Zeitschrift: IABSE congress report = Rapport du congrès AIPC = IVBH Kongressbericht

Band: 11 (1980)

Artikel: Baustoff Holz: Erkenntnisse und Entwicklungen im technologischen Bereich und in den Verbindungen

Autor: Gehri, E.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-11189

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 15.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

IIb

Baustoff Holz – Erkenntnisse und Entwicklungen im technologischen Bereich und in den Verbindungen

Timber Technology and Assembling – Present State of Knowledge and Future Developments

Bois et assemblages – Etat actuel des connaissances et développements futurs

E. GEHRI
Dipl.-Ing.
Eidgenössische Technische Hochschule
Zürich, Schweiz

ZUSAMMENFASSUNG
Die im Vergleich zu anderen Baustoffen hohe Leistungsfähigkeit des Holzes für tragende Elemente wird aufgezeigt. Die Vielfalt von Holzarten und Holzwerkstoffen erschwert eine systematische Darstellung der Einsatzmöglichkeiten. Auf Lücken in den technologischen Erkenntnissen wird hingewiesen. Zudem werden die wichtigsten Kriterien für die Entwicklung leistungsfähiger Verbindungsarten zusammengestellt.

SUMMARY
The article shows that timber has, compared with other structural materials, a high efficiency. The great variety of wood species and of wood derivates impedes a systematic review of their possibilities and application. The report points out unsolved problems of our technological knowledge and draws up the main criteria for the development of connections with high efficiency.

RESUME
L'article montre la haute efficacité du bois pour des éléments porteurs. La grande variété des essences et des dérivés en bois rend difficile une représentation systématique des possibilités d'emploi. Le rapport indique les lacunes dans les connaissances technologiques actuelles et énonce les critères principaux pour le développement de moyens d'assemblage efficaces.

1. BEDEUTUNG DER HOLZTECHNOLOGIE

1.1 Rohstoff Holz

Holz zählt zu den ältesten Baustoffen, deren sich die Menschheit bediente. Während auf allen Baustoffsektoren mit viel technischem und finanziellem Aufwand eine Verbreiterung des Angebotes hinsichtlich Baustoffeigenschaften angestrebt wurde, z. B. beim Stahl durch die laufende Entwicklung neuer Stähle, sei es mit hohen Festigkeitseigenschaften oder mit besonderen korrosionsträgen Eigenschaften wie die wetterfesten Stähle, besitzt der Holzbauer von Natur aus eine erstaunlich breite Palette von Holzarten mit ganz unterschiedlichen Eigenschaften hinsichtlich Dichte, Festigkeit, Dauerhaftigkeit usw. Allerdings wird immer noch erst eine erschreckend kleine Anzahl von Holzarten bautechnisch genutzt, dafür einige Holzarten besonders forciert, was aus ökologischen Gründen unerwünscht ist. Hier wird artenreicher Mischwald den Monokulturen vorgezogen.

Wie gross die Spanne zwischen den einzelnen Holzarten ist, zeigen die nachfolgenden Zahlen (Tabelle 1):

Holzart	Darrdichte [kg/m^3]	$E_{d\parallel}$ [kN/mm^2] w≈15%	$\sigma_{d\parallel}$ [N/mm^2]
Balsa	130	2,6	8
Kiefer	460	11	45
Eiche	650	12	50
Pockholz	1230	13	105

Tabelle 1 Mittlere Werte für Druckfestigkeit und E-Modul

Aber auch innerhalb derselben Holzart sind starke Variationen möglich, z. B. für Fichte (picea excelsa) variiert die Darrdichte zwischen 0,26 und 0,62 g/cm^3. Bekanntlich besteht eine ausgeprägte Proportionalität zwischen Darrdichte und mechanischen Eigenschaften. Die starke Variation der Festigkeiten wird in der Regel als Nachteil betrachtet, da für die Bemessung untere gesicherte Werte eingesetzt werden müssen. Meines Erachtens ist es Aufgabe der Holzwirtschaft, durch geeignete Sortierungskriterien diese Eigenschaften positiv auszunützen.

Ein weiterer, wesentlicher Punkt ist die vollständige Verwertung der Holzmasse des gefällten Baumes. Heute ist dies technisch weitgehend möglich durch die Weiterverwertung von Schwarten und kleineren Durchmessern zu Span- und Faserplatten, aber auch hier ist ein Gleichgewicht in den verschiedenen Einsatzarten des Holzes erforderlich.

Erwünscht sind Untersuchungen über den Einsatz von für den Holzbau nichttraditionellen Holzarten, dies um eine vollständige Nutzung des natürlichen, artenreichen Waldes zu fördern.

1.2 Holzverarbeitung

Generell ist die geringste Zerlegung des gewachsenen Holzes anzustreben. Dadurch werden die guten, natürlichen Eigenschaften der Holzstruktur möglichst erhalten. Man erhält somit durch Sägeeinschnitt Kanthölzer. Für grössere Bauteile genügen die eingeschnittenen Abmessungen nicht mehr, so dass deren Zusammensetzung erforderlich wird. Sie kann mittels mechanischer Verbindungsmittel oder mittels Leimung erfolgen.

Die heutigen Verleimungstechniken für Brettschichtholz verlangen relativ geringe Lamellenstärken. Durch Sägeeinschnitt und Hobeln entstehen grosser Verarbeitungsaufwand und Verlust an unzerlegtem Holz (unabhängig von der allfälligen Weiterverwendung dieser Abfälle zum Beispiel für Spanplatten). Zudem sind die erforderlichen Anlagen raum- und kostenintensiv. Die grösseren Presszeiten verhindern eine grössere Produktivität. Die Entwicklung von Verfahren zur kostengünstigeren Herstellung von Brettschichtholz ist deshalb erwünscht. Anlagen mit kontinuierlicher Herstellung von verleimten Trägern stehen noch in den Anfängen. Der Schritt zur Produktion von Halbzeug (Schichtholz mit normierten Querschnitten und Längen) und dessen Lagerhaltung ist noch kaum durchgeführt. Eine Kombination von Mass- und Lagerherstellung wäre sinnvoll.

Die Herstellung von Span- und Faserplatten wurde von Anfang an industriell betrieben. Grosse, weitgehend automatisierte Anlagen stellen normierte Produkte (bezüglich Qualität und Abmessungen) her. Für die Verarbeitung von eigenen Abfällen in integrierten Betrieben können Kleinanlagen trotzdem interessant werden. Die Produktion kann sich auf Einzelprodukte mit spezifischen Abmessungen beschränken, die meist wieder in den Endprodukten Wiederverwendung finden. Vorteile können sein: eine vollständige Verwertung des Holzes, Wegfall von Lager- und Transportkosten für die Abfälle, so dass auch weniger wirtschaftlich arbeitende Kleinanlagen gesamthaft gesehen gerechtfertigt sind.

1.3 Verbindungstechnik

Die Verbindungstechnik hat einen entscheidenden Einfluss auf die Einsatzmöglichkeiten des Holzes. Die früheren Holzverbindungen verlangten eine handwerkliche Verarbeitung, die heute wirtschaftlich nicht mehr tragbar ist. Die zum Teil mehrhundertjährigen Holzbauten sind Zeugen für die Güte dieser handwerklichen Verbindungstechnik.

Wohl lassen sich einige traditionelle Holzverbindungen (Versatz, Verdübelung mit hölzernen Rechteckdübeln) mechanisieren, finden jedoch wegen des geringen Wirkungsgrades nur noch in untergeordneten Bauteilen Verwendung. Der heutige hohe Stand der Verbindungstechnik wurde ermöglicht durch die Leime, insbesondere durch die Kunstharzleime sowie die mechanischen Verbindungsmittel aus Stahl.

