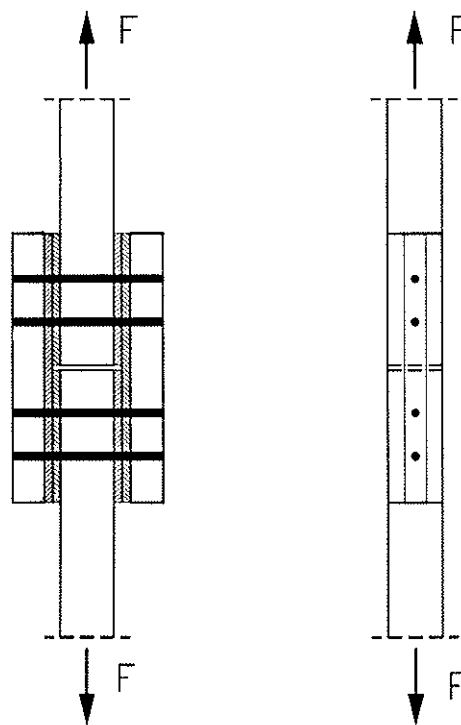


Möglichkeiten zur Leistungssteigerung von Anschlüssen mit stiftförmigen Verbindungsmiteln

von

Jürgen Ehlbeck und Hartmut Werner



Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine

Abt. Ingenieurholzbau

Universität Fridericiana Karlsruhe

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Ehlbeck

Vorwort

Diese Arbeit entstand in den Jahren 1991 bis 1993 im Auftrage und mit Unterstützung der Entwicklungsgemeinschaft Holzbau (EGH) in der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung (DGfH). Die finanziellen Mittel wurden vom Ministerium für Wirtschaft, Mittelstand und Technologie Baden-Württemberg und von der Holzwirtschaft bereitgestellt. Zu einzelnen Teilproblemen wurden in freimütiger Weise Hilfeleistungen aus der Industrie erbracht.

Das Hauptziel der Forschungsarbeit bestand darin, zu ergründen, durch welche Einflußgrößen die Tragfähigkeit und das Verformungsverhalten von mechanischen Holzverbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln entscheidend bestimmt werden und wie sich diese Parameter im einzelnen auswirken. Darauf aufbauend sollten Ansatzpunkte zur möglichen Leistungssteigerung herausgestellt werden, um konstruktive Maßnahmen in sinnvoller Weise empfehlen zu können. Unter Berücksichtigung der Streuungen aller Einflußparameter und mit Hilfe von speziell entwickelter Rechenprogramme gelang es, praktikable konstruktive Maßnahmen und zuverlässige Rechenverfahren für die Bemessung aufzubereiten. Die Ergebnisse dieser Arbeit liefern eine breite Grundlage zur Einführung leistungsstarker Anschlüsse im konstruktiven Holzbau.

Die Erarbeitung der theoretischen Grundlagen und die Planung und Durchführung versuchstechnischer Untersuchungen lag in den Händen des Herrn Dr.-Ing. Hartmut Werner. Die Herstellung der Versuchskörper und die Abwicklung der Prüfungen besorgten in bewährter Weise die Herren Günter Rüd und Johann Lafferthorn. Die besonderen Versuche zur Bestimmung von Haftspannungen unter Querbelastrung wurden in der Abteilung Versuchswesen und Meßtechnik des Instituts für Baustatik, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Udo Vogel, unter Leitung des Herrn Dipl.-Ing. Guido Karius durchgeführt. Mit großer Gewissenhaftigkeit wurden Auswertungen und Darstellung von Ergebnissen von den wissenschaftlichen Hilfskräften, Herrn cand.ing. Axel Bißwurm, Herrn cand.ing. Frank Lederer und Herrn cand.ing. Rolf Malthaner durchgeführt.

Das Interesse aller Mitarbeiter an der Sache und die Freude über die neu gewonnenen Erkenntnisse ermöglichten das Zustandekommen der Arbeit. Dafür sei allen gedankt.

Jürgen Ehlbeck

Inhaltsverzeichnis

1	Ziel der Untersuchung	1-1
2	Auswertung des Schrifttums	2-1
3	Erörterung der Möglichkeiten zur Leistungssteigerung von Anschlüssen	3-1
4	Experimentelle Untersuchung verschiedener Einflußgrößen	4-1
4.1	Lochleibungsfestigkeit verschiedener Verstärkungswerkstoffe	4-1
4.1.1	Allgemeines	4-1
4.1.2	Lochleibungsfestigkeit von Bau-Furniersperrholz aus Buche	4-1
4.1.3	Lochleibungsfestigkeit von Kunstharzpreßholz und Preßfurniersperrholz	4-3
4.2	Einfluß einer als Verstärkung aufgeklebten Holzwerkstoffplatte auf die Lochleibungsfestigkeit von Nadelholz	4-5
4.3	Mechanische Verankerung der Verbindungsmittel im Holz	4-7
4.3.1	Allgemeines	4-7
4.3.2	Verankerungskräfte und deren Verteilung entlang einem profilierten Verbindungsmittel	4-8
4.3.3	Endverankerung des Verbindungsmittels	4-13
4.3.4	Experimentelle Bestimmung der Haftspannungen unter Querbelastung	4-14
4.4	Biegewiderstand von Verbindungsmitteln	4-23

4.5	Spaltempfindlichkeit der Hölzer	4-27
4.5.1	Allgemeines	4-27
4.5.2	Spaltbeanspruchung von in Faserrichtung beanspruchten Verbindungen mit runden stiftförmigen Verbindungsmitteln	4-28
4.5.3	Anwendung der Bruchmechanik auf das Spaltversagen von Verbindungen unter Beanspruchung in Faserrichtung	4-31
4.5.4	Ermittlung der Spaltbruchzähigkeit	4-33
4.6	Leimverbindung zwischen Holz und Holzwerkstoffen	4-39
5	Modell zur Berechnung der Tragfähigkeit von Verbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln	5-1
5.1	Allgemeines	5-1
5.2	Auszieh- und Umlenkkräfte	5-2
5.2.1	Einschnittige Verbindungen	5-3
5.2.2	Zweischchnittige Verbindungen	5-4
5.3	Rechenmodell	5-5
5.4	Bemessungsgleichungen	5-8
5.4.1	Holz-Holz-Verbindungen mit verstärkten Anschlußbereichen	5-8
5.4.2	Stahlblech-Holz-Verbindungen	5-10
5.5	Rechenprogramm "XJOINT"	5-12

6	Entwicklung von leistungsfähigen Anschlüssen	6-1
6.1	BFU-BU verstärkte Stahlblech-Holz-Nagel- verbindung mit nicht vorgebohrten Stahlblechen	6-1
6.2	Buche-Furniersperrholz verstärkte Holz-Holz- Verbindung mit Stabdübeln und eingedrehten Gewindestangen	6-9
6.2.1	Versuchsprogramm und Versuchsdurchführung	6-9
6.2.2	Ergebnisse der Zugscherversuche	6-11
6.2.3	Ergebnisse der Simulationsrechnung	6-16
6.3	Verstärkte Stahlblech-Holz-Verbindung mit aufgeschweißten Gewindebolzen	6-20
6.4	Preßfurniersperrholz verstärkte Holz-Holz- Verbindung mit Paßbolzen	6-23
6.5	Stahlblech-Holz-Stabdübelverbindung mit Brettschichtholz aus Nadelholz- und Buchefurniersperrholzlammellen	6-26
7	Empfehlungen für die Bemessung von Verbindungen mit verstärkten Anschluß- bereichen	7-1
8	Zusammenfassung	8-1
9	Schrifttum	9-1

1 Ziel der Untersuchung

Die Tragfähigkeit des Anschlußbereiches stellt bezüglich des Tragverhaltens der gesamten Holzkonstruktion die Schwachstelle dar. Der Wirkungsgrad eines Anschlusses mit stiftförmigen Verbindungsmitteln ohne Verstärkungsmaßnahmen liegt bezogen auf den Bruttoquerschnitt des Stabes bei etwa 40% bis 60%.

Für die Leistungsfähigkeit und somit auch für die Wirtschaftlichkeit eines Tragwerkes hat die konstruktive Ausbildung der Verbindung eine ausschlaggebende Bedeutung. Sind die wesentlichen Einflußparameter auf deren Trag- und Verformungsverhalten bekannt, kann durch gezielte Änderungen an der konstruktiven Ausbildung eine Verbesserung erreicht werden. Durch lokale Verstärkungen, insbesondere durch Aufleimen von Holzwerkstoffplatten wie z.B. Baufurniersperrholz aus Buche auf die Hölzer einer Verbindung, können die natürlichen Schwächen des Baustoffes Holz ausgeglichen werden.

Die Ergebnisse orientierender Vorversuche von BLAß und WERNER 1988 mit aufgeleimtem Baufurniersperrholz aus Buche im Bereich der Scherflächen von Nadelholzverbindungen ergaben, daß einerseits durch das Aufleimen die Spaltgefahr des Nadelholzes erheblich reduziert wird und andererseits sich die höhere Lochleibungsfestigkeit des Bau-Furniersperrholzes aus Buche in den am höchsten beanspruchten Bereichen des Anschlusses tragfähigkeitssteigernd auswirkt.

Ziel dieses Forschungsprojekts ist es, Maßnahmen zur Leistungssteigerung separat systematisch zu untersuchen und die Ergebnisse in geeigneter Weise zu kombinieren, so daß zuverlässige Rechenverfahren zur Erfassung der Tragfähigkeiten solcher leistungsstarker Anschlüsse angegeben werden können.

2 Auswertung des Schrifttums

Ausgehend von umfangreichen Untersuchungen über das Trag- und Verformungsverhalten von Anschlüssen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln (EHLBECK, WERNER 1989 und 1992) an der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abt. Ingenieurholzbau, wurden Literaturstellen, insbesondere bezüglich der Möglichkeiten der Leistungssteigerung solcher Verbindungen, ausgewertet.

Schon in den 20er und 30er Jahren wurden im Holzflugzeugbau verschiedene Verstärkungsmöglichkeiten von TRAYER 1928, TEICHMANN und BORKMANN 1930 sowie von PILGRIM 1940 untersucht, um den Wirkungsgrad von Anschlüssen zu verbessern.

In jüngerer Zeit wurden in der Schweiz von GEHRI und FONTANA 1983 Versuche mit Stabdübeln hoher Festigkeit und mit örtlich verstärkten Anschlußbereichen durchgeführt. Auf Holz aufgeklebte Stahlbleche, glasfaserverstärkte Kunststoffe und Preßfurniersperrhölzer wurden in den Niederlanden von LEITEN 1988a,b und 1991 als Verstärkungswerkstoffe getestet. Dabei hat sich Preßfurniersperrholz als geeignet erwiesen, und die gewonnenen Erkenntnisse lassen außerordentlich leistungsfähige mechanische Anschlüsse möglich erscheinen.

Druckscherversuche mit aufgeleimtem Bau-Furniersperrholz aus Buche im Bereich der Scherflächen von Nadelholzverbindungen mit Stabdübeln von BLAß und WERNER 1988 ergaben gegenüber Versuchskörpern aus Brettschichtholz unter denselben Versuchsbedingungen eine Traglaststeigerung um etwa 35%.

Nicht nur die Steigerung der Tragfähigkeit bzw. Steifigkeit, sondern auch ein rationelles Herstellungsverfahren tragen zur Leistungsfähigkeit einer Verbindung bei, wie Untersuchungen von Stahlblech-Holz-Verbindungen mit nicht vorgebohrten Stahlblechen unter Verwendung von Stahlnägeln (EHLBECK, EBERHART 1988) zeigten. Auch besteht die Möglichkeit, stiftförmige Verbindungsmittel in übergroße Löcher einzubringen und mit Epoxydharz einzugießen (RODD, HILSON, SPRIGGS 1989), um Herstellungstoleranzen auszugleichen und um im Traglastzustand den sogenannten Einhängeeffekt zu nutzen.

3 Erörterung der Möglichkeiten zur Leistungssteigerung von Anschlüssen

Für die Wirtschaftlichkeit und somit für die Leistungsfähigkeit eines Tragwerkes hat die konstruktive Ausbildung der Verbindungen und der damit verbundene Arbeitsaufwand eine ausschlaggebende Bedeutung. Leistungsfähige Verbindungsmitteltechniken bedingen eine eingehende Kenntnis des Trag- und Verformungsverhaltens des Holzes und der Holzwerkstoffe im Verbindungsmittelbereich. Weiterhin sind Kenntnisse über den Biege- und Torsionswiderstand und die Duktilität des Verbindungsmittels erforderlich. Auf Grund von theoretischen Überlegungen ergeben sich folgende Möglichkeiten zur Leistungssteigerung von Anschlüssen.

a.) *Verwendung von stiftförmigen Verbindungsmitteln aus hochfestem, duktilem Stahl*

Durch die Verwendung von Verbindungsmitteln aus hochfestem, duktilem Stahl kann bei gleichbleibendem Biege- und Torsionswiderstand der Durchmesser des Verbindungsmittels reduziert werden. Dadurch können eine höhere Lochleibungsfestigkeit für das Holz angesetzt, die Spaltgefahr des Holzes herabgesetzt und geringere Verbindungsmittelabstände vorgesehen werden.

b.) *Berücksichtigung der mechanischen Verankerung der Verbindungsmittel mit einer profilierten Schaftoberfläche im Holz*

Durch den Einhängeneffekt bei Verbindungsmitteln mit einer profilierten Schaftoberfläche sind Tragreserven vorhanden, die durch planmäßige Berücksichtigung die Leistungsfähigkeit der Verbindung steigern können.

c.) *Berücksichtigung der günstigeren Lagerungsbedingungen des Verbindungsmittels bei Stahlblechen in vorgefertigten Holzschlitzen*

Infolge der günstigeren Lagerungsbedingungen (Durchlaufwirkung) bei Verbindungen mit innenliegenden Stahlblechen werden die Lochleibungsspannungen besser im Holz verteilt, so daß größere Tragfähigkeiten zu erwarten sind.

d.) *Absperrn des Anschlußbereiches durch aufgeleimte Holzwerkstoffplatten*

Durch das Aufleimen von Holzwerkstoffplatten auf die Hölzer einer Verbindung wird das Aufspalten des Holzes verhindert und das Verdrängen des Holzes behindert. Dadurch ergeben sich auch Möglichkeiten, die Verbindungsmittelabstände zu reduzieren. Für Verstärkungsmaßnahmen von Verbindungen eignen sich in erster Linie Holzwerkstoffe, deren Lochleibungsfestigkeit wesentlich höher ist als die des zu verstärkenden Holzes. Dazu gehören vor allem Bau-Furniersperrholz aus Buche (BFU - BU), Kunstharzpreßholz (KPH) und Preßfurniersperrholz (PFU).

e.) *Rationelle Herstellungsverfahren von Verbindungen*

Durch die Entwicklung von rationellen Herstellungsverfahren lassen sich die Produktionskosten senken. Das Vorbohren der Stahlbleche und das paßgenaue Einbringen der Verbindungsmittel sind sehr arbeitsintensiv. Möglichkeiten wie das Durchschießen von dicken Stahlblechen oder das Bolzenschweißen stellen eine Alternative dar, deren Eignung aber nachgewiesen werden muß. Weiterhin können andere Bohrverfahren oder spezielle Bohrer eingesetzt werden, um Holz und Stahl gleichzeitig durchzubohren.

Basierend auf diesen Überlegungen wurden leistungsfähige Anschlüsse entwickelt. In Abschnitt 6 sind diese Verbindungen beschrieben. Zuerst müssen jedoch die wesentlichen Einflußgrößen auf die Tragfähigkeit von Verbindungen mit verstärkten Anschlußbereichen bekannt sein.

4 Experimentelle Untersuchung verschiedener Einflußgrößen

4.1 Lochleibungsfestigkeit verschiedener Holzwerkstoffplatten

4.1.1 Allgemeines

Die Lochleibungsfestigkeit von Holzwerkstoffen hängt stark vom Plattentyp und ihrem Aufbau ab. Für Flachpressplatten (MÖHLER, BUDIANTO, EHLBECK 1978), Bau-Furniersperrholz aus Buche (DRÖGE, KRAMER 1989), Furnierschichtholz aus Fichte (BLAß, WERNER 1988a), Kunstharzpreßholz (EHLBECK, KÜRTH 1991) und für Preßfurniersperrholz (EHLBECK, WERNER 1992b) liegen aus jüngster Zeit Untersuchungen über deren Lochleibungsfestigkeit vor. Jedoch unterscheiden sich alle Untersuchungen in der Prüfmethode, so daß die Ergebnisse nur schwer miteinander vergleichbar sind.

Für Verstärkungsmaßnahmen von Verbindungen eignen sich in erster Linie Holzwerkstoffe, deren Lochleibungsfestigkeit wesentlich höher ist als die des zu verstärkenden Holzes. Dazu gehören vor allem Bau-Furniersperrholz aus Buche (BFU-BU), Kunstharzpreßholz (KPH) und Preßfurniersperrholz (PFU).

4.1.2 Lochleibungsfestigkeit von Bau-Furniersperrholz aus Buche

Die Lochleibungsfestigkeit von Bau-Furniersperrholz aus Buche nach DIN 68705 Teil 5 wurde von DRÖGE, KRAMER 1989 an rechteckigen Probekörpern (**Bild 4.1**) mit einem halbrunden Loch, in welches der Stabdübel paßgenau eingelegt wurde, ermittelt. Mit dieser Versuchsanordnung wurden insgesamt 900 Versuche durchgeführt. Bis eine vergleichbare Anzahl von Versuchsergebnissen mit einer einheitlichen europäischen Prüfnorm vorliegt, wird diese Untersuchung bei der weiteren Betrachtung herangezogen. Ergänzend dazu wurden eigene Lochleibungsversuche nach EN 383 durchgeführt, um die Ergebnisse von Dröge und Kramer besser beurteilen zu können.

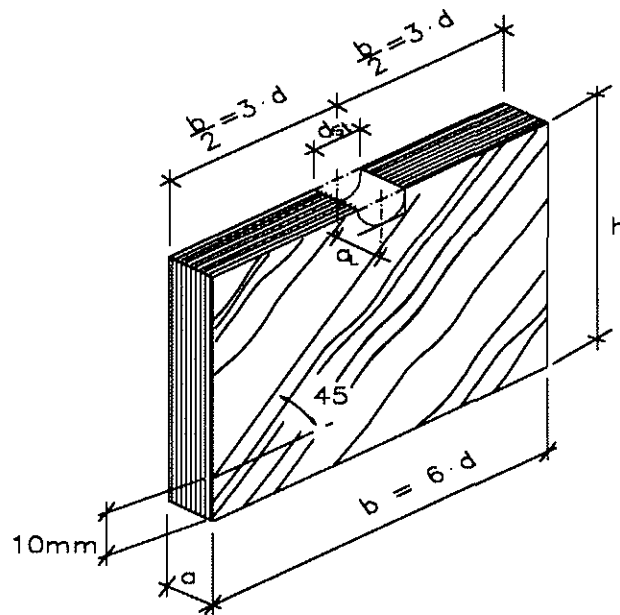


Bild 4.1: Probekörper zur Bestimmung der Lochleibungsfestigkeit nach DRÖGE, KRAMER 1989

Die Untersuchungen zeigten, daß die Lochleibungsfestigkeit im wesentlichen vom Durchmesser des Verbindungsmittels und nicht vom Kraft-Faser-Winkel abhängen. Für die Lochleibungsfestigkeit von Buchensperrholz für Stabdübel-durchmesser von 8 bis 26 mm wurde folgende Beziehung gefunden:

$$f_h = \left(0,79 + \frac{4,5}{\sqrt{d}} \right) \cdot \left(\frac{18}{e^{(1,9 \cdot t_L - 1)}} + 30 \right) \quad (\text{N/mm}^2) \quad (4.1)$$

$$s_R = 3,6 \text{ N/mm}^2$$

mit $t_L = \frac{t}{n}$

t Plattendicke in mm

n Anzahl der Furniere

d Verbindungsmitteldurchmesser in mm

Nach den Ausführungen von Dröge und Kramer behält diese Gleichung auch für kleinere Verbindungsmitteldurchmesser ihre Gültigkeit. Für gebräuchliche Furnierlagendicken von 1,4 mm bis 3,0 mm kann diese Gleichung wie folgt vereinfacht werden:

$$f_h = \left(0,79 + \frac{4,5}{\sqrt{d}} \right) \cdot 30 \quad (\text{N/mm}^2) \quad (4.2)$$

Lochleibungsversuche nach EN 383 (n = 15) im Rahmen dieses Forschungsprojekts mit 5-lagigem Bau-Furniersperrholz aus Buche (t = 9,5 mm) und Stabdübeln mit d = 16 mm ergaben folgende mittlere Lochleibungsfestigkeit:

$$f_h = 60,4 \text{ N/mm}^2 \quad v = 4,9 \%$$

In den **Anlagen 1 und 2** sind der Versuchsaufbau und die Last-Verformungsdiagramme dargestellt. In **Anlage 3** sind tabellarisch die Einzelergebnisse entsprechend EN 383 zusammengestellt. Wertet man Gl. 4.1 für diesen Plattentyp und Verbindungsmitteldurchmesser aus, so ergibt sich ein Wert von 60,0 N/mm². Somit kann davon ausgegangen werden, daß trotz der unterschiedlichen Prüfbedingungen die Ergebnisse direkt vergleichbar sind.

4.1.3 Lochleibungsfestigkeit von Kunstharzpreßholz und Preßfurniersperrholz

Für Kunstharzpreßholz (KPH) wurden von EHLBECK, KÜRTH 1991 Versuche in Anlehnung an EN 383 durchgeführt. Es wurden Platten mit den Dicken t = 12 mm und 20 mm mit Stabdübeln d = 16 mm und 24 mm getestet. Dabei wurde der Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung der Deckfurniere variiert. Es wurde kein eindeutiger Einfluß dieses Winkels festgestellt, wenn die Platte symmetrisch aufgebaut und die Furnierlagen in beiden Richtungen gleich dick waren. Bei gleicher Plattendicke ist die Lochleibungsfestigkeit um so größer, je kleiner der Stabdübeldurchmesser ist. Da nur zwei Stabdübeldurchmesser geprüft wurden, konnte kein eindeutiger mathematischer Zusammenhang angegeben werden. Aus allen 45 Versuchen ergab sich eine

$$\begin{array}{ll} \text{mittlere Lochleibungsfestigkeit von} & f_h = 174,7 \text{ N/mm}^2 \\ \text{und eine Standardabweichung von} & s = 10,9 \text{ N/mm}^2 \end{array}$$

Im Rahmen eines europäischen Forschungsprojekts untersuchten EHLBECK, WERNER 1992b die Lochleibungsfestigkeit von Preßfurniersperrholz (PFU) aus Buche, Pappel und Seekiefer. Die Versuche in Anlehnung an EN 383 wurden

mit Stabdübeln ($d = 17 \text{ mm}$) durchgeführt, wobei zwei Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung der Deckfurniere geprüft wurden.

Aus den Versuchsergebnissen kann folgendes geschlossen werden:

- Die Lochleibungsfestigkeit von Preßfurniersperrholz unter Druckbeanspruchung und unter Zugbeanspruchung ist etwa gleich groß. Das Verhältnis $f_{h,Zug} / f_{h,Druck}$ betrug im Mittel 0,98.
- Die Lochleibungsfestigkeit unter einem Winkel von 45° zwischen Kraft- und Faserrichtung der Deckfurniere ist etwa 5% größer als unter einem Winkel von 0° bzw. 90° .

Für die verschiedenen Preßfurniersperrhölzer wurden die in **Tabelle 4.1** angegebenen Lochleibungsfestigkeiten ermittelt.

Tabelle 4.1: Lochleibungsfestigkeit verschiedener Preßfurniersperrhölzer für Stabdübel mit $d = 17 \text{ mm}$

Preßfurniersperrholz aus	Anzahl der Versuche	Mittelwert Rohdichte ρ (kg/m^3)	Variationskoeffizient (ρ) (%)	Mittelwert Lochleibungsfestigkeit f_h (N/mm^2)	Variationskoeffizient (f_h) (%)
Buche	72	1243	7,62	129,9	15,5
Pappel	72	1231	3,12	121,5	7,01
Seekiefer	72	1237	6,05	117,7	7,65

RODD 1993 ermittelte die Lochleibungsfestigkeit von diesen Preßfurnierhölzern für Stabdübel mit $d = 35 \text{ mm}$. Dabei kam er zu ähnlichen Ergebnissen, so daß für die Berechnung der Tragfähigkeit von verstärkten Anschlüssen von den hier angegebenen Versuchswerten ausgegangen werden kann.

4.2 Einfluß einer als Verstärkung aufgeklebten Holzwerkstoffplatte auf die Lochleibungsfestigkeit von Nadelholz

Durch das Aufleimen von Holzwerkstoffplatten auf die Hölzer einer Verbindung wird die Art der Stauchung unter dem Verbindungsmittel beeinflusst. Zum einen wird das Aufspalten des Holzes verhindert und zum anderen wird das Verdrängen des Holzes behindert. Um den Einfluß einer als Verstärkung aufgeklebten Holzwerkstoffplatte auf die Lochleibungsfestigkeit von Fichtenholz zu untersuchen, wurden 30 Versuche in Anlehnung an EN 383 mit dem in **Bild 4.2** dargestellten Versuchskörper durchgeführt. Im Nadelholz wurden die Löcher mit dem Nenndurchmesser ($d = 8; 16$ und 24 mm) des Verbindungsmittels gebohrt, in der aufgeklebten Holzwerkstoffplatte befand sich ein um 10 mm größeres Langloch.



Bild 4.2: Versuchskörper aus Fichtenholz mit aufgeleimter Verstärkung

Als Lochleibungsfestigkeit des verstärkten Fichtenholzes wurde die Spannung definiert, die sich 2,5 mm vor Erreichen der Bohrlochwandung der Holzwerkstoffplatte einstellt. Hierbei war sichergestellt, daß das Verbindungsmittel auf der Verstärkung nicht aufsaß, aber das Nadelholz in

dessen Querdehnung sowohl in Faserrichtung als auch rechtwinklig dazu behindert wurde. **Bild 4.3** zeigt exemplarisch ein Last - Verformungsdiagramm eines solchen Versuchs. Die Auswertung der Versuche ergab folgende Regressionsgleichung:

Fichtenholz runde, glattschaftige Verbindungsmittel Löcher vorgebohrt

Beanspruchung in Faserrichtung (Anzahl der Versuche $n=30$)

$$f_{h,0} = 0,091 \cdot (1 - 0,010 \cdot d) \cdot \rho \quad A = 0,010 \quad (4.3)$$

$$r = 0,48 \quad s_R = 0,011$$

Es bedeuten

$f_{h,0}$ Lochleibungsfestigkeit parallel der Faserrichtung in N/mm^2 ,

ρ Normalrohddichte in kg/m^3 ,

d Durchmesser des Verbindungsmittels in mm,

r Korrelationskoeffizient,

s_R Standardabweichung des Residuums (Reststreuung)

A Steigungsbeiwert

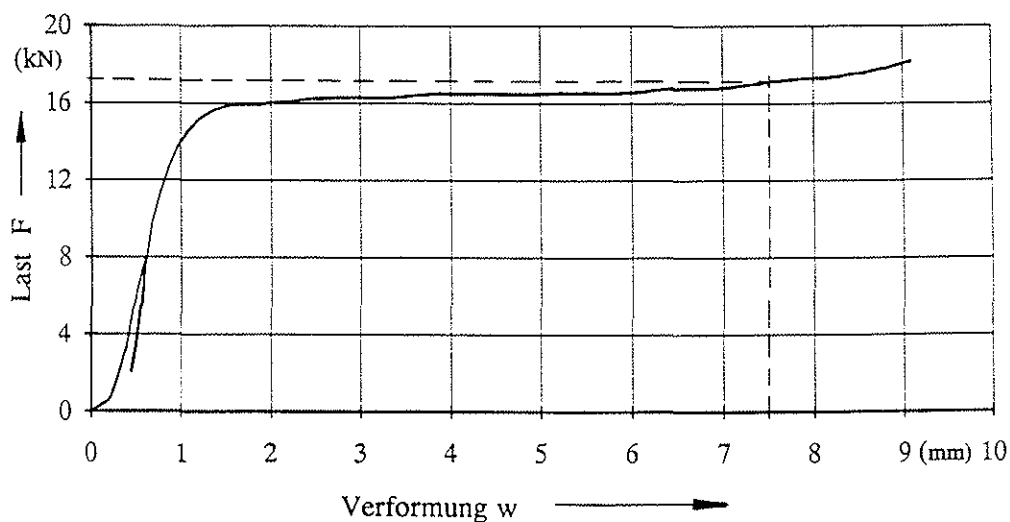


Bild 4.3: Last - Verformungsdiagramm einer Fichtenholzprobe unter Lochleibungsbeanspruchung (Behinderung der Querdehnung durch eine Holzwerkstoffplatte)

Dies entspricht einer ca. 10% -igen Steigerung der in ENV 1995-1-1 Gl. (6.5.1.2b) angegebenen Lochleibungsfestigkeit.

4.3 Mechanische Verankerung der Verbindungsmittel im Holz

4.3.1 Allgemeines

MEYER 1957 hat bereits früh auf die Erhöhung der Tragfähigkeit von Nagelverbindungen auf Grund des sog. "Seileffekts" hingewiesen. Seine Theorie geht davon aus, daß im Traglastzustand der Nagel sich schräg stellt und dadurch die Horizontalkomponente der Ausziehungskraft Reibungskräfte zwischen den verbundenen Hölzern erzeugt und diese zur Gesamttragfähigkeit der Verbindung beitragen. Dabei wurden jedoch Annahmen getroffen, die die Wirklichkeit nur bedingt beschreiben (siehe auch KUIPERS, VAN DER PUT 1982). So müßten z.B. wesentlich größere Verankerungskräfte im Holz als die Ausziehungskraft des Nagels wirken, um die erforderlichen Reibungskräfte zu erzeugen, da die Laschen bei einem Zuganschluß schon bei kleinen Verformungen der Nägel auseinanderweichen. KUIPERS und VAN DER PUT 1982 haben bei Untersuchungen jedoch festgestellt, daß bei geringen Ausmitten der äußeren Kräfte und bei Ansatz eines Reibungskoeffizienten von $\mu = 0,4$ diese zusätzliche Reibung von Holz auf Holz nur einen Anteil von 7 % an der Gesamtlast ausmacht, die somit vernachlässigt werden kann. Sie entwickelten eine Nagelreibungstheorie um das Tragverhalten von Nagelverbindungen besser abzuschätzen. Wenn sich der glattschaftige Nagel um ungefähr 45° schräg stellt und sich dabei nicht verbiegt, fanden sie, ist eine etwa 13 % höhere Belastung möglich als nach den Ansätzen von JOHANSEN 1949. Sollte sich der glattschaftige Nagel verbiegen, wird die Zugkraft im Nagel umgelenkt, wobei sich die aufnehmbare Kraft der Verbindung um ca. 27 % gegenüber der Rechnung nach der Plastizitätstheorie erhöht, wenn man für den Nagel eine sehr große Verformung annimmt. Für Nägel mit profiliertem Schaft ist eine bessere Haftung im Holz möglich, sodaß sich dieser Anteil erhöhen kann. WERNER und SIEBERT 1991 ermittelten bei Rillennägeln einen etwa 3,5 mal höheren Ausziehungswiderstand als bei glattschaftigen Nägeln. Diese Verhältnisse können sich jedoch bei großer Querbelastung noch ändern. Um die mechanische Verankerung der Verbindungsmittel im Holz in einem Rechenmodell zu berücksichtigen, muß die Größe der Verankerungskräfte und deren Verteilung entlang dem Verbindungsmittel bekannt sein.

4.3.2 Verankerungskräfte und deren Verteilung entlang einem profilierten Verbindungsmittel

Bei den Verankerungskräften und deren Verteilung ist zwischen einschnittigen und zweischnittigen Verbindungen zu unterscheiden. Bei einschnittigen Verbindungen kann das Verbindungsmittel in den beiden Hölzern gleiten, wenn es nicht durch einen Kopf auf einer Seite gehalten wird. Dagegen wirken bei zweischnittigen Verbindungen an den Schnittufern der Scherflächen Normalkräfte im Verbindungsmittel, die im Mittelholz umgelenkt werden.

Zur Ermittlung der Haftspannungsverteilung entlang einem profilierten Verbindungsmittel wurden auf Gewindestangen M 20 der Stahlgüte 8.8 Dehnmeßstreifen (DMS) appliziert und in zweischnittige Druckscherkörper aus Brett-schichtholz eingeschraubt. Dazu wurden zwei Nuten außen eingefräst, in welche die Dehnmeßstreifen in einem bestimmten Abstand eingeklebt wurden, um die Meßstreifen und ihre Anschlüsse vor Beschädigung zu schützen. Nach dem Anlöten und Verlegen der Anschlußkabel wurden die Nuten mit Polyesterharz ausgegossen. **Bild 4.4** zeigt einen Versuchskörper unter der Prüfmaschine. Die Durchführung der Versuche erfolgte nach DIN EN 26891. Dabei wurden die aufgebrachte Last, die Verschiebung der Verbindung und die Dehnungen an verschiedenen Stellen des Verbindungsmittels gemessen. In **Bild 4.5** ist exemplarisch ein Last-Verschiebungsdiagramm einer solchen Verbindung dargestellt. Die dazugehörige Normalspannungsverteilung im Verbindungsmittel und der daraus errechnete Schubflußverlauf bei Laststufe 50 kN, kurz vor Ausfall des Meßstreifes an der meist beanspruchten Stelle, zeigt **Bild 4.6**.

Der Schubfluß T bzw. die auf die Gleitfläche bezogene Haftspannung τ_h entlang einem Verbindungsmittel läßt sich ermitteln, wenn die Längsdehnungen ε in der neutralen Faser des Verbindungsmittels bekannt sind.

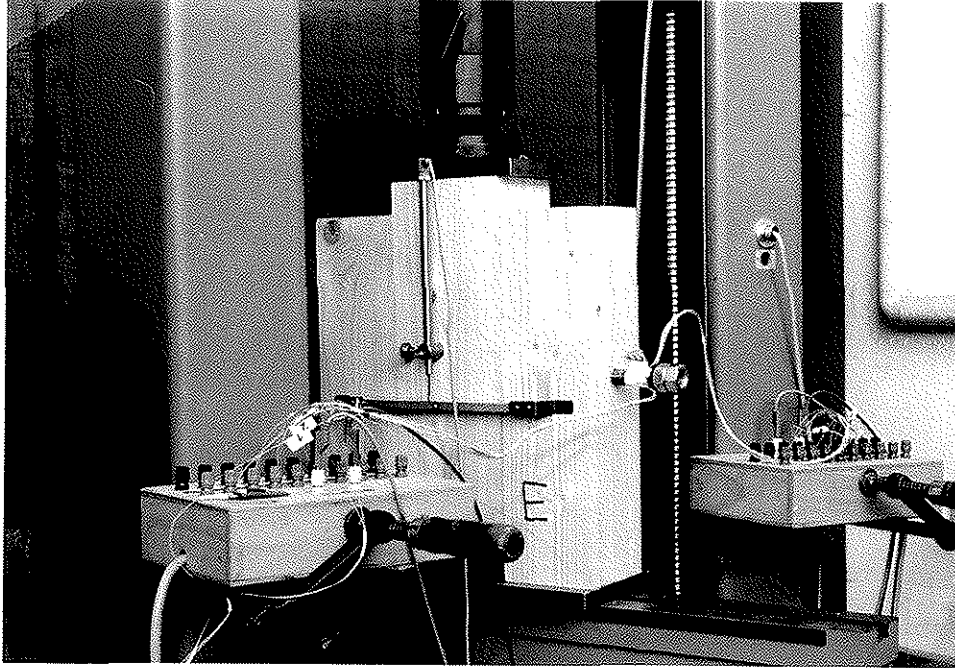


Bild 4.4: Versuchskörper zur Ermittlung der Haftspannungverteilung unter der Prüfmaschine

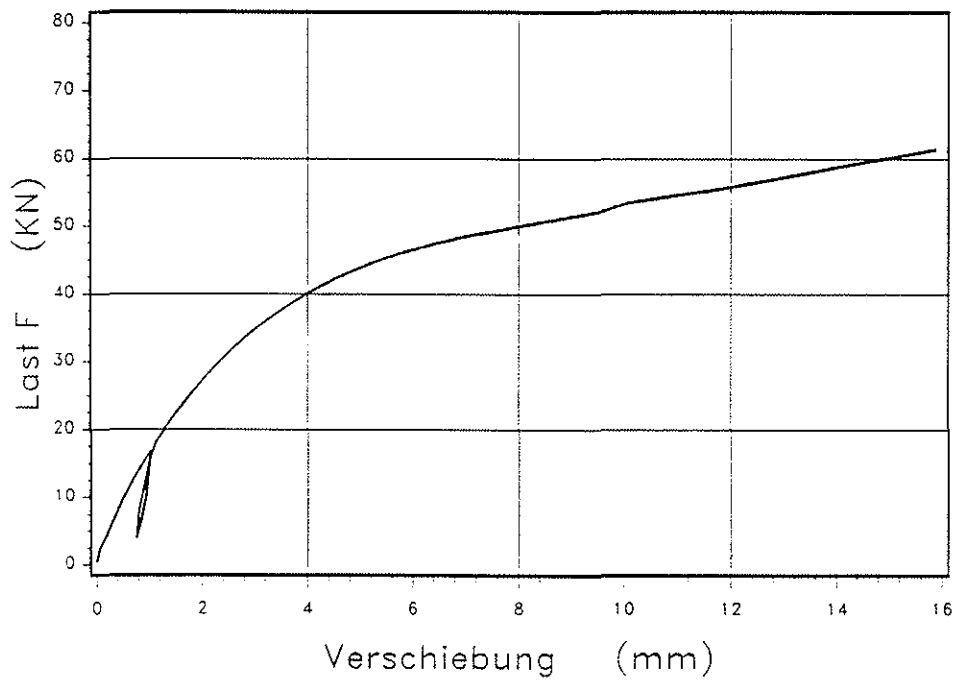


Bild 4.5: Last - Verschiebungsdiagramm einer Verbindung mit Gewindestange M20

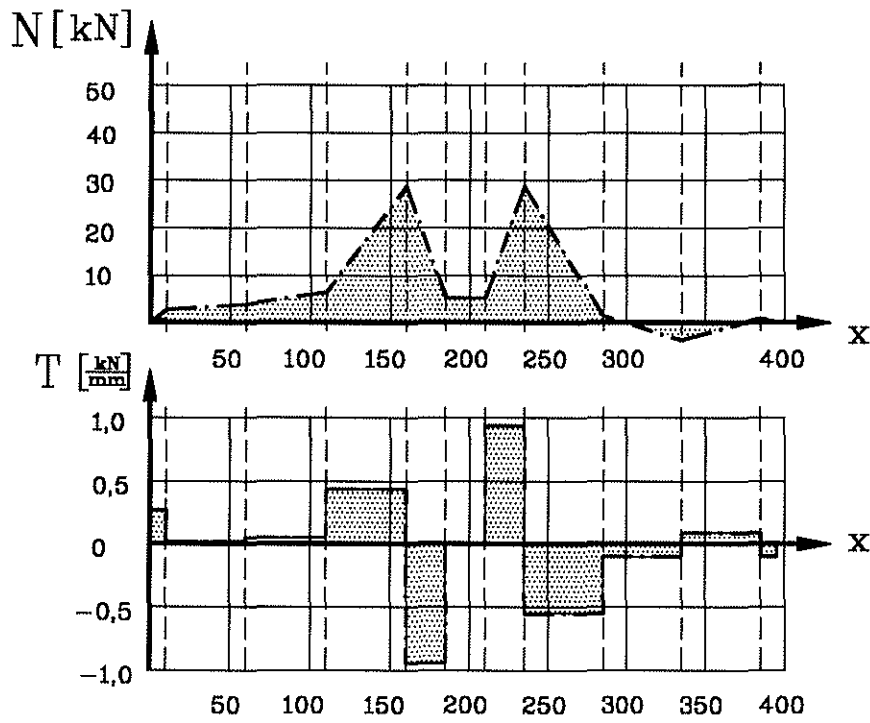
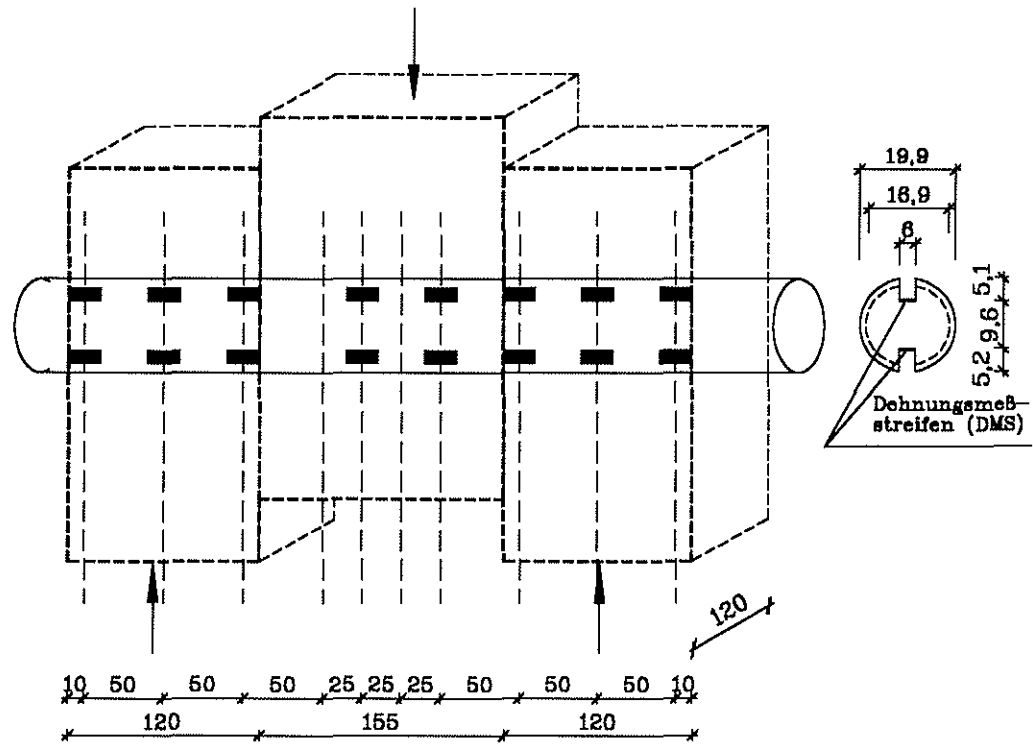
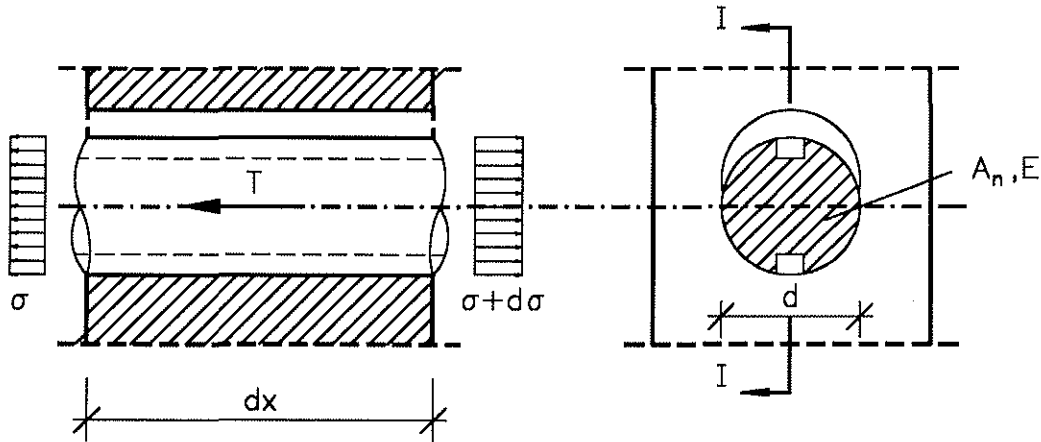


Bild 4.6: Normalkraftverteilung im Verbindungsmittel und der Schubflußverlauf entlang dem Verbindungsmittel

An einem abgeschnittenen Verbindungsmittel gelten bei konstantem Nettoquerschnitt A_n folgende Beziehungen:



$$T \cdot dx + \sigma \cdot A_n = (\sigma + d\sigma) \cdot A_n \quad (4.4)$$

$$T = A_n \cdot \frac{d\sigma}{dx} \quad (4.5)$$

$$T = A_n \cdot E \cdot \frac{d\varepsilon}{dx} \quad (4.6)$$

Die Beobachtungen aus den Versuchen und die daraus gewonnenen Erkenntnisse sind im Folgenden zusammengefaßt:

1. Außerhalb des Krümmungsbereichs kann die Haftspannung τ_h näherungsweise als konstant verteilt angenommen werden. Sie ist von der Art und der Oberflächenbeschaffenheit der beiden berührenden Materialien abhängig. Die Lochleibungsspannung wird in der Regel auf den Nenndurchmesser des Verbindungsmittels bezogen, die Haftspannung dagegen auf die berührende Gleitfläche.
2. Im Krümmungsbereich des Verbindungsmittels ist eine sprunghafte Änderung der Normalkraft zu beobachten. Daher liegt die Vermutung nahe, daß die Normalkraftänderung im Krümmungsbereich, wie bei Spanngliedern im Stahlbetonbau, durch das Seilreibungsgesetz über einen feststehenden Zylinder beschrieben werden kann. Für den Normalkraftverlust ΔN infolge der Umlenkung der Normalkraft N gilt folgende Beziehung (siehe auch **Bild 4.7**).

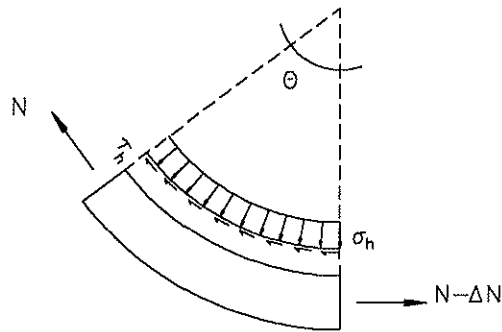


Bild 4.7: Normalkraftverlust infolge Umlenkung des Verbindungsmittels

$$\Delta N = N \cdot e^{\mu \cdot \theta} - N \quad (4.7)$$

mit N Normalkraft
 μ Gleitreibungsbeiwert
 θ Umlenkwinkel im Bogenmaß

Das Seilreibungsgesetz kann jedoch nur als gute Näherung betrachtet werden, da im Traglastzustand infolge der großen Eindrückungen im Holz die Ausziehungskraft nicht unabhängig von der Gleitfläche ist. Wie der starke Normalkraftverlust durch das Umbiegen des Verbindungsmittels im Mittelholz (siehe **Bild 4.6**) zeigt, kann bei profilierten Verbindungsmitteln von einer fast vollständigen Haftung im Holz ausgegangen werden. Gleiche Beobachtungen machten auch KUIPERS, VAN DER PUT 1982. Bei Annahme einer vollständigen Haftung ergibt sich auf Grund der folgenden Überlegungen der Gleitreibungsbeiwert zu eins.

