

Entwicklung des ingenieurmässigen Holzbaus seit Grubenmann. Teil II: 20. Jahrhundert und künftige Möglichkeiten

Autor(en): **Gehri, Ernst**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **101 (1983)**

Heft 33/34

PDF erstellt am: **25.04.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-75184>

Nutzungsbedingungen

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

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

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

Haftungsausschluss

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

Entwicklung des ingenieurmässigen Holzbaus seit Grubenmann

Teil II: 20. Jahrhundert und künftige Möglichkeiten

Von Ernst Gehri, Zürich

Ein entscheidender Schritt gelang mit der Einführung von Brettschichtholz, wodurch materialtechnische Unsicherheiten wesentlich eingeschränkt werden konnten. Neue Verbindungstechniken mit Vorbohrung des Holzes und Beizug von Stahlteilen ermöglichten leistungsfähigere Anschlüsse sowie den Einsatz von Harthölzern. Entwicklungen bei Baumaterial und Tragsystem sind im Gang, entscheidend ist aber der Wille zur Zusammenarbeit der Beteiligten aus Entwurf und Ausführung.

Brettschichtholz als neuer Baustoff

Die Hetzersche «Erfindung»

Im Jahre 1906 hat *Otto Hetzer* aus Weimar im Kaiserlichen Patentamt zu Berlin ein Patent, auf welches heute die Brettschichtbauweise zurückgeführt wird, angemeldet [11]. Sein Patentanspruch lautete:

«Gebogener Holz-Bauteil für vereinigte Dach-Pfosten und -Sparren, dadurch gekennzeichnet, dass zwei oder mehrere in gewünschter Form gebogene Langholzstäbe durch Zwischenfügung eines in Feuchtigkeit nicht löslichen Bindemittels unter Druck zusammengefügt sind.»

Erläuternd hieran war noch folgende Zeichnung beigelegt (Bild 12). – Mehrmals habe ich die kurze Patentschrift durchgelesen und mich gefragt: Ist das wirklich alles?

Die Verleimung stellte – wie bereits dargelegt – keine Neuheit mehr dar. Die verleimten Bogen von *Wiebeking* und von *Valentine* mochten in Vergessenheit geraten sein, aber die mit Kasein verleimten Bogenbinder in England (Bild 13) konnten nicht unerkannt bleiben. Deshalb musste sich *Hetzer* auf die Patentierung eines sekundären Bauteils beschränken, d.h. auf einen gebogenen Bauteil, der zugleich die Funktion eines Pfostens und eines Sparrens besitzt. Bild 14 stellt eine dem *Hetzerschen* Patentanspruch entsprechende Ausführung dar. Es stellt das Apparatehaus der *Konservenfabrik Lenzburg* dar, das 1916 gebaut wurde. Das *Hetzer*-Pfosten-Sparren-Dach überspannt stützenfrei 13,5 m.

Der Vollständigkeit halber sei hier noch aus *Wiebeking* [5] zitiert:

«Solche Verbindungen der kleinen Bretter zu einem ganzen Baustücke, deren Stossfugen abwechseln müssen, kann ich nicht genug beim Bau der Bogenbrücken und bey Treppen, kurz, überall, wo man stark gekrümmte Bauhölzer nöthig hat, empfehlen.

Die einzelnen Bretter lassen sich nämlich nach der Lehre, selbst in Windungen krümmen; folglich ist eine Zusammensetzung davon zu Bogenbrücken und Treppenträgern sehr geschickt.»

Man kann daraus ersehen, dass durch die Arbeiten und durch die Veröffentlichung von *Wiebeking* (1809, d.h. rund 100 Jahre früher!) der Patentanspruch von *Hetzer* hinfällig wurde.

Die Verleimungstechnik

Entscheidend für den Einsatz des Brettschichtholzes war – und ist auch noch heute – die *Beherrschung der Verleimungstechnik*. Hiezu gehören nebst der Vorbereitung des Holzes (Schnitt, Holz-auswahl, Oberflächenzustand, Trocknung) und der Aufbereitung des Leimes auch die fachgemässe Ausführung (Auftragsmenge, Pressdruck und Pressdauer).

Das *maschinelle Planhobeln* von Brettern war bereits seit 1776 möglich. Auch waren geeignete Lagerungsarten für die Lufttrocknung bekannt. Zudem verfügten die Handwerker über die erforderlichen Kenntnisse für die geeignete Auswahl des Holzes.

Die wichtigste Komponente stellt sicherlich die *Aufbereitung des Leimes* dar. Aus der Patentschrift von *Hetzer* geht nur hervor, dass «ein in Feuchtigkeit nicht lösliches Bindemittel» verwendet wurde. Gemäss *Böhm* [12] erzielte *Hetzer* eine innige Verbindung der Hölzer «durch einen von ihm erfundenen, seiner Natur nach dem Käseleim wohl verwandten Klebstoff und sehr starkes Zusammenpressen der damit verkitteten Holzstücke».

Kaseinleime waren wohlbekannt. Bei der in Bild 13 dargestellten Tragkonstruktion, fast 50 Jahre vor der Patentanmeldung durch *Hetzer*, war bereits ein Kaseinleim verwendet worden.

Wiebeking verwendete für die Verleimung der Bogen für die *Brücke bei Altenmarkt* im Jahre 1809 folgendes Verfahren [5]:

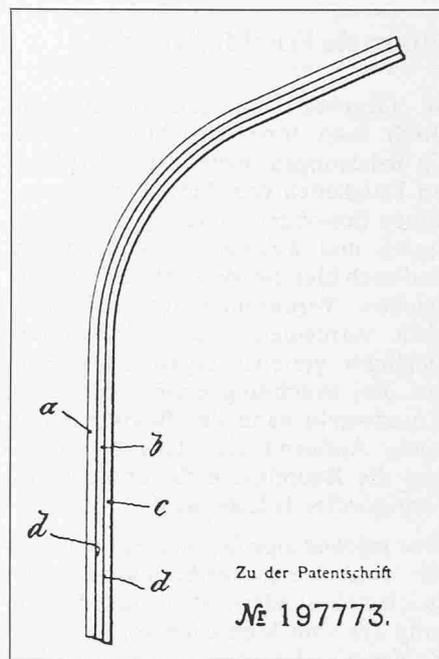


Bild 12. Skizze zu der Patentschrift Nr. 197773 von Otto Hetzer in Weimar

«Diese Bretter werden nämlich mittelst Kohlfener erwärmt, dann wird die Oberfläche des untern und die untere Fläche des darauf zu liegenden kommenden Brettes mit Tischlerleim dünn bestrichen; und so wird das untere Brett, oder die unteren Bretter, und das obere Brett mit Zwingen dergestalt zusammengepresst, dass alle Bretter nur einen Holzkörper bilden.»

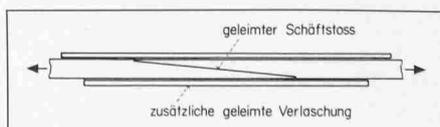
Emy [13] erwähnt bei der Besprechung der Brücke bei *Altenmarkt* als besseren *Schutz des Leimes vor Luftfeuchtigkeit*, es

«wäre vorzuziehen, anstatt des Leimes einen fetten, steinigen, wasserdichten Mastix, wie etwa den von *HILL*, anzuwenden, welcher dem Holze so anklebt, dass Hölzer, welche durch denselben verbunden sind, nur durch Abspringen getrennt werden können».

Bei der Diskussion der 1847 von *Valentine* entworfenen Eisenbahnbrücke über den *Wissey-Fluss* mit geleimten Holzboden (vgl. *Booth* [6]) macht *James* interessante Angaben über den 1842 bereits bekannten «*Jeffery's marine glue*», einer Mischung aus Gummi und Schellack in einem üblichen Lösungsmittel wie «*Naphtha*».

Hier ist auch auf *Remington* hinzuweisen, der 1847 ein *hölzernes Hängeband* baute, wobei er die Holzlamellen durch geleimte Schäftungen zugfest zusammenfügte. Bild 15 zeigt einen derartigen Stoss.