Für die optimale Verwertung der Holzerzeugung wirkt sich nachteilig aus, dass diese Verbindungstechniken weitgehend auf die Nadelhölzer - wie Fichte, Kiefer, Föhre, Douglasie - ausgerichtet wurden. Dadurch werden auch wieder diese Holzarten bevorzugt, da sie im Verbund mit dieser Verbindungstechnik zu erprobten und wirtschaftlichen Bauten führen.

Von Bedeutung ist deshalb die Erweiterung unserer Kenntnisse in Bezug auf geeignete Verbindungen für andere, bisher weniger gebräuchliche Holzarten. Veröffentlichungen von Ergebnissen auf diesem Gebiete sind deshalb besonders erwünscht. Dabei genügt es nicht, die Eignung auf Grund von labormässigen Prüfungen festzustellen; erst mit dem Vorliegen geeigneter industrieller Herstellungsprozesse ist dieses Ziel erreicht.

Ein derartiges Problem stellen zum Beispiel die Keilzinkenverbindungen dar. Bekannt seit rund 40 Jahren, sind erst im letzten Jahrzehnt bedeutende Fortschritte zu einer wirtschaftlicheren, industriellen Fertigung von Keilzinkenstössen für Brettlamellen gemacht worden. Diese Entwicklung orientiert sich jedoch einseitig auf die Eigenschaften der üblicherweise für Brettschichtholz verwendeten Nadelholzarten. Versuche mittels Buchenholzlamellen zeigten die Notwendigkeit, diese Technologie den spezifischen Erfordernissen dieser Holzart anzupassen, um auch hier eine wirtschaftliche Anwendung gewährleisten zu können.

Auf dem Gebiete der Verbindungstechnik sind besonders erwünscht neuere Entwicklungen:

- mit vielseitigem Anwendungsbereich, insbesondere auch für verschiedene Holzarten
- für einfache, sichere Anwendung, ohne besondere Anforderungen bezüglich Berechnung, Ausführung und Güte des Holzes
- die eine stärkere Automatisierung bzw. eine rationelle industrielle Fertigung ermöglichen.

1.4 Holzschutz

Ein allgemeiner, vollständiger Schutz ist trotz der hohen natürlichen Dauerhaftigkeit vieler Holzarten nicht möglich. Dies ist aber auch nicht für die anderen Baustoffe wie Stahl oder Beton der Fall. Als besonders resistent haben sich z. B. Bongossi, Quebracho, Teak und Eiche erwiesen, aber auch andere Holzarten können unter gewissen Bedingungen sehr hohe Lebensdauern erreichen. Entscheidend hierfür sind Art und Grad der Einwirkung. Schematisch ist dies in Tabelle 2 dargestellt.

Einwirkung	Auswirkung	Schutzmassnahmen
Pilze	Verfärbung	geeignete Holzarten konstruktive Massnahmen chemischer Holzschutz
	Zerstörung	
Insekten (Käfer, Termiten)		
Meerwasserschädlinge		
Hohe Temperaturen		
Witterung	Verfärbung Oberflächenzerstörung Dimensionsänderung	Oberflächenbehandlung Quellungsvergütung
Chemisch (Laugen, Säuren, Elektrolyte)	Verfärbung Zerstörung	geeignete Holzarten Beschichtung
Mechanisch	Zerstörung	geeignete Holzarten konstruktive Massnahmen

Tabelle 2 Schematischer Ueberblick über Einwirkungen und mögliche Schutzmassnahmen nach [1].

Weitgehend in den Händen des Konstrukteurs liegt die Wahl der geeigneten Holzart und insbesondere der konstruktive oder der bauliche Holzschutz. Dieser soll stets dem chemischen Holzschutz vorangehen. Wo erforderlich, ist eine Kombination anzustreben. Dabei sind mögliche Nebenwirkungen des chemischen Holzschutzes zu beachten.

2. HOLZ UND HOLZWERKSTOFFE

2.1 Bautechnische Eigenschaften des Schnittholzes

2.11 Generelles

Entsprechend den regional unterschiedlich eingesetzten Holzarten weisen diese stark voneinander abweichende bautechnische Eigenschaften auf. Jedoch allen gemeinsam ist die markante Anisotropie des Holzes, mit besonderer Orientierung längs zur Stammachse. Daraus ergeben sich auch ausserordentlich hohe mechanische Eigenschaften des Holzes in Richtung parallel zur Stammachse oder parallel zur Faser, wie aus Tabelle 3 ersichtlich:

	Kiefer fehlerfrei	Baustahl Fe 360	FE 510	Spannstahl	Alu-Lg.	Kiefer Bauholz
Zugfestigkeit N/mm^2	100	360	510	1400-1600	320-450	40
(Feucht-)Dichte t/m^3	0,5	7,85		7,85	2,7	0,5
Reisslänge km	20	4,7	6,6	18 - 20	12-16,5	8

Tabelle 3 Reisslängen verschiedener Baustoffe

Die Reisslängen des Holzes, ohne Strukturstörungen parallel zur Faser, liegen in der Grössenordnung der Spannstähle und höher als für hochfeste Aluminiumlegierungen.

Bedingt durch Strukturstörungen (Krümmungen, Schrägfaserigkeit, Drehwuchs, Aestigkeit usw.) liegen die für Bauholz nutzbaren Werte wesentlich tiefer, bezogen auf die Dichte immerhin noch höher als für Baustahl Fe 510.

Es liegt am Holzbauer, sich die ausgezeichneten Eigenschaften längs zur Faser nutzbar zu machen.

2.12 Charakteristische mechanische Eigenschaften

Die mechanischen Eigenschaften werden durch einen Satz von Werten wiedergegeben: $\sigma_{\parallel}$, $\sigma_{\perp}$, τ ; $E_{\parallel}$, $E_{\perp}$, G . Ausgehend von diesen Werten ist es möglich - mit baupraktischer Genauigkeit - die Eigenschaften in beliebiger Richtung zu beschreiben. Die häufigste, zweckmässigste und zugleich generellste Formulierung ist mit der sogenannten Hankinson-Formel gegeben. Eine vergleichende Untersuchung unter Einbezug neuerer, präziserer Ansätze zeigte, dass die Hankinson-Formel nebst genügender Genauigkeit noch andere wesentliche Vorzüge aufweist [2].

Man erhält demnach für beliebige Richtungen folgende, in Abbildung 1 dargestellte, Beziehung.

Zu den eigentlichen Strukturstörungen (können auch als Wuchsstörungen bezeichnet werden) treten noch Störungen infolge der Trocknung des Holzes. Die Trocknung führt sowohl zu Krümmungen und Verwerfungen als auch zu Eigenspannungszuständen. Werden die Schwindverformungen stark behindert, so führen die hohen Schwindspannungen zu Rissen, zu den sogenannten Schwindrissen. Diese treten normalerweise quer zur Faser durch Ueberwinden der Querzugfestigkeit des Holzes auf. Die Querzugfestigkeit grösserer Querschnitte ist deshalb stark herabgesetzt.

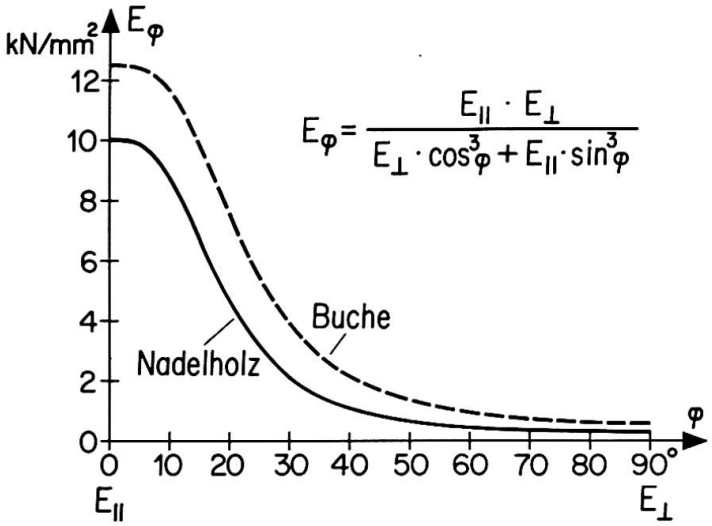


Abb. 1

Mechanische Eigenschaften in Abhängigkeit des Winkels $\varphi = \sphericalangle$ Kraftrichtung zur Faserrichtung

Durch besondere Trocknungsprozesse versucht man diese unerwünschten Folgen der Trocknung herabzusetzen. So können z.B. durch Dämpfen des Holzes vor dem Trocknen diese inneren Spannungen - und somit die Riss- und Verwerfungsanfälligkeit - vermindert werden [3].