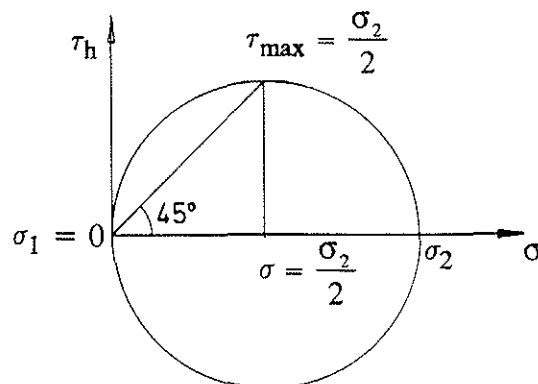


Bild 4.8 Mohrscher Spannungskreis für Verbindungsmittel mit vollständiger Haftung

Am Mohrschen Spannungskreis (**Bild 4.8**) wird deutlich, daß extremale Schubspannungen an den Scheitelpunkten des Kreises auftreten, und daß sie den Betrag

$$\tau_{\max} = \frac{|\sigma_1 + \sigma_2|}{2} \quad (4.8)$$

haben. Bei einem frühzeitigen Querzugbruch rechtwinklig zur Holzfaserrichtung ist die Hauptspannung $\sigma_1 = 0$. Die zugehörige Normalspannung σ zur Schubspannung τ_{\max} ist

$$\sigma = \frac{\sigma_2}{2} \quad (4.9)$$

und somit folgt

$$\mu = \frac{\tau_{\max}}{\sigma} = 1 \quad (4.10)$$

4.3.3 Endverankerung des Verbindungsmittels

Befindet sich an einem Ende bzw. an beiden Enden des Verbindungsmittels ein Kopf oder eine Mutter mit oder ohne Unterlegscheibe, so wirkt dies wie eine Endverankerung, die das Einziehen des verbogenen Verbindungsmittels im Traglastzustand behindert. Für die verschiedenen stiftförmigen Verbindungsmittel, insbesondere bei Nägeln, sind eine Vielzahl von Kopfausbildungen bekannt. Bei Bolzen oder Paßbolzen besteht die Endverankerung in der Regel aus Kopf oder Mutter mit einer Unterlegscheibe. **Bild 4.9** zeigt die Wirkungsweise der Endverankerung am Beispiel einer Paßbolzenverbindung.

Sie hängt jedoch stark von folgenden Einflüssen ab:

- Form und Fläche der Endverankerung
- Vorspanngrad des Verbindungsmittels
- Holzfeuchteunterschied bei der Herstellung der Verbindung und im Gebrauchszustand
- Druckfestigkeit rechtwinklig zur Faserrichtung
- Herstellungsgenauigkeit der Verbindung

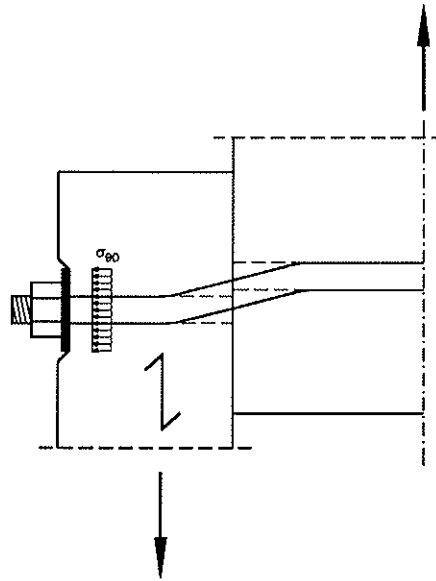


Bild 4.9: Endverankerung

Es ist z.B. eine schwache Endverankerung vorhanden, wenn die Unterlegscheiben bei der Herstellung der Verbindung nur angelegt und halbtrockene Hölzer verwendet werden, die nachher austrocknen können. Da sich der Grad der Endverankerung nur schwer bestimmen läßt und sich dabei traglaststeigernd auf die Gesamttragfähigkeit einer Verbindung auswirkt, wird auf deren Berücksichtigung in einem Rechenmodell verzichtet.

4.3.4 Experimentelle Bestimmung der Haftspannung unter Querbelastung

Um Eingangsdaten für die Berücksichtigung der Haftspannungen entlang dem Verbindungsmittel zu erhalten, wurden Ausziehversuche mit metrischen Gewindestangen unter Querbelastung durchgeführt. Diese Ausziehversuche unterscheiden sich im wesentlichen von den üblichen dadurch, daß eine definierte Querlast auf den Prüfkörper aufgebracht wird. Sie wird dabei so bemessen, daß sich die dadurch erzeugten Lochleibungsspannungen im Probekörper im Bereich des Traglastzustandes befinden, um Rückschlüsse auf die Tragfähigkeit von Verbindungen ziehen zu können.

4.3.4.1 Probekörper und Versuchsanordnung

Bei diesen Ausziehversuchen wird eine Gewindestange mit konstanter Geschwindigkeit von 5 mm/min durch eine aufgesägte Holzprobe gezogen. Die Lagerung der Hölzer und die Durchführung der Versuche erfolgte im Prüflabor bei Normalklima DIN 50014 - 20/65-2. Vor dem Aufsägen der Probekörper in zwei Hälften wurden die Hölzer mit etwa dem Flankendurchmesser (d.h. bei Gewindestange M8 Bohrlochdurchmesser 7 mm, bei M16 Bohrlochdurchmesser 15 mm und bei M20 Bohrlochdurchmesser 18,5 mm) gebohrt und die Gewindestangen eingeschraubt. Die Breite des Sägeschnitts vor Aufbringen der Querlast betrug 6 bzw. 10 mm. Nach Aufbringen der Querlast betrug der Spalt zwischen den beiden Hälften im Mittel 2 mm. In **Bild 4.10** ist der für diese Untersuchung verwendete Probekörper für eine Querbelastung in Faserrichtung und der für eine Querbelastung rechtwinklig zur Faserrichtung dargestellt.

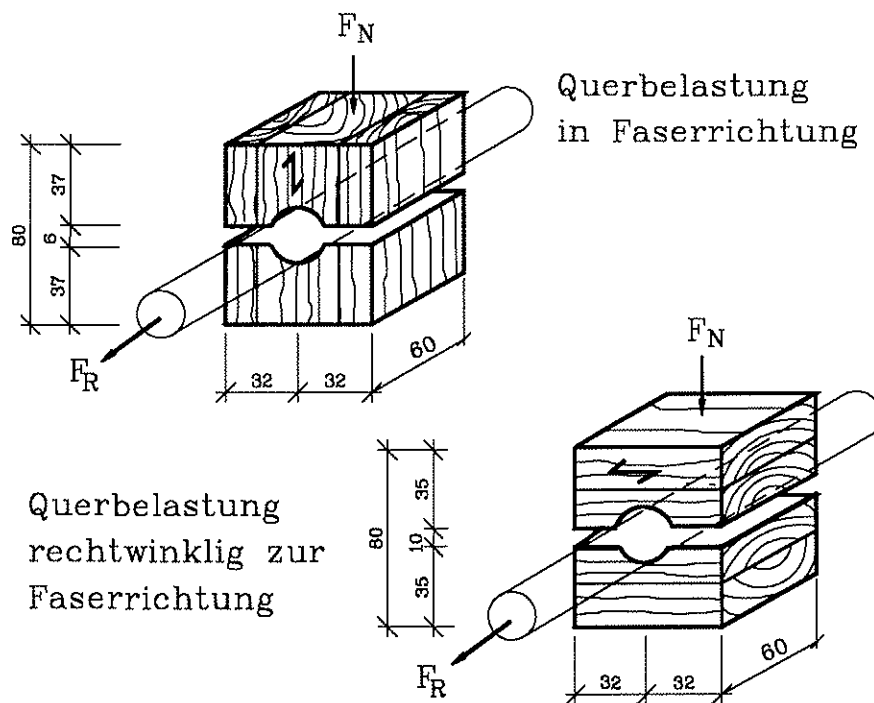


Bild 4.10: Probekörper zur Bestimmung der Haftspannungen unter Querbelastung

Die beiden Hälften der Holzproben wurden über einen Belastungshebel (Übersetzungsverhältnis 1:10) mittels unterschiedlichen Gewichten an die

Gewindestangen gepreßt. Die Ausziehkraft und der Ausziehweg wurden durch elektrische Meßwertwandler in analoge elektrische Größen umgeformt und auf einem Zweikoordinatenschreiber aufgezeichnet. **Bild 4.11** gibt den Versuchsaufbau schematisch wieder, die **Bilder 4.12** und **4.13** zeigen die Versuchsvorrichtung.

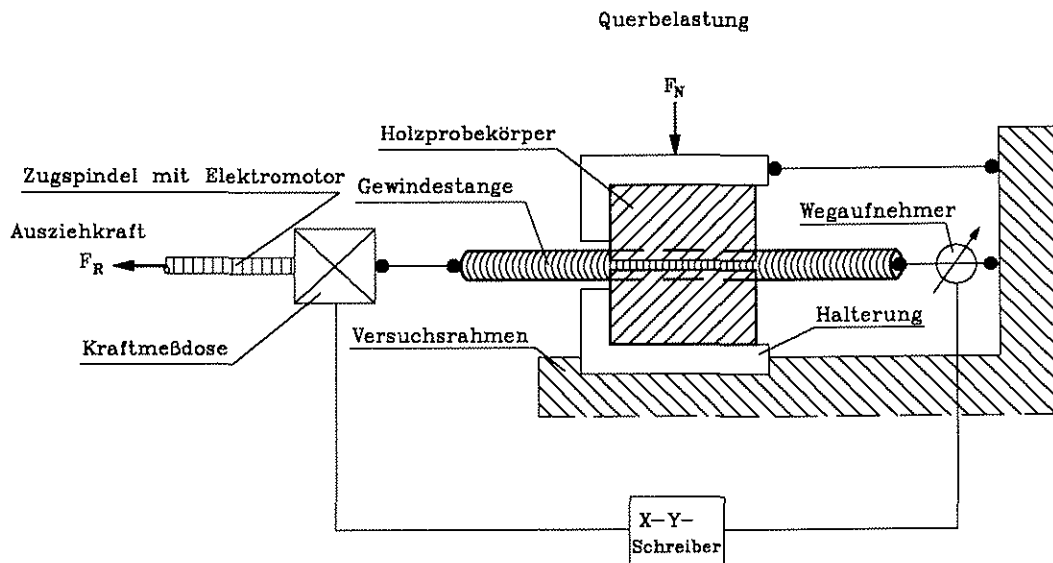


Bild 4.11: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus

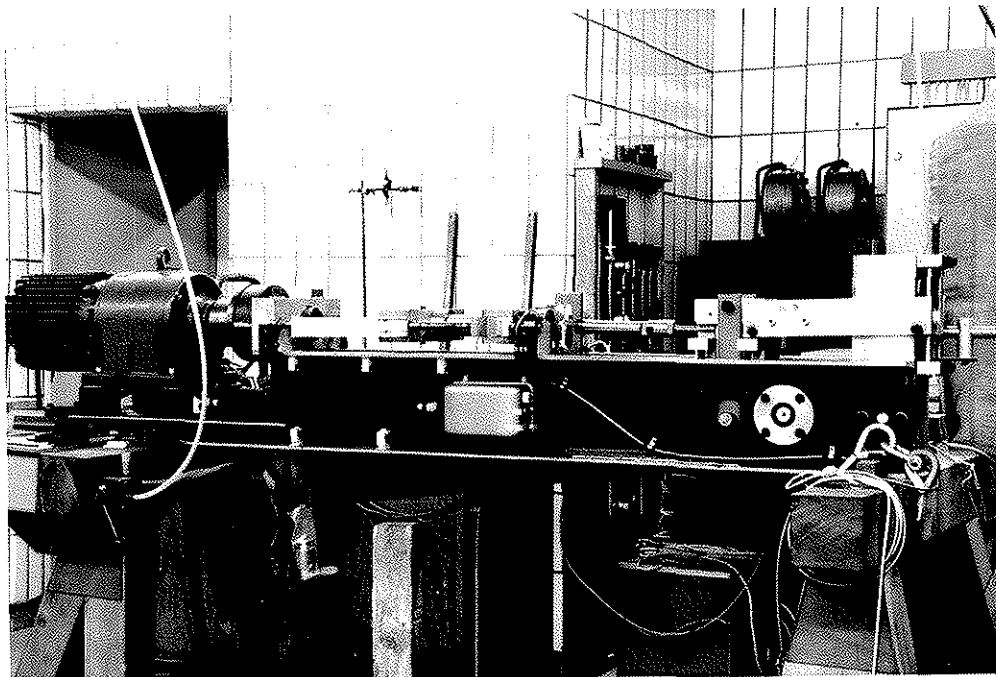


Bild 4.12: Versuchsvorrichtung (Gesamtansicht)

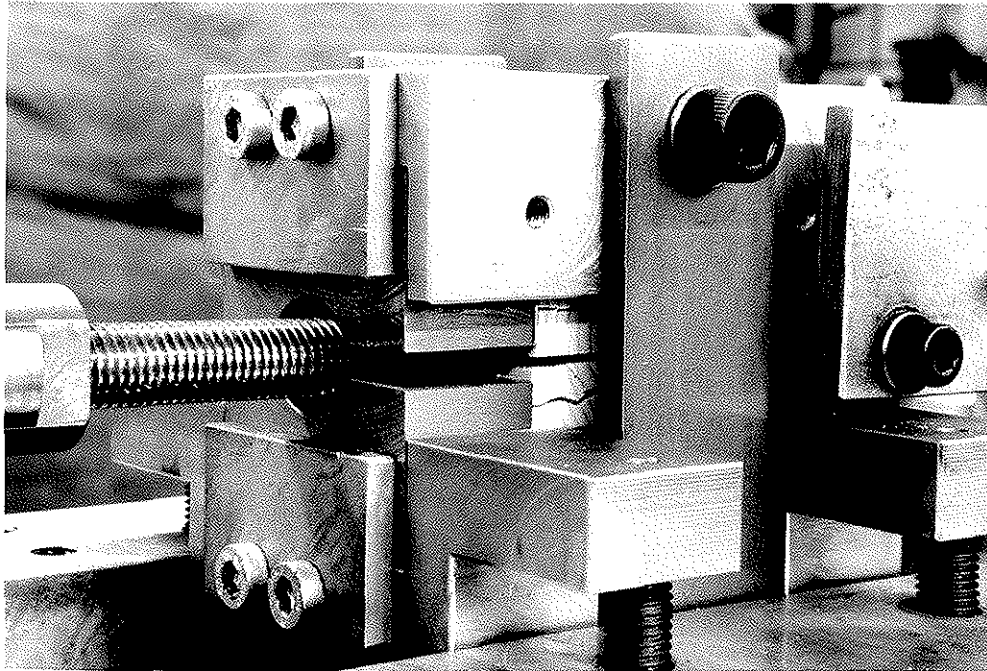


Bild 4.13: Probekörper in der Versuchsvorrichtung

Tabelle 4.2 gibt eine Übersicht über die durchgeführten Ausziehversuche mit Fichtenholz. Hierbei wurde die Ausziehungskraft unter einer Querbelastung in Faserrichtung als auch rechtwinklig zur Faserrichtung bestimmt. Weiterhin wurden acht Ausziehversuche mit Baufurniersperrholz aus Buche und Gewindestangen M16 durchgeführt, wobei das Bohrloch rechtwinklig zur Deckfurnierlage eingebracht wurde.

4.3.4.2 Versuchsmaterial

Für die Probekörper wurde Brettschichtholz aus Fichte verwendet, wobei die Gewindestange immer in eine Brettlamelle eingebracht wurde. Von der Lamelle wurden die Rohdichte, die Jahrringbreite und der Winkel zwischen Auszieh- und Tangentialrichtung der Jahrringe bestimmt. In **Tabelle 4.3** sind die Mittel- und Grenzwerte sowie die Standardabweichungen und die Variationskoeffizienten der 90 Proben zusammengestellt.

Tabelle 4.2: Zusammenstellung der Ausziehversuche mit Fichtenholz

Gewinde- stange	Belastungsstufe		
	I	II	III
	Querbelastung in Faserrichtung		
M8	-	M8/P-1 bis 10 (10 kN)	M8/P-11 bis 20 (13 kN)
M16	M16/P-21 bis 30 (15 kN)	M16/P-31 bis 40 (20 kN)	M16/P-41 bis 50 (25kN)
M20	M20/P-55 bis 60 (18 kN)	M20/P-61 bis 70 (25 KN)	-
	Querbelastung rechtwinklig zur Faserrichtung		
M16	M16/S-72 bis 80 (5 kN)	M16/S-86 bis 90 (7,5 KN)	M16/S-82 bis 85 (10 kN)

(Die Werte in den Klammern geben die Höhe der Querbelastung an)

Tabelle 4.3: Materialeigenschaften des Fichtenholzes

	Min.	Mittelwert	Max.	Standard- abweichung
Rohdichte (kg/m ³)	372	443	523	36
Jahringbreite (mm)	1,4	2,9	6,0	1,0
Winkel zwischen Auszieh- u. Tangential- richtung der Jahrringe	5°	37°	81°	20°

4.3.4.3 Ergebnisse der Versuche

In **Bild 4.14** und **Bild 4.15** sind exemplarisch Last-Verformungsdiagramme mit Gewindestangen M16 dargestellt. Die übrigen Last-Verformungsdiagramme zeigen **Anlage 4-10**.

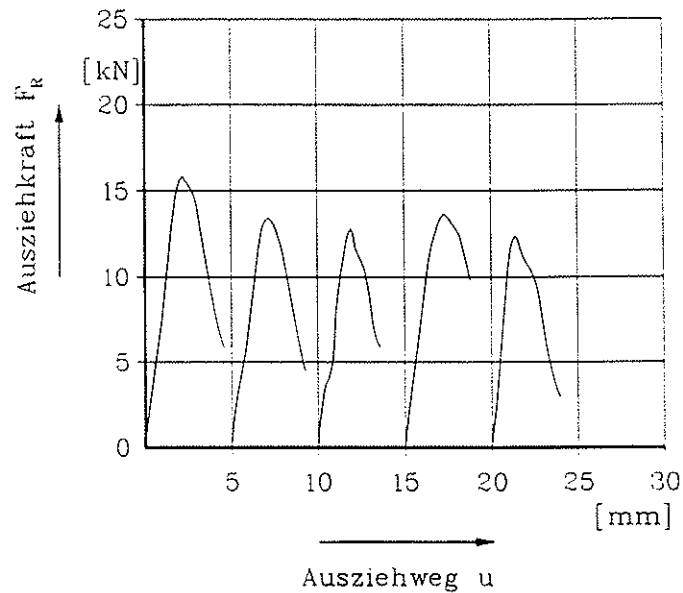


Bild 4.14: Last-Verformungsdiagramme Versuche M16/P-36 bis 40
(Querbelastung in Faserrichtung $F_N = 20$ kN)

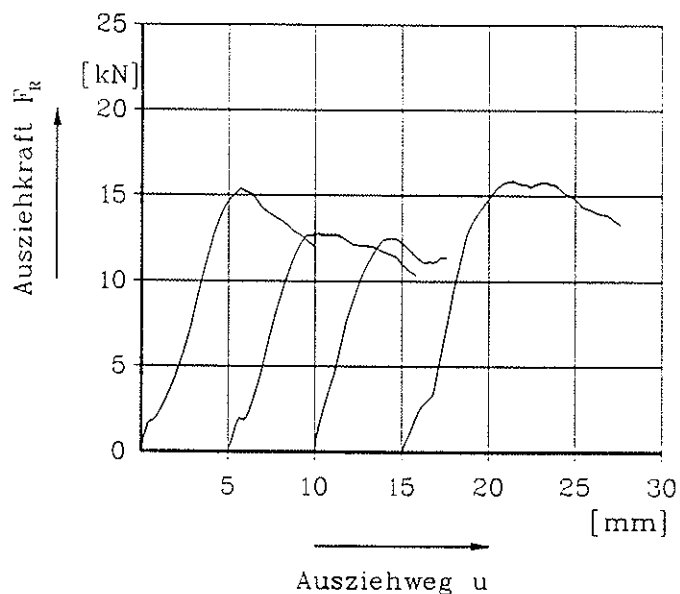


Bild 4.15: Last-Verformungsdiagramme Versuche M16/S-82 bis 85
(Querbelastung rechtwinklig zur Faserrichtung $F_N = 10$ kN)

Bei einer Querbelastung in Faserrichtung ist ein plötzlicher Abfall der Ausziehkraft nach dem Erreichen der Höchstlast zu beobachten. Dagegen zeigt sich bei einer Querbelastung rechtwinklig zur Faserrichtung kein so deutliches Absinken der Kraft.

In **Tabelle 4.4** sind die Ergebnisse der einzelnen Versuchsreihen zusammengefaßt. Es sind die Mittelwerte und die Variationskoeffizienten der Rohdichte und der Haftfestigkeit angegeben. Die Haftfestigkeit wurde dabei aus folgender Beziehung ermittelt, wobei die Spaltbreite nach Aufbringen der Querlast von 2 mm berücksichtigt wurde. Die maximale Ausziehkraft wird definiert als die Kraft, die vor oder bei Erreichen eines Ausziehweges von 5 mm gemessen wird.

$$\tau_h = \frac{\max F_R}{(d \cdot \pi - 4) \cdot l} \quad (4.11)$$

mit	τ_h	Haftfestigkeit in N/mm ²
	$\max F_R$	max. Ausziehkraft in N
	d	Nenn- bzw. Außendurchmesser der Gewindestange in mm
	l	Länge des Probekörpers in mm

Die maximale Ausziehkraft wurde unter einer Querbelastung in Faserrichtung im Mittel bei 2,9 mm Ausziehweg erreicht. Unter einer Querbelastung rechtwinklig zur Faserrichtung betrug der mittlere Ausziehweg bei Höchstlast 4,5 mm. **Bild 4.16** zeigt einen aufgeklappten Probekörper nach dem Versuch.

Die Untersuchungen mit Fichtenholz unter einer Querbelastung in Faserrichtung ergaben keine signifikante Abhängigkeit der Haftfestigkeit von der Rohdichte, von der Jahrringbreite und von dem Winkel zwischen Ausziehkraft und der Tangentialrichtung der Jahrringe. Jedoch wurde mit steigendem Nenndurchmesser der Gewindestangen eine Abnahme der Haftfestigkeit festgestellt. Eine nichtlineare Regression ergab als beste Anpassung folgende Gleichung:

$$\tau_h = 25,3 \cdot d^{-0,58} \quad (4.12)$$

Tabelle 4.4: Ergebnisse der Ausziehversuche unter Querbelastung mit Fichtenholz

Gewindestange	Querlast F_N (kN)	Mittelwert Rohdichte ρ (kg/m ³)	Variations- koeffizient Rohdichte (%)	Mittelwert Haftfestigkeit τ_h (N/mm ²)	Variations- koeffizient Haftfestigkeit (%)
Querbelastung in Faserrichtung					
M8	10	466	7,0	7,41	8,6
M8	13	448	9,1	7,83	9,0
M16	15	483	4,6	5,04	19,0
M16	20	465	8,2	4,96	7,3
M16	25	443	6,9	4,84	9,7
M20	18	417	6,7	4,76	10,7
M20	25	412	3,7	4,66	17,0
Querbelastung rechtwinklig zur Faserrichtung					
M16	5	421	5,0	3,48	24,3
M16	7,5	415	4,8	4,15	6,9
M16	10	430	5,1	4,65	12,8

Diese Gleichung kann genügend genau ersetzt werden durch

$$\tau_h = 20,8 \cdot \frac{1}{\sqrt{d}} \quad s_R = 0,693 \quad (4.13)$$

Es bedeuten

- τ_h Haftfestigkeit rechtwinklig zur Faser unter Querbelastung in Faserrichtung in N/mm²
- d Nenndurchmesser der Gewindestange in mm
- s_R Standardabweichung des Residuums (Reststreuung)

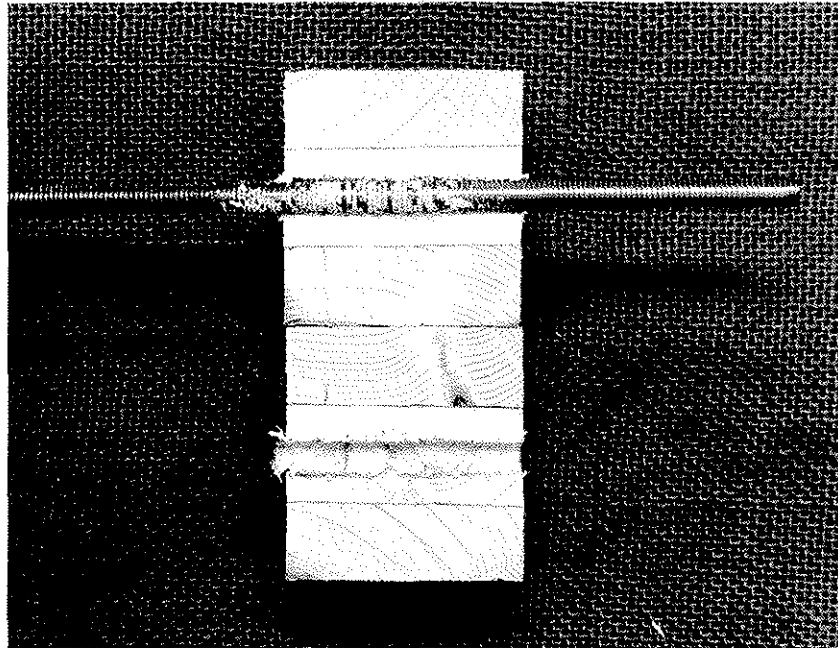


Bild 4.16 Fichte-Probekörper mit Gewindestange M8 nach dem Versuch (Querbelastung in Faserrichtung)

Unter einer Querbelastung rechtwinklig zur Faserrichtung zeigt sich bei der relativ geringen Anzahl von Versuchen eine Zunahme der Haftfestigkeit mit Zunahme der Querbelastung. Im Mittel wurde eine Haftfestigkeit von $4,1 \text{ N/mm}^2$ bei Gewindestangen M16 in Fichtenholz bestimmt.

Die Ausziehversuche mit Baufurniersperrholz aus Buche und Gewindestangen M16 zeigten bei unterschiedlichen Querlasten und 5 mm Ausziehweg keinen Unterschied in der Höhe der Haftfestigkeit. Folgende Haftfestigkeiten bei 5 mm Ausziehweg wurden bei diesen Versuchen ermittelt:

$$\begin{aligned} \text{Haftfestigkeit} \quad \tau_h &= 10,5 \text{ N/mm}^2 \\ \text{Standardabweichung } s &= 1,07 \text{ N/mm}^2 \end{aligned} \quad (4.14)$$

Im Gegensatz zu den Versuchen mit Fichtenholz, bei denen nach Erreichen der maximalen Haftspannung das Holz ausgeraspelt wurde, konnte dies bei Baufurniersperrholz aus Buche nicht festgestellt werden. Vielmehr wurden die Furniere in einem Abstand zur Bohrlochwandung abgeknickt, wobei die Kraft bis zu einem Ausziehweg von etwa 10 mm anstieg. Ausziehwege von über 5 mm werden im Traglastzustand von auf Abscheren beanspruchten Verbindungsmitteln in der Regel nicht erreicht.

4.4 Biege widerstand von Verbindungsmitteln

Die Tragfähigkeit von Verbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln bei Beanspruchung auf Abscheren wird auch durch den Biege widerstand des Verbindungsmittels bestimmt. Der Biege widerstand eines Verbindungsmittels aus Stahl wird durch das Fließmoment M_y charakterisiert. Die Streckgrenze oder die Zugfestigkeit des Ausgangsmaterials eignen sich in der Regel nicht zu dessen zuverlässiger Bestimmung, da einerseits die im Zugversuch ermittelten Kenngrößen sich nicht ohne weiteres auf eine Biegebeanspruchung übertragen lassen und andererseits die Verfestigung des Stahls infolge Kaltverformung bei der Herstellung der endgültigen Gestalt der Verbindungsmittel dabei nicht berücksichtigt wird. Weiterhin ist bei manchen Verbindungsmitteln, wie z.B. bei Gewindestangen oder Sondernägeln, die Querschnittsgeometrie schwer zu erfassen, so daß sich das plastische Widerstandsmoment nur näherungsweise ermitteln läßt.

Auf Grundlage des Prinzips in der europäischen Norm EN 409 (Holzbauwerke - Bestimmung des Fließmomentes von stiftförmigen Verbindungsmitteln - Nägel) wurde zur Bestimmung des Fließmomentes von stiftförmigen Verbindungsmitteln mit Durchmessern von 8 mm bis 30 mm ein Biegegerät (siehe **Bild 4.17**) entwickelt und gebaut. Konstruktionsdetails und Funktionsweise des Biegegeräts sind in EHLBECK, WERNER 1991 beschrieben.

Mit dieser Versuchseinrichtung wurden 69 Stabdübel und Gewindestangen mit unterschiedlichen Durchmessern und Stahlgüten gebogen und mit den im Zugversuch nach DIN 50145 ermittelten Festigkeitskennwerten verglichen. Die Stabdübel wurden aus Rundstahl gefertigt und die Gewindestangen von 1 m langen Stangen abgesägt. Aus verschiedenen Stangen wurde Material entnommen.

In **Tabelle 4.5** sind Mittelwerte und Variationskoeffizienten der Versuchsergebnisse zusammengestellt.

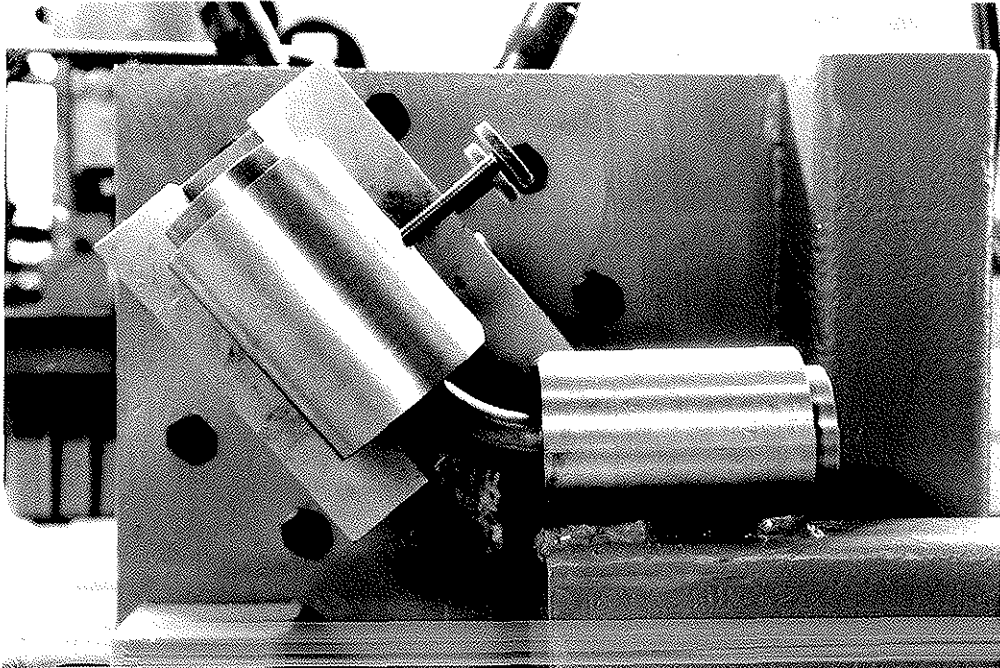
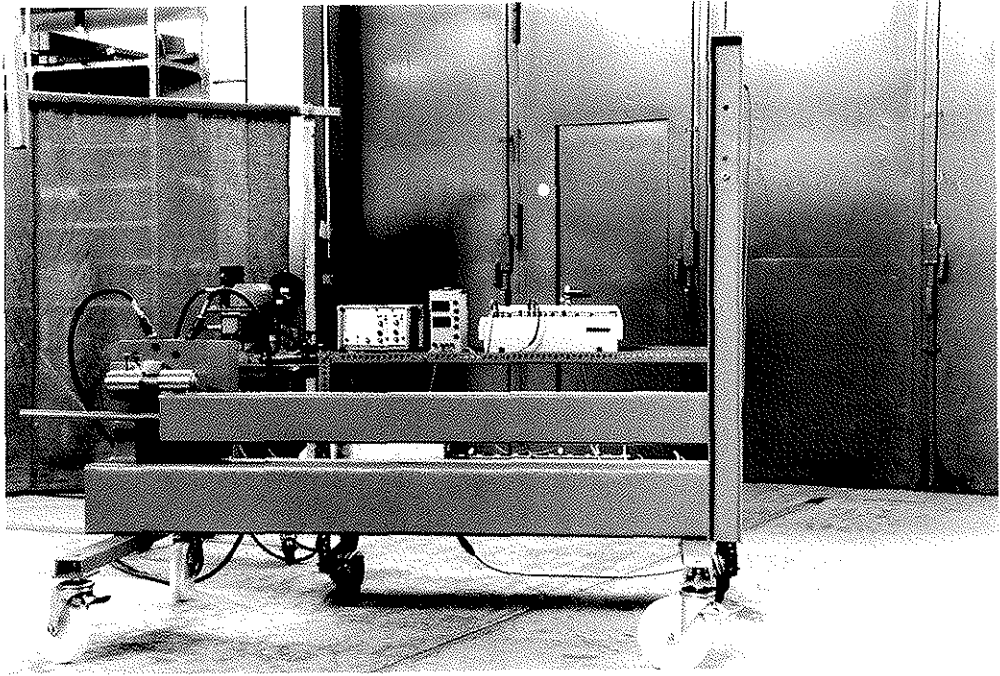


Bild 4.17: Biegegerät

Tabelle 4.5: Ergebnisse der Biege- und Zugversuche

Reihe	Verbindungs- mittel	Stahlgüte	Durch- messer d [mm]	Anzahl der Versuche	Fließ- moment M_y (Nm)	Var.- koeff. (%)	Zug- festigkeit f_u (N/mm ²)	Fließ- spannung f_y (N/mm ²)
1	Stabdübel	St 37 K	8	10	50,2	11,8	584	589
2		St 37 K	16	10	441	4,0	614	647
3		St 37 K	24	10	1364	1,8	552	592
4		St 37 K	30	1	2962	-	581	658
5	Stabdübel	9S20K	8	3	70,4	7,2	739	825
6	Gewinde- stangen	Güte 8.8	M 8	10	43,9	1,8	-	838
7		Güte 8.8	M 12	10	165	11,4	-	906
8		Güte 8.8	M 16	5	413	2,9	-	885
9		Güte 8.8	M 20	10	857	2,5	-	943

Aus dem Fließmoment wurde eine Fließspannung nach folgender Beziehung errechnet:

$$f_y = M_y/W_y \quad (4.15)$$

mit dem plastischen Widerstandsmoment

für Stabdübel $W_y = d^3/6$ bzw. für Gewindestangen $W_y = d_{sp}^3/6$.

Im durchplastizierten Zustand beeinflussen die Kerbspannungen in den Gewindestangen die Höhe des Fließmomentes nur wenig. Daher kann nach Untersuchungen von SCHEER, PEIL und NÖLLE 1988 in die Gleichung zur Ermittlung des plastischen Widerstandsmoments der Durchmesser d_{sp} eingesetzt werden, wobei d_{sp} der zur Berechnung des Spannungsquerschnittes verwendete Durchmesser ist.

Die Form der Biegelinie des Verbindungsmittels bei Höchstlast im Biegeversuch entsprach etwa der in einer Verbindung unter Versagenslast.

Aus den Versuchen ($n = 35$) mit metrischen Gewindestangen der Güte 8.8 ergibt sich ein Mittelwert der rechnerischen Fließspannung zu

$$f_y = 895 \text{ N/mm}^2 \quad \begin{array}{l} \text{Standardabw.} \\ \text{Var.-Koeffizient} \end{array} \quad \begin{array}{l} s = 68,4 \text{ N/mm}^2 \\ v = 7,6\% \end{array} \quad (4.16)$$

Die Festigkeitskennwerte des blanken kaltverformten Stahls, aus welchem die Stabdübel hergestellt waren, liegen merklich über den Anforderungen des Ausgangsmaterials St 37 (Fe 360). Die aus den Fließmomenten errechneten Fließspannungen waren stets größer als die ermittelten Zugfestigkeiten des gleichen Materials.

Für die geprüften Stabdübel ($n = 31$) aus blankem Stahl St 37 K nach DIN 1652 wurde folgende rechnerische Fließspannung ermittelt:

$$f_y = 610 \text{ N/mm}^2 \quad \begin{array}{l} \text{Standardabw.} \\ \text{Var.-Koeffizient} \end{array} \quad \begin{array}{l} s = 49,5 \text{ N/mm}^2 \\ v = 8,1\% \end{array} \quad (4.17)$$

Analog zum Streubereich der Zugfestigkeit in DIN 1652 wird bei einer größeren Probenanzahl ein Variationskoeffizient von 13% angenommen. Mit dieser Annahme ergibt sich das 5%-Fraktil der rechnerischen Fließspannung nach dem Verfahren in EUROCODE 5 Annex A (ENV 1995-1-1) zu 490 N/mm^2 .

In EUROCODE 5 wird vorgeschlagen, die Fließspannung nach folgender Gleichung zu berechnen:

$$f_y = 0,8 \cdot f_u \quad (4.18)$$

mit f_u : Zugfestigkeit

Setzt man in diese Gleichung die in DIN 1652 Teil 2 angegebene Mindestzugfestigkeit ($f_u = 440 \text{ N/mm}^2$) des geprüften Werkstoffes ein, so ergibt sich ein Wert der 28% kleiner ist als der aus Biegeversuchen ermittelte charakteristische Wert. Um eine wirtschaftliche Bemessung durchführen zu können, sollte das charakteristische Fließmoment bzw. die charakteristische Fließspannung des im Bauteil verwendeten Verbindungsmittels bekannt sein.

4.5 Spaltempfindlichkeit der Hölzer

4.5.1 Allgemeines

Versuche mit Stabdübelverbindungen (EHLBECK, WERNER 1989) zeigten, daß die Hauptursache des Versagens der Prüfkörper ein Aufspalten der Seitenhölzer war. Diese Versagensart wird bisher bei der Bemessung von Verbindungen nur indirekt dadurch berücksichtigt, daß die Lochleibungsfestigkeit mit abnehmendem Abstand der Verbindungsmittel reduziert wird. FAHLBUSCH 1949 unterschied zwischen fünf möglichen Versagensarten der Hölzer, wenn runde, stiftförmige Verbindungsmittel rechtwinklig zu ihrer Achse belastet werden. Diese Versagensarten sind in **Bild 4.18** schematisch dargestellt sind.

- Lochleibungsversagen (plastische Verformung $> 0,02 \cdot d$)
- Spaltversagen längs zur Faser
- Ausscheren des Vorholzes
- Zugbruch im Nettoquerschnitt (nur bei Zugbeanspruchung)
- Abscheren des Verbindungsmittels

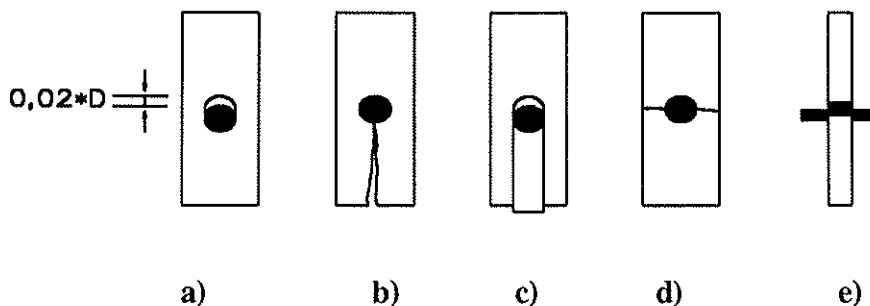


Bild 4.18: Versagensarten nach FAHLBUSCH 1949

Bei kleinen Endabständen ist ein starker Abfall der kritischen Spaltkraft zu beobachten.

Um das Tragverhalten von Verbindungen genauer zu analysieren, ist es wichtig, die rechtwinklig zur Faserrichtung wirkende Spaltkraft zu kennen. Die experimentelle Bestimmung dieser Spaltkraft ist sehr schwierig. Daher wird zur Ermittlung der tatsächlich wirkenden Spaltkraft eine von WERNER 1993 erweiterte Verdrängungstheorie benutzt.

4.5.2 Spaltbeanspruchung von in Faserrichtung beanspruchten Verbindungen mit runden stiftförmigen Verbindungsmitteln

Durch das Verschieben eines runden stiftförmigen Verbindungsmittels in Faserrichtung wird Holz rechtwinklig zur Faser verdrängt (**Bild 4.19**). Die gesuchte Spaltbeanspruchung ist die Kraft, die benötigt wird, um einen Teil des Holzes rechtwinklig zur Faser zu verdrängen. Die Breite des vertikal zerdrückten Holzes läßt sich unter dem Meßmikroskop bestimmen. Aus den geometrischen Beziehungen lassen sich die Horizontalverschiebungen des Holzes berechnen.

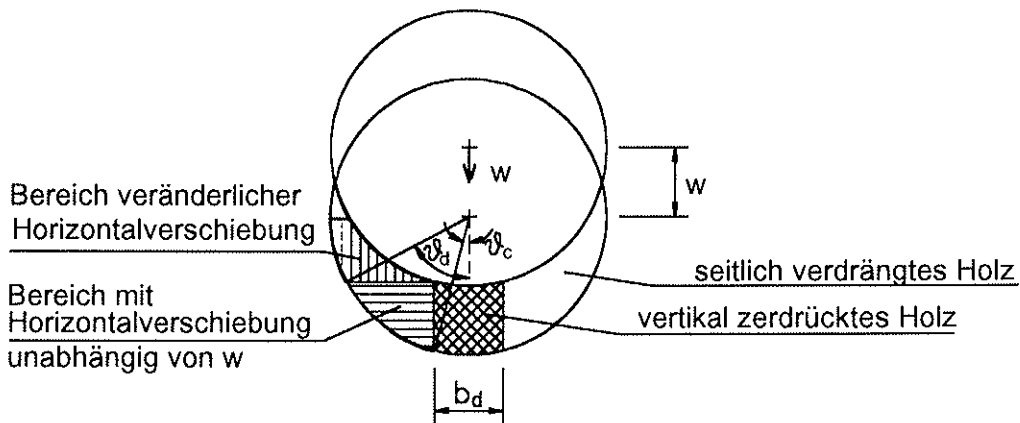


Bild 4.19: Schematische Darstellung der Verdrängung des Holzes

Die zugehörige Spannung $\sigma_{h,90}$ ergibt sich dann aus der Arbeitslinie des Holzes unter Querbelastung. Die Spaltbeanspruchung F_s berechnet sich als Integral zwischen den Grenzen φ_c und $\pi/2$ wie folgt:

$$F_s = \frac{t \cdot d}{2} \int_{\varphi_c}^{\pi/2} \sigma_{h,90} \cdot \sin \varphi \cdot d\varphi \quad (4.19)$$

Zur Berechnung der Spaltbeanspruchung von in Faserrichtung beanspruchten Verbindungen mit dünnen Hölzern wurde ein FORTRAN-Programm (**Anlage 11**) entwickelt. Mit Hilfe der Funktion der Last-Verformungskurve des Holzes unter der Belastung rechtwinklig zur Faserrichtung, mit dem Verbindungsmitteldurchmesser, der Breite des vertikal zerdrückten Holzes und der Holzdicke kann die Spaltkraft berechnet werden, welche ein in Faserrichtung beanspruchtes Verbindungsmittel erzeugt. Mit diesem Programm wurden vorhandene

Lochleibungsversuche unter einer Beanspruchung in Faserrichtung (Anzahl der Versuche $n = 431$), die unter ähnlichen Bedingungen durchgeführt wurden, ausgewertet. Dabei wurde die Verformung beim Versagen durch Aufspalten und die Näherungsfunktionen der Last-Verformungskurven unter einer Beanspruchung rechtwinklig zur Faserrichtung eingesetzt. Die Ergebnisse sind in **Tabelle 4.6 und 4.7** zusammengestellt.

Nach diesen Berechnungen beträgt die Spaltkraft bei Fichtenholz etwa 1/6 der Tragfähigkeit in Faserrichtung. Bei den Laubhölzern ist dieser Wert wegen der günstigeren Eigenschaften rechtwinklig zur Faserrichtung in der Regel größer. Da eine experimentelle Bestimmung dieser Spaltkraft sehr schwierig ist, wurden zur Überprüfung dieser Verdrängungstheorie Finite-Elemente (FE) - Berechnungen durchgeführt. Über die gewonnenen Erkenntnisse wurde in WERNER 1993 berichtet.

Tabelle 4.6: Zusammenstellung der errechneten Spaltkräfte aus den Lochleibungsversuchen mit verschiedenen Nadelhölzern
*Beanspruchung in Faserrichtung Löcher vorgebohrt
runde glattschaftige Verbindungsmittel*

Holzart	Anzahl der Versuche	Durchmesser d (mm)	Höchstlast in Faserrichtung		Spaltkraft		Verhältnis	
			F_{\max}		F_s		F_{\max}/F_s	
			Mittelw. (kN)	Var.-Koeff. (%)	Mittelw. (kN)	Var.-Koeff. (%)	Mittelw.	Var.-Koeff. (%)
Fichte	20	8	3,95	16,3	0,63	10,2	6,3	13,9
	40	12	8,84	11,9	1,43	12,1	6,3	14,6
	20	16	12,5	13,3	2,45	7,40	5,1	9,7
	40	20	23,1	11,7	3,46	14,4	6,8	22,1
Kiefer	20	8	4,78	7,88	0,62	14,0	7,8	10,6
	40	12	10,9	13,5	1,50	17,9	7,4	15,6
	20	16	17,0	23,3	2,32	16,8	7,7	29,4
	40	20	24,9	18,6	3,71	14,8	6,9	21,7
Canadian Spruce-pine-fir	20	12	9,20	17,8	1,48	17,0	6,3	14,9
	20	20	22,5	11,7	3,63	14,2	6,3	14,8

Tabelle 4.7: Zusammenstellung der errechneten Spaltkräfte aus den Lochleibungsversuchen mit verschiedenen Laubhölzern
*Beanspruchung in Faserrichtung Löcher vorgebohrt
 runde glattschaftige Verbindungsmittel*

Holzart	Anzahl der Versuche	Durchmesser d (mm)	Höchstlast in Faserrichtung F_{\max}		Spaltkraft F_s		Verhältnis F_{\max}/F_s	
			Mittelw.	Var.-Koeff.	Mittelw.	Var.-Koeff.	Mittelw.	Var.-Koeff.
			(kN)	(%)	(kN)	(%)		(%)
Buche	5	8	8,74	9,64	1,81	6,79	4,8	8,83
	5	12	15,1	21,4	3,95	21,2	3,8	7,49
	5	16	34,3	8,07	8,42	8,75	4,1	7,41
	5	24	59,1	9,53	16,3	1,96	3,6	7,81
Eiche	5	8	7,87	2,71	1,88	2,30	4,2	2,40
Teak	5	8	5,97	1,83	1,59	3,58	3,8	4,34
Merbau	5	8	11,2	3,47	1,54	18,6	7,5	19,5
	5	16	31,2	7,25	4,88	27,8	7,1	47,6
	3	30	92,2	4,73	21,5	20,5	4,4	20,4
Afzelia	5	8	9,73	10,8	1,68	5,03	5,8	13,3
	5	16	27,3	2,32	5,89	15,9	4,7	17,7
	4	30	92,4	5,17	17,4	13,1	5,4	11,6
Bongossi	5	8	14,6	3,86	2,57	4,16	5,7	2,35
	5	16	44,1	4,79	11,1	6,23	4,0	3,82
	4	30	140	7,43	33,4	4,42	4,2	11,8

4.5.3 Anwendung der Bruchmechanik auf das Spaltversagen von Verbindungen unter Beanspruchung in Faserrichtung

Konventionelle Bemessungsmethoden berücksichtigen nicht die Spannungsspitzen, die bei der Belastung von gelochten Bauteilen auftreten. Unter bestimmten Voraussetzungen bietet die Bruchmechanik Möglichkeiten zur Abschätzung der aufnehmbaren Last. Holz verhält sich unter Querkzugbelastung spröde. Wegen der starken Anisotropie tritt ein Rißfortschritt in Faserrichtungsrichtung auf. Die Lage des entstehenden Risses kann somit lokalisiert werden. Unter Anwendung der linear-elastischen Bruchmechanik wurde von WERNER 1993 folgendes Spaltbruchkriterium angegeben.