Bild 15. Geleimte Schäftung gemäss *Remington*; Bild aus *Culmann* [3] entnommen



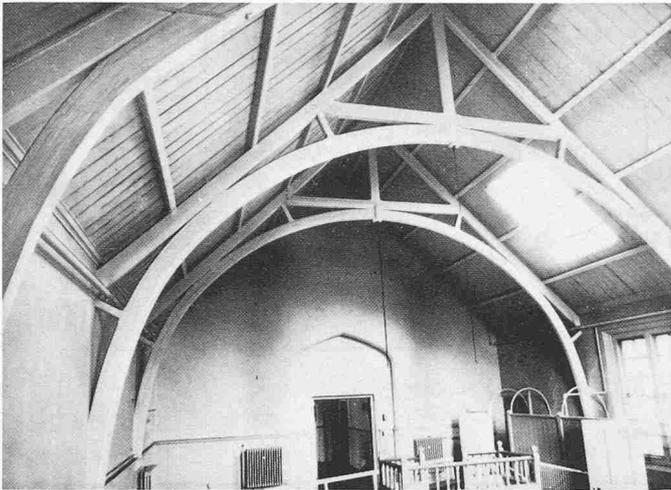


Bild 13. Bogenbinder aus Brettschichtholz; Versammlungssaal des King Edward College in Southampton, errichtet um 1860 (Foto: Arbeitsgemeinschaft Holz, Düsseldorf)

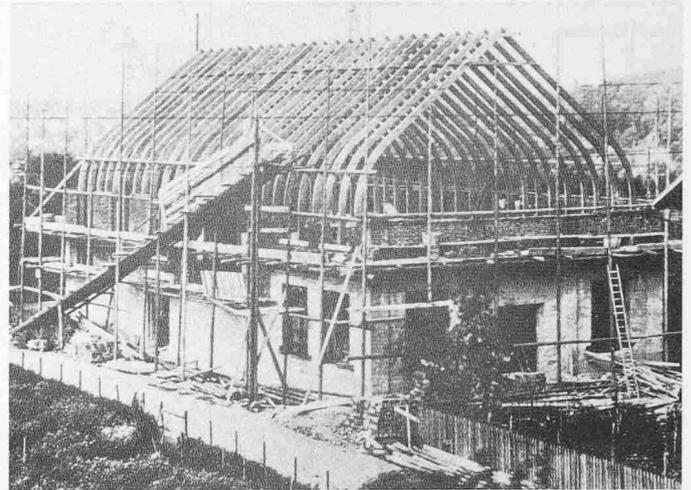


Bild 14. Dachkonstruktion des Apparatehauses der Konservenfabrik Lenzburg

Die wichtigsten Elemente der Verleimtechnik waren vor dem Zeitpunkt der Patentanmeldung von *Hetzer* bekannt, ja es bestanden bereits entsprechend ausgeführte Tragkonstruktionen. Worin liegt denn die Leistung von *Hetzer* für die Leimbauweise?

Zusammenwirken von Idee - Entwurf - Ausführung

Dass der Leimbauweise durch das Patent von *Hetzer* ein entscheidender Durchbruch gelang, ist nicht mehr allein das Verdienst *Hetzers*. Wir haben dies dem Zusammenwirken von Idee (*Hetzer*), vom optimalen Entwurf und der Bemessung (*Chopard*) sowie von handwerklich sorgfältiger Ausführung durch die Mitgliedsfirmen der Schweizerischen Aktiengesellschaft für die *Hetzerschen Holzbauweisen* zu verdanken. Innerhalb von knapp 10 Jahren wurden in der Schweiz über 200 Bauten mit Brettschichtholz erstellt. Bild 16 zeigt die SBB-Werkstätte in Bellinzona.

Diese rasante Entwicklung wurde in den 20er Jahren unterbrochen. Nebst wirtschaftlichen Gründen war hierfür auch das Auseinanderleben der Partner mitverantwortlich. Gewisse Fehlanwendungen im Aussenbereich mögen das ihre beigetragen haben.

Ein weiteres - noch heute aktuelles - Problem tauchte bereits damals auf: die Frage nach der Güte der Verleimung und nach den Möglichkeiten zu deren Überprüfung. Inwieweit von der Konkurrenz inspiriert, bleibe offen, aber interessant sind die aus *Seitz* [14] zitierten Feststellungen dennoch:

«Mehr als bei allen anderen Methoden spielt beim Verleimen die Güte der Verarbeitung und des Leims eine Rolle. Dazu kommt, dass Fehler in der Herstellung einer verleimten Konstruktion viel schwerer feststellbar sind als bei anderen Holzkonstruktionen, die grösstenteils ein Auseinandernehmen und

eine eingehende Besichtigung der Einzelteile erlauben. Stellen sich Fehler in der Verleimung heraus, so sind diese nur schwer und wenig sicher zu beheben. Wird die Güte der Verleimung durch Festigkeitsproben untersucht, so befindet man sich bis unmittelbar vor Eintreten des Bruchs im Unklaren über die Tragfähigkeit der Verbindung, da naturgemäss die Zerstörung sehr plötzlich eintritt.

Geleimte Konstruktionen sollten deshalb nur dann angewendet werden, wenn eine unmittelbare Durchfeuchtung nicht zu befürchten ist, und die Ausführung mit erfahrenem Personal in hierzu eingerichteten Betrieben unter dauernder sachverständiger Aufsicht vorgenommen wird. Weiter sollte immer beachtet werden, dass das zusammenzufügende Material durchweg gleichmässig trocken ist, und dass immer nur Langholz mit parallelen Fasern verleimt wird.»

Die Kunstharzverleimung

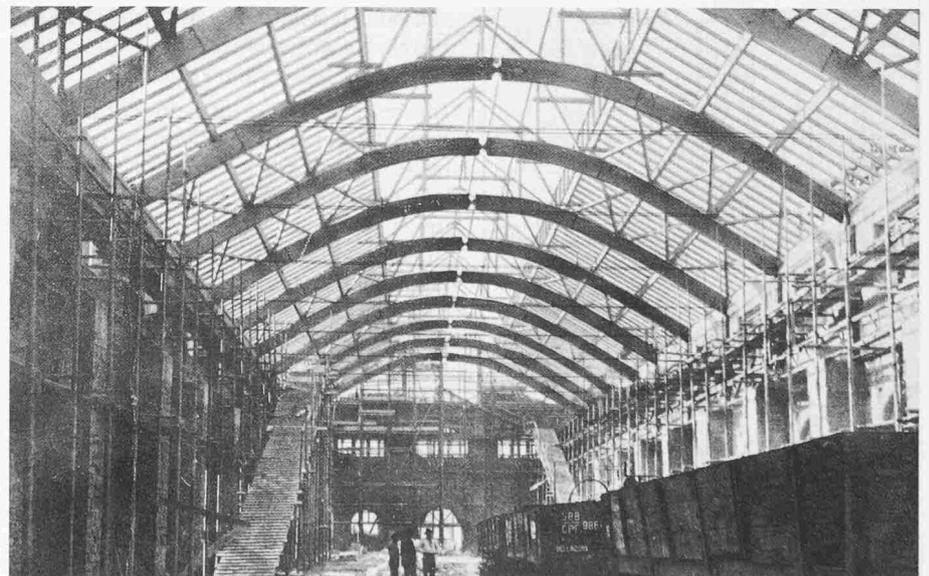
Der Aufschwung des Brettschichtholzes nach dem Zweiten Weltkrieg wird häufig mit dem Aufkommen der Kunstharzleime, insbesondere der Harnstoff- und der Resorcinharzleime,

begründet. Dies ist nur bedingt richtig, insbesondere wenn man bedenkt, dass in den USA noch lange und heute immer noch mit *Kasein* geleimt wird, während Leime auf Harnstoffbasis hierfür überhaupt nicht zugelassen sind.

Entscheidend für die grosse Verbreitung der Kunstharzverleimung ist neben der besseren Feuchtebeständigkeit bzw. Wasserfestigkeit die Möglichkeit, den *Aushärtungsvorgang* in weiten Grenzen zu steuern. Dadurch können optimale Verarbeitungsabläufe erreicht werden.

Für die Leistungsfähigkeit des kunstharzverleimten Brettschichtholzes sprechen verschiedene in den letzten 20 Jahren in der Schweiz erstellte Holzbauten [31]. Markantes Zeichen bildet die 1971 erstellte Dachkonstruktion für die *Eishalle Bern* mit Spannweiten von 76 bis 86 m. Auch hier wirkte sich die Zusammenarbeit von Entwurf und Verleimtechnik positiv für den Holzbau aus.