2.13 Feuchteänderung

Holz als hygroskopischer Baustoff passt seinen Feuchtegehalt der Umgebungsfeuchtigkeit an. Diese Feuchteänderung führt zu Schwind- und Quellverformungen, die bei der konstruktiven Gestaltung beachtet werden müssen.

Kurzzeitige rasche Aenderungen führen zudem - wegen des langsamen Feuchteausgleiches - zu unterschiedlichem Feuchtegrad über dem Querschnitt. Um die daraus sich ergebenden inneren Spannungen zu vermindern, können hemmende Oberflächenanstriche vorteilhaft sein. Bessere Kenntnisse auf diesem Gebiet können Fehler, aber auch Vorurteile abbauen helfen.

In der Regel treten die Feuchteänderungen an belasteten Bauteilen auf. Damit sind aber auch Kriechverformungen, d.h. irreversible Verformungen verbunden. Dieses Phänomen ist bekannt. Auch die Versuche, durchgeführt an kleinen Querschnitten, bestätigen dies. Bis heute fehlen aber Unterlagen zur rechnerischen Erfassung dieses Phänomens für baupraktische Abmessungen.

2.14 Lastdauer

Der Einfluss der Lastdauer auf die mechanischen Eigenschaften des Holzes ist mindestens seit den Madison-Versuchen bekannt. Auch heute noch wird die Madison-Kurve in den meisten Ländern in dieser oder ähnlicher Form berücksichtigt.

In den letzten Jahren sind ernsthafte Zweifel an der Richtigkeit der Aussage der Madison-Kurve aufgetreten [4]. Dabei wird mit Recht auf den wesentlichen Unterschied zwischen Untersuchungen an strukturfehlerfreien Kleinproben und an solchen an baupraktischen, mit Strukturfehlern behafteten Bauelementen hingewiesen. Die kurzzeitigen Festigkeiten liegen bei letzteren sogar wesentlich unter denjenigen unter Dauerlast für strukturfehlerfreies Holz. Eine direkte Uebertragung der Resultate ist somit nicht gesichert.

Die Untersuchungen sollten auch ausgeweitet werden auf andere Holzarten. Dabei sollte stets auch der gleichzeitige Einfluss von Feuchteänderungen mitbehandelt werden.

2.2 Schichtholz aus Brettern und Furnieren

2.21 Kennzeichnende Unterschiede

Beim Brettschichtholz bestehen die einzelnen Lamellen aus eingesägten Brettern, die künstlich auf die Gebrauchsfeuchte heruntergetrocknet, in den erforderlichen Längen mittels Keilzinkung zusammengesetzt, beidseitig auf enges Toleranzmass gehobelt und kurzfristig danach miteinander verleimt werden. Die Brettstärke variiert i.a. zwischen 15 und 40 mm.

Beim Furnierholz bestehen die einzelnen Lamellen aus Furnieren. Normalerweise wird auf ein Stossen der Furniere verzichtet - die Stösse werden einzig versetzt angeordnet. Ein Hobeln erübrigt sich. Die Furnierlagen werden in der Regel - analog wie Furniersperrholz - heissverleimt. Die Furnierstärke variiert i.a. zwischen 2 und 10 mm [5].

Die Ausbeute von Schichtholz aus der Rundholzmasse ist beim Furnierholz grösser, da Sägeschnitte und Hobeln wegfallen. Diese beträgt über 60 %, während beim Schichtholz in der Regel 40 % erreicht werden. Andererseits ist mit einem grösseren Leimverbrauch (ca. 3- bis 8-fache Fugenzahl) zu rechnen. Die an sich unerwünschte weitgehende Zerlegung des Holzes führt andererseits zu einer Homogenisierung. Die bessere Verteilung der absolut kleineren Strukturstörungen führt zu höheren charakteristischen Festigkeitswerten mit kleineren Streuungen (vgl. Abb. 2).

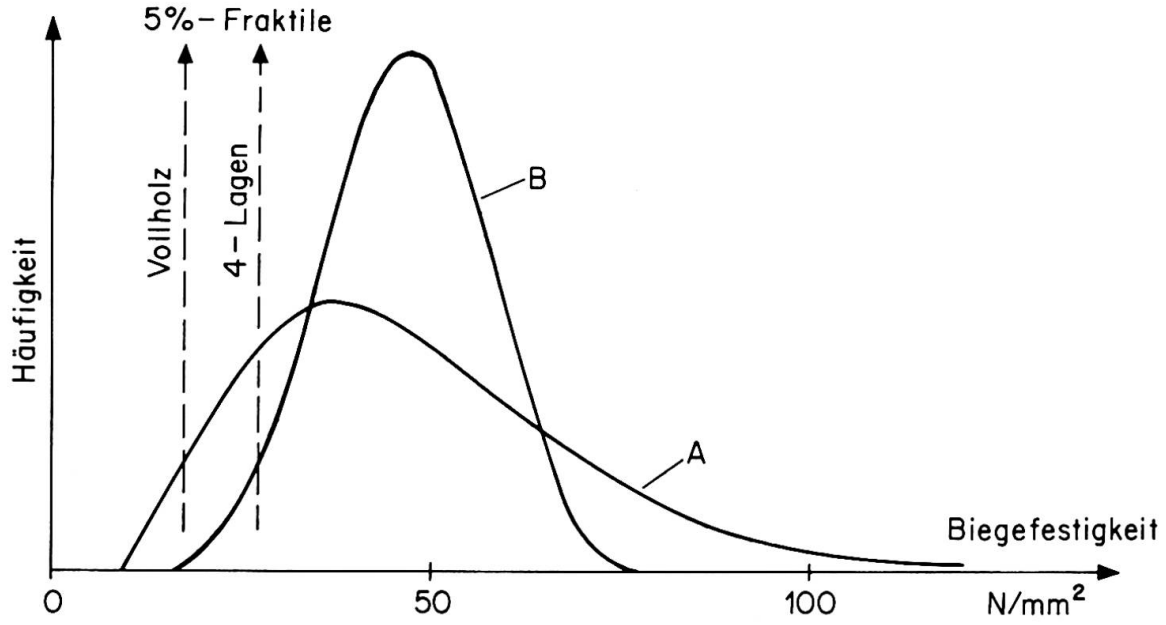


Abb. 2 Theoretische Verbesserung der Festigkeitseigenschaften durch Lamellierung nach [5]
Kurve A: Gemessene Streuung von Bauholz
Kurve B: Abgeleitete Werte für Schichtholz aus 4 Lamellen

Die dünneren Lamellen beim Furnierschichtholz erlauben geringere Krümmungsradien bzw. der Einfluss von Vorkrümmungen und des daraus entstehenden Eigenspannungszustandes haben geringere Bedeutung.

2.22 Mechanische Eigenschaften

Die mechanischen Eigenschaften des Schichtholzes sind ausgeglichener. Dies gilt vor allem für die Elastizitätsmoduli, $E_{\parallel}$ und $E_{\perp}$. Für die Zugfestigkeiten ist - zumindest beim Brettschichtholz - diese Wirkung nicht so ausgeprägt, da weder eine direkte Korrelation von $E_{\parallel}$ und $\sigma_{z\parallel}$ (vgl. Abb. 3) (grössere Streuungen) noch ein wesentlicher plastischer Ausgleich auf Zug (vgl. Abb. 4) vorhanden sind.

