

Karlsruher Forschung im Ingenieurholzbau 1987

Herrn em. o. Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Karl Möhler zur Vollendung seines 75. Lebensjahres gewidmet

P. Belchior-Gaspard, P. Beyersdorfer, H. J. Blaß,
F. Colling, O. Eberhard, J. Ehlbeck, R. Görlacher,
R. Hättich, W. Siebert und H. Werner

Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine
Abt. Ingenieurholzbau der Universität Fridericiana Karlsruhe

1 Einleitung

Als im Jahre 1981 der derzeitige Inhaber des Lehrstuhls für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen der Universität Karlsruhe, o. Prof. Dr.-Ing. Jürgen Ehlbeck, die Nachfolge des emeritierten o. Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Karl Möhler antrat, hatte sich die Abteilung Ingenieurholzbau der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, dem der o. g. Lehrstuhl angeschlossen ist, zu einer Forschungsstätte entwickelt, die sich mit großem Einsatz der Entwicklung des modernen Ingenieurholzbau widmete. Karl Möhler hatte in langjähriger Tätigkeit das Institut zu dieser heute weltweit anerkannten Forschungsstätte des Holzbaues ausgebaut. Das anlässlich der Vollendung seines 70. Lebensjahres im Jahre 1982 in Karlsruhe veranstaltete internationale Symposium in Verbindung mit der Tagung der Arbeitsgruppe CIB-W18 »Timber Structures« hat in glanzvoller Weise das hohe Verdienst Karl Möhlers dokumentiert. Der von seinen früheren Mitarbeitern Jürgen Ehlbeck und Günter Steck – heute Professor für Grundlagen des konstruktiven Ingenieurbau mit Holzbau an der Fachhochschule München – damals herausgegebene Sammelband »Ingenieurholzbau in Forschung und Praxis« mit vielen Beiträgen nationaler und internationaler Autoren und Freunde Möhlers war ein kleiner Beitrag, der die hohen Verdienste Karl Möhlers um die Entwicklung des Holzbaues aufzeigen sollte.

Nach fünf Jahren betrachten die Mitarbeiter dieses Karlsruher Institutes es als eine wichtige und ehrenvolle Aufgabe, über die heutigen Aktivitäten zu informieren. Dafür erscheint die Vollendung des 75. Lebensjahres Karl Möhlers als ein würdevoller Anlaß. Der Bericht, der in drei Folgen in dieser Fachzeitschrift erscheinen wird, beschränkt sich auf die heutigen Forschungsarbeiten, ohne daß auf die vielfältigen Aufgaben des Institutes in der Lehre, der Materialprüfung sowie der nationalen und internationalen Normung eingegangen wird.

Als ein wichtiges Ereignis ist die seit 1985 laufende Beteiligung am Karlsruher Sonderforschungsbereich 315 »Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke – Bauegefüge, Konstruktionen, Werkstoffe« hervorzuheben. Unter den Themenstellungen »Trag- und Verformungsverhalten alten Konstruktionsholzes« und »Knotenpunkte und Verbindungsmittel alter Holzkonstruktionen« werden in zwei Teilprojekten des SFB grundlegende Forschungen angegangen, die letztlich zu sinnvollen Beurteilungskriterien für alte, historische Holzkonstruktionen führen sollen. Der derzeitige Stand der Forschungen wird in dieser Berichtsfolge dargestellt. Unter der wissenschaftlichen Leitung Karl Möhlers wurde in den Jahren 1982/83 mit R. Freiseis über die Erhöhung der Querdrukfestigkeit [1] und im Jahre 1983 mit W. Siebert über die Erhöhung der Querkzugfestigkeit des Holzes in gefährdeten Bereichen [2] wichtige Projekte zu einem vorläufigen Abschluß gebracht. Untersuchungen über die Knicklasten von einseitig eingespannten Holzstützen mit nachgiebigem Fußanschluß [3] wurden im Jahre 1982 mit R. Freiseis abgeschlossen. Mit Arbeiten über die Aussteifung von Stahlprofilen [4] mit R. Freiseis und über Festigkeitseigenschaften von einheimischem Douglasienholz [5] mit P. Beyersdorfer (Abschluß 1984) wurden von Karl Möhler wichtige Erkenntnisse erarbeitet, die bei Normungsvorhaben für Traggerüste bzw. in der Berechnungsnorm für Holzbauwerke ihren Niederschlag gefunden haben.

Eine bereits von Möhler begonnene Arbeit über den Abbau von Eigenspannungen aus Feuchteänderungen bei Brettschichtholz durch Sägeschnitte [6] wurde von G. Steck weiterbearbeitet und bis auf ergänzende Langzeitversuche unter Freibewitterung im Jahre 1985 abgeschlossen [7].

Verbindungstechniken des Holzbaues waren von jeher ein bevorzugter Forschungsbereich in Karlsruhe. Aus der Problematik der sehr wirtschaftlichen Balkenschuhanschlüsse wurden wegen der auftretenden Querkzugbeanspruchungen im Holz mit R. Görlacher im Jahre 1983 Arbeiten über das Tragverhalten von Querschlüssen mittels Stahlblechformteilen im Holzbau abgeschlossen [8, 9] und daran anschließend (1984) aufgrund von Versuchen, ebenfalls mit R. Görlacher, die Tragfähigkeiten von Balken-

schuhen unter zweiachsiger Beanspruchung erforscht [10]. Die Verwendung von mit gestanzten Nagellöchern versehenen Stahlblechen als Verbindungsmittel im Zusammenwirken mit geeigneten Nägeln führte zu Untersuchungen über die erforderlichen Mindestnagelabstände bei der Stahlblech-Holz-Nagelung, bei der eine bezüglich der Holzfaserrichtung versetzte Nagelanordnung unterbleibt. Diese Untersuchungen [11] mit R. Görlacher (1982) führten zu Vorschlägen für die Neufassung der DIN 1052.

Auch die Erforschung des Tragverhaltens von Nagelverbindungen bei gleichzeitiger Beanspruchung auf Abscheren und Ausziehen (Interaktion) [12] mit W. Siebert 1984 führte zu neuen Erkenntnissen und daraus hergeleiteten einfachen Bemessungskriterien für die Neufassung der Normen. Dabei ist das günstigere Verhalten der sog. Sondernägel mit profiliertem Schaft gegenüber den runden Drahtstiften hervorzuheben.

Im Bereich der Verbindungstechnik wurden im Jahre 1985 mit R. Freiseis und R. Hättich schließlich physikalische und mechanische Eigenschaften von Kunstharz-Preßschichthölzern [13] als Vorarbeit für die Entwicklung neuer, metallfreier Verbindungsmittel im Holzbau ermittelt. Hieran sollen sich weitere Forschungsarbeiten anschließen.

Für den Einsatz in tragenden Bauteilen bietet sich hochwertiges Bau-Furniersperrholz aus Buche als sehr wirkungsvoll an. Mit F. Colling (1983) wurden als Eingangsdaten für die überarbeitete DIN 1052 fehlende mechanische Größen – insbesondere Scherfestigkeiten und Schubmoduln – an großen Proben in Anlehnung an international vorgeschlagene Prüfverfahren bestimmt [14]. Ein langfristiges Forschungsvorhaben über die Tragfähigkeit von Brettschichtholz-Biegeträgern unter besonderer Berücksichtigung der mechanischen und physikalischen Eigenschaften der Brett lamellen sowie der Festigkeitskenngrößen der Keilzinkenverbindungen wurde in einer ersten Phase mit F. Colling und R. Görlacher im Jahre 1984 abgeschlossen [15] und führte zu einem Rechenmodell, das in weiteren Abschnitten dieses Projektes verfeinert wird, während gleichzeitig die Kenntnisse über die streuenden Materialeigenschaften zu vertiefen sind.

Ein umfangreiches Forschungsvorhaben über etwa fünf Jahre befaßte sich mit dem Zusammenwirken von Längs-, Quer- und Schubspannungen im Holz mit dem Ziel, eine Grundlage für eine mathematische Beschreibung des Bruchkriteriums bei derartigen Interaktionen zu schaffen. Dazu mußten eine besondere Prüfkörperform und ein geeignetes Prüfgerät entwickelt werden. Die mit K. Hemmer im Jahre 1986 zum Abschluß gebrachte Arbeit [16] ermöglicht es, für verschiedene Nadelholzarten bei den im konstruktiven Holzbau vorkommenden Spannungskombinationen die charakteristischen Tragfähigkeiten zu beschreiben, eine wichtige Grundlage also für die Verbesserung von Tragfähigkeitsnachweisen bei gleichzeitig auftretenden verschiedenen Spannungsarten.

Nachstehend und in weiteren Folgen dieser Zeitschrift wird über die gegenwärtig laufenden, noch nicht oder gerade zum Abschluß gebrachten Karlsruher Forschungsprojekte auf dem Gebiete des Ingenieurholzbau berichtet.

2 Sonderforschungsbereich:

»Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke«

Am Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen der Universität Karlsruhe sind zwei der insgesamt zwölf Teilprojekte des Sonderforschungsbereichs 315 »Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke« eingerichtet. Sie befassen sich mit »altem« Konstruktionsholz, seinen Festigkeiten und den Möglichkeiten, diese zerstörungsfrei zu ermitteln, sowie mit dem Tragverhalten von Knotenpunkten und Verbindungsmitteln alter Holzkonstruktionen. Über den derzeitigen Stand und die ersten Ergebnisse der beiden Teilprojekte zwei Jahre nach Aufnahme der Arbeit wird nachstehend berichtet.

2.1 Teilprojekt B2: Trag- und Verformungsverhalten alten Konstruktionsholzes

Die Beurteilung alter Holzkonstruktionen kann entweder mit Hilfe der angesammelten Erfahrung des mit der Bauwerkserhaltung und -sanierung betrauten Ingenieurs oder Architekten erfolgen, oder man versucht, die heutigen Sortiervorschriften sowie die Festlegungen über zulässige Spannungs- und Verformungszustände auf das alte Holz anzuwenden. Beide Wege können zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen führen und werden immer nur für den gerade aktuellen Einzelfall beschränkt. Eine systematisch angelegte Erforschung der sonstigen Möglichkeiten, zu zuverlässigen und am Bau praktikablen Beurteilungsmethoden zu gelangen, liegt bisher nicht vor. Es existieren zwar einige Prüfmethoden, deren Anwendung an eingebautem Holz zu überprüfen ist, eine systematische und gezielte Untersuchung jedoch steht noch aus.

Dies war Ausgangspunkt für das Teilprojekt B2, bei dem zunächst die zerstörungsfreien bzw. zerstörungsarmen Holzprüfmethoden [nondestructive testing (NDT)] für die Anwendung an altem Konstruktionsholz zu erproben und zu verbessern waren. Da weitgehend nicht vorhanden, müssen Bindeglieder geschaffen werden zwischen der für die heutigen Verwendungszwecke von Holz etablierten zerstörenden Materialprüfung und den NDT-Methoden.

Eine umfangreiche Literaturrecherche sollte einen Überblick über den Stand der zerstörungsfreien Prüfung von Holz verschaffen und Hinweise auf geeignete Methoden für den Einsatz an historischen Konstruktionen geben. Weit über 100 Literaturstellen aus nationalen und vor allem aus internationalen Fachzeitschriften und Veröffentlichungen wurden ausgewertet. Wichtiges Kriterium für die Auswahl geeigneter Methoden war eine problemlose in-situ-Anwendbarkeit. Sehr wichtig sind aber auch abgesicherte Kenntnisse über die Beziehung zwischen der Meßgröße und der Zielgröße (gesuchte Holzeigenschaft).

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß viele Methoden für die Gütesortierung von »neuem« Holz oder für den Einsatz bei der Forschung entwickelt und angewendet wurden, daß aber sehr wenige Erfahrungen über in-situ-Messungen mit diesen Verfahren vorliegen.

Folgende Meßmethoden wurden für weitergehende Untersuchungen ausgewählt und die entsprechenden Geräte und Ausrüstungen beschafft. Eine genauere Beschreibung und Bewertung der Verfahren ist im SFB-Jahrbuch 1986 [17] veröffentlicht.

● **Eindringwiderstandsmessung:** Die Eindringtiefe eines Stahlstiftes, der mit definierter Energie ins Holz eingetrieben wird, ist ein Maß für die Holzgüte (Rohdichte).

● **Laufzeitmessung:** Aus der Laufzeit einer durch einmaliges Anschlagen des zu prüfenden Holzes erzeugten Welle und der Rohdichte kann der Elastizitätsmodul bestimmt werden.

● **Schwingungzeitmessung:** Der Elastizitätsmodul läßt sich auch aus der Schwingungszeit eines durch einmaliges Erregen frei schwingenden Körpers ermitteln.

● **Bohrkernanalyse:** Bohrkern können Aufschluß über Holzstruktur und Holzqualität geben. Neben Rohdichte und Holzfeuchte können in speziellen Prüfeinrichtungen auch Festigkeiten ermittelt werden.

Elastizitätsmodul, Rohdichte und Holzfeuchte sind neben der Ästigkeit (die in der Regel visuell bestimmt werden kann) die wichtigsten Kenngrößen zur Beurteilung der Festigkeit von Holz. Diese vier Einflußgrößen gilt es schnell und zuverlässig im Bauwerk zu ermitteln.

Die aufgrund der Literaturrecherche ausgewählten Verfahren wurden zunächst im Labor an »neuem« Holz angewendet, also an Holz, das den heutigen Güte- und Sortierkriterien genügt. Fichtenholz wurde zur Kalibrierung und zum Vergleich herangezogen, da es z. Zt. überwiegend als Bauholz eingesetzt wird und da über die Abhängigkeiten seiner mechanischen Eigenschaften (Festigkeiten) von Holzstruktur (Rohdichte, Ästigkeit) oder von elasti-

schen Eigenschaften (Elastizitätsmodul) bereits umfangreiche Kenntnisse vorhanden sind.

An »altem« Holz, das einerseits im Bauwerk schon über einen längeren Zeitraum mechanisch beansprucht war, andererseits nicht nach den heute gültigen Sortierkriterien ausgewählt wurde, konnten ebenso die zerstörungsfreien Methoden angewendet werden. Bisher wurden Kiefer (Karlsruhe-Durlach), Tanne (Schwetzingen und Merdingen bei Freiburg) und Eiche (Merdingen bei Freiburg) aus Sanierungsobjekten untersucht.

Die Erprobung der Eindringwiderstandsmessung mit dem Holzprüfgerät PILODYN 6J der Firma PROCEQ¹ an neuem Holz ist bereits abgeschlossen. Eine Veröffentlichung hierüber ist in Vorbereitung [18]. Exemplarisch für die Ergebnisse ist in **Bild 1** der Zusammenhang zwischen der Eindringtiefe und der Rohdichte von Fichtenholz gegeben. Messungen an altem Holz (Kiefer, Tanne, Eiche), die bereits durchgeführt und laufend ergänzt werden, zeigen bisher keine systematischen Abweichungen von den dargestellten Ergebnissen (**Bild 2**).

Mit den übrigen Verfahren liegen ebenfalls Meßergebnisse an altem und neuem Holz vor. Diese werden z. Zt. vervollständigt und für Veröffentlichungen aufbereitet.

Nach Anwendung der entsprechenden zerstörungsfreien Prüfmethoden wurden die Hölzer Festigkeitsuntersuchungen nach den einschlägigen Prüfnormen unterzogen. Festigkeitsuntersuchungen an altem Holz sollen Aufschluß geben, ob andere Wuchsbedingungen, andere Auswahl der Hölzer, die Belastungsdauer oder Pilz- und Insektenbefall das Trag- und Verformungsverhalten beeinflussen. Dabei wurde zunächst das Bauteil (bisher

1 PROCEQ SA, Riesbachstraße 57, CH-8034 Zürich, Schweiz

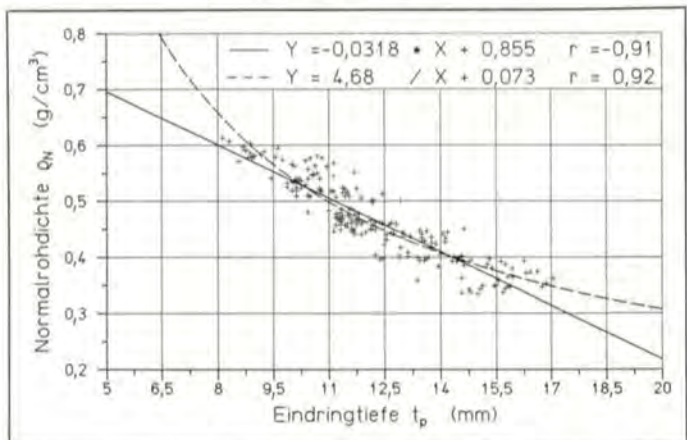


Bild 1: Zusammenhang zwischen der Rohdichte und der Eindringtiefe (PILODYN 6J) bei Fichte (*picea abies*)
+ = Mittelwert aus 16 Messungen

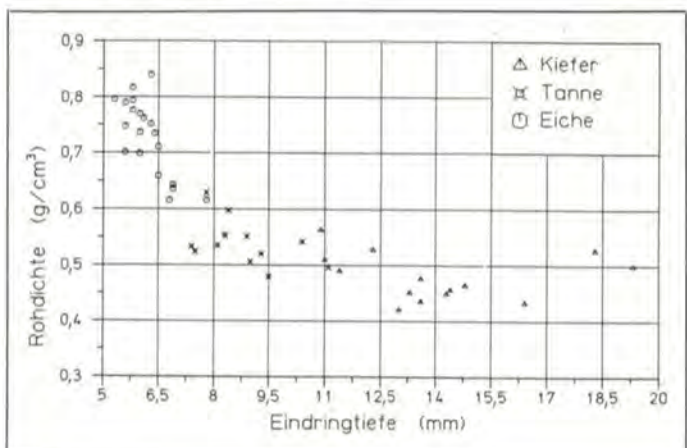


Bild 2: Zusammenhang zwischen der Rohdichte und der Eindringtiefe; Messungen an Eiche, Kiefer und Tanne aus dem 18. Jahrhundert

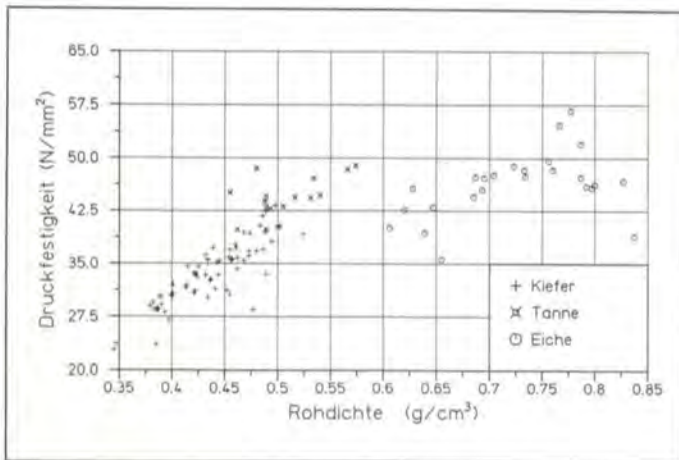


Bild 3: Zusammenhang zwischen der Druckfestigkeit und der Rohdichte von »altem« Holz (Holzfeuchte 15 %)

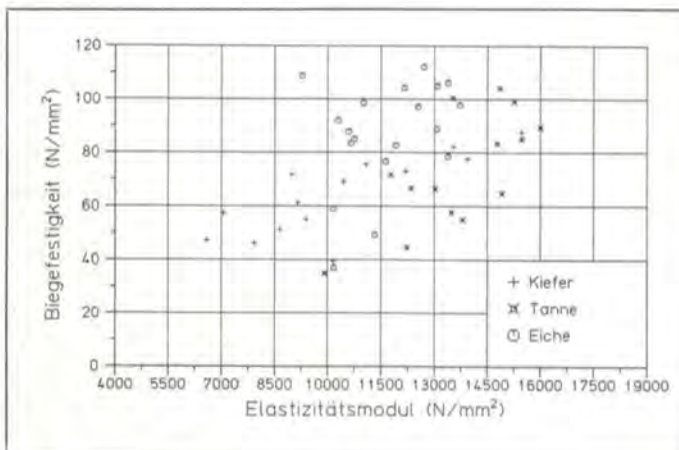


Bild 4: Zusammenhang zwischen der Biegefestigkeit und dem dynamischen, mittels GRINDO-SONIC ermittelten Biege-Elastizitätsmodul

Deckenbalken) mit der im Bauwerk aufgetretenen Beanspruchungsart (Biegung) geprüft. Aus den gering beanspruchten Bereichen wurden nach dem Versagen des Bauteils kleine fehlerfreie Proben entnommen und nach den entsprechenden Normen untersucht (Biege-, Druckprüfung, Rohdichte, Feuchte).

Bild 3 zeigt die Ergebnisse der Druckversuche nach DIN 52 185 von Kiefer, Tanne und Eiche. Die bekannte Abhängigkeit der Druckfestigkeit von der Rohdichte ist auch bei den bisher untersuchten Hölzern deutlich. Die Ergebnisse werden durch weitere Untersuchungen laufend ergänzt.

Da in den nächsten Jahren mit einer großen Datenmenge über Festigkeiten und die zugehörigen zerstörungsfrei ermittelten Meßgrößen gerechnet wird, wurde schon jetzt begonnen, die Daten systematisch auf einer Rechenanlage abzuspeichern und entsprechende Auswertprogramme zu entwickeln. Auf diese Weise können schnell und zuverlässig Abhängigkeiten der einzelnen Meßgrößen dargestellt und berechnet werden. In **Bild 4** ist z. B. die Abhängigkeit der Biegefestigkeit von Biegeproben ($b/h/l = 4/4/80$ cm) vom Biege-Elastizitätsmodul – ermittelt mit dem Meßgerät GRINDO-SONIC – dargestellt (siehe auch [19]). Eine lineare Abhängigkeit der Biegefestigkeit vom Biege-Elastizitätsmodul weist für die dargestellten Wertepaare einen Korrelationskoeffizienten von $r = 0,62$ auf. Wird eine multiple Regressionsanalyse der Biegefestigkeit in Abhängigkeit vom Biege-E-Modul und von der Rohdichte durchgeführt, erhält man in diesem Fall einen multiplen Korrelationskoeffizienten von $r = 0,74$. Dieses Beispiel kann noch nicht als Endergebnis angesehen werden, zeigt aber die Bedeutung einer solchen Auswertung.

Die bisherigen Ergebnisse haben erkennen lassen, daß es möglich und auch notwendig ist, altes Holz zerstörungsfrei zu unter-

suchen, um auf seine mechanischen Eigenschaften schließen zu können. Dazu sind die begonnenen Untersuchungen systematisch fortzuführen. Dadurch wird es möglich sein, eventuell vorhandene Zeit-, Material- und Beanspruchungsabhängigkeiten der Festigkeiten zu finden, um damit schließlich alte Holzkonstruktionen individuell beurteilen zu können.

2.2 Teilprojekt C1: Knotenpunkte und Verbindungsmittel alter Holzkonstruktionen

Die Tragsicherheit der Knotenpunkte und Verbindungsmittel alter Holzkonstruktionen (im folgenden kurz historische Knotenpunkte genannt) kann bisher nur äußerst schwierig und unzuverlässig beurteilt werden. Die einschlägigen technischen Baubestimmungen sind auf moderne Ingenieurholzbauwerke ausgerichtet und können für die Beurteilung nur unter Vorbehalt herangezogen werden.