Bild 16. SBB-Lokomotivremise Bellinzona, erstellt 1919 durch B. Zöllig Söhne, Stützweite 24 m



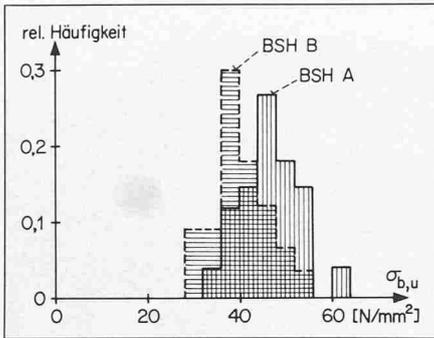
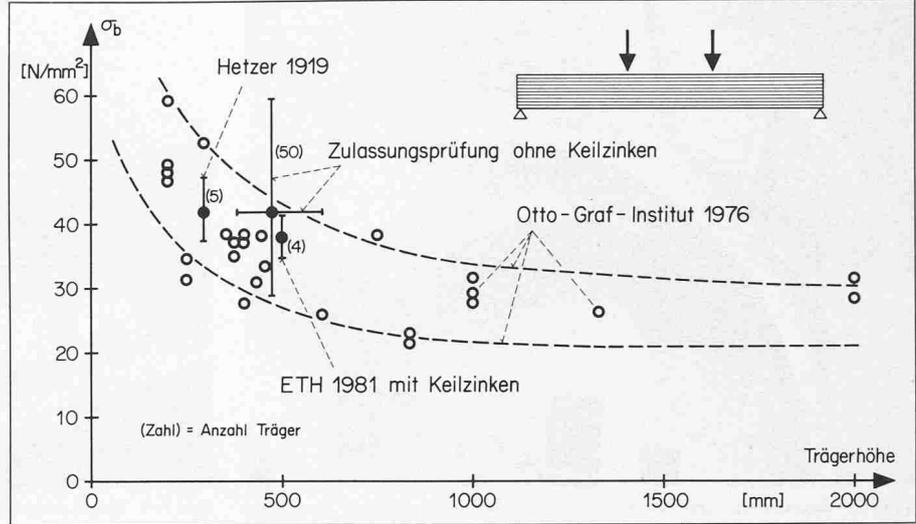


Bild 17 (oben). Histogramm der Bruchfestigkeiten an Biegeträgern bei Zulassungsprüfungen

Bild 18 (rechts). Versuchswerte nach [16] im Vergleich zu Werten aus Zulassungsprüfungen

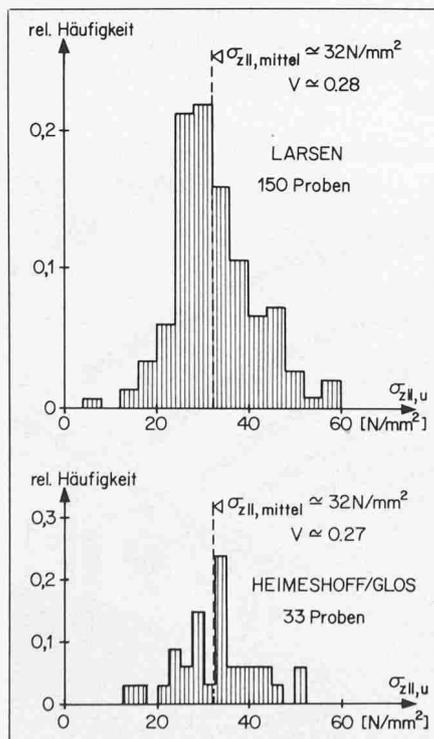


Baustoff mit gesicherten mechanischen Eigenschaften

Qualitativ gutes *Kanholz* grösserer und mittlerer Abmessungen wird immer rarer. Deshalb müssen wir uns rechtzeitig auf *Brettschichtholz* einstellen. Der Zimmermann muss lernen, mit diesem Baustoff zu arbeiten, so wie der Schlosser auch gelernt hat, dass es zweckmäßiger ist, das Winkelprofil zu kaufen als selber herzustellen. Sicher bedarf es einer Umstellung, wobei der simple Ersatz des Kanholzes durch einen verleimten Querschnitt kaum in Frage kommt, d.h. auch die konstruktive Durchbildung muss neu überdacht werden.

Standen früher die Möglichkeiten der *Formgebung* beim Brettschichtholz im

Bild 19. Histogramme für die Zugfestigkeit keilgezinkter Lamellen gemäss Larsen [19] und Heimeshoff/Glos [20]



Vordergrund, so hat heute die durch Lamellierung erreichbare *Homogenisierung* ebensolche Bedeutung. Wir benötigen einen Baustoff mit gleichmässig guten, aber vor allem mit gesicherten Eigenschaften.

Die durch die Kunstharzleime und insbesondere durch die neu auf den Markt drängenden Polyurethan- und Isocyanat-Leime bewirkten Erleichterungen im Herstellungsablauf, sowie neue *automatisierte Verarbeitungsanlagen* verleiteten vermehrt zum Einstieg in den Klub der Leimbauer. Fehlendes «Know-how» macht sich unliebsam bemerkbar. Der Qualitätssicherung und der überprüfaren Gewährleistung eines Qualitätsstandards kommt deshalb heute grösste Bedeutung zu, wobei grösseres Gewicht einer *sinnvollen betrieblichen Eigenkontrolle* als einer staatlichen Überwachung beigemessen wird.

In der BRD ist die Herstellung von Brettschichtholz nur über eine behördliche Zulassung mit festgelegten Kontrollverpflichtungen möglich. Dennoch sind auch dort grössere Qualitätsunterschiede feststellbar, die nicht allein durch die unterschiedliche Rohstoffbasis begründet werden können.

Interessant sind in diesem Zusammenhang die beiden vom *Otto-Graf-Institut* in Stuttgart veröffentlichten Daten. In [15] gibt *Kolb* die Versuchsergebnisse im Zusammenhang mit Zulassungsprüfungen wieder (Bild 17). Auch wenn man berücksichtigt, dass im massgebenden höchst beanspruchten Bereich jeweils keine Keilzinkungen vorlagen, liegen die festgestellten *Bruchwerte* relativ hoch, so dass hier eine höhere Sorgfalt (hier bezüglich der Holzsortierung der äusseren gezogenen Lamellen) vermutet werden muss.

Vergleicht man diese Bruchwerte mit denjenigen an *grösseren Trägern* (Brüche meist ausgehend von Keilzinken-

stössen), so erhält man gemäss Bild 18 tiefere Bruchwerte. Trägt man noch die *Werte von «Hetzer»* ein (1919 an der EMPA durchgeführte Versuche), so stellt man hier keine wesentlichen Unterschiede fest, was nicht erstaunlich ist, da auch die Versuchsträger von *Hetzer* keine Lamellenstösse aufwiesen. Massgebend war hier somit nicht die Verleimung, sondern die *Holzauswahl!*

Offen bleibt somit immer noch die Frage, wie eine zuverlässige, aber zugleich einfache und wenig kostenintensive *Qualitätssicherung* durchzuführen ist. Der Lamelliereffekt wirkt sich positiv aus, darf aber nicht überschätzt werden. Aufgrund der Untersuchungen von *Peterson/Noziska* [17] und von *Larsen* [18] dürfte dadurch ein Ausgleich – durch Anhebung der Tiefstwerte der Einzellamelle um bis zu 40% – erreicht werden. Betrachtet man nun aber die an gezinkten Einzellamellen festgestellten Streuungen (Bild 19), so kann daraus jedoch kaum eine angemessene Sicherung abgeleitet werden.

Die Erfahrung lehrt zudem, dass gerade wegen der schwierigen nachträglichen Feststellung der Verleimungsqualität (nur über zerstörende Proben) einem *dauernd kontrollierten Fertigungsablauf* höchste Bedeutung zukommt. Die meisten Leimbaubetriebe haben dies inzwischen auch erkannt und durch interne, stichprobenartige Prüfungen eine laufende Kontrolle der Produktion erreicht.

