

Da aber eine Bestimmung der Keilzinken-Zugfestigkeit in den Leimbaubetrieben zur Qualitätsüberwachung zu aufwendig und somit kaum durchführbar ist, wurde vereinbart, die Keilzinken-Biegefestigkeit zur Abschätzung der zugehörigen Zugfestigkeit heranzuziehen.

Anhand von umfangreichen Untersuchungen (EHLBECK und COLLING, 1992) wurde folgende Beziehung zwischen der charakteristischen Zugfestigkeit $f_{t,j,k}$ und der charakteristischen Biegefestigkeit $f_{m,j,k}$ von Keilzinkenverbindungen ermittelt:

$$f_{t,j,k} \approx 0,7 f_{m,j,k} \quad (4)$$

Die Versuche zeigten, daß diese Gleichung unabhängig von den Eigenschaften des verwendeten Brettmaterials und somit auch von der Sortierklasse der Lamellen gilt.

Mit Hilfe von Gl.(3) und Gl.(4) ergibt sich somit folgende Abhängigkeit zwischen der charakteristischen Brettschichtholz-Biegefestigkeit $f_{m,gl,k}$ und der charakteristischen Keilzinken-Biegefestigkeit $f_{m,j,k}$:

$$f_{m,gl,k} \approx 1,05 \cdot 0,7 f_{m,j,k} = 0,75 f_{m,j,k} \quad (5)$$

Diese lineare Abhängigkeit ist in Abb. 8 dargestellt.

Diese etwas eigenartig anmutende Darstellung wurde bewußt gewählt, um zu verdeutlichen, daß beim Keilzinkenversagen sämtlicher Träger die Lamellenzugfestigkeit ohne Bedeutung ist (die Brettschichtholzfestigkeit ist bei vorgegebener Keilzinkenfestigkeit konstant). Zum Vergleich mit dem Einfluß der Brettfestigkeit ist die in Abb. 7 dargestellte Abhängigkeit als gestrichelte Linie dargestellt.

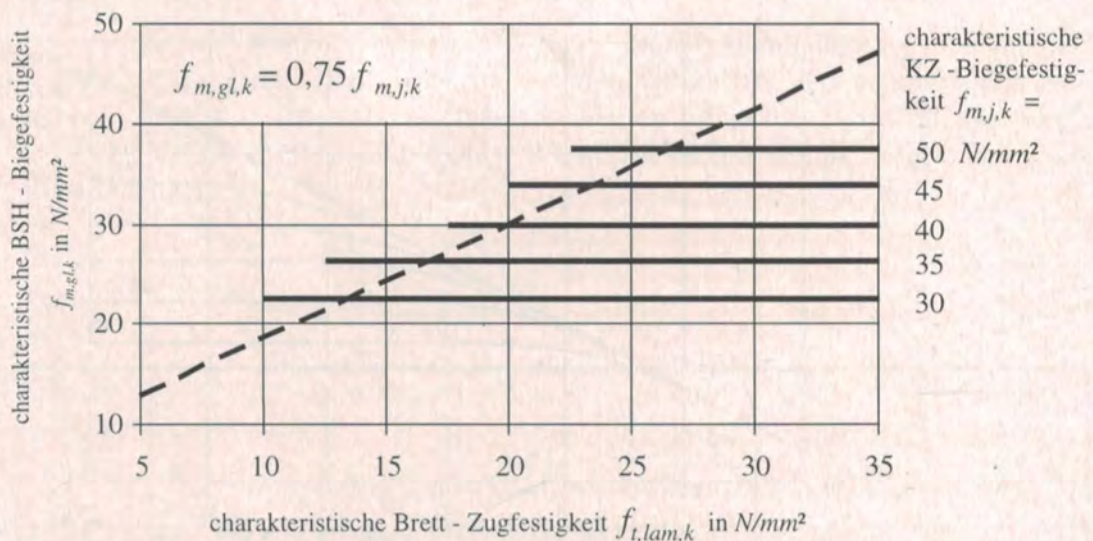


Abb. 8 charakteristische Brettschichtholz-Biegefestigkeit in Abhängigkeit von der charakteristischen Keilzinken-Biegefestigkeit.