Ein durch ein stiftförmiges Verbindungsmittel in Faserrichtung beanspruchtes Holz spaltet auf, wenn folgende Bedingung erfüllt ist:

$$F_s > V_c \quad (4.20)$$

Die Spaltkraft F_s kann mit Hilfe der Verdrängungstheorie abgeschätzt werden.

Erstreckt sich der eingeprägte Anriß nicht bis zum Hirnholzende kann folgendes in **Bild 4.20** dargestellte statische System angenommen werden.

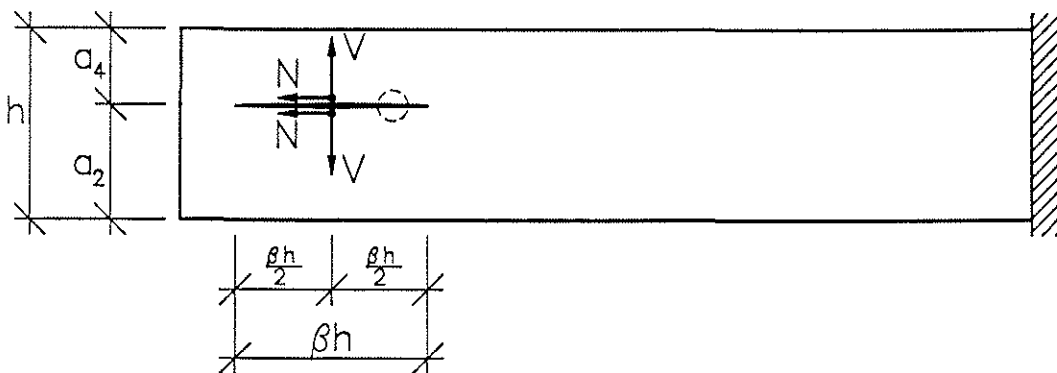


Bild 4.20: Verbindung unter Spaltbeanspruchung mit fiktivem Anriß

Die kritische Spaltkraft V_c ergibt sich zu (siehe auch WERNER 1993):

$$V_c = 2 \cdot e f t \cdot \sqrt{W \cdot E} \cdot \sqrt{\frac{a_4}{A \cdot \left(\frac{F_u}{2 \cdot F_s}\right)^2 + B \cdot \beta \cdot \frac{F_u}{2 \cdot F_s} + C \cdot \beta^2 + 1,2 \cdot \frac{E}{G} \cdot D}} \quad (4.21)$$

mit	$\sqrt{W \cdot E}$	Spaltbruchzähigkeit
	$e f t$; t	effektive Holzdicke; Holzdicke
	F_u	vorhandene Höchstlast in Faserrichtung des Holzes
	F_s	vorhandene Spaltkraft rechtwinklig zur Faserrichtung
	E	Elastizitätsmodul in Faserrichtung
	G	Schubmodul
	a_4	kleinster Abstand des Verbindungsmittels vom Rand
	α	Verhältnis $\frac{a_4}{h}$
	β	Verhältnis $\frac{2 \cdot a_R}{h}$
	h	Höhe des Holzes
	a_R	halbe fiktive Rißlänge
	A, B, C, D	Faktoren in Abhängigkeit von α

$$A = \frac{1 + 36 (\alpha - \alpha^2) (1 - 2\alpha)^2 + 3 (1 - 2\alpha)^2}{3 (1 - \alpha)}$$

$$B = \frac{2}{3} \cdot \frac{\alpha^2 + (1 - \alpha)^2}{\alpha \cdot (1 - \alpha)^2}$$

$$C = \frac{\alpha^3 + (1 - \alpha)^3}{3\alpha^2 \cdot (1 - \alpha)^3}$$

$$D = \frac{1}{1 - \alpha}$$

Dieses Spaltbruchkriterium hängt somit von folgenden Einflußgrößen ab:

- Spaltbruchzähigkeit
- Geometrie
- Rißlänge
- Verhältnis Elastizitätsmodul / Schubmodul
- Verhältnis Belastung in Rißrichtung / Belastung rechtwinklig zur Rißrichtung

In der linear-elastischen Bruchmechanik kann die Bruchzähigkeit durch die anschaulichere Kenngröße Bruchenergie W ausgedrückt werden. Sie ist die Energie, die notwendig ist, um eine Einheitsfläche eines Risses zu bilden.

Sie ist neben der Rohdichte und der Holzdicke von anderen Einflußgrößen wie Lage der Jahrringe, Ausbildung der Rißspitze und der Holzfeuchte abhängig. Sind mehrere Verbindungsmittel in einer Verbindung, beeinflussen sie sich insbesondere bei geringen Abständen gegenseitig, so daß die Wahrscheinlichkeit eines frühzeitigen Aufspaltens wesentlich größer ist.

Im Folgenden wird die Spaltbruchzähigkeit aus Lochleibungsversuchen errechnet und mit den in der Literatur angegebenen Werten verglichen.

4.5.4 Ermittlung der Spaltbruchzähigkeit

Die Spaltbruchzähigkeit der Probekörper der Lochleibungsversuche kann bei Kenntnis der Spaltkraft (siehe Abschnitt 4.5.2) aus Gl. (4.21) berechnet werden. Die Holzdicke t und der Abstand a_4 vom Rand sind gegeben. Für das Verhältnis E/G wird, wie auch in prEN 338 angenommen, ein Wert von 16 eingesetzt. Die halbe Rißlänge $a_R = \beta \cdot h/2$ wird mit Hilfe der charakteristischen Rißlänge a_c , die wie folgt definiert ist,

$$a_c = \frac{E_{90} \cdot W}{f_{t,90}^2} \quad (4.22)$$

E_{90} Elastizitätsmodul rechtwinklig zur Faserrichtung

$f_{t,90}$ Querkzugfestigkeit

abgeschätzt. GUSTAFSSON 1985 gibt die charakteristische Rißlänge von Holz mit

etwa 10 mm an. Somit wird die halbe Rißlänge

$$a_R = \frac{d}{2} + a_c \quad (4.23)$$

mit $a_c = 10$ mm der Berechnung zugrunde gelegt. Es kann gezeigt werden, daß die Größe der charakteristischen Rißlänge nicht exakt bekannt sein muß, da sie nur einen geringen Einfluß auf die Ergebnisse hat. Die Bruchenergie W und der Elastizitätsmodul E sind von der Rohdichte linear abhängig, so daß auch von einer linearen Abhängigkeit der Spaltbruchzähigkeit ausgegangen werden kann. In **Tabelle 4.8 und 4.9** sind die errechneten Spaltbruchzähigkeiten der Hölzer der vorhandenen Lochleibungsversuche zusammengestellt.

Tabelle 4.8: Zusammenstellung der aus Lochleibungsversuchen ermittelten Spaltbruchzähigkeiten verschiedener Nadelhölzer
*Beanspruchung in Faserrichtung Löcher vorgebohrt
runde glattschaftige Verbindungsmittel*

Holzart	Anzahl der Versuche	Holzdicke $t = 2d$ (mm)	Rohdichte ρ		Spaltbruchzähigkeit $\sqrt{W \cdot E}$		$\frac{\sqrt{W \cdot E}}{\rho} \cdot \left(\frac{t_0}{t}\right)^{0,3}$	
			Mittelw. (kg/m^3)	Var.-Koeff. (%)	Mittelw. ($\text{N/mm}^{3/2}$)	Var.-Koeff. (%)	Mittelw.	Var.-Koeff. (%)
Fichte	20	16	421	11,5	43,3	10,5	0,136	4,07
	40	24	430	10,7	51,7	10,9	0,141	11,3
	20	32	402	7,58	54,9	7,75	0,146	1,39
	40	40	414	7,78	57,7	11,8	0,139	8,93
Kiefer	20	16	491	9,75	44,7	11,9	0,120	6,20
	40	24	505	12,4	56,1	16,0	0,130	10,7
	20	32	485	11,5	55,7	11,0	0,125	17,0
	40	40	491	11,4	61,9	11,9	0,128	15,2
Canadian Spruce-pine-fir	20	24	428	11,5	53,6	16,4	0,145	8,83
	20	40	431	9,49	59,6	12,6	0,138	7,89

Tabelle 4.9: Zusammenstellung der aus Lochleibungsversuchen ermittelten Spaltbruchzähigkeiten verschiedener Laubhölzer
*Beanspruchung in Faserrichtung Löcher vorgebohrt
 runde glattschaftige Verbindungsmittel*

Holzart	Anzahl der Versuche	Holzdicke $t = 2d$ (mm)	Rohdichte ρ		Spaltbruchzähigkeit $\sqrt{W \cdot E}$		$\frac{\sqrt{W \cdot E}}{\rho} \cdot \left(\frac{t_0}{t}\right)^{0,35}$	
			Mittelw. (kg/m ³)	Var.-Koeff. (%)	Mittelw. (N/mm ^{3/2})	Var.-Koeff. (%)	Mittelw.	Var.-Koeff. (%)
Buche	5	16	714	6,79	79,0	6,58	0,152	1,10
	5	24	683	5,17	90,7	21,1	0,158	18,1
	5	32	741	0,31	125,4	8,44	0,183	8,47
	5	48	717	4,59	130,1	2,44	0,170	2,37
Eiche	5	16	743	2,30	80,8	2,23	0,150	0,24
Teak	5	16	652	1,49	67,9	3,24	0,144	2,08
Merbau	5	16	800	2,68	72,4	14,1	0,125	15,4
	5	32	771	4,91	77,4	20,8	0,109	23,3
	3	60	839	1,07	124,3	18,7	0,128	17,9
Afzelia	5	16	709	5,70	75,5	4,09	0,147	5,70
	5	32	722	2,19	88,9	14,2	0,133	14,8
	4	60	706	0,90	102,7	11,8	0,126	12,1
Bongossi	5	16	1047	1,71	114,8	4,02	0,151	2,85
	5	32	1097	6,24	164,8	6,02	0,162	6,57
	4	60	1120	4,42	192,5	3,46	0,149	4,59

Man erkennt deutlich, daß die Spaltbruchzähigkeit von der Probengröße, insbesondere von der Holzdicke, abhängt. Über den Einfluß der Holzdicke gibt es in der Literatur unterschiedliche Aussagen. BOSTRÖM 1990 z.B. stellte durch Versuche fest, daß bei einigen Probekörpergrößen die Bruchzähigkeit mit der Holzdicke

anwächst, bei anderen Probekörpergrößen war gerade das Gegenteil der Fall. Bei diesen Untersuchungen wurde folgende Abhängigkeit von der Holzdicke festgestellt:

$$\text{Nadelholz} \quad \frac{\sqrt{W \cdot E}}{\rho} = \text{const.} \cdot t^{0,3} \quad (4.24)$$

$$\text{Laubholz} \quad \frac{\sqrt{W \cdot E}}{\rho} = \text{const.} \cdot t^{0,35} \quad (4.25)$$

Normiert man die Spaltbruchzähigkeit mit der Rohdichte und bezieht alle Werte auf eine Holzdicke von 40 mm, um die Werte mit den Dreipunkt-Biegeversuchen zur Bestimmung der Bruchenergie (siehe LARSEN, GUSTAFSSON 1989) vergleichen zu können, so ergeben sich die letzten beiden Spalten dieser Tabellen.

4.5.4.1 Spaltempfindlichkeit der einzelnen Holzarten

Die Spaltempfindlichkeit der einzelnen Holzarten ist entsprechend der normierten Spaltbruchzähigkeit unterschiedlich. Die Holzart Kiefer ist spaltempfindlicher als Fichte wie folgende Ergebnisse zeigen:

$$\text{Kiefer:} \quad \frac{\sqrt{W \cdot E}}{\rho \cdot t^{0,3}} = 0,042 \quad \text{Standardabw. } s = 0,0055 \quad (4.26)$$

$$\text{Fichte:} \quad \frac{\sqrt{W \cdot E}}{\rho \cdot t^{0,3}} = 0,046 \quad \text{Standardabw. } s = 0,0040 \quad (4.27)$$

Hierin bedeuten:

W	Bruchenergie in N/mm
E	Elastizitätsmodul in N/mm ²
t	Holzdicke in mm
ρ	Rohdichte in kg/m ³

Die normierte Spaltbruchzähigkeit aller untersuchten Lochleibungsprüfkörper aus Nadelholz (n = 280) ergab sich zu

$$\text{Nadelholz:} \quad \frac{\sqrt{W \cdot E}}{\rho \cdot t^{0,3}} = 0,044 \quad \text{Standardabw. } s = 0,0053 \quad (4.28)$$

Die tropischen Laubhölzer Teak, Merbau und Afzelia neigen mehr zum Spalten als die einheimischen Laubhölzer (siehe Tabelle 4.9). Die zäheren Eigenschaften von z.B. Buche werden auch bei dieser Betrachtungsweise verdeutlicht.

$$\text{Buche: } \frac{\sqrt{W \cdot E}}{\rho \cdot t^{0,35}} = 0,046 \quad \text{Standardabw. } s = 0,0053 \quad (4.29)$$

4.5.4.2 Vergleich der Spaltbruchzähigkeit mit bekannten Kennwerten

Vergleicht man die aus Lochleibungsversuchen ermittelte Spaltbruchzähigkeit mit den aus der Literatur bekannten Kennwerten Elastizitätsmodul (siehe COLLING, GÖRLACHER 1989) und Bruchenergie (siehe LARSEN, GUSTAFSSON 1990) von Fichtenholz, so ergibt sich:

mittlere Spaltbruchzähigkeit ermittelt aus Lochleibungsversuchen

$$\sqrt{W \cdot E} = 57,7 \text{ N/mm}^{\frac{3}{2}}$$

mit $\rho_m = 414 \text{ kg/m}^3$ und $t = 40 \text{ mm}$

mittlere Spaltbruchzähigkeit berechnet mit W und E

$$W = 1,04 \cdot \rho - 146 = 285 \text{ Nm/m}^2$$

$$E = 40,17 \cdot \rho - 5520 = 11110 \text{ N/mm}^2$$

$$\sqrt{W \cdot E} = \sqrt{0,285 \cdot 11110} = 56,3 \text{ N/mm}^{\frac{3}{2}}$$

mit $\rho_m = 414 \text{ kg/m}^3$ und $t = 40 \text{ mm}$

Das Problem des Aufspaltens von Verbindungen läßt sich somit auf bekannte Materialkennwerte zurückführen.

4.5.4.3 Einfluß der Verbindungsmittelabstände

Die bisherigen Betrachtungen basieren auf Untersuchungen an einem Verbindungsmittel mit einem Mindestabstand vom beanspruchten Hirnholzende von 7d, wie er im EUROCODE 5 vorgesehen ist. Wie auch FE-Berechnungen zeigten, haben die Verbindungsmittelabstände einen großen Einfluß auf das Spaltversagen.

Für Stabdübelverbindungen mit einem Abstand vom beanspruchten Hirnholzende ($a_{3,t}$) von 6d und einem Verbindungsmittelabstand untereinander (a_1) von 5d liegen

umfangreiche Versuchsergebnisse von EHLBECK, WERNER 1989 und 1992 vor. Um den Einfluß der geringeren Abstände zu untersuchen, wurden die Bauteilversuche mit kleiner Schlankheit (maßgebende Bruchursache 1 bzw. 1a (siehe Abschnitt 3)) ausgewertet, um sie mit den genormten Lochleibungsversuchen ($a_{3,t} = 7d$) zu vergleichen. Dabei ergab sich sowohl bei den Verbindungen mit Nadelholz als auch bei den Verbindungen mit Laubholz eine um 40% geringere Spaltbruchzähigkeit als bei den vorher beschriebenen Lochleibungsversuchen. Für andere Verbindungsmittelabstände liegen noch keine Versuchsergebnisse vor, so daß diese Problematik noch weiterer Untersuchungen bedarf.

4.5.4.4 Einfluß des Winkels zwischen Tangential- und Rißebeine und der Rohdichte

Der Einfluß des Winkels zwischen Tangential- und Rißebeine und der Rohdichte auf die Anrißlast einer CT - Probe (Compact-Tension) wurde von LOGEMANN 1991 untersucht. Die Untersuchung erbrachte folgende Ergebnisse :

- Der Einfluß der Rohdichte auf die Anrißlast nimmt mit steigendem Winkel α zwischen Tangential- und Rißebeine zu,
- die Anrißlast hat ihr Maximum unabhängig von der Rohdichte bei $\alpha = 45^\circ$, was in erster Linie auf eine vergrößerte effektive Bruchoberfläche zurückzuführen ist.

Die Lage der Jahrringe in einem hölzernen Bauteil ist jedoch rein zufällig, so daß dieser Parameter bei einer Bemessung explizit nicht berücksichtigt werden kann. Vielmehr ist dieser Einfluß in den Streuungen der Versuchsergebnisse enthalten.

4.6 Leimverbindung zwischen Holz und Holzwerkstoffplatten

Die Verleimung von Holz mit Holzwerkstoffplatten wird im Holzbau bei Dach-, Wand- und Deckenträgern sowie bei Schalungsträgern schon vielfältig eingesetzt. Für eng begrenzte Fälle sind Berechnungs- und Konstruktionshinweise in DIN 1052 Teil 1 angegeben. Diese Angaben sind jedoch nicht auf alle Fälle anwendbar. Parameter wie Leimflächengröße, Beanspruchungsart und Winkel zwischen Kraft und Faserrichtung beeinflussen die Tragfähigkeit der Leimfuge. Auf Grundlage der Erkenntnisse von GLOS et al. 1987 und 1990 können Abscherfestigkeiten in der Leimfuge zwischen Holz und Bau-Furniersperrholz aus Buche abgeleitet werden. Dabei wurde zwischen Nagelprebleimung und Verleimung in Pressen unterschieden. Für die in **Bild 4.21** dargestellten Prüfkörper mit einem Zuggurt aus Bau-furniersperrholz aus Buche wurde für verschiedene Verleimungswinkel α die in **Tabelle 4.10** angegebenen mittleren Abscherfestigkeiten ermittelt. Als Leim wurde Resorcinharzleim Kauresin 460fl. eingesetzt.

Tabelle 4.10: Mittlere Abscherfestigkeit f_v in der Leimfuge in Abhängigkeit vom Verleimungswinkel α (GLOS et al. 1987)
(Zuggurt aus BFU-BU; Leimfläche 400 cm²)

Preßtechnik	N	V	N	N	N
α (°)	0°	0°	30°	60°	90°
f_v (N/mm ²)	3,82	3,51	2,25	1,69	1,84

N: Nagelprebleimung

V: Verleimung in Pressen

Nach den Erkenntnissen von KALINA 1965 an einschnittigen Druckscherproben sinkt die Scherfestigkeit einer Leimverbindung mit wachsender Größe der Leimfläche ab. Jedoch herrscht in der Leimfuge meist ein mehrachsiger Spannungszustand, wobei die Querspannungen infolge der Ausmitte der angreifenden Kraft bei kleineren Leimflächen größer werden, so daß sich diese beiden Effekte gegenseitig ausgleichen können.

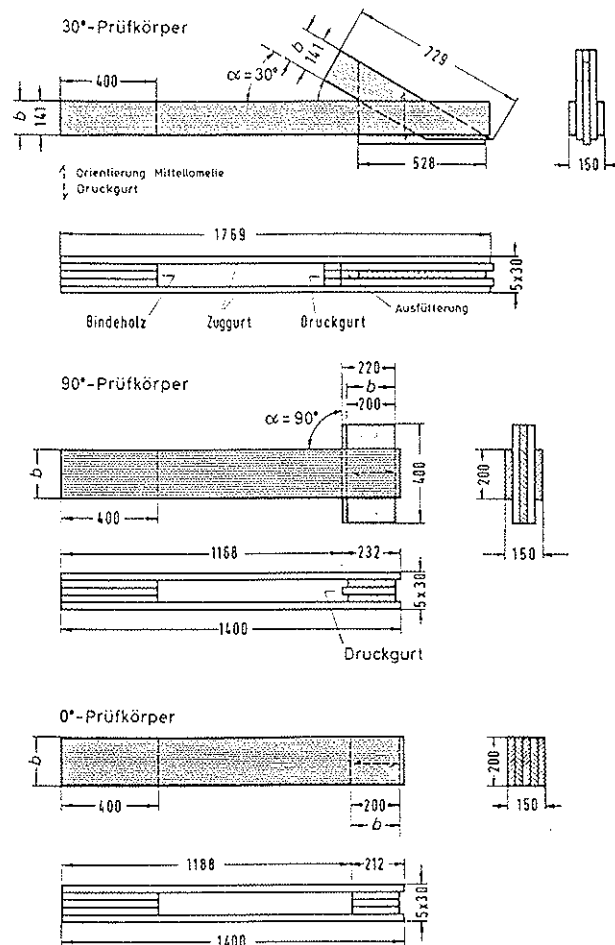


Bild 4.21: Prüfkörper mit Zuggurt aus BFU-BU zur Ermittlung der Abscherfestigkeit in der Leimfuge (GLOS et al. 1987)

Oft ist die Abscherfestigkeit der Leimfuge größer als die des Holzes selbst. Daher kann auch die Abscherfestigkeit des Holzes maßgebend werden. In prEN 338 sind charakteristische Schubfestigkeiten $f_{v,k}$ verschiedener Bauholz-Festigkeitsklassen angegeben. Für Nadelholz der Sortierklasse S10 und S13 nach DIN 4074 Teil 1 kann ein Wert von $f_{v,k} = 2,5 \text{ N/mm}^2$ angenommen werden.

Das Verleimen bzw. Verkleben von Kunstharzpreßholz und Preßfurniersperrholz mit Nadelholz stellt nach Untersuchungen von JANSSEN 1988 kein Problem dar. Es wurden Versuche unter Wechselklimabeanspruchung als auch Delaminierungsprüfungen durchgeführt, um Aussagen über die Qualität der Verleimung zu erhalten. Er fand, daß die Leimfuge zwischen den hochwertigen Holzwerkstoffplatten und Holz mindestens genau so gut ist wie die zwischen Holz und Holz:

Die Kraft, die durch die Verbindungsmittel über Lochleibung in die Holzwerkstoffplatte eingebracht wird, muß durch die Leimfläche (siehe **Bild 4.22**) in das Holzbauteil übertragen werden. Die Lochleibungsspannung kann bei dünnen Holzwerkstoffplatten über die Plattendicke t als gleichmäßig verteilt angenommen werden. Die anteilige Kraft, welche über die Leimfläche übertragen wird, berechnet sich zu:

$$R_{u,t} = n \cdot f_{h,t} \cdot t \cdot d \leq A_L \cdot f_v \quad (4.30)$$

mit $A_L = L_L \cdot B_L - n \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}$

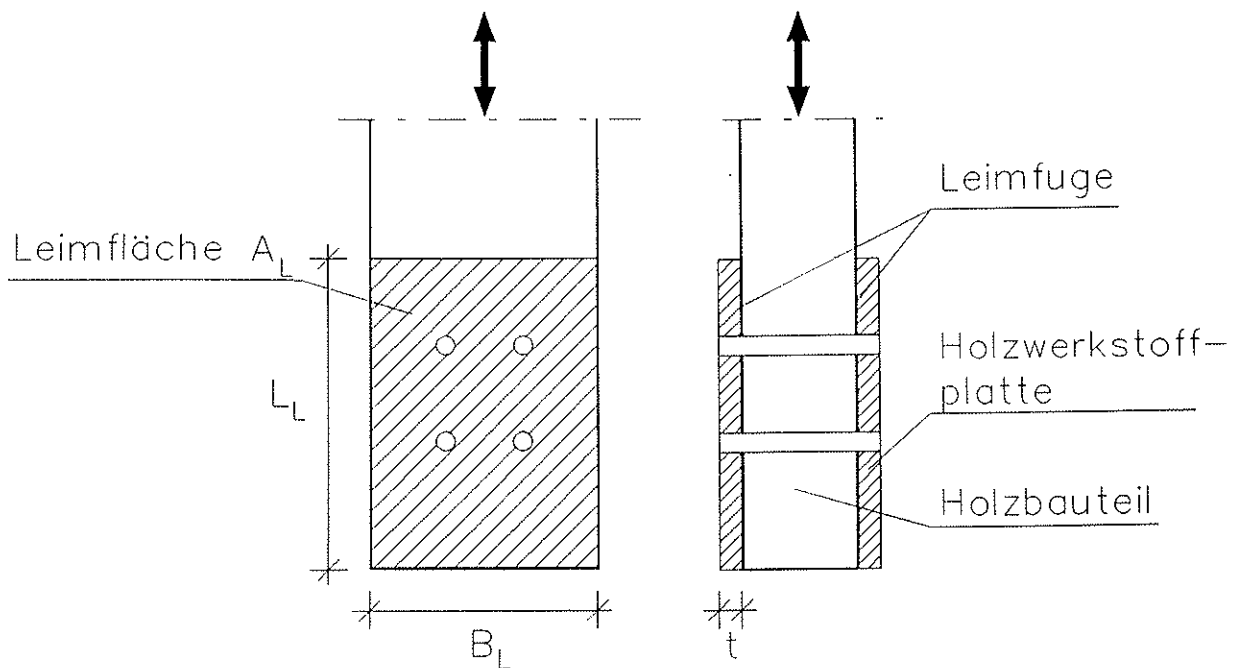


Bild 4.22: Angenommene Leimfläche für die Übertragung der anteiligen Kraft von der Holzwerkstoffplatte auf das Holzbauteil

Daher muß die Leimfläche A_L folgender Bedingung genügen:

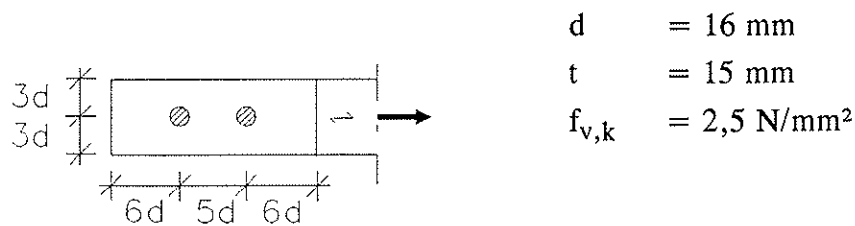
$$A_L \geq \frac{f_{h,t}}{f_v} \cdot n \cdot t \cdot d \quad (4.31)$$

Hierin bedeuten:

- $f_{h,t}$: Lochleibungsfestigkeit der Holzwerkstoffplatte
- f_v : Abscherfestigkeit der Leimfuge bzw. des Holzes
- n : Anzahl der Verbindungsmittel
- t : Plattendicke
- d : Durchmesser des Verbindungsmittels

Diese Bedingung wird in der Regel erfüllt, wenn die gesamte Anschlußfläche mit Holzwerkstoffplatten abgedeckt ist. Bei mit Buche-Furniersperrholz verstärkten Verbindungen wurde bei keinem Versuch ein Versagen in der Leimfuge beobachtet. Dies verdeutlicht auch folgendes Beispiel.

Beispiel: Buche-Furniersperrholz verstärktes Seitenholz



$$A_L = 102 \cdot d^2 - 2 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 100,4 \cdot d^2 = 25710 \text{ mm}^2$$

Die Lochleibungsfestigkeit der Bau-Furniersperrholzplatte aus Buche muß folgende Bedingung erfüllen:

$$f_{h,t} \leq 25710 \cdot \frac{2,5}{2 \cdot 15 \cdot 16} = 133,9 \text{ N/mm}^2$$

Dieser Wert entspricht etwa dem Doppelten der tatsächlichen Lochleibungsfestigkeit von Bau-Furniersperrholz aus Buche. Jedoch ist die Lochleibungsfestigkeit von Kunstharzpreßholz und Preßfurniersperrholz etwa in der Größenordnung von 100 - 180 N/mm², so daß ein Nachweis in der Leimfuge bei der Verstärkung einer Verbindung mit diesen hochwertigen Holzwerkstoffplatten stets zu führen ist. Auch ist die Kerbempfindlichkeit dieser gelochten Platten zu beachten (siehe dazu EHLBECK, EBERHART 1989).

5 Modell zur Berechnung der Tragfähigkeit von Verbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln

5.1 Allgemeines

JOHANSEN 1949 stellte erstmals ein theoretisches Modell zur Berechnung der Tragfähigkeit von Bolzenverbindungen vor. MÖLLER 1951 und MEYER 1957 erweiterten diese Theorie auf Nagelverbindungen. Die daraus folgenden Bemessungsgleichungen sind in die internationalen Normvorschläge CIB - STRUCTURAL TIMBER DESIGN CODE 1983 und ENV 1995-1-1 "Design of Timber Structures" 1993 (EUROCODE 5) eingeflossen.

Das Rechenmodell von Johansen geht hierbei u.a. von folgenden Vereinfachungen aus:

- *ideal* elastisch-plastische Arbeitslinie des Holzes unter Lochleibungsbeanspruchung;
- die Verankerungskräfte zwischen Holz und Verbindungsmittel werden *nicht* berücksichtigt;
- ein *Spaltversagen* der einzelnen Hölzer ist ausgeschlossen;
- die Berechnung von Verbindungen, die mit aufgeklebten Holzwerkstoffplatten verstärkt werden, ist *nicht* möglich!

In der Arbeit von WERNER 1993 wurde aufbauend auf der "Johansen-Theorie" ein Rechenmodell entwickelt, bei dem auf die o.a. Vereinfachungen verzichtet werden konnte. Dazu ist jedoch ein Rechenprogramm auf einem Computer notwendig, um diese komplexen Rechenoperationen durchführen zu können. Ein Computerrechenprogramm bietet weiterhin den Vorteil, daß man die Tragfähigkeiten einer ausreichend großen Anzahl von Verbindungen mit gleichen geometrischen und werkstoffbezogenen Verhältnissen berechnen kann. Dazu werden mit Hilfe eines Simulationsprogramms den Eingangsgrößen des Rechenmodells zufällige Werte zugeordnet, wobei die Autokorrelationen einzelner Parameter zu berücksichtigen sind.

Für das Spaltversagen von Verbindungen wurde ein theoretischer Ansatz unter Verwendung der linear-elastischen Bruchmechanik vorgestellt. Wirken auf einzelne Hölzer einer Verbindung planmäßig querzugerzeugende Kräfte, wird von EHLBECK, GÖRLACHER, WERNER 1991 vorgeschlagen, einen gesonderten Querschnittsnachweis zu führen.

Das für verschiedene Bruchursachen hergeleitete Rechenmodell wurde auf der Grundlage von Energiemethoden entwickelt. Energiemethoden werden verwendet, da Arbeit und Energie skalare Größen sind und somit das Rechnen mit diesen Größen wesentlich einfacher als das Rechnen mit Vektoren ist, vor allen Dingen dann, wenn die Richtung der Kräfte nicht eindeutig zu bestimmen ist.

Für die Entwicklung eines Rechenmodells wurden folgende Annahmen getroffen:

- Die Arbeit der Reibungskräfte zwischen den Hölzern bleibt unberücksichtigt, da sich die Laschen eines Anschlusses im Bruchzustand ablösen und somit die Reibungskräfte nur bedingt wirken können. Auch die zugehörigen Druckspannungen leisten keine Arbeit in Richtung der virtuellen Verschiebung.
- Die Dicke t der aufgeklebten Verstärkung ist im Verhältnis zur Dicke s des zugehörigen Holzes klein. Damit wird das Auftreten eines Fließgelenkes in den Verstärkungsplatten ausgeschlossen.
- Die Lochleibungs- und Haftfestigkeiten werden in den maßgebenden Bereichen als gleichmäßig verteilt angenommen.
- Für die virtuelle Verschiebung gilt: $\sin \theta = \tan \theta = \theta$ und $\cos \theta = 1$

5.2 Auszieh- und Umlenkkräfte

Durch die Verschiebung des Anschlusses in Richtung der gesuchten Traglast verdreht sich bei einzelnen Bruchursachen das Verbindungsmittel oder ein Abschnitt davon um den Winkel θ . Durch diese Verformung verschiebt sich das Verbindungsmittel entlang der Bohrlochwandung und es werden Ausziehkräfte erzeugt. Wegen der relativ kurzen Einbindelänge werden die wirkenden Haftfestigkeiten abschnittsweise dem Betrage nach als konstant angenommen. Sie wirken der Verschiebungsrichtung entgegen. Jedoch ist zwischen ein- und zweischnittigen

Verbindungen zu unterscheiden. Im Krümmungsbereich des Verbindungsmittels ist eine sprunghafte Änderung der Normalkraft zu beobachten. Dies wird durch Ansatz einer Rückhalte­kraft in Größe des Normalkraftverlustes infolge der Umlenkung berücksichtigt.

5.2.1 Einschnittige Verbindungen

Bei einschnittigen Verbindungen muß bei einigen Bruchursachen die Lage des Drehpunktes x_D , um welchen sich das Verbindungsmittel beim Schrägstellen um den Winkel θ dreht, ermittelt werden. Wenn die Stahldehnungen vernachlässigt werden, entsteht dabei für den Fall, daß der Drehpunkt x_D im Bereich von s_1 liegt, die in **Bild 5.1** dargestellte Verteilung der Haftfestigkeiten. Jeder Punkt auf dem Verbindungsmittel verschiebt sich im schrägen Bereich um

$$\Delta l = s \cdot \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1 \right) \quad (5.1)$$

gegenüber seiner ursprünglichen Lage im Holz. Die Haftspannung wirkt nur auf den halben Umfang des Verbindungsmittels, da sich, infolge der großen Ein­drückungen im Traglastzustand, das Verbindungsmittel auf einer Seite vom Holz löst. Bei einer virtuellen Verschiebung des Anschlusses in Richtung der gesuchten Traglast um den Betrag l ist $\cos \theta \cong 1$ und somit $\Delta l = 0$. Zur Bestimmung der geometrischen Verhältnisse im Anschluß ist der Arbeitsanteil der Auszieh- und Umlenkkräfte nicht zu berücksichtigen.

Kurz vor Versagen des Anschlusses stellt sich ein Biegewinkel $\max \theta$ ein. Dabei liefern die vertikalen Komponenten der Ausziehkräfte $R_{u,\tau}$ einen zusätzlichen Anteil zur Gesamttragfähigkeit R_u .

Durch das Verbiegen des Verbindungsmittels bleiben in einigen Versagensfällen bestimmte Teillängen des Verbindungsmittels nahezu horizontal. Der starke Normalkraftverlust im Krümmungsbereich des Verbindungsmittels wird vereinfacht wie folgt berücksichtigt (siehe auch Abschnitt 4.3):

$$\Delta N = \max N \cdot (e^{\mu \cdot \max \theta} - 1) \quad (5.2)$$

mit $\max N = \pi \cdot d \cdot s' \cdot \tau_h(s')$

bzw. $\max N = \pi \cdot d \cdot s^* \cdot \tau_h(s^*)$

$\max N$	maximal mögliche Normalkraft im horizontalen Bereich
μ	Gleitreibungsbeiwert
$\max \theta$	Umlenkwinkel im Bogenmaß kurz vor Versagen des Anschlusses
τ_h	Haftfestigkeit
s', s^*	Länge der horizontal bleibenden Teilstücke
d	Nenn Durchmesser des Verbindungsmittels

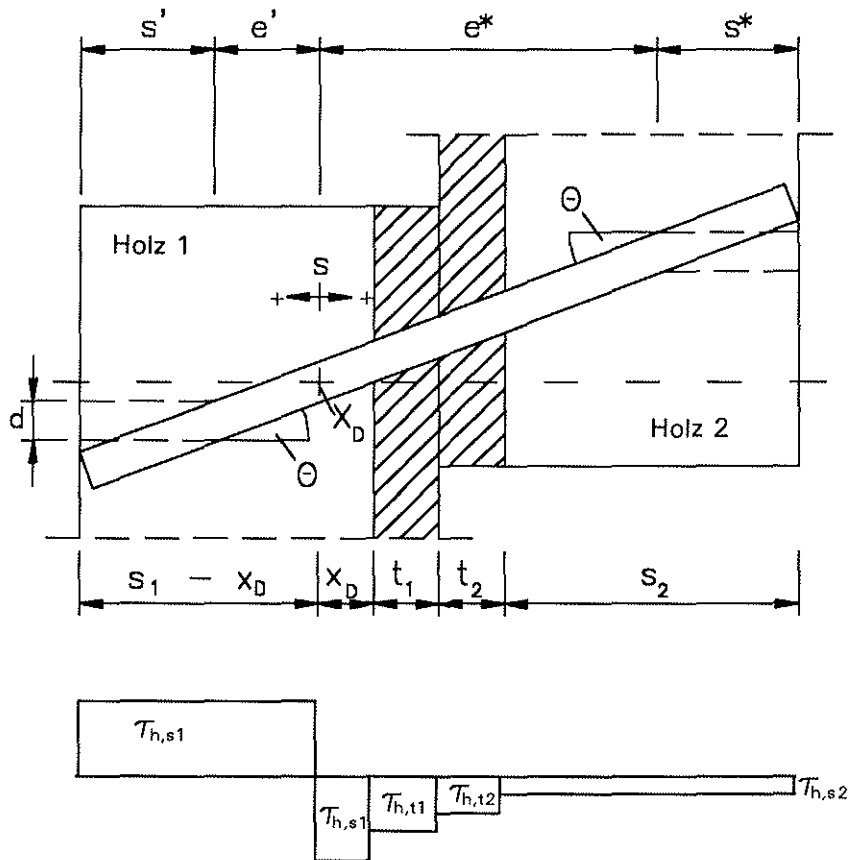


Bild 5.1: Vereinfachte Annahme der Verteilung der Haftfestigkeiten entlang des Verbindungsmittels mit dem Drehpunkt x_D im Holz 1

5.2.2 Zweischnittige Verbindungen

Bei zweischnittigen Verbindungen liegt der Drehpunkt durch die Symmetrieeigenschaften im Mittelholz fest. Dadurch entfällt hier die iterative Suche nach diesem Punkt. Es wird die in **Bild 5.2** dargestellte Verschiebung des Verbindungsmittels bei einer Schrägstellung um den Winkel θ angenommen.

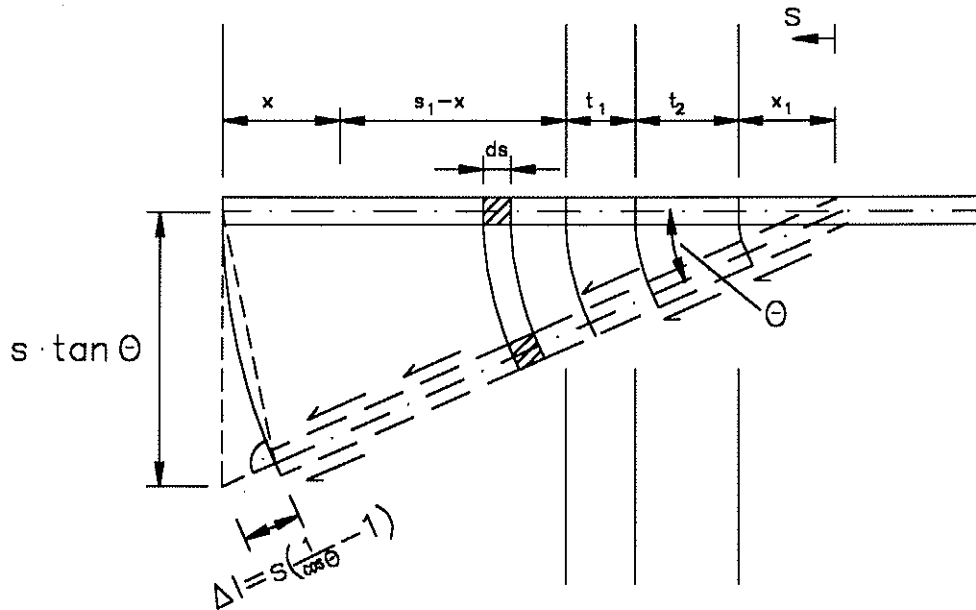


Bild 5.2: Verschiebung des Verbindungsmittels bei einer Schrägstellung um den Winkel θ

5.3 Rechenmodell

Die Gleichungen zur Bestimmung der Tragfähigkeit der unterschiedlichen Bruchursachen sind in WERNER 1993 hergeleitet. Jede mögliche Bruchursache muß dabei getrennt untersucht werden. Es sind zwischen ein- und mehrschnittigen Holz-Holz bzw. Stahlblech-Holz-Verbindungen zu unterscheiden.

Für Holz-Holz-Verbindungen sind die verschiedenen Bruchursachen in **Bild 5.3** zusammengestellt. Die Bruchursachen für Stahlblech-Holz-Verbindungen zeigen **Bild 5.4**. Diejenige Bruchursache, welche die kleinste Traglast liefert, ist maßgebend.

Auf Grund des plastischen Verhaltens des Holzes unter Lochleibungsbeanspruchung kann die Spannung in der Nähe der Scherfläche als gleichmäßig verteilt angenommen werden. Bei einzelnen Bruchursachen bilden sich an einer oder an mehreren Stellen des Verbindungsmittels Fließbereiche aus, die bei Anwendung der Fließgelenktheorie in einem Querschnitt zusammengefaßt werden.

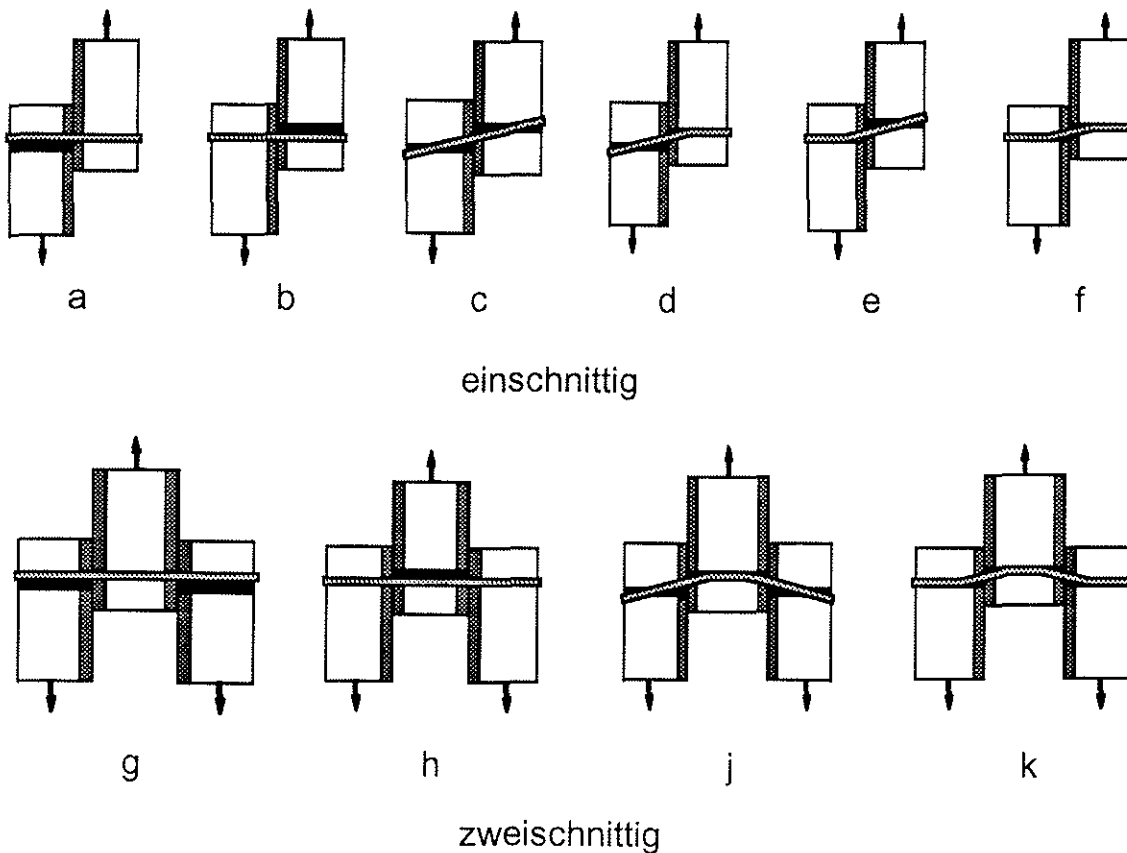


Bild 5.3: Mögliche Bruchursachen bei Holz-Holz-Verbindungen

Damit ergibt sich ein Knickwinkel als gute Näherung für sehr große Krümmungen. In dem Rechenmodell werden außer den Lochleibungskräften und dem Biege-
widerstand des Verbindungsmittels die Verankerungskräfte im Holz berücksichtigt. Mit einer idealisierten Verformungsfigur des Verbindungsmittels wird iterativ die Gesamtverschiebung der Verbindung berechnet. Dies geschieht so lange bis entweder eine Verschiebung von 15 mm erreicht ist oder ein Holz durch Aufspalten versagt.

Aus den Eindrücken des Verbindungsmittels im Traglastzustand wird mit der Arbeitslinie die vorhandene Lochleibungsspannung bestimmt und in die Gleichungen zur Ermittlung der rechnerische Tragfähigkeit eingesetzt. Im Hinblick auf die Tragfähigkeitssteigerung von Verbindungen wurde das theoretische Rechenmodell so hergeleitet, daß die Berechnung der Traglast unter Berücksichtigung von aufgeleimten Holzwerkstoffplatten im Anschlußbereich möglich ist.

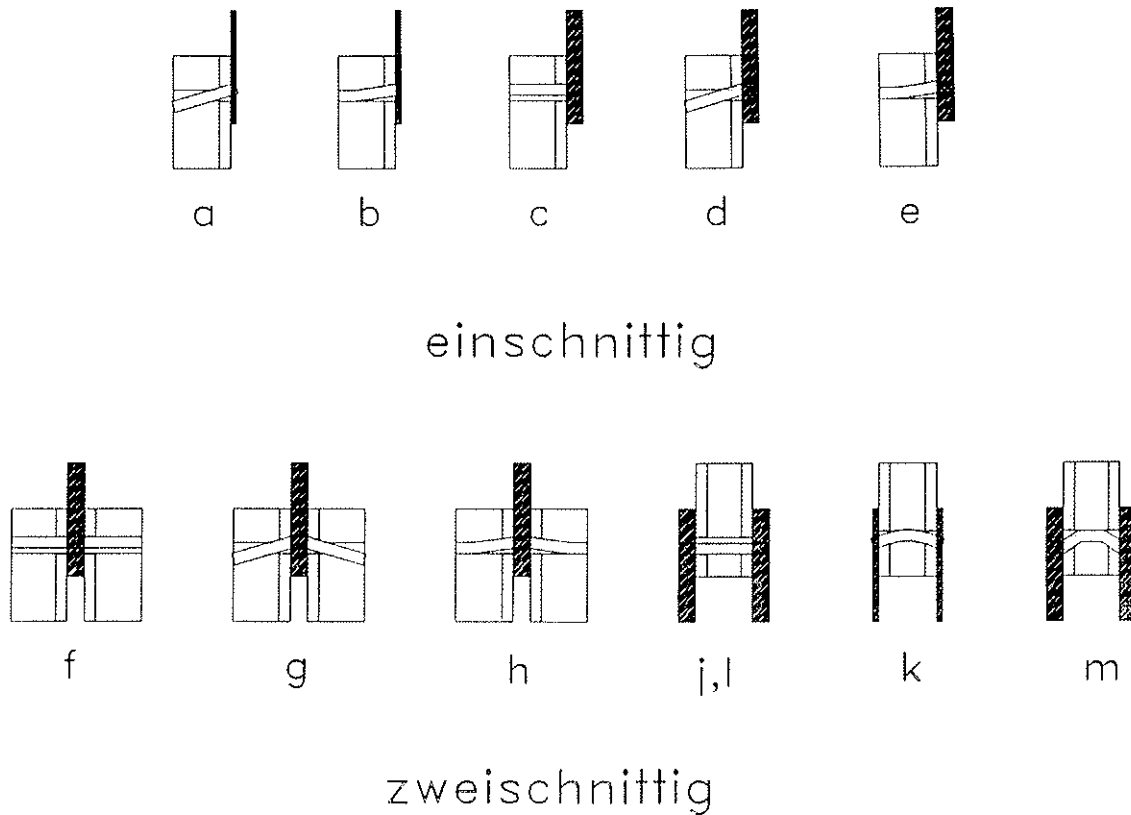


Bild 5.4: Mögliche Bruchursachen bei Stahlblech-Holz-Verbindungen

Zur Bemessung von Verbindungen müssen jedoch handhabbare Gleichungen angegeben werden. Wie Untersuchungen zeigten, können bei Zugrundelegung der "Johansen"-Theorie die zusätzlichen Systemeigenschaften einer Verbindungsart in einem Systemfaktor k_{sys} zusammengefaßt werden. Bei Bruchursachen, bei denen nur das Lochleibungsversagen die Tragfähigkeit der Verbindung bestimmt, entfällt dieser Faktor. Im folgenden werden Bemessungsgleichungen für Verbindungen mit verstärkten Anschlußbereichen angegeben. Zur Vereinfachung wird vorausgesetzt, daß die Dicke und die Lochleibungsfestigkeit der jeweils an den Scherflächen aufgeleimten Holzwerkstoffplatten gleich groß sind (siehe auch BLAß, WERNER 1988). Ferner wird vorausgesetzt, daß sich die Fließgelenke jeweils in den Hölzern und nicht in den dünnen Holzwerkstoffplatten ausbilden.