Einsatzmöglichkeiten von brettschichtverleimten Harthölzern

Ein Blick auf Bild 18 dürfte auf den seit der «Erfindung» *Hetzers* eingetretenen Fortschritt – zumindest im Hinblick auf die Festigkeitseigenschaften – *ernüchternd* wirken. Die neuen Produktionstechniken, die Keilzinkung, die

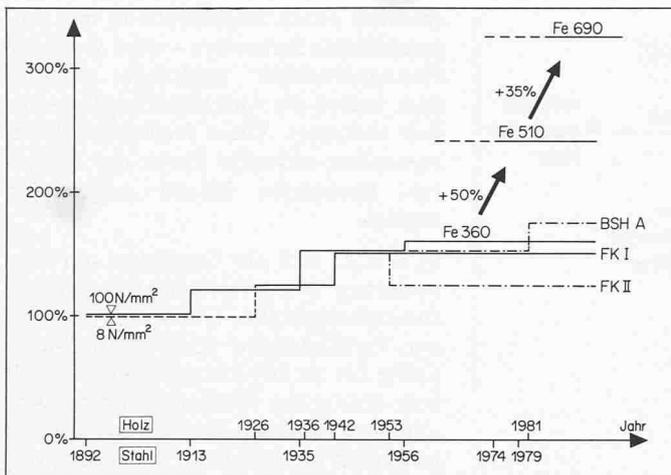


Bild 20. Zulässige Spannung von Biegeträgern aus Stahl und Holz gemäss schweizerischen Normen (Jahreszahlen bedeuten Inkraftsetzung Norm)

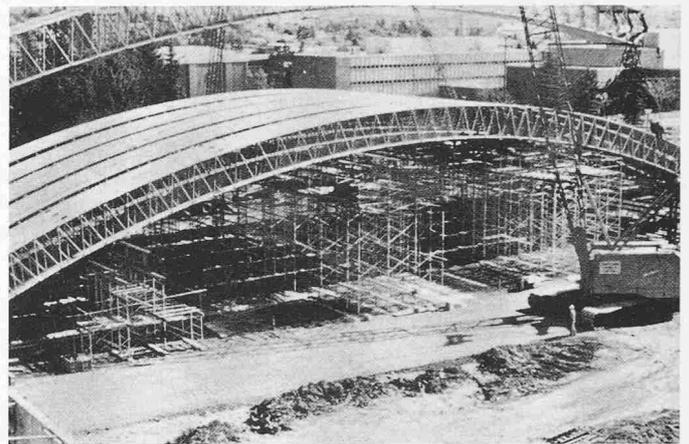


Bild 22. 122 m weit gespannter Bogen mit oberer und unterer Schale aus Furnierschichtholz (1975 in Moscow, Idaho, USA, erstellt)

Kunsthharzleime, die technische Trocknung usw. haben produktionstechnische und wirtschaftliche Vorteile gebracht, jedoch beschränkt im Endeffekt die Qualität der eingesetzten Holzlamellen die Festigkeit des Endproduktes, Qualität, die seitens des Rohproduktes im Laufe der letzten 70 Jahre kaum eine positive Änderung erfahren hat. Im Gegenteil führt der steigende Bedarf zu einer Verarbeitung vom Ausgangsmaterial mit ungünstigeren Eigenschaften.

Ein Vergleich mit anderen Bauweisen, z. B. mit der Stahlbauweise, zeigt, dass hier gezielt Baustoffe mit höheren Eigenschaften entwickelt werden. Die heutige Stellung der Stahlbauweise wäre ohne diese – wenn auch mengenmässig geringer Anteil – hochfesten Stahlsorten undenkbar. Bild 20 zeigt uns – anhand der zulässigen Spannungen in den schweizerischen Normen – die Entwicklung im Stahlbau und im Holzbau.

Verbesserungen der Eigenschaften des Brettschichtholzes wurden u. a. durch folgende Massnahmen versucht:

- Verwendung von Zuglamellen mit ausgewählt hohen Festigkeitseigenschaften. Durch den Einsatz von Holzlamellen höherer Dichte und grösserer Astreinheit weisen derartige Träger höhere Biegebruchfestigkeiten und in geringerem Masse auch grössere Biegesteifigkeiten auf; zudem liegen geringere Streuungen der Eigenschaften vor. Diese Massnahme wird vor allem in den USA praktiziert.
- Einsatz dünnerer Lamellen auf der Zugseite: Die auf der Zugseite liegenden äusseren Lamellen werden z. B. aus nur halb so dicken Lamellen gefertigt. Bruchmechanische Überlegungen weisen auf eine Verbesserung der Biegebruchfestigkeit hin. Diese Massnahme wird z. T. in den USA

angewendet, falls ungenügendes Angebot an hochwertigen Zuglamellen vorliegt.

- *Verwendungen von Furnierschichtholzlamellen als Zuglamellen:* Versuche zeigen, dass durch eine derartige Massnahme die Streuung der Biegebruchfestigkeiten verringert und dadurch der Mindestwert angehoben wird. Aus produktionstechnischen Gründen wurde diese interessante Massnahme noch nicht praktisch eingesetzt (Zukauf und Lagerhaltung von entsprechendem Material).
- *Verwendung von Stahlarmierung:* Durch das Einlegen (Einkleben) von Längsarmierungen kann der gleiche Effekt – Verringerung der Streuungen – erreicht werden. Zudem kann von der höheren Festigkeit des Verbundquerschnittes Nutzen gezogen werden. Bisherige Untersuchungen beschränken sich auf unter Laborbedingungen hergestellte Träger.

Den ersten drei Massnahmen kommt somit *praktische Bedeutung* zu; sie lassen sich zudem in den normalen Fabrikationsablauf integrieren.

Einen weiteren Schritt zur Verbesserung der Eigenschaften von Brettschichtholz stellt der Einsatz von *Holzarten höherer Festigkeit* dar, d. h. die Verwendung von Laubholzarten wie *Buche, Esche* usw. an Stelle des traditionellen Nadelholzes. Damit lassen sich – bei gleichen Querschnittsabmessungen – rund 50% höhere Tragwiderstände erreichen [21].

Damit steht aber dem Holzbau ein Baustoff hoher Festigkeit – in Analogie zum Stahlbau entsprechend dem Fe 510 – zur Verfügung. Entscheidend ist dabei nicht allein diese Festigkeitssteigerung, sondern dass bei gleicher Ausbildung der *Wirkungsgrad mechanischer Verbindungen* sogar stärker ansteigt. Dadurch lassen sich kompaktere Anschlüsse ausführen.

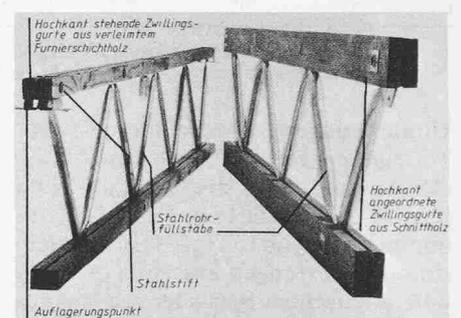


Bild 21. Truss Joist mit Gurtungen aus Furnierschichtholz

Furnierschichtholz

Furniersperrholz und Furnierschichtholz

Beide Holzwerkstoffe sind über 50 Jahre bekannt. Besonders im Zusammenhang mit dem *Holzflugzeugbau* wurden diese Werkstoffe intensiv erforscht, wobei hier die bezüglich Gewicht hohe Leistungsfähigkeit dieser Werkstoffe im Vordergrund stand.

Das plattenförmige Sperrholz wurde in der Zwischenzeit in vielen Anwendungsbereichen durch *Spanplatten* verdrängt. Nur in besonderen Fällen – wie hohe mechanische Festigkeit, Wasserbeständigkeit usw. – kommt Sperrholz noch zum Zuge. Eine für Bauzwecke interessante Alternative ist die industrielle Fertigung von Furnierschichtholz.

Ausgangsmaterial ist auch hier das Schäl furnier. Dabei werden grössere Furnierdicken angestrebt, um die Zahl der Leimfugen und somit auch den Leimverbrauch klein zu halten. Durch dieses Verfahren erhofft man sich zudem eine höhere Ausnutzung und bessere Verwertung des Rohstoffes Holz zu hochwertigeren Produkten [22, 23, 24].