Da aber die Keilzinkenfestigkeit von Betrieb zu Betrieb unterschiedlich ist (Einfluß produktionsabhängiger Faktoren), kann sie bei der Bemessung von Brettschichtholzträgern auch kaum berücksichtigt werden. Daher wurde vereinbart, Gl.(5) nicht zur Abschätzung der Brettschichtholzfestigkeit, sondern zur Festlegung von Mindestanforderungen an die Keilzinkenfestigkeit heranzuziehen:

- Der Tragwerksplaner legt bei der Bemessung die Sortierklasse der Lamellen fest, mit denen ein Brettschichtholzträger aufgebaut werden soll. Unter Zugrundelegung von Gl.(1) ist damit auch ein 'Zielwert' für die charakteristische Biegefestigkeit der Brettschichtholzträger festgelegt.
- Diese 'Zielfestigkeit' kann aber nur erreicht werden, wenn nach Gl.(5) die Keilzinkenverbindungen folgende Bedingungen erfüllen:

$$f_{m,j,k} \geq 1,35 f_{m,gl,k} \quad (6)$$

Diese Anforderung, die die Grundlage vieler kontroverser Diskussionen bildete, wurde in modifizierter Form in die europäische Brettschichtholz-Norm aufgenommen (siehe hierzu auch Abschnitt 6).

5.3 Kombiniertes Einfluß

Da bei Versuchen in den meisten Fällen weder ein ausschließliches Holzversagen noch ein alleiniges Keilzinkenversagen festzustellen ist, liegt in aller Regel ein kombinierter Einfluß der beiden Faktoren vor. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn der Einfluß beider Faktoren etwa gleich groß ist und sich nach Gl.(1) und Gl.(5) etwa gleich große Werte ergeben. Dies ist nach Abb. 8 immer dann der Fall, wenn sich die Gerade der Brettfestigkeit mit einer Geraden der Keilzinkenfestigkeit schneidet.

Zur Darstellung des kombinierten Einflusses wurden die beiden Abhängigkeiten in ein Diagramm übertragen (Abb. 9), wobei der Kurvenverlauf im Bereich der jeweiligen Schnittpunkte mit Hilfe eines statistischen Modelles (vgl. COLLING, 1990a) berechnet wurden. Hierdurch wurden die Knickpunkte abgerundet.

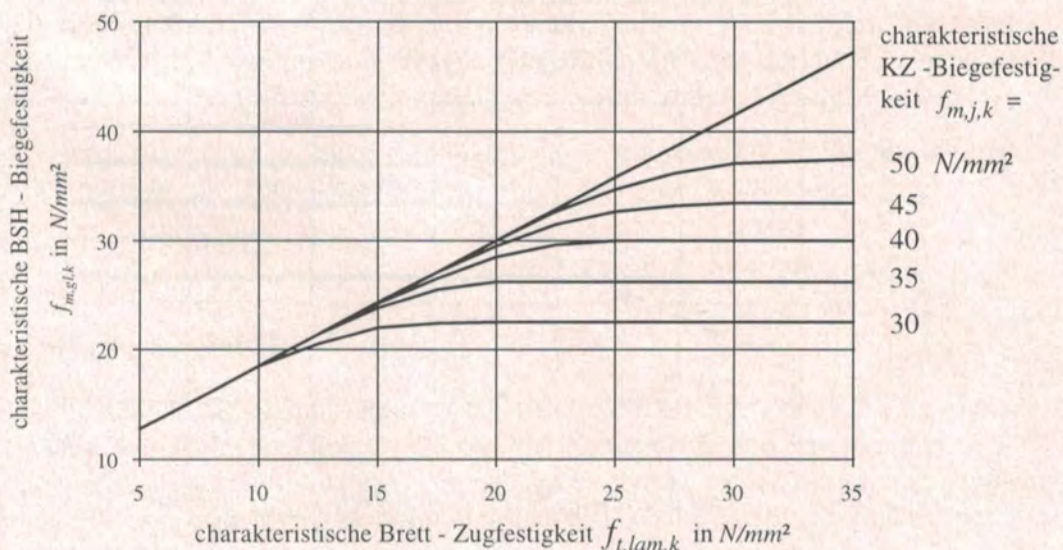


Abb. 9 charakteristische Brettschichtholz-Biegefestigkeit in Abhängigkeit von der charakteristischen Brett-Zugfestigkeit und der charakteristischen Keilzinken-Biegefestigkeit.