Experimentelle und theoretische Untersuchungen an historischen Knotenpunkten wurden bisher im Rahmen von speziellen Sanierungsarbeiten an einzelnen Objekten und nur in sehr geringem Umfang durchgeführt. Man geht vielfach davon aus, daß bei alten Bauweisen die Anschlüsse nur einen geringen Prozentsatz der Tragfähigkeit des Holzquerschnittes übertragen können. Rechnerische Abschätzungen, denen man moderne Betrachtungsweisen zugrunde legt, vernachlässigen aber beispielsweise den durch Reibung übertragbaren Kraftanteil.

Eine Literaturschau der verfügbaren Schriften über alte Holzbauwerke bildete die Grundlage zur Dokumentation der wichtigsten, häufig vorkommenden historischen Knotenpunkte. Diese Dokumentation soll alle für die weiteren Untersuchungen notwendigen Informationen erfassen, also die Knotentypen, ihre Abmessungen, ihre Anwendungsbereiche, die Beanspruchungen im Bauwerk und die Häufigkeiten ihres Auftretens in historischen Holzkonstruktionen.

Als Längs-, Quer-, Anschluß- und Eckverbindungen in historischen Holzkonstruktionen wurden im Laufe der Jahrhunderte die fünf Grundtypen Verblattung, Verzapfung, Versatzung, Verkämmung, Aufklauung sowie zahlreiche Varianten dieser Grundtypen und Mischformen aus mehreren Grundtypen entwickelt (**Bilder 5 und 6**). Die für die weiteren Untersuchungen notwendigen Informationen ergaben aus der Literatur nur ein lückenhaftes Bild. Die genannten Grundtypen der historischen Knotenpunkte lassen sich zwar meistens im Schrifttum wiederfinden, Angaben über ihre Anwendung, ihre Beanspruchung und die Häufigkeit ihres Auftretens gibt es jedoch selten. Sind die Verbindungen zeichnerisch dargestellt, so fehlen oft ausreichende Angaben über die geometrischen Maße. Verwertbare Hinweise, die über die Aufzählung und Darstellung historischer Knotenpunkte hinausgehen, wurden erst ab etwa 1850 gefunden. Die Quellen zu solchen Informationen bleiben in der Regel unbekannt.

Bestandsaufnahmen vor Ort sollen die o. g. Erkenntnisse, vor allem hinsichtlich auftretender Mängel und Schäden infolge ungeschickter Konstruktion und biologischer Holzzerstörungen, ergänzen.

Die bisher besichtigten Objekte ließen erkennen, daß handwerklich einfache Verbindungen bevorzugt wurden. Die Ursache von teilweise sehr großen Verformungen der Holzkonstruktionen sind offenbar:

- Setzungen des Baugrundes,
- Tierische und pflanzliche Schädigungen einzelner Konstruktionsglieder infolge unzureichender Gebäudewartung,
- Unsachgemäße Eingriffe in die Konstruktion,
- Nutzungsänderungen,
- Entfernung wichtiger Konstruktionsteile.

Obwohl eine Literaturschau aus baugeschichtlicher Sicht kein Spiegelbild der verwendeten historischen Knotenpunkte wiedergeben konnte und die Bestandsaufnahme vor Ort nur stichprobenartig erfolgte, konnten für die Festlegung der Ver-

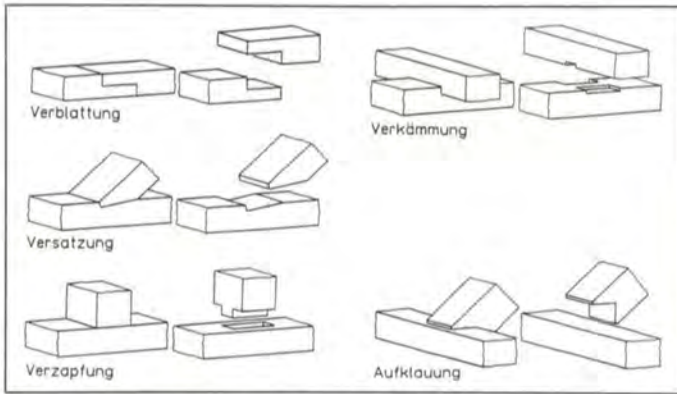


Bild 5: Beispiele für die Grundtypen der Knotenpunkte

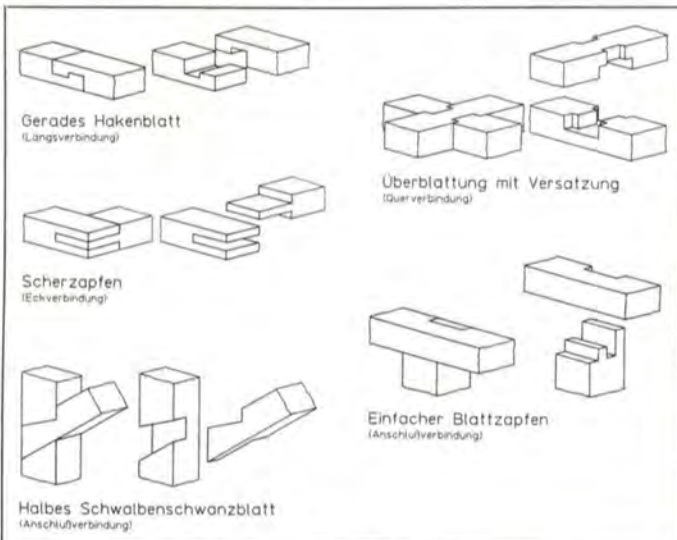


Bild 6: Beispiele für Varianten (links) und Mischformen (rechts) einiger Grundtypen

suchskörper im Rahmen dieses Teilprojektes genügend Informationen gesammelt werden.

Das Trag- und Verformungsverhalten der historischen Knotenpunkte wird in Belastungsversuchen unter gezielter Berücksichtigung der Einflüsse der charakteristischen Holzeigenschaften, der Herstellung und der Beanspruchungsart untersucht [20]. Während der Versuchsdurchführung werden die Verformungen in den Knotenpunkten in Abhängigkeit von der Lasteinwirkung aufgezeichnet. Die hieraus resultierenden Verformungskenngrößen sowie die Tragkraft und die Versagensursachen sollen zur Schaffung von Beurteilungskriterien der historischen Knotenpunkte dienen.

Der Großteil der Versuche wird mit aus Bauschnittholz unterschiedlicher Holzfeuchte hergestellten Knotenpunkten durchgeführt (Bild 7). Die Verwendung von Bauschnittholz ermöglicht Untersuchungen in Versuchsserien, die jeweils aus gleichartigen Prüfkörpern bestehen und bei gleichen Randbedingungen geprüft werden können. Nur dadurch ist eine wegen der streuenden Einflußparameter notwendige statistische Auswertung der Versuchsergebnisse möglich. Um den Einfluß der streuenden Holzeigenschaften so gering wie möglich zu halten, wird das Versuchsmaterial zerstörungsarm (PILODYN) oder zerstörungsfrei (GRINDO-SONIC, STRESS-WAVE-TIMER) auf die wichtigsten Holzeigenschaften hin untersucht und sortiert. Versuche mit Knotenpunkten aus historischem Bauholz oder originalen Knotenpunkten erscheinen im Hinblick auf eine statistische Auswertung für Versuchsserien wenig geeignet, da sie nur in ungenügender Anzahl vorhanden sind. Einzelversuche, die mit solchen Knotenpunkten durchzuführen sind, sollen aber die Übertragbarkeit der in den Versuchsserien gewonnenen Erkenntnisse auf die historischen Knotenpunkte erleichtern.

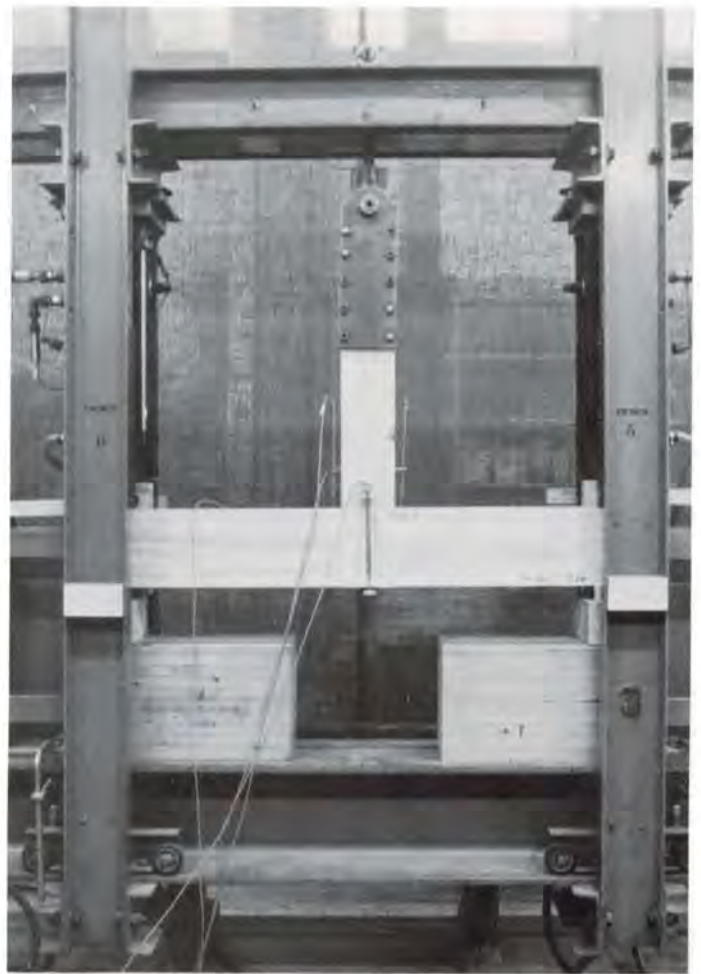


Bild 7: Versuchskörper mit einem halben Schwalbenschwanzblatt in der Prüfeinrichtung

Bei den bisher untersuchten Blattverbindungen mit Holznagel, Zapfenverbindungen mit Holznagel, Hakenblattverbindungen und Schwalbenschwanzverbindungen in unterschiedlichen Variationen traten bis zum Erreichen der Versagenslast Verschiebungen zwischen 10 mm und 20 mm auf. Die Bruchlasten lagen zwischen 10 kN und 40 kN. Die bisher durchgeführten Versuche haben gezeigt, daß die im neuzeitlichen Holzbau zugelassenen Höchstverformungen zur Einhaltung der Gebrauchstauglichkeit für alte Holzkonstruktionen neu definiert werden müssen. Eine ebenso wichtige Erkenntnis ist, daß gleiche Verbindungen, die aus Holz unterschiedlicher Feuchte hergestellt wurden, ein deutlich unterschiedliches Trag- und Verformungsverhalten aufweisen. Risse, Quetschungen und Gesamtdeformationen können eine wichtige Information über die bisherige Beanspruchungsgeschichte und die Resttragfähigkeit eines historischen Knotenpunktes geben. In rechnerischen Analysen wird überprüft, inwieweit das Trag- und Verformungsverhalten der experimentell untersuchten historischen Knotenpunkte mit Finite-Elemente-Methoden nachvollzogen werden kann. Bei befriedigender Übereinstimmung mit den praktischen Versuchen (ähnliches Verformungsbild, wirklichkeitsnaher Kraftfluß, Spannungsspitzen in den tatsächlichen Versagenspunkten) können dann sowohl die streuenden Materialeigenschaften des Holzes als auch geometrische Varianten theoretisch untersucht und die Ergebnisse solcher Analysen einer statistischen Auswertung zugeführt werden.

Für den Fall, daß die kraftübertragenden Kontaktflächen eines Knotenpunktes im Ausgangszustand nur druckbeansprucht sind, scheint eine Simulation auf rechnerischem Wege möglich. Vergleicht man die in Bild 8 und Bild 9 dargestellten Verformungsbilder einer Hakenblattverbindung aus Versuch und Berechnung, so ist eine sehr gute Übereinstimmung erkennbar. Der Einfluß unter-



Bild 8: Hakenblattverbindung in der Prüfeinrichtung nach dem Versuch

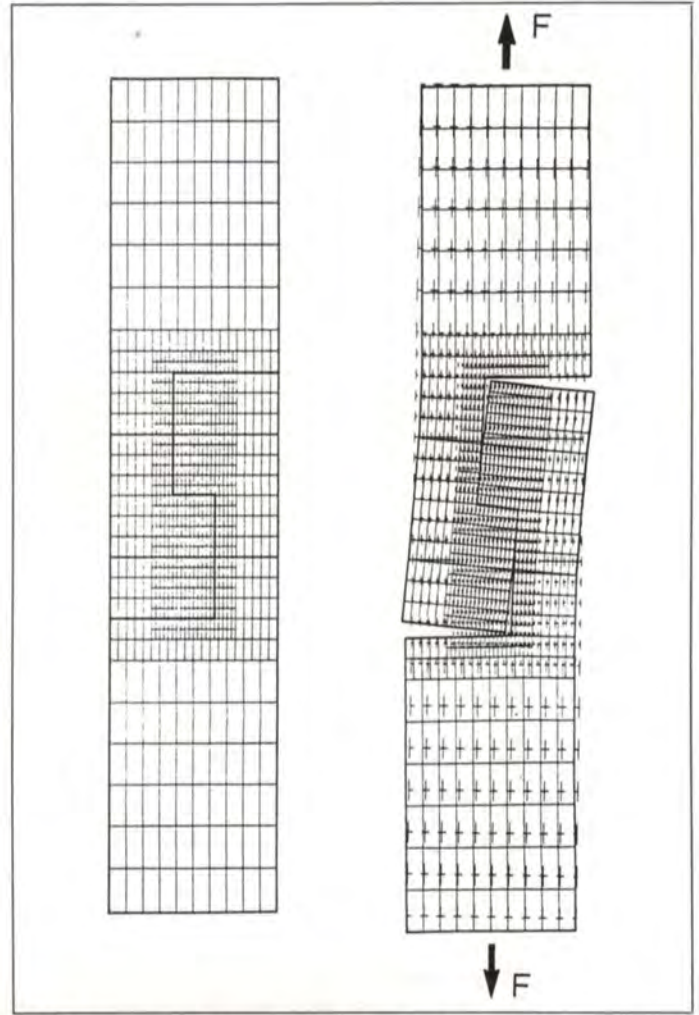


Bild 9: Hakenblattverbindung mit der Finite-Elemente-Methode simuliert – links unbelasteter Zustand; rechts belasteter Zustand; der unbelastete Zustand ist zum Vergleich gestrichelt angedeutet

schiedlicher Hakenblattgeometrien und streuender Materialeigenschaften wird aufgrund der ersten Erkenntnisse mit Finite-Elemente-Methoden untersucht. Wirken in den Kontaktflächen der Knotenpunkte im Ausgangszustand neben einer Druckbeanspruchung auch noch Reibungskräfte, wie dies bei der Schwalbenschwanzverbindung der Fall ist, dann bereitet eine Simulation der Kontaktschicht allerdings z. Zt. noch Schwierigkeiten, da der Reibungsanteil an der Kraftübertragung mit linear steigender Belastung nichtlinear zunimmt.

Die drei beschriebenen Methoden – Dokumentation, Versuche, rechnerische Analyse – führen zu Grundlagen für die Erörterung des statisch-konstruktiven Prinzips der Wirkungsweise historischer Knotenpunkte und im weiteren Verlauf der Forschung zu Beurteilungskriterien für deren Trag- und Verformungsverhalten. Um den Einfluß der Belastungsgeschichte eines Knotenpunktes auf seine Resttragfähigkeit beurteilen zu können, muß geklärt werden, wie sich die Knotenpunkte unter Langzeitbelastung, auch mit wechselnden Intensitäten der Lasteinwirkung, verhalten. Ein wechselnder Klimaeinfluß ist ebenfalls zu beachten. Schließlich sind die Übertragbarkeit der durch die Versuche mit Knotenpunkten aus Bauschnittholz gewonnenen Erkenntnisse auf historische Knotenpunkte zu prüfen und Beurteilungskriterien für das Trag- und Verformungsverhalten der historischen Knotenpunkte zu entwickeln.

3 Zuverlässigkeit von Brettschichtholzstützen

Das Problem der Sicherheit und Zuverlässigkeit von Bauwerken ist für den natürlichen Baustoff Holz, dessen Eigenschaften allein

durch die Wuchsbedingungen in weiten Grenzen streuen, von besonderer Bedeutung. Die Frage nach sicheren und gleichzeitig wirtschaftlichen Konstruktionen kann mit den herkömmlichen, auf empirischen Grundlagen ermittelten Sicherheitsfaktoren nur bedingt beantwortet werden. Die Einführung des Begriffes der Zuverlässigkeit im Rahmen eines wahrscheinlichkeitsorientierten Sicherheitskonzepts macht es möglich, die statistischen Verteilungsfunktionen der Basisvariablen in einem mechanischen Modell zu berücksichtigen, welches das Bauteilverhalten im Grenzzustand möglichst zutreffend beschreibt. Die Sicherheit eines Bauteils läßt sich mit der Versagenswahrscheinlichkeit p , zahlenmäßig bestimmen, wenn die Wahrscheinlichkeitsdichten der streuenden Einwirkung S und des ebenfalls streuenden Bauteilwiderstandes R bekannt sind (**Bild 10**). Das Ziel einer Forschungsarbeit [21] war die Ermittlung des Bauteilwiderstandes von Druckstäben aus Brettschichtholz unter Berücksichtigung des geometrisch und physikalisch nichtlinearen Verhaltens der Bauteile.

Wichtige Grundlage jeder Traglastberechnung ist die Spannungs-Dehnungs-Beziehung. Während bei Zugbeanspruchung parallel zur Faser ein linear-elastisch-sprödes Verhalten beobachtet wird, zeigt Fichtenholz bei Druckbeanspruchung ein plastisches Verformungsverhalten. Umfangreiche Untersuchungen zur Arbeitslinie druckbeanspruchter Fichtenbrettlamellen [22] führten zur Näherungskurve in **Bild 11**, deren Verlauf durch vier charakteristische Größen – die Druckfestigkeit σ_{dB} , den Elastizitätsmodul E_d , die Bruchstauchung ϵ_{dB} und die asymptotische Endfestigkeit σ_{dBA} – festgelegt ist. Der Verlauf der Arbeitslinie bei Zugbeanspruchung wird durch zwei charakteristische Größen – die Zugfe-

stigkeit σ_{zB} und den Elastizitätsmodul E_z – hinreichend beschrieben. Die Erwartungswerte der insgesamt sechs charakteristischen Größen der Spannungs-Dehnungs-Beziehung werden für jeden Lamellenabschnitt von 150 mm Länge über Regressionsgleichungen aus fünf Einwirkungskenngrößen – der Darrohdichte, der Ästigkeit, dem Druckholzanteil, der Holzfeuchte und einer evtl. vorhandenen Keilzinkenverbindung – ermittelt. Damit kann das Festigkeitsverhalten druck- und zugbeanspruchter Bretelemente als stochastische Größe aus vorgegebenen Kenngrößen ermittelt werden.

Das stochastische Modell ist definiert als Gesamtheit der Annahmen und Beziehungen für das wahrscheinlichkeitstheoretische Erfassen von Einflüssen. Es umfaßt die statistischen Verteilungsfunktionen der wesentlichen Basisvariablen. Diese sind einmal die oben erwähnten fünf Kenngrößen, die als Strukturmerkmale das Festigkeits- und Verformungsverhalten des Holzes beeinflussen, zum anderen wirken sich geometrische Imperfektionen unmittelbar auf die Tragfähigkeit von Holzdruckstäben aus.

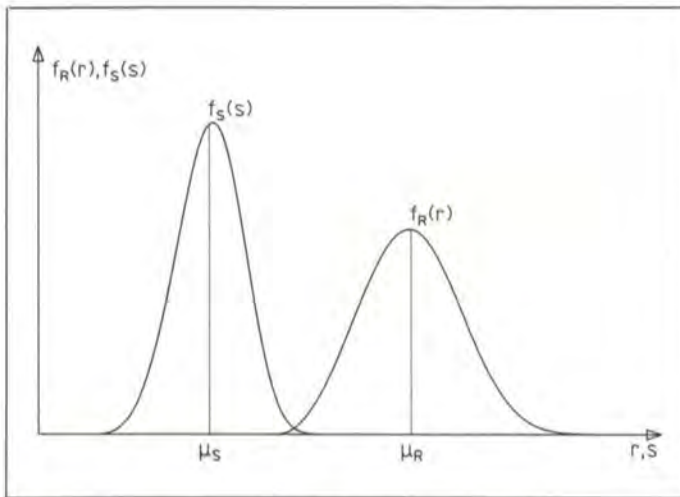


Bild 10: Wahrscheinlichkeitsdichte der Einwirkung S und des Bauteilwiderstandes R

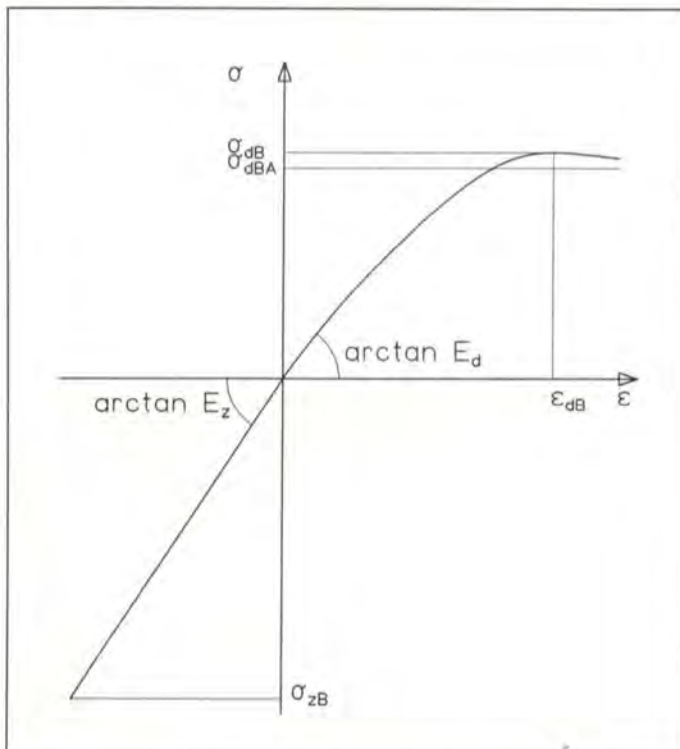


Bild 11: Spannungs-Dehnungs-Beziehung von Fichtenbrettlamellen nach Glos [22]

Die Häufigkeitsverteilung der Darrohdichte als das wichtigste Strukturmerkmal für das Festigkeitsverhalten von Fichtenbrettlamellen ist in **Bild 12** dargestellt. Die Häufigkeitsverteilungen der Ästigkeit – getrennt nach Güteklassen –, des Druckholzanteils, der Holzfeuchte eingebauter Stützen und des Keilzinkenabstands sind ebenfalls Bestandteile des stochastischen Modells. Die statistischen Verteilungsfunktionen der geometrischen Imperfektionen wurden im Rahmen eines Meßprogrammes [23] ermittelt. Während die Stützhöhe als deterministische Größe angesehen werden kann, werden die Abweichungen der Querschnittsabmessungen von den Sollmaßen sowie die Vorkrümmung amplitude der Stabachse im stochastischen Modell berücksichtigt.