Furnierschichtholz aus Nadelholzarten

In den USA wird Furnierschichtholz seit mehreren Jahren in bedeutendem

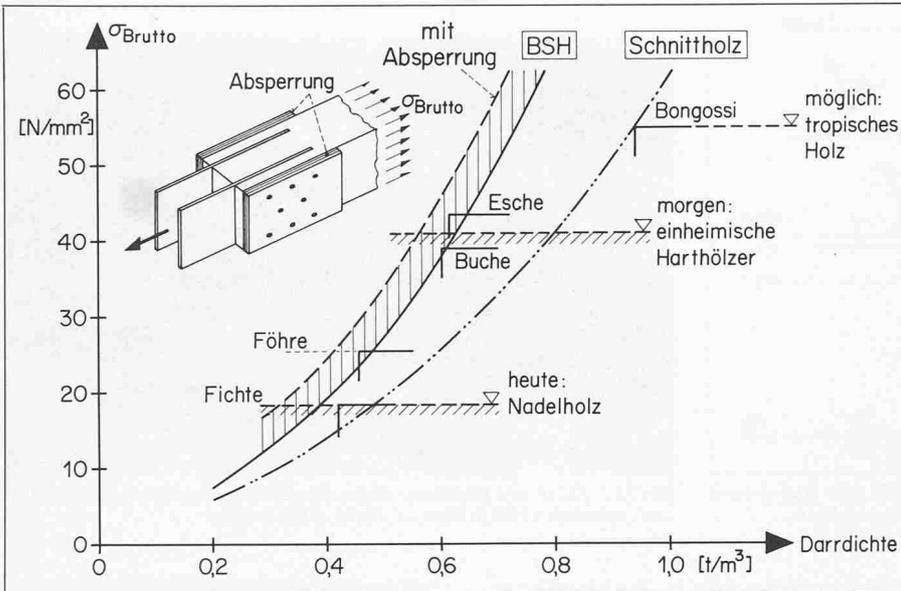


Bild 23. Überproportionale Steigerung der Tragfähigkeit von Zuganschlüssen mit zunehmender Dichte des Holzes; Spannungswerte bezogen auf Bruttoquerschnitte

Umfang eingesetzt, wobei hierfür *Nadelholz* furniere verarbeitet werden. Mögliche Anwendungen sind in Bild 21 und Bild 22 dargestellt (aus *Stern* [25] entnommen). Beim «Truss Joist»-System sind die Gurtungen aus Holz (Schnittholz, Brettschichtholz oder wie hier aus Furnierschichtholz) und die Diagonalen aus dünnwandigen Stahlrohren.

Furnierschichtholz aus Harthölzern

Furnierschichtholz aus *Buche* wurde bereits um 1930 hergestellt. Technisch bestehen heute keine Hindernisse, um hochwertiges Furnierschichtholz ausgehend von Harthölzern herzustellen.

Verbindungstechniken hoher Leistungsfähigkeit

Bedeutung hoher Leistungsfähigkeit

Gewünscht wird eine möglichst ungeschmälerete Nutzung der Holzeigenschaften; entscheidend ist somit, dass die durch die Verbindungsart erzeugte Schwächung (infolge Querschnittsverminderung und Kerbwirkung) gering ausfällt. Eine ungeschmälerete Nutzung des Querschnittes ist grundsätzlich *nur durch eine Verleimung*, d. h. durch eine Schäftung bzw. Keilzinkung möglich. Der Einsatz dieser Verbindungsart ist jedoch auf Werkstattarbeiten beschränkt.

Die Leistungsfähigkeit bzw. der Wirkungsgrad einer *Verbindung* kann ausgedrückt werden als das Verhältnis der Anschlusskraft zum Tragwiderstand des Bruttoquerschnittes des anzuschliessenden Stabes. Für die üblichen Verbindungsarten ergeben sich für *Kraftrichtung parallel zur Faser* folgende Wirkungsgrade:

- Leimverbindung: $\eta \approx 0,8$ bis 1
- Bolzenverbindung: $\eta \approx 0,5$ bis 0,65
- Ringübelverbindung: $\eta \approx 0,3$ bis 0,4

Da im Holzbau der *konstante Stabquerschnitt* üblich ist – eine örtliche Verstärkung mittels aufgeleimter Sperrholzplatten erfolgt nur ausnahmsweise –, bedeutet ein geringer Wirkungsgrad des Anschlusses, dass der restliche Teil des Stabes wesentlich überdimensioniert, d. h. überaus schlecht genutzt ist.

Situation bei den mechanischen Verbindungen

Bei *Knotenverbindungen* sind die Verhältnisse meist noch ungünstiger, da die Stababmessungen durch die für das Verbindungsmittel erforderliche Anschlussfläche diktiert werden.

Selbst für die Gelenkbolzen-Verbindung (Bild 25), die bei hoch beanspruchten Stabanschlüssen Verwendung findet, stellt man in der Praxis geringe Wirkungsgrade fest. Für den auf Zug angeschlossenen Stab 180/260 in Bild 27 beträgt der Wirkungsgrad nur rund 0,3, beim Druckstab liegt dieser (selbst unter Beachtung des Knickfaktors) noch bei rund 0,5.

Eine *Steigerung des Wirkungsgrades* und somit eine effizientere Nutzung des Holzes ist möglich:

- durch Weiterentwicklung geeigneter Verbindungsarten
- durch effiziente statische Ausbildung und entsprechende konstruktive Gestaltung

Stahl/Holz-Verbindung mittels Passbolzen hoher Festigkeit

Höchste Wirkungsgrade lassen sich mit *Bolzenverbindungen* erreichen. Bei mehrschnittigen Verbindungen – er-

reichbar durch Stahlbleche in den eingeschlitzten Stabenden – wird wohl der Nettoquerschnitt zusätzlich vermindert, jedoch die Anschlusslänge wesentlich reduziert. Diese Reduktion kann zumindest teilweise durch die dünneren, hochfesten Bolzen aufgewogen werden.

In Bild 23 sind die *Ergebnisse von Zugversuchen* an derartigen Anschlüssen zusammengestellt. Die bisher geprüften Verbindungen wiesen Anschlusskräfte bis zu 800 kN auf. Beim Nadelholz betrug der Wirkungsgrad des Anschlusses rund 0,6. Aus der Darstellung ist zudem die mögliche Steigerung mit Brettschichtholz aus Buche oder Esche ersichtlich. Eine weitere Steigerung – allerdings geringfügiger – ist mit tropischen Harthölzern möglich. Wegen der Drehwüchsigkeit dieser Hölzer (Schnittholz) ergeben sich hier allerdings grössere Streuungen.

Eine zusätzliche Steigerung ist durch eine *Abspernung der Stabenden*, z. B. durch Aufleimen von Sperrholz, möglich (gerasteter Bereich in Bild 23).

Heutiger Entwicklungsstand und zukünftige Möglichkeiten

Materialtechnik

Die Bemühungen um eine den schweizerischen Gegebenheiten angepasste *Festigkeitssortierung des Schnittholzes* haben ihren Niederschlag in der Norm SIA 164 «Holzbau» gefunden. Die Handhabung der dort festgelegten visuellen Sortierkriterien bereitet allerdings Mühe und stösst sowohl beim Säger (als zu wissenschaftlich und zu aufwendig) als auch beim Ingenieur (als zu unzuverlässig) auf Widerstand. Mechanische Sortiermethoden – wie z. T. im Ausland erfolgreich eingesetzt – konnten sich in der Schweiz bisher nicht durchsetzen. Gründe hierfür sind einerseits die bedeutend kleinere Betriebsgrösse der einheimischen Sägereien und andererseits die traditionelle Verwendung grösserer Kantholzquerschnitte, die sich nur mit höherem Aufwand mechanisch sortieren lassen.

Die Unzuverlässigkeit des auf den Markt gelangenden Schnittholzes sowie die Notwendigkeit des Einbaus massgerechten, trockenen Bauholzes führten zu einem vermehrten Einsatz von Holzwerkstoffen, wobei für Ingenieurbauten heute das *Brettschichtholz aus Fichte* im Vordergrund steht. Der heutige Qualitätsstandard ist jedoch z. T. noch unbefriedigend, könnte jedoch durch eine intensivere Zusammenarbeit zwischen Leimbaubetrieben und Materialwissenschaft *rasch behoben* werden.