Mit Hilfe dieses Diagrammes ist es nun möglich, die charakteristische Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern abzuschätzen, wenn man die Festigkeitseigenschaften der Bretter und der Keilzinkenverbindungen kennt. Liegt z.B. eine charakteristische Zugfestigkeit der Bretter

von 18 N/mm^2 vor und werden gleichzeitig Keilzinkenverbindungen mit einer charakteristischen Biegefestigkeit von 35 N/mm^2 hergestellt, so ist eine charakteristische Biegefestigkeit der Brettschichtholzträger von etwa 26 N/mm^2 zu erwarten.

Dieses Bild zeigt weiterhin, in welchen Bereichen ausschließlich die Brettqualität maßgebend wird, und in welchen Bereichen die Brettschichtholzfestigkeit ausschließlich von den Keilzinkenverbindungen beeinflusst wird. Prinzipiell gilt, daß mit steigender Brettqualität auch höhere Keilzinkenfestigkeiten gewährleistet werden müssen, damit die Qualität der Bretter überhaupt genutzt werden kann.

Betrachten wir hierzu den Kurvenverlauf für eine Keilzinken-Biegefestigkeit von 35 N/mm^2 : Bei geringen Brettfestigkeiten ($f_{t,lam,k} \leq 15 \text{ N/mm}^2$) bestimmen die Bretter die Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern. Steigert man jedoch die Brettfestigkeit durch eine geeignete Holzsortierung, so ist zu erkennen, daß die Brettschichtholzfestigkeit ab einem bestimmten Punkt ($f_{t,lam,k} \geq 20 \text{ N/mm}^2$) nicht weiter gesteigert werden kann, weil dann die Keilzinkenfestigkeit die Brettschichtholzfestigkeit bestimmt. Man bleibt also im wahrsten Sinne des Wortes stehen, und die hohen Brettqualitäten können gar nicht genutzt werden.

Dies bestätigt die oben bereits gemachte Aussage, daß das Endprodukt Brettschichtholz nur so gut sein kann, wie der schwächere der beiden Faktoren Holzfestigkeit und Keilzinkenfestigkeit.

Im Sinne einer Optimierung ist weiterhin anzustreben, beide Faktoren so ausgeglichen wie möglich zu gestalten. Dies bedeutet, daß es sinnvoll ist, die Brettqualität und die Keilzinkenfestigkeit so zu steuern, daß man in den Bereich der Schnittpunkte der jeweiligen Begrenzungskurven gelangt. Dies bedeutet aber, daß man dazu in der Lage sein muß, beide Faktoren gezielt zu beeinflussen, d.h. zu steuern. Dies ist - wie bereits wiederholt erwähnt - nur möglich mit Hilfe einer maschinellen Holzsortierung auf der Grundlage der Rohdichte und/oder des Elastizitätsmoduls der Bretter.

Die in Bild 9 dargestellte Abhängigkeit wurde durch umfangreiche norwegische Untersuchungen bestätigt (FALK et al., 1992). Bei den hier durchgeführten Versuchen wurden die Eigenschaften von mehreren tausend maschinell sortierten Brettern, 200 Keilzinkenverbindungen und mehr als 200 Brettschichtholzträgern untersucht. Die Versuchsergebnisse sind in Tabelle 3 zusammengefaßt.

Tabelle 3 Versuchsergebnisse aus FALK et al. (1992).