Die statistischen Verteilungsfunktionen aller maßgebenden Einflußgrößen gehen in die Simulation des Stützenaufbaus ein. Mit der Simulation wird der Herstellungsprozeß von Brettschichtholzbauteilen nachgebildet. Modelliert man eine große Anzahl von Druckstäben mit vorgegebenen Abmessungen, so bilden deren Traglasten eine Stichprobe des Bauteilwiderstandes. Von dieser

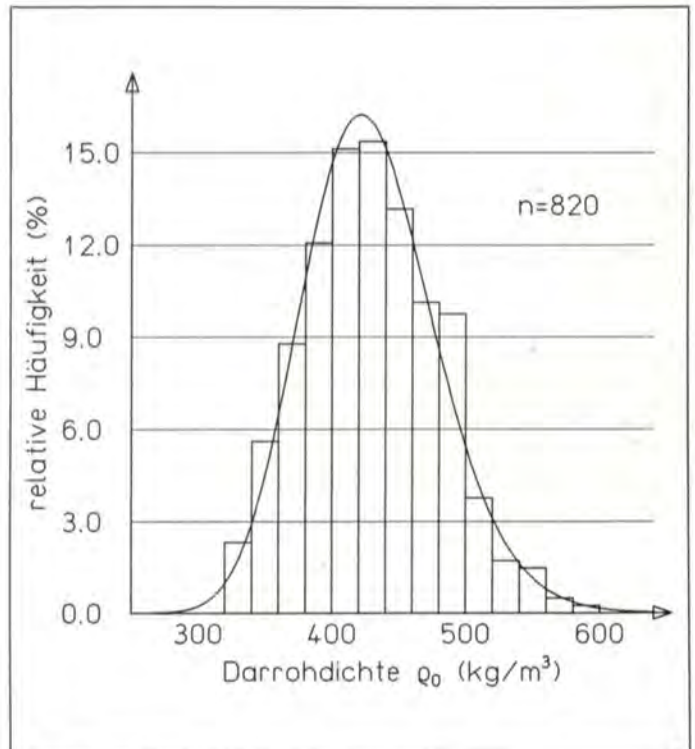


Bild 12: Häufigkeitsverteilung der Darrohdichte

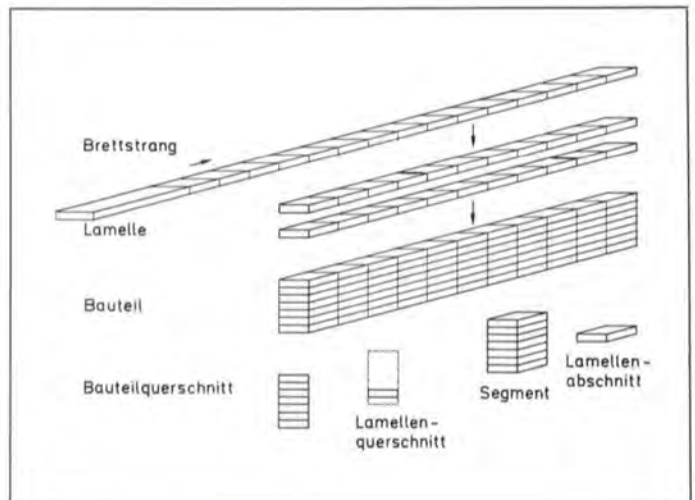


Bild 13: Herstellung eines Brettschichtholzbauteils und Bezeichnungen

Stichprobe kann auf die Wahrscheinlichkeitsdichte der Grundgesamtheit geschlossen werden.

In der Bundesrepublik wird Brettschichtholz aus keilgezinkten Brettsträngen hergestellt, die entsprechend der Bauteillänge in Lamellen unterteilt werden (Bild 13). Die Eigenschaften benachbarter Lamellen im Querschnitt sind dabei voneinander unabhängig. Korrelationen der Eigenschaften treten nur in Brett längsrichtung zwischen zwei Keilzinkenverbindungen auf. Die Simulation

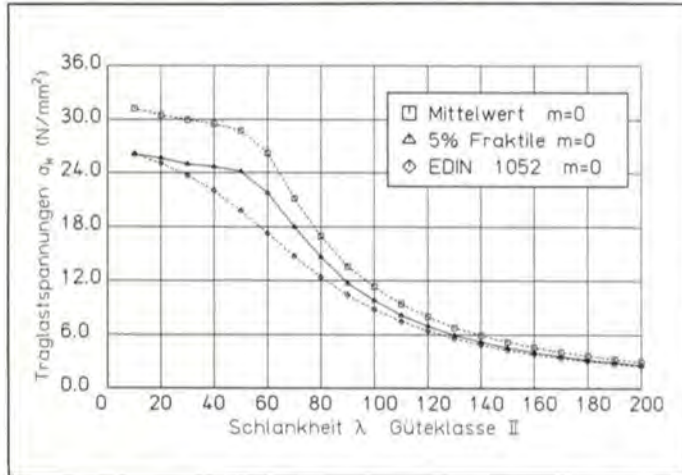


Bild 14: Traglastspannungen gelenkig gelagerter Stützen aus Brettschichtholz, Güteklasse II, $m = 0$

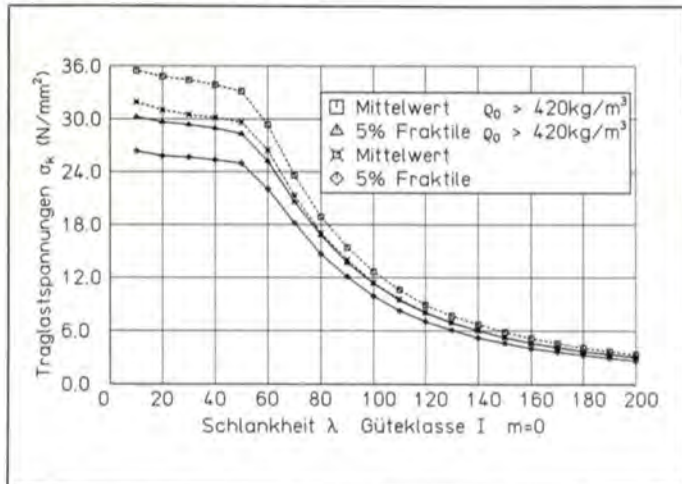


Bild 15: Traglastspannungen gelenkig gelagerter Stützen aus Brettschichtholz, Güteklasse I, $m = 0$

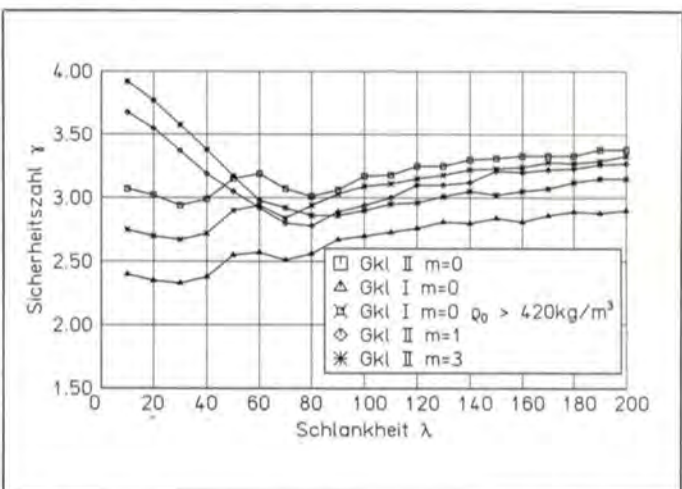


Bild 16: Sicherheitszahlen γ für Brettschichtholzstützen gegenüber der 5%-Fraktile der Traglastspannung

beginnt mit der Festlegung der Lage der Keilzinkenverbindungen aus der Häufigkeitsverteilung des Keilzinkenabstandes. Anschließend wird jedem Lamellenquerschnitt ein Kenngrößenvektor aus Darrohdichte, Ästigkeit, Druckholzanteil und Holzfeuchte zugeordnet. Während Ästigkeit und Druckholzanteil zufällig und unabhängig zugewiesen werden, wird die Darrohdichte innerhalb eines Brettes als konstant angenommen. Die Holzfeuchte wird über das gesamte Bauteil als unveränderlich angesehen. Mit den simulierten Einwirkungskenngrößen werden die Werte der sechs charakteristischen Größen der Spannungs-Dehnungs-Beziehung berechnet. Damit ist die Arbeitslinie in jedem Lamellenquerschnitt bekannt. Abgeschlossen wird die Modellierung einer Brettschichtholzstütze mit der Simulation der geometrischen Imperfektionen.

Das mechanische Modell beschreibt das Verhalten von Druckstäben aus Brettschichtholz, die durch Normalkräfte und Querlasten beansprucht werden. Plastische Verformungen im Querschnitt führen zu Steifigkeitsänderungen, die mit dem Sekantenmodulverfahren erfaßt werden. Im Verlauf der Traglastberechnung eines Druckstabes, die nur iterativ erfolgen kann, ändern sich die Steifigkeiten in jedem Querschnitt mit jeder Schnittgrößenänderung. Für vorgegebene Lasten ist daher im Rahmen einer Steifigkeitsiteration die wiederholte Berechnung des Stabwerkes notwendig. Als baustatisches Rechenverfahren wurde das verallgemeinerte Verschiebungsgrößenverfahren in Matrixschreibweise gewählt. Zur Berücksichtigung einer spannungslosen Vorverformung und von veränderlichen Eigenschaften entlang der Stabachse wird der Stab in 150 mm lange Segmente mit konstanten Steifigkeitswerten unterteilt. Diese Segmente bilden polygonzugartig die Vorverformungsfigur einer Sinushalbwellen nach. Die Berechnung eines Stabes wird für eine vorgegebene Last so oft wiederholt, bis sich entweder die Steifigkeiten nicht mehr ändern oder in einem der Stabquerschnitte Versagen festgestellt wird. Im Versagensfall bildet der Schätzwert eine Obergrenze der Traglast, ansonsten eine Untergrenze. Mit neuen Schätzwerten als Mittel zwischen Ober- und Untergrenze kann die Traglast dann immer genauer eingegrenzt werden.

Die Auswertung umfangreicher Simulationsrechnungen führte zu Traglastkurven gelenkig gelagerter Einfeldstützen als Mittelwert und 5 %-Fraktile der Traglastspannung. Die Berechnungen wurden für Stützen mit Rechteckquerschnitt und sieben Lamellen für sämtliche Schlankheitswerte durchgeführt. Die Anzahl der Simulationen für jede Schlankheit und planmäßige Exzentrizität lag zwischen 400 für große Schlankheiten und 1000 im unteren Schlankheitsbereich. Jeder Stichprobe von Traglastspannungen wurde die Wahrscheinlichkeitsdichte der 3parametrischen Weibullverteilung angepaßt.

Der Vergleich zwischen 5 %-Fraktile der Traglastspannung mit den Traglastspannungen nach der Elastizitätstheorie [24, 25] zeigt am Beispiel der planmäßig mittig belasteten Stützen der Güteklasse II (Bild 14) den Gewinn der strengeren Theorie. Insbesondere im mittleren Schlankheitsbereich zwischen $\lambda = 40$ und $\lambda = 80$ wirkt sich das Arbeitsvermögen des Holzes bei Druckbeanspruchung parallel zur Faser traglaststeigernd aus. Die ermittelten Traglastkurven der Güteklasse I liegen nur unwesentlich – etwa 1,5 % – über denjenigen der Güteklasse II. Der Grund hierfür liegt in der Praxis der visuellen Gütesortierung. Hier ist die Ästigkeit das einzige Merkmal für die Einteilung in verschiedene Güteklassen. Die Häufigkeitsverteilung der Ästigkeit der Güteklasse II unterscheidet sich aber nicht wesentlich von derjenigen der Güteklasse I.

Signifikante Traglaststeigerungen können erst erwartet werden, wenn als zusätzlicher Sortierparameter eine höhere Mindestdarrohdichte als die derzeit gültige eingeführt wird. Erforderlich ist dazu allerdings eine maschinelle Gütesortierung. Als Beispiel mögen die Traglastkurven der Güteklasse I mit einer Mindestdarrohdichte von 420 kg/m^3 dienen (Bild 15); der Unterschied zur Güteklasse II beträgt für die 5 %-Fraktile bereits 16 %.

Definiert man als Sicherheitszahl γ den Quotienten aus 5 %-Fraktile der Traglastspannung zur zulässigen Spannung, so

erkennt man das zur Zeit uneinheitliche Sicherheitsniveau (**Bild 16**). Abhängig von Schlankheit, Güteklasse und planmäßiger Exzentrizität $m = \text{Ausmitte/Kernweite}$ liegt die Sicherheitszahl zur Zeit zwischen 2,3 und 3,9. Anzustreben ist jedoch ein einheitliches Sicherheitsniveau. Zumindest sollte die Forderung nach einem Sicherheitsabstand von der Eulerschen Knicklast aufgegeben werden, der bisher die zulässigen Spannungen von Holzdruckstäben im oberen Schlankheitsbereich bestimmte.

Die Angabe von charakteristischen Werten der Traglastspannung stellt eine Grundlage zur wahrscheinlichkeitsorientierten Bemessung von Holzdruckstäben dar und kann zu einer wirtschaftlichen Bemessung von Stützen aus Brettschichtholz führen.

4 Entwicklung und Prüfung neuer Verbindungsmittel*

Mit der Weiterentwicklung des Ingenieurholzbau es ist immer auch die Neuentwicklung wirkungsvoller Verbindungsmittel verbunden. Dies liegt zum einen an dem Bestreben, die Anschlußflächen der Verbindungen möglichst klein zu halten, zum anderen aber auch an dem Wunsch nach einer möglichst wirtschaftlichen Herstellung der Verbindungen. Im Zuge dieser Entwicklung wurde im modernen Ingenieurholzbau vor allem die Verbindungstechnik unter Heranziehung von verschiedenartigen Verbindungsmitteln aus **Metall** (wie z. B. Nägel, Nagelplatten, Stahlbleche, Stahlblechformteile und Stabdübel) vorangetrieben. Damit verbunden sind zwangsläufig aber Fragen des Korrosionsschutzes, des Brandschutzes sowie der Ästhetik des Holzbaues, wodurch die Anwendung derartiger Verbindungstechniken, trotz aller statischen und konstruktiven Vorteile, oft beschränkt bleiben muß oder erst durch kostensteigernde Zusatzmaßnahmen (z. B. im Brandschutz) ermöglicht wird. Auch in den Fällen, in denen man den Einfluß der magnetischen Eigenschaften ausschließen oder die Konstruktion für elektromagnetische Wellen durchsichtig machen will, ist die Verwendung von nichtmetallischen Verbindungsmitteln wünschenswert.

Da die Holzverarbeitende Industrie mit ursprünglich anderen Zielsetzungen hochwertige holzhaltige Werkstoffe entwickelt hat, die für tragende Verbindungen aber durchaus geeignet erscheinen, ist es das Ziel dieses in mehreren Stufen durchzuführenden Forschungsvorhabens, bestehende holzhaltige und aus der Sicht der Tragfähigkeit und der Verformungskennwerte hochwertige Werkstoffe auf ihre Eignung als mechanische Verbindungsmittel zu untersuchen und aufgrund theoretischer und versuchstechnischer Arbeiten für die Bemessung und Ausführung derartiger Verbindungen entsprechende Grundlagen zu schaffen.

Im ersten Abschnitt dieses Forschungsvorhabens [13] wurden die physikalischen, im besonderen die mechanischen Eigenschaften von geeignet erscheinendem Kunstharz-Preßholz untersucht. Besondere Beachtung fand dabei die Untersuchung der Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften vom Schichtaufbau, von der Furnierdicke und von der Plattendicke. Es zeigte sich, daß das untersuchte Kunstharz-Preßholz den gewünschten Eigenschaften mit Ausnahme der festgestellten großen Kerbempfindlichkeit sehr nahe kommt. Weiter war festzustellen, daß durch Änderungen der Furnierdicke und des Schichtaufbaues die Eigenschaften merklich verändert und gesteuert werden können. Im zweiten Abschnitt soll nun das Trag- und Verformungsverhalten von mechanischen Verbindungen erforscht werden, bei denen die nichtmetallischen, holzhaltigen Werkstoffe als Stifte oder Stabdübel einerseits sowie Laschen und Knotenplatten andererseits eingesetzt werden. Dabei sind zunächst einige im Laufe der Bearbeitung des ersten Abschnittes aufgetretene Fragen näher zu klären. Dies scheint insbesondere für eine Reduzierung der Kerbempfindlichkeit der bisher untersuchten Kunstharz-

Preßhölzer von besonderer Wichtigkeit. In Zusammenarbeit mit den Herstellern dieser Werkstoffe wird versucht, durch systematische Variation der Parameter Plattenaufbau, zusätzliche Verstärkungen (wie z. B. Kunststoffeinslagen), Schlankheit und Einfluß des Lochanteiles am Bruttoquerschnitt die Materialeigenschaften zu verbessern. Das Ziel dieses Untersuchungsteils liegt in der Angabe von Kerbfaktoren, die beim Tragfähigkeitsnachweis von gelochten Platten zu berücksichtigen sind.

Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeit ist die Klärung der Frage, inwieweit die für Holzverbindungen mit metallischen Verbindungsmitteln bekannten Tragfähigkeitshypothesen unter Zugrundelegung der im ersten Abschnitt ermittelten Werkstoffkennwerte auf Verbindungen mit diesen nichtmetallischen Werkstoffen übertragen werden können, und eine anschließende Überprüfung der Theorie durch systematische Versuche an ein- und mehrschnittigen Verbindungen.

Aufgrund der erwarteten Ergebnisse soll ein allgemeingültiges Konzept zur Beurteilung des Verformungsverhaltens und der Tragfähigkeit vorgelegt werden. Damit ist eine breite Grundlage für die Ausführung (größtmögliche Anschlußdicke) und den Standsicherheitsnachweis von Bauteilen mit solchen Verbindungsmitteln geschaffen.

5 Die Auswirkung wechselnder Klimabeanspruchungen auf Formänderungsverhalten und Tragfähigkeit genagelter Holzspanplatten-Vollholz-Verbindungen

Genagelte Spanplatten-Vollholz-Verbindungen werden heute überwiegend in Wand-, Dach- und Deckenelementen eingesetzt, in denen die Verbindungen infolge äußerer Lasteinwirkung in Plattenebene auf Abscheren und zum Teil rechtwinklig dazu auf Herausziehen beansprucht werden. Die Nagelverbindungen der Außenbauteile sind zusätzlich wechselnden Klimabedingungen ausgesetzt. Das Ausmaß der Feuchteänderungen im Bauteil wird im wesentlichen von seinem bauphysikalischen Aufbau, der Feuchte des Holzes und der Holzwerkstoffe zum Zeitpunkt der Verarbeitung sowie von ihrem Sorptionsverhalten im eingebauten Zustand beeinflusst. Durch Versuche sollte geklärt werden, welchen Einfluß extreme Feuchteänderungen auf das Trag- und Verformungsverhalten von Spanplatten-Fichtenholz-Verbindungen haben können. Hierzu wurden Druckscherkörper in Kurz- und Langzeitversuchen mit dem Ziel untersucht, das Verhalten der Nagelverbindungen unter natürlichen Klimaverhältnissen durch zeitgeraffte Versuche in definiertem Wechselklima zu simulieren [26].

In **Bild 17** ist der Aufbau der Druckscherkörper dargestellt.

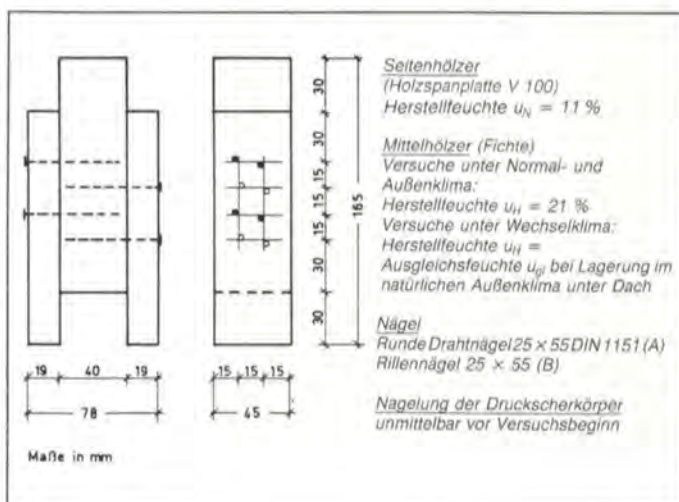


Bild 17: Aufbau der Druckscherkörper.

* Ehlbeck, J.; Eberhart, O.: Entwicklung und Prüfung neuer Verbindungsmittel aus Hartholz, Preßschichtholz und ähnlichen holzhaltigen Werkstoffen für tragende Verbindungen im Holzbau, 2. Teil: Tragfähigkeits- und Verformungsverhalten von Verbindungen (Laufendes Forschungsvorhaben).

Klimatische Einwirkung	Infolge Lagerung der Scherkörper im 1 Normalklima 2 natürlichen Außenklima unter Dach 3a Wechselklima 20/95–40/20 7 Zyklen; 2 Tage je Zyklus 3b, c, d Wechselklima 20/85–40/40 5, 10, 9 Zyklen; 4, 2, 4 Tage je Zyklus
	Krafteinwirkung
Langzeitbelastung Über 12 Monate in Klima 1 und 2 Über 14, 20, 36 Tage in Klima 3a bis d konstante Belastung mit zul F = 2000 N von 5 bzw. 10 Scherkörpern je Nageltyp und Klimabereich regelmäßige Messung der Verschiebungen mittels 1/100 Meßuhr nach Entlastung und Kriecherholung kontinuierliche Belastung bis max F bzw. F_{15} (bei $v = 15$ mm)	

Tabelle 1: Einwirkung auf die Druckscherkörper.

In **Tabelle 1** sind die Einwirkungen auf die Prüfkörper angegeben. Die Versuche unter Normal- und Außenklima begannen alle im Dezember 1982, während die Versuche unter Wechselklima zu verschiedenen Zeitpunkten (Januar, April, September 1983 und Mai 1984) angesetzt wurden.

Die statischen Kurzzeitprüfungen erfolgten gemäß Tabelle 1 in Anlehnung an ISO 6891 »Timber structures – Joints made with mechanical fasteners«. Parallel zum Versuchsbeginn der Kurz- und Langzeitversuche unter Normal- und Außenklima wurden je fünf Scherkörper »A« (runde Drahtnägel) und »B« (Rillennägel) zum Zeitpunkt »O« (»Nullversuche«) statisch geprüft. Die Verschiebungen bzw. Bruchlasten der »Nullversuche« wurden zur Beurteilung des Einflusses der Feuchteänderungen auf alle nachfolgenden Kurzzeitversuche bzw. Bruchversuche nach Abschluß

der Langzeitbelastung unter Normal-, Außen- und Wechselklima herangezogen.