5.4 Bemessungsgleichungen

5.4.1 Holz-Holz-Verbindungen mit verstärkten Anschlußbereichen

- (1) Der Bemessungswert der Tragfähigkeit pro Verbindungsmittel und Scherfläche für Holz-Holz-Verbindungen mit verstärkten Anschlußbereichen, hergestellt mit stiftförmigen Verbindungsmitteln, ergibt sich als kleinster Wert aus den folgenden Gleichungen.

Bemessungswert der Tragfähigkeit von *einschnittigen* Verbindungen:

$$R_d = \min \left\{ \begin{array}{l} (f_{h,1,d} \cdot s_1 + f_{h,t,d} \cdot t) \cdot d \quad (5.3a) \\ (f_{h,2,d} \cdot s_2 + f_{h,t,d} \cdot t) \cdot d \quad (5.3b) \\ \frac{f_{h,1,d} \cdot s_1 \cdot d}{1 + \beta} \cdot \sqrt{\beta \left(1 - 4\eta \left(\frac{t}{s_1} \right)^2 \right) + 2\beta^2 \left(1 + \left(\frac{s_2}{s_1} \right) + \left(\frac{s_2}{s_1} \right)^2 + 4 \left(\frac{t}{s_1} \right) + 8 \left(\frac{t}{s_1} \right)^2 + 4 \left(\frac{t}{s_1} \right) \left(\frac{s_2}{s_1} \right) - 2\eta \left(\frac{t}{s_1} \right)^2 \right) + \beta^3 \left(\frac{s_2}{s_1} \right)^2} - \frac{\beta \cdot f_{h,1,d} \cdot s_1 \cdot d}{1 + \beta} \cdot \left[1 + 4 \left(\frac{t}{s_1} \right) + \left(\frac{s_2}{s_1} \right) \right] + f_{h,t,d} \cdot d \cdot t \quad (5.3c) \\ k_{sys} \cdot \frac{\beta \cdot f_{h,1,d} \cdot d}{2 + \beta} \cdot \left[\sqrt{(s_1 + 4t)^2 + \frac{2 + \beta}{\beta} \left(s_1^2 - 4\eta t^2 + \frac{4 M_{y,d}}{d \cdot f_{h,1,d}} \right)} - (s_1 + 4t) \right] + f_{h,t,d} \cdot t \cdot d \quad (5.3d) \\ k_{sys} \cdot \frac{\beta \cdot f_{h,1,d} \cdot d}{1 + 2\beta} \cdot \left[\sqrt{(s_2 + 4t)^2 + (1 + 2\beta) \left(s_2^2 - 4\eta t^2 + \frac{4 M_{y,d}}{\beta \cdot d \cdot f_{h,1,d}} \right)} - (s_2 + 4t) \right] + f_{h,t,d} \cdot t \cdot d \quad (5.3e) \\ k_{sys} \cdot \frac{2 \cdot \beta \cdot f_{h,1,d} \cdot d}{1 + \beta} \cdot \left[\sqrt{t^2 - \frac{1 + \beta}{2\beta} \left(\eta t^2 - \frac{2 M_{y,d}}{d \cdot f_{h,1,d}} \right)} - t \right] + f_{h,t,d} \cdot t \cdot d \quad (5.3f) \end{array} \right.$$

Bemessungswert der Tragfähigkeit von *zweischchnittigen* Verbindungen:

$$R_d = \min \left\{ \begin{array}{l} (f_{h,1,d} \cdot s_1 + f_{h,t,d} \cdot t) \cdot d \quad (5.3g) \\ (0,5 \cdot f_{h,2,d} \cdot s_2 + f_{h,t,d} \cdot t) \cdot d \quad (5.3h) \\ k_{sys} \cdot \frac{\beta \cdot f_{h,1,d} \cdot d}{2 + \beta} \cdot \left[\sqrt{(s_1 + 4t)^2 + \frac{2 + \beta}{\beta} \left(s_1^2 - 4\eta t^2 + \frac{4 M_{y,d}}{d \cdot f_{h,1,d}} \right)} - (s_1 + 4t) \right] + f_{h,t,d} \cdot t \cdot d \quad (5.3j) \\ k_{sys} \cdot \frac{2 \cdot \beta \cdot f_{h,1,d} \cdot d}{1 + \beta} \cdot \left[\sqrt{t^2 - \frac{1 + \beta}{2\beta} \left(\eta t^2 - \frac{2 M_{y,d}}{d \cdot f_{h,1,d}} \right)} - t \right] + f_{h,t,d} \cdot t \cdot d \quad (5.3k) \end{array} \right.$$

Der Wert in den eckigen Klammern muß immer größer gleich Null sein.

Ergibt sich der Wert in einer eckigen Klammer kleiner Null, so sind die Voraussetzungen für die Herleitung der Gleichungen verletzt, und es müssen andere Bemessungsverfahren verwendet werden.

s_1 und s_2	Dicke der Hölzer oder Eindringtiefe
t	Dicke der aufgeleimten Holzwerkstoffplatten
$f_{h,1}$ und $f_{h,2}$	Lochleibungsfestigkeiten der Hölzer in s_1 bzw. s_2
$f_{h,t}$	Lochleibungsfestigkeit der aufgeleimten Holzwerkstoffplatten
M_y	Fließmomentes des Verbindungsmittels
d	Durchmesser des Verbindungsmittels
k_{sys}	Systemfaktor

$$\beta \quad \text{Verhältnis } \frac{f_{h,2,d}}{f_{h,1,d}}$$

$$\eta \quad \text{Verhältnis } \frac{f_{h,t,d}}{f_{h,1,d}}$$

- (2) Die Bemessungswerte der Lochleibungsfestigkeiten $f_{h,1,d}$, $f_{h,2,d}$ und $f_{h,t,d}$ berechnen sich wie folgt:

$$f_{h,1,d} = \frac{k_{mod,1} \cdot f_{h,1,k}}{\gamma_m} \quad \text{bzw.} \quad f_{h,2,d} = \frac{k_{mod,2} \cdot f_{h,2,k}}{\gamma_m} \quad (5.3 \text{ l})$$

$$f_{h,t,d} = \frac{k_{mod,t} \cdot f_{h,t,k}}{\gamma_m} \quad (5.3 \text{ m})$$

k_{mod} Modifikationsfaktor zur Berücksichtigung der Holzfeuchte und der Lasteinwirkungsdauer

γ_m Teilsicherheitsbeiwert für die Baustoffeigenschaften der Hölzer bzw. der Holzwerkstoffe

- (3) Der Bemessungswert des Fließmomentes $M_{y,d}$ der Verbindungsmittel ergibt sich aus folgender Gleichung:

$$M_{y,d} = \frac{M_{y,k}}{\gamma_m} \quad (5.3 \text{ n})$$

γ_m Teilsicherheitsbeiwert für die Baustoffeigenschaften der Verbindungsmittel

Die Bruchursachen sind in **Bild 5.3** dargestellt. Die Buchstaben entsprechen den zugehörigen Gleichungsnummern. Setzt man die Dicke t der aufgeleimten Holzwerkstoffplatten in den oben angegebenen Bemessungsgleichungen zu Null, dann entsprechen sie den Gl. (6.2.1a-k) im Entwurf zu EUROCODE 5 (ENV 1995-1-1).

5.4.2 Stahlblech-Holz-Verbindungen

- (1) Der Bemessungswert der Tragfähigkeit pro Verbindungsmittel von *einschnittigen* Stahlblech-Holz-Verbindungen mit dünnen Stahlblechen (d.h. für eine Stahlblechdicke $t_{\text{Blech}} \leq 0,5d$) und verstärkten Anschlußbereichen ergibt sich als kleinster Wert aus den folgenden Gleichungen:

$$R_d = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,1,d} \cdot d \cdot \left[\sqrt{2s_1^2 + 2(2-\eta)t^2 + 4ts_1} - (s_1 + 2t) \right] + f_{h,t,d} \cdot t \cdot d \quad (5.4a) \\ k_{\text{sys}} \cdot f_{h,1,d} \cdot d \cdot \left[\sqrt{(4-\eta)t^2 + \frac{2M_{y,d}}{d \cdot f_{h,1,d}}} - 2t \right] + f_{h,t,d} \cdot t \cdot d \quad (5.4b) \end{array} \right.$$

Für Verbindungen mit dicken Stahlblechen (d.h. für eine Stahlblechdicke $t_{\text{Blech}} \geq d$) und verstärkten Anschlußbereichen ergibt sich der Bemessungswert der Tragfähigkeit als kleinster Wert aus den folgenden Gleichungen:

$$R_d = \min \left\{ \begin{array}{l} (f_{h,1,d} \cdot s_1 + f_{h,t,d} \cdot t) \cdot d \quad (5.4c) \\ k_{\text{sys}} \cdot f_{h,1,d} \cdot d \cdot \left[\sqrt{2s_1^2 + 2(2-\eta)t^2 + 4ts_1 + \frac{4M_{y,d}}{d \cdot f_{h,1,d}}} - (s_1 + 2t) \right] + f_{h,t,d} \cdot t \cdot d \quad (5.4d) \\ k_{\text{sys}} \cdot f_{h,1,d} \cdot d \cdot \left[\sqrt{(4-\eta)t^2 + \frac{4M_{y,d}}{d \cdot f_{h,1,d}}} - 2t \right] + f_{h,t,d} \cdot t \cdot d \quad (5.4e) \end{array} \right.$$

Für $0,5d < t_{\text{Blech}} < d$ könnte man lineare Interpolation empfehlen. Die Symbole sind in Abschnitt 5.4.1 definiert. Der Wert in den eckigen Klammern muß immer größer gleich Null sein.

- (2) Der Bemessungswert der Tragfähigkeit pro Verbindungsmittel und Scherfläche von *zweischschnittigen* Stahlblech-Holz-Verbindungen mit *innenliegenden* Stahlblechen und verstärkten Anschlußbereichen ergibt sich als kleinster Wert aus den folgenden Gleichungen.

$$R_d = \min \left\{ \begin{array}{l} (f_{h,1,d} \cdot s_1 + f_{h,t,d} \cdot t) \cdot d \quad (5.4f) \\ k_{\text{sys}} \cdot f_{h,1,d} \cdot d \cdot \left[\sqrt{2s_1^2 + 2(2-\eta)t^2 + 4ts_1 + \frac{4M_{y,d}}{d \cdot f_{h,1,d}}} - (s_1 + 2t) \right] + f_{h,t,d} \cdot t \cdot d \quad (5.4g) \\ k_{\text{sys}} \cdot f_{h,1,d} \cdot d \cdot \left[\sqrt{(4-\eta)t^2 + \frac{4M_{y,d}}{d \cdot f_{h,1,d}}} - 2t \right] + f_{h,t,d} \cdot t \cdot d \quad (5.4h) \end{array} \right.$$

Die Symbole sind in Abschnitt 5.4.1 definiert. Der Wert in den eckigen Klammern muß immer größer gleich Null sein.

- (3) Der Bemessungswert der Tragfähigkeit pro Verbindungsmittel und Scherfläche von *zweischrittigen* Stahlblech-Holz-Verbindungen mit *außenliegenden dünnen* Stahlblechen (d.h. für eine Stahlblechdicke $t_{\text{Blech}} \leq 0,5d$) und verstärkten Anschlußbereichen ergibt sich als kleinster Wert aus den folgenden Gleichungen.

$$R_d = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,5 \cdot f_{h,2,d} \cdot s_2 \cdot d + f_{h,t,d} \cdot t \cdot d \quad (5.4j) \\ k_{\text{sys}} \cdot f_{h,2,d} \cdot d \cdot \left[\sqrt{\left(4 - \frac{f_{h,t,d}}{f_{h,2,d}}\right) t^2 + \frac{2 M_{y,d}}{d \cdot f_{h,2,d}}} - 2 t \right] + f_{h,t,d} \cdot t \cdot d \quad (5.4k) \end{array} \right.$$

Für Verbindungen mit außenliegenden dicken Stahlblechen (d.h. für eine Stahlblechdicke $t_{\text{Blech}} \geq d$) und verstärkten Anschlußbereichen ergibt sich der Bemessungswert der Tragfähigkeit als kleinster Wert aus den folgenden Gleichungen.

$$R_d = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,5 \cdot f_{h,2,d} \cdot s_2 \cdot d + f_{h,t,d} \cdot t \cdot d \quad (5.4l) \\ k_{\text{sys}} \cdot f_{h,2,d} \cdot d \cdot \left[\sqrt{\left(4 - \frac{f_{h,t,d}}{f_{h,2,d}}\right) t^2 + \frac{4 M_{y,d}}{d \cdot f_{h,2,d}}} - 2 t \right] + f_{h,t,d} \cdot t \cdot d \quad (5.4m) \end{array} \right.$$

Für $0,5d < t_{\text{Blech}} < d$ könnte man lineare Interpolation empfehlen. Die Symbole sind in Abschnitt 5.4.1 definiert. Der Wert in den eckigen Klammern muß immer größer gleich Null sein.

- (4) Die Tragfähigkeit der Stahlbleche ist stets zusätzlich zu überprüfen.

Die Bruchursachen sind in **Bild 5.4** dargestellt. Die Buchstaben entsprechen den zugehörigen Gleichungsnummern. Bei den praktisch vorkommenden Fällen ist die Forderung, daß die Werte in den eckigen Klammern größer gleich Null sein müssen, in der Regel erfüllt. Sie folgt aus der Annahme, daß die Fließgelenke nicht in den dünnen Holzwerkstoffplatten auftreten.

5.5 Rechenprogramm "XJOINT"

Basierend auf dem theoretischen Modell, wurde das Computerprogramm "XJOINT" (Xylon <griech.: 'Holz'> JOINT <engl.: 'Verbindung'>) zur Berechnung der Tragfähigkeit von ein- und zweischnittigen Verbindungen unter Berücksichtigung der Verankerung des stiftförmigen Verbindungsmittels im Holz und des Spaltversagens entwickelt. Damit können sowohl Holz-Holz-Verbindungen als auch Stahlblech-Holz-Verbindungen mit und ohne Verstärkungsmaßnahmen berechnet werden. Für die Berechnung der Traglasten der Anschlüsse werden alle möglichen Versagensarten für jede Scherfläche getrennt untersucht und die Ergebnisse, d.h. die Tragfähigkeit bzw. ihre Geometrie im Bruchzustand, insbesondere die Verschiebung der Verbindung beim Versagen, in Dateien aufgelistet oder auf dem Drucker ausgegeben. Dieses Programm dient in erster Linie dazu, die Tragfähigkeit einer ausreichend großen Anzahl von gleichartigen Verbindungen zu ermitteln, um daraus das 5%-Fraktil zu bestimmen, so daß auf Grundlage des neuen Sicherheitskonzepts verfeinerte Bemessungsregeln für Verbindungen angegeben werden können. Es ist jedoch so aufgebaut, daß die Tragfähigkeit einer einzelnen Verbindung benutzerfreundlich durch Abfrage der Eingangsgrößen auf einem Personal-Computer (PC) berechnet werden kann. Auch besteht die Möglichkeit, durch Aufruf eines Unterprogramms das Last-Verschiebungsdiagramm der berechneten Verbindung auf dem Bildschirm darzustellen und zu speichern.

Das Programm XJOINT setzt sich aus dem Hauptprogramm und 17 Unterprogrammen zusammen. Das Hauptprogramm steuert das Öffnen der Dateien, definiert die Textvariablen für die Bildschirmabfrage und ruft die vom Benutzer gewünschten Unterprogramme auf.

Die einzelnen Unterprogramme (UPe) sind:

- XEIN UP zur Abfrage und Eingabe der Verbindungsparameter
- XEINLES UP zum Einlesen einer Datei mit Verbindungsparametern
- XBILD UP zur graphischen Darstellung der Verbindung
- XRECHEN UP zur Steuerung der Tragfähigkeitsberechnung
- XRECHEN1 UP zur Berechnung der Tragfähigkeit von einschnittigen Verbindungen

- XRECHEN2 UP zur Berechnung der Tragfähigkeit von zweischnittigen Verbindungen
- XXX UP zur Lösung von Gleichungen nach dem Newtonschen Iterationsverfahren
- XKRIT UP zur Überprüfung der statisch möglichen Versagensform
- XSPALT UP zur Berechnung der Spaltbeanspruchung einer Holz-Holz-Verbindung
- XSPALTS UP zur Berechnung der Spaltbeanspruchung einer Stahlblech-Holz-Verbindung
- XSPALSA UP zur Berechnung der Spaltbeanspruchung einer zweischnittigen Stahlblech-Holz-Verbindung mit außenliegenden Stahlblechen
- XSPARECH UP zur Berechnung der Spaltkraft einer dünnen Holzscheibe
- XSPADIA UP zur Ermittlung einer Beanspruchung aus einem Last-Verformungsdiagramm
- XDRUCK UP zum Drucken der Ergebnisse
- XDRUCKA UP zum Drucken der Ergebnisse mit der Geometrie im Traglastzustand
- XSAS UP zur Erstellung einer Ergebnisdatei für eine statistische Auswertung
- XDIA UP zur Darstellung des Last-Verschiebungsdiagramms einer Verbindung
- XINFO UP mit Informationen über das Programm

In WERNER 1993 sind die Flußdiagramme des Hauptprogramms und einiger Unterprogramme zusammengestellt.

Zur Berechnung der Tragfähigkeit einer Verbindung sind folgende Eingabedaten erforderlich:

1. Kennwerte der Hölzer

Dicke der Hölzer von 1-i	s_i
Lochleibungsfestigkeit der Hölzer	f_{si}
Haftfestigkeit des Verbindungsmittels in den Hölzern	τ_{si}
Gleitreibungsbeiwert Verbindungsmittel/Holz	μ_{si}

2. *Kennwerte der Verstärkungswerkstoffe*

Dicke der aufgeklebten Holzwerkstoffplatten	t_i
Lochleibungsfestigkeit der Holzwerkstoffe	f_{ti}
Haftfestigkeit des Verbindungsmittels in den Holzwerkstoffen	τ_{si}

3. *Kennwerte des Verbindungsmittels*

Durchmesser des Verbindungsmittels	d
Spannungsdurchmesser des Verbindungsmittels	d_{sp}
Fließspannung des Verbindungsmittels	f_y

4. *Kennwerte zur Beschreibung der Arbeitslinie unter Lochleibungsbeanspruchung*

in Faserrichtung	$K_{1,i}$, $K_{2,i}$ und $K_{3,i}$
rechtwinklig zur Faserrichtung	$K_{1,i}$, $K_{2,i}$ und $K_{3,i}$
Schlupf in Faserrichtung	$w_{s,i}$

5. *Kennwerte zur Berücksichtigung des Spaltversagens*

Spaltbruchzähigkeit der Hölzer	$(\sqrt{W \cdot E})_i$
kleinster Abstand des Verbindungsmittels vom Rand	a_4
Verhältnis Elastizitätsmodul in Faserrichtung zu Schubmodul	E/G
Faktor zur Berechnung der Breite des vertikal zerdrückten Holzes	k_{bd}

Bei Stahlblech-Holz-Verbindungen wird für die Stahlbleche eine ausreichende Festigkeit vorausgesetzt. Das Programm erkennt selbständig, ob es sich um eine ein- oder zweiseitige Verbindung handelt. Die Traglast einer Verbindung kann wahlweise mit und ohne Berücksichtigung des Spaltversagens berechnet werden. Bei Verbindungen mit außenliegenden Stahlblechen ist es möglich, sowohl die Tragfähigkeit der Verbindung mit dünnen, biegeweichen Stahlblechen als auch die Tragfähigkeit der Verbindung mit dicken, steifen Stahlblechen zu berechnen. Nach ENV 1995-1-1 liegen dünne Stahlbleche vor, wenn $t_{Bleeh} \leq 0,5d$ ist. Stahlbleche mit $t_{Bleeh} \geq d$ besitzen eine ausreichende Steifigkeit und werden als dicke Stahlbleche bezeichnet. Für $0,5d < t_{Bleeh} < d$ darf nach diesem Entwurf die Tragfähigkeit linear interpoliert werden.

6 Entwicklung von leistungsfähigen Anschlüssen

6.1 BFU-BU verstärkte Stahlblech-Holz-Nagelverbindung mit nicht vorgebohrten Stahlblechen

Auf Grund der theoretischen Überlegungen wurde eine Verbindung entwickelt, die alle leistungssteigernden Eigenschaften, die in Abschnitt 3 erwähnt sind, in sich vereinigt. In **Bild 6.1** ist eine solche Verbindung dargestellt, die in dieser Weise für orientierende Versuche hergestellt und geprüft wurde. Als Verbindungsmittel wurden U-nopul Stahlstifte* 3,6 x 75 verwendet, die nach Herstellerangaben 6 - 8 mm dicke Stahlbleche aus St 37-2 mit einem Drucklufttreibgerät durchnageln.

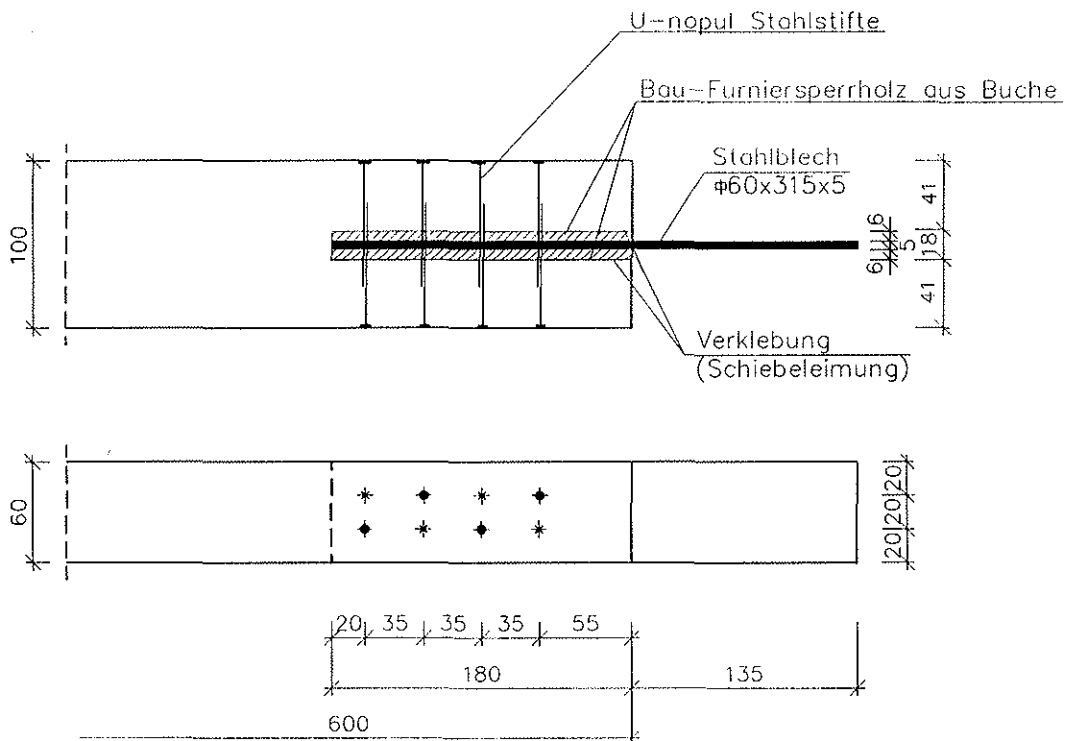


Bild 6.1: BFU-BU verstärkte Stahlblech-Holz-Verbindung mit nicht vorgebohrten Stahlblechen und U-nopul-Stahlstiften

* Produktbezeichnung des Herstellers aerosmith GmbH, Dachau

Nach EN 409 wurde das Fließmoment dieser Stahlstifte ermittelt. Es ergab sich im Mittel zu 17,16 Nm, dies entspricht einer rechnerischen Fließspannung von 2206 N/mm^2 , wobei bei einem Biegewinkel von 45° die Stahlstifte noch nicht brachen. Durch Aufleimen von 6 mm dicken Bau-Furniersperrholzplatten aus Buche im Bereich der Scherflächen konnte die Spaltgefahr des verwendeten Brettschichtholzes erheblich reduziert und andererseits die hohe Lochleibungsfestigkeit des Holzwerkstoffs ausgenutzt werden. Für die Befestigung der Verstärkung wurde der Polyurethan-Klebstoff Plastic-Mastic 573.8 der Firma Klebchemie, Weingarten ausgewählt. Die Verklebung erfolgte durch Einschieben der Holzwerkstoffplatten in den Holzschlitz, wobei sie durch Einstecken der Stahlbleche fixiert wurden. Bei dem Versuchskörper nach **Bild 6.1** wurden die Abstände der Verbindungsmittel entsprechend DIN 1052 Teil 2 bzw. ENV 1995-1-1 für Holz-Holz-Verbindungen gewählt.

Versuch A	$a_1 = 35 \text{ mm (9,7d)}$	$a_2 = 20 \text{ mm (5,6d)}$
	$a_{3,t} = 55 \text{ mm (15,3d)}$	$a_4 = 20 \text{ mm (5,6d)}$

In einem weiteren Versuch wurden die Verbindungsmittelabstände erheblich reduziert.

Versuch B	$a_1 = 20 \text{ mm (5,6d)}$	$a_2 = 20 \text{ mm (5,6d)}$
	$a_{3,t} = 35 \text{ mm (9,7d)}$	$a_4 = 20 \text{ mm (5,6d)}$

Die Zuverlässigkeit des Eintreibvorganges erfüllte noch nicht die Erwartungen, da 5 von 24 Stahlstiften die Stahlbleche nicht durchdrangen, wie die Röntgenaufnahmen in **Bild 6.2 und 6.3** demonstrieren, und somit die Verbindungsmittel nur einschnittig wirken konnten.

Gegebenenfalls sind kürzere Stahlstifte zu verwenden und/oder geringfügige Modifikationen am Eintreibgerät vorzunehmen, um eine ausreichende Zuverlässigkeit zu gewährleisten. Trotz dieses Umstandes waren die wenigen Ergebnisse aus den Zugscherversuchen nach DIN EN 26891 vielversprechend.

Bild 6.2: Röntgenaufnahme des Versuchskörpers A nach dem Versuch

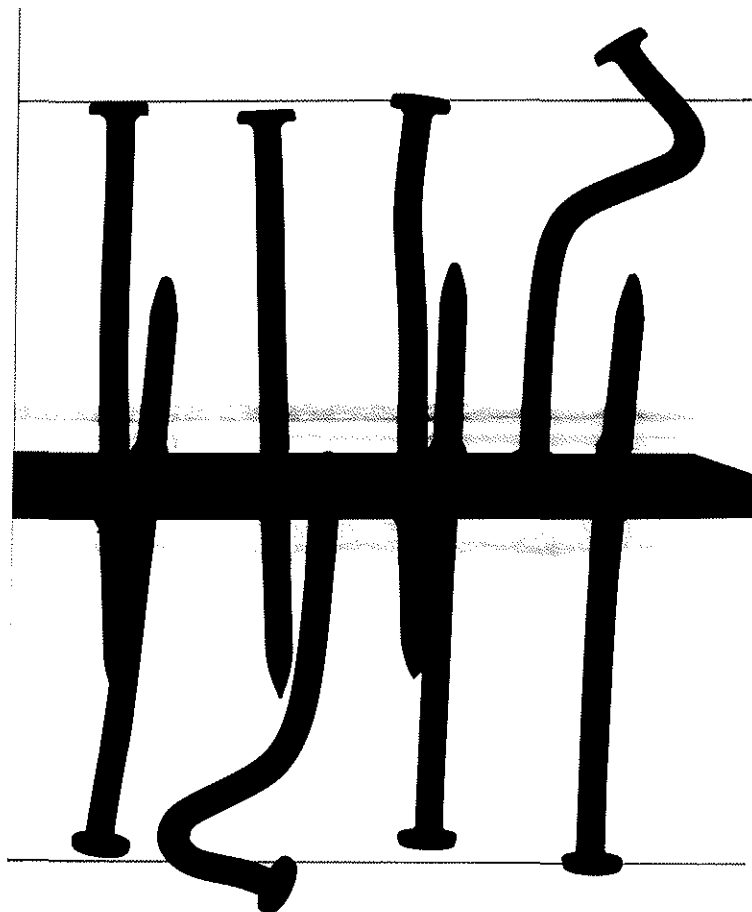


Bild 6.3: Röntgenaufnahme des Versuchskörpers B nach dem Versuch

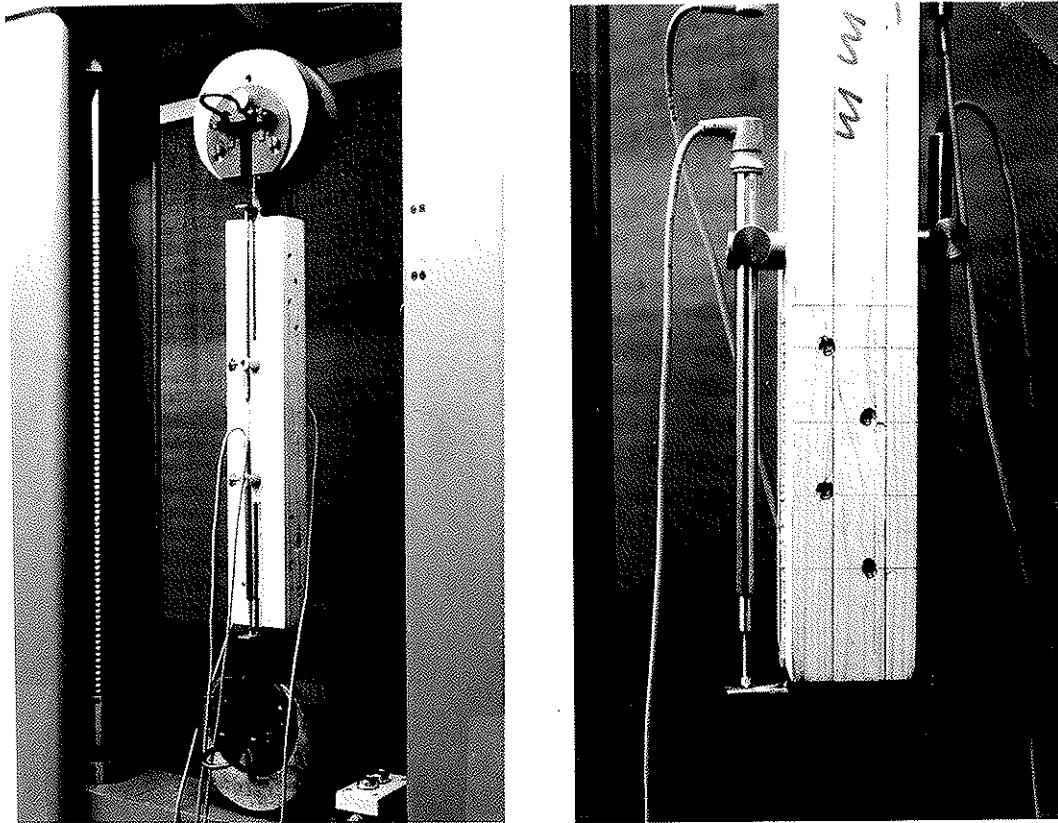


Bild 6.4: Versuchsaufbau mit der Meßeinrichtung und die Nagelanordnung.

Bild 6.4 zeigt den Versuchsaufbau mit der Meßeinrichtung und die Nagelanordnung. Für Versuch A und B wurden die Kraft-Verschiebungsdiagramme (**Bild 6.5 und 6.6**) aufgezeichnet und die Bruchlasten ermittelt.

Das Hilti Bolzenschubwerkzeug scheint ebenfalls geeignet zu sein, Nägeln durch Holz in dickere Stahlbleche ohne Vorbohren einzutreiben. Bei diesem Gerät wird die Energie einer Treibladung durch einen Kolben kontrolliert. Durch das Abstoppen des Kolbens im Gerät wird der Eintreibvorgang beendet, so daß Durchschüsse nicht möglich sind. Jedoch muß die Stärke der Treibladung auf den entsprechenden Anwendungsfall abgestimmt sein. Die starke Erwärmung beim Eintreiben führt zur Verschweißung des Nagels mit dem Stahlblech.

Bild 6.7 zeigt zum Vergleich den mit einem Druckluft-eintreibgerät eingebrachten U-nopul-Stahlstift 3,6 x 75 und den mit dem Bolzenschubwerkzeug eingetriebenen Hilti DN-Nagel* 3,7 x 62.

* Produktbezeichnung des Herstellers Hilti Deutschland GmbH, München

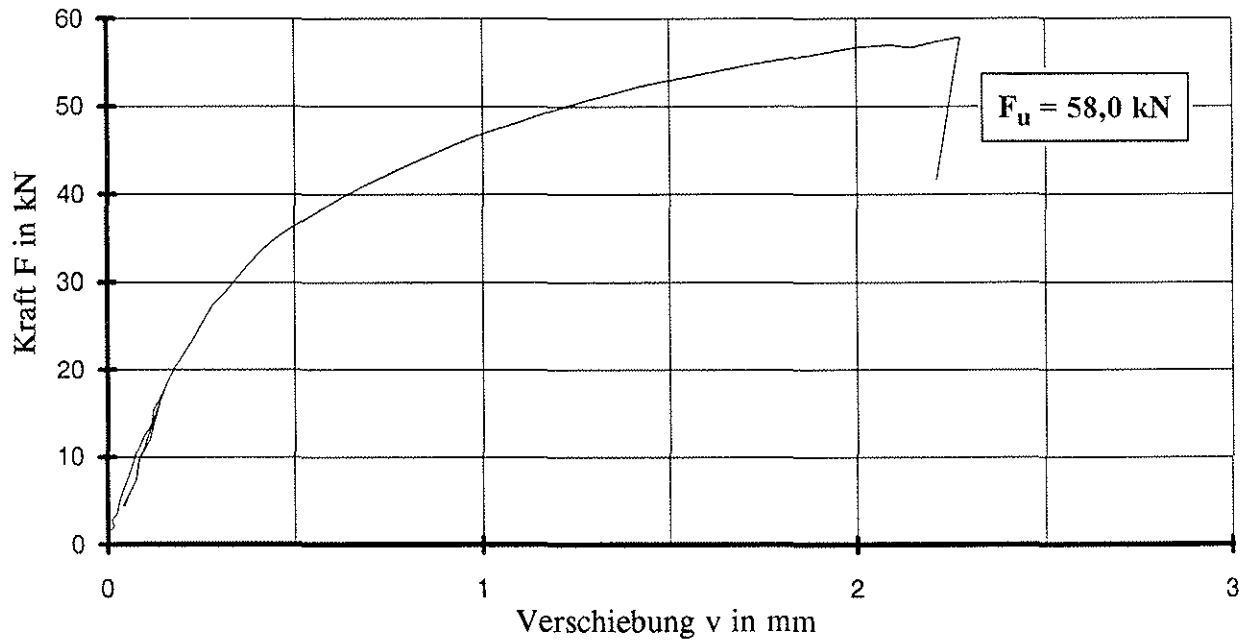


Bild 6.5: Kraft-Verschiebungsdiagramm des Versuches A

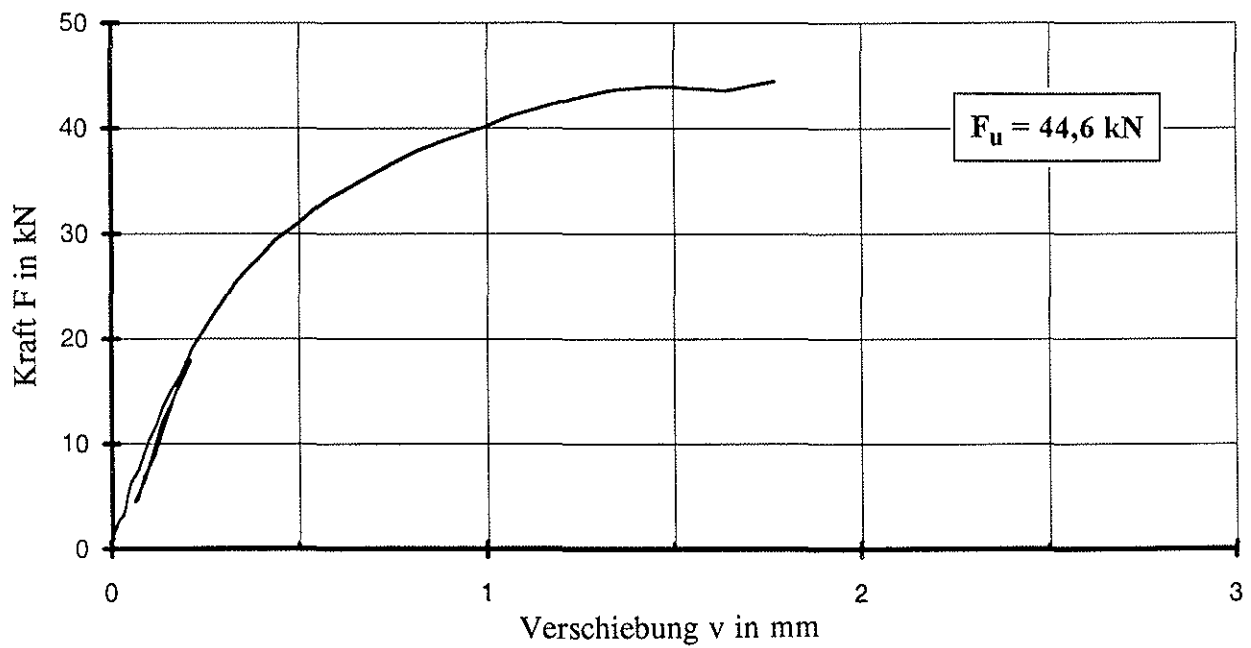


Bild 6.6: Kraft-Verschiebungsdiagramm des Versuches B



(a)

(b)

Bild 6.7: Eingetriebener U-nopul-Stahlstift 3,6 x 75 (a) und Hilti DN-Nagel 3,7 x 62 (b)

Derartige Verbindungen bedürfen einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung. Im Rahmen von Zulassungsversuchen müßten die noch offenen Fragen und Randbedingungen geklärt werden.

Im Folgenden werden die Bruchlasten verschiedener Stahlblech-Holz-Verbindungen mit ähnlichen Dimensionen verglichen, um den Wirkungsgrad der beschriebenen Verbindung zu verdeutlichen.

Verbindung I

Stahlblech-Holz-Nagelverbindung
nach DIN 1052

Nägel nach DIN 1151

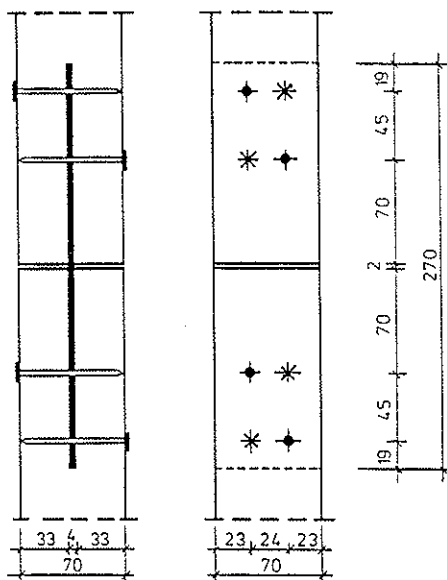
Durchmesser $d = 4,2$ mm

Nagellänge $l = 70$ mm

Fließmoment $M_y = 8,02$ Nm

Nagellöcher vorgebohrt

Stahlblechdicke $t = 3$ mm
keine Verstärkung



Tragfähigkeit pro Nagel

$$F_{u,n} = 4,16 \text{ kN}$$

Wirkungsgrad: 100 %

Verbindung II

BFU-BU verstärkte Stahlblech-Holz-
Verbindung mit U-nopul Stahlstiften

U-nopul Stahlstifte

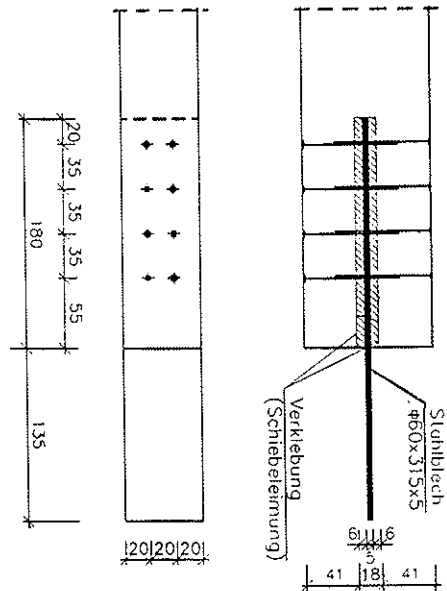
Durchmesser $d = 3,6$ mm

Stiftlänge $l = 75$ mm

Fließmoment $M_y = 17,16$ Nm

Stahlstifte ohne Vorbohren pneu-
matisch eingetrieben

Stahlblechdicke $t = 5$ mm
Verstärkung aus BFU-BU



Tragfähigkeit pro Stahlstift

$$F_{u,n} = 7,25 \text{ kN}$$

Wirkungsgrad: 175 %

Verbindung III

Stahlblech-Holz-Nagelverbindung
nach Zulassung Z-9.1-212

PASTHO - Nägel

Durchmesser $d = 3,8 \text{ mm}$

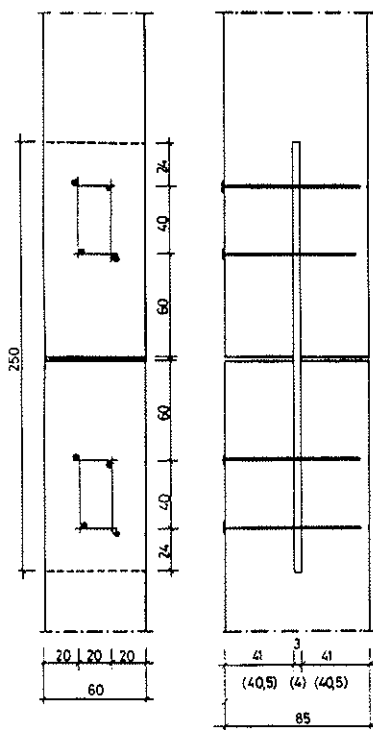
Nagellänge $l = 80 \text{ mm}$

Fließmoment $M_y = 19,62 \text{ Nm}$

Nägel ohne Vorbohren pneumatisch
eingetrieben

Stahlblechdicke $t = 3 \text{ mm}$

keine Verstärkung



Alle Maße in mm

Tragfähigkeit pro Nagel

$$F_{u,n} = 4,64 \text{ kN}$$

Wirkungsgrad: 112 %

Verbindung IV

Stahlblech-Holz-Verbindung mit
selbstbohrenden Schrauben

EJOT - Bohrschrauben JT2 - 4 - 5,5

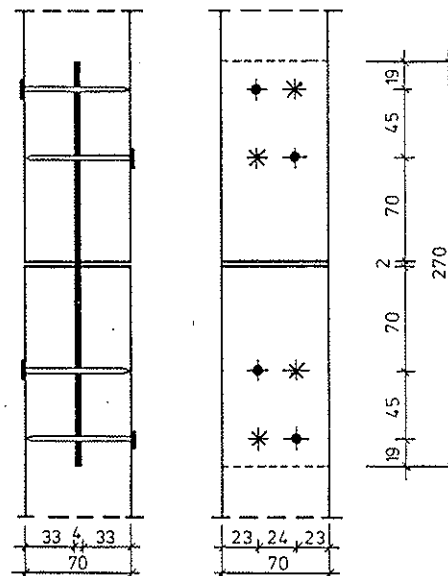
Nenn Durchmesser $d = 4,5 \text{ mm}$

Schraubenslänge $l = 70 \text{ mm}$

Einseitiges Vorbohren des Holzes
mit $d_L = 4 \text{ mm}$

Stahlblechdicke $t = 3 \text{ mm}$

keine Verstärkung



Tragfähigkeit pro Bohrschraube

$$F_{u,n} = 4,78 \text{ kN}$$

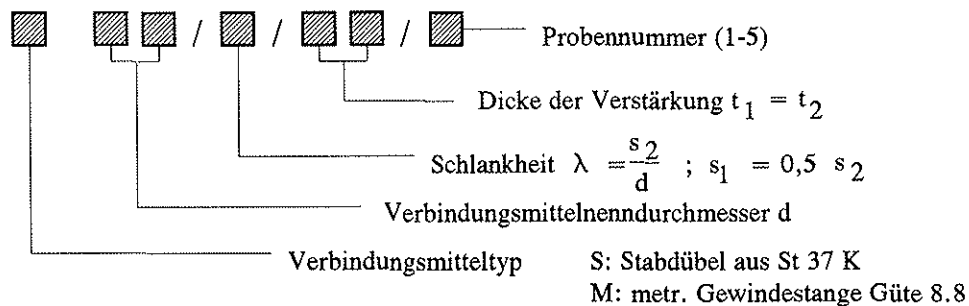
Wirkungsgrad: 115 %

6.2 Buche-Furniersperrholz verstärkte Holz-Holz-Verbindung mit Stabdübeln und eingedrehten Gewindestangen

6.2.1 Versuchsprogramm und Versuchsdurchführung

Bei Holz-Holz-Verbindungen können nicht so viele Möglichkeiten zur Leistungssteigerung ausgeschöpft werden. Bei früheren Versuchen mit Gewindestangen als Verbindungsmittel (siehe EHLBECK, WERNER 1992) war bei größeren Schlankheiten ein Einhängeneffekt zu beobachten, der zusätzlich zu den aufgeklebten Bau-Furniersperrholzplatten aus Buche (BFU-BU) zur Erhöhung der Traglast beitragen kann.

Zur Bestimmung der Traglasten unter Berücksichtigung verschiedener Einflußparameter und zur Überprüfung des Rechenmodells wurde das in **Tabelle 6.1** angegebene Versuchsprogramm durchgeführt. Dabei wurden der Verbindungsmitteltyp und -durchmesser, die Schlankheit sowie die Dicke der Verstärkung variiert. Für die Versuchsbezeichnung wurde folgendes Schema gewählt:



Bei der Herstellung der Versuchskörper (**Bild 6.8**) wurde ausschließlich Brettschichtholz aus Nadelholz verwendet, wobei die Verbindungsmittel immer in eine Brettlamelle eingebracht wurden. Das Brettschichtholz stammt aus mehreren Lieferungen eines deutschen Holzleimbaubetriebes. Die Rohdichte jeder Brettlamelle, in der sich Verbindungsmittel befanden, wurde an Endabschnitten durch Messen und Wiegen bestimmt. Der Mittelwert der Rohdichte im Normalklima 20/65 betrug 443 kg/m^3 , die Standardabweichung 53 kg/m^3 . Das nichtparametrische 5%-Fraktile ergab sich zu 365 kg/m^3 . Mit Hilfe der Rohdichte wurde die Lochleibungsfestigkeit der Hölzer abgeschätzt. Die Auswahl des Holzes für die Probekörper erfolgte nicht nach DIN EN 28970, da bei der weiteren

Auswertung die Rohdichte berücksichtigt wurde. Zur Verstärkung wurde Bau-Furniersperrholz aus Buche nach DIN 68705 Teil 3 ($t = 6 \text{ mm}$) und Teil 5 ($t = 10$ und 15 mm) mit Resorcinharzleim auf die Seiten- und Mittelhölzer ($t_1 = t_2$) aufgeklebt.