Brett- klasse	$\frac{\%_{\text{Holz}}}{\%_{\text{KZV}}}$ 1)	$f_{t,lam,k}$ (N/mm^2)	$f_{m,j,k}$ (N/mm^2)	$f_{m,gl,k}$ ($H=300 \text{ mm}$) (N/mm^2)	$f_{m,gl,k}^{2)}$ ($H=600 \text{ mm}$) (N/mm^2)	$f_{m,gl,k}$ Nach Abb. 9 (N/mm^2)
C30 N=104	77	18,8	49,0	34,2	29,8	$\cong 29,0$
C37 N=112	66	23,6	52,0	39,4	34,3	$\cong 34,0$

1) Anteil der Träger mit Holzversagen/Keilzinkenversagen in %

2) $f_{m,gl,k}(600) = (300/600)^{0,2} f_{m,gl,k}(300)$

Aus dieser Tabelle ist eine gute Übereinstimmung zwischen versuchsmäßig ermittelter und nach Bild 9 abgeschätzter Tragfähigkeit festzustellen.

Weiterhin ist anhand der Versagensanteile zu erkennen, daß bei der ersten Versuchsreihe (C30-Bretter) die Brettschichtholzfestigkeit maßgeblich von der Brettqualität bestimmt wurde, während bei der zweiten Versuchsreihe (C37-Bretter) die Brett- und Keilzinkenqualität besser aufeinander abgestimmt waren. Dieses Ergebnis war nach Bild 9 auch zu erwarten: für die C30-Bretter wird der Wert der Brettschichtholzfestigkeit ausschließlich über die Gerade der Brettfestigkeit bestimmt, während man sich bei den C37-Brettern eher im Bereich des Schnittpunktes der beiden Einflußkurven befindet.

In jedem Fall zeigen diese Versuche erneut, daß es mit Hilfe einer maschinellen Holzsortierung möglich ist, das "Problem" Keilzinkung in den Griff zu kriegen, wenn nicht sogar ganz auszuschalten.

6 Normung

Bei den Arbeiten im Zusammenhang mit der Harmonisierung der europäischen Baubestimmungen bildete vor allem die Mindestanforderung an die Keilzinkenfestigkeit Gegenstand zahlreicher kontrovers geführter Diskussionen. Die in Gl.(6) enthaltene Forderung hätte zur Folge, daß eine ganze Reihe von deutschen Leimbaubetrieben künftig kein Brettschichtholz der Güteklasse I (BS 14) mehr herstellen dürfte, weil sie nach dem derzeitigen Stand die geforderten Keilzinkenfestigkeiten nicht erfüllen.

In Anbetracht der Tatsache, daß sich die derzeitigen Regelungen der DIN-Normen bewährt haben, wird daher die Notwendigkeit von schärferen/strengerem Anforderungen angezweifelt. Dabei unterstützen folgende Argumente diese Haltung:

- Es sind keine Schäden bekannt, die darauf hindeuten, daß die Standsicherheit bei ordnungsgemäß hergestelltem Brettschichtholz nicht gewährleistet wäre. Das derzeitige Sicherheitsniveau hat sich somit bewährt und kann als ausreichend angesehen werden.
- Die laufende Qualitätsüberwachung während der Herstellung von Brettschichtholz reduziert das Risiko von möglichen Ausreißern und erhöht somit zusätzlich die Sicherheit.
- Die hier vorgestellten Versuchsergebnisse beruhen auf Kurzzeit-Untersuchungen, die keine Rückschlüsse auf das Langzeitverhalten von Brettschichtholz zulassen.
- Die im Eurocode 5 vorgesehenen Modifikationsfaktoren k_{mod} zur Berücksichtigung der Lasteinwirkungsdauer und der Holzfeuchte basieren auf Versuchen mit Vollholzträgern. Infolge des vielschichtigen Aufbaus von Brettschichtholz und der damit verbundenen Möglichkeit von Lastumlagerungen ist für Brettschichtholz ein 'günstigeres' Langzeitverhalten zu erwarten.

Auf der Grundlage dieser Argumente wurde vereinbart, die Gleichungen (1) und (6) so zu modifizieren, daß das derzeit vorhandene Sicherheitsniveau erreicht wird.