Zukünftige Möglichkeiten liegen beim Brettschichtholz durch einen differenzierten Einsatz der verschiedenen Nadelholzarten und insbesondere durch den Einbezug von Laubhölzern hoher Festigkeit. Neben homogen aufgebauten Querschnitten kommt bei Biegeträgern den *hybriden Querschnitten* vermehrte Bedeutung zu. In Bild 24 sind die Ergebnisse einer Versuchsserie von Trägern mit Querschnitt 120/500 mm zusammengestellt. Dank der Verwendung von Lamellen höherer Zugfestigkeit (hier aus Buche) konnte die ersichtliche Steigerung erzielt werden. Der Bruch ging auch hier ausgehend von der Keilzinkung aus.

Eine weitere Steigerung ist hier somit durch den Einsatz von *kontinuierlich* (d. h. ohne Keilzinkenstöße) hergestellten Furnierschichtholzlamellen möglich. Dank der industriellen Fertigung weisen diese Lamellen zudem wesentlich geringere Festigkeitsstreuungen auf. In naher Zukunft dürfte auch ein vermehrter Einsatz *imprägnierten Holzes* möglich werden, sei dies durch die Verwendung leichter imprägnierbarer Holzarten (wie z. B. der Buche) oder durch die Verwendung dünnerer Lamellen (z. B. auch nur von Furnieren).

Entscheidend für einen zukünftigen, ingenieurmässigen Einsatz von Holz wird die *Zuverlässigkeit des Baustoffes* bleiben, d. h. die sichere Gewährleistung von Mindesteigenschaften. Erhöhte Wirtschaftlichkeit der Holzbauteile kann zudem durch eine differenziertere Nutzung der holzartenspezifischen Eigenschaften, d. h. durch eine Abkehr von der heutigen Ausrichtung auf die Fichte, erreicht werden. Hiefür sind die entsprechenden Grundlagen zu erarbeiten.

Verbindungstechnik

Bei Fachwerkssystemen mit hohen Stabkräften (Anschlusskräfte von 200 bis 500 kN) stand bisher die *Gelenkbolzen-Verbindung* im Vordergrund (Bild 25). Sie stellt heute eine erprobte, aber auch aufwendige Ausbildungsart dar. Auf diese Weise werden die Anschlussmomente möglichst ausgeschaltet. Da Gurtungen und Ausfachungsstäbe nicht in der gleichen Ebene angeordnet werden können, sind allerdings doppelte Gurtungen erforderlich. Zudem muss die Zugdiagonale über seitliche Stahllaschen angeschlossen werden.

Der gesamte *Kräfteausgleich* hat über den massiven Gelenkbolzen zu erfolgen. Wegen der örtlich konzentrierten Krafteinleitung muss die Kraft über aufgenagelte Stahlbleche über einen grösseren Bereich verteilt werden. Bedingt durch die exzentrische Ausbildung bezüglich der Tragebene erfolgt

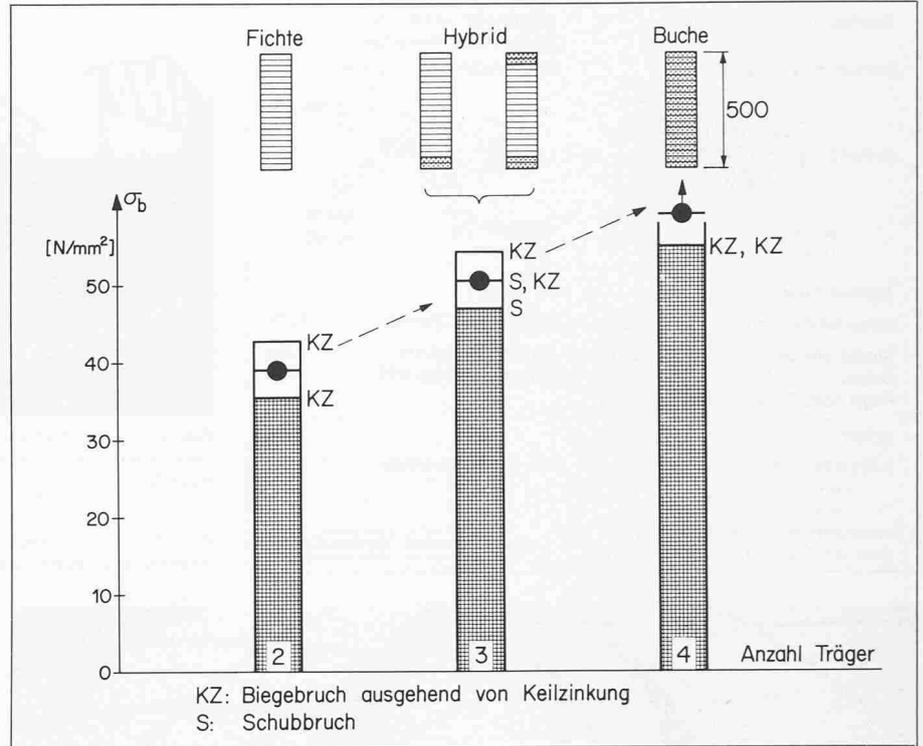


Bild 24. Steigerung der Tragfähigkeit durch Verwendung von Lamellen höherer Tragfähigkeit (insbesondere in den gezogenen Aussenbereichen); KZ bedeutet Bruch ausgehend von Keilzinkung, S bedeutet Schubbruch (hier im Fichtenteil)

zudem die Krafteinleitung in die Gurte nur einseitig.

Die Idee gelenkiger Anschlüsse in den Holzfachwerken tauchte in den 20er Jahren auf, da bei einigen Fachwerkknoten mit biegesteifen Anschlüssen – allerdings ohne Verwendung von Stahlknotenblechen – Schäden auftraten. Dies führte zur Entwicklung «gelenkiger» Knoten mit Volldübel, Ringdübel usw. mit dem Effekt, dass daraus eine *wesentliche Exzentrizität des Anschlusses* bezüglich der Tragebene resultierte.

Heute wissen wir, dass die früher aufgetretenen Schäden weniger mit der Biegesteifigkeit des Anschlusses zu tun hatten, sondern aus der fehlenden *Stabzentrierung* herrührten (Bild 26). Durch die Verwendung von *Stahlknotenplatten*, die in die eingeschlitzten Hölzer eingelassen werden, liegen Gurtung und Ausfachungsstäbe in einer Ebene. Der Kräfteausgleich erfolgt hier im Knotenblech; die Krafteinleitung ins Holz erfolgt primär parallel zur Faserrichtung. Die auftretenden Einspannmomente führen wohl zu einer geringen Verminderung der Anschlusskräfte, die je nach Stabschlankheit im Bereich von 10 bis 20% liegt [10, 26], können aber die Wirtschaftlichkeit dieser Knotenausbildung kaum beeinträchtigen. Kombiniert man diese Verbindungstechnik noch mit einer *Buchenholzausführung*, so werden die Vorteile noch offensichtlicher.

In Bild 27 sind an einem Knotenpunkt eines Fachwerkträgers von 42 m Spann-

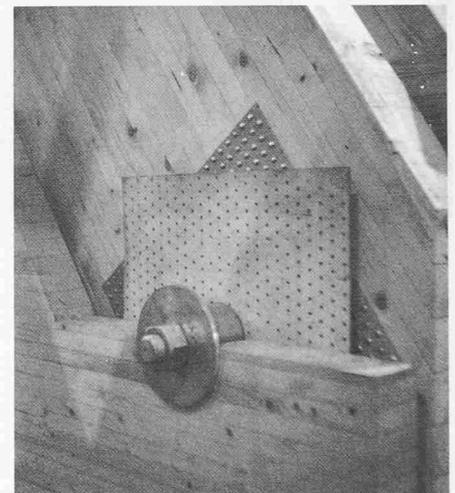
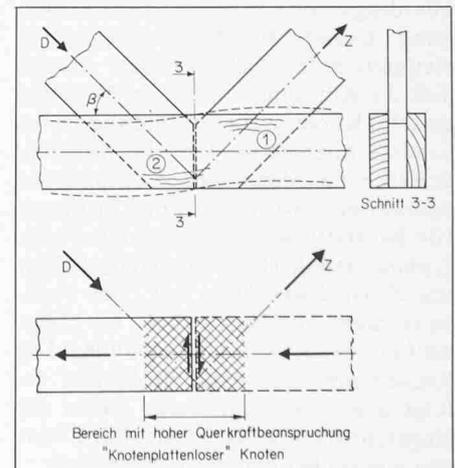