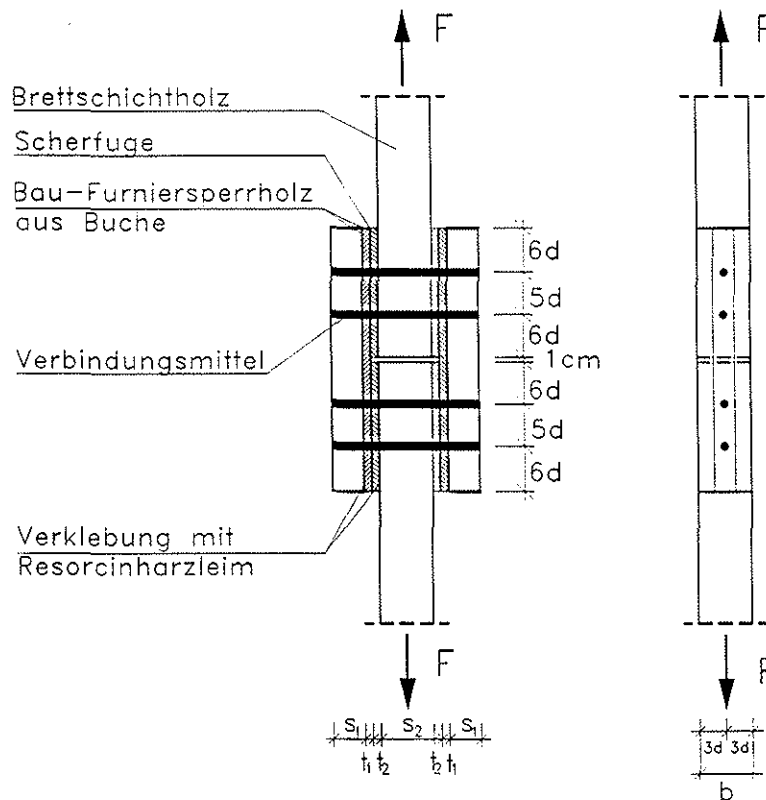


Bild 6.8: Zugscherversuchskörper

Als Schlankheit λ wird das Verhältnis Mittelholzdicke zu Verbindungsmitteldurchmesser bezeichnet. Pro Anschluß wurden zwei Verbindungsmittel mit den Mindestabständen nach DIN 1052 Teil 2 angeordnet. Das Verhältnis Seitenholzdicke s_1 zu Mittelholzdicke s_2 war bei allen Versuchen konstant ($s_1/s_2 = 0,5$). Die Löcher wurden für die Stabdübel mit dem Nenndurchmesser und für die Gewindestangen mit etwa dem Flankendurchmesser gebohrt. Das Eintreiben der Stabdübel erfolgte mit dem Hammer, dagegen wurden die Gewindestangen mit einem Schlagschrauber eingedreht. Die Lagerung aller Hölzer und Holzwerkstoffe zur Klimatisierung und die Durchführung der Versuche geschah im Prüflabor bei Normalklima DIN 50014 - 20/65-2. Die Versuchskörper wurden auf Zug in Faserrichtung der Hölzer und der Deckfurniere der Holzwerkstoffe belastet. Die Durchführung und Auswertung der Versuche erfolgte nach DIN EN 26891 : 1991.

Tabelle 6.1: Versuchsprogramm
Buche-Furniersperrholz verstärkte Holz-Holz-Verbindungen
mit Stabdübeln und Gewindestangen (80 Versuche)

Nenndurchmesser d (mm)	Stabdübel aus blankem Rundstahl St 37 K			
	$\lambda = 2$	$\lambda = 4$	$\lambda = 6$	$\lambda = 8$
8		S 8/4/6/1+5	S 8/6/6/1+5	S 8/8/6/1+5
16	S 16/2/6/1+5	S 16/4/6/1+5	S 16/6/6/1+5 S 16/6/10/1+5 S 16/6/15/1+5	
24		S 24/4/10/1+5	S 24/6/10/1+5	
	metrische Gewindestangen der Güte 8.8			
M 8			M 8/6/6/1+5	M 8/8/6/1+5
M12		M 12/4/6/1+5	M 12/6/6/1+5	M 12/8/6/1+5
M20			M 20/6/10/1+5	

Bild 6.9 zeigt den Versuchsaufbau für die Zugscherversuche. Für die Messung der Verschiebungen wurden induktive Wegaufnehmer verwendet. Die Meßwerterfassung erfolgte mit einer rechnergestützten Umschaltanlage (UPH 3200). Zur Auswertung der Meßdaten wurde ein Auswertungsprogramm benutzt, weiterhin wurde zur Darstellung der Versuchsergebnisse in graphischer Form ein spezielles EDV - Programm verwendet.

Die Versuche wurden mit 1 mm/min weggesteuert gefahren. Die Zugscherkörper wurden mittels Universalprüfmaschinen mit einer Maximalprüfkraft von 100 kN bzw. 250 kN auf Zug belastet

6.2.2 Ergebnisse der Zugscherversuche

Die Last-Verschiebungsdiagramme aller durchgeführten Zugscherversuche mit Stabdübeln sind in **Anlage 12 - 21**, die der mit Gewindestangen in **Anlage 22 - 27** dargestellt. In den Tabellen der **Anlagen 28 - 33** sind die aufgenommenen

Bild 6.9: Zugscherversuchskörper in der Prüfmaschine

Höchstlast F_u pro Verbindungsmittel, die Einzelverschiebungen und die daraus errechneten Verschiebungsmoduln angegeben. Die Verschiebungswerte bzw. Verschiebungsmoduln wurden nach DIN EN 26891 : 1991 berechnet.

Es bedeuten:

$$\text{Anfangsverschiebung} \quad v_i = v_{04} \quad (6.1)$$

$$\text{modifizierte Anfangsverschiebung} \quad v_{i,\text{mod}} = \frac{4}{3} \cdot (v_{04} - v_{01}) \quad (6.2)$$

$$\text{bleibende Anfangsverschiebung} \quad v_s = v_i - v_{i,\text{mod}} \quad (6.3)$$

$$\text{elastische Verschiebung} \quad v_e = \frac{2}{3} \cdot (v_{14} + v_{24} - v_{11} - v_{21}) \quad (6.4)$$

$$\text{mod. Verschiebung bei } 0,6 \cdot F_{\text{max}} \quad v_{06,\text{mod}} = v_{26} - v_{24} + v_{i,\text{mod}} \quad (6.5)$$

$$\text{mod. Verschiebung bei } 0,8 \cdot F_{\text{max}} \quad v_{08,\text{mod}} = v_{28} - v_{24} + v_{i,\text{mod}} \quad (6.6)$$

$$\text{Anfangs- Verschiebungsmodul} \quad k_i = \frac{0,4 \cdot F_{\text{est}}}{v_i} \quad (6.7)$$

$$\text{Verschiebungsmodul} \quad k_s = \frac{0,4 \cdot F_{\text{est}}}{v_{i,\text{mod}}} \quad (6.8)$$

v_{01} , v_{11} , v_{04} , v_{14} , v_{24} , v_{26} und v_{28} sind Verschiebungen bei in DIN EN 26891 definierten Lastpunkten, F_{max} die Höchstlast der Verbindung und F_{est} die geschätzte Höchstlast. Die **Bilder 6.10 und 6.11** zeigen aufgetrennte Versuchskörper der Schlankheit 2 und 8

In **Tabelle 6.2** sind die wichtigsten Ergebnisse zusammengestellt. In dieser Tabelle sind auch die auf rechnerischem Wege ermittelten Tragfähigkeiten den Versuchshöchstlasten gegenübergestellt. Zur Abschätzung der Eingangsdaten für das Rechenmodell wurden die in Abschnitt 4 angegebenen Beziehungen verwendet. Hierbei fehlen jedoch noch Angaben über die Haftfestigkeit der Gewindestangen in den Bau-Furniersperrholzplatten aus Buche in Abhängigkeit vom Durchmesser des Verbindungsmittels. Diese Abhängigkeit wurde analog zu Gl. 4.13 wie folgt abgeschätzt:

$$\tau_h = \text{const.} \cdot \frac{1}{\sqrt{d}} \quad (6.9)$$

Auch wird die Haftfestigkeit der Gewindestange im Holz durch das Aufleimen der Holzwerkstoffplatte infolge der Querbehinderung beeinflusst. Bis statistisch abgesicherte Versuchsergebnisse vorliegen, wird eine um 25% größere Haftfestigkeit als nach Gl. 4.13 angenommen. In **Bild 6.12** ist ein aufgetrennter Versuchskörper mit Gewindestangen dargestellt. Die Gewindegänge im Holz wurden kaum ausgeraspelt.

Die Gegenüberstellung zeigt eine gute Übereinstimmung der Rechen- und Versuchsergebnisse. Ein Aufspalten der Versuchskörper wurde nur bei sehr dünnen Hölzern (Schlankheit $\lambda = 2$ und vereinzelt bei $\lambda = 4$) beobachtet. Die Annahme im Rechenmodell, daß im baupraktischen Bereich kein Spaltversagen bei Verbindungen mit verstärkten Anschlußbereichen auftritt, ist somit gerechtfertigt. Bei Verbindungen mit Gewindestangen ist die Versuchshöchstlast im Mittel etwa 5% höher als die rechnerische Tragfähigkeit (siehe Tabelle 6.2). Durch die bessere Haftung dieser Verbindungsmittel lösen sich die Laschen bei einer Zug-scherbelastung weniger ab, so daß größere Reibungskräfte im Kurzzeitversuch zwischen Seitenhölzer und Mittelholz wirken, die aber bewußt im Rechenmodell

nicht berücksichtigt wurden.

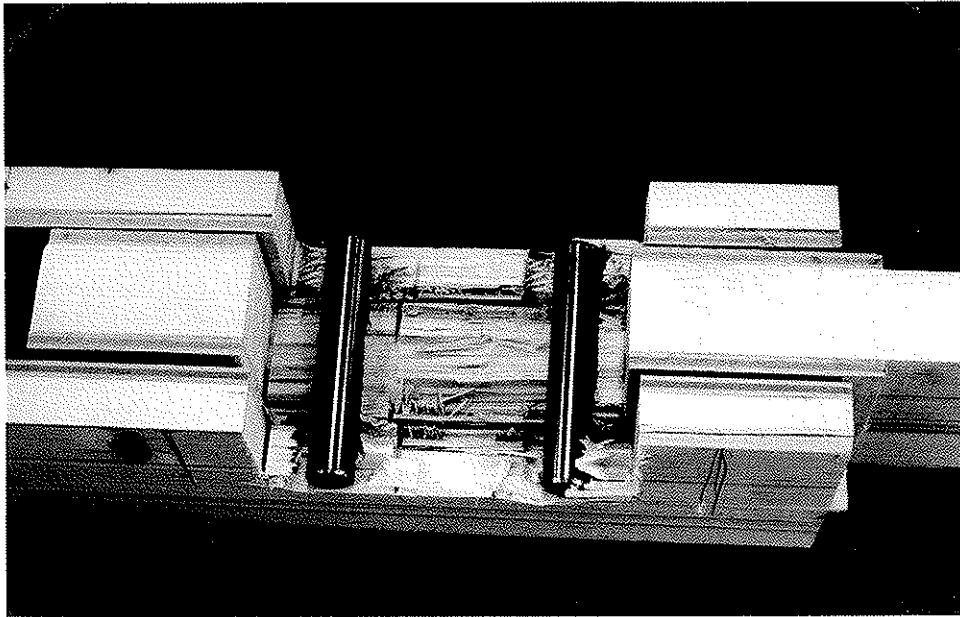


Bild 6.10: Aufgetrennter Buche-Furniersperrholz verstärkter Versuchskörper (Schlankheit $\lambda = 2$)

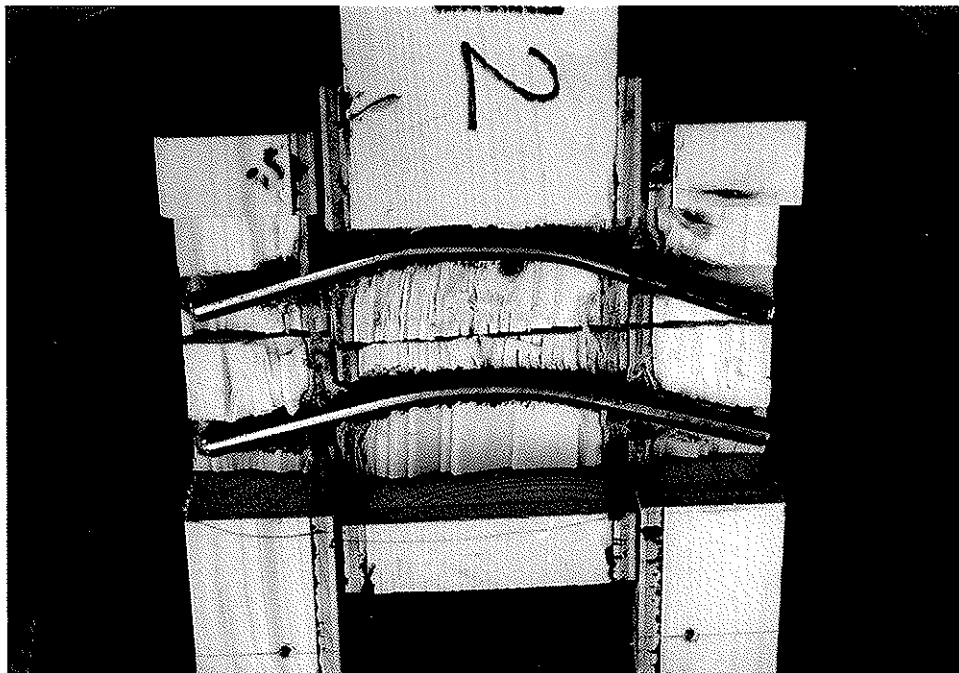


Bild 6.11: Aufgetrennter Buche-Furniersperrholz verstärkter Versuchskörper (Schlankheit $\lambda = 8$)

Tabelle 6.2: Versuchsergebnisse und Gegenüberstellung der Versuchshöchstlast F_u je Verbindungsmittel mit der rechnerischen Tragfähigkeit R_u
Mittelwerte der Zugscherversuche mit Buche-Furniersperrholz verstärkten Holz-Holz-Verbindungen

Versuchsreihe	Dicke der Verstärkung t (mm)	Nenn-durchmesser d (mm)	Schlankheit λ	Mittelwert Höchstlast F_u (kN)	rechn. Traglast R_u (kN)	Ver-schiebung bei F_u v_{spalt} (mm)	Ver-schiebung bei R_u max v (mm)	Verhältnis $\frac{F_u}{R_u}$
Verbindungsmittel: Stabdübel aus Rundstahl St 37 K								
S 8/4/6	6	8	4	10,4	10,9	7,6	15,0	0,95
S 8/6/6	6	8	6	12,6	12,5	10,8	15,0	1,00
S 8/8/6	6	8	8	16,3	14,6	14,5	15,0	1,12
S 16/2/6	6	16	2	25,6	27,0	5,7	5,0	0,95
S 16/4/6	6	16	4	34,1	36,3	14,3	15,0	0,94
S 16/6/6	6	16	6	38,7	39,2	15,0	15,0	0,99
S 16/6/10	10	16	6	41,8	43,2	14,8	15,0	0,97
S 16/6/15	15	16	6	51,5	49,1	15,0	15,0	1,05
S 24/4/10	10	24	4	68,8	72,5	13,6	15,0	0,95
S 24/6/10	10	24	6	80,7	79,1	13,3	15,0	1,02
Verbindungsmittel: metrische Gewindestangen der Güte 8.8								
M 8/6/6	6	8	6	15,2	14,5	15,0	15,0	1,05
M 8/8/6	6	8	8	17,9	15,8	15,0	15,0	1,13
M 12/4/6	6	12	4	25,4	25,4	14,3	15,0	1,00
M 12/6/6	6	12	6	28,5	26,7	15,0	15,0	1,06
M 12/8/6	6	12	8	31,7	30,3	15,0	15,0	1,05
M 20/6/10	10	20	6	62,9	62,8	14,1	15,0	1,00

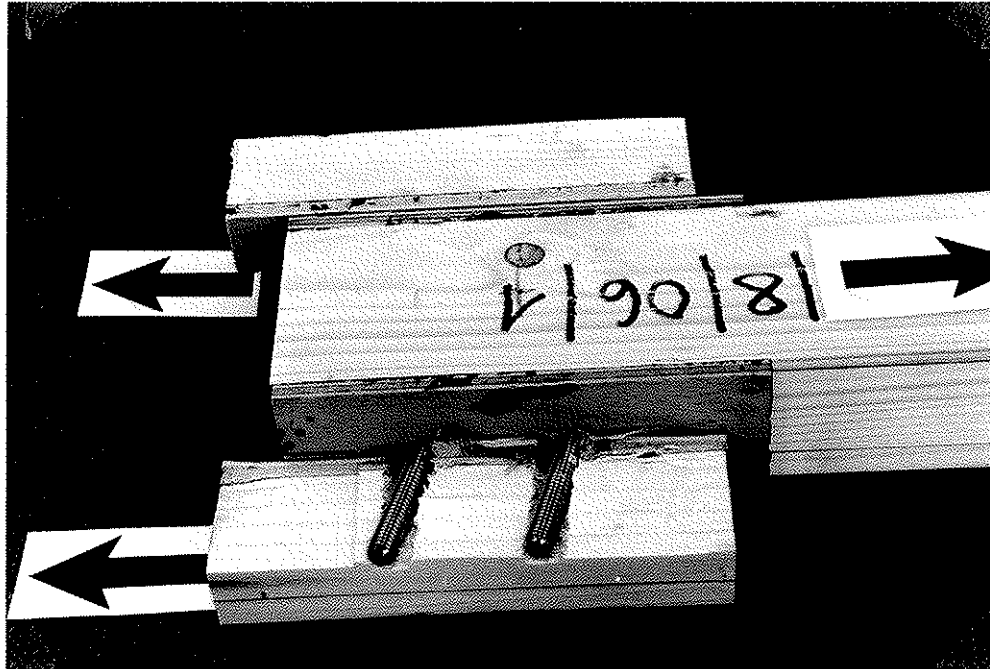


Bild 6.12: Aufgetrennter Buche-Furniersperrholz verstärkter Versuchskörper mit Gewindestangen M8

6.2.3 Ergebnisse der Simulationsrechnung

Zur Ermittlung der Traglasten von mit Bau-Furniersperrholz aus Buche verstärkten Verbindungen wurden umfangreiche Simulationsrechnungen durchgeführt, deren Auswertung die charakteristische Tragfähigkeit in Abhängigkeit von der Verbindungsart und der Anschlußgeometrie liefern. Im Entwurf zu EUROCODE 5 (ENV 1995-1-1) ist die charakteristische Tragfähigkeit als 5%-Fraktil der Grundgesamtheit definiert und gilt für eine Einwirkungsdauer von 10-15 Minuten bei einer Temperatur von 20°C und einer relativen Luftfeuchte von 65%. Deshalb wird den Hölzern die sich im Normalklima 20/65 einstellende Holzfeuchte von etwa 12 % zugewiesen.

Im folgenden wird die beschriebene Verbindungsart mit Fichtenholz unter einer Belastung in Faserrichtung untersucht, wobei die Traglast eines Verbindungsmittels pro Scherfläche betrachtet wird. Dieser Wert dient als Grundlage für die Bemessung von Verbindungen.

Die Berücksichtigung der streuenden Einflußgrößen erfolgt nach Art der Monte-Carlo-Simulation, wobei die Autokorrelation einzelner Kennwerte bei der Betrachtung mit einbezogen wird.

Die Aufgabe des von WERNER 1993 entwickelten Simulationsprogramms "XDATSIM" ist es, eine Verbindung mit allen erforderlichen Einflußgrößen zu simulieren, angefangen bei den Abmessungen und den Rohdichtewerten der einzelnen Hölzer sowie dem Biege- und Schubwiderstand des Verbindungsmittels bis hin zu den Arbeitslinien der Hölzer unter Lochleibungsbeanspruchung und deren Spaltbruchzähigkeiten. Das stochastische Modell umfaßt die statistische Verteilung der Einflußgrößen, ihre Korrelationsstruktur und deren Auswirkung auf den Aufbau der Verbindung. Der Durchmesser des Verbindungsmittels und das Verhältnis Elastizitätsmodul zu Schubmodul werden als deterministische Größen betrachtet.

Zur Simulation der vielfach korrelierten Kennwerte der Arbeitslinie eines Holzes unter Lochleibungsbeanspruchung wird ein Verfahren verwendet, das auf der Transformation der multivariaten Normalverteilung basiert. Dieses Verfahren wurde schon von TAYLOR, BENDER 1988 und BLAß 1991a,b zur Simulation von Holzeigenschaften erfolgreich benutzt, da es sowohl die Wahrscheinlichkeitsverteilung jeder Eigenschaft als auch die Korrelation der Eigenschaften untereinander näherungsweise erhält. Die Generierung dieser Zufallszahlen wurde mit der IMSL-Prozedur RNMVN durchgeführt. Dabei muß zuerst die Korrelationsmatrix mit Hilfe einer Cholesky-Zerlegung in eine obere Dreiecksmatrix umgewandelt werden. Auf der Rechenanlage des Rechenzentrums der Universität Karlsruhe steht dazu die Prozedur CHFAC zur Verfügung. Die so generierten Zufallszahlen sind normalverteilt mit dem Mittelwert 0. Daraus lassen sich für die betreffende Kenngröße mit dem bekannten Mittelwert und der Standardabweichung zufällige Werte bestimmen. Für untereinander nicht korrelierte Einflußparameter, wie Rohdichte der Hölzer oder Fließspannung der Verbindungsmittel, werden Zufallsgeneratoren aus der NAG - Bibliothek benutzt, um Werte mit entsprechenden Wahrscheinlichkeitsverteilungen zu erzeugen. Die angenommenen Verteilungsfunktionen und die Korrelationsstrukturen aller benötigten Einflußparameter sind in WERNER 1993 angegeben.

Normalverteilte zufällig erzeugte Eingangsgrößen können Werte annehmen, die physikalisch oder baupraktisch ausgeschlossen sind. Daher müssen für einzelne Parameter sinnvolle Grenzwerte festgelegt werden. Als unterer Grenzwert der Normalrohddichte von Fichtenholz wurde dabei 250 kg/m^3 , als oberer Grenzwert 650 kg/m^3 festgelegt. Der erforderliche Umfang einer Stichprobe wurde durch Versuchsrechnungen bestimmt. Betrachtet man die Änderung des 5%-Fraktils einer Teilstichprobe mit wachsender Stichprobengröße als Maß für die statistische Unsicherheit, so kann die Anzahl der Simulationen abgeschätzt werden. Es wurden gleichartige Verbindungen jeweils 100, 200, 500 und 1000 mal simuliert und aus den berechneten Traglastwerten der nichtparametrische Wert des 5%-Fraktils bestimmt. Dabei haben sich ab einer Spielzahl von 500 das 5%-Fraktile zweier unabhängiger Teilstichproben um weniger als 1% unterschieden. WEHRLI 1970 gibt zur Bestimmung unbekannter Verteilungsfunktionen die erforderliche Spielzahl mit 600 - 740 an. Auf Grund dieser Überlegungen wird die Anzahl der Simulationen für jede Teilstichprobe auf 600 festgelegt.

Zur Bestimmung des 5%-Fraktilwertes der Tragfähigkeit wurden die streuenden Einflußgrößen der in **Bild 6.13** dargestellten Verbindung simuliert und die Traglasten mit Hilfe des Rechenmodells berechnet. In **Bild 6.14** sind die Traglasten in Abhängigkeit von der Schlankheit aufgezeichnet, die für eine Verbindung mit folgenden Kenndaten

Holzart:	Fichte
Verstärkungswerkstoff:	Bau-Furniersperrholz aus Buche
Verbindungsmittel:	Stabdübel aus Rundstahl St 37 K
Durchmesser:	$d = 16 \text{ mm}$
Dicke der Verstärkung:	$t_1 = t_2 = 6 \text{ mm}$
Verhältnis:	$s_1/s_2 = 0,50$

berechnet wurden.

Weitere Ergebnisse der Traglastberechnungen sind in den **Anlagen 34 - 36** angegeben.

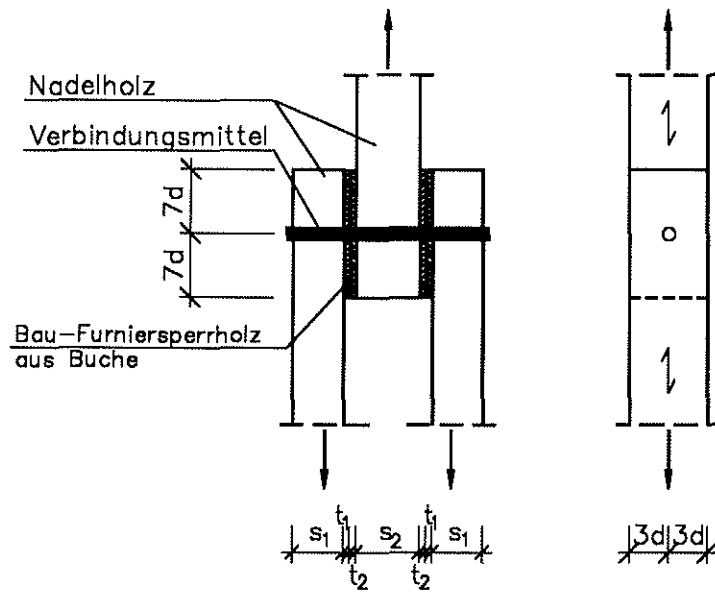


Bild 6.13: Buche-Furniersperrholz verstärkte Holz-Holz-Verbindung mit Stabdübeln

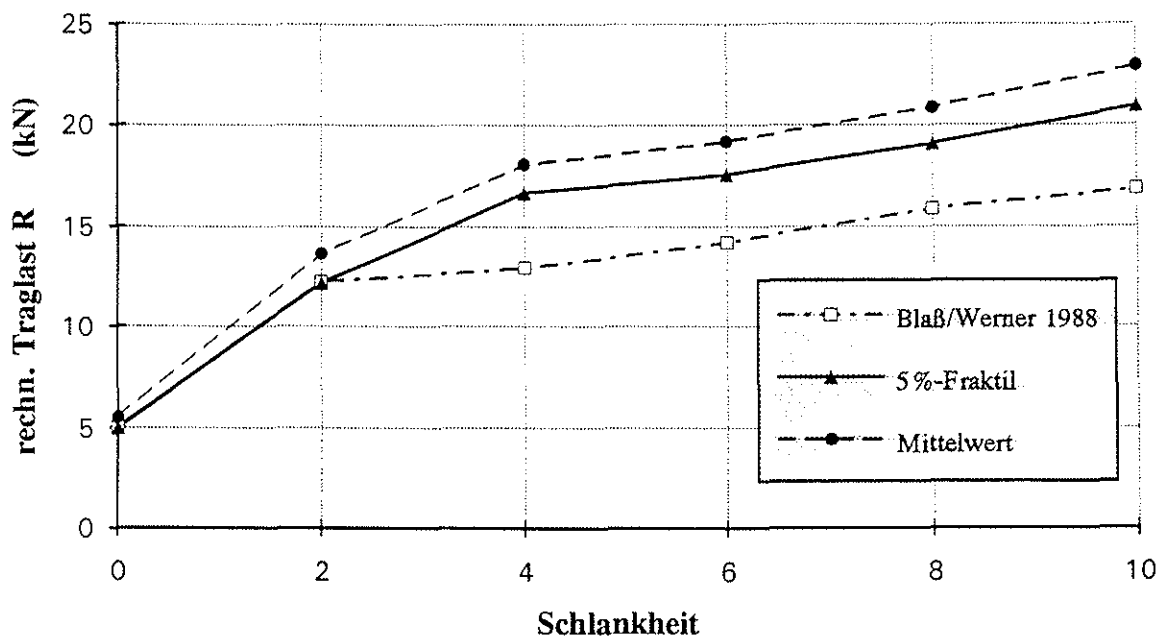


Bild 6.14: Traglast pro Scherfläche eines Stabdübels in Abhängigkeit von der Schlankheit
($d = 16 \text{ mm}$; $s_1/s_2 = 0,50$; $t_1 = t_2 = 6 \text{ mm}$)

BLAß, WERNER 1988 leiteten ausgehend von der Theorie von "Johansen" ein vereinfachtes Rechenmodell für zweischnittige Holz-Holz-Verbindungen mit verstärkten Anschlußbereichen unter der Bedingung her, daß die Dicke und die Lochleibungsfestigkeit des Verstärkungswerkstoffes überall gleich groß sind. Diese Gleichungen entsprechen Gl. 5.3 g-k jedoch ohne den Systemfaktor k_{sys} .

In **Bild 6.14** und den **Anlagen 34 - 36** sind zum Vergleich die charakteristischen Tragfähigkeiten berechnet mit Gl. 5.3 g-k mit $k_{\text{sys}} = 1$ und den folgenden Eingangsgrößen

$$\begin{aligned} f_{h,1,k} &= f_{h,2,k} = 0,09 \cdot \rho_k \cdot (1 - 0,01 \cdot d) && (\text{N/mm}^2) \\ f_{h,t,k} &= (0,79 + 3,8/\sqrt{d}) \cdot 30 && (\text{N/mm}^2) \\ M_{y,k} &= 0,8 \cdot f_{u,k} \cdot d^3/6 && (\text{Nmm}) \\ f_{u,k} &= 440 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

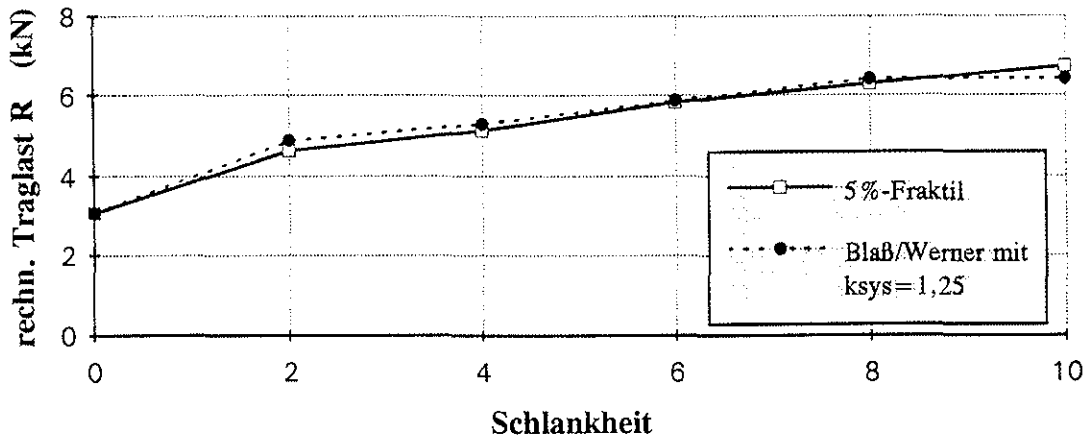
ingezeichnet.

Analog dem Vorgehen im Entwurf zu EUROCODE 5 würde ein Systemfaktor von $k_{\text{sys}} = 1,25$ die 5%-Fraktilwerte der Traglasten, die mit den simulierten Daten berechnet wurden, am besten anpassen. Darin ist auch die geringe Streubreite der Traglasten enthalten. In **Bild 6.15** ist dieser Systemfaktor berücksichtigt.

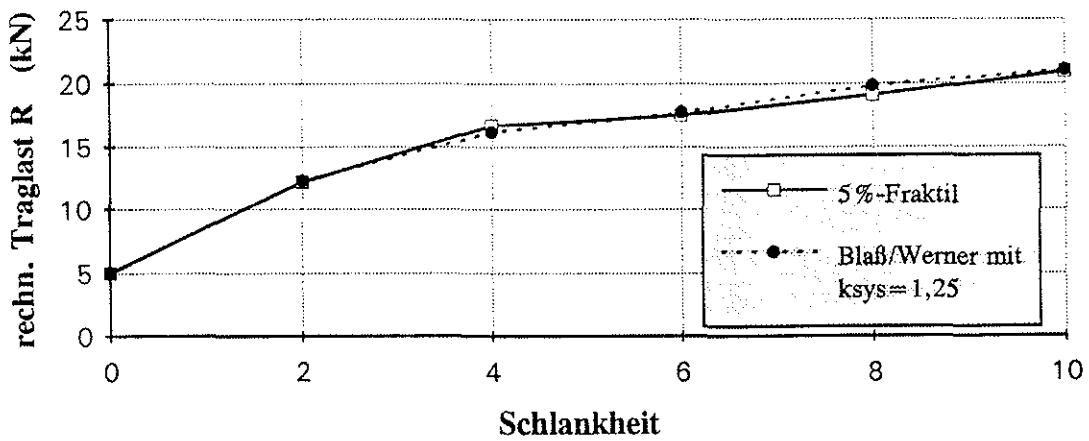
6.3 Verstärkte Stahlblech-Holz-Verbindung mit aufgeschweißten Gewindebolzen

Die Anwendung der Bolzenschweißtechnik zur Herstellung von kraftschlüssigen Verbindungen im Holzbau wurde bereits früher an der Universität Karlsruhe theoretisch betrachtet. Darauf aufbauend wurden erste praktische Schweißversuche von BOUWKAMP et al. 1988 durchgeführt. Üblicherweise ist die Schweißnaht beim Schweißvorgang mittels eines Keramikrings zu schützen. Bei innenliegenden Blechen müßte die Bohrung so groß gestaltet werden, daß der Keramikring problemlos eingeführt werden kann und sich die Bruchstücke nach dem Schweißen leicht wieder entfernen lassen. Die größeren Bohrlöcher müßten nachträglich vergossen werden. Um dies zu vermeiden, wurde von einem namhaften Hersteller*

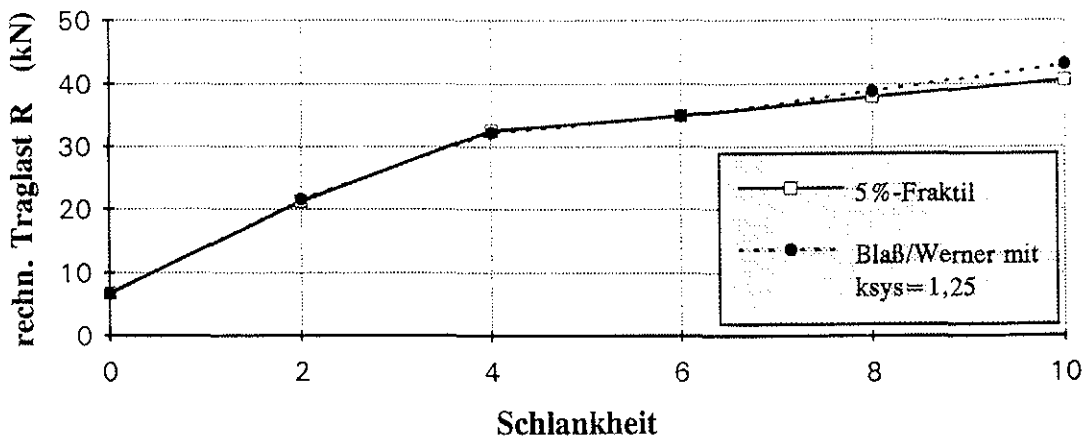
* Bei der Firma Köster & Co. GmbH, Ennepetal möchten wir uns für ihre Bemühungen bedanken.



(Stabdübel $d = 8 \text{ mm}$)



(Stabdübel $d = 16 \text{ mm}$)



(Stabdübel $d = 24 \text{ mm}$)

Bild 6.15: Vergleich der 5%-Fraktilwerte der ermittelten Traglasten mit den Tragfähigkeiten nach Gl. 5.3 g-h mit $k_{sys} = 1,25$
(Stabdübel St 37 K; $s_1/s_2 = 0,5$; Verstärkung BFU-BU $t = 6 \text{ mm}$)

von Bolzenschweißanlagen an dem in **Bild 6.16** dargestellten Versuchskörper Probeschweißungen durchgeführt. Es zeigte sich, daß sich Gewindebolzen ohne Keramikring nur bedingt aufschweißen lassen (siehe **Bild 6.17**). Der Lichtbogen führt zu einer starken Vergasung des Kunstharzpreßholzes. Zusammen mit dem Schutzgas ergibt sich eine Flambildung im Schweißbereich, die keine ausreichende Schweißqualität zuläßt.

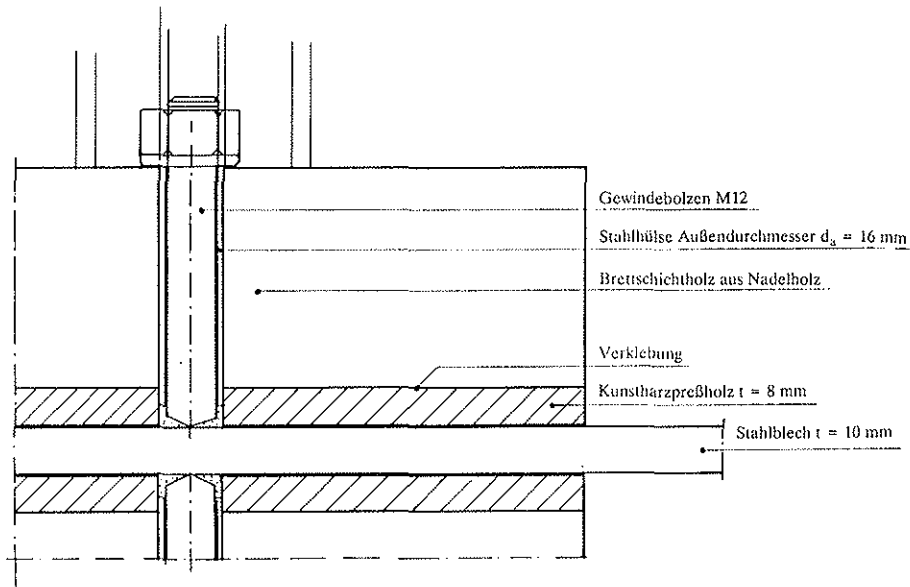


Bild 6.16: Verstärkte Stahlblech-Holz-Verbindung mit aufgeschweißten Gewindebolzen

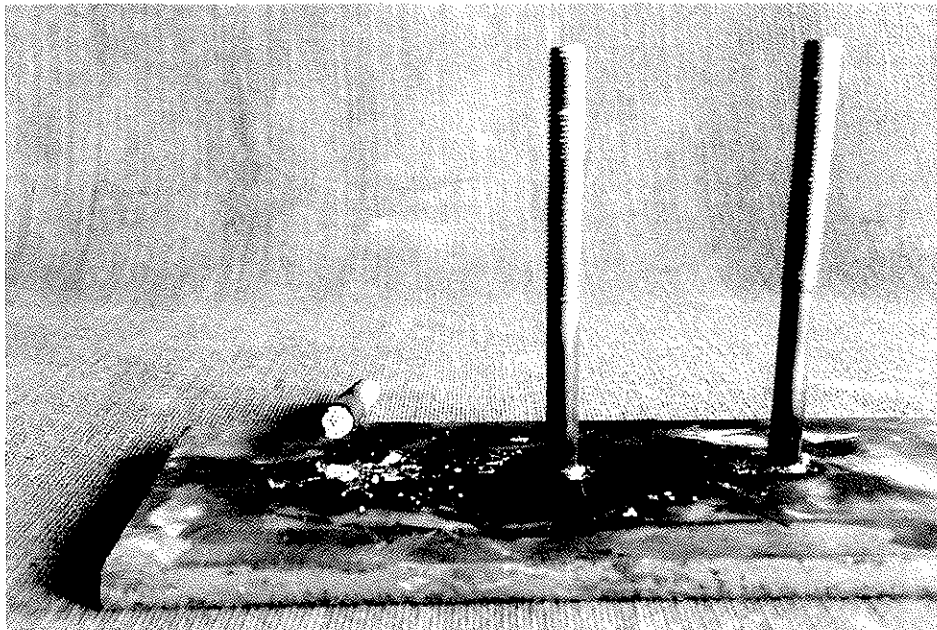
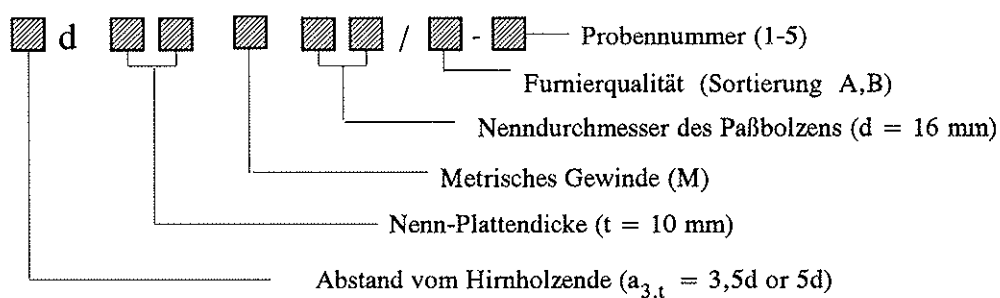


Bild 6.17: Probeschweißung mit nicht ausreichender Schweißqualität

6.4 Preßfurniersperrholz verstärkte Holz-Holz-Verbindung mit Paßbolzen

Um zu zeigen, welches Potential in diesen mit Holzwerkstoffplatten verstärkten Verbindungen steckt, wurden Preßfurniersperrholz verstärkte Holz-Holz-Verbindungen mit Paßbolzen der Güte 8.8 nach DIN ISO 898 Teil 1 getestet. Neben den hochfesten Materialeigenschaften des Preßfurniersperrholzes und des Paßbolzens wirken hier zusätzliche Seilkräfte infolge der Endverankerung des Verbindungsmittels durch Kopf und Mutter, die das Einziehen des verbogenen Bolzens im Traglastzustand behindert.

Es wurden zwei Versuchsreihen mit jeweils 5 Einzelversuchen durchgeführt, wobei der Abstand des Verbindungsmittels vom Hirnholzende variiert wurde. Für die Versuchsbezeichnung wurde folgendes Schema gewählt:



Bei der Herstellung der Versuchskörper (**Bild 6.18**) wurde ausschließlich Brett-schichtholz aus Nadelholz verwendet. Die Rohdichte der Brett lamellen, in der sich Verbindungsmittel befanden, wurde an Endabschnitten durch Messen und Wiegen bestimmt. Der Mittelwert der Rohdichte im Normalklima 20/65 betrug 410 kg/m^3 , die Standardabweichung 32 kg/m^3 . Die Auswahl des Holzes für die Probekörper erfolgte nach DIN EN 28970 Verfahren 1, wobei eine geforderte charakteristische Rohdichte von 380 kg/m^3 zugrunde gelegt wurde. 33% aller Hölzer hatten eine Rohdichte unter diesem geforderten Wert.

Zur Verstärkung wurde Preßfurniersperrholz aus Buche der Firma Lignostone, Ter Apel aus den Niederlanden mit Resorcinharzleim auf die Seiten- und Mittelhölzer aufgeklebt. Pro Anschluß wurde ein Verbindungsmittel angeordnet. Die Löcher für die Paßbolzen wurden mit dem Nenn Durchmesser gebohrt. Die Bolzen wurden mit einem Drehmoment von 110-150 Nm angezogen. Die Lagerung aller Hölzer und Holzwerkstoffe zur Klimatisierung und die Durchführung der Versuche geschah im

Prüflabor bei Normalklima DIN 50014 - 20/65-2. Die Versuchskörper wurden auf Zug in Faserrichtung der Hölzer belastet. Die Durchführung und Auswertung der Versuche erfolgte nach DIN EN 26891 : 1991. **Bild 6.19** zeigt den Versuchsaufbau für die Zugscherversuche. Für die Messung der Verschiebungen wurden induktive Wegaufnehmer verwendet.

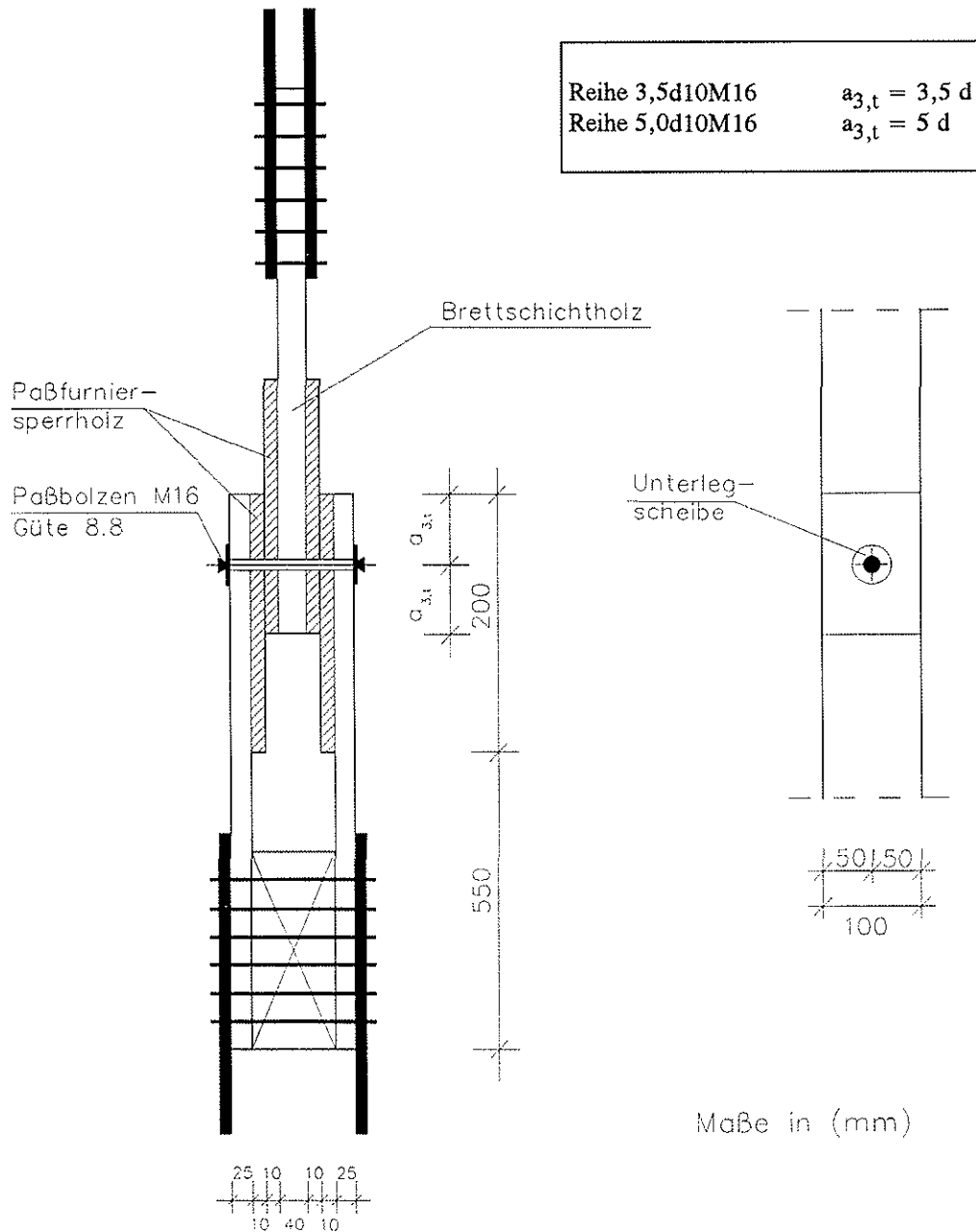


Bild 6.18: Geprüfter Zugscherversuchskörper

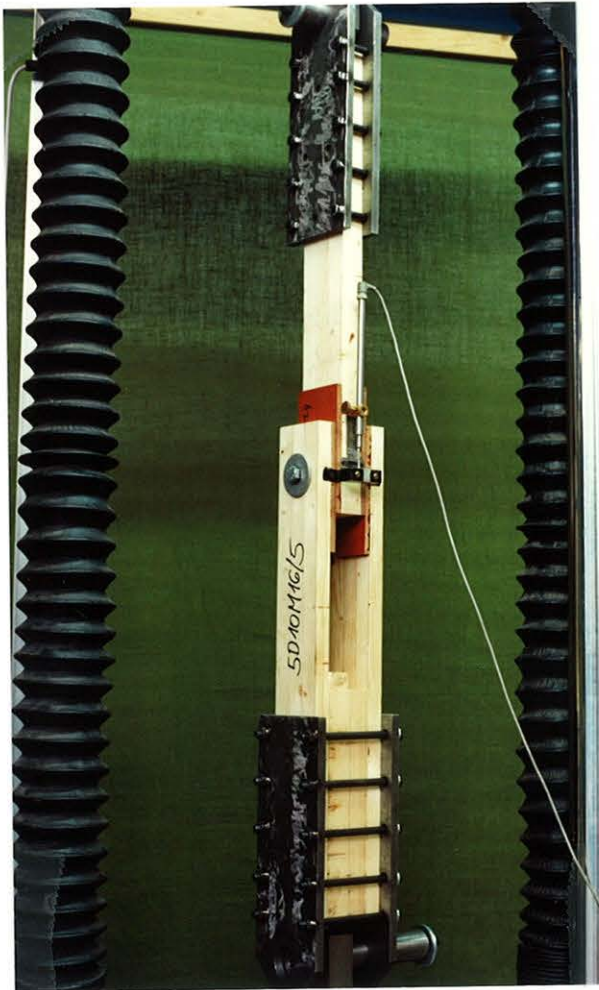


Bild 6.19: Zugscherversuchskörper
in der Prüfmaschine

Bild 6.20: Aufgetrennter Preßfurnier-
sperrholz verstärkter
Versuchskörper mit Paßbolzen
M16 der Güte 8.8



Die Zugscherkörper wurden mittels Universalprüfmaschine mit einer Maximalprüfkraft von 250 kN auf Zug belastet.