Eine Austrocknung der unbelastet gelagerten Nagelverbindungen führte infolge Schwindens zu einer Verbreiterung der Verbindungsfugen, deren Einfluß auf die Verschiebungszunahme gegenüber den vergleichbaren Werten der »Nullversuche« mit fortschreitender Belastung und Verfestigung des Nagelbettes nachließ. Selbst bei extremer Austrocknung von »A« (runde Drahtnägel) bzw. »B« (Rillennägel) unter Wechselklima (3a: $\Delta u_{F1} \approx -13\%$ und $\Delta u_{Sp} \approx -5\%$) wurden jedoch mittlere Verschiebungen $v_K (\Delta u) = 0,5$ mm unter zul F bzw. 1,8 mm unter $2 \times$ zul F nicht überschritten.

Bei den Langzeitversuchen unter Normal-, Außen- und Wechselklima wurden die höchsten Kriechverformungen $v_L (\Delta u(t)) = 1,3$ mm von »A« und 1,4 mm von »B« ebenfalls unter extremem Wechselklima (3a) festgestellt, entsprechend dem nahezu dreifachen Wert $v_K (\Delta u)$ unter zul F.

Die bei fast allen Kurz- und Langzeitversuchen gegenüber »A« etwas größeren Verschiebungen von »B« sind wahrscheinlich auf die Schaftprofilierung des Rillennagels (B) zurückzuführen. Der Verzahnungseffekt des Rillennagels im Holz wirkt sich erst oberhalb einer Verschiebung von 1,5 mm durch höhere und geringer streuende Höchstlasten gegenüber einem glattschaftigen Nagel (A) aus.

Die Tragfähigkeiten der unter den drei Klimalagerungen unbelasteten wie auch der langzeitbelasteten Scherkörper »A« verringerten sich nur nach extremer Austrocknung ($\Delta u_{F1} > 7\%$) gegenüber den »Nullversuchen«, während die Scherkörper »B« in allen Fällen ansteigende Höchstlasten erkennen ließen. Höchstlasten $\max F \geq 3 \times$ zul F wurden stets erreicht. Die Bruchlasten von »B« (Rillennägel) wurden meist bei Verformungen unterhalb eines Verschiebungswertes von 15 mm erreicht, der überwiegend für die Höchstlasten von »A« maßgebend wurde.

Die erhöhte Tragfähigkeit von »B« gegenüber den »Nullversuchen« läßt den Schluß zu, daß sich auch wiederholte Feuchteänderungen $\Delta u_{Sp} \approx \pm 5\%$ nicht nachteilig auf die maßgebenden Spanplatteeigenschaften auswirken.

Für die Scherkörper unter Langzeitbelastung wurde eine Vorrichtung entwickelt, in der fünf übereinander angeordnete Druckscherkörper gleichzeitig belastet werden konnten (**Bild 18**). Für die drei Klimabereiche wurden gleiche Vorrichtungen verwendet, in denen die Körper in Serien zu fünf Stück übereinander gestapelt konstant mit zul F = 2000 N belastet wurden. Die gegenseit-



Bild 18: Vorrichtung für Scherkörper unter Langzeitbelastung, 1/100 Meßuhr in Meßstellung (Bildmitte).

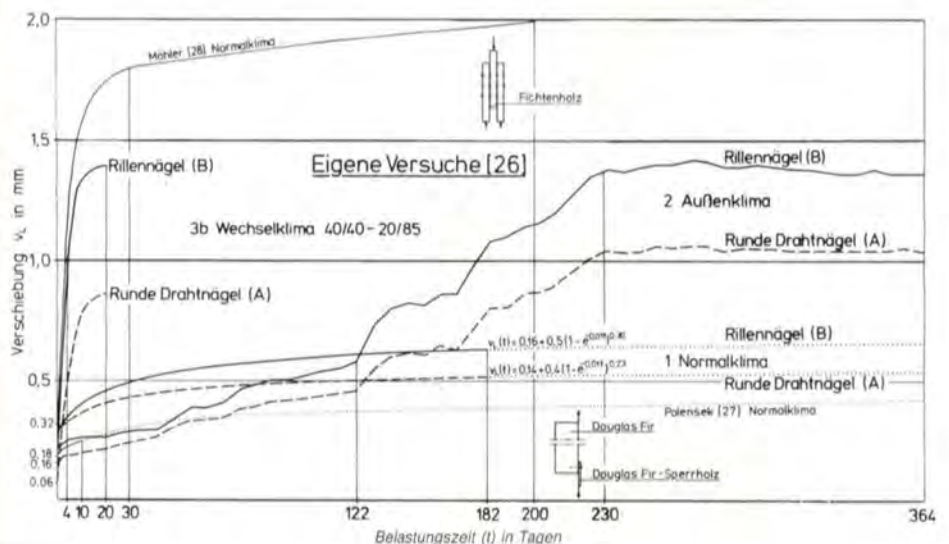


Bild 19: Kriechverformungen v_L unter Feuchteänderungen bei Langzeitbelastung unter der rechnerisch zulässiger Belastung.

gen Verschiebungen zwischen Seiten- und Mittelhölzern wurden an durchgehenden, versetzt angeordneten Meßstiften aus Silberstahldraht ($\varnothing 3$ mm) an beiden Seiten eines jeden Prüfkörpers mit einer 1/100-Meßuhr regelmäßig abgelesen.

In **Bild 19** ist das Kriechverhalten der eigenen Langzeitversuche unter Normal-, Außen- und Wechselklima beider Nageltypen annähernd vergleichbaren Versuchsergebnissen aus [27] und [28] gegenübergestellt.

Die Douglas Fir-Douglas Fir Sperrholz-Nagelverbindungen von Polsek (1 Nagel 29×51) waren bei Herstellung und Prüfung über zehn Tage Normalklimabedingungen ausgesetzt. Die für $t = 364$ Tage verlängerte Potenzfunktion für die Verschiebung $v_L = v_0 + a \cdot t^n$ (a, n Konstanten) setzt sich aus einer zeitunabhängigen Anfangsverschiebung v_0 und einem rein zeitabhängigen Kriechverlauf zusammen.

Bei allen anderen Kriechkurven wurde die Höhe der Verschiebungszunahmen im wesentlichen von den Feuchteänderungen, bezogen auf die Herstellfeuchte u_H der Scherkörper bestimmt. Solange nur die Herstellfeuchte u_H von Nagelverbindungen variiert und das Prüfklima wirklich konstant gehalten wird, lassen sich die Kriechverformungen $v_L(t)$, die sich aus Anfangsverschiebungen v_0 , aus überwiegend feuchteänderungsabhängigen Verschiebungen $v(\Delta u(t))$ und ab $u = u_{gr}$ (Holzgleichgewichtsfeuchte) aus rein zeitabhängigen Verschiebungen $v(t)$ zusammensetzen, empirisch mit Potenz- bzw. Exponentialfunktionen beschreiben. Die Exponentialfunktion

$$v_L(t) = v_0 + v(\Delta u(t)) + v(t) \\ v(\Delta u(t)) + v(t) = a(1 - e^{-bt})^n$$

mit

t = Belastungszeit

a, b, n = Konstanten

ist für den Kriechverlauf im Normalklima beider Nageltypen für die ersten 182 Tage in **Bild 19** ausgewertet.

Bei weiterhin konstanten Klimaverhältnissen wären die Verformungen etwa dem gepunkteten Verlauf gefolgt. Wegen überforderter Klimaregelung in der zweiten Jahreshälfte 1983 sind jedoch die Verformungen infolge sinkender relativer Luftfeuchte auf $\varphi < 50\%$ weiter angestiegen.

Der Kriechverlauf im Außenklima ist bei beiden Nageltypen von jahreszeitlich wechselnden Außenklimaverhältnissen geprägt. Da die Endverformungen vorwiegend vom Ausmaß der Feuchteänderungen ausgelöst werden, konnten Verschiebungen dieser Größenordnung mit den zeitgerafften Wechselklimaversuchen 3b bereits nach 20 Tagen erreicht werden.

Bei den feuchtgenagelten ($u_H > 30\%$), zweischnittigen Fichtenholz-Verbindungen (12 Nägel 31×70) von Möhler [28] werden die erheblichen Auswirkungen von großen Feuchteänderungen unter gleichzeitiger zulässiger Belastung besonders deutlich.

Bei Nagelverbindungen unter zulässiger Belastung ist mit den geringsten Verschiebungszunahmen zu rechnen, wenn die Herstellfeuchte einer Verbindung ihrer zu erwartenden mittleren Gebrauchsfeuchte am nächsten kommt.

6 Stahlblech-Holz-Nagelverbindungen mit nicht vorgebohrten Stahlblechen von mindestens 2 mm Dicke*

Stahlblech-Holz-Nagelverbindungen nach DIN 1052 (Ausgabe Oktober 1969) benötigen eine Blechdicke von mindestens 2,0 mm, ein Vorbohren des Bleches sowie ein Vorbohren des Holzes, wenn die Bleche nicht außen liegen. Da in der Praxis diese Bedingungen nur schwer eingehalten werden können und bereits Nageleintreibgeräte mit abgestimmten Stahlnägeln auf dem Markt sind, die ein Durchnageln von Blechen ohne Vorbohren ermöglichen, wird diese Bauweise außerhalb der Normvorschriften bereits angewendet. Der Einsatz bei praxisüblichen Verbindun-

gen, die Randbedingungen, die Grenzen dieser Anwendungsmöglichkeit der Geräte sowie die notwendigen sicherheitstechnischen Aussagen sind bisher jedoch auch im bauaufsichtlichen Sinne noch nicht hinreichend untersucht.

Mit der laufenden Untersuchung sollen anhand von Versuchen die Eignung dieses Verfahrens zum Herstellen von Stahlblech-Holz-Nagelverbindungen geklärt und die Grenzen der Anwendbarkeit festgestellt werden. In weiteren Versuchen wird das Trag- und Verformungsverhalten solcher Verbindungen untersucht. Unter der Voraussetzung leistungsfähiger Nageleintreibgeräte, die eine ordnungsgemäße Herstellung dieser Stahlblech-Holz-Nagelverbindungen ermöglichen, könnten auf der Grundlage der Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens im Hinblick auf die Arbeitszeit wesentlich wirtschaftlichere Verbindungen für die Praxis entwickelt werden.

Nach Erkundung des Marktes standen für die Durchführung der Eignungsversuche zwei geeignet erscheinende Nageleintreibgeräte mit drei Nagelgrößen zur Verfügung. Es war zu erwarten, daß die Parameter Blechdicke, Anzahl der durchschlagenen Bleche, Holzdicke, Holzart und Holzfeuchte sowie der Betriebsdruck der Nageleintreibgeräte einen signifikanten Einfluß auf die Herstellung der Verbindungen haben. Durch eine Variation dieser Einflußgrößen sollten zunächst die Grenzen der Anwendbarkeit bestimmt werden.

Bei den Versuchskörpern aus halbtrockenem Nadelholz (NH) und trockenem Brettschichtholz (BSH) wurden dazu bei einer einheitlich gewählten Holzdicke von 24 mm (Mindestdicke nach DIN 1052) verzinkte Stahlbleche der Dicke $t = 2,0$ und $t = 2,5$ mm in die Schlitze (Schlitzbreite $d = t + 1$ mm) eingeführt und unter Variation des Betriebsdrucks der Nageleintreibgeräte genagelt. Versuche mit außenliegenden Stahlblechen scheiden aus sicherheitstechnischen Gründen aus.

Die zur Verfügung stehenden Nageleintreibgeräte erlauben einen maximalen Betriebsdruck von 8,0 bar. Ausgehend von diesem Wert wurde der Druck schrittweise um jeweils 1 bar verringert, bis ein Nageln nicht mehr möglich war. Bei jeder Versuchsvariante wurden in NH 2×5 Nägel und in BSH je 5 Nägel »parallel« und »rechtwinklig« zur Leimfuge eingetrieben, also insgesamt 20 Nagelungen je Versuchsvariante und Nagelgröße durchgeführt.

Es zeigte sich, daß bei Verwendung von 2,0 mm bzw. 2,5 mm dicken Blechen das Herstellen einer Verbindung mit einem eingelegten Blech ab einem Betriebsdruck von ca. 5 bar bzw. 6 bar, bei Verwendung von zwei Blechen ab ca. 6 bar bzw. 7 bar möglich ist. Bei einem Betriebsdruck von 8 bar und drei Blechen konnten sowohl die 2,0 mm als auch die 2,5 mm dicken Bleche genagelt werden. Ein unterschiedlicher Einfluß der verwendeten Holzart (NH bzw. BSH) auf die Herstellung der Verbindungen wurde nicht festgestellt.

Zur besseren Beurteilung der hergestellten Verbindungen wurde das Durchdringen der Bleche und des Holzes sowie die Lage der Nägel mittels Röntgenaufnahmen oder durch Aufspalten des Versuchskörpers festgestellt. **Bild 20** zeigt die Röntgenaufnahmen eines Versuchskörpers aus BSH mit zwei Blechen ($t = 2,0$ mm), der mit Nägeln 36×90 bei einem Betriebsdruck des Nageleintreibgerätes von 6,0 bar einwandfrei hergestellt wurde. In **Bild 21** ist ein Versuchskörper dargestellt, bei dessen Herstellung unter Beibehaltung aller anderen Parameter der Druck auf 5,0 bar verringert wurde. Es ist zu erkennen, daß bei dem Betriebsdruck von 5,0 bar das zweite Stahlblech nur noch teilweise durchdrungen wurde, die verbleibende Energie aber nicht mehr ausreichte, die Nägel vollständig in den Probekörper einzutreiben.

Nach den positiv verlaufenen Eignungsversuchen werden im zweiten Forschungsabschnitt mit Zugscherkörpern die Tragfähigkeiten und das Verformungsverhalten solcher Verbindungen untersucht, die sich einwandfrei herstellen lassen. Aufbauend auf den sicherheitstechnischen Anforderungen, den Ergebnissen der durchgeführten Eignungsversuche sowie den Versuchen zur Untersuchung des Trag- und Verformungsverhaltens der Verbindungen wird die Entwicklung allgemeiner Herstellungs- und Bemessungshinweise angestrebt.

* Ehlbeck, J.; Eberhart, O.: Untersuchungen von Stahlblech-Holz-Nagelverbindungen mit nicht vorgebohrten Stahlblechen von mindestens 2 mm Dicke unter Verwendung von Stahlnägeln (laufendes Forschungsvorhaben).

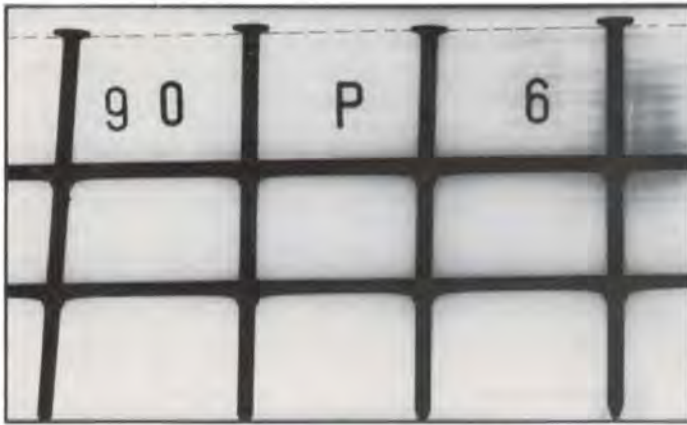


Bild 20: Probekörper aus BSH mit 2 Blechen ($t = 2,0$ mm), genagelt mit Nägeln 36×90 und einem Druck von $6,0$ bar (--- = Holzkante).

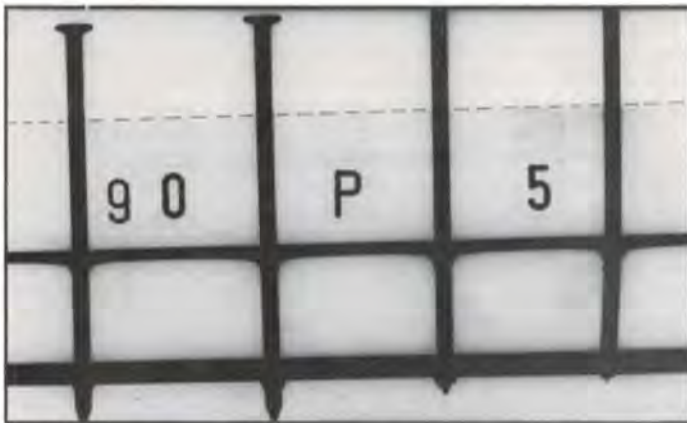


Bild 21: Probekörper aus BSH mit 2 Blechen ($t = 2,0$ mm), genagelt mit Nägeln 36×90 und einem Druck von $5,0$ bar (--- = Holzkante).

7 Tragverhalten von Stabdübelverbindungen bei unterschiedlichen Rißlinienanordnungen*

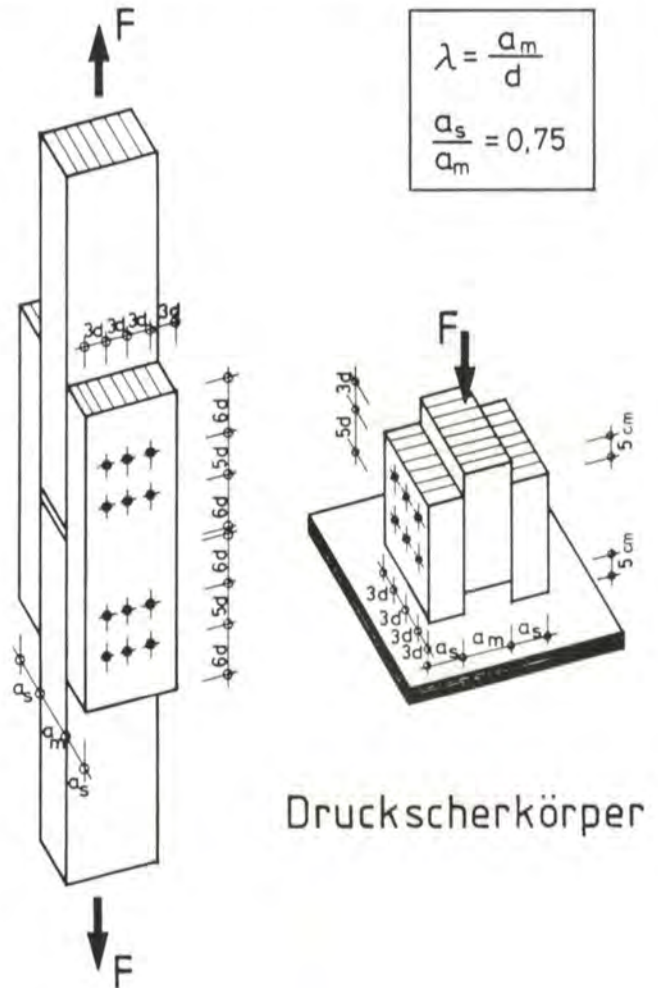
Stabdübel werden in Verbindungen des modernen Ingenieurohlbaues häufig zur Aufnahme großer Lasten eingesetzt. Nach DIN 1052 (Okt. 69) sowie nach dem Entwurf DIN 1052 Teil 2 – Mechanische Verbindungen – (Aug. 84) müssen Stabdübel in Faserrichtung meist versetzt angeordnet werden. Die internationalen Normungsvorschläge [29], [30] sehen jedoch eine versetzte Anordnung nicht vor. Neuere Untersuchungen an Stabdübelverbindungen mit unversetzter Anordnung ergaben ein unterschiedliches Tragsicherheitsniveau bei verschiedenen Stabdübelschlankheiten λ (Mittelholzdicke/Stabdübeldurchmesser) gegenüber der zulässigen Belastung nach DIN 1052. Es soll untersucht werden, wie sich die Tragfähigkeit einer Verbindung mit versetzter Stabdübelanordnung gegenüber einer solchen mit unversetzter Anordnung verhält, und welchen Einfluß die Stabdübeldurchmesser, insbesondere der im Entwurf DIN 1052 Teil 2 neu aufgenommene Dübeldurchmesser 30 mm, sowie Schlankheit und Rohdichte des Holzes unterschiedlicher Holzarten auf das Tragverhalten ausüben. Infolge der schrittweisen Umstellung des Sicherheitskonzeptes von einer deterministischen auf eine probabilistische Grundlage sollen die Versuchsdaten zur Ermittlung charakteristischer Werte des Bauteilwiderstandes beitragen.

Es wurde ein umfangreiches Versuchsprogramm für die Belastung parallel zur Faserrichtung aufgestellt, um folgende Einflüsse

auf das Tragverhalten der Stabdübelverbindungen zu untersuchen:

- Unterschiede zwischen versetzter und unversetzter Stabdübelanordnung bei sonst gleichen Versuchsbedingungen;
- Einfluß der Rohdichte der zu verbindenden Hölzer;
- Einfluß von Dübeldurchmesser und Schlankheit λ ;
- Unterschied zwischen Druckscher- und Zugscherbeanspruchung;
- Tragfähigkeit verschiedener Holzarten;
- Einfluß des Stabdübelwerkstoffes.

Es wurden die in **Bild 22** dargestellten Versuchskörper mit den Durchmessern $d = 8, 16, 24$ und 30 mm sowie den Schlankheiten $\lambda = 4, 6$ und 8 geprüft. Das Verhältnis Seitenholzdicke a_s zu Mittelholzdicke a_m wurde bei allen Versuchen konstant gehalten. Die Löcher für die Stabdübel wurden mit dem Nenn Durchmesser gebohrt. Die Hauptuntersuchung erfolgte an Brettschichtholz aus Nadelholz. Vergleichend dazu wurden Versuche mit Nadelvollholz (Fichte/Tanne und Douglasie) durchgeführt. Durch die Verwendung von Brettschichtholz wurde eine geringere Streuung der Versuchsergebnisse erreicht und somit der Einfluß der einzelnen Parameter besser erfaßt. **Bild 23** zeigt den Versuchsaufbau für Zugscherversuche, **Bild 24** den für Druckscherversuche. Weiterhin wurden Versuche mit jeweils einem Vertreter der drei in der Normvorlage zu DIN 1052 neu aufgenommenen Laubholzgruppen (Gruppe A – Buche, Gruppe B – Afzelia, Gruppe C – Bongossi) durchgeführt. In der Praxis wird zur Herstellung von Stabdübeln sowohl blanker (kaltverformter) als auch warmgewalzter Rundstahl St 37 verwendet. Es ist bekannt, daß sich unterschied-



Zugscherkörper

Bild 22: Versuchskörper für Zug- und Druckscherversuche.

* Ehlbeck, J.; Werner, H.: Tragverhalten von Stabdübeln in Brettschichtholz und Vollholz verschiedener Holzarten bei unterschiedlicher Rißlinienanordnung (laufendes Forschungsvorhaben).



Bild 23: Versuchsaufbau für einen Zugscherversuch.

Bild 24: Versuchsaufbau für einen Druckscherversuch.

licher Stabdübelwerkstoff auf das Tragverhalten, vor allem aber auf das Verformungsverhalten der Verbindung auswirkt. Für die Versuche wurden meistens Stabdübel aus Rundstahl St 37 K verwendet. Im folgenden wird über erste Teilergebnisse berichtet.