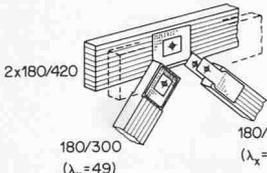
Bild 25. Aufgeschnittene Gelenkbolzen-Verbindung

Bild 26. Fehlende Stabzentrierung und «knotenplattenlose» Knotenausbildung ergeben grössere querkräftbeanspruchte Bereiche in den Gurtungen



Gelenkbolzen - Verbindung

Brettschichtholz aus Fichte



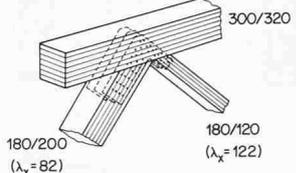
2x180/420

180/300 ($\lambda_x=49$)

180/260 ($\lambda_x=56$)

Biegesteifer Knoten mit Stahl - Holz - Passbolzen

Brettschichtholz aus Buche



300/320

180/120 ($\lambda_x=122$)

180/200 ($\lambda_x=82$)

Materialaufwand ¹⁾

Holzvolumen (Fichte)	100%	Holzvolumen (Buche)	63%
Stahlbleche gelocht	42 kg	Stahlbleche gelocht	20 kg
Bolzen	12 kg	Bolzen (45 Stück Ø8)	10 kg
Nägel (520 Stück Ø6/80)	10 kg		

Arbeit

520 Löcher vorbohren	45 Löcher vorbohren
-----	-----
-----	-----

¹⁾ Holzvolumen auf ganzen Träger bezogen, Stahl und Arbeit auf einen Knoten bezogen

➔ preiswertere Verbindung



Bild 28 (oben). Prototypbau eines als Zweigelenkrahmen ausgebildeten Fachwerkbinders; Fachwerkträger mit Stäben aus Buchenbrettschichtholz; Knoten biegesteif

Bild 27 (links). Vergleich einer Gelenkbolzen-Verbindung an Fichtenholz mit einer biegesteifen Knotenausbildung an Buchenholz



Bild 29. Halle in Tacoma (USA) mit rund 160 m Durchmesser. Bauzustand: Netzschale mit Beginn der Dacheindeckung

weite und 3 m statischer Höhe [27] die zwei Verbindungsarten exemplarisch gegenübergestellt. Voraussetzung für den Einsatz biegesteifer Knotenverbindungen ist selbstverständlich eine adäquate Stabschlankheit; dadurch lässt sich der Einfluss des Einspannmomenten eingrenzen.

Selbstverständlich könnte die Gelenkbolzen-Verbindung auch mit *Buchenholz* kombiniert werden; wegen der *zweiteiligen Druckgurtungen* ergibt sich allerdings eine schlechtere Holzausnutzung. Gerade für hochbeanspruchte, weitgespannte Fachwerkträger erweist sich die Kombination Buchenholz/biegesteife Knotenpunktausbildung als besonders interessant. Um die Möglichkeiten einer derartigen Kombination aufzuzeigen, wurde von der Professur für Baustatik und Stahlbau ein *Prototypbau* erstellt (Bild 28). Statisch liegt ein *Zweigelenkrahmen* vor. Der Fachwerkträger aus Buchenholz ist biegesteif mit der Stahlstütze verbunden. Die Knotenverbindung der Holzstäbe erfolgt über 2 Knotenbleche, die in die eingeschlitzten Hölzer eingeführt werden, sowie über hochfeste Passbolzen.

Aufgebaut auf diesem System wurden schon verschiedene *grössere Fachwerkbauten* mit Brettschichtholzstäben aus Fichte errichtet. Bei Verwendung von Hartholz sind wir heute in der Lage, Diagonalstäbe mit Bruchlasten bis zu 1200 kN anzuschliessen. Wege zur rationalen Fertigung sind bereits erkundet, so dass in Zukunft auch für grosse Spannweiten ansprechende, schlanke Fachwerkträger machbar werden.

Tragsysteme

Hier steht vor allem der *materialgerechte Einsatz des Holzes* im Vordergrund. Dabei sind auch gemischte Tragsysteme (Einbezug anderer Baustoffe) zu betrachten. Ein typisches Beispiel für die Mischbauweise stellen die in Bild 21 dargestellten Fachwerkträger dar. Die Gurtungen sind hier aus Holz (Schnittholz, Brettschichtholz oder Furnierschichtholz) und die Diagonalen aus dünnwandigem Stahlrohr. Dieses in den USA als «Truss Joist» bezeichnete System eignet sich, wie in Bild 24 gezeigt wurde, auch für grösste Spannweiten.

Räumliche Lastabtragung ermöglicht die rationelle Überspannung *grosser Flächen*. Mit den nach dem «Ensphere Concept» erstellten Netzschalen wurden bereits kreisförmige Flächen mit über 150 m Durchmesser überspannt (Bild 29). Grössere Weiten (über 200 m) dürften demnächst folgen (vgl. *Rossman* [28]). Durch die Verwendung biegesteifer Anschlüsse der Brettschichtträger an die stählernen Knotenpunkte ergaben sich ausserordentlich kleine Trägerquerschnitte.

Die aufgezeigte Entwicklung leistungsfähiger Stabanschlüsse, insbesondere von Stahl/Holz-Verbindungen in Kombination mit Harthölzern, ermöglicht nun auch die Ausführung *echter Raumfachwerke*. In Bild 30 ist der Prototyp eines derartigen Raumfachwerkes in der grossen Versuchshalle der ETH Höngerberg erkennbar. Auch hier liegt eine *Kombination Stahl/Holz* vor. Der Kraftausgleich bzw. die Kraftumlenkung erfolgt hier ebenfalls im Stahlknoten. Die Stahl/Holz-Anschlüsse werden fast ausschliesslich durch Normkräfte (Zug oder Druck) beansprucht, wobei die Krafteinleitung optimal parallel zur Faser erfolgt. Bild 31 zeigt einen derartigen Knoten im Detail. Mit derartigen Raumfachwerkplatten lassen sich grössere Flächen stützenfrei überdachen.

Ausführung

Eine Bedingung für die rationelle Ausführung von Holzbauwerken liegt in der *häufigen Wiederholung des Bauteils*. Voraussetzung hierfür ist somit eine Typisierung. Diese braucht dabei nicht bis zum fertigen Bauteil zu gehen, sondern kann sich z. B. auf häufig vorkommende Anschlüsse in Verbindung mit ausgewählten Querschnittsabmessungen beschränken. Ein derart ge-

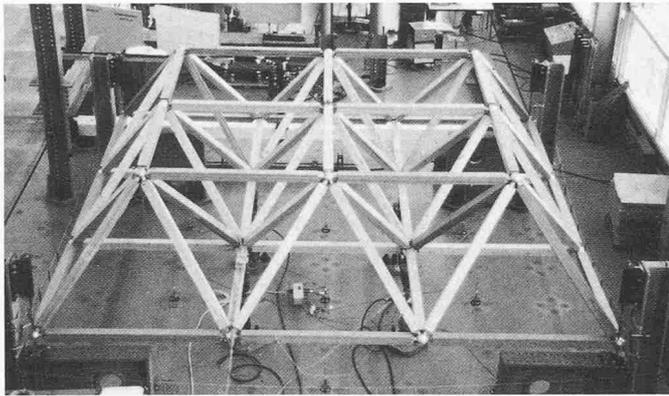


Bild 30. Raumfachwerk aufgebaut aus 2,4 m langen Stäben mit Querschnitt 120×120 mm; Tragkraft 1200 kN; hochbeanspruchte Stäbe in Buche