Die Last-Verschiebungsdiagramme aller durchgeführten Zugscherversuche mit Paßbolzen sind in **Anlage 37 - 38** dargestellt. In der Tabelle der **Anlage 39** sind die aufgenommene Höchstlast F_u pro Verbindungsmittel, die Einzelverschiebungen und die daraus errechneten Verschiebungsmoduln angegeben. Die Verschiebungswerte bzw. Verschiebungsmoduln wurden nach DIN EN 26891 : 1991 bestimmt. **Bild 6.20** zeigt einen aufgetrennten Versuchskörper.

Welche Möglichkeiten diese Weiterentwicklung der Verbindungsmitteltechnik im Holzbau bietet, zeigt folgender Vergleich. Verbindet man zwei Fichtenbretter der Dicke 25 mm mit einer 40 mm dicken Bohle durch einen Stabdübel mit $d = 16$ mm, so ist eine mittlere Bruchlast von 19 kN zu erwarten. Klebt man 10 mm dickes Preßfurniersperrholz im Bereich der Scherflächen auf die Hölzer und benutzt anstatt eines gewöhnlichen Stabdübels einen handelsüblichen Paßbolzen der Güte 8.8, so wurde eine mittlere Bruchlast von 84,2 kN bei einem Abstand vom Hirnholzende von $5d$ gemessen. D.h. durch diese beschriebenen Maßnahmen wurde die Tragfähigkeit bei einer 30% kleineren Anschlußfläche auf das fast 4,5-fache gesteigert.

6.5 Stahlblech-Holz-Stabdübelverbindung mit Brettschichtholz aus Nadelholz- und Buchefurniersperrholzlamellen

Zur Überprüfung der Wirksamkeit der Verstärkung wurden auch Versuche mit Stahlblech-Holz-Verbindungen durchgeführt. In **Bild 6.21** ist der Versuchskörper mit seinen Abmessungen dargestellt. Die Löcher für die glattschaftigen Stabdübel wurden mit einem Merk-Kombi-Bohrer* Durchmesser 12 mm vorgebohrt. Durch die spezielle Bohrer-geometrie (siehe **Bild 6.22**) kann damit Holz und Stahl in einem Arbeitsgang kostengünstig und paßgenau gebohrt werden. Die Stabdübel wurden aus Vergütungsstahl C 45 K gefertigt. In Anlehnung an DIN EN 409 wurde das Fließmoment dieser Stabdübel bestimmt. Es ergab sich im Mittel zu 278 Nm, dies entspricht einer rechnerischen Fließspannung von 965 N/mm^2 . Als Verstärkung wurde in der Mitte des Brettschichtholzquerschnitts eine 22 mm dicke

* Produktbezeichnung des Herstellers Merk-Holzbau, Aichach

Buche-Furniersperrholzlamelle mit Resorcinharzleim eingeleimt. Die Schlitz für die Stahlbleche aus St 37-2 wurden mittig in diese Lamelle gefräst.

Die Versuchskörper wurden auf Zug in Faserrichtung der Hölzer und der Deckfurniere der Holzwerkstoffe belastet. Die Durchführung und Auswertung der Versuche erfolgte nach DIN EN 26891 : 1991. Die Last-Verschiebungsdiagramme sind in **Anlage 40** dargestellt. In der Tabelle der **Anlage 41** sind die aufgenommene Höchstlast F_u pro Verbindungsmittel, die Einzelverschiebungen und die daraus errechneten Verschiebungsmoduln angegeben.

Die wichtigsten Ergebnisse der Versuche sind in **Tabelle 6.3** zusammengefaßt.

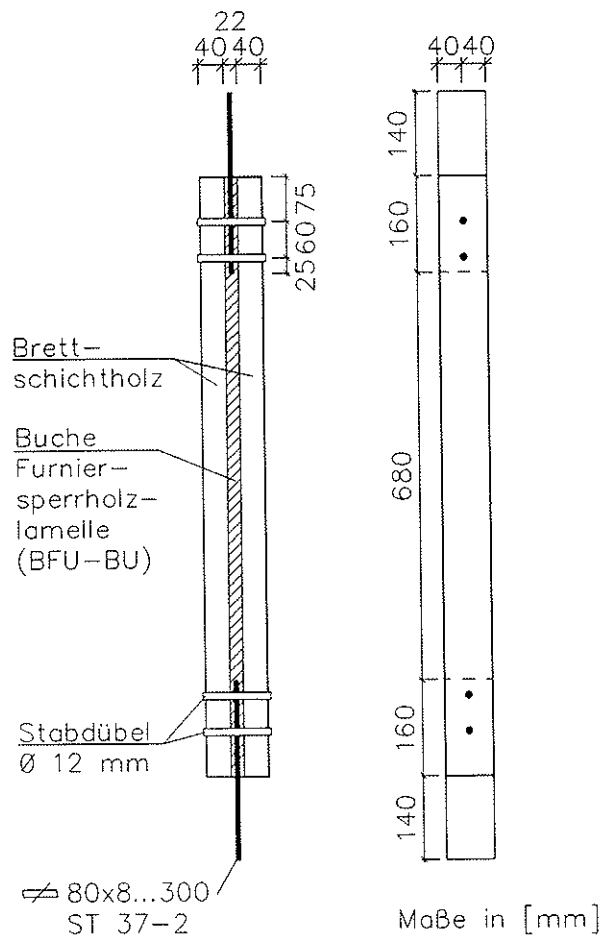


Bild 6.21: Abmessungen der Versuchskörper der Stahlblech-Holz-Verbindung (Versuchsreihe St 12/40/7)

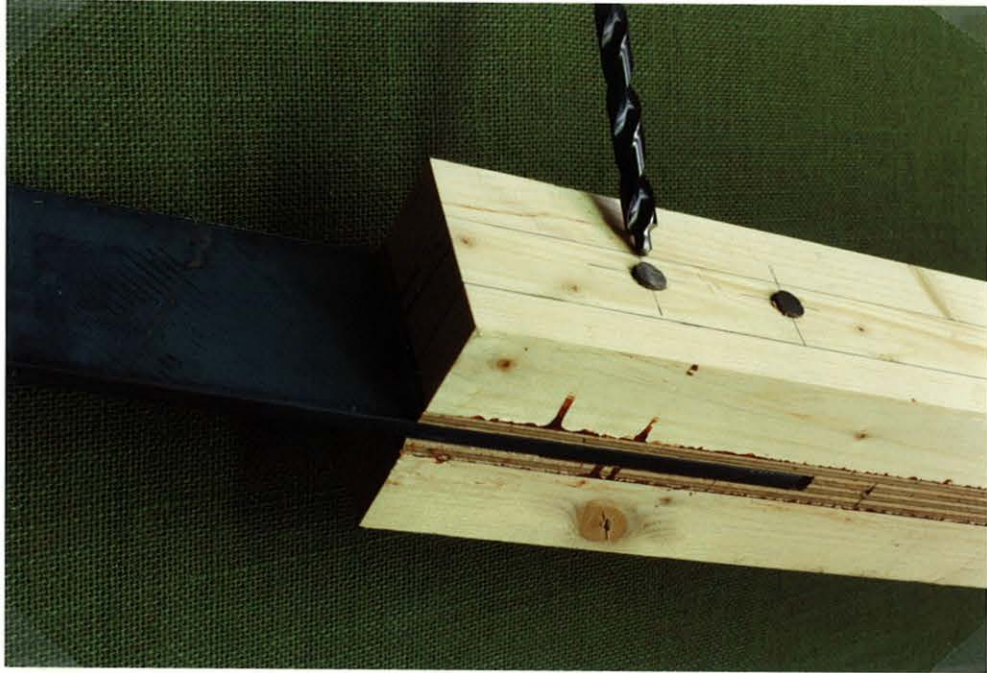


Bild 6.22: Versuchskörper und Merk-Kombi-Bohrer

Tabelle 6.3: Versuchsergebnisse der Zugscherversuche mit Buche-Furniersperrholz verstärkten Stahlblech-Holz-Verbindungen

Versuchsreihe	Dicke der Verstärkung t (mm)	Nenn-durchmesser d (mm)	Dicke Seitenholz s ₁ (mm)	Höchstlast pro Verb.-mittel F _u (kN)	Ver-schiebung bei F _u v _{max} (mm)
Verbindungsmittel: Stabdübel aus Rundstahl C 45 K					
St 12/40/7-1	6,5	12	40	33,6	8,1
St 12/40/7-2	6,5	12	40	33,0	11,7
St 12/40/7-3	6,5	12	40	31,9	5,7
St 12/40/7-4	6,5	12	40	33,6	6,7
St 12/40/7-5	6,5	12	40	35,2	8,9
Mittelwert				33,6	8,2

Mit dem Computerprogramm XJOINT wurde die Traglast rechnerisch ermittelt. Von den Versuchskörpern ist die Rohdichte der Brettlamellen und das Fließmoment der Verbindungsmittel bekannt. Daraus wurde die Lochleibungsfestigkeit der Hölzer und die Fließspannung der Verbindungsmittel bestimmt. Die Lochleibungsfestigkeit des Bau-Furniersperrholzes aus Buche wurde entsprechend Abschnitt 4.1.2 zu 60 N/mm^2 angenommen. **Bild 6.23** zeigt den Programmausdruck für diese Verbindung. Die Traglast ergibt sich mit dem Rechenmodell zu $34,1 \text{ kN}$ pro Verbindungsmittel und somit eine Abweichung von etwa 2% von der mittleren gemessenen Traglast.

Programm XJOINT
zur Berechnung der Tragfähigkeit von Verbindungen
mit stiftförmigen Verbindungsmitteln

Geometrie und Werkstoffkennwerte der 1. zweischnittigen Verbindung

Einheiten	:	[mm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]
1.Holz	:	s1 = 40.00	fs1= 29.00	τs1= 2.90	μs1=0.40
Verstärkung 1.Holz:	:	t1 = 6.50	ft1= 60.00	τt1= 6.00	
Verstärkung 2.Holz:	:	t2 = 0.00	ft2= 0.00	τt2= 0.00	
2.Holz / Stahl	:	s2 = 0.00	fs2= 0.00	τs2= 0.00	μs2=0.00
Verstärkung 3.Holz:	:	t3 = 6.50	ft3= 60.00	τt3= 6.00	
3.Holz	:	s3 = 40.00	fs3= 29.00	τs3= 2.90	μs3=0.40

Verbindungsmittel : d = 12.0mm dsp= 12.0mm fy = 965.0 N/mm²

Traglasten für eine Stahlblech - Holz - Verbindung, Stahlblech innen

Traglast der Bruchursache 1S :	Ru1S =	18600.00 N/Scherfläche
Traglast der Bruchursache 3S :	Ru3S =	17068.05 N/Scherfläche
Traglast der Bruchursache 4S :	Ru4S =	***** N/Scherfläche
Maßgebende Traglast RuS :		34136.11 N

Bild 6.23: Programmausdruck mit Eingabedaten und Ergebnissen für eine Buchefurniersperrholz verstärkte Stahlblech-Holz-Verbindung

7 Empfehlungen für die Bemessung von Verbindungen mit verstärkten Anschlußbereichen

Eine Holzverbindung ist ein komplexes System, in dem verschiedene Hölzer, Holzwerkstoffe und Verbindungsmittel zusammenwirken. Dabei wird der natürliche, anisotrope Baustoff Holz mehraxial beansprucht. Durch die Berücksichtigung der zufallsbedingten Streuungen der maßgebenden Einflußgrößen können Aussagen über die Tragfähigkeit von unterschiedlichen Verbindungsarten gemacht werden.

Um die statistische Variabilität von Material- und Konstruktionseigenschaften bei der Bemessung wirklichkeitsnah zu berücksichtigen, muß das System als Ganzes betrachtet werden. Insbesondere muß davon ausgegangen werden, daß die Hölzer aufspalten können. Einen traglaststeigernden Einfluß hat dabei

- die Berücksichtigung der Verankerung der Verbindungsmittel im Holz,
- die geringe Wahrscheinlichkeit, daß eine Verbindung nur aus Hölzern mit charakteristischen Materialeigenschaften entsprechend dem 5%-Fraktile zusammengesetzt ist,
- die Berücksichtigung des tatsächlichen Fließmomentes der Verbindungsmittel
- und das Aufleimen einer Holzwerkstoffplatte als Absperrung.

Traglastmindernd wirken sich dagegen folgende Faktoren aus:

- die Spaltempfindlichkeit der Hölzer;
- die größere Streuung der Lochleibungsfestigkeiten im Vergleich zur Rohdichte;
- reduzierte Verbindungsmittelabstände untereinander und von den Rändern.

Zur Bemessung von Verbindungen mit verstärkten Anschlußbereichen wurden in Abschnitt 5.4 handhabbare Gleichungen angegeben. Wie die Untersuchungen von WERNER 1993 zeigten, kann man bei Zugrundelegung der "Johansen"-Theorie die zusätzlichen Systemeigenschaften einer Verbindungsart in einem Systemfaktor k_{sys} zusammenfassen. Bei Bruchursachen, bei denen nur das Lochleibungsversagen die Tragfähigkeit der Verbindung bestimmt, entfällt dieser Faktor. Bei der Verstärkung einer Verbindung mit hochwertigen Holzwerkstoffplatten wie Kunstharzpreßholz oder Preßfurniersperrholz ist stets ein Nachweis in der Leimfuge nach Gl. 4.31 zu führen.

Im folgenden werden Empfehlungen für die Bemessung von Verbindungen mit Bolzen, Stabdübeln und Gewindestangen angegeben. Die hier gemachten Aussagen gelten für Verbindungsmittelabstände nach EUROCODE 5 (ENV 1995-1-1) Tabelle 6.5.1.2 und 6.6.

Aus den experimentellen Untersuchungen und den Simulationsrechnungen von WERNER 1993 ergibt sich unter Berücksichtigung des Spaltversagens die charakteristische Lochleibungsfestigkeit von Fichtenholz für eine Belastung unter einem Winkel α zur Faserrichtung zu:

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \quad (7.1)$$

$$f_{h,0,k} = 0,077 \cdot \rho_k \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \quad (7.2)$$

$$k_{90} = 1,35 + 0,015 \cdot d \quad (7.3)$$

mit $f_{h,\alpha,k}$, $f_{h,0,k}$ in N/mm^2 , ρ_k in kg/m^3 und d in mm

Werden Holzwerkstoffplatten auf die Hölzer geklebt, so darf die charakteristische Lochleibungsfestigkeit der Fichtenhölzer um 15% erhöht werden. Die Dicke von nicht abgesperrten Hölzern sollte wegen der erhöhten Sprödbruchgefahr mindestens $2d$ betragen.

Die charakteristische Lochleibungsfestigkeit von Bau-Furniersperrholz aus Buche kann wie folgt angenommen werden:

$$f_{h,t,k} = \left(0,79 + \frac{3,8}{\sqrt{d}}\right) \cdot 30 \quad (7.4)$$

mit $f_{h,t,k}$ in N/mm^2 und d in mm

Unter der Voraussetzung, daß der charakteristische Wert des Fließmomentes der o.g. Verbindungsmittel mit der Gleichung

$$M_{y,k} = 0,8 \cdot f_{u,k} \cdot \frac{d_{sp}^3}{6} \quad (7.5)$$

$f_{u,k}$ charakteristische Zugfestigkeit des Verbindungsmittels

d_{sp} Spannungsdurchmesser

in Ansatz gebracht wird, wird für zweischnittige Holz-Holz-Verbindungen mit Stabdübeln und Bolzen sowie verstärkten Anschlußbereichen ein Systemfaktor $k_{\text{sys}} = 1,25$ vorgeschlagen. Für andere Verbindungsarten sind in WERNER 1993 folgende Systemfaktoren angegeben:

Einschnittige Holz-Holz-Verbindungen mit Stabdübeln und Bolzen
ohne verstärkten Anschlußbereich $k_{\text{sys}} = 1,10$

Zweischnittige Holz-Holz-Verbindungen mit Stabdübeln und Bolzen
ohne verstärkte Anschlußbereiche $k_{\text{sys}} = 1,15$

Einschnittige Stahlblech-Holz-Verbindungen mit Stabdübeln und Bolzen
ohne verstärkten Anschlußbereich $k_{\text{sys}} = 1,15$

Zweischnittige Stahlblech-Holz-Verbindungen mit Stabdübeln und Bolzen
ohne verstärkte Anschlußbereiche $k_{\text{sys}} = 1,20$

Zweischnittige Holz-Holz-Verbindungen mit metrischen Gewindestangen
ohne verstärkte Anschlußbereiche $k_{\text{sys}} = 1,55 d^{-0,1}$

Die Einführung eines Systemfaktors für Bruchursachen mit Fließgelenken im EUROCODE 5 - Entwurf 1993 hat sich auf Grund der Simulationsrechnungen als sinnvoll erwiesen. Jedoch ist dieser Wert keine Konstante, sondern von der Art der Verbindung abhängig. Er berücksichtigt die Verankerung des Verbindungsmittels im Holz und die geringe Wahrscheinlichkeit, daß sämtliche Teile einer Verbindung genau die charakteristischen Baustoffeigenschaften besitzen.

8 Zusammenfassung

Um die Tragfähigkeit von Verbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln aus Stahl unter der Berücksichtigung streuender Einflußgrößen zu untersuchen, wurden von WERNER 1993 ein theoretisches Rechenmodell und ein Computerprogramm entwickelt, die die Berechnung der Traglast unter Berücksichtigung aller wesentlichen Einflußgrößen nach Art der Monte-Carlo-Simulation ermöglichen.

Zur Beschreibung des Spaltversagens der Hölzer wurde ein theoretischer Ansatz unter Verwendung der linear-elastischen Bruchmechanik verwendet. Zur Beschreibung der Spaltempfindlichkeit dient der bruchmechanische Werkstoffkennwert Bruchzähigkeit. Dieser Kennwert wurde mit Hilfe der Spaltkraft aus vorhandenen Lochleibungsversuchen berechnet. Die experimentelle Bestimmung der Spaltkraft von in Faserrichtung beanspruchten Verbindungen ist sehr schwierig. Um die Spaltbeanspruchung rechtwinklig zur Faser zu bestimmen, wurde daher eine sogenannte Verdrängungstheorie erweitert und auf dieses Problem angewandt. Da derzeit nur Versuchsergebnisse unter Belastung in Faserrichtung mit runden glattschaftigen Verbindungsmitteln und metrischen Gewindestangen in vorgebohrten Löchern vorliegen, muß vorläufig die Anwendung des gefundenen Spaltbruchkriteriums auf diese Fälle beschränkt bleiben.

Im Hinblick auf die Tragfähigkeitssteigerung von Verbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln wurde das theoretische Rechenmodell so hergeleitet, daß die Ermittlung der Traglast unter Berücksichtigung von aufgeleimten Holzwerkstoffplatten im Anschlußbereich möglich ist.

Anhand von Versuchen wurde das Rechenmodell überprüft. Die gemessenen Lasten und Verschiebungen beim Versagen von verschiedenen Verbindungsarten wurden mit den Rechenergebnissen verglichen. Dabei zeigte sich eine gute Übereinstimmung.

Zur Bestimmung der Wahrscheinlichkeitsverteilung des Bauteilwiderstandes wurden mit einem dafür entwickelten Computerprogramm für jede gewählte Verbindungsart und Anschlußgeometrie 600 Verbindungen simuliert und deren Traglast berechnet. Von jeder Stichprobe wurde der nichtparametrische 5%-Fraktilwert bestimmt.

Als Ergebnis erhält man die charakteristische Tragfähigkeit eines Verbindungsmittels in einer Verbindung. Diese Größe ist wichtigster Bestandteil der Bemessungsregeln auf der Grundlage des neuen Sicherheitskonzeptes und sie gilt definitionsgemäß für eine Lasteinwirkungsdauer von 10-15 Minuten bei einer Temperatur von 20°C und einer relativen Luftfeuchte von 65%. Die gegenseitige Beeinflussung der Verbindungsmittel, die in erster Linie von der Anzahl der Verbindungsmittel hintereinander und deren Abständen abhängt, wurde hier nicht behandelt und muß als gesondertes Problem betrachtet werden.

Die Systemeigenschaften einer Verbindungsart kann man vereinfacht in einem Systemfaktor k_{sys} zusammenfassen. Bei Bruchursachen, bei denen nur das Lochleibungsversagen die Tragfähigkeit der Verbindung bestimmt, entfällt dieser Faktor. Der Systemfaktor ist keine Konstante, sondern ist von der Art der Verbindung abhängig. Er berücksichtigt die Verankerung des Verbindungsmittels im Holz und die Streuung der Baustoffeigenschaften der einzelnen Verbindungsmittelteile, d.h. die geringe Wahrscheinlichkeit, daß eine Verbindung gerade aus Teilen mit den charakteristischen Baustoffeigenschaften (5%-Fraktilen) besteht.

Zur Bemessung von Verbindungen mit verstärkten Anschlußbereichen sind handhabbare Gleichungen angegeben. Setzt man die Dicke t der aufgeleimten Holzwerkstoffplatten in diesen Gleichungen zu Null, dann entsprechen sie den Angaben im Entwurf zu EUROCODE 5 (ENV 1995-1-1).

Die folgenden leistungsfähigen Anschlüsse wurden entwickelt und untersucht:

- Buche-Furniersperrholz verstärkte Stahlblech-Holz-Nagelverbindung mit nicht vorgebohrten Stahlblechen
- Buche-Furniersperrholz verstärkte Holz-Holz-Verbindung mit Stabdübeln und eingedrehten Gewindestangen
- Verstärkte Stahlblech-Holz-Verbindung mit aufgeschweißten Gewindebolzen
- Preßfurniersperrholz verstärkte Holz-Holz-Verbindung mit Paßbolzen
- Stahlblech-Holz-Stabdübelverbindung mit Brettschichtholz aus Nadelholz- und Buche-Furniersperrholzlamellen

Die Versuche haben gezeigt, daß die Tragfähigkeit der Verbindung überproportional zunimmt, wenn an den Scherflächen hochwertige Holzwerkstoffplatten angeordnet werden. Durch den Vergütungseffekt wird auch die Streubreite der Tragfähigkeit wesentlich reduziert. Die Verstärkung der Anschlußbereiche kann daher zu einer beträchtlichen Holzersparnis führen, die den Aufwand, der durch das Aufleimen der Holzwerkstoffplatten bedingt ist, mehr als ausgleicht.

Die begrenzte Tragfähigkeit der Anschlüsse erfordert z.B. bei Holz-Fachwerkstrukturen häufig eine Überdimensionierung der Fachwerkstäbe. Durch die rechnerische Berücksichtigung von Verstärkungsmaßnahmen eröffnen sich Möglichkeiten, filigrane und architektonisch ansprechende Holzkonstruktionen herzustellen.

9 Schrifttum

- BLAß, H.J. 1991a** : Untersuchungen zur Lastverteilung in Nagelverbindungen. In: Holz als Roh- und Werkstoff 49(1991), S.21-26
- BLAß, H.J. 1991b** : Traglastberechnung von Nagelverbindungen. In: Holz als Roh- und Werkstoff 49(1991), S.91-98
- BLAß, H.J.; WERNER, H. 1988a** : Lochleibungsfestigkeit von Furnierschichtholz aus Fichte. In: Holz als Roh- und Werkstoff 46(1988), S. 472
- BLAß, H.J.; WERNER, H. 1988** : Stabdübelverbindungen mit verstärkten Anschlußbereichen. In: bauen mit holz 90(1988), S. 601-607
- BOSTRÖM, L. 1990** : The compact tension test used on wood - an analysis of a testing method. In: IUFRO 5.02 proceedings, Saint John, New Brunswick, Kanada
- BOUWKAMP, G.; BECKER, K.; WINTER, S. 1988** : Bolzenschweißverfahren im Holzbau. Darmstadt: Institut für Stahlbau und Werkstoffmechanik, Abt. Konstruktiver Holzbau, Technische Hochschule Darmstadt.
-Forschungsbericht
- CIB (CONSEIL INTERNATIONAL DU BÂTIMENT) 1983** : CIB Structural Timber Design Code. CIB-W18 "Holzbauwerke", Publ. No. 66. -Report
- COLLING, F.; GÖRLACHER, R. 1989** : Eigenschaften des in Leimbaubetrieben verarbeiteten Schnittholzes. In: bauen mit holz 91(1989), S. 327-331
- DRÖGE, G.; KRAMER, S. 1989** : Die Lochleibungsbruchspannungen von Bau - Furniersperrholz nach DIN 68705, T.5. In: Holzbau - Statik - Aktuell, 10/1989, S. 10 - 13
- EHLBECK, J.; EBERHART, O. 1988** : Untersuchungen von Stahlblech - Holz - Nagelverbindungen mit nicht vorgebohrten Stahlblechen von mindestens 2 mm Dicke unter Verwendung von Stahlnägeln. Karlsruhe: Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abt. Ingenieurholzbau, Universität Karlsruhe(TH). -Forschungsbericht

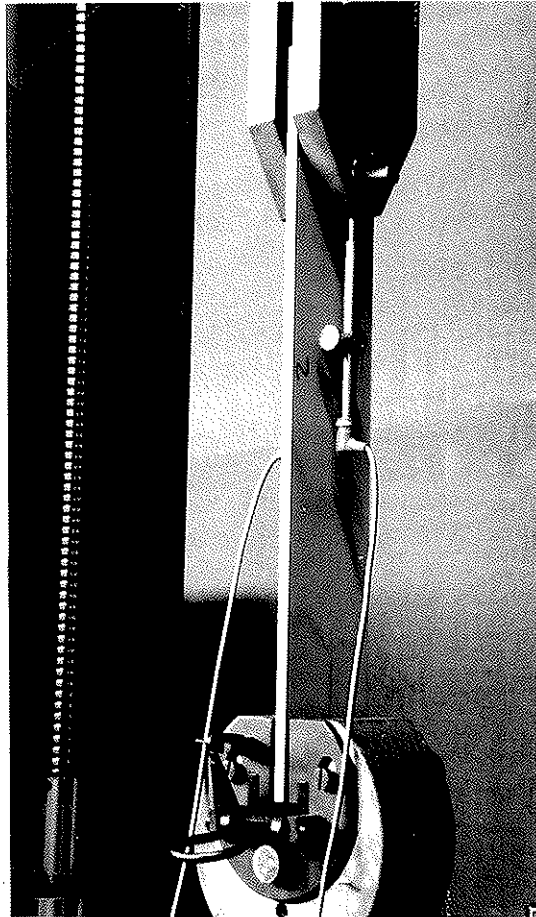
- EHLBECK, J.; EBERHART, O. 1989** : Entwicklung und Prüfung neuer Verbindungsmittel aus Hartholz, Preßschichtholz und ähnlichen holzhaltigen Werkstoffen für tragende Verbindungen im Holzbau, Teil 2B: Kerbuntersuchungen an Platten aus Kunstharzpreßholz. Karlsruhe: Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abt. Ingenieurholzbau, Universität Karlsruhe(TH). -Forschungsbericht
- EHLBECK, J.; GÖRLACHER, R.; WERNER, H. 1991** : Empfehlungen zum einheitlichen, genaueren Querschnittsnachweis für Anschlüsse mit mechanischen Verbindungsmitteln. In: bauen mit holz 93(1991), S.825-828
- EHLBECK, J.; KÜRTH, J. 1991** : Entwicklung und Prüfung neuer Verbindungsmittel aus Hartholz, Preßschichtholz und ähnlichen holzhaltigen Werkstoffen für tragende Verbindungen im Holzbau, Teil 3: Optimierung des Anschlußbildes und Entwicklung von Bemessungsgrundlagen. Karlsruhe: Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abt. Ingenieurholzbau, Universität Karlsruhe(TH). -Forschungsbericht
- EHLBECK, J.; WERNER, H. 1989** : Tragverhalten von Stabdübeln in Brettschichtholz und Vollholz verschiedener Holzarten bei unterschiedlichen Rißlinienanordnungen. Karlsruhe: Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abt. Ingenieurholzbau, Universität Karlsruhe(TH). -Forschungsbericht
- EHLBECK, J.; WERNER, H. 1991** : Biegegerät zur Prüfung von stabförmigen Verbindungsmitteln. Karlsruhe: Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abt. Ingenieurholzbau, Universität Karlsruhe(TH). -Forschungsbericht
- EHLBECK, J.; WERNER, H. 1992** : Tragfähigkeit von Laubholzverbindungen mit stabförmigen Verbindungsmitteln. Karlsruhe: Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abt. Ingenieurholzbau, Universität Karlsruhe(TH). -Forschungsbericht
- EHLBECK, J.; WERNER, H. 1992b** : Embedding strength of densified veneer wood for dowel-type fastener. Karlsruhe: Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abt. Ingenieurholzbau, Universität Karlsruhe(TH). -Forschungsbericht

- FAHLBUSCH, H. 1949** : Ein Beitrag zur Frage der Tragfähigkeit von Bolzen in Holz bei statischer Belastung. Braunschweig: Institut für Maschinenkonstruktion und Leichtbau, Technische Hochschule Braunschweig. -Bericht-Nr. 49-9
- GEHRI, E.; FONTANA, M. 1983** : Betrachtungen zum Tragverhalten von Paßbolzen in Holz-Holz-Verbindungen. Zürich: Baustatik und Stahlbau, Eidg. Techn. Hochschule Zürich, Schweiz
- GLOS, P.; HENRICI, D.; HORSTMANN, H. 1987** : Festigkeit großflächiger geleimter Holzverbindungen. In: Holz als Roh- und Werkstoff 45(1987), S.355-364
- GLOS, P.; HENRICI, D.; HORSTMANN, H. 1990** : Versuche mit großflächigen geleimten Stabwerken. In: Holz als Roh- und Werkstoff 48(1990), S.333-338
- GUSTAFSSON P.J. 1985** : Fracture mechanics studies of non-yielding materials like concrete. Lund: Lund Institute of Technologie, Schweden. -Technical report TVBM-1007
- JANSSEN, H.F.M. 1988** : Durability of glued connection between wood and Lignostone. Delft: Faculty of Civil Engineering, Delft University of Technology, Niederlanden. - Stevin report 25-88-101/14-LV-7
- JOHANSEN, K. W. 1949** : Theory of timber connections. In: International Association for Bridge and Structural Engineering, Vol. 9, S.249-262
- KALINA, M. 1965** : Scherbeanspruchung in Knotenplatten aus Sperrholz bei geleimten Fachwerkträgern. In: Holz als Roh- und Werkstoff 23(1965), S.394-396
- KUIPERS, J.; VAN DER PUT, T.A.C.M. 1982** : Betrachtungen zum Bruchmechanismus von Nagelverbindungen. In: Ingenieurholzbau in Forschung und Praxis, Hrsg. Ehlbeck, J.; Steck, G., Bruderverlag Karlsruhe
- LARSEN, H.J.; GUSTAFSSON P.J. 1989** : Design of end - notched beams. In: CIB-W18A - proceedings, Berlin, Paper 22-10-1

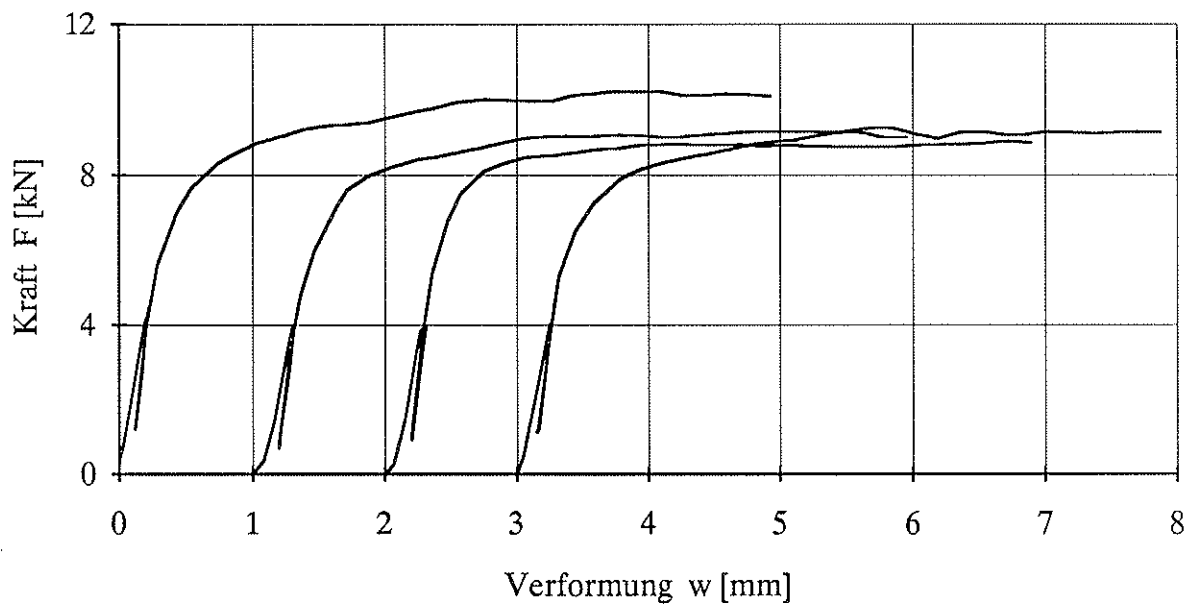
- LARSEN, H.J.; GUSTAFSSON, P.J. 1990** : The fracture energy of wood in tension perpendicular to the grain. In: CIB-W18 A- proceedings, Lissabon, Portugal, Paper 23-19-2
- LEIJTEN, A.J.M. 1988a** : Locally reinforced joints. In: IUFRO-S5.02 - proceedings, Turku, Finland, S. 158-171
- LEIJTEN, A.J.M. 1988b** : Steel reinforced joints with dowels and bolts. In: Proceedings Intern. Conference on Timber Engineering, Seattle, Kanada, S. 474-488
- LEIJTEN, A.J.M. 1991** : Development of reinforced joints with densified veneer wood. In: Proceedings Intern. Timber Engineering Conference, London, UK, S. 3.36-3.42
- LOGEMANN, M. 1991** : Abschätzung der Tragfähigkeit von Holzbauteilen mit Ausklinkungen und Durchbrüchen. Düsseldorf: Fortschr. Ber. VDI Reihe 4, Nr. 102, VDI - Verlag
- MEYER, A. 1957** : Die Tragfähigkeit von Nagelverbindungen bei statischer Belastung. In: Holz als Roh- und Werkstoff 15(1957), Nr.2, S.96-109
- MÖHLER, K.; BUDIANTO, T.; EHLBECK, J. 1978** : Bestimmung der Lochleibungs- festigkeit und des Kraft - Eindrückungsverhaltens von Holzspanplatten. In: Holz als Roh- und Werkstoff 36(1978), S. 475 - 484
- MÖLLER, T. 1951** : En ny metod för beräkning av spikförband. Göteborg: Chalmers Tekniska Högskola Handlingar, Nr. 117, Schweden
- PILGRIM v., M. 1940** : Bolzenverbindungen, Bolzen in Holz. In: Ringbuch der Luftfahrttechnik (1940)
- RODD, P.D. 1993** : Embedding strength of densified veneer wood with dowel-type fasteners. Brighton: Structural Timber Research Unit, Department of Civil Engineering, University of Brighton, UK
- RODD, P.D.; HILSON, B.O.; SPRIGGS, R.A. 1989** : Resin injected mechanically fastened timber joints. In: Proceedings 2nd Pacific Timber Engineering Conference, Vol. 2, S. 131-136

- SCHEER, J.; PEIL, U.; NÖLLE, H. 1988** : Schrauben mit planmäßiger Biegebeanspruchung. In: Der Stahlbau 57(1988), Nr.8, S.237-245
- TAYLOR, S.E.; BENDER, D.A. 1988** : Simulating correlated lumber properties using a modified multivariate normal approach. In: Transactions of the American Society of Agricultural Engineers 31(1988), S.182-186
- TEICHMANN, A.; BORKMANN, K. 1930** : Versuche mit kurzen Bolzen in Holzbauteilen. In: Luftfahrtforschung (1930), S.18-38
- TRAYER, G.W. 1928** : Bearing strength of wood under steel aircraft bolts and washers and other factors influencing fitting design. Washington: National Advisory Committee for Aeronautic, Technical Note No. 296, USA
- WEHRLI, M. 1970** : Zur Stichprobenreduktion bei Monte Carlo Simulation. In: Unternehmensforschung (1970), Heft 2, Zürich, Schweiz
- WERNER, H. 1993** : Tragfähigkeit von Holz-Verbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln unter Berücksichtigung streuender Einflußgrößen. Karlsruhe: Universität Karlsruhe. - Dissertation

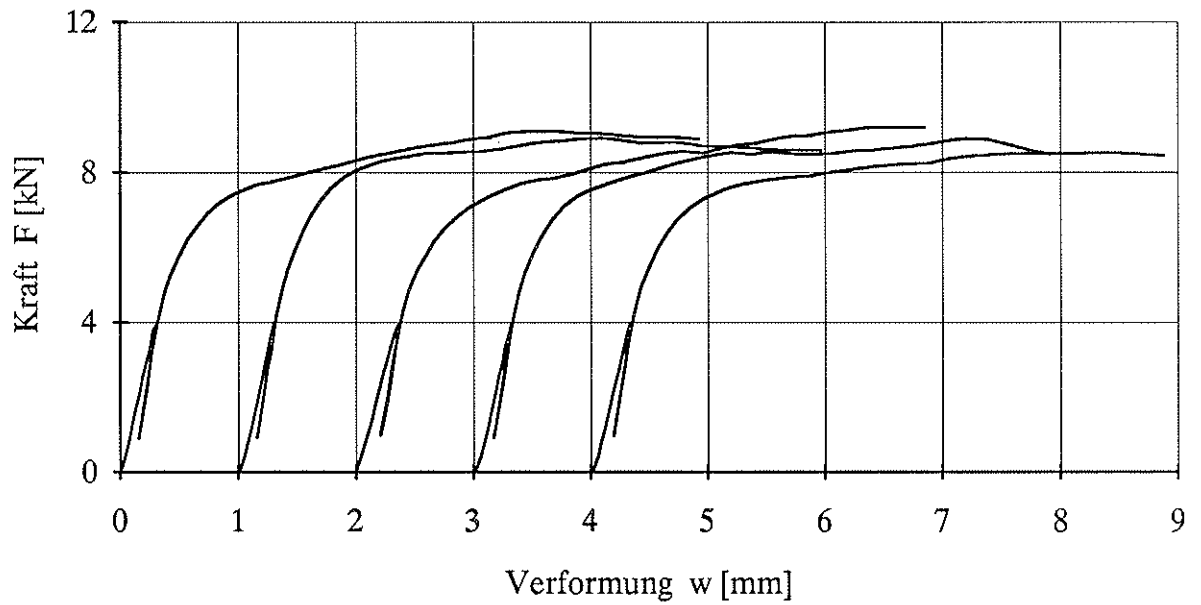
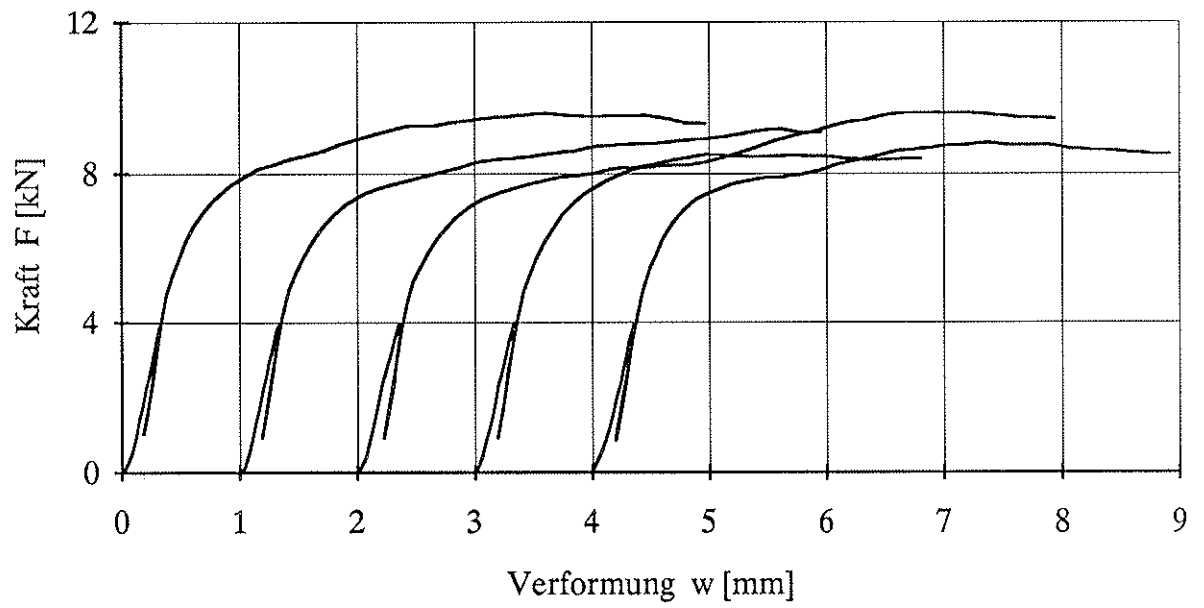
Anlagen



Versuchsaufbau für die Lochleibungsversuche
 mit Baufurniersperrholz aus Buche ($t = 9,5 \text{ mm}$)
 und Stabdübeln mit $d = 16 \text{ mm}$ unter Zugbeanspruchung



Last-Verformungsdiagramme
 Lochleibungsversuche unter Druckbeanspruchung
 (BFU-BU $t = 9,5 \text{ mm}$, Stabdübel $d = 16 \text{ mm}$)



Last-Verformungsdiagramme

Lochleibungsversuche unter Zugbeanspruchung

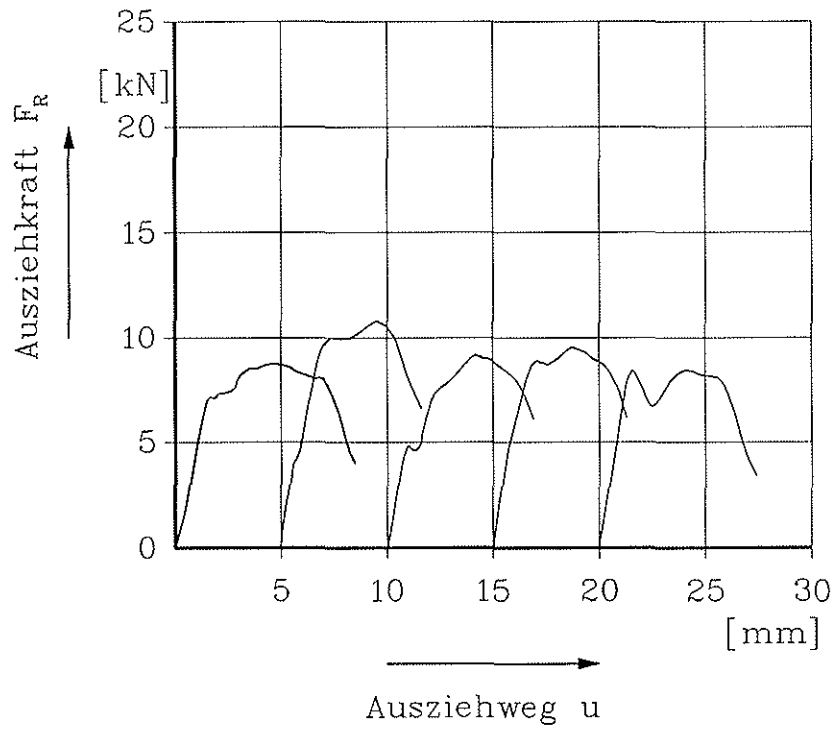
(BFU-BU $t = 9,5$ mm, Stabdübel $d = 16$ mm)

Einzelergebnisse der Lochleibungsversuche mit Baufurniersperrholz aus Buche

(Kraft-Faserwinkel der Deckfurniere 0°, Stabdübel mit d = 16 mm)