Die Tragfähigkeit einer Stabdübelverbindung zeigt bei einer Belastung parallel zur Faserrichtung keinen signifikanten Unterschied zwischen unversetzter und versetzter Anordnung der Stabdübel. In **Tabelle 2** sind die Versuchsergebnisse gegenübergestellt. Es besteht jedoch ein geringfügiger Unterschied zwischen der Beanspruchungsart. Bei reiner Zugbeanspruchung macht sich die versetzte Anordnung zum Teil negativ bemerkbar, da durch das Versetzen mehr Zugfasern des Holzes unterbrochen werden. Bei Druckbeanspruchung wirkt sich die versetzte Anordnung positiv aus, da als Bruchursache meist ein Aufspalten der Seitenhölzer eintritt und das Versetzen einer solchen Versagensart entgegenwirkt. Das Vorbohren der Löcher mit dem Nenndurchmesser der Stabdübel reduziert die Spaltbeanspruchung im Vergleich zu der früher geforderten Vorbohrung mit einem kleineren Durchmesser. Weiterhin ist zu bemerken, daß bei größeren Durchmessern und somit größeren Holzstücken ein geringfügiges Verlaufen der Holzbohrer unvermeidlich ist, so daß die Stabdübel auf der Rückseite ungewollt leicht versetzt sind. Aus diesem Grunde nähern sich die Versuchsergebnisse der Druckscherversuche von versetzter und nicht versetzter Stabdübelanordnung bei steigendem Durchmesser einander an. Aus einer Literaturrecherche ergab sich ein enger Zusammenhang zwischen der Tragfähigkeit der Stabdübelverbindung und der Rohdichte des Holzes. Um diesen Einfluß genauer zu untersuchen, wurden Brett-schichtholzträger aus Brettern mit niedriger, mittlerer und hoher Rohdichte zusammengestellt. Die Auswahl der Bretter erfolgte durch Wägung. Somit konnte ein gleichmäßiger Rohdichteverlauf über den Querschnitt gewährleistet werden.

Die einzelnen Hölzer wurden nach dem Zuschneiden im Normal-klima DIN 50 014 – 20/65-2 gelagert. Die mittlere Rohdichte über den gesamten Querschnitt wurde durch Wiegen und Ausmessen der einzelnen Teile ermittelt.

Es wurden zwei Versuchsreihen mit jeweils neun Einzelversuchen durchgeführt. Schlankheitsgrad, Stabdübelanordnung und Beanspruchungsart wurden dabei konstant gehalten. Bei der ersten Versuchsreihe wurden jeweils sechs Stabdübel mit dem Durchmesser $d = 16$ mm verwendet, bei der zweiten Versuchsreihe jeweils sechs Stabdübel mit dem Durchmesser $d = 30$ mm. In **Bild 25** ist die Abhängigkeit einer rechnerisch ermittelten Loch-leibungsfestigkeit von der mittleren Rohdichte bei Normalklima dargestellt. Als Bezugsroh-dichte wurde der Mittelwert aus allen drei Hölzern gewählt.

Versuchsreihe	Anzahl der Versuche n	Beanspruchungsart/ Stabdübelanordnung	Stabdübel- durchmesser d (mm)	Schlankheits- grad λ	Mittelwert Bruchlast \bar{F}_U (kN)	Verhältnis $\frac{\bar{F}_U \text{ versetzt}}{\bar{F}_U \text{ unversetzt}}$
V 1/8/n	3	Zug / versetzt	8	8	54,8	0,98
U 1/8/n	5	Zug / unversetzt	8	8	55,8	
V-D 1/8/n	3	Druck / versetzt	8	8	66,8	1,01
U-D 1/8/n		Druck / unversetzt	8	8	66,1	
V 2/8/n	3	Zug / versetzt	16	8	194,3	0,98
U 2/8/n	5	Zug / unversetzt	16	8	198,6	
V-D 2/8/n	3	Druck / versetzt	16	8	291,7	1,09
U-D 2/8/n	5	Druck / unversetzt	16	8	267,0	
V 2/6/n	3	Zug / versetzt	16	6	187,2	1,00
U 2/6/n	5	Zug / unversetzt	16	6	187,2	
V-D 2/6/n	3	Druck / versetzt	16	6	244,8	1,12
U-D 2/6/n	3	Druck / unversetzt	16	6	219,5	
V-D 3/6/n	3	Druck / versetzt	24	6	451,4	1,00
U-D 3/6/n	3	Druck / unversetzt	24	6	453,0	
V-D 4/6/n	3	Druck / versetzt	30	6	683,1	0,99
U-D 4/6/n	3	Druck / unversetzt	30	6	689,5	

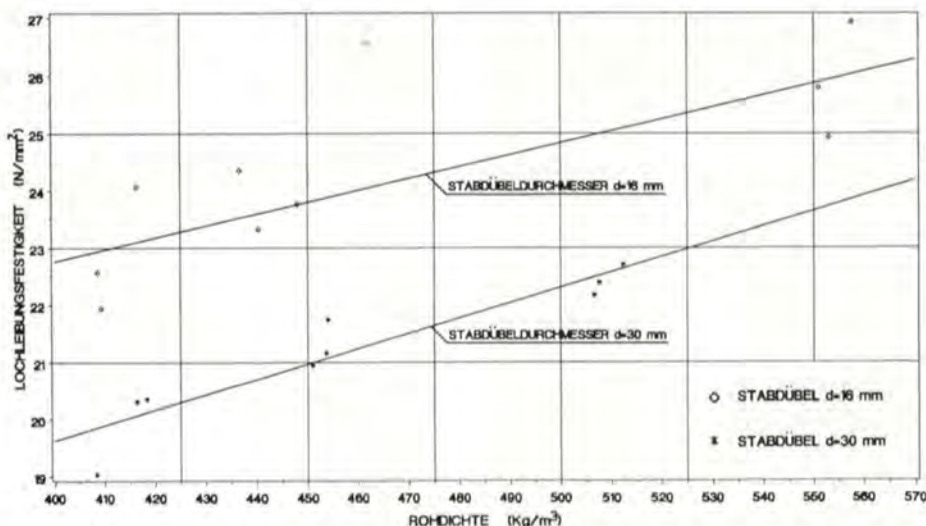
Tabelle 2: Vergleich der Bruchlasten zwischen versetzter und unversetzter Stabdübelanordnung

Eine lineare Regression ergibt für die Versuchsreihe mit Stabdübeldurchmesser $d = 16$ mm bzw. $d = 30$ mm einen zugehörigen Korrelationskoeffizienten von $R = +0,87$ bzw. $R = +0,94$. Bei den Versuchen mit Stabdübeln $d = 16$ mm war der Rohdichteunterschied zwischen den Seitenhölzern und dem Mittelholz größer, womit auch die größere Streuung zu erklären ist. Eine lineare Abhängigkeit der aufnehmbaren Last und somit der Lochleibungsfestigkeit des Brettschichtholzes von der mittleren Rohdichte bestätigte sich. Die Lochleibungsfestigkeiten sind jedoch vom Stabdübeldurchmesser abhängig.

8 Mindestholzabmessungen und Mindestnagelabstände bei europäischem Douglasienholz*

Douglasienholz wird zur Zeit noch selten als Bauholz verwendet und bei der Ernte anfallende einzelne Stämme werden häufig unter dem üblichen Fichten-/Tannenholz »versteckt«. In den kommenden Jahren wird dieses Holz jedoch in zunehmenden Mengen aus Wuchsgebieten der Bundesrepublik Deutschland und der Nachbarländer zur Verfügung stehen. Dieser Tatsache wird im Neuentwurf zu DIN 1052 dadurch Rechnung getragen, daß Douglasienholz neben den bisher verwendeten europäischen Nadelhölzern genannt wird und die gleichen Rechenwerte für die zulässigen Spannungen, die Elastizitätsmoduln, sowie die Schwind- und Quellmaße zugrunde gelegt werden dürfen. Die Gleichwertigkeit mit Fichtenholz bezüglich der Festigkeiten wurde durch Forschungsarbeiten nachgewiesen. Andererseits wurde jedoch durch neuere Untersuchungen [5] die Vermutung bestätigt, daß beim Nageln eine erhöhte Spaltgefahr besteht, so daß die Mindestholzabmessungen und Mindestnagelabstände nach der bisher gültigen DIN 1052 nicht ohne weiteres auf Douglasienholz übertragen werden dürfen. Ziel des laufenden Forschungsvorhabens ist es, durch systematische Versuche den Einfluß der unterschiedlichen Parameter auf die Spaltgefahr des Holzes bzw. die Tragfähigkeit der Nagelverbindungen zu ermitteln. Als wesentliche Parameter gelten dabei Nageldurchmesser und Nagellänge im Verhältnis zu den Abständen der Nägel untereinander und von den Holzrändern sowie auch zur Holzdicke. Auch Holzrohndichte, Jahrringverlauf und Feuchteinflüsse werden für die Untersuchungen von Bedeutung sein. Mit der Aufnahme von Sondernägeln in den Neuentwurf zu DIN 1052 Teil 2 hat der Einfluß der Schaftform Interesse geweckt, und auch ein von einem Nagelhersteller entwickelter »Antispalt-nagel« mit spezieller Ausbildung der Spitze wird in die Prüfungen mit einbezogen.

Zunächst sollten anhand von Nageleinschlagversuchen mit Einzelhölzern Mindestabmessungen der Hölzer und Mindestabstände der Nägel herausgefunden werden, bei deren Einhaltung die Hölzer noch nicht spalten. Als Ergebnis dieser »Nageleinschlagversuche« kann folgendes festgehalten werden: Es gibt keine klare Bereichsabgrenzung zwischen Spalten und Nichtspalten. Als Ausgangspunkt für weitere Versuche können jedoch eine um 10 mm größere Holzdicke und um $2,5 d_n$ seitlich und um $5 d_n$ in Faserrichtung erhöhte Nagelabstände angesetzt werden, wenn man die für Fichtenholz gültigen Festlegungen der Norm als Bezugswerte nimmt. Bild 26 zeigt zwei Nagelkörper mit links $20 d_n$ und rechts $15 d_n$ Hirnholzabstand und $15 d_n$ Nagelabstand parallel zur Faserrichtung des Holzes. Rechtwinklig zur



DRUCKSCHERVERSUCHE MIT BRETTSCHICHTHOLZ (UNVERSETZT)
ROHDICHTE = MITTELWERT AUS SEITENHÖLZERN U. MITTELHÖLZ
STABDÜBELSCHLANKHEIT = 6

Bild 25: Lochleibungsfestigkeit in Abhängigkeit von der Rohdichte des Holzes.

Faserrichtung beträgt der Abstand der Rißlinien untereinander und zum Rand $5 d_n$ bei den Körpern C 1.5 und C 2.5 bzw. $7,5 d_n$ bei den Körpern C 1.6 und C 2.6.

An Fichtenholzvergleichsproben wurde festgestellt, daß auch hier bei Einhalten der Mindestholzdicken und Mindestnagelabstände erhebliche Spaltgefahr bestehen kann. Bild 27 zeigt besonders spaltempfindliche Probekörper aus abgelagertem Holz mit hoher Rohdichte. Daß die Spaltgefahr verringert werden kann, wird an Bild 28 deutlich, das den Ausschnitt eines Nagelkörpers zeigt, der von Nägeln mit abgewinkelter Spitze durchdrungen ist und keine Risse zeigt. Die praktische Anwendbarkeit dieser Methode dürfte jedoch am aufwendigen Einschlagen scheitern, denn die Nägel müßten so angeordnet werden, daß die Holzfasern jeweils rechtwinklig von der Schneide der Meißelspitze des Nagels durchschnitten werden. Erste Versuche mit den bereits erwähnten »Antispalt-nägeln« lassen jedoch ähnlich gute Ergebnisse bei unproblematischer Handhabung erwarten.

Ausgehend von den erforderlichen Mindestabmessungen werden Belastungsversuche durchgeführt. Bei Form und Belastung der Versuchskörper wird nach Anwendungsbereichen unterschieden. Hierbei sind drei Hauptgruppen zu nennen:

Bei der allgemeinen Anwendung von Nägeln als Verbindungsmittel von Holzteilen (Gurtstöße, Knotenpunkte u. a.) kommen glattschaftige Nägel und Sondernägel zur Anwendung, wobei Zug-scherkörper parallel zur Faser und Druckscherkörper rechtwinklig zur Holzfaserrichtung belastet werden.

In den letzten Jahren nahm die Verwendung von Stahlblechformteilen ständig zu, wobei vorwiegend außenliegende Stahlbleche mit serienmäßig eingestanzten Löchern (i. a. nicht versetzt) mit speziell hierfür geeigneten Ankernägeln befestigt werden. Hierzu werden Zug-scherkörper mit ebenen Blechlaschen sowie auch Versuchsanordnungen mit Balkenschuhen geprüft.

Von Wichtigkeit dürfte die Spaltgefahr bei der Nagelung von Latungen sein, wie z. B. im Fassadenbau, wo Traglatten mit sehr kleinem Querschnitt (24×48 mm bzw. 30×50 mm) meist mit Schraubnägeln aus nichtrostendem Stahl an oft nur 40 mm breite Konterlatten befestigt werden. Da je Kreuzungspunkt nur zwei Nägel diagonal angeordnet werden, können zwei benachbarte Nägel nicht in eine Rißlinie fallen, so daß in diesem Anwendungsfall die Spaltgefahr gering bleibt.

Nach Kenntnis der genannten Einflüsse sollen Mindestholzabmessungen und Mindestnagelabstände für die praktische Anwendung vorgeschlagen werden, so daß eine zuverlässige Nagelung von Douglasienholz auch ohne Vorbohren ermöglicht und somit eine wirtschaftliche Nagelverbindung erreicht wird. Verformungsmessungen geben Aufschluß über die Steifigkeit von Nagelverbin-

* Ehlbeck, J.; Siebert, W.: Ermittlung von Mindestholzabmessungen und Mindestnagelabständen bei Nagelverbindungen mit europäischem Douglasienholz (laufendes Forschungsvorhaben).

dungen mit Douglasienholz, so daß mit der Kenntnis des Verformungsverhaltens bzw. der Verschiebungsmoduln auch die Voraussetzungen für wirklichkeitsnahe Verformungsberechnungen geschaffen werden können.

9 Eingeleimte Gewindestangen unter Axialbelastung – 1. Teil –

Die niedrige Festigkeit des Holzes quer zu seiner Faserrichtung bereitet den Tragwerksplanern häufig Probleme. In Auflager- und Lasteinleitungsbereichen wird oft die Querdruckfestigkeit für die

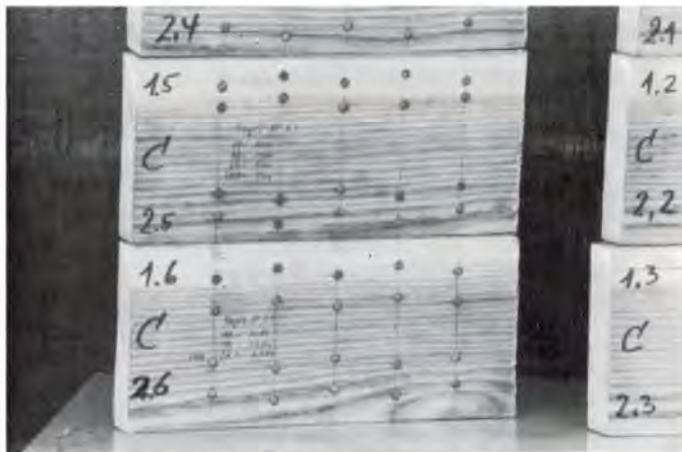


Bild 26: Versuchskörper aus Douglasie mit unterschiedlichen Nagelabständen.



Bild 27: Spaltempfindliche Versuchskörper aus Fichte.



Bild 28: Nagel mit »abgezwickter« Nagelspitze.

Bemessung maßgebend, und bei gekrümmten Trägern, Satteldachträgern, bei Trägerdurchbrüchen und Trägersausklüngen sowie angehängten Lasten treten Querspannungen auf, die aufgrund der geringen Querspannungsfestigkeit des Holzes eine erhebliche Gefahr darstellen und in der Vergangenheit häufig die Ursache von Schadensfällen waren. Seit etlichen Jahren werden Gewindestangen als Verstärkungsmaßnahme eingeleimt, und zahlreiche Veröffentlichungen zeugen von den vielfältigen Anwendungs- und Ausführungsmöglichkeiten. Während ein 1986 veröffentlichter Bericht [31] die Aktualität des Themas unterstreicht, bildeten frühere Untersuchungen ([32], [33]) die Grundlage für einen 1981 in [34] formulierten Bemessungsvorschlag. In den früheren Untersuchungen, Berechnungsansätzen und Bemessungsvorschlägen wurde jedoch nicht der tatsächliche Spannungsverlauf entlang der Gewindestange beschrieben, sondern es wurde i. a. mit einer mittleren, über die Einleimlänge konstant angenommenen Haftspannung gerechnet. Ziel des hier beschriebenen Forschungsvorhabens [35] war die Entwicklung eines Meßverfahrens zur Ermittlung des tatsächlichen Haftspannungsverlaufes entlang der Gewindestangen sowie die Beschreibung und Überprüfung geeigneter Einleimmethoden.

Als Ergebnis einer Umfrage bei 29 Holzleimbaubetrieben und aufgrund eigener Erfahrungen können Einleimmethoden mit drei unterschiedlichen Gewindestangen empfohlen werden:

Bei Verwendung von Gewindestangen nach DIN 975, Ausgabe September 1986, mit metrischem Gewinde sollte die Bohrung im Holz mit dem Gewindeaußendurchmesser erfolgen. Auf die früher vorgeschlagene Leimentlastungsnut kann verzichtet werden, und die Stäbe lassen sich dennoch relativ leicht einbringen. Um eine vollständige Leimverteilung zwischen den Gewindegängen zu erreichen, muß das letzte Stück eingeschraubt werden.

Die zweite Möglichkeit ist die Verwendung von Stangen mit dem Gewinde von Sechskant-Holzschrauben nach DIN 571, sog. »Schlüsselschrauben«. Das Holz wird mit dem Mittel aus Kern- und Außendurchmesser vorgebohrt, und das Eindrehen erfolgt zweckmäßigerweise mit Hilfe eines Schlagschraubgerätes.

Bei Verwendung von Betonrippenstäben muß unbedingt mit dem äußeren Durchmesser vorgebohrt werden. Stähle mit Gewinderippen, sog. »GEWI-Stähle« sind vorzuziehen, da durch ein abschließendes Eindrehen im Gewindedrehsinn eine ausreichende Leimverteilung sichergestellt werden kann.

Die Ermittlung des Haftspannungsverlaufes erfolgte über Dehnungsmessungen entlang der Einleim- bzw. Einschraublänge der Stangen mit Hilfe von Dehnungsmeßstreifen. Dazu wurden Längsnuten in die Stangen eingefräst und darin die Dehnungsmeßstreifen eingeklebt. Die derartig präparierten Stangen wurden in die vorgesehenen Versuchskörper eingeschraubt bzw. eingeklebt und stufenweise durch Zug- oder Druckkräfte belastet. Die Längsdehnungen in den Gewindestangen wurden bei jeder Laststufe gemessen und aufgezeichnet. Daraus wurde der Dehnungsverlauf mittels einer Regressionsrechnung durch Polynome angenähert. Aus der Gradienten dieser Dehnungskurven wurde der jeweilige Haftspannungsverlauf berechnet.

Für die Untersuchungen wurden Stangen mit metrischem Gewinde, Schlüsselschrauben und GEWI-Stähle verwendet. Die Einschraub- bzw. Einleimlängen, Stangen- und Bohrlochdurchmesser wurden variiert. Die Stangen waren parallel oder rechtwinklig zur Faserrichtung des Holzes (Brettschichtholz) angeordnet. Einzelne Stangen wurden ohne Leim eingedreht, i. a. wurde Resorcinharzleim verwendet, und GEWI-Stähle wurden entweder mit Resorcinharzleim oder mit einem Polyurethankleber eingeklebt. Die **Bilder 29 und 30** zeigen zwei unterschiedliche Versuchsanordnungen.