Die Arbeiten zu der entsprechenden Norm EN 1194 "Holzbauwerke - Brettschichtholz - Festigkeitsklassen und Bestimmung charakteristischer Werte" sind noch nicht abgeschlossen, die im derzeitigen Entwurf (November 1994) vorgesehenen Gleichungen sind nachfolgend angegeben:

$$f_{m,gl,k} = 9 + 1,2f_{t,o,l,k} \quad (7)$$

und

$$f_{m,j,k} = 1,2f_{m,gl,k} \quad (8a)$$

bzw.

$$f_{m,j,k} = 1,2(9 + 1,2f_{t,o,l,k}) \quad (8b)$$

Mit diesen Regelungen erscheint es möglich, den jetzigen Stand sowohl unter sicherheitsrelevanten als auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten zu erhalten.

Darüber hinaus sind in der europäischen Brettschichtholz-Norm Festigkeitsklassen für Brettschichtholz mit maschinell sortierten Lamellen vorgesehen, womit die normativen Voraussetzungen für den Einsatz von hochwertigem Brettschichtholz geschaffen wurden. Durch aktive Mitarbeit in den zuständigen Normungsgremien ist es somit gelungen, neueste Forschungsergebnisse in die Normung und somit auch in die Praxis umzusetzen.

7 Literatur

COLLING, F. (1988). Estimation of the effect of different grading criteria on the bending strength of glulam beams by using the "Karlsruhe calculation model". IUFRO, Turku, Finland.

COLLING, F. (1990a). Tragfähigkeit von Biegeträgern aus Brettschichtholz in Abhängigkeit von den festigkeitsrelevanten Einflußgrößen. Dissertation der Universität Karlsruhe.

COLLING, F. (1990b). Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern in Abhängigkeit von den festigkeitsrelevanten Einflußgrößen. Holz als Roh- und Werkstoff 48: 269 - 273; 321 - 326; 391 - 395.

COLLING, F. und DINORT, R. (1987). Die Ästigkeit des in den Leimbaubetrieben verwendeten Schnittholzes. Holz als Roh- und Werkstoff 45: 23 - 26.

Colling, F. und EHLBECK, J. (1992). Tragfähigkeit von Keilzinkenverbindungen im Holzleimbau. Bauen mit Holz 94 (7): 586 - 593.

COLLING, F. und FALK, R. (1993). Investigation of laminating effects in glued laminated timber. CIB-W18, Athens, Georgia, USA.

COLLING, F. und GÖRLACHER, R. (1989). Eigenschaften des in Leimbaubetrieben verarbeiteten Schnittholzes. Bauen mit Holz 91: 327 - 331.

EHLBECK, J. und COLLING, F. (1992). Biegefestigkeit von Brettschichtholz in Abhängigkeit von den Eigenschaften der Brett lamellen im Hinblick auf Normungsvorschläge. Forschungsbericht des Lehrstuhls für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen der Universität Karlsruhe.

EHLBECK, J., COLLING, F. und GÖRLACHER, R. (1985). Einfluß keilgezinkter Lamellen auf die Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern. Holz als Roh- und Werkstoff 43: 333 - 337; 369 - 373; 439 - 442.

EHLBECK, J., COLLING, F. und WENZ, J. (1989). Prüfung der Tragfähigkeit von Keilzinkenverbindungen der Lamellen für Brettschichtholz. Forschungsbericht der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abteilung Ingenieurholzbau, Universität Karlsruhe.

FALK, R., SOLLI, K. und AASHEIM, E. (1992). The performance of glued laminated beams manufactured from machine stress graded Norwegian spruce. Norsk Treteknisk Institut, meddelelse 77.

FOSCHI, R.O. und BARRETT, J.D. (1980). Glued-laminated beam strength: a model. Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 106, No.ST8: 1735 - 1754.

HEIMESHOFF, B. und GLOS, P. (1980). Zugfestigkeit und Biege-E-Modul von Fichten-Brettla-mellen. Holz als Roh- und Werkstoff 38: 51 - 59.