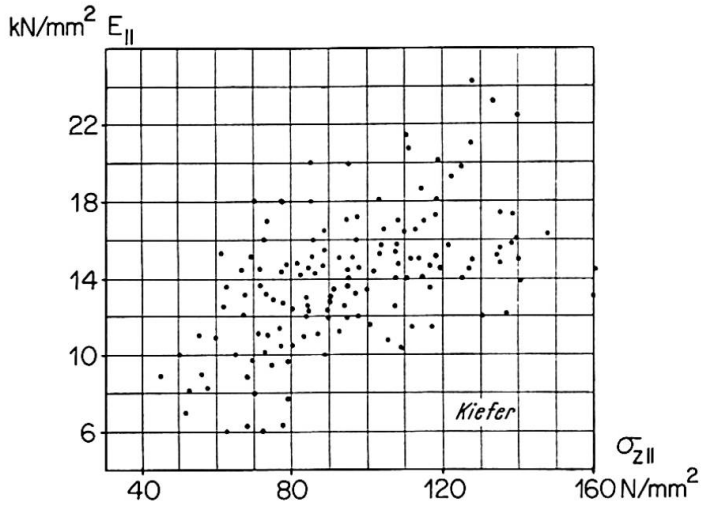


Abb. 3 Zugfestigkeit in Abhängigkeit vom E-Modul bei Kiefer nach [6]

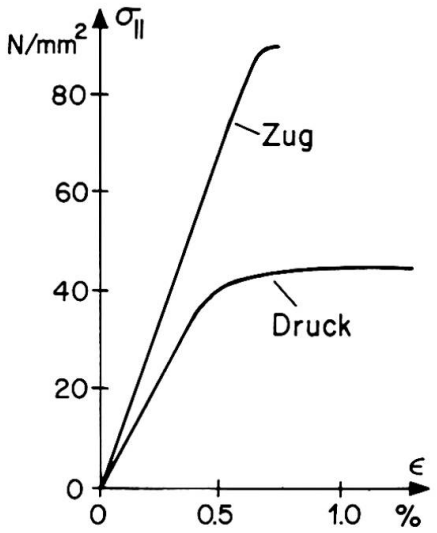


Abb. 4 Spannungs-Dehnungs-Diagramm für Fichte

Der Lamellierungseffekt auf Zug dürfte deshalb in der Praxis wesentlich geringer sein als die theoretischen Ansätze. Die in British Standard CP 112 angegebenen Werte, die auf theoretischen Untersuchungen beruhen [7], dürften deshalb kaum erreicht werden und zu falschen Schlüssen führen.

Bei Trägern mit Biegebeanspruchungen wirken sich nur die Eigenschaften der äusseren Lamellen (Randlamellen) aus, d.h. nur jeweils 3 bis 4 Lamellen. Der zweckmässigen Festigkeitssortierung und der Anordnung der Holzlamellen höherer Festigkeit in den Aussenzonen kommt deshalb eine entscheidendere Bedeutung zu. Eine eingehendere Darstellung dieses Problems unter Beachtung der grossen Streuung der Festigkeitseigenschaften (in Funktion der Dichte und der Strukturstörungen) und der normalerweise vorhandenen Keilzinkungen ist für die optimale Ausnutzung des Holzes von Bedeutung. Theoretische Abhandlungen über solche hybride Querschnitte ohne entsprechende Absicherung durch Versuche ergeben noch keine Grundlage.

2.23 Variable Querschnitte

Für die Herstellung variabler Querschnitte bestehen prinzipiell zwei Möglichkeiten (vgl. Abb. 5):

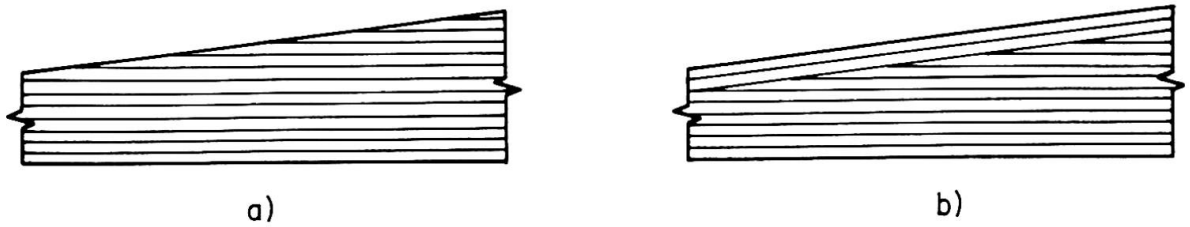
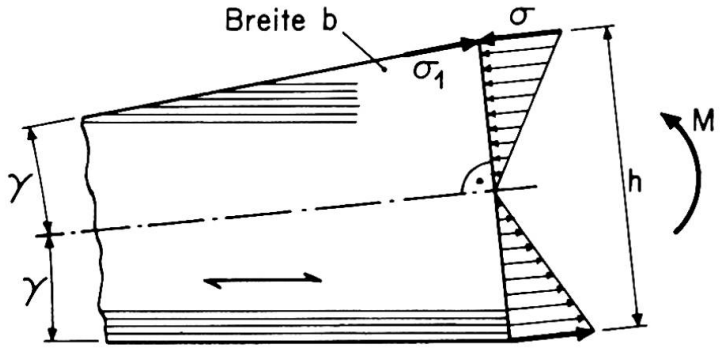


Abb. 5

a) alle Lamellen parallel gerichtet b) Aussenlamellen stets parallel zum Rand

Die Lösung b) stellt festigkeitsmässig die günstigste Anordnung dar, wird aber wegen der teureren Fertigung (zwei Arbeitsgänge erforderlich) selten angewendet.

Im Falle a) werden somit bewusst Schnitte schräg zur Faser in Kauf genommen. Wie unter 2.12 dargestellt, muss damit aber eine Verminderung der Tragfähigkeit in Kauf genommen werden. Da die Längsspannungen im Randbereich parallel zum Rand verlaufen, kann das Problem als Kraftrichtung schräg zur Faser behandelt werden (vgl. Abb. 6):



$$\sigma = \frac{6M}{bh^2} \qquad \sigma_1 = \frac{\sigma}{\cos\gamma}$$

Bedingung nach Abschnitt 2.12

$$\sigma_1 = \frac{\sigma}{\cos\gamma} \leqslant \sigma_\varphi \quad \text{mit } \varphi = 2\gamma$$

und σ_φ nach Fig. 7 in [8]

Abb. 6

Demnach sind Schräganschnitte auf Zug bedeutend gefährlicher als auf Druck (vgl. Fig. 7 in [8]; c_φ - Verlauf für Zug und Druck). Für Nadelholz führen bereits 1:10 angeschnittene Lamellen bei Zugbeanspruchung zu einer Festigkeitseinbusse von rund 30 %. Ohne entsprechende Reduktion dürften somit solche Anschnitte nicht toleriert werden.

2.24 Gekrümmte Querschnitte

Die Möglichkeit freier Formgebung führt zu häufiger Anwendung gekrümmter Bauelemente. Bei parabel- oder kreisförmig geformten Bogentragwerken sind die Krümmungsradien in der Regel so gross, dass die Eigenspannung aus der Vorkrümmung der Lamellen vernachlässigt werden kann. Erst bei kleineren Krümmungsradien muss dieser Einfluss gesondert untersucht werden. Bei gekrümmten Elementen sind demnach gegenüber den geraden Elementen folgende Einflüsse zusätzlich zu beachten:

- die Spannungen sind nicht mehr linear sondern hyperbolisch über den Querschnitt verteilt
- aus Gleichgewichtsgründen treten senkrecht zur Elementachse Kräfte auf, die Spannungen quer zur Faserrichtung bewirken

die während der Herstellung vorgekrümmten Lamellen weisen hohe Biegespannungen auf, die nur geringfügig durch Kriechen des Holzes abgebaut werden (vgl. [9], Abb. 27 und 28 sowie [10], Bild 24).