Aus einer Vielzahl von Versuchen mit den verschiedenen Versuchsparametern sind im wesentlichen die nachfolgend beschriebenen Schlußfolgerungen zu ziehen:

– Werden die Stangen *ohne* Leim in enge Bohrlocher eingeschraubt, so stellt sich grundsätzlich eine gleichmäßigere Kraftabtragung über die Einschraubtiefe ein, als bei eingeleimten Stangen, die ein steiferes Verhalten zeigen, so daß der größere Teil

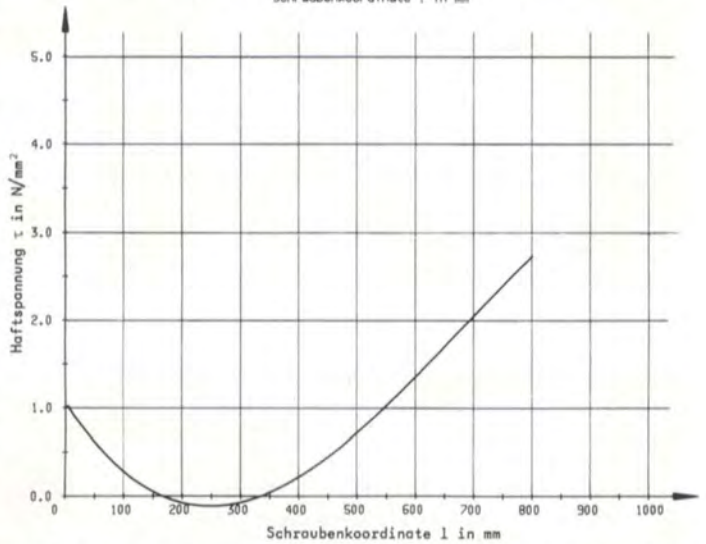
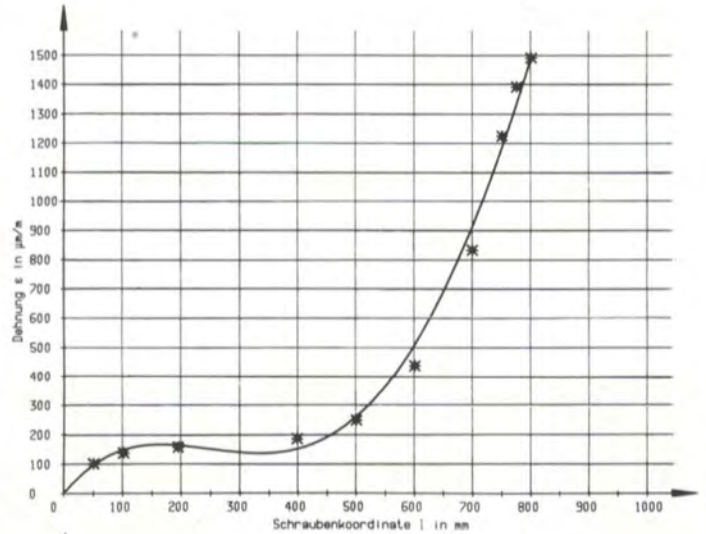
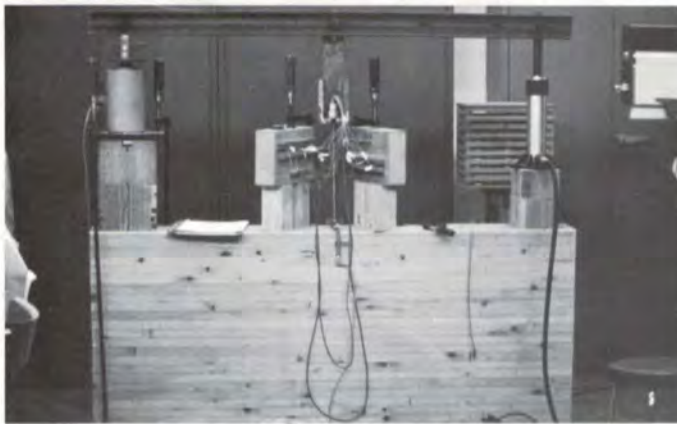
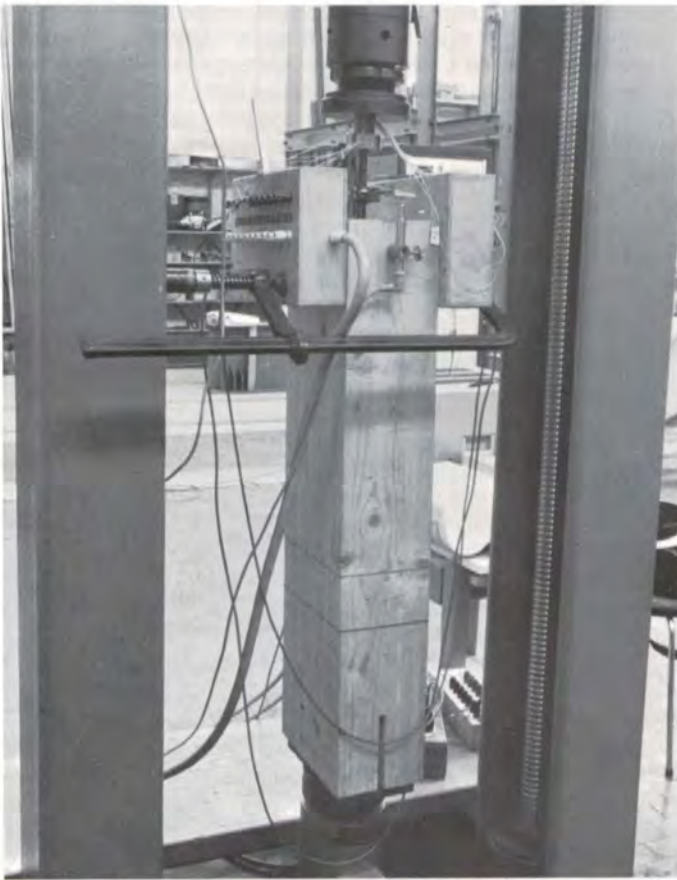


Bild 29: Stange mit metrischem Gewinde faserparallel eingeleimt, Beanspruchung auf Druck (links oben)

Bild 30: Gewindestange M 16 rechtwinklig zur Faserrichtung unter Zugbeanspruchung (links unten)

Bild 31: Dehnungsverlauf (Gewindestange M 16 mit Resorcin parallel zur Faserrichtung eingeleimt; Bohrlochdurchmesser 15 mm) (rechts oben)

Bild 32: Haftspannungsverlauf der Gewindestange aus Bild 31 (rechts unten)

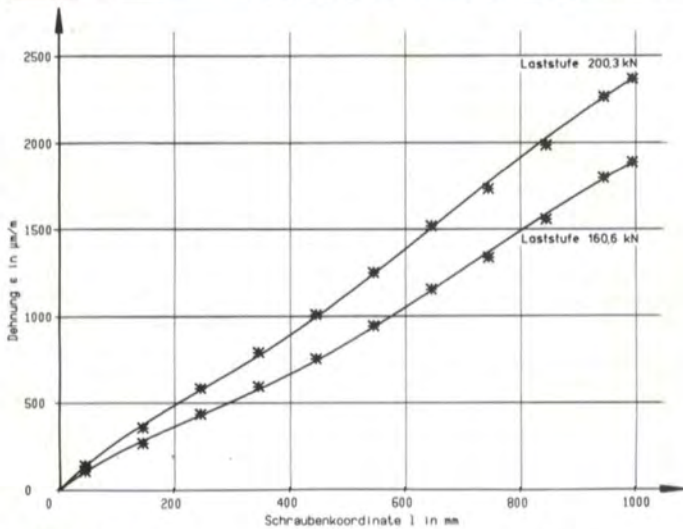


Bild 33: Dehnungsverlauf (GEWI-Stahl \varnothing 26,5 mm mit Resorcin rechtwinklig zur Faserrichtung eingeleimt; Bohrlochdurchmesser 30 mm)

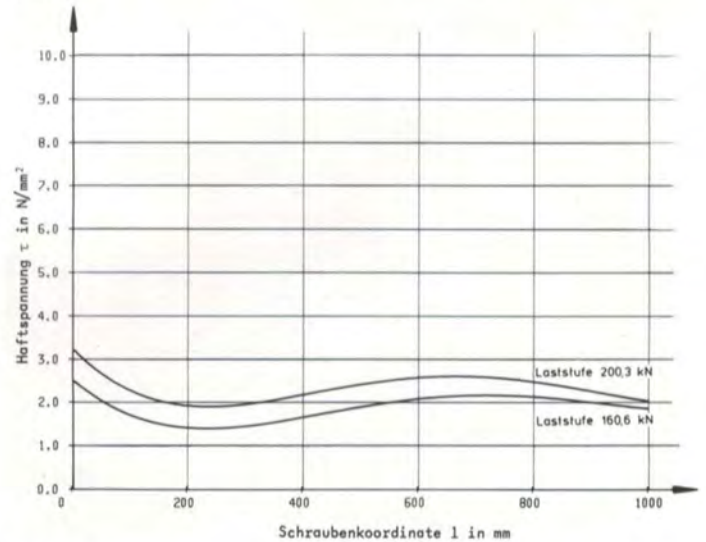


Bild 34: Haftspannungsverlauf der GEWI-Stange aus Bild 33

der zu übertragenden Kraft im »äußeren« Bereich, d. h. kurz nach Eintritt der Stange in das Holz, übertragen wird.

– Der relativ geringe Unterschied bei der Kraftübertragung zwischen Anordnung parallel und rechtwinklig zur Holzfaserrichtung ist durch die unterschiedliche Dehnsteifigkeit des Holzes zu erklären. Ein entsprechend dem kleineren Elastizitätsmodul »weicherer« Verhalten rechtwinklig zur Faserrichtung des Holzes führt zu einer gleichmäßigeren Kraftübertragung bei Anordnung der Stange rechtwinklig zur Faserrichtung.

Werden Normalkräfte (Zug oder Druck) über die Stange in das Holz eingeleitet, die auch im Holz als Normalkräfte weitergeleitet werden, dann entstehen am Anfang und am Ende der Stangen Haftspannungsspitzen, die sich bei in Faserrichtung eingebrachten Stangen wegen der größeren Dehnsteifigkeit des Holzes in Faserrichtung deutlicher ausprägen. Bei großen Einleimlängen wirkt der mittlere Teil dann kaum noch bei der Kraftübertragung mit, da sich in diesem Bereich im Stahl und im Holz gleichgroße Dehnungen einstellen. Aus den Versuchen ging hervor, daß für diese Fälle, also in Faserrichtung, eine gewisse »Grenzlänge« bei etwa dem 40fachen des Durchmessers erreicht ist.

Bild 31 zeigt den Dehnungsverlauf entlang einer Gewindestange. Meßwerte sind durch Kreuze gekennzeichnet. Die Kurve wurde durch Regressionsrechnung ermittelt. Das linke Ende ($l = 0$) bezeichnet das unbelastete Stangenende im Holz, rechts wirkt die Belastung, und bei $l = 800$ mm tritt die Stange aus dem Holz aus. **Bild 32** zeigt den zugehörigen rechnerischen Haftspannungsverlauf.

– Ein Einfluß unterschiedlicher Holzquerschnitte bei Zugkörpern mit faserparallel eingeleimten Gewindestangen machte sich nur unwesentlich bemerkbar. Mit kleiner werdender Dehnsteifigkeit des Holzquerschnittes verlagerten sich die Haftspannungen geringfügig vom Anfang der Stange ins Holzinere.

– Zwischen Zug- und Druckbeanspruchung der eingeleimten Stangen war kein grundsätzlicher Unterschied im Spannungsverlauf zu erkennen. Lediglich im Lasteinleitungsbereich machten sich versuchsbedingte Exzentrizitäten bei Druckbeanspruchung deutlicher bemerkbar als bei Zug.

– Bei unterschiedlichen Einleim- bzw. Einschraubtiefen zeigte sich grundsätzlich ein untereinander ähnlicher Dehnungs- und somit auch Haftspannungsverlauf. Erst ab Einleimlängen von etwa 500 bis 800 mm stellte sich heraus, daß nicht mehr die gesamte Länge an der Kraftübertragung beteiligt ist, sondern sich die Haftspannungen auf den oder die äußeren Bereiche konzentrieren.

– Die unterschiedlichen Durchmesser der Stangen mit metrischem oder Holzschraubengewinde sowie die Variation der Bohrlochdurchmesser zwischen kleiner und gleich dem Gewindeaußendurchmesser hatten keinen signifikanten Einfluß auf den Spannungsverlauf.

– Es wurde festgestellt, daß Stangen mit metrischem Gewinde und Holzschraubengewinde bei ordnungsgemäßem Einleimen vergleichbare Haftspannungsverläufe aufweisen. Werden die Stangen jedoch nicht eingeleimt, sondern nur ohne Leim eingedreht, dann kann für metrische Gewinde, bedingt durch Ausführungsungenauigkeiten, eine ausreichende Haftfestigkeit nicht mehr garantiert werden, während für Holzschraubengewinde dank der tieferen Verzahnung mit dem Holz auch ohne Leim ein relativ steifes Verhalten und damit eine gewisse Mindesthaftfestigkeit erwartet werden kann. Dieser Verzahnungseffekt des Holzschraubengewindes im umgebenden Holz gleicht daher auch bei einer Einleimung der Schlüsselschrauben eine unge-

nügend gleichmäßige Leimverteilung über die gesamte Einleimlänge im wesentlichen wieder aus.

– Mit den verwendeten GEWI-Stählen wurden aufgrund ihrer hohen Festigkeit (Spannstahl 1080/1230) und bedingt durch die abweichende Geometrie des Profils neue Erfahrungen gemacht. Dank ihrer hohen Festigkeit konnten die Stäbe selbst bei Einleimlängen von 1000 mm bis zur Überschreitung der Haftfestigkeit beansprucht werden. Hierbei wurde ein deutlicher Unterschied im Verhalten des Resorcinharzleimes und des Polyurethanklebers festgestellt. Bei Verwendung von Resorcinharzleim stellten sich bei den GEWI-Stählen über die gesamte Länge nahezu konstante Haftspannungen ein, die bei Laststeigerung bis zur Höchstlast gleichmäßig anstiegen. Der Bruch erfolgte dann gleichzeitig auf der ganzen Länge. Die Haftfestigkeiten lagen zwischen 2,3 und 2,8 N/mm².

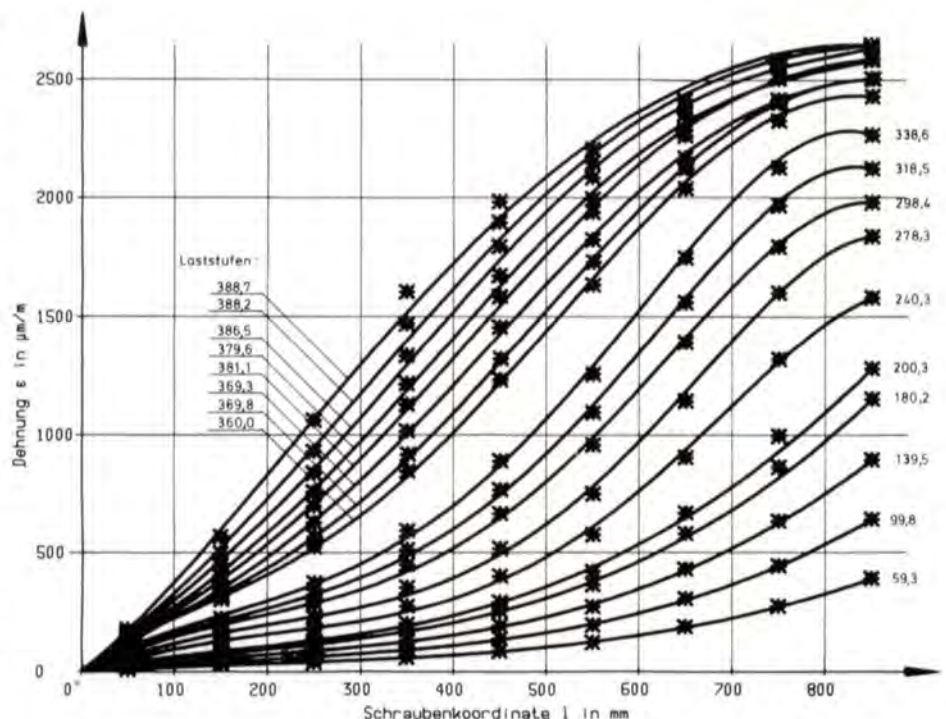
Bilder **33** und **34** zeigen den Dehnungs- und Haftspannungsverlauf eines mit Resorcinharzleim eingeleimten GEWI-Stahles.

Bei Verwendung des Polyurethanklebers ergab sich ein steiferes Verhalten mit einer Haftspannungsspitze im äußeren Bereich. Bei Laststeigerung stieg diese Spitze an, bis ein Höchstwert erreicht war. Dann erfolgte eine Kraftumlagerung nach dem Holzinere, und die Stange begann nach dem »Reißverschlußprinzip« von außen her sich vom Holz zu lösen. Die Spannungsspitze von ca. 5 bis 6 N/mm² wanderte dabei auf das Stabende zu, und da im äußeren Bereich noch Reibungskräfte aktiviert wurden, war noch eine Laststeigerung möglich, bis auch am Stangenende die Haftfestigkeit erreicht war. Hierbei ergaben sich auf die Gesamtlänge bezogene mittlere Haftfestigkeiten von 3,7 bis 4,0 N/mm².

Die **Bilder 35** und **36** dokumentieren das Tragverhalten einer mit Polyurethankleber eingeklebten GEWI-Stange bei unterschiedlichen Laststufen bis zur Überschreitung der Höchstlast.

Weitere trotz der Vielzahl von durchgeführten Versuchen noch offen gebliebene Fragen werden im zweiten und dritten Teil dieser Forschungsreihe untersucht.

Bild 35: Dehnungsverlauf (GEWI-Stahl \varnothing 32 mm mit Polyurethan rechtwinklig zur Faserrichtung eingeleimt; Bohrlochdurchmesser 36 mm)



10 Eingeleimte Gewindestangen unter Axialbelastung – 2. Teil*

Gewindestangen aus Stahl können in Brettschichtholz eingedreht oder eingeleimt werden. Bei Beanspruchung in Schaftrichtung als Bewehrung gegen Querschnittsrisse oder zur Einleitung von Zug- und Druckkräften und bei Beanspruchung quer zum Schaft (Abscheren) zur Herstellung von Anschlüssen und Stößen hat sich dieses »Holzverstärkungsmittel« bereits teilweise bewährt.

Ziel dieses zweiten Forschungsabschnittes ist es, den zeitabhängigen Haftspannungsverlauf entlang der eingeleimten bzw. eingedrehten Gewindestangen zu bestimmen. Dabei werden klimatische Einwirkungen und Langzeitbeanspruchungen untersucht. Die Prüfkörper bestehen aus resorcinverleimtem Brettschichtholz der Güteklasse II und aus Stangen der Stahlgüten 8.8 bzw. 1080/1230.

Unter Klimaeinwirkung werden folgende Einflüsse untersucht:

- Stange parallel bzw. rechtwinklig zur Holzfaserrichtung eingebracht,
- Gewindeform,
- Leimsorte (auch ohne Leim),
- Klima.

In **Bild 37** ist die Form eines Prüfkörpers für die Klimaversuche dargestellt. Die Einleimlänge beträgt einheitlich jeweils 400 mm; dies entspricht einer Einleim- bzw. Eindrehlänge von $l = 20 d$ ($d =$ Nenndurchmesser der Stange). Bei dieser Versuchsanordnung wird gewährleistet, daß die Stange sich in einem querzugbeanspruchten Bereich befindet.

Als Gewindeformen sind metrische und Sechskant-Holzschraubengewinde vorgesehen. Der Nenndurchmesser der Gewindestangen beträgt jeweils 20 mm. Für die Stangen mit metrischem Gewinde kommen die Leimarten Resorcinharzleim, Polyurethanleimer und Epoxidharzleim zur Anwendung. Die Sechskant-Holzschrauben sollen ohne Leim oder mit Resorcinharzleim eingedreht werden, wobei der Bohrlochdurchmesser 18 mm beträgt. Es sollen drei klimatische Einwirkungen untersucht werden (Lufttemperatur in °C / rel. Luftfeuchtigkeit in %):

- a) Klima 20/30; 20/90; 20/30; 20/90
- b) Klima 10/65; 60/65; 10/65; 60/65
- c) Normalklima nach DIN 50 014 – 20/65-1

Im Fall a) soll der Klimawechsel alle vier Wochen erfolgen, im Fall b) etwa alle zwei Tage. Im Fall c) wird das Klima konstant gehalten.

In einem Ausziehversuch kann abschließend der verbleibende Auszieh widerstand ermittelt werden.

Die Prüfkörper unter Langzeitbelastung stehen im Freien, werden jedoch gegen direkten Wettereinfluß geschützt. Folgende Parameter sollen variiert werden:

- Prüfkörperform,
- Belastungshöhe,
- Gewindeform,
- Leimsorte (auch ohne Leim),
- Einleimlänge.

Zusätzlich zu der in **Bild 37** dargestellten Prüfkörperform wird auch die in **Bild 38** dargestellte Form verwendet. Die Prüfkörper sollen nur quer zur Faser beansprucht werden.

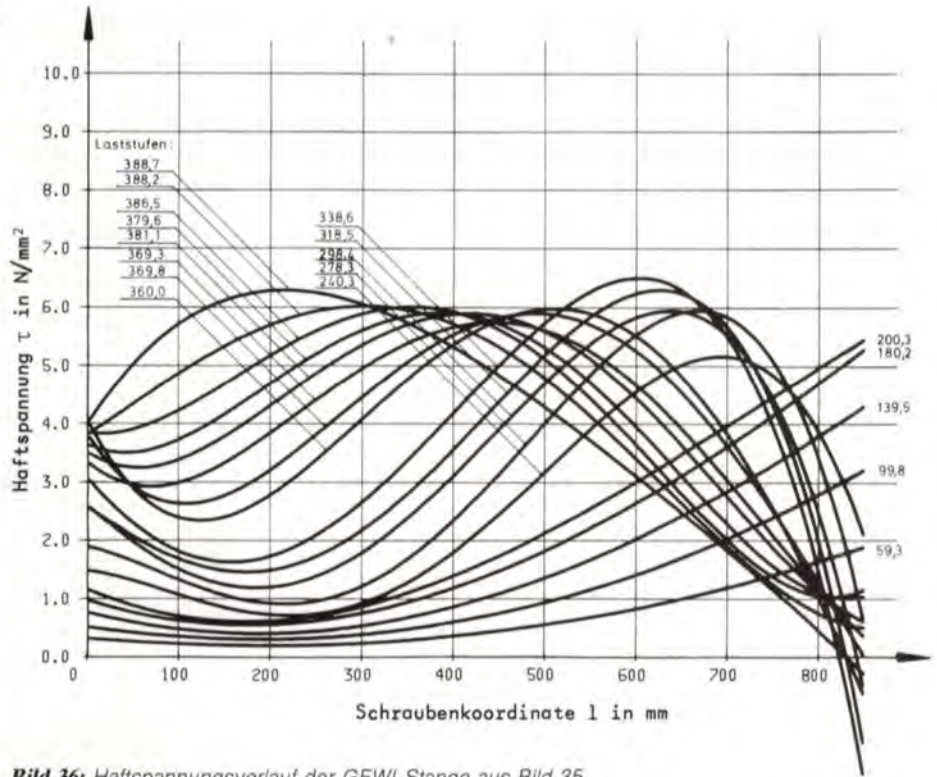


Bild 36: Haftspannungsverlauf der GEWI-Stange aus Bild 35

Die aufzubringenden Lasten werden über Hebelarme axial-symmetrisch in die Stangen eingeleitet. Zunächst werden die Lasten so gewählt, daß in allen Stangen eine gleiche rechnerisch mittlere Haftspannung auftritt. Nach einem Belastungsjahr soll aufgrund der erzielten Ergebnisse über die Höhe der Lasten neu entschieden werden.

Der Nenndurchmesser der Stangen aus Stahl 8.8 beträgt jeweils 20 mm. Als Gewindeformen sind metrische und Sechskant-Holzschraubengewinde vorgesehen. Zusätzlich werden noch zwei Stangen aus GEWI-Stahl der Klasse 1080/1230 in die Untersuchungen einbezogen. Sie besitzen die GEWI-Gewindeform, und der Nenndurchmesser beträgt 26,5 bzw. 32,0 mm. Bei den Prüfkörpern mit Stangen metrischer Gewinde wird der Einfluß von Resorcinharzleim und einem Polyurethan-Kleber untersucht. Die Sechskant-Holzschrauben sollen mit Resorcinharzleim oder ohne Leim eingedreht werden. Die GEWI-Stangen werden wiederum mit Resorcinharzleim bzw. mit Polyurethan-Kleber eingeleimt. Die Einleimlänge beträgt 400 mm für die Prüfkörper nach **Bild 37** und 1000 mm für die GEWI-Stangen bzw. 800 mm bei allen anderen Stangentypen.

Die Stangen werden – wie in **Bild 39** dargestellt – zweiseitig eingefräst. In die Nuten werden Dehnungsmeßstreifen eingeklebt, deren Abstände nach den Erkenntnissen aus dem ersten Teil des Forschungsprojektes festgelegt werden. Durch die symmetrische Anordnung der Nuten kann die Lasteinleitung auf ihre Exzentrizität hin untersucht werden, und eventuell notwendige Korrekturen können rechtzeitig erfolgen. Die für das Anbringen der Dehnungsmeßstreifen erforderlichen Nuten verursachen eine Reduzierung des Stangenquerschnitts, so daß die Wahl der Stahlgüte 8.8 erforderlich wurde.

Die Ergebnisse dieses zweiten Teils werden einen Beitrag zum besseren Verständnis des Klima- und des Langzeiteinflusses auf die Lastabtragung eingeleimter oder eingedrehter Gewindestangen liefern. Eine vollständige Analyse ist nur im Zusammenhang mit den Ergebnissen aus dem ersten Teil möglich, in dem andere Parameter untersucht worden sind, wie z. B. Stangendurchmesser, »Einleimlänge« und Höhe der Belastung. Die Ausdehnung der Kenntnisse auf in der Praxis häufig vorkommende Trägertypen und Anschlüsse soll in einem später vorgesehenen dritten Forschungsabschnitt erfolgen.