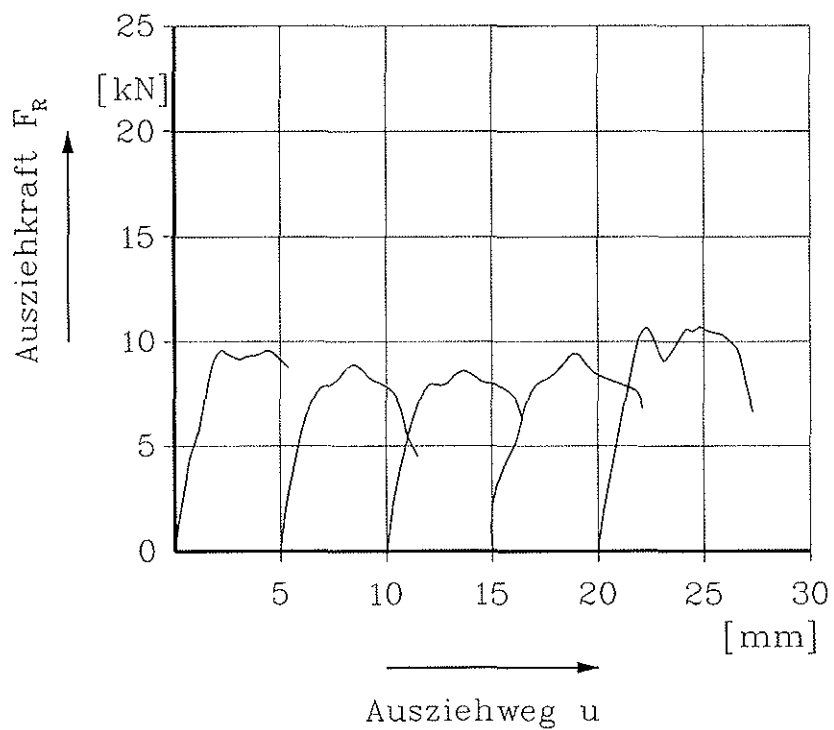
Versuch	t (mm)	$\bar{\rho}$ (kg/m ³)	f_h (N/mm ²)	w_i (mm)	$w_{i,mod}$ (mm)	w_s (mm)	w_e (mm)	w_{06} (mm)	w_{08} (mm)	K_i (N/mm ³)	K_s (N/mm ³)	K_c (N/mm ³)
BFU T16 01	9,5	779	63,1	0,33	0,27	0,05	0,17	0,49	0,92	80	96	154
BFU T16 02	9,5	775	60,3	0,36	0,32	0,04	0,21	0,51	0,99	74	82	124
BFU T16 03	9,5	746	55,9	0,35	0,32	0,04	0,20	0,47	0,00	74	82	124
BFU T16 04	9,5	748	63,3	0,34	0,31	0,03	0,21	0,53	1,06	78	84	127
BFU T16 05	9,4	752	58,6	0,36	0,31	0,05	0,22	0,48	0,79	73	85	124
BFU T16 06	9,4	764	60,6	0,29	0,27	0,02	0,19	0,45	0,90	92	85	122
BFU T16 07	9,3	759	60,0	0,31	0,27	0,03	0,20	0,42	0,68	88	98	131
BFU T16 08	9,3	770	61,8	0,37	0,36	0,01	0,21	0,54	1,13	73	75	124
BFU T16 09	9,3	775	59,7	0,33	0,29	0,04	0,21	0,44	0,78	82	93	125
BFU T16 10	9,3	767	57,2	0,34	0,31	0,03	0,21	0,45	0,76	79	86	127
BFU C16 01	9,5	745	57,0	0,26	0,17	0,09	0,10	0,31	0,75	101	156	274
BFU C16 02	9,4	760	68,0	0,19	0,19	-0,01	0,12	0,34	0,70	141	137	236
BFU C16 03	9,5	742	60,3	0,31	0,23	0,08	0,16	0,43	0,67	86	114	166
BFU C16 04	9,4	744	59,2	0,28	0,21	0,07	0,13	0,00	0,52	96	125	198
BFU C16 05	9,4	760	61,6	0,25	0,23	0,02	0,14	0,35	0,63	106	118	187

T: = Versuch unter Zugbelastung; C: = Versuch unter Druckbelastung



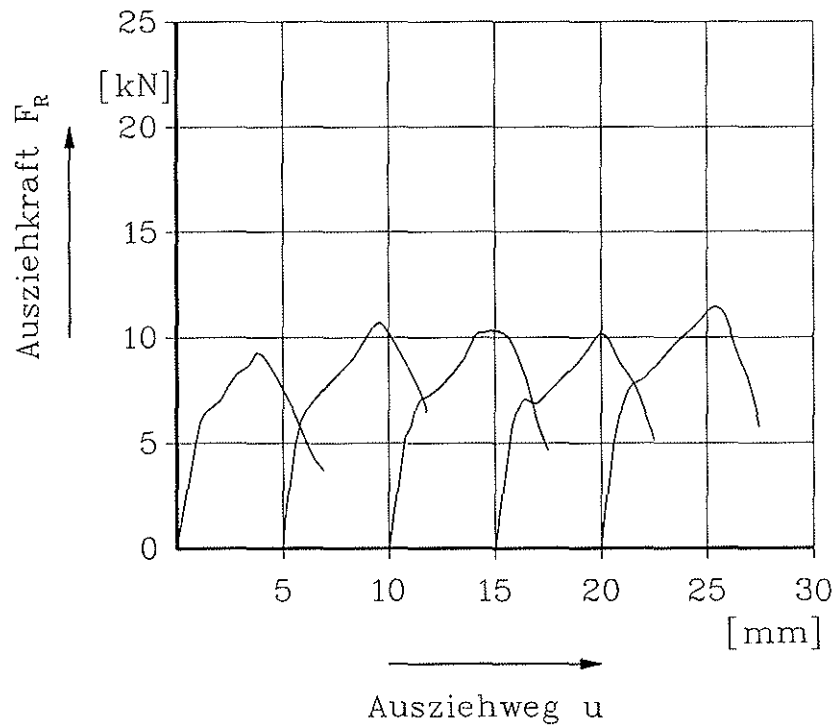
Last-Verformungsdiagramme Versuche M08/P-1 bis 5

(Querbelastung in Faserrichtung $F_N = 10$ kN)

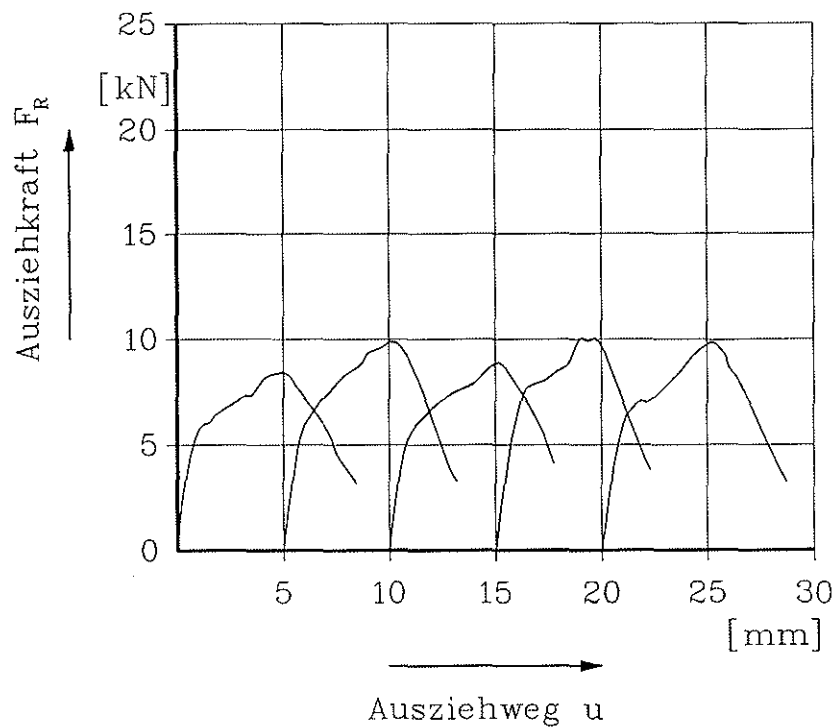


Last-Verformungsdiagramme Versuche M08/P-6 bis 10

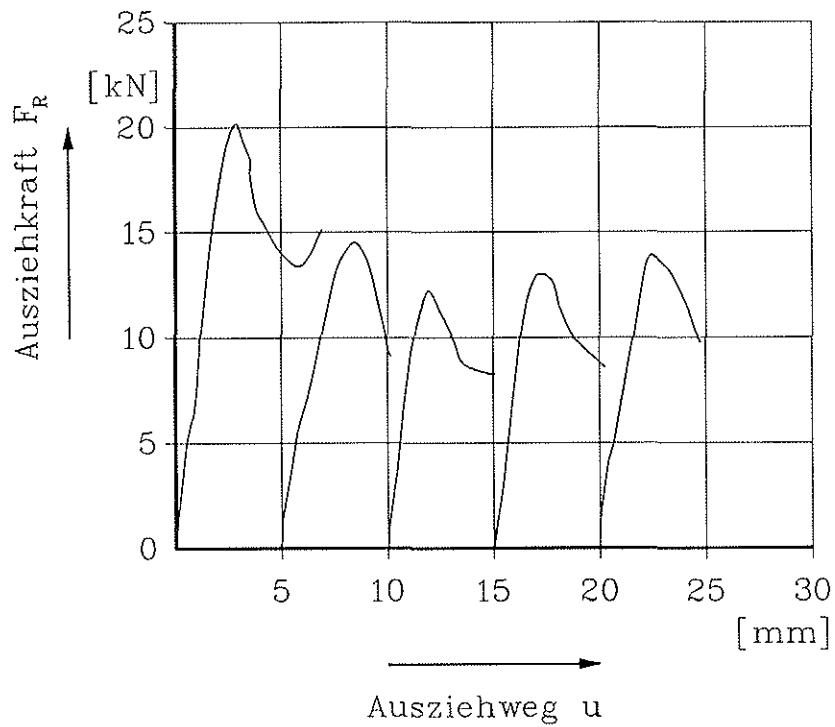
(Querbelastung in Faserrichtung $F_N = 10$ kN)



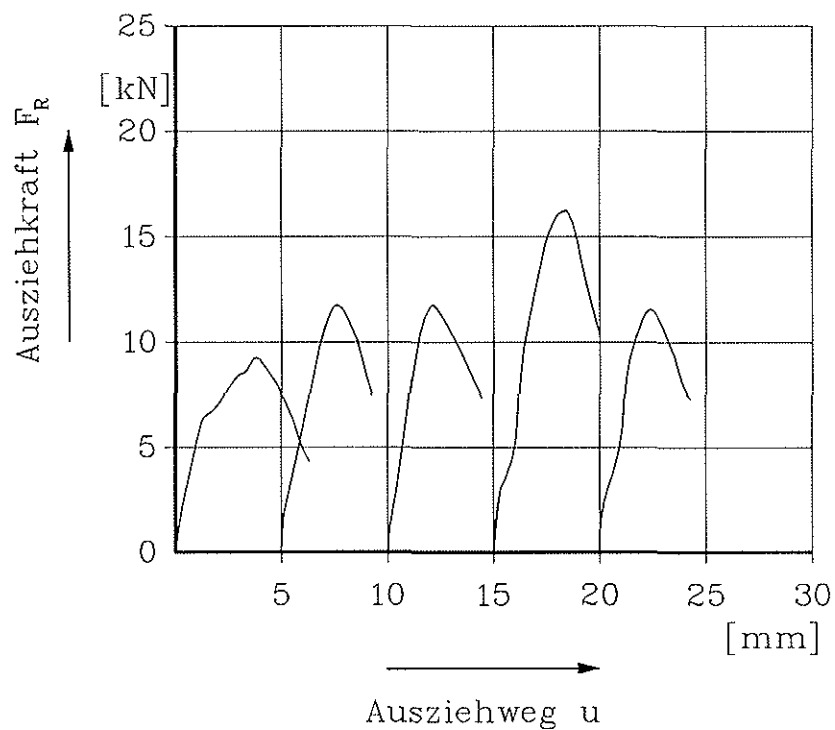
Last-Verformungsdiagramme Versuche M08/P-11 bis 15
(Querbelastung in Faserrichtung $F_N = 13$ kN)



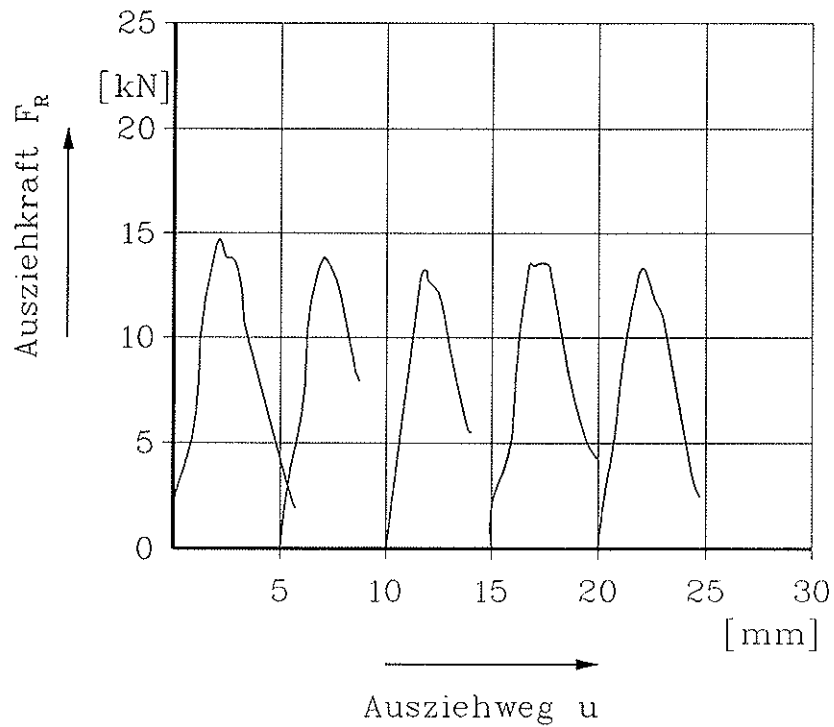
Last-Verformungsdiagramme Versuche M08/P-16 bis 20
(Querbelastung in Faserrichtung $F_N = 13$ kN)



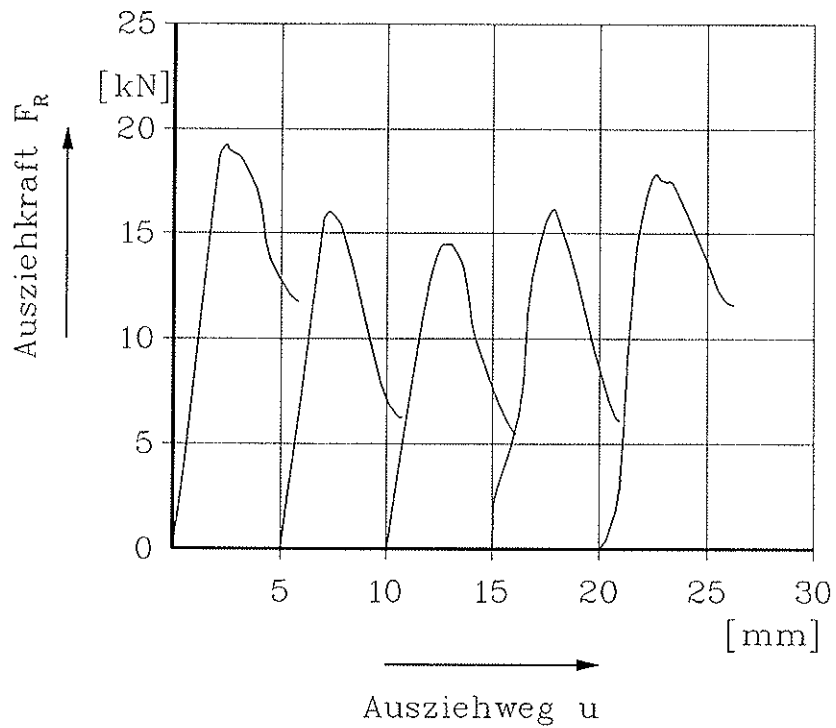
Last-Verformungsdiagramme Versuche M16/P-21 bis 25
 (Querbelastung in Faserrichtung $F_N = 15 \text{ kN}$)



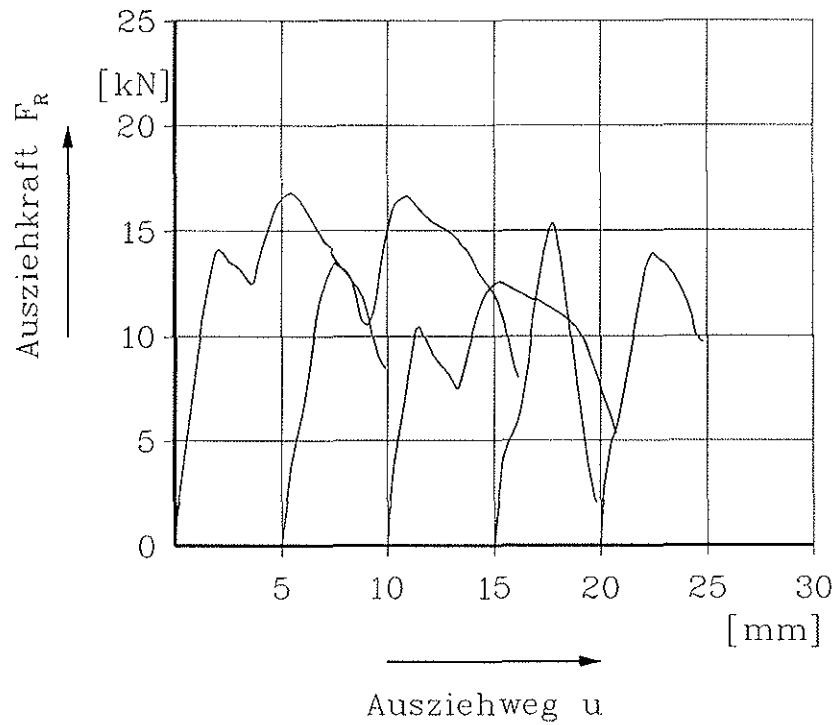
Last-Verformungsdiagramme Versuche M16/P-26 bis 30
 (Querbelastung in Faserrichtung $F_N = 15 \text{ kN}$)



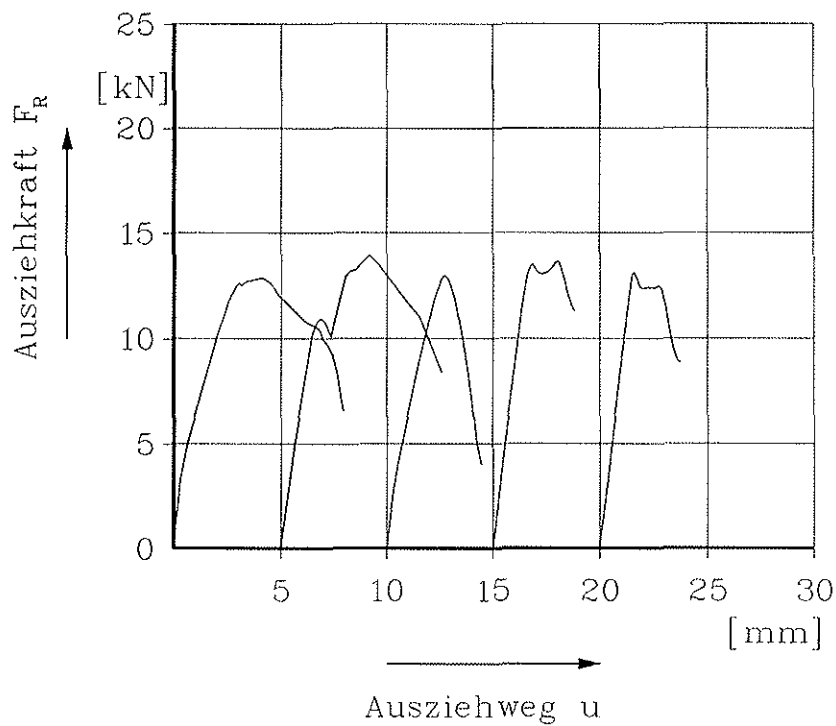
Last-Verformungsdiagramme Versuche M16/P-31 bis 35
 (Querbelastung in Faserrichtung $F_N = 20$ kN)



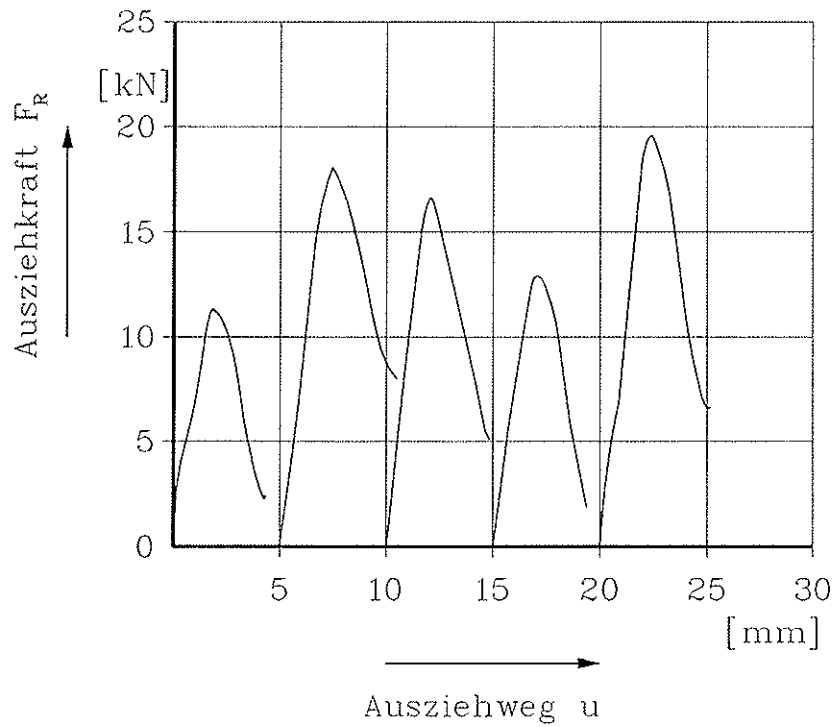
Last-Verformungsdiagramme Versuche M20/P-55,56,57,58,60
 (Querbelastung in Faserrichtung $F_N = 18$ kN)



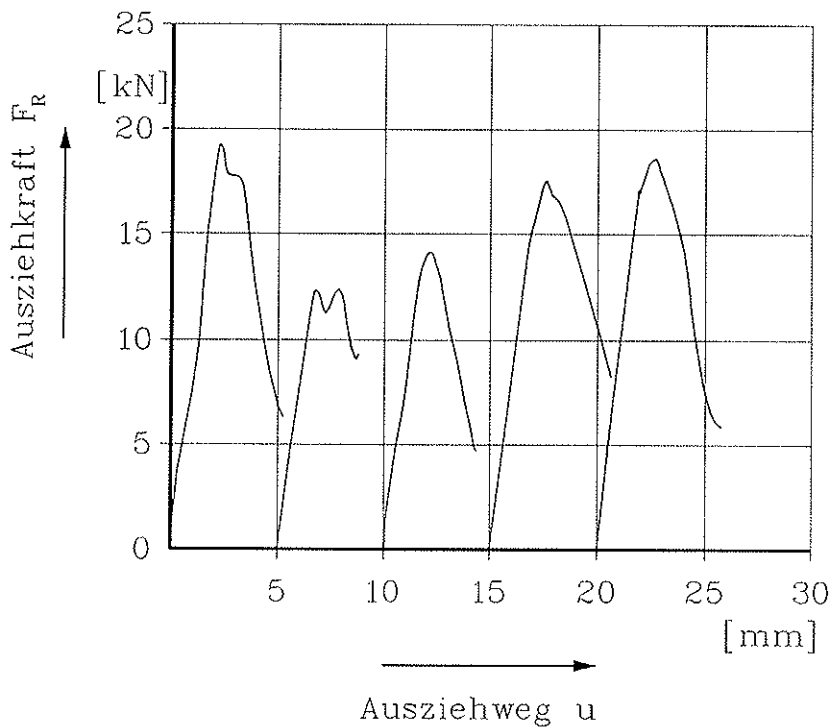
Last-Verformungsdiagramme Versuche M16/P-41 bis 45
 (Querbelastung in Faserrichtung $F_N = 25$ kN)



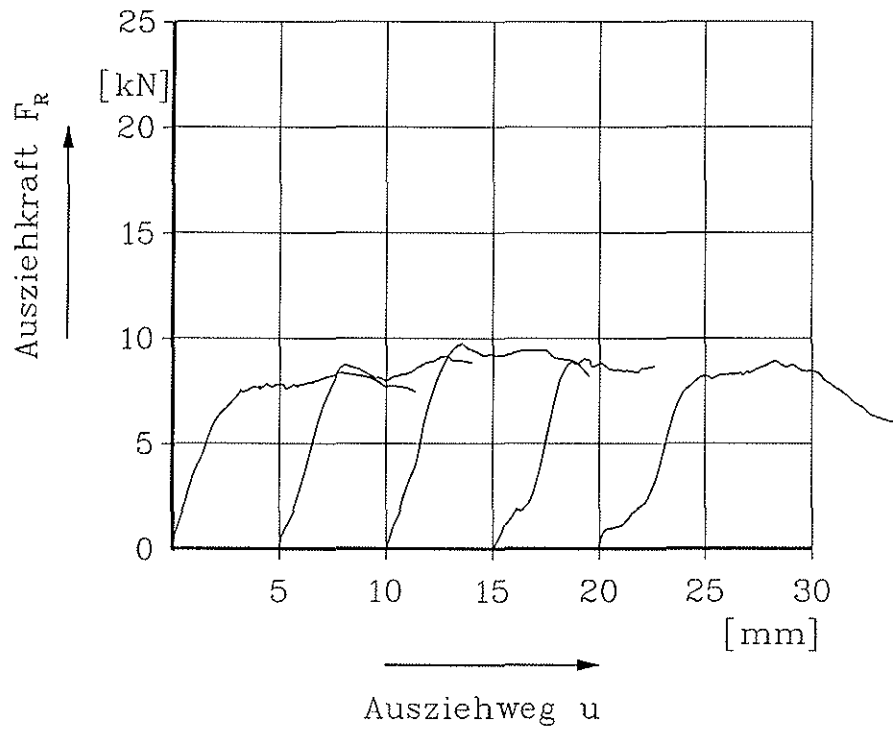
Last-Verformungsdiagramme Versuche M16/P-46 bis 50
 (Querbelastung in Faserrichtung $F_N = 25$ kN)



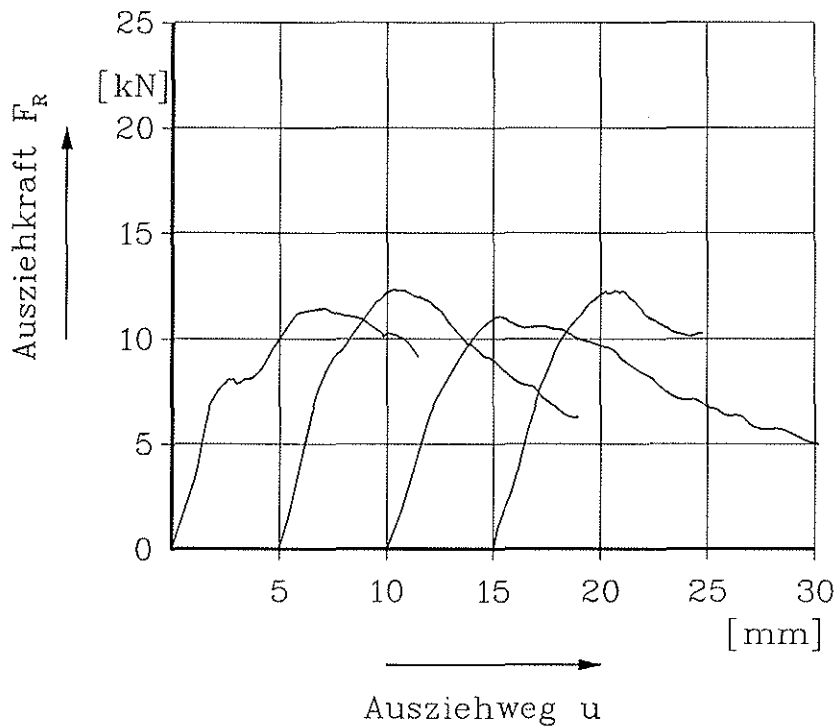
Last-Verformungsdiagramme Versuche M20/P-61 bis 65
 (Querbelastung in Faserrichtung $F_N = 25$ kN)



Last-Verformungsdiagramme Versuche M20/P-66 bis 70
 (Querbelastung in Faserrichtung $F_N = 25$ kN)



Last-Verformungsdiagramme Versuche M16/S-76 bis 80
 (Querbelastung rechtwinklig zur Faserrichtung $F_N = 5$ kN)

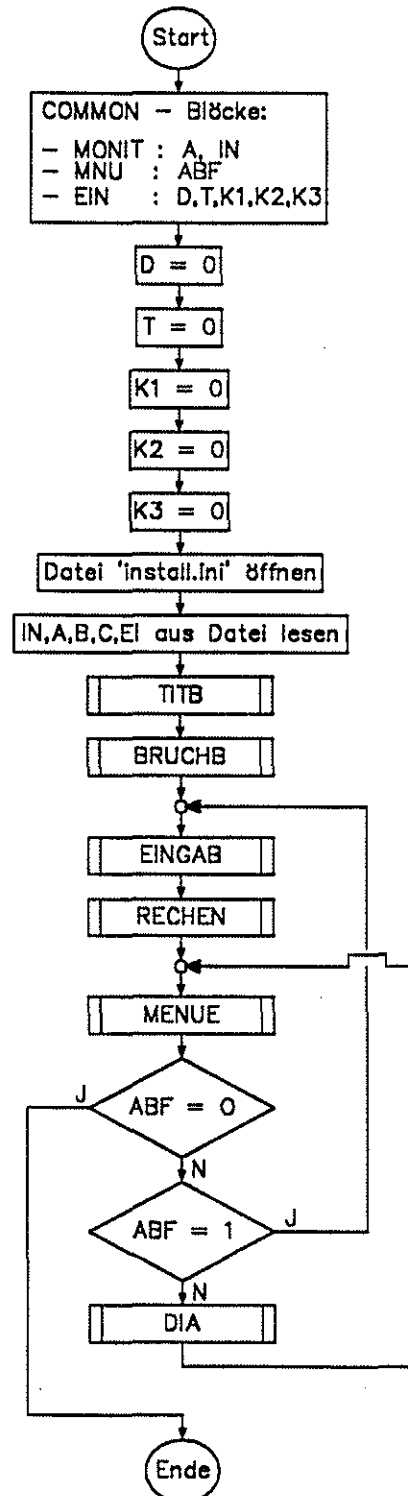


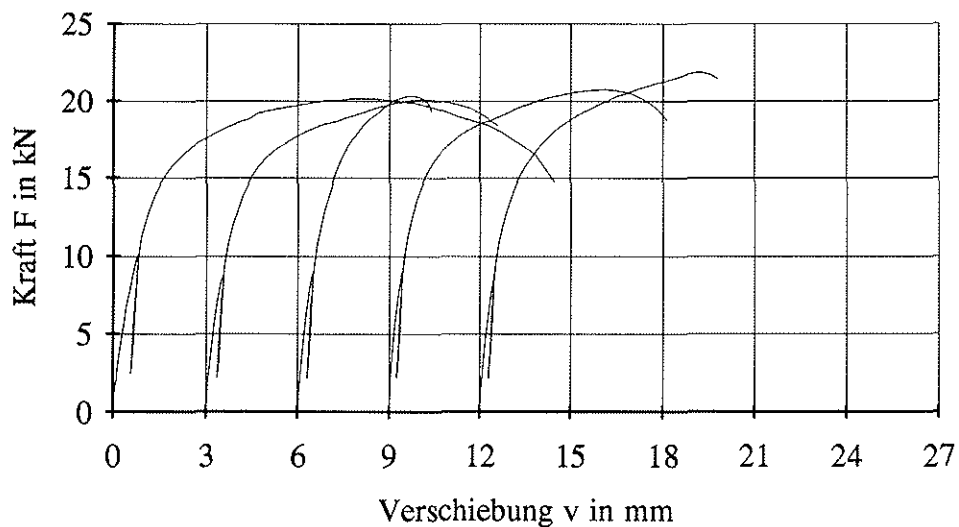
Last-Verformungsdiagramme Versuche M16/S-86,88,89,90
 (Querbelastung rechtwinklig zur Faserrichtung $F_N = 7,5$ kN)