Neuere Untersuchungen zeigen, dass der letzte Einfluss bisher unterschätzt wurde [11]. In Abbildung 7 sind vergleichsweise auch die früheren Ansätze wiedergegeben.

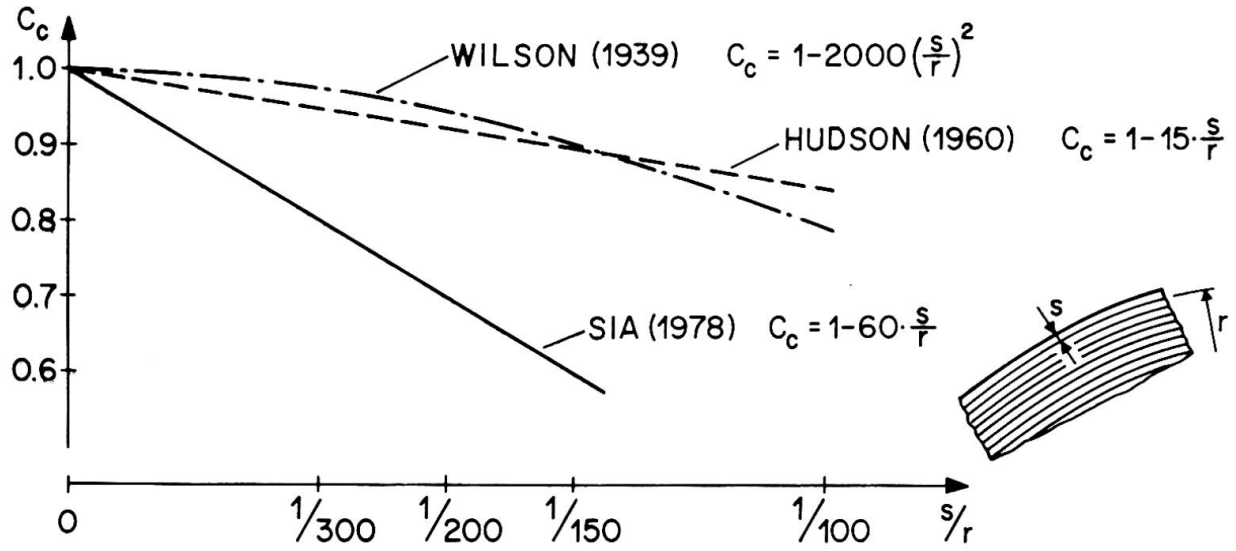


Abb. 7 Einfluss der Vorkrümmung

Weitere Untersuchungen zur Absicherung dieses Einflusses sind erwünscht. Die stärkere Abminderung wirkt sich allerdings nur dort aus, wo am Aussenrand durch äussere Kräfte Zugbeanspruchungen auftreten, denen sich die Biegezugspannungen aus der Vorkrümmung überlagern. Am Innenrand können bei Druckbeanspruchungen durch das Plastifizierungsvermögen des Holzes auf Druck (vgl. Abb. 4) die Eigenspannungen aus Vorkrümmung wesentlich abgebaut werden, so dass diese dann die Tragfähigkeit kaum beeinflussen.

Bei stärkerer Krümmung und höheren Trägern treten nicht mehr vernachlässigbare radiale Spannungen (quer zur Faserrichtung) auf. Die Radialspannungen können beim Rechteckquerschnitt mit guter Näherung durch folgende Beziehung angegeben werden:

$$\sigma_{\perp,max} = \sigma_{\parallel,max} \cdot \frac{H}{4R}$$

wobei H die Trägerhöhe und R den Krümmungsradius bedeuten.

Im Falle von Satteldachträgern treten die Radialspannungen als Querzugspannungen auf. Wegen der geringen Querzugfestigkeit - insbesondere der für Schichtholz verwendeten Nadelholzarten - kann die Biegetragfähigkeit nicht ausgenützt werden. Vorteile können hier bieten: Verwendung von Laubholzarten mit höherer Querzugfestigkeit, wie z.B. Buche; die Querarmierung des Schichtholzes.

2.25 Querarmierung

Die geringere Festigkeit des Holzes quer zur Faserrichtung erschwert gewisse Konstruktionen. Der Gedanke liegt deshalb nahe, durch die Querarmierung (analog der

Stahleinlagen im Beton, vgl. Abb. 8a) oder durch eine Querabsperrung (analog dem Sperrholz, vgl. Abb. 8b) die Eigenschaften in Querrichtung zu verbessern.

Abb. 8

a) eingeleimte Schraubenbolzen oder Holzzapfen

b) beidseitig aufgeleimtes Furnier oder Furniersperrholz

Zum Teil wurden für Reparaturzwecke Schraubenbolzen in Löchern mit Spiel eingezogen und vorgespannt. Da die Vorspannung durch Feuchteänderungen und Kriechen des Holzes abgebaut wird, kann hier nicht von einer Querarmierung, sondern nur von einer Verbolzung gesprochen werden. Die Querarmierung, aus passend eingeleimten Stahlstäben (meist Gewindestäbe) oder aus Holzstäben hoher Festigkeit, soll über den ganzen Bereich eine sichere Haftung gewährleisten.

Die Quereigenschaften können näherungsweise bestimmt werden zu:

$$E_{\perp,id} \approx \frac{A_{Holz} \cdot E_{\perp} + A_{Armierung} \cdot E_{Armierung}}{\Sigma A}$$

In der Regel dürfte somit der Einsatz von Holzstäben für die Querarmierung genügen, mit dem Vorteil einfacher Ausführung und sicherer Verleimung.

Die Absperrung im Bereich von Rahmenecken kann sinnvoll mittels aufgeleimter Furniere oder einer dreischichtigen Furnierplatte [12] erreicht werden. Die Absperrung kann auch nur zur Verminderung des Aufreissens des Holzes eingesetzt werden. Günstige Ergebnisse sind für die Absperrung von Schwellenholz bekannt geworden [13].

Weitere Einsatzmöglichkeiten der Querarmierung des Holzes sind auch bei knappen Auflagerungsverhältnissen von Brettschichtträgern bekannt geworden [14].

Erweiterte Untersuchungen in diesem Bereich und damit gewonnene praktische Erfahrungen sind für einen vermehrten Einsatz der Querarmierung erwünscht. Dadurch könnten bisherige Schwachstellen wie Rahmenecken, gekrümmte Bereiche mit Querzug, optimal verstärkt werden.

2.3 Sperrholz aus Brettern und Furnieren

2.31 Aufbau

Heute steht eine Vielfalt von Produkten zur Verfügung. Als wichtigste Variablen treten Schichtenaufbau und Holzarten auf.

In der Regel werden die Schichten kreuzweise angeordnet. Die Schichtstärke der Furniere beträgt zwischen 1,5 und 8 mm (dünnere Schichten von weniger als 0,5 mm wurden früher im Flugzeugbau eingesetzt).

Eine besondere Abart von Brettsperrholz stellen die Kämpfplatten dar. Durch geringe gegenseitige Verdrehung von 3 oder mehr 15 bis 20 mm starken Brettlagen werden Schubfestigkeit und Querfestigkeit erhöht ohne wesentliche Beeinträchtigung der Eigenschaften längs.

Der Aufbau von Furniersperrholz kann erfolgen mit unterschiedlicher Schichtstärke sowie mit ungleichmässigen Anteilen in Längs- und Querrichtung. Zudem können die Holzarten und Holzgüten schichtweise variieren. Die Festigkeit der Leimverbindung ist bei den heute verwendeten Leimen derart hoch, dass sie kaum noch als Kriterium herangezogen werden kann. Für die Leimwahl sind somit die Einsatzbedingungen (Feuchte, Nässe) massgebend.