* Ehlbeck, J.; Belchior-Gaspard, P.: Wirkungsweise von eingeleimten Gewindestangen unter Axialbelastung bei Übertragung von großen Kräften und bei Aufnahme von Querschnittsrisse in Biegeträgern, Teil 2: Einfluß von Klimaeinwirkungen und Langzeitbelastung (laufendes Forschungsvorhaben).

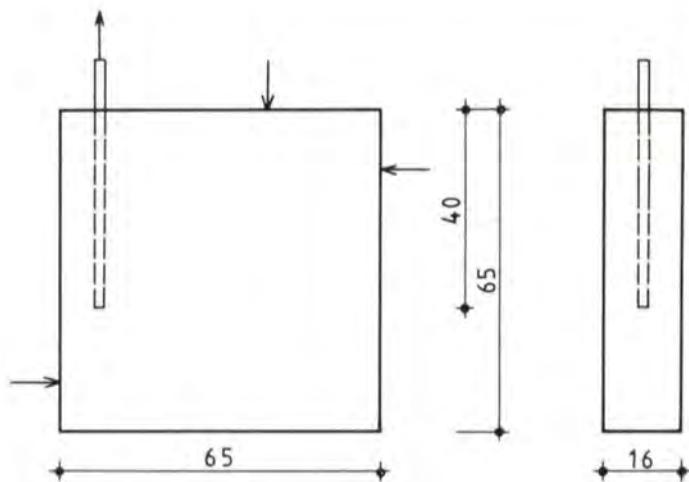


Bild 37: Schematische Darstellung eines Prüfkörpers für Klimaversuche und Langzeitversuche

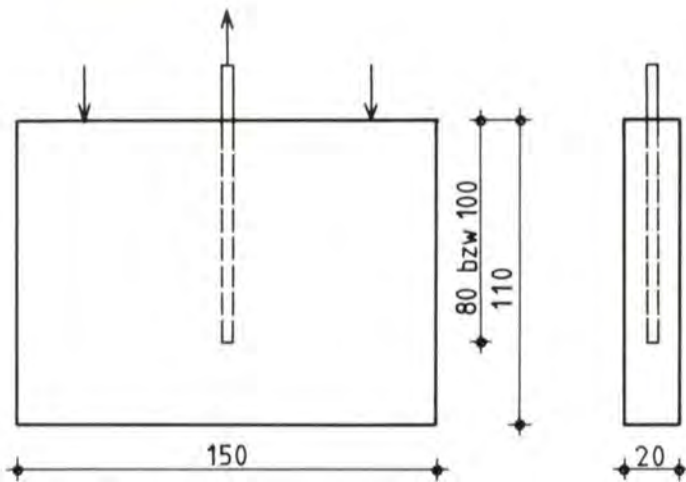


Bild 38: Schematische Darstellung eines Prüfkörpers für Langzeitbelastungen

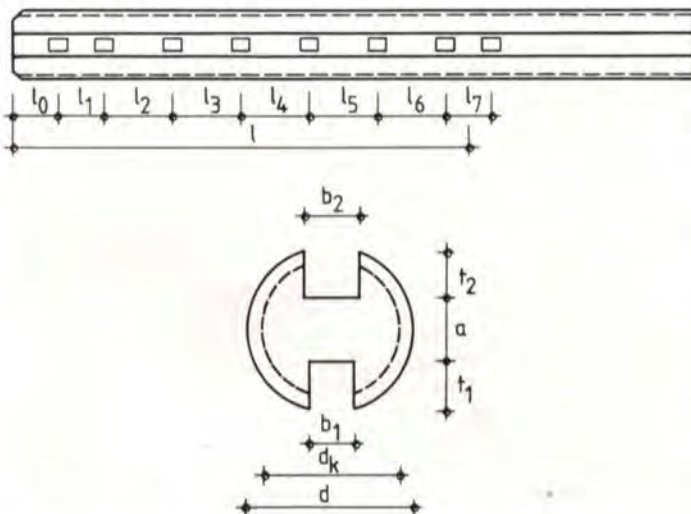


Bild 39: Quer- und Längsschnitt durch eine Gewindestange

11 Tragfähigkeit glasfaserverstärkter Brettschichtholzträger

Die Biegefestigkeit von Brettschichtholz (BSH)-Trägern hängt in besonderem Maße von der Qualität der äußeren Zuglamellen und der zugehörigen Keilzinkenverbindungen ab (siehe auch [38]). Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen [36] wurde eine Möglichkeit zur Erhöhung der Tragfähigkeit von BSH-Trägern untersucht, die keinen Eingriff in die derzeitige Gütesortierpraxis oder die Keilzinkenherstellung erfordert, nämlich eine Verstärkung der BSH-Träger. Im folgenden sind die wichtigsten Kriterien angegeben, die ein Verstärkungswerkstoff erfüllen sollte:

- hoher Elastizitätsmodul,
- hohe Festigkeit,
- Widerstandsfähigkeit gegenüber Umwelteinflüssen und Feuer,
- preiswert,
- einfache Handhabung,
- Integrierbarkeit in den Produktionsablauf der Leimbaubetriebe.

Während die drei ersten Kriterien das Maß der erreichbaren Tragfähigkeitssteigerung beeinflussen, bestimmen die restlichen Kriterien die Wirtschaftlichkeit einer solchen Verstärkungsmaßnahme. Der im Rahmen des Forschungsvorhabens verwendete Verstärkungswerkstoff wurde von der Firma Bayer AG entwickelt. Der Kern dieses Glasfaser-Verbund-Profiles (GVP) besteht aus nebeneinanderliegenden, kreisrunden Vollstäben, die aus unidirektional geordneten, in Polyester dicht gepackten Glasfasern bestehen. Die Packungsdichte der endlosen Glasfasern beträgt mehr als 65 Vol.-%. Die als Halbzeug lieferbaren Rundstäbe wurden ebenfalls unter Verwendung von Polyester mit Deckschichten aus Kiefer-Messerfurnieren zu einem Sandwichelement verbunden. Hierdurch wird die Verleimung mit den für die Brettschichtholzherstellung zugelassenen Holzleimen ermöglicht. In **Bild 40** ist diese GVP-Lamelle dargestellt. Bei einem mittleren Durchmesser der Glasfaserstäbe von 2,8 mm und einer Furnierdicke von im Mittel 0,7 mm ergibt sich eine mittlere Dicke der GVP-Lamelle von etwa 4,2 mm.

Bei dieser relativ geringen Dicke waren die GVP-Lamellen noch so biegsam, daß es laut Hersteller möglich ist, große Längen in aufgerollter Form zu liefern. Auch ist die GVP-Lamelle in allen Breiten herstellbar. Infolge der einfachen Handhabung der Variationsmöglichkeiten bzgl. Länge und Breite und der Verleimbarkeit mit den üblichen Holzleimen sind wesentliche Voraussetzungen zur Integration der GVP-Lamelle in den Produktionsablauf der Leimbaubetriebe erfüllt.

Die Materialeigenschaften der GVP-Lamellen wurden im Zugversuch ermittelt. Hierbei ergab sich eine mittlere Zugfestigkeit von etwa 670 N/mm^2 und ein mittlerer Zug-Elastizitätsmodul von etwa $31\,500 \text{ N/mm}^2$ (jeweils auf den Gesamtquerschnitt bezogen). Eine GVP-Lamelle nach Überschreiten der Zugfestigkeit ist in **Bild 41** dargestellt.

Bei den Trägerversuchen wurden je 9 Versuche mit verstärkten und unverstärkten Trägern der Gkl. II durchgeführt. In diesen Versuchen wurde das Tragverhalten von drei verschiedenen Trägertypen untersucht, bei denen die beiden äußeren Holzlamellen in der Zugzone folgende Eigenschaften aufwiesen:

- Typ A: zwei unmittelbar übereinanderliegende Keilzinkungen,
- Typ B: eine Keilzinkung in der äußeren Lamelle mit einem unmittelbar darüberliegenden großen Ast, und
- Typ C: eine Keilzinkung in der äußeren Lamelle mit beliebiger zweiter Lamelle.

Von jedem dieser Trägertypen wurden drei Versuche durchgeführt. Die Trägerhöhe betrug jeweils 600 mm. Die Versuchsergebnisse sind in **Tabelle 3** angegeben.

Bei den verstärkten Trägern war das Versagen des BSH-Trägers immer mit einem plötzlichen Abplatzen (Abschalen) der GVP-Lamelle verbunden (s. **Bild 42**). Eine weitere Laststeigerung nach Ausfall der Zugzone (vgl. Stahlbetonträger) war somit nicht möglich, weil die hohen Schubspannungen im Bereich der ausgefallenen Brettlamelle nicht aufgenommen werden konnten.

Aus **Tabelle 3** ist ersichtlich, daß bei den unverstärkten Trägern

nur einmal eine Keilzinkung für das Versagen verantwortlich war. Ein Vergleich der erreichten Biegefestigkeiten mit der mittleren Keilzinkzugfestigkeit von etwa 36 N/mm^2 – die Festigkeit der am Herstellungstag der BSH-Träger produzierten Keilzinkenverbindungen wurde in vergleichenden Zugversuchen ermittelt – zeigt, daß die Träger versagten, bevor die Zugfestigkeit der vorhandenen Keilzinkungen erreicht wurde. Bei diesen BSH-Trägern war also die Keilzinkenqualität besser als die Holzqualität. Bei den verstärkten Trägern hingegen trat in 5 von 9 Fällen ein Keilzinkenversagen ein, was darauf hindeutet, daß im Bereich eines Astes die Verstärkung effektiver ist als im Bereich einer Keilzinkenverbindung. Dies kann mit dem Tragverhalten eines Astes bzw. einer Keilzinkung erklärt werden: ein BSH-Träger ist ein Verbundträger, bei dem der Elastizitätsmodul nicht nur von Lamelle zu Lamelle oder von Brett zu Brett schwankt, sondern er ist auch innerhalb eines Brettes z. T. erheblichen Streuungen



Bild 40: Glasfaser-Verbund-Profil (GVP)

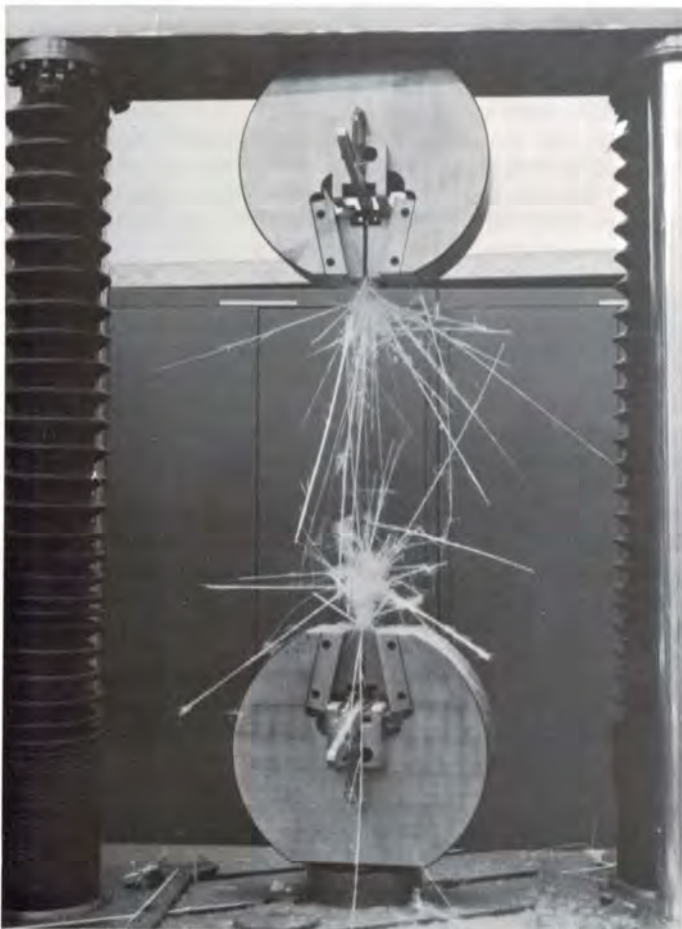


Bild 41: GVP-Lamelle nach Überschreiten der Zugfestigkeit

ausgesetzt. In jedem Brett treten in mehr oder weniger regelmäßigen Abständen Äste oder Astansammlungen auf, die eine Reduzierung des örtlichen Elastizitätsmoduls bewirken. Da sich in einem Verbundquerschnitt die Spannungen entsprechend den Steifigkeiten verteilen, entfällt auf eine GVP-Lamelle im Bereich eines darüberliegenden Astes ein größerer Anteil an Belastung als im Bereich des fehlerfreien Holzes oder einer Keilzinkenverbindung, die ebenfalls einen hohen Elastizitätsmodul aufweist. Infolge dieser behinderten Längsdehnung (sog. Laminierungseffekt) wird also ein Bereich mit niedriger Steifigkeit stärker entlastet als ein Bereich mit hoher Steifigkeit. Die prozentuale Tragfähigkeitssteigerung ist somit im Bereich der Äste größer als im Bereich der Keilzinkenverbindungen. Für die verstärkten Träger mit Holzversagen ergibt sich eine um etwa 27 % höhere Tragfähigkeit als für die vergleichbaren unverstärkten Träger. Anhand der Theorie der Verbundquerschnitte ist für die untersuchten Träger lediglich eine Steigerung von etwa 6 % zu erwarten. Dieser Unterschied ist auf die behinderte, örtliche Längsdehnung zurückzuführen, die im Bereich von Ästen vorhanden ist, von der Theorie jedoch nicht erfaßt wird.

Im Falle der Keilzinkungen dürfte diese Theorie der Verbundquerschnitte jedoch wegen des fehlenden Laminierungseffektes eher zutreffen, so daß bei den Keilzinkungen der hier untersuchten

Träger	unverstärkt		verstärkt	
	Biegefestigkeit ¹⁾ β_B N/mm^2	Bruchursache	Biegefestigkeit ¹⁾ β_B N/mm^2	Bruchursache
A.1	31,8	Ast	35,3	Ast
A.2	34,8	Ast	44,1	KZV ²⁾
A.3	31,7	Ast	42,3	Ast
B.1	28,9	Ast	33,3	KZV ²⁾
B.2	26,7	KZV ²⁾	28,1	KZV ²⁾
B.3	31,4	Ast	36,1	KZV ²⁾
C.1	29,9	Ast	42,3	Ast
C.2	31,5	Ast	37,9	Ast
C.3	25,3	Ast	39,6	KZV ²⁾

$$^1) \beta_B = \frac{\max M}{bh^2/6}$$

²⁾ KZV = Keilzinkenverbindung

Tabelle 3: Versuchsergebnisse mit unverstärkten und glasfaserverstärkten BSH-Trägern



Bild 42: Typisches Bruchbild eines verstärkten Trägers mit abgeplatzter GVP-Lamelle

Träger nur eine Tragfähigkeitssteigerung von etwa 6 % erwartet werden konnte.

Mit Hilfe des »Karlsruher Rechenmodells« (siehe [15]) werden die Tragfähigkeiten einiger Versuchsträger berechnet und somit die Tragfähigkeitssteigerungen rechnerisch erfaßt. Die Berechnungen dauern z. Zt. noch an.

Weiterhin wurden im Oktober 1985 erste orientierende Langzeitversuche (überdachtes Außenklima) mit jeweils einem verstärkten und einem unverstärkten BSH-Träger begonnen. Die Abmessungen dieser Träger sind die gleichen wie bei den Kurzzeitversuchen. Der unverstärkte Träger ist einer Belastung ausgesetzt, die der zulässigen Biegespannung nach DIN 1052 für BSH-Träger der Gkl. II entspricht, während der verstärkte BSH-Träger in Anlehnung an die Ergebnisse der Kurzzeitversuche unter einer 27 % höheren Belastung steht. Bei beiden Trägern ist bisher ein identisches Langzeitverhalten zu beobachten: das Kriechmaß (= Durchbiegung zum Zeitpunkt t /Anfangsdurchbiegung) beträgt beim unverstärkten Träger z. Zt. $\sim 1,55$ und beim verstärkten Träger $\sim 1,50$. Der Grad der Verstärkung (4,2 mm GVP-Lamelle bei 600 mm Trägerhöhe) ist offensichtlich zu gering, um einen deutlichen Unterschied im Langzeitverhalten zu bewirken.

12 Die Biegefestigkeit von Brett-schichtholz (BSH)-Trägern

Im Rahmen der 1. Stufe dieses Forschungsvorhabens [15] wurde ein Rechenmodell entwickelt, mit dem die Tragfähigkeit von BSH-Biegeträgern berechnet werden kann. In diesem Rechenmodell werden die Brett-lamellen in 150 mm lange Brettabschnitte (im folgenden Zellen genannt) unterteilt. Mit den beiden Holz-eigenschaften Rohdichte und Ästigkeit können der Elastizitätsmodul und die Festigkeit jeder Zelle mit Hilfe von Regressionsgleichungen berechnet werden. Um der Tatsache Rechnung zu tragen, daß zwei Zellen mit gleicher Rohdichte und Ästigkeit unterschiedliche Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften besitzen können, werden aus den Reststreuungen der Regressionsgleichungen zufällige Werte (die auch negativ sein können) gewählt, und den berechneten Werten hinzugezählt. Diese Reststreuungen sind aus Versuchen (siehe z. B. [37]) bekannt.

Die Genauigkeit des Rechenmodells wurde anhand von 24 Biegeversuchen mit 330 mm hohen BSH-Trägern überprüft, bei denen die Rohdichte und die Ästigkeit jeder Zelle bekannt waren. Zwischen den im Versuch ermittelten und den berechneten Tragfähigkeiten wurde eine gute Übereinstimmung festgestellt.

Sind jedoch weder die Ästigkeit noch die Rohdichte der Bretter bekannt, so muß der Trägeraufbau simuliert werden, d. h. jeder Zelle müssen Werte für die Rohdichte und die Ästigkeit in einem Simulationsprogramm zugeordnet werden. Hierzu sind Angaben über die Auftretenshäufigkeiten und Regelmäßigkeiten dieser Holzeigenschaften erforderlich.

Im Rahmen der 2. Stufe dieses Forschungsvorhabens [38] wurde daher die Ästigkeitsverteilung von insgesamt 456 Brettern untersucht [39].

Somit kann die Verteilung der Ästigkeit in Brett-längsrichtung wirklichkeitsnäher – unter Berücksichtigung der durch das Wachstum des Baumes bedingten Regelmäßigkeiten – simuliert werden.

Die o. a. Regressionsgleichungen zur Bestimmung der Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften der Zellen wurden anhand von umfangreichen Versuchen bestimmt und sind – ebenso wie die zugehörigen Reststreuungen – repräsentativ für das in den deutschen Leimbaubetrieben verwendete Schnittholz. Untersuchungen über den Elastizitätsmodul von 640 Brettabschnitten aus insgesamt 100 Brettern [40] zeigten jedoch, daß die Streuung des Elastizitätsmoduls innerhalb eines Brettes geringer ist, als die Reststreuung der allgemeinen, für das gesamte Holzangebot gültigen Regressionsgleichung. Unter Berücksichtigung dieser Ergebnisse konnte eine weitere Verbesserung des Rechenmodells erreicht werden.

Bei den Biegeversuchen (mit Trägerhöhen zwischen 167 mm und

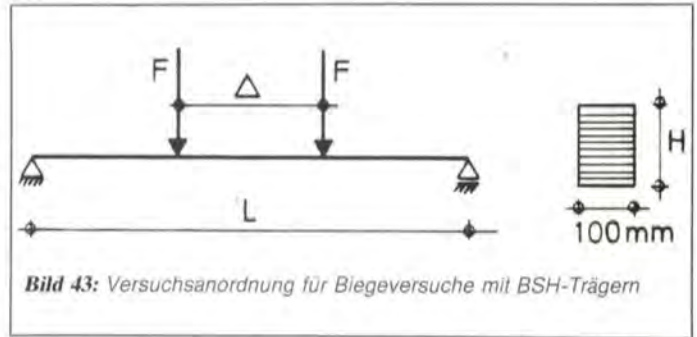


Bild 43: Versuchsanordnung für Biegeversuche mit BSH-Trägern

1250 mm) wurde u. a. der Einfluß der Trägergröße auf die Tragfähigkeit von BSH-Trägern untersucht. Die zugehörige Versuchsanordnung ist in Bild 43 dargestellt. Hierbei waren bei der überwiegenden Zahl der Versuchsträger in den beiden äußeren Zuglamellen keine Keilzinkenverbindungen im Bereich zwischen den Einzellasten vorhanden.

Bei diesen Versuchen wurde eine Abnahme der Tragfähigkeit der BSH-Träger mit wachsender Trägerhöhe festgestellt (siehe Bild 44). Für Träger mit baupraktischen Abmessungen ($H \geq 300$ mm) erscheint dieser Festigkeitsabfall jedoch nur noch gering.

Eine Auswertung der Träger, bei denen das Versagen auf eine Keilzinkenverbindung zurückzuführen war, ergab, daß die Biegefestigkeit dieser Träger in der Größenordnung der Zugfestigkeit der Keilzinkungen liegt (die Zugfestigkeit der am Herstellungstag der BSH-Trägers produzierten Keilzinkungen wurde in vergleichenden Versuchen ermittelt). Dies bedeutet, daß im Falle einer Keilzinkenverbindung keine Festigkeitserhöhung (sog. Laminierungseffekt) infolge Verleimen der Brett-lamellen zu erwarten ist. Weiterhin konnte bei diesen Trägern keine Abhängigkeit von der Trägerhöhe festgestellt werden.

Mit Hilfe des Rechenmodells wurde die Tragfähigkeit von 9 beliebig ausgewählten Versuchsträgern (mit Höhen von 250, 500 und 1000 mm) berechnet und mit den erreichten Bruchwerten verglichen (siehe Bild 45). Die Abweichung zwischen berechneter und tatsächlicher Biegefestigkeit betrug hierbei höchstens 10 %. Auch die eingetretene Bruchursache (Holz- bzw. Keilzinkenversagen) wurde vom Rechenmodell in allen Fällen richtig vorhergesagt.

Mit Hilfe des Rechenmodells wurden weiterhin die Auswirkungen von verschiedenen denkbaren Möglichkeiten der Holzsortierung auf die Tragfähigkeit von BSH-Trägern untersucht. Die Anforderungen, die hierbei an die Bretter der beiden äußeren Zuglamellen gestellt wurden, sind in Tabelle 4 angegeben. Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Bild 46 dargestellt. Bei den Auswertungen wurde unterschieden, ob der Bruch des Trägers auf ein Holzversagen (Ast) oder ein Keilzinkenversagen zurückzuführen war.