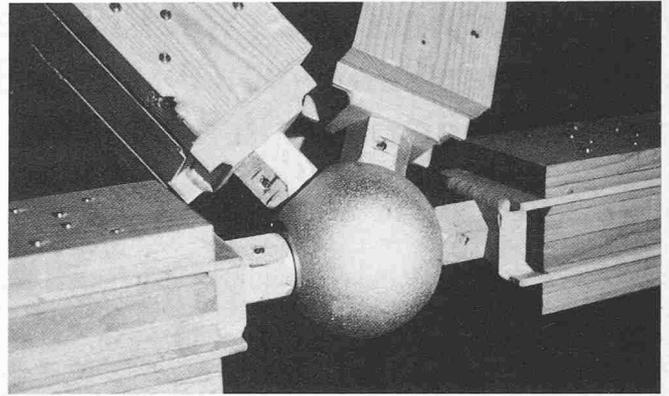


Bild 31. Knotenausbildung für den Prototypbau

normtes System ist in [9] und [26] beschrieben. Die Normung wirkt sich dabei auch positiv auf die Entwurfsarbeit aus. Jede Vereinheitlichung und Vereinfachung führt zu einer weniger fehleranfälligen Bemessung des Tragwerkes. Erfolgreiche Vorläufer für derartig genormte Bauteile und Tragwerke sind

bekannt; es sei hier nur nochmals an die *Howeschen* Träger amerikanischer Bauweise hingewiesen. Zur Ausführung gehört auch die *Gewährleistung der geforderten Güte*. Der Bauherr erwartet von seinem Bauwerk grosse Dauerhaftigkeit bei geringem Unterhalt; hiezu kann der Holzbaube-

trieb durch sorgfältige Arbeit einen Beitrag leisten. In weit grösserem Masse wird dies jedoch durch den Entwurf beeinflusst.

Schlussbemerkung

Wir haben feststellen müssen, dass erst eine *enge Zusammenarbeit* von Ingenieur und Handwerker, von Technologie und Unternehmer dauerhafte technische Entwicklungen ermöglicht. Das traditionsgebundene Zimmerhandwerk mit seinem Bestreben, möglichst reine Holzlösungen zu pflegen, führte in eine Sackgasse. Aber auch ingenieurmässig ausgebildete Tragwerke haben nicht das erfüllt, was ihre Erfinder zu leisten versprochen.

War es zu Zeiten *Grubenmanns* möglich, das vom Holzeinschlag bis zur Erstellung des Bauwerkes erforderliche Wissen und Können noch in einem Kopf zu vereinigen, so bedarf es heute mehrerer Fachleute. Dabei ist nicht so sehr die Summe des so angehäuften Fachwissens entscheidend, sondern die *Bereitschaft der Beteiligten, dieses Wissen für ein gemeinsames Ziel einzusetzen*.

Anstösse zur Weiterentwicklung des Holzbaus können und sollen aus allen Bereichen – Handwerk, Material- und Ingenieurwissenschaften – kommen. Dank der noch vorhandenen Zimmermannskunst und dem durch weniger Vorschriften als anderswo eingegengten, ingenieurmässigen Innovationsgeist besitzt die Schweiz weiterhin gute Voraussetzungen für ein Weiterbestehen des Holzes als Ingenieurbaustoff.

Ergänzte schriftliche Fassung des am 28. Januar 1983 an der ETH Zürich gehaltenen Vortrages im Rahmen der Tagung «Holzbau gestern und heute» anlässlich des 200. Todestages von Hans Ulrich Grubenmann.

Adresse des Verfassers: E. Gehri, dipl. Ing. ETH, Lehrstuhl für Baustatik und Stahlbau, ETH Hönggerberg, 8093 Zürich.

Literatur

- [1] Die Entwicklung des Grossbrückenbaus. ETH Zürich 1979.
- [2] James, J.G.: «The evolution of wooden bridge trusses to 1850». Journal of the Institute of Wood Science 1982, Vol. 9.
- [3] Culmann, K.: «Der Bau der hölzernen Brücken in den Vereinigten Staaten von Nordamerika». Allgemeine Bauzeitung 1851.
- [4] Bauernfeind, C.M.: «Vorlegeblätter zur Brückenbaukunde». München 1853.
- [5] Wiebeking, C.F.: «Beyträge zur Brückenbaukunde». München 1809.
- [6] Booth, L.G.: «Laminated timber arch railway bridges in England and Scotland». Trans. Newcomen Soc., 44 (1971) S. 1–23.
- [7] Ritter, W.: «Der Brückenbau in den Vereinigten Staaten Amerikas». Hallersche Buchdruckerei Bern 1894.
- [8] Tryzna, F.: «Über die Formänderungen hölzerner Tragwerke». Mitt. d. Fachausschusses für Holzfragen beim VDI und Deutschen Forstverein, Nr. 30, 1941, S. 13–17.
- [9] Entwurf und Bemessung von Schnittholzkonstruktionen mit neuzeitlichen Verbindungen. Fortbildungskurs der SAH, 1979, Weinfelden.
- [10] Gehri, E.: «Fachwerkträger aus Buche und Fichte mit Stahlknotenplatten in eingeschlitzten Hölzern». Baustatik und Stahlbau, ETH Zürich, 1982.
- [11] Heizer, O.: «Gebogener Holz-Bauteil für vereinigte Dach-Pfosten und -Sparren». Kaiserliches Patentamt. Patentschrift Nr. 197773. 22. Juni 1906.
- [12] Böhm, T.: «Handbuch der Holzkonstruktionen». Springer Berlin 1911.
- [13] Emy, A.R.: «Lehrbuch der gesamten Zimmerkunst». Deutsche Übersetzung von L. Hoffmann. Leipzig 1848.
- [14] Seitz, H.: «Grundlagen des Ingenieurholzbau». Springer Berlin 1925.
- [15] Kolb, H.: «Versuche mit verleimten Holzbauteilen». Holz als Roh- und Werkstoff, 1974, S. 257–262.
- [16] Frech: «Prüfung grosser Träger aus Brett-schichtholz». Bauen mit Holz 1976, H. 12, S. 590.
- [17] Peterson, J./Noziska, D.: «The tensile strength of laminated members». Forest Products Journal, 1973, Nov., p. 50–51.
- [18] Larsen, H.J.: «Strength of glued laminated beams». Part 5. Institute of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg, Danmark 1982.
- [19] Larsen, H.J.: «Bøjnings- og traekstyrke af fingerskarringer». Institute of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg, Danmark, Rapport Nr. 790 1979.
- [20] Heimeshoff, B./Glos, P.: «Zugfestigkeit und Biege-E-Modul von Fichten-Brett-lamellen». Holz als Roh- und Werkstoff 1980, S. 51–59.
- [21] Gehri, E.: «Möglichkeiten des Einsatzes von Buchenholz für Tragkonstruktionen». Schweiz. Bauwirtschaft, 1980, H. 56, S. 14.
- [22] FPL Press-Lam Research Team: «FPL press-lam process: Fast, efficient, conversion of logs into structural products». For. Prod. Journal, Nov. 1972, S. 11–18.
- [23] Schafter, E.L./u.a.: «Press-Lam-Progress in technical development of laminated veneer structural products». USDA, For. Serv. Res. Pap. FPL 279, 1977.
- [24] Harpole, G.B./Aubry, L.W.: «Economic feasibility of process for high-yield laminated structural products». USDA, For. Serv. Res. Pap. FPL 285, 1977.
- [25] Stern, E.G.: «Stahl/Holz-Verbundbauweise». Ingenieurholzbau in Forschung und Praxis – Karl Möhler gewidmet. Bruderverlag Karlsruhe 1982.
- [26] Gehri, E.: «Zur Berechnung und Bemessung von Fachwerkträgern mit Knotenplatten in eingeschlitzten Hölzern». Schw. Ing. und Architekt, 1983, H. 6, S. 145.
- [27] EGH-Bericht-Konstruktionsbeispiele/Berechnungsverfahren, Teil 4.
- [28] Rossman, W.E.: «Holzschalen grosser Spannweite – das Ensphere System». Vortrag gehalten am 3. März 1983 an der ETH Zürich.
- [29] Ghega, C.: «Über nordamerikanischen Brückenbau und Berechnung des Tragvermögens der Howeschen Brücken». Kaulfuss Witwe, Prandel & Companie, Wien 1845.
- [30] Brunner, J.: «Der Bau von Brücken aus Holz in der Schweiz». Beilage zum Diskussionsbericht Nr. 5 der EMPA «SIA-Normen für Holzbauten», Eidg. Materialprüfungsanstalt an der ETH Zürich, 1925.
- [31] Kühne, H.: «70 Jahre geleimte Holztragwerke in der Schweiz». Schweizer Ingenieur und Architekt, 1979, Heft 32 und 33.