2.32 Mechanische Eigenschaften

Mit Ausnahme der Flugzeugsperrhölzer mit vielen dünnen Schichten und entsprechend hohem Anteil an Leimfugen, kann in der Regel der verfestigende Einfluss der Leimschichten vernachlässigt werden.

Bei normierten Produkten (Holzart, Aufbau, Holzgüte, Leim) können die mechanischen Eigenschaften auf Grund laufender Standardversuche festgelegt werden. Für die häufig anzutreffenden anderen Fälle liegen meist praktisch ungenügend gesicherte Unterlagen vor. Auf Grund der besser bekannten Eigenschaften der Furniere und einzelner Versuche können ausgehend vom Aufbau der Platte die mechanischen Eigenschaften dennoch ermittelt werden. Die theoretischen Ansätze zur Darstellung der mechanischen Eigenschaften liegen vor [15][16].

Zum Teil erfolgen die Angaben bezogen auf die Querschnitte der Furniere in Längs- bzw. Querrichtung (z.B. in den USA), zum Teil wird als Bezugsquerschnitt die volle Plattenstärke (z.B. in Europa) verwendet. Beide Möglichkeiten weisen Vorteile und Nachteile auf. Für den praktischen Gebrauch dürfte letztere Methode einfacher sein.

2.33 Bedeutung des Sperrholzes

Das Sperrholz - als erstes industriell hergestelltes plattenförmiges Produkt - wurde früher vielfach für Zwecke eingesetzt, die heute wirtschaftlicher durch Spanplatten erfüllt werden.

Heute gilt es, die ausgezeichneten Festigkeiten des Sperrholzes bezüglich Schub, besser auszunützen. Durch die Absperrwirkung wird die Schubfestigkeit - gegenüber derjenigen des Schnittholzes parallel zur Faser - um das 3- bis 5-fache erhöht. Sperrholz sollte deshalb dort eingesetzt werden, wo hohe Schubkräfte zu übertragen sind, z.B. bei Biegeträgern mit Sperrholzstegen.

In solchen Bauelementen treten meist kombinierte Beanspruchungen in den Stegen auf: Normalspannungen aus Biegung und Schubspannungen aus Querkräften. Bisher fehlen gesicherte Festigkeitskriterien für derartige kombinierte Beanspruchungen.

2.4 Span- und Faserplatten

2.41 Plattenarten

Heute besteht eine ausserordentlich grosse Vielfalt von plattenförmigen Holzprodukten. Unterschiedliche Art der Zerkleinerung, Aufbau, Verdichtung und Leimzugabe führen zu Produkten mit grosser Variation der mechanischen Eigenschaften. Zwischen den frei Hauptarten: Waferboard/Strandboard, Spanplatten und Faserplat-

ist ein fliessender Uebergang vorhanden. Einer stärkeren Anwendung in Tragwerken mit ständiger Beanspruchung steht das ungünstige Kriechverhalten entgegen. Vorzugsweise werden deshalb solche Elemente für Windscheiben und andere kurzzeitig beanspruchte Bauteile eingesetzt.

2.42 Wafer- und Strandboard

Waferboard ist ein plattenförmiger Holzwerkstoff, der aus relativ quadratischen, grossflächigen Holzspänen besteht, während Strandboard aus schmalen, streifenartigen Holzspänen gefertigt wird, wobei die Späne gerichtet eingestreut werden können. Durch unterschiedliche Spanorientierung zwischen Deck- und Mittellagen um jeweils 90°, kann ein dem Furnierholz ähnliches Produkt erzeugt werden, mit bezogen auf die Rohdichte nur halb so hohen Festigkeiten wie das Furnierholz. Im Vergleich zu den konventionellen Spanplatten weisen jedoch die sog. "Strukturplatten" wesentlich höhere Biege- und Schubfestigkeiten auf, so dass grössere Einsatzmöglichkeiten für tragende Elemente bestehen [17][18][19].

2.43 Spanplatten

Die aus laufenden Gütekontrollen ermittelten mechanischen Eigenschaften zeigen je nach Aufbau und Verdichtung der Decklagen unterschiedliche Werte, wobei jedoch generell mit zunehmender Plattendicke sowohl Elastizitätsmasse als auch Festigkeitswerte abnehmen.

Die Elastizitätsmasse variieren zwischen 1000 und 4000 N/mm^2 und die Zug- und Druckfestigkeiten in Plattenebene zwischen 5 und 15 N/mm^2. Die Biegefestigkeit senkrecht zur Plattenebene liegt infolge der Verdichtung der Aussenbereiche etwas höher (8 bis 20 N/mm^2). Diese Werte stellen jedoch nur Kurzzeitwerte dar. Bei langfristig beanspruchten Bauteilen aus Spanplatten ist sowohl ein starker Abfall an Festigkeit als auch infolge Kriechen eine starke Zunahme der Verformungen feststellbar. Mit steigender Feuchte und/oder Feuchteänderung treten obige Einflüsse verstärkt auf.

Der Einsatz von Spanplatten sollte deshalb auf Tragelemente mit vorwiegend kurzfristiger Beanspruchung und geringer Feuchteänderung (notfalls durch geeigneten Oberflächenschutz zu gewährleisten) beschränkt bleiben. Die Publikation positiver und negativer Erfahrungen mit dem Einsatz von Spanplatten für tragende Elemente ist erwünscht.

2.44 Faserplatten

Für tragende Funktion kommen nur harte (Rohdichte 800 kg/m^3) und mittelharte Faserplatten (Rohdichte zwischen 350 und 800 kg/m^3) in Frage. Mittelharte Faserplatten weisen ähnliche mechanische Eigenschaften wie Spanplatten gleicher Rohdichte auf. Hartfaserplatten, die jedoch nur mit geringen Plattenstärken hergestellt werden, weisen höhere Werte auf. Analog den Spanplatten ist auch hier der Einfluss der Lastdauer und der Feuchte von entscheidender Bedeutung.

3. VERBINDUNGEN

3.1 Bedeutung für den Holzbau

Durch den Einschnitt gewinnt man aus dem Stammholz stets gerade Elemente. Anderweitige Formen müssen durch Zusammensetzen einzelner im Ausgangszustand gerader Teile erzeugt werden. Der Verbindung der einzelnen Teile und somit den Verbin-

dungsmitteln kommt demnach eine ausserordentliche Bedeutung zu.

Bei den anderen Baustoffen bestehen weniger Schwierigkeiten. Stahl kann dank seinen ausgezeichneten Plastizifizierungseigenschaften weitgehend umgeformt werden, entweder kalt durch Abkanten, Pressen, Rollformen oder durch örtliche Erwärmung mittels Wärmekeilen. Auch bei den Betonkonstruktionen kann dank der Giessfähigkeit des Betons eine unbeschränkte Formgebung erreicht werden.

Ohne geeignete und wirtschaftliche Verbindungen wäre demnach Holz nur für untergeordnete Zwecke einsetzbar.

3.2 Problematik der Holzverbindungen

Die vollständige Stossverbindung - im Stahlbau durch einen Schweissstoss einfach und überall realisierbar - ist im Holzbau kaum durchführbar. Entsprechende Untersuchungen [20] mittels Stirnflächenverleimungen laufen zwar, ein praktischer Einsatz ist jedoch kaum ersichtlich. Am nächsten kommen noch verzahnte Verbindungen [21].

Minizinken (mit Zinkenlängen um 7,5 mm und Flankenneigungen von 1:8) sind bereits praktisch erprobt und werden für die industrielle Keilzinkung von Brettlamellen für Schichtholz eingesetzt. Deren Einsatz beschränkte sich aber auf Nadelhölzer geringer Dichte ($r_0 \cong 0{,}4$ bis $0{,}5$ g/cm^3).