Aus Bild 46 ist ersichtlich, daß die Biegefestigkeit von BSH-Trägern in besonderem Maße von der Festigkeit der Keilzinkenverbindungen abhängig ist. So wird am Beispiel der visuellen Gütesortierung deutlich, daß eine Verbesserung der Holzqualität ohne gleichzeitige Erhöhung der Keilzinkenfestigkeit (z. B. Reihe »Kl. II« \rightarrow Reihe »KAR«) lediglich ein häufigeres Keilzinkenversagen bewirkt. Die höhere Holzfestigkeit kann somit oft nicht ausgenutzt werden. Erst mit Hilfe einer maschinellen Holzsortierung anhand der Rohdichte bzw. des Elastizitätsmoduls (Reihe »RHO« und »EMO«) sind höhere Keilzinkenfestigkeiten und somit auch höhere Tragfähigkeiten der BSH-Träger möglich.

Der Nachteil einer Holzsortierung, welche nur einen Sortierparameter berücksichtigt, liegt darin, daß z. B. der festigkeitssteigernde Einfluß eines kleinen Astes durch eine geringe Rohdichte genauso zunichte gemacht werden kann, wie der festigkeitssteigernde Einfluß einer hohen Rohdichte von einem großen Ast. Erst eine kombinierte visuelle/maschinelle Sortierung schließt solche Ausreißer aus und ermöglicht hohe Holzfestigkeiten.

Bei den Berechnungen wurde eine Keilzinkenqualität zugrunde gelegt, wie sie im Mittel von den deutschen Leimbaubetrieben hergestellt wird (siehe auch [15]).

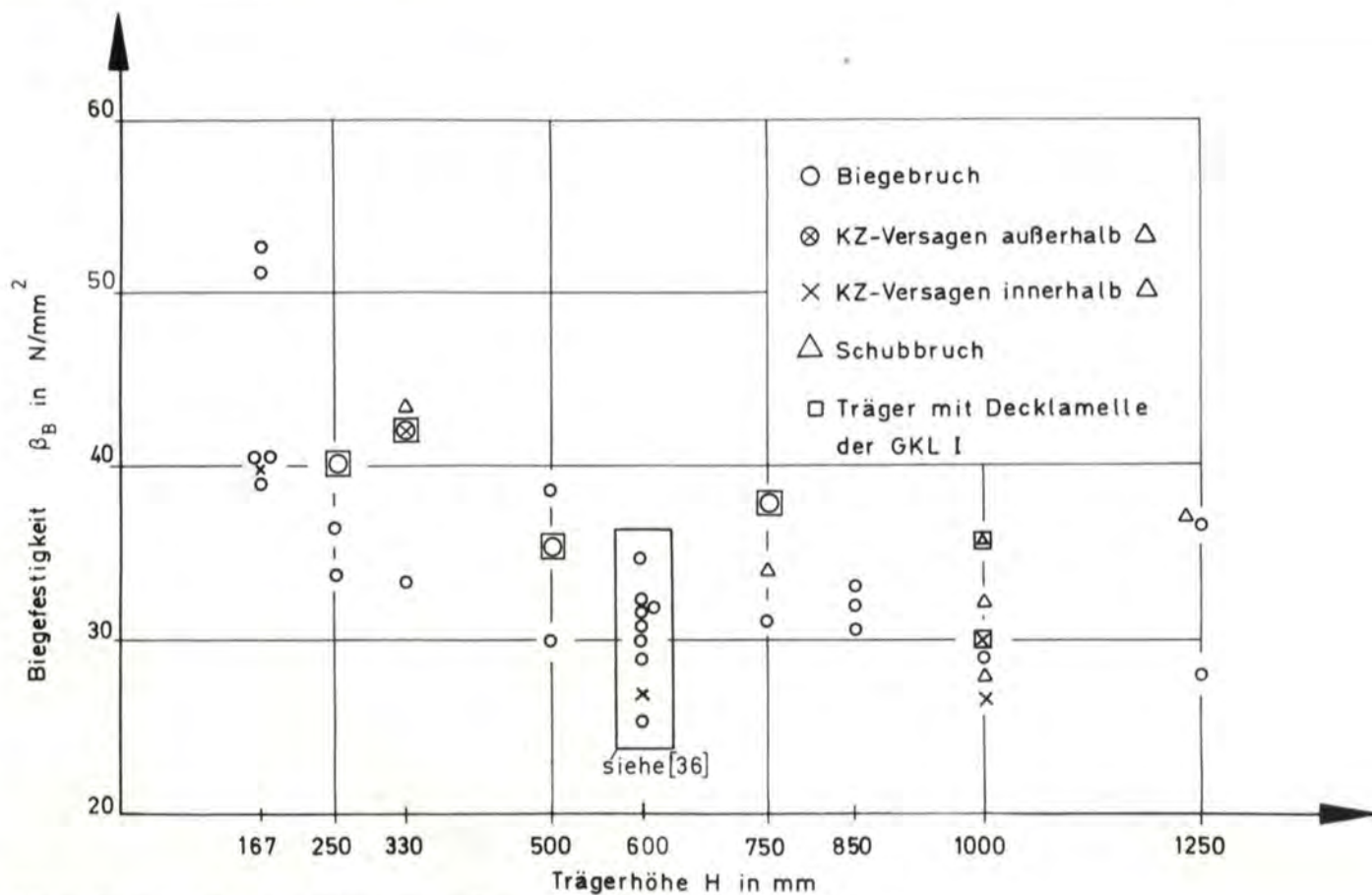
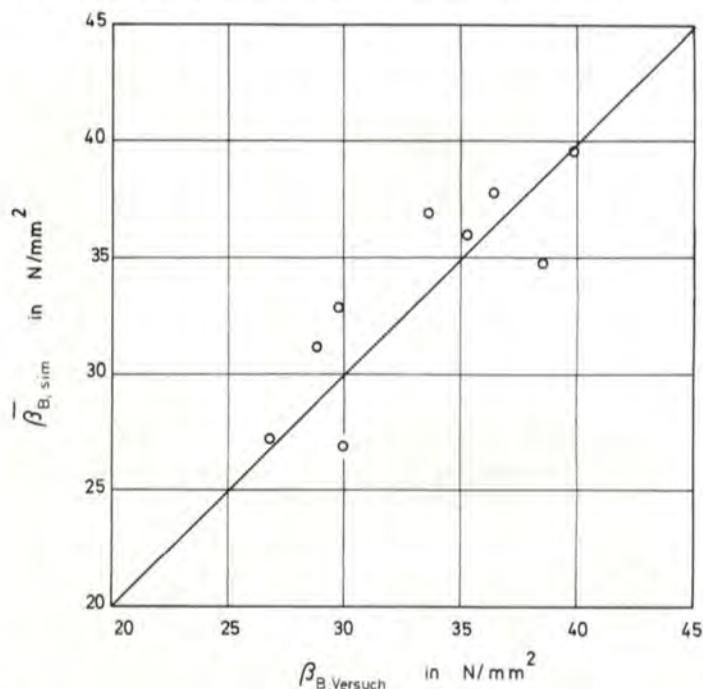


Bild 44: Biegefestigkeit in Abhängigkeit von der Trägerhöhe H (Kolbenabstand $\Delta = 2000$ mm)



Aus Bild 46 ist ersichtlich, daß mit dieser mittleren Keilzinkenfestigkeit die hohen Holzfestigkeiten der Reihen »KARHO« und »KAREMO« nur ungenügend ausgenutzt werden können, weil die Anzahl der Träger mit Keilzinkenversagen gegenüber den Reihen »RHO« und »EMO« wieder deutlich zunimmt. Die Vorteile einer kombinierten visuellen/maschinellen Sortierung können also z. Z. nur mit überdurchschnittlichen Keilzinkenverbindungen sinnvoll ausgenutzt werden. Der Erfolg einer Holzsortierung hängt somit auch von der Ausgewogenheit der Faktoren »Holzfe-

Holzsortierung	Reihe	Anforderungen an die Bretter		
		Ästigkeit ²⁾	Darr-Rohdichte ρ_0 g/cm ³	Elastizitätsmodul E N/mm ²
visuell	Kl. I	Gkl. I ¹⁾	—	—
	Kl. II	Gkl. II ¹⁾	—	—
	KAR	KAR $\leq 0,10$	—	—
maschinell	RHO	Gkl. II ¹⁾	$\geq 0,50$	—
	EMO	Gkl. II ¹⁾	—	$\geq 15\ 000$
visuell/ maschinell	KARHO	KAR $\leq 0,10$	$\geq 0,50$	—
	KAREMO	KAR $\leq 0,10$	—	$\geq 15\ 000$

¹⁾ nach [39]

²⁾ KAR-Wert = auf den Brettquerschnitt bezogene Astfläche (Knot Area Ratio)

Tabelle 4: Anforderungen an die Bretter der beiden äußeren Zuglamellen

Bild 45: Vergleich zwischen mittlerer, berechneter Biegefestigkeit $\bar{\beta}_{B,Sim}$ und tatsächlicher Biegefestigkeit $\beta_{B,Versuch}$ (links)

stigkeit« und »Keilzinkenfestigkeit« ab: die Verbesserung nur eines dieser Faktoren führt zu einer größeren Streuung der Versuchswerte, die eine höhere, mittlere Tragfähigkeit wieder zunichte machen kann.

Mit Hilfe des »Karlsruher Rechenmodells« war es somit möglich, die Auswirkungen, aber auch die Grenzen von verschiedenen Holzsortierungen auf die Tragfähigkeit von BSH-Trägern qualitativ und quantitativ abzuschätzen. Eine ausführlichere Veröffentlichung über dieses Forschungsvorhaben ist in Vorbereitung.

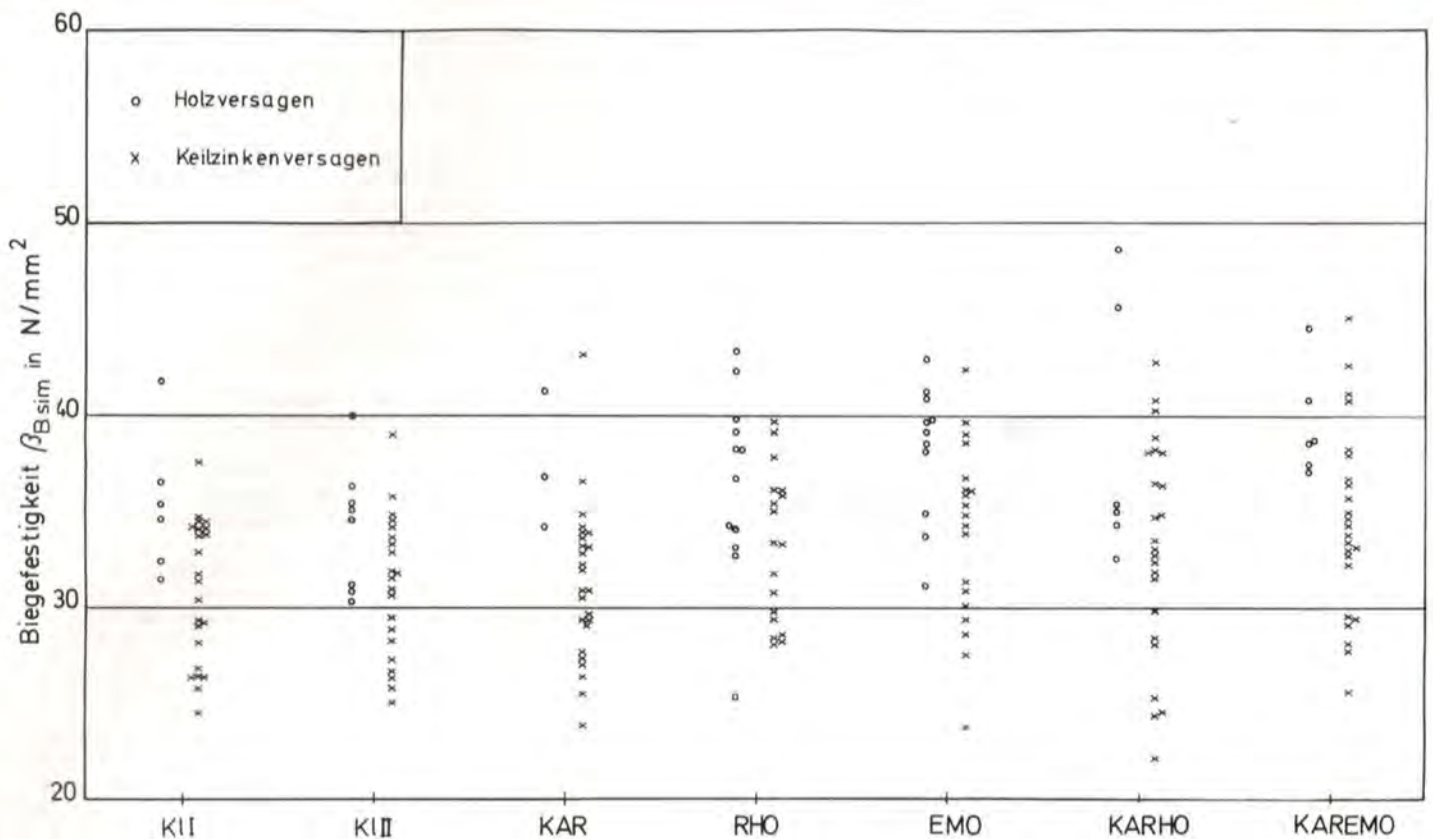


Bild 46: Biegefestigkeit β_B in Abhängigkeit von verschiedenen Möglichkeiten der Holzsortierung (vgl. Tabelle 4)

13 Schlußbemerkung

Die in dieser Veröffentlichung vorgestellten abgeschlossenen oder noch in Bearbeitung befindlichen Karlsruher Forschungsprojekte im Bereich des Ingenieurholzbaues sollen einen Eindruck von den gegenwärtigen Forschungsaktivitäten vermitteln. Es ist allen Mitarbeitern an diesen Projekten ein Bedürfnis, für die von vielen Seiten erfolgte finanzielle Förderung der Vorhaben zu danken. Wenn auch in Zukunft die Möglichkeit erhalten bleibt, intensive theoretische und versuchstechnische Forschung zu betreiben, werden der Nutzung des Werkstoffes Holz im Bauwesen

weitere Möglichkeiten eröffnet werden können. Der Transfer der Forschungsergebnisse in die Normungsarbeit und die praktische Anwendung darf aber nicht unbeachtet bleiben. Daher bleibt es nach wie vor eine wichtige Aufgabe des Karlsruher Institutes, sich auch an nationalen und internationalen Normungsvorhaben aktiv zu beteiligen. Es muß sich aber auch die Holzbaubauindustrie den neuen Erkenntnissen gegenüber offen zeigen und aktiv an der möglichen Qualitätssteigerung des konstruktiven Holzbaues mitwirken.

Literatur

- [1] Möhler, K.; Freiseis, R. 1984: Erhöhung der Querdrukfestigkeit von Auflagerungen durch zusätzliche Konstruktionsmaßnahmen. IRB-Verlag Stuttgart, Best.-Nr. F 1879/2
- [2] Möhler, K.; Siebert, W. 1984: Untersuchungen zur Erhöhung der Querdrukfestigkeit in gefährdeten Bereichen. »bauen mit holz« 86: S. 388–393
- [3] Möhler, K.; Freiseis, R. 1983: Untersuchungen zur Bemessung von Holzstützen mit nachgiebigem Fußanschluß. »bauen mit holz« 85: S. 648–653
- [4] Möhler, K.; Freiseis, R. 1984: Aussteifung von Stahlprofilen im Lasteinleitungsbereich mittels Nadelholz. IRB-Verlag Stuttgart, Best.-Nr. T 1238
- [5] Möhler, K.; Beyersdorfer, P. 1987: Festigkeitsuntersuchungen an einheimischem Douglasienholz als Bauholz. Holz Roh-Werkstoff 45: S. 49–58
- [6] Möhler, K.; Steck, G. 1980: Untersuchungen über die Ribbildung in Brettschichtholz infolge Klimabeanspruchung. »bauen mit holz« 82: S. 194–200
- [7] Steck, G. 1987: Relaxationsversuche mit Brettschichtholzproben unter Querdrukbeanspruchung infolge Feuchtezunahme. Holz Roh-Werkstoff 45: S. 137–140
- [8] Ehlbeck, J.; Görlacher, R. 1984: Querdrukgefährdete Anschlüsse mit Nagelplatten. »bauen mit holz« 86: S. 587–591
- [9] Ehlbeck, J.; Görlacher, R. 1985: Zum Querdruknachweis bei Anschlüssen mittels Stahlblechformteilen. »bauen mit holz« 87: S. 468–473
- [10] Ehlbeck, J.; Görlacher, R. 1985: Tragfähigkeit von Balkenschuhen unter zweiachsiger Beanspruchung. »bauen mit holz« 87: S. 534–536
- [11] Ehlbeck, J.; Görlacher, R. 1983: Mindestnagelabstände bei Stahlblech-Holz-Nagelung. IRB-Verlag Stuttgart, Best.-Nr. F 1879/3
- [12] Ehlbeck, J.; Siebert, W. 1985: Tragverhalten von Nagelverbindungen bei gleichzeitiger Beanspruchung auf Abscheren und Ausziehen. IRB-Verlag Stuttgart, Best.-Nr. F 1913
- [13] Ehlbeck, J.; Hättich, R. 1986: Physikalische, insbesondere mechanische Eigenschaften von Kunstharz-Preßholz. Holz Roh-Werkstoff 44: S. 449–452
- [14] Ehlbeck, J.; Colling, F. 1985: Scherfestigkeit rechtwinklig zur Plattenebene und Schubmodul von Bau-Furniersperrholz aus Buche. Holz Roh-Werkstoff 43: S. 143–147
- [15] Ehlbeck, J.; Colling, F.; Görlacher, R. 1985: Einfluß keilgezinkter Lamellen auf die Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern. Holz Roh-Werkstoff 43: S. 333–337, 369–373, 439–442
- [16] Hemmer, K. 1985: Versagensarten des Holzes der Weißtanne (*Abies alba*) unter mehrachsiger Beanspruchung. Berichte der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine der Universität Fridericiana in Karlsruhe, 4. Folge – Heft 11

- [17] Steck, G.; Görlacher, R. 1987: Methoden zur zerstörungsfreien und zerstörungsarmen Prüfung von Bauholz – eine Literaturlauswertung. Jahrbuch des SFB 315, Ernst & Sohn, Berlin
- [18] Görlacher, R. 1987: Zerstörungsfreie Prüfung von Holz: Ein »in-situ«-Verfahren zur Bestimmung der Rohdichte. Holz Roh-Werkstoff 45 (in Vorbereitung)
- [19] Görlacher, R. 1984: Ein neues Meßverfahren zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls von Holz. Holz Roh-Werkstoff 42: S. 219–222
- [20] Ehlbeck, J.; Hätlich, R. 1987: Über die Erforschung des Trag- und Verformungsverhaltens von Knotenpunkten und Verbindungsmitteln alter Holzkonstruktionen, Jahrbuch des SFB 315 Ernst & Sohn, Berlin
- [21] Ehlbeck, J.; Blaß, H. J. 1987: Berechnung der Zuverlässigkeit des ein- und mehrteiligen Holzdruckstabes im Hinblick auf Normungsvorschläge auf der Basis eines wahrscheinlichkeitsorientierten Sicherheitskonzeptes. Forschungsberichte der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abt. Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen, Universität Karlsruhe (in Vorbereitung)
- [22] Glos, P. 1978: Zur Bestimmung des Festigkeitsverhaltens von Brettschichtholz bei Druckbeanspruchung aus Werkstoff- und Einwirkungskenngrößen. Berichte zur Zuverlässigkeitstheorie der Bauwerke, Heft 35, Sonderforschungsbereich 96, TU München
- [23] Ehlbeck, J.; Blaß, H. J. 1987: Imperfektionsannahmen für Holzdruckstäbe, Holz Roh-Werkstoff 45 (in Vorbereitung)
- [24] Möhler, K.; Scheer, C.; Muszala, W. 1983: Knickzahlen für Voll-, Brettschichtholz und Holzwerkstoffe. »bauen mit holz« 85: S. 500–505
- [25] Möhler, K. 1942: Tragkraft und Querkraft von ein- und mehrteiligen Holzdruckstäben nach Versuch und Rechnung. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH)
- [26] Ehlbeck, J.; Beyersdorfer, P.; Steck, G. 1987: Die Auswirkung wechselnder Klimabeanspruchung auf Formänderungsverhalten und Tragfähigkeit genagelter Holzspanplatten-Vollholz-Verbindungen. Forschungsbericht der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abt. Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen, Universität Karlsruhe (in Vorbereitung)
- [27] Polensek, A. 1982: Creep prediction for nailed joints under constant and increasing loading. Wood Science 15: 183–192.
- [28] Möhler, K. 1966: Versuche über das Dauerstandverhalten von Nagelverbindungen. Berichte aus der Bauforschung Heft 47, Holzbau-Versuche (III. Teil): 57–74. Wilhelm Ernst u. Sohn, Berlin.
- [29] CIB-Structural Timber Design Code 6. Edition, 1983: CIB-Publication 66.
- [30] EUROCODE 5 Timber Structures, Entwurf 1986.
- [31] Riberholt, H. 1986: Glued Bolts in Glulam. Afdelingen for Baerende Konstruktioner, Danmarks tekniske Højskole. Serie R., No. 210
- [32] Riberholt, R. 1978: Eingeleimte Gewindestangen. Afdelingen for Baerende Konstruktioner, Danmarks tekniske Højskole. Rapport Nr. R 99 (Deutsche Fassung, Januar 1979)
- [33] Möhler, K.; Hemmer, K. 1981: Versuche mit eingeleimten Gewindestangen. IRB-Verlag Stuttgart, Best-Nr. F 1771
- [34] Möhler, K.; Hemmer, K. 1981: Eingeleimte Gewindestangen. »bauen mit holz« 83: 296–298
- [35] Ehlbeck, J.; Siebert, W. 1987: Praktikable Einleimmethoden und Wirkungsweise von eingeleimten Gewindestangen unter Axialbelastung bei Übertragung von großen Kräften und bei Aufnahme von Querkraftkräften in Biegeträgern. Teil 1: Einleimmethoden, Meßverfahren, Haftspannungsverlauf. Forschungsbericht der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abt. Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen, Universität Karlsruhe
- [36] Ehlbeck, J.; Colling, F. 1987: Tragfähigkeit von mit Glasfaser-Verbund-Profilen verstärkten Brettschichtholzträgern. Forschungsbericht der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abt. Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen, Universität Karlsruhe (in Vorbereitung)
- [37] Heimeshoff, B.; Glos, P. 1980: Zugfestigkeit und Biege-E-Modul von Fichten-Brettlamellen. Holz Roh-Werkstoff 38: 51–59
- [38] Ehlbeck, J.; Colling, F. 1987: Biegefestigkeit von Brettschichtholz in Abhängigkeit von Rohdichte, Elastizitätsmodul, Ästigkeit und Keilzinkung der Lamellen, der Lage der Keilzinkung sowie von der Trägerhöhe. Teil A: Karlsruher Untersuchungen, Forschungsbericht der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abt. Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen, Universität Karlsruhe
- [39] Colling, F.; Dinort, R. 1987: Die Ästigkeit des in den Leimbaubetrieben verwendeten Schnittholzes, Holz Roh-Werkstoff 45: 23–26
- [40] Colling, F.; Scherberger, M. 1987: Die Streuung des Elastizitätsmoduls in Brettllängsrichtung. Holz Roh-Werkstoff 45: 95–99