Für grössere Querschnitte und andere Holzarten kommen eher die grösseren Verzahnungen mit Längen zwischen 20 und 60 mm in Frage. Wie labormässig durchgeführte Keilzinkungen zeigen, können spezifische Beanspruchungen von über 80 N/mm^2 bezogen auf den Bruttoquerschnitt übertragen werden. Allerdings fehlen noch für industriell gefertigte Keilzinkungen entsprechende Untersuchungen. Bei allen mechanischen Verbindungen erfolgt die Kraftübertragung durch Ueberlappung. Bei einfacher Ueberlappung ergeben sich bei den grösseren Querschnittsabmessungen entsprechend hohe Exzentrizitäten, die zu einem starken Abfall des Wirkungsgrades führen.

Zu diesen einfachen Stossverbindungen (Stossebene $\perp$ zur Faserrichtung) kommen jedoch häufig schräge Anschlüsse, d.h. solche mit Kraftrichtungen schräg zur Faser vor. Diese weisen wie nach 2.12 zu erwarten ist, bei einfacher Ueberlappung noch einen geringeren Wirkungsgrad auf.

Verbesserungen sind möglich und zu erzielen durch:

- kleinere Anschluss-Stärken (durch Unterteilung des Querschnittes oder durch mehrschnittige Verbindungen); dadurch Verkleinerung der Exzentrizitäten und zugleich kleinere Anschlusslängen,
- lokale Verbesserung der Holzeigenschaften, z.B. durch Querarmierung, Absperrung usw.,
- Verbindungsarten, z.B. bei Fachwerkknoten, die die Kräfte vorwiegend längs zur Faser einleiten.

Grundlegende Arbeiten in diesen Bereichen erlauben die zielgerichtete Entwicklung von Verbindungsmitteln mit hohem Wirkungsgrad.

3.3 Leimverbindungen

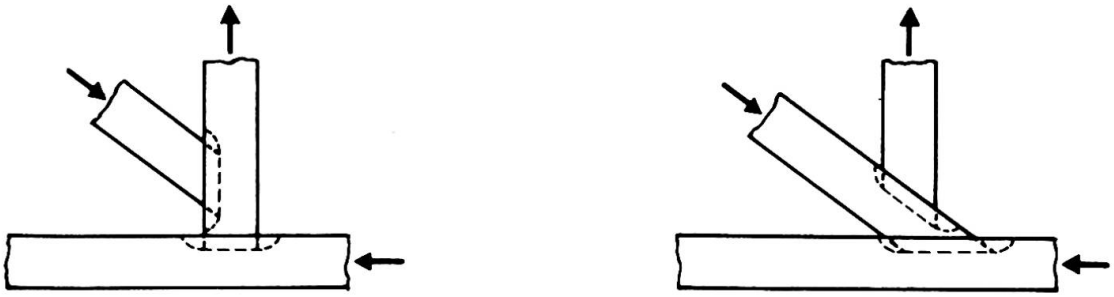
Sieht man von der flächenhaften Verleimung der einzelnen Lamellen und Furniere ab

(siehe unter 2.2 und 2.3), so verbleiben noch folgende geleimte Verbindungen:

- überlappte, geleimte Stösse (geleimte Laschenverbindungen)
- Stossverbindungen mittels Schäftung oder Keilzinken.

Die geleimte Laschenverbindung eignet sich nur für geringe Querschnitte und Laschenabmessungen. Werden Stäbe schräg durch Ueberlappung angeschlossen, so treten bei Feuchteänderungen infolge unterschiedlichem Schwinden bzw. Quellen der miteinander verleimten Hölzer Eigenspannungen auf, die bei grösseren Anschlussflächen bzw. grösseren Querschnittsabmessungen zur Zerstörung der Leimfuge führen können. Da geleimte Laschenverbindungen für biegesteife Montagestösse von Brettschichtholzbögen häufig eingesetzt werden, sind gesicherte Angaben über die Festigkeit solcher Verbindungen erwünscht. Allzu oft wird die starke Abminderung der Scherfestigkeit mit zunehmender Fläche bzw. Länge des Anschlusses ausser Acht gelassen.

Stossverbindungen mittels Schäftung oder Keilzinken grösserer Bauteile aus Schnittholz und insbesondere aus Brettschichtholz haben sich als durchführbar erwiesen [22]. Problematisch ist die Erfassung der Tragfähigkeit von Stössen unter einem Winkel. Gewisse Ansätze liegen vor [23][24], jedoch ist eine eingehendere Betrachtung unter Einbezug von Holzarten mit höherer Querzugfestigkeit erwünscht. Ein Beispiel für die geschickte Ausnützung des in 2.12 dargestellten Unterschiedes zwischen Schrägzug und Schrägdruck ist für Keilzinkenanschlüsse von Fachwerkstäben in [25] wiedergegeben (vgl. auch Abb. 9).



a) korrekte Ausführung: Anschlüsse auf Druck und Schub beansprucht

b) schlechte Ausführung: Pfostenanschluss führt zu Zugbeanspruchung schräg zur Faser

Abb. 9 Vergleich zweier möglicher Anschlussarten

Allerdings werden bei dieser Lösung grössere Stabexzentrizitäten in Kauf genommen.

3.4 Verbindungen mit eingelassenen und eingetriebenen Teilen

Nagel- und Bolzenverbindungen einerseits und Dübelverbindungen andererseits sind immer noch die klassischen Verbindungsarten, die sowohl für die Vorfabrikation als auch auf Montage vielseitig eingesetzt werden.

Die Dübelverbindungen blicken auf eine bereits vor rund 40 Jahren abgeschlossene Entwicklung zurück. Eine Weiterentwicklung der eingelassenen oder eingepressten Dübel ist nicht erkennbar. Diese Verbindungen weisen zudem einen tiefen Wirkungsgrad auf; trotzdem werden sie immer noch häufig angewendet. Deren Eignung für Nadelholzarten ist bekannt. Für andere Holzarten liegen nur ungenügende Untersuchungen vor.

Die Wirkungsweise von Nägeln und Bolzen (Schraubenbolzen und Stabdübel) in Scherverbindungen ist vergleichbar, d.h. in beiden Fällen liegen stabförmige, auf Biegung beanspruchte Teile vor. Massgebend ist die Biegesteifigkeit, die Seilwirkung dürfte insbesondere bei grösserer Lastdauer weitgehend vernachlässigt werden. Die Tragfähigkeit wird abgesehen von den geometrischen Verhältnissen (Stabdurchmesser bezogen auf die Holzstärken) beeinflusst durch:

- Materialfestigkeit (Fliessgrenze der Nägel und Dübel; Druckfestigkeit des Holzes)
- Formgebung der Stäbe (neben den glattschaftigen Nägeln kommen auch Gewinde- und Rillennägel zur Anwendung, insbesondere wenn Austrocknung möglich ist)
- Notwendigkeit des Vorbohrens für grössere Nageldurchmesser (Angabe der Grenzen für verschiedene Holzarten, insbesondere im Hinblick auf den Einsatz vom Nagelautomaten).

In der Regel werden die Verbindungen nur unter kurzfristiger Beanspruchung geprüft. Als Kriterium für die Festlegung der zulässigen Beanspruchung werden die Traglast und die Verschieblichkeit benutzt. Diese Festlegung ist nicht unbedingt sinnvoll, da die zulässige Verschieblichkeit i.a. aus der Nutzung sich ergibt, also in der Regel kein Sicherheitskriterium darstellt.

Bisher fehlt noch eine einheitliche Darstellung des Tragverhaltens stabförmiger Verbindungsmittel, in der die verschiedenen Einflussfaktoren direkt eingehen.

3.5 Spezialverbindungen

Bei der grossen Bedeutung der Verbindungen für den wirtschaftlichen Einsatz des Holzes ist die laufende Entwicklung von Spezialverbindungen nicht erstaunlich. Zum Teil haben diese Verbinder einen grossen Anwendungsbereich gefunden, wie z.B. die verschiedensten Arten von Nagelplatten, z.T. werden sie für spezifische Zwecke individuell entworfen. Es kann - im Rahmen dieses Berichtes - nicht auf die Vielzahl dieser Produkte eingegangen werden. Entscheidender Faktor für die Durchsetzung ist - neben der technisch sauberen Lösung der Aufgabe - die Möglichkeit einer Rationalisierung, wobei dieser Effekt sowohl in der Bemessung als auch in der Herstellung zum Tragen kommen sollte.

3.6 Kriterien für die Entwicklung neuer Verbindungen

Die wichtigsten Kriterien sind:

A - Hoher Wirkungsgrad der Verbindungen: Die Verbindung soll eine hohe Ausnutzung der natürlichen Festigkeit des Holzes ermöglichen und geringe Verformungen aufweisen (für die Bemessung soll die Tragfähigkeit und nicht die Gebrauchsfähigkeit massgebend werden). Solche Verbindungen können nur durch ein Minimum an Exzentrizitäten, an Kraftumlenkungen und an Beanspruchungen quer oder schräg zur Faser erreicht werden.

B - Rationelle Fertigung: Die Verbindung soll kostengünstig herstellbar sein. Damit dieser Effekt bereits ab geringen Mengen wirksam wird, dürfen hierfür keine zu umfangreichen und teuren Spezialanlagen erforderlich sein. Notfalls sollte die Verbindung auch mit einfacheren Mitteln noch herstellbar sein (z.B. bei Montageverbindungen).

C - Sichere Ausführung: Entscheidend ist eine hohe Zuverlässigkeit der Verbindung. Diese sollte durch entsprechende einfache Kontrollen rasch überprüfbar

sein, z.B. durch eine visuelle Kontrolle. Die Verbindung muss auch eine dem verwendeten Holz entsprechende Dauerhaftigkeit besitzen. Bei Einsatz in Schnittholzkonstruktionen sollte auch eine geringe Empfindlichkeit gegenüber Feuchteänderungen (z.B. nachträgliche Austrocknung) vorhanden sein.

D - Vielseitiger Verwendungsbereich: Von Interesse ist die Anwendbarkeit für unterschiedliche Abmessungen und für einen grösseren Querschnitts- und Kraftbereich.

E - Geringe Anforderungen bez. Holzqualität: Von besonderem Interesse ist die Anwendbarkeit von Holz unterschiedlicher Festigkeit, bzw. dass keine zu strengen Anforderungen an die Holzqualität im Verbindungsbereich gestellt werden. Die Verbindung sollte für verschiedene Holzarten einsetzbar oder zumindest leicht anpassbar sein.

F - Aesthetische Anforderungen: Die vermehrte Zurschaustellung der Tragkonstruktion verlangt ästhetisch saubere Verbindungen.

Selbstverständlich vermag eine Verbindungsart nur jeweils einem Teil obiger Kriterien genügen. Durch eine systematische Darstellung der Anforderungen und der hierzu jeweiligen Lösungsmöglichkeiten lassen sich Kombinationen herleiten, die zu wesentlich leistungsfähigeren Verbindungsarten führen können. Die Erprobung, Anpassung an rationelle Herstellungsmethoden und schliesslich die Typisierung solcher Verbindungen verlangt nebst guter Kenntnisse der Holzeigenschaften auch einen gewissen Pioniergeist.

Es ist zu hoffen, dass neue Verbindungsarten, die weitgehend obige Kriterien erfüllen, im Rahmen des Kongresses vorgestellt werden können.

LITERATURVERZEICHNIS

[1] WILLEITNER, H.: Holzschutz. Holzbautaschenbuch, 7. Aufl. W. Ernst & Sohn Berlin, 1974

[2] GEHRI, E./STEURER, A.: Holzfestigkeit bei Beanspruchung schräg zur Faser. Schweiz. Arbeitsgemeinschaft für Holzforschung, Bull. 7/2, 1979

[3] GONET, B.: Der Einfluss des Dämpfens auf die Eigenschaften von Rotbuchenholz. Holztechnologie 14, S. 70 - 72

[4] MADSEN, B.: Duration of load tests for dry lumber in bending. Forest Products Journal, Vol. 23, No. 2, S. 21 - 28

[5] FPL press-lam process: fast, efficient conversion of logs into structural parts. Forest Products Journal, Vol. 22, No. 11

[6] SCHAEFER, W.: Die Zugfestigkeit lamellierter Stäbe. Holz als Roh- und Werkstoff, Jg. 10, H. 1, S. 15 - 18

[7] - : Grade stresses for structural laminated timber. Ministry of Technology. Forest Products Research, Bulletin No. 53

[8] GEHRI, E./GASSER H.H.: Timber construction. IABSE Surveys S-7/78

[9] ROS, M.: Ergebnisse der Belastungsversuche in Arth-Goldau an einem einstieligen Versuchsbinder der Kreisdirektion Luzern der SBB. Bericht Nr. 152 der EMPA, 1945

[10] EGNER, K.: Festigkeit von aus kunstharzverleimten Brettern zusammengesetzten, geraden und gebogenen Balken. Holz als Roh- und Werkstoff, Jg. 4, S. 49 - 64

[11] GEHRI, E.: Betrachtungen zum Tragverhalten gekrümmter Brettschichtträger konstanten Querschnittes. Schweiz. Arbeitsgemeinschaft für Holzforschung, Bull. 4/2, 1976

[12] - : Reithalle und Ställe. Bauen mit Holz, S. 426, 1972

[13] - : Capping of heavy timbers provides control of checking and splitting. Forest Products Journal, No. 1, S. 9, 1970

[14] - : Messehallen Nürnberg-Langwasser. Bauen mit Holz, S. 372 - 375, 1972

[15] KEYLWERTH, R.: Die anisotrope Elastizität des Holzes und der Lagenhölzer. VDI-Forschungsheft 430, Düsseldorf 1951

[16] - : Wood handbook - wood as an engineering material. U.S. Department of Agriculture. Forest Products Laboratory. Agriculture Handbook, No. 72, Chapter 11, 1974

[17] HUNT, M.O.: Structural particleboard: a new construction panel product. Forestry & Natural Resources, 1977

[18] CARROLL, M.N.: Growth of waferboard in Canada. Forest Products Journal, No. 11, S. 26 - 30, 1976

[19] MOELTNER, H.G.: Waferboard and Strandboard Holz als Roh- und Werkstoff, S. 353, 1976

[20] SCHAEFFER,R.E./GILLESPIE,R.H.: Improving end-to-end grain butt joint gluing of white pine. Forest Products Journal, No. 6, S. 39 - 43, 1970

[21] MARIAN, J.-E.: Das Keilzinken von Holz. Holz als Roh- und Werkstoff, S 41 - 45, 1968

[22] SCHOLZ, G.: Hölzernes Hängedach über dem Ausstellungspavillon der Bundesgartenschau in Dortmund. Detail-Zeitschrift für Architektur & Baudetails

[23] KOLB, H.: Festigkeitsuntersuchungen an gestossenen und gekrümmten Teilen aus Brettschichtholz. Bauen mit Holz, S. 323 - 334, 1969

[24] BLUMER/FLUEHMANN/GEHRI/KAEMPF/WIRZ: Bemessung und Ausführung von Brettschicht-Konstruktionen. Schweiz. Arbeitsgemeinschaft für Holzforschung, Weinfelden, 1976

[25] HOYLE/STRICKLER/ADAMS: A finger joint connected wood truss system. Forest Products Journal, No. 8, S. 17 - 26, 1973