**Programm zur Berechnung der Spaltbeanspruchung von in Faser-
richtung beanspruchten Verbindungen mit dünnen Hölzern**

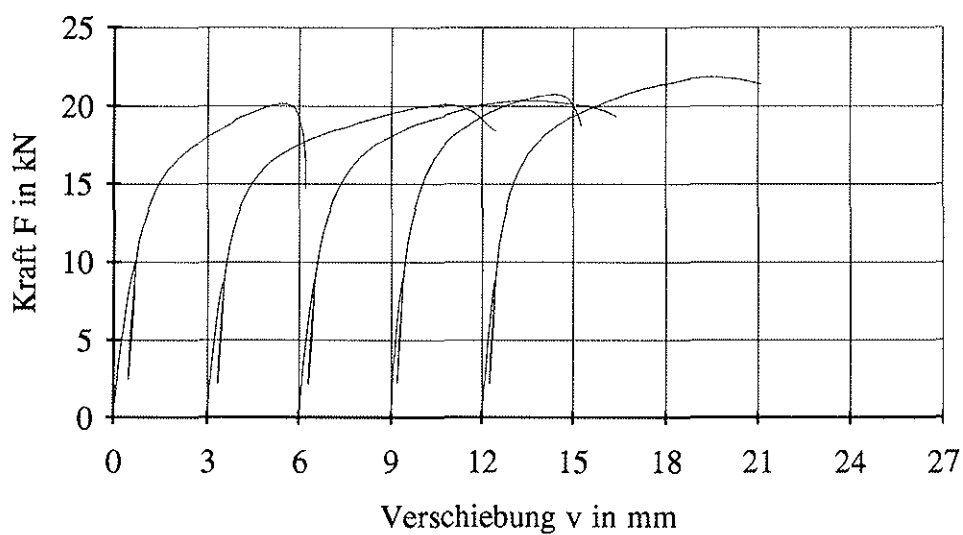
Flußdiagramm

Hauptprogramm





Oberer Anschluß

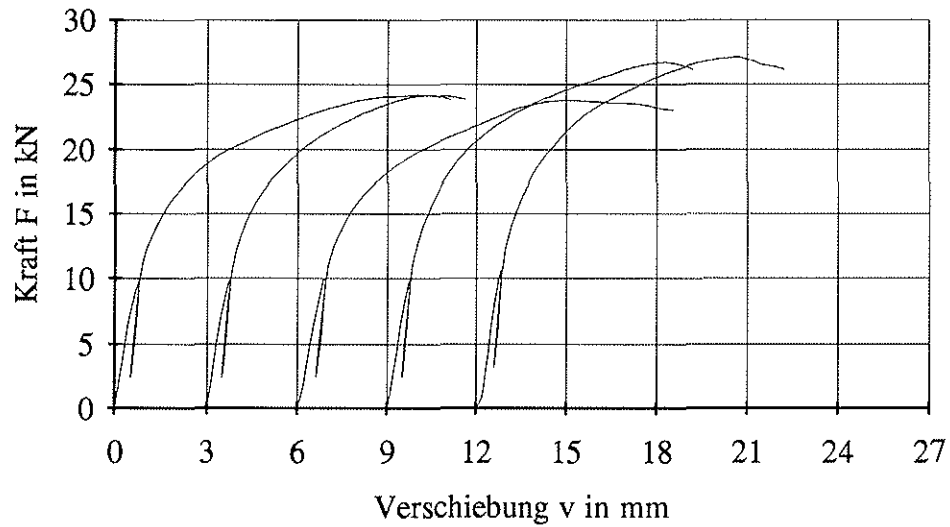


Unterer Anschluß

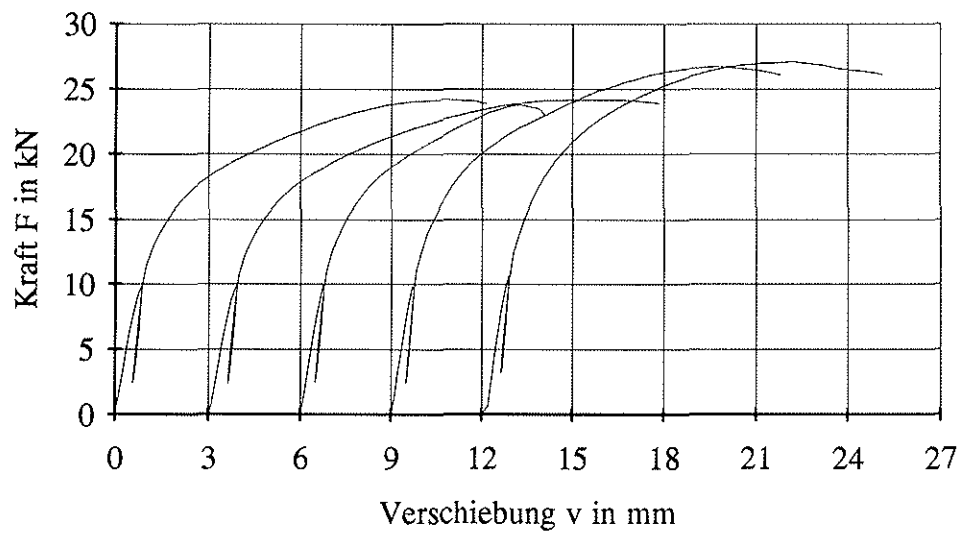
Last-Verschiebungsdiagramme

Versuchsreihe: S 8/4/6

Zugscherversuche mit Buche-Furniersperrholz verstärkten Holz-Holz-Verbindungen



Oberer Anschluß

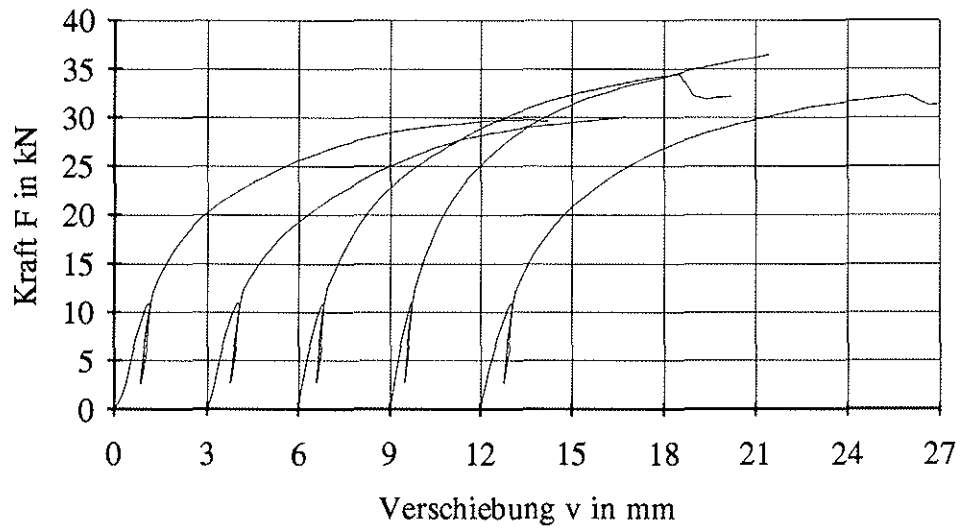


Unterer Anschluß

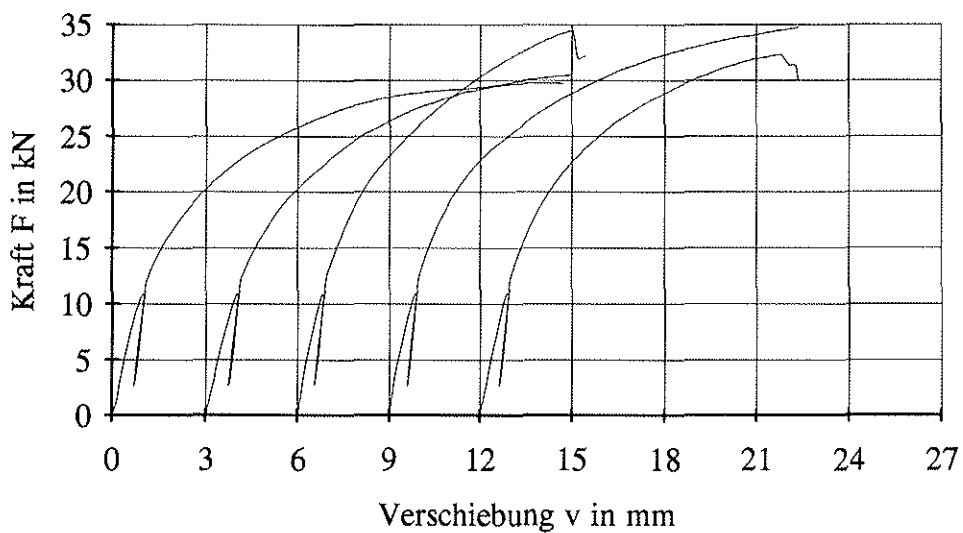
Last-Verschiebungsdiagramme

Versuchsreihe: S 8/6/6

Zugscherversuche mit Buche-Furniersperrholz verstärkten Holz-Holz-Verbindungen



Oberer Anschluß

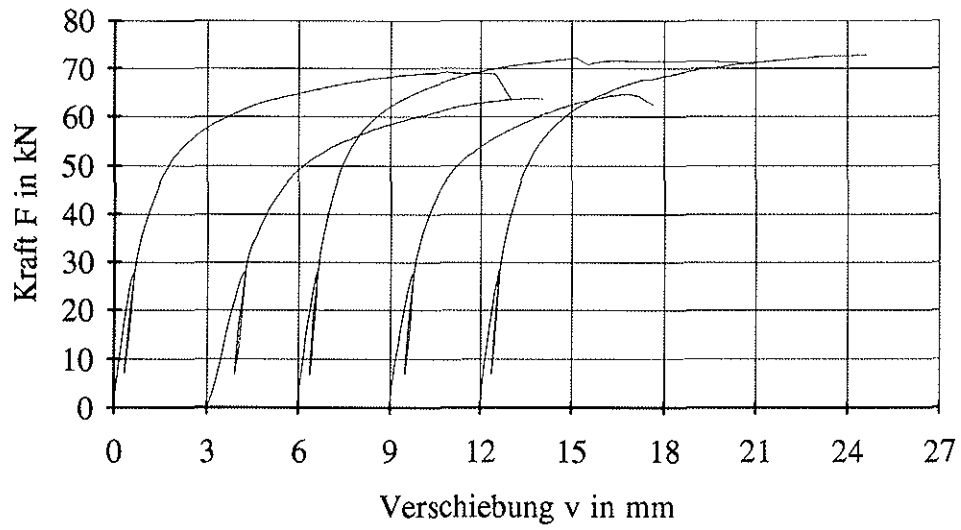


Unterer Anschluß

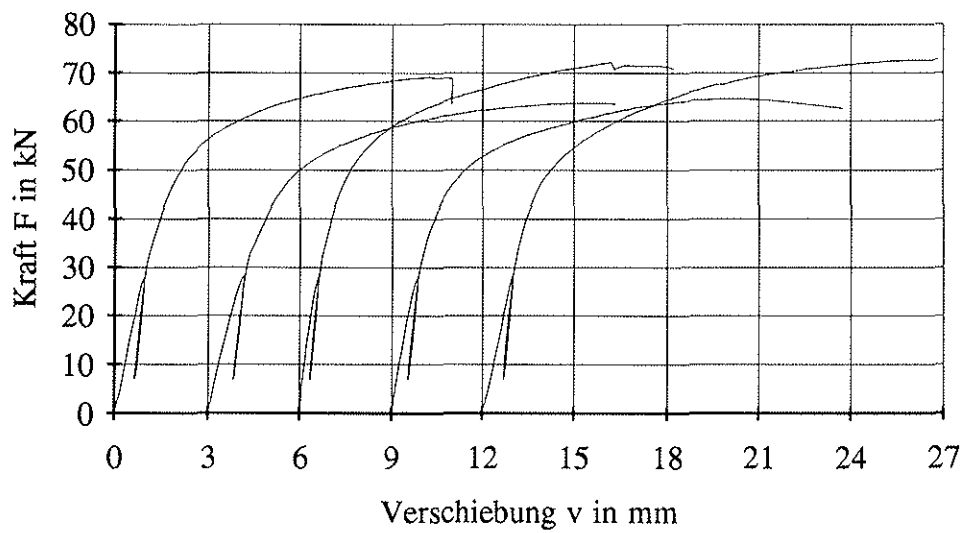
Last-Verschiebungsdiagramme

Versuchsreihe: S 8/8/6

Zugscherversuche mit Buche-Furniersperrholz verstärkten Holz-Holz-Verbindungen



Oberer Anschluß

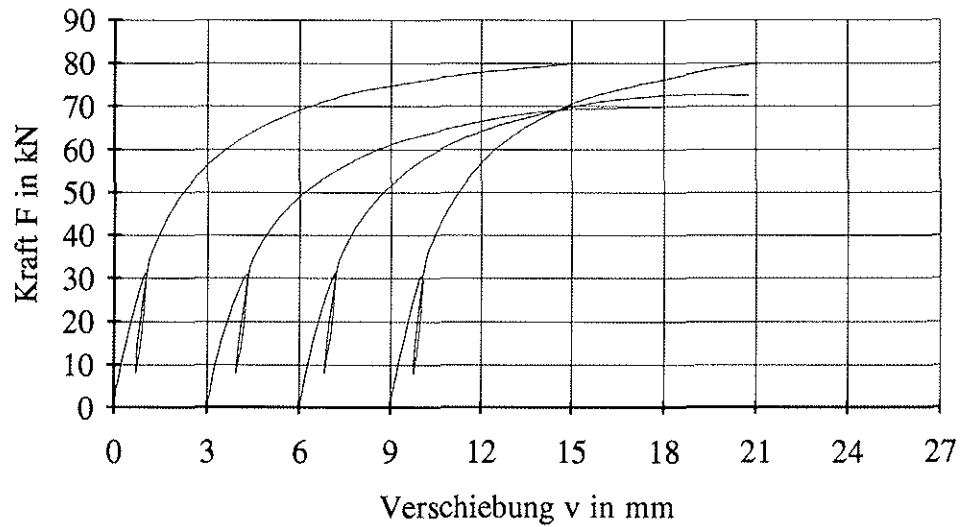


Unterer Anschluß

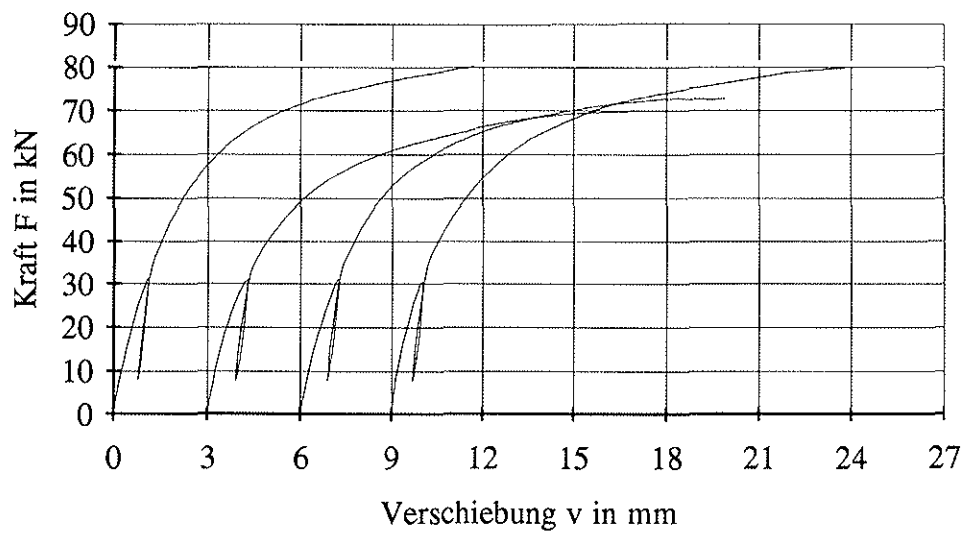
Last-Verschiebungsdiagramme

Versuchsreihe: S 16/4/6

Zugscherversuche mit Buche-Furniersperrholz verstärkten Holz-Holz-Verbindungen



Oberer Anschluß

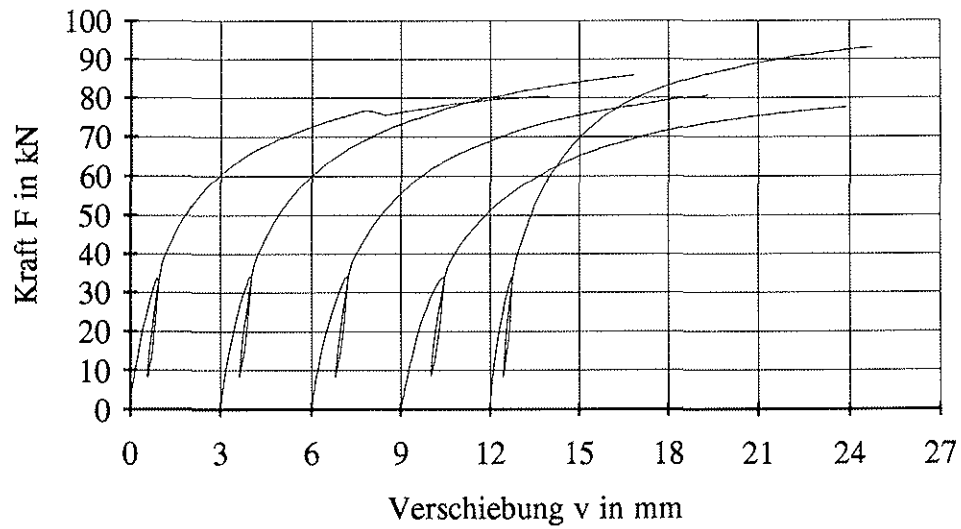


Unterer Anschluß

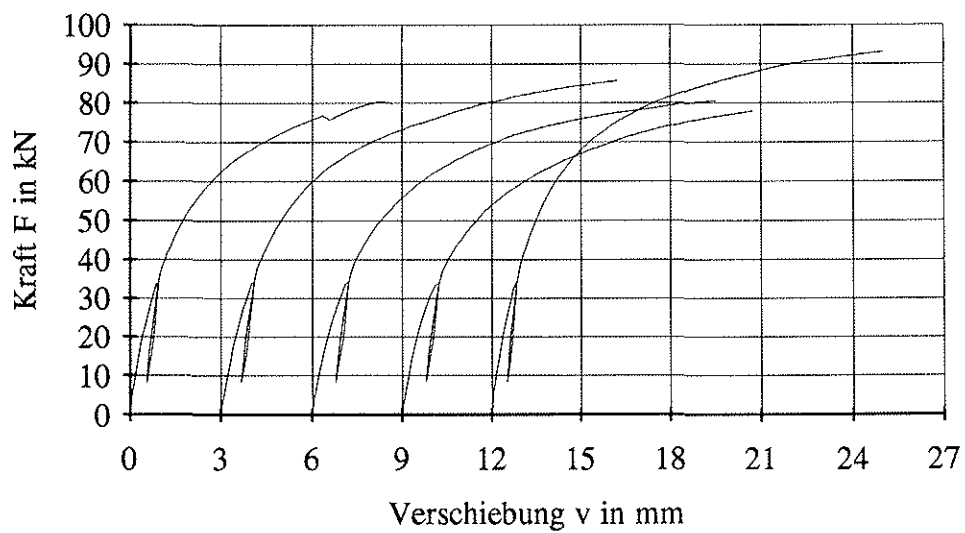
Last-Verschiebungsdiagramme

Versuchsreihe: S 16/6/6

Zugscherversuche mit Buche-Furniersperrholz verstärkten Holz-Holz-Verbindungen



Oberer Anschluß

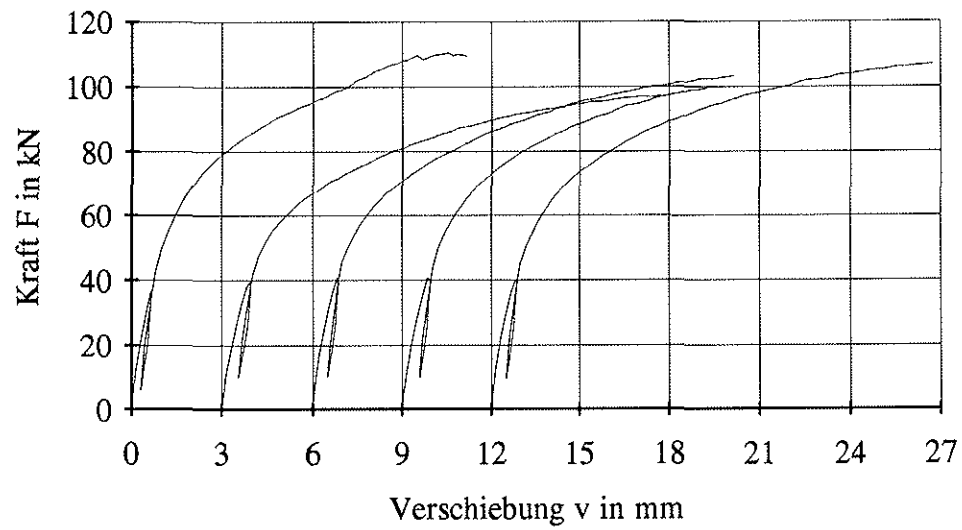


Unterer Anschluß

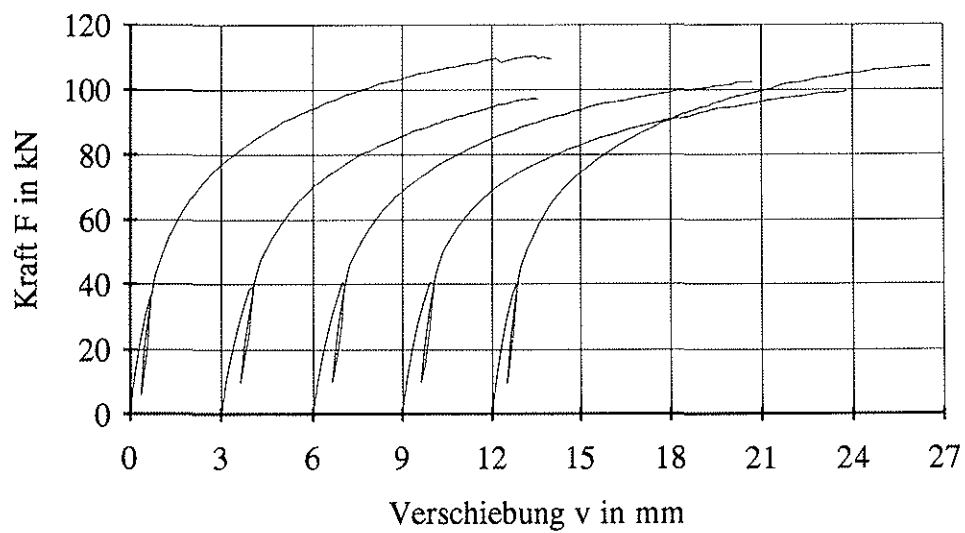
Last-Verschiebungsdiagramme

Versuchsreihe: S 16/6/10

Zugscherversuche mit Buche-Furniersperrholz verstärkten Holz-Holz-Verbindungen



Oberer Anschluß

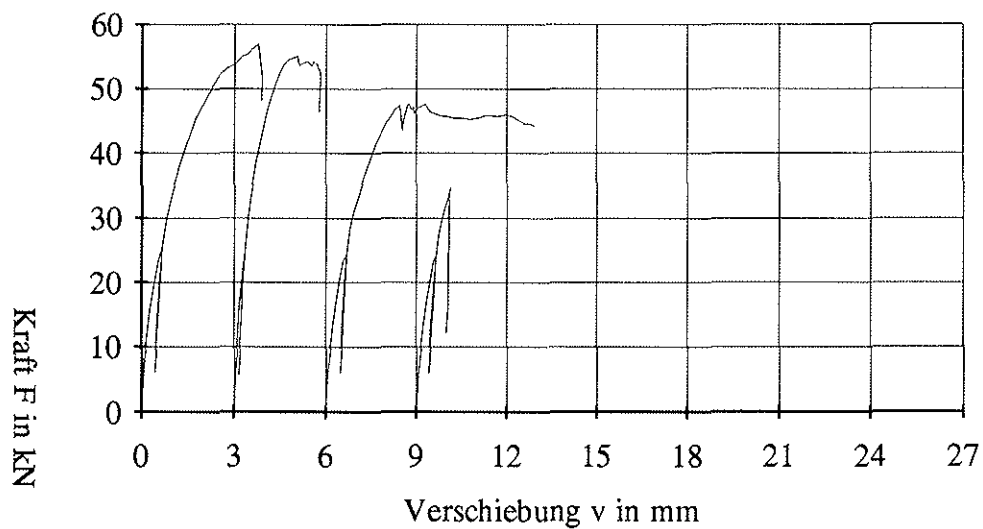


Unterer Anschluß

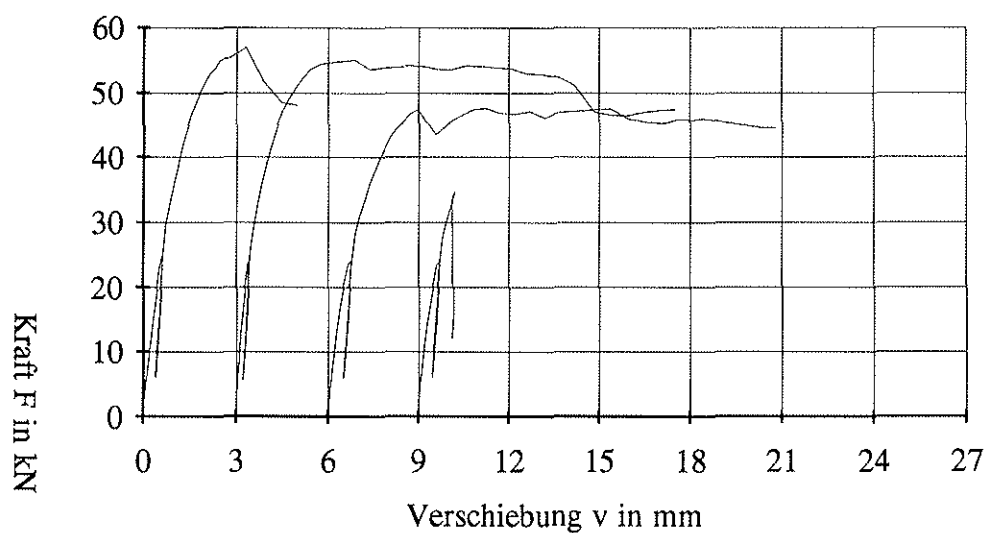
Last-Verschiebungsdiagramme

Versuchsreihe: S 16/6/15

Zugscherversuche mit Buche-Furniersperrholz verstärkten Holz-Holz-Verbindungen



Oberer Anschluß

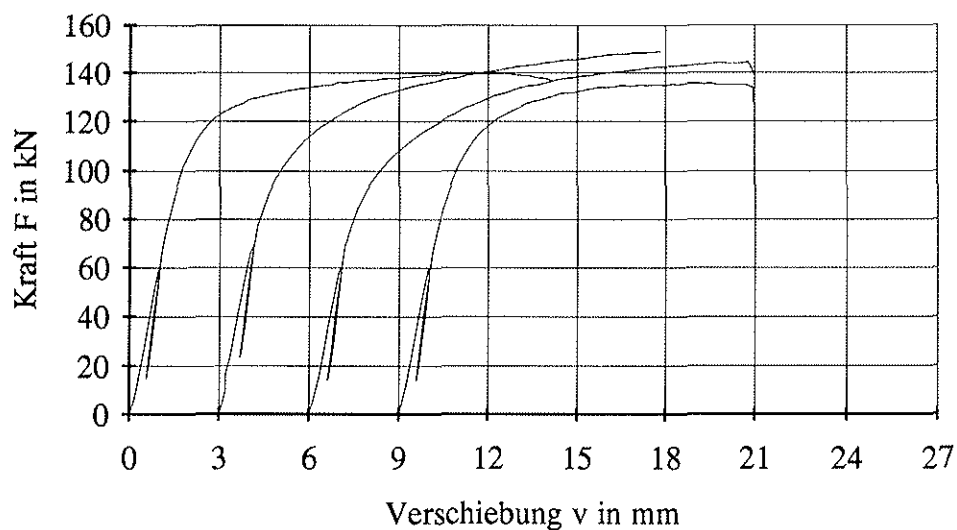


Unterer Anschluß

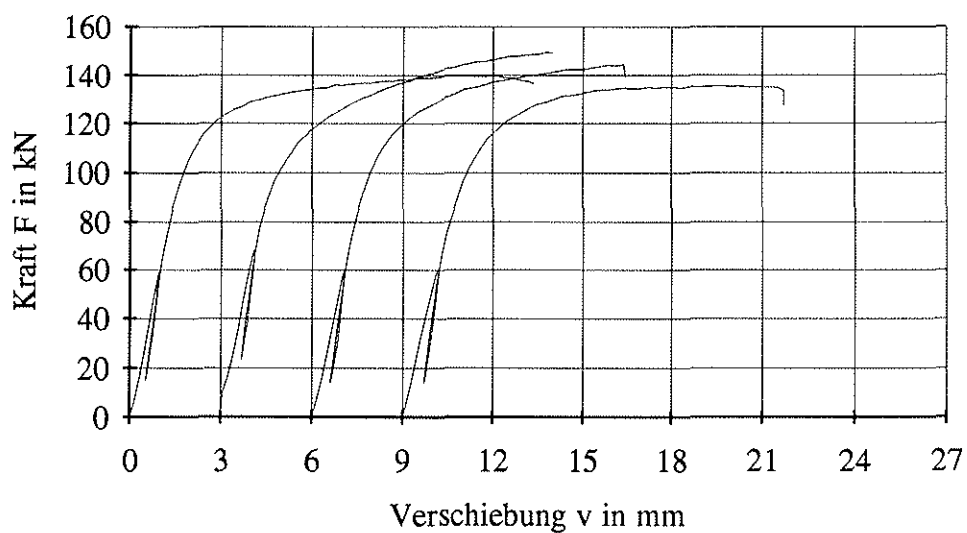
Last-Verschiebungsdiagramme

Versuchsreihe: S 16/2/6

Zugscherversuche mit Buche-Furniersperrholz verstärkten Holz-Holz-Verbindungen



Oberer Anschluß

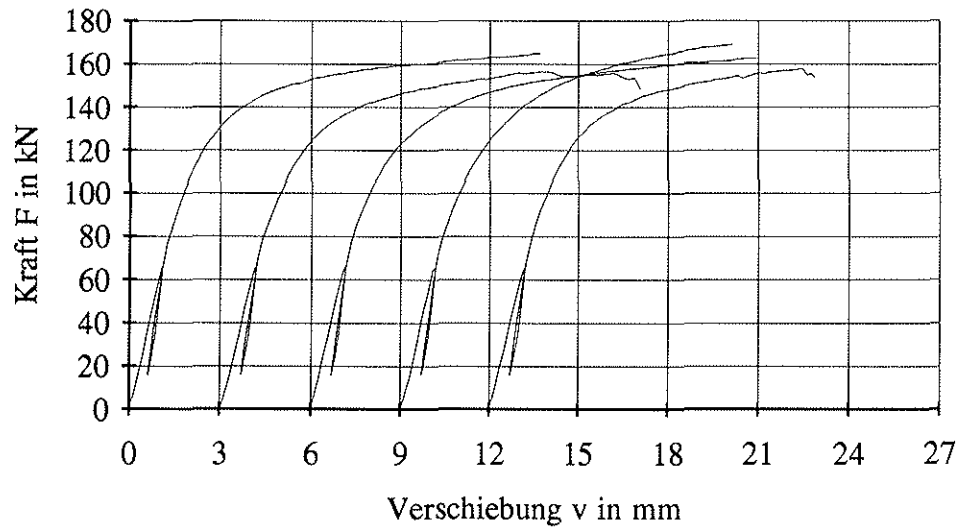


Unterer Anschluß

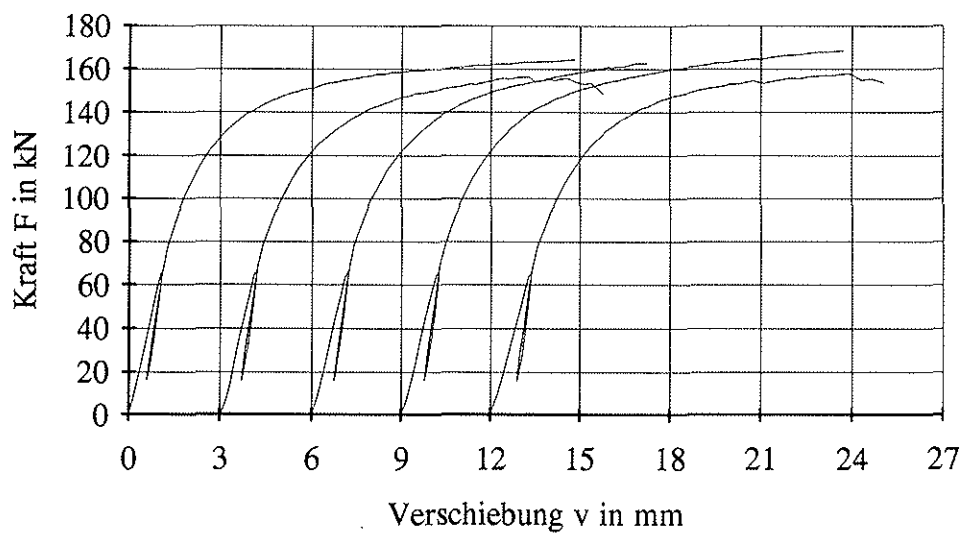
Last-Verschiebungsdiagramme

Versuchsreihe: S 24/4/10

Zugscherversuche mit Buche-Furniersperrholz verstärkten Holz-Holz-Verbindungen



Oberer Anschluß

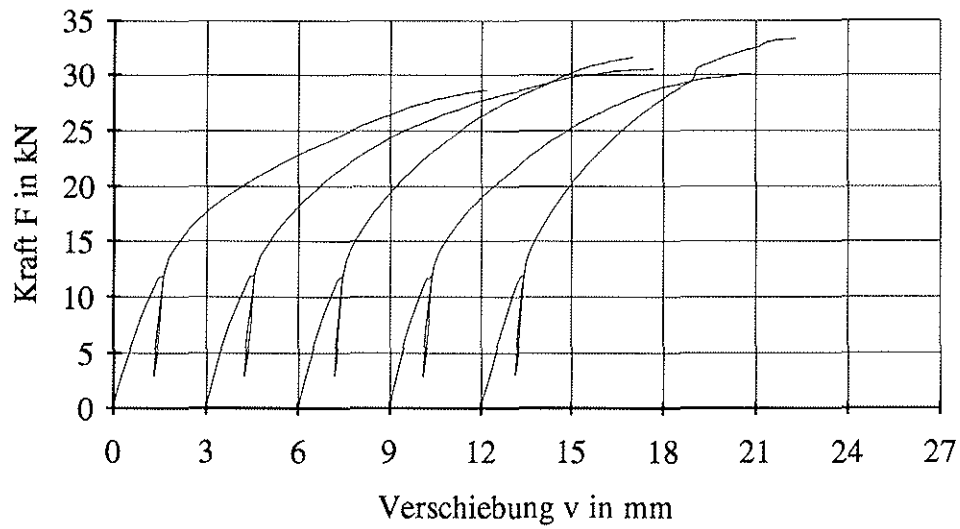


Unterer Anschluß

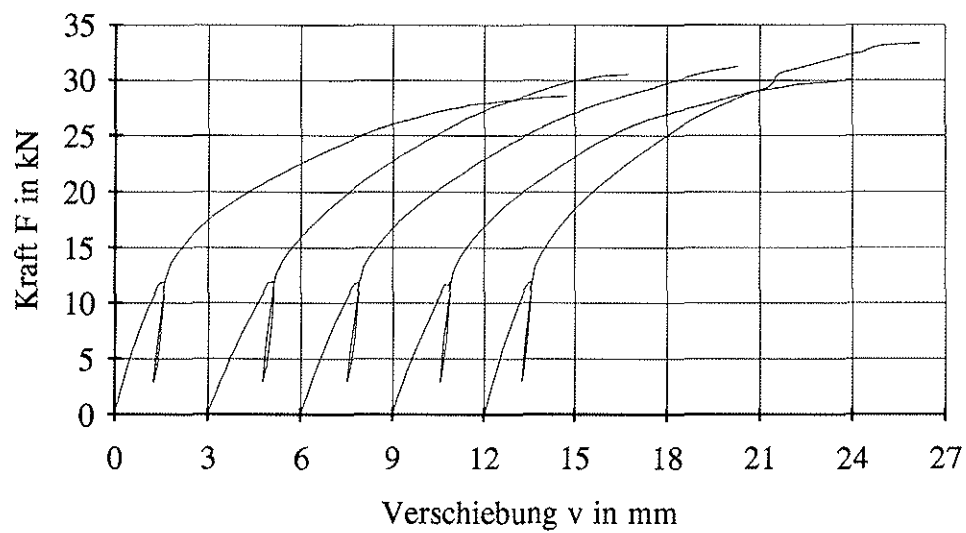
Last-Verschiebungsdiagramme

Versuchsreihe: S 24/6/10

Zugscherversuche mit Buche-Furniersperrholz verstärkten Holz-Holz-Verbindungen



Oberer Anschluß

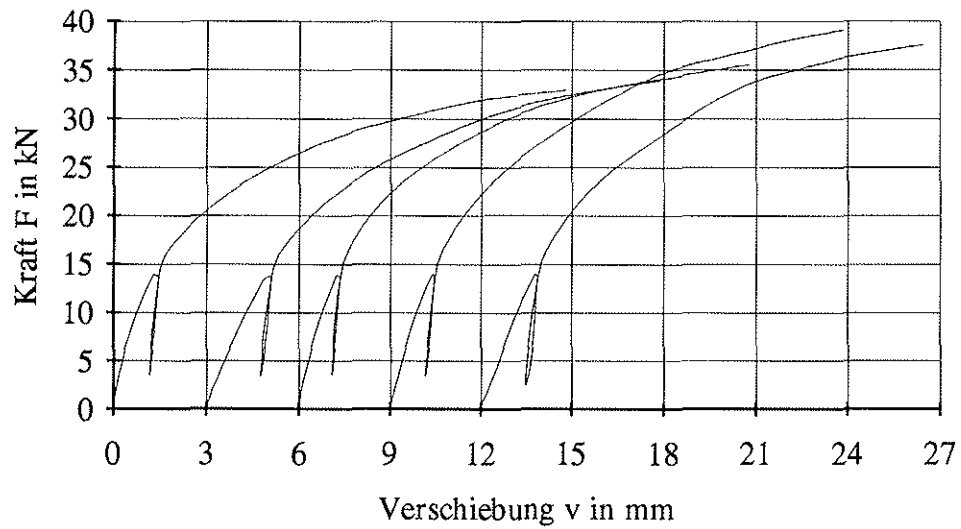


Unterer Anschluß

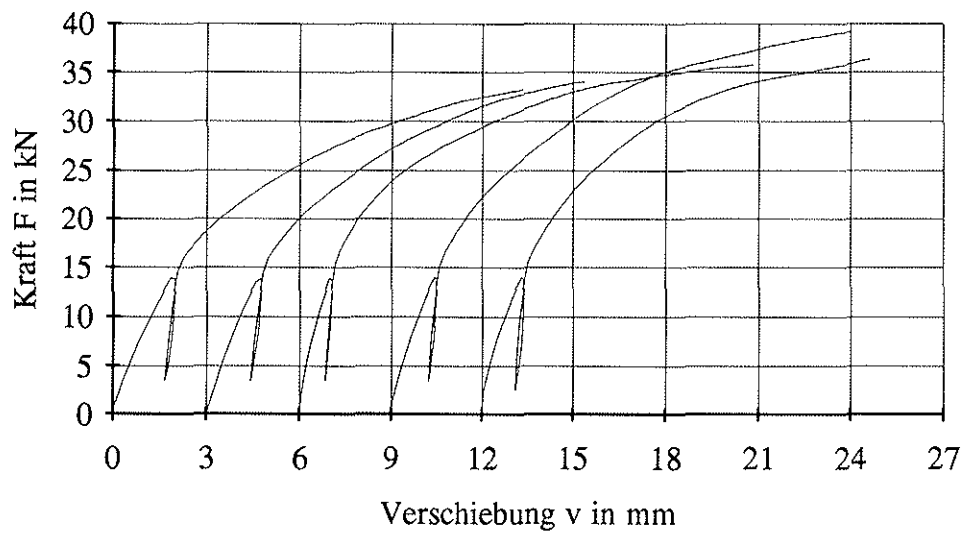
Last-Verschiebungsdiagramme

Versuchsreihe: **M 8/6/6**

Zugscherversuche mit Buche-Furniersperrholz verstärkten Holz-Holz-Verbindungen



Oberer Anschluß

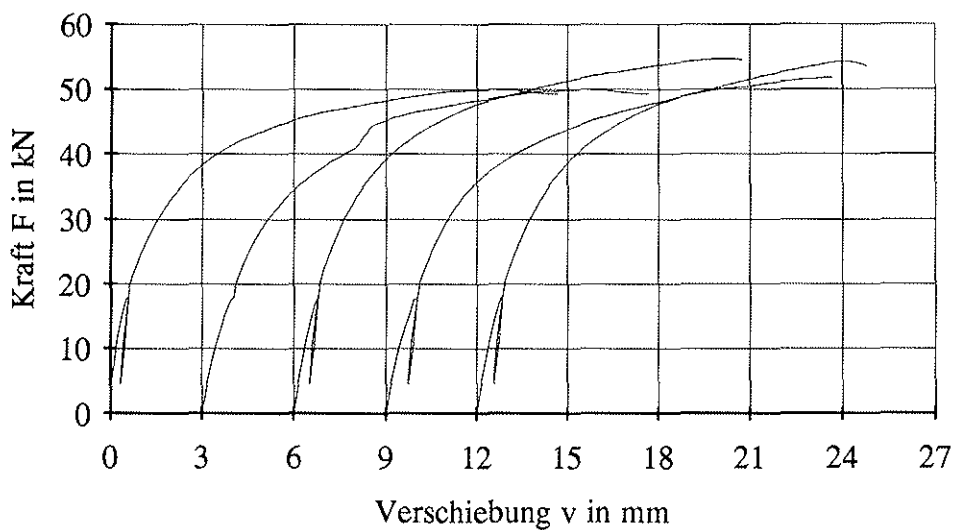


Unterer Anschluß

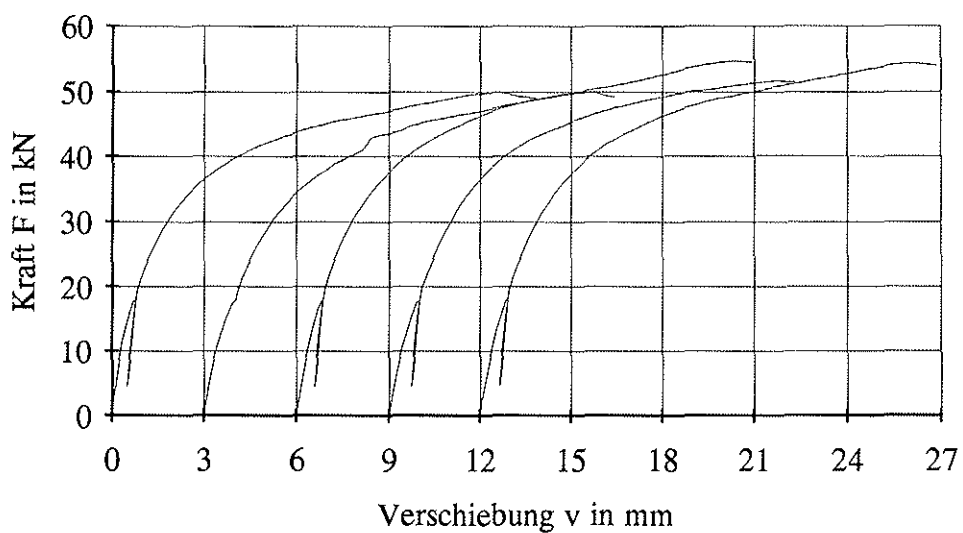
Last-Verschiebungsdiagramme

Versuchsreihe: **M 8/8/6**

Zugscherversuche mit Buche-Furniersperrholz verstärkten Holz-Holz-Verbindungen



Oberer Anschluß

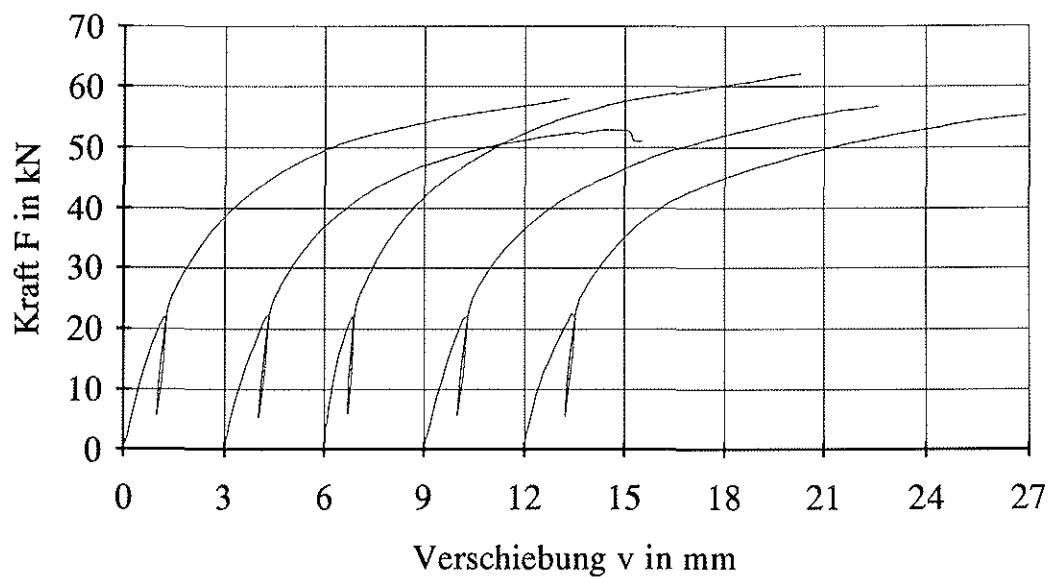


Unterer Anschluß

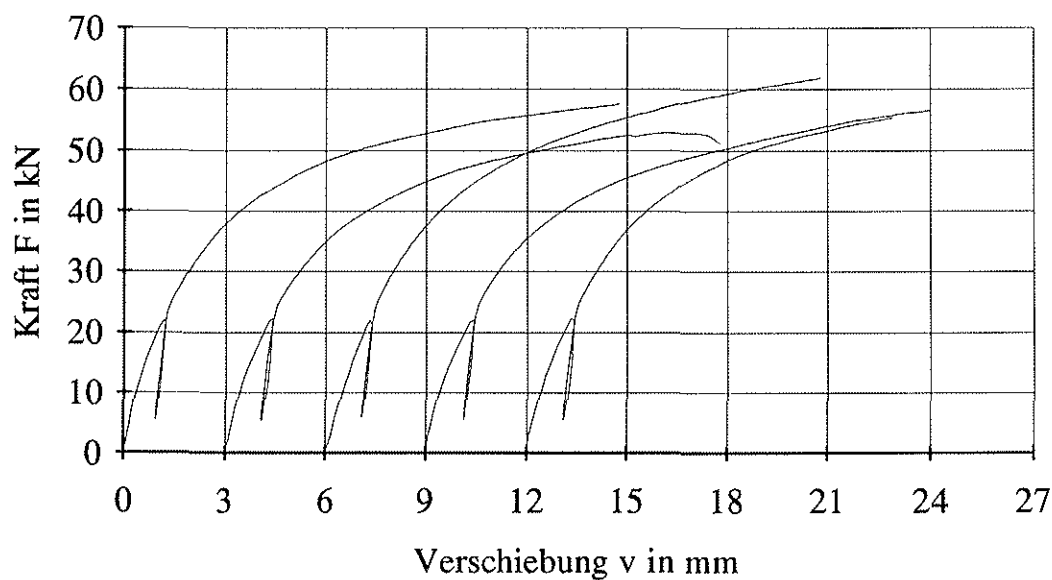
Last-Verschiebungsdiagramme

Versuchsreihe: M 12/4/6

Zugscherversuche mit Buche-Furniersperrholz verstärkten Holz-Holz-Verbindungen



Oberer Anschluß

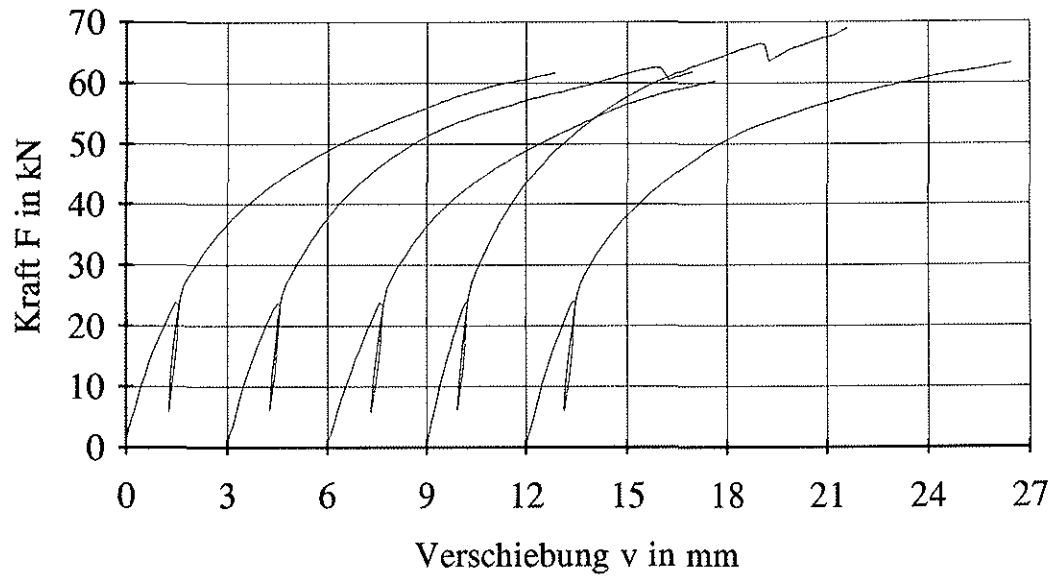


Unterer Anschluß

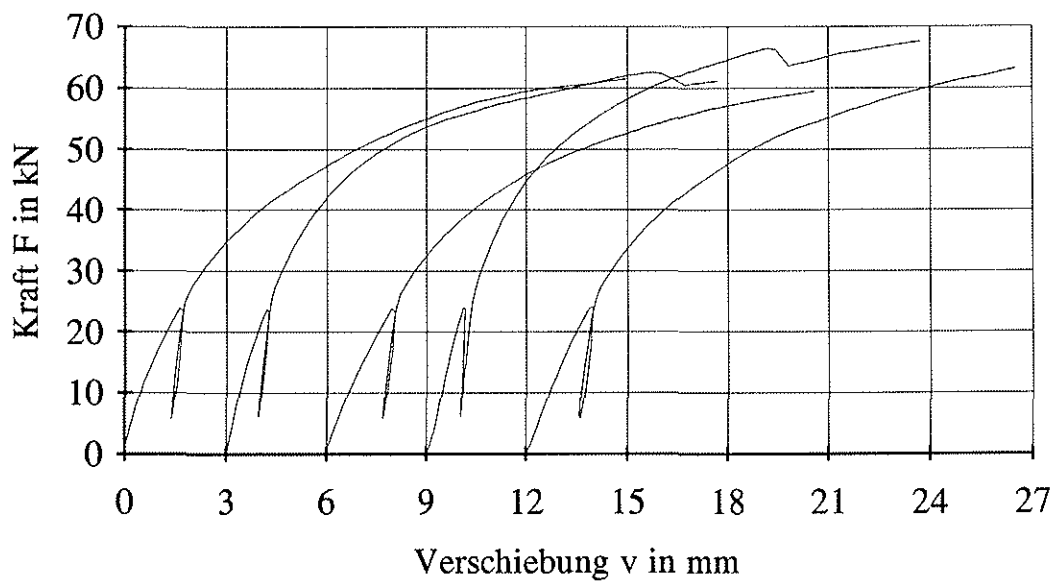
Last-Verschiebungsdiagramme

Versuchsreihe: M 12/6/6

Zugscherversuche mit Buche-Furniersperrholz verstärkten Holz-Holz-Verbindungen

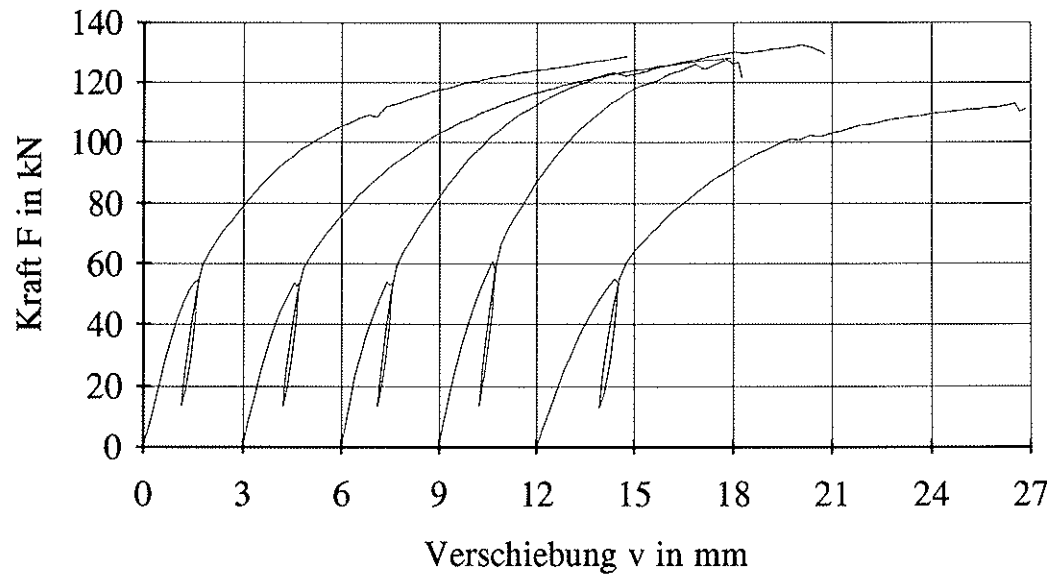


Oberer Anschluß

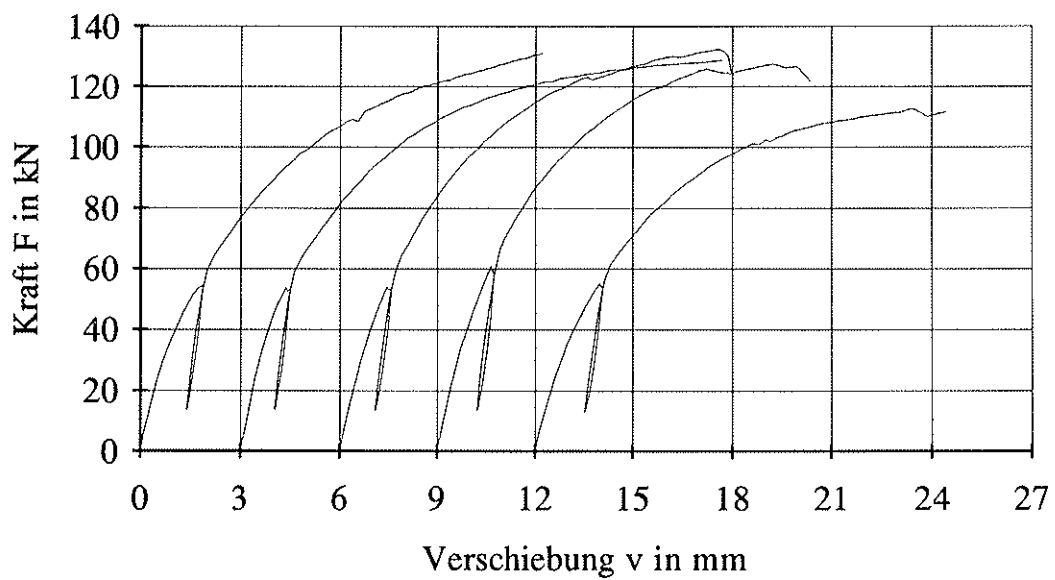


Unterer Anschluß

Last-VerschiebungsdiagrammeVersuchsreihe: **M 12/8/6****Zugscherversuche mit Buche-Furniersperrholz verstärkten Holz-Holz-Verbindungen**



Oberer Anschluß



Unterer Anschluß

Last-Verschiebungsdiagramme

Versuchsreihe: M 20/6/10

Zugscherversuche mit Buche-Furniersperrholz verstärkten Holz-Holz-Verbindungen

Zusammenstellung der Einzelergebnisse der Zugscherversuche mit Buche-Furniersperrholz verstärkten Holz-Holz-Verbindungen (Stabdübel d = 8 mm)

Versuch	d (mm)	λ	t (mm)	F _u (kN)	Anschluß	V _i (mm)	V _{i,mod} (mm)	V _s (mm)	V _e (mm)	V _{06,mod} (mm)	V _{08,mod} (mm)	k _i (kN/mm)	k _s (kN/mm)
S 8/4/6/1	8	4	6	10,1	oben	0,77	0,87	-0,10	0,30	1,07	2,13	3,26	2,88
					unten	0,67	0,75	-0,08	0,29	0,95	1,89	3,75	3,33
S 8/4/6/2	8	4	6	10,1	oben	1,25	1,59	-0,34	0,25	1,91	2,90	1,80	1,41
					unten	1,08	1,35	-0,27	0,26	1,65	2,71	2,09	1,67
S 8/4/6/3	8	4	6	10,2	oben	0,47	0,53	-0,06	0,26	0,82	1,48	4,74	4,24
					unten	0,48	0,55	-0,07	0,29	0,86	1,84	4,65	4,10
S 8/4/6/4	8	4	6	10,4	oben	0,41	0,48	-0,07	0,25	0,77	1,73	5,52	4,71
					unten	0,36	0,42	-0,06	0,25	0,69	1,45	6,30	5,35
S 8/4/6/5	8	4	6	11,0	oben	0,49	0,55	-0,07	0,26	0,98	2,26	4,63	4,08
					unten	0,43	0,45	-0,03	0,25	0,79	1,77	5,28	4,96
S 8/6/6/1	8	6	6	12,3	oben	0,78	0,84	-0,05	0,34	1,50	3,33	3,19	2,99
					unten	0,84	0,89	-0,05	0,35	1,58	3,79	2,97	2,82
S 8/6/6/2	8	6	6	12,3	oben	0,75	0,78	-0,03	0,36	1,33	2,85	3,33	3,22
					unten	0,89	0,89	0,00	0,40	1,61	4,02	2,81	2,80
S 8/6/6/3	8	6	6	12,2	oben	0,86	0,82	0,04	0,40	1,43	3,32	2,92	3,06
					unten	0,74	0,74	0,00	0,39	1,28	2,92	3,39	3,40
S 8/6/6/4	8	6	6	13,4	oben	0,73	0,74	-0,01	0,37	1,51	3,36	3,41	3,36
					unten	0,72	0,75	-0,03	0,36	1,59	3,77	3,48	3,36
S 8/6/6/5	8	6	6	-	oben	-	-	-	-	-	-	-	-
					unten	-	-	-	-	-	-	-	-
S 8/8/6/1	8	8	6	14,9	oben	1,14	1,04	0,10	0,42	2,13	4,69	2,42	2,65
					unten	1,01	1,04	-0,03	0,44	2,24	4,59	2,72	2,64
S 8/8/6/2	8	8	6	15,2	oben	0,96	0,99	-0,03	0,43	2,48	5,46	2,86	2,78
					unten	0,97	1,01	-0,04	0,43	2,27	4,63	2,82	2,72
S 8/8/6/3	8	8	6	17,3	oben	0,75	0,86	-0,11	0,33	2,41	5,27	3,65	3,18
					unten	0,78	0,85	-0,07	0,37	2,27	4,63	3,51	3,23
S 8/8/6/4	8	8	6	18,0	oben	0,70	0,76	-0,06	0,33	2,15	4,67	3,92	3,61
					unten	0,85	0,94	-0,09	0,37	2,52	5,69	3,25	2,92
S 8/8/6/5	8	8	6	16,2	oben	1,03	1,15	-0,12	0,42	2,62	5,44	2,68	2,40
					unten	0,89	0,93	-0,03	0,39	2,10	4,22	3,08	2,97

Zusammenstellung der Einzelergebnisse der Zugscherversuche mit Buche-Furniersperrholz verstärkten Holz-Holz-Verbindungen (Stabdübel d = 16 mm)

Versuch	d (mm)	λ	t (mm)	F_u (kN)	Anschluß	V_i (mm)	$V_{i,mod}$ (mm)	V_s (mm)	V_e (mm)	$V_{06,mod}$ (mm)	$V_{08,mod}$ (mm)	k_i (kN/mm)	k_s (kN/mm)
S 16/2/6/1	16	2	6	28,5	oben	0,58	0,68	-0,10	0,31	1,04	1,81	0,43	8,85
					unten	0,57	0,62	-0,05	0,29	0,91	1,49	0,50	9,63
S 16/2/6/2	16	2	6	27,6	oben	0,31	0,35	-0,04	0,25	0,55	0,97	9,46	7,22
					unten	0,40	0,47	-0,07	0,28	0,73	1,32	5,01	2,80
S 16/2/6/3	16	2	6	23,8	oben	0,59	0,70	-0,11	0,27	0,82	1,42	0,12	8,57
					unten	0,67	0,76	-0,09	0,33	0,90	1,55	8,90	7,86
S 16/2/6/4	16	2	6	25,6	oben	0,58	0,67	-0,09	0,30	0,63	0,78	0,38	8,92
					unten	0,63	0,74	-0,12	0,31	0,70	0,85	9,59	8,08
S 16/2/6/5	16	2	6	24,4	oben	0,78	0,90	-0,12	0,33	1,10	1,86	7,67	6,66
					unten	0,82	0,93	-0,11	0,37	1,14	1,95	7,30	6,45
S 16/4/6/1	16	4	6	34,6	oben	0,58	0,65	-0,07	0,39	1,19	2,51	1,99	0,76
					unten	0,91	0,89	0,02	0,38	1,47	2,77	7,71	7,91
S 16/4/6/2	16	4	6	31,9	oben	1,19	1,15	0,04	0,46	1,69	3,28	5,89	6,09
					unten	1,11	1,18	-0,07	0,49	1,72	3,21	6,29	5,92
S 16/4/6/3	16	4	6	36,1	oben	0,61	0,71	-0,11	0,32	1,19	2,29	1,57	9,85
					unten	0,60	0,70	-0,09	0,37	1,27	2,85	1,62	0,04
S 16/4/6/4	16	4	6	32,3	oben	0,75	0,86	-0,11	0,38	1,30	2,64	9,30	8,10
					unten	0,84	0,92	-0,08	0,43	1,38	2,84	8,31	7,58
S 16/4/6/5	16	4	6	36,4	oben	0,59	0,67	-0,08	0,35	1,22	2,51	1,83	0,40
					unten	0,97	0,93	0,03	0,42	1,59	3,81	7,25	7,50
S 16/6/6/1	16	6	6	40,0	oben	0,98	1,09	-0,11	0,46	2,06	4,45	7,90	7,13
					unten	1,06	1,17	-0,11	0,48	2,09	4,00	7,31	6,62
S 16/6/6/2	16	6	6	35,0	oben	1,29	1,47	-0,19	0,53	2,23	4,53	6,02	5,25
					unten	1,28	1,48	-0,20	0,54	2,25	4,48	6,04	5,24
S 16/6/6/3	16	6	6	36,4	oben	1,13	1,25	-0,11	0,52	2,07	4,25	6,84	6,21
					unten	1,20	1,35	-0,14	0,53	2,11	4,04	6,44	5,75
S 16/6/6/4	16	6	6	40,0	oben	1,08	1,20	-0,12	0,42	2,19	4,34	7,18	6,48
					unten	1,08	1,29	-0,20	0,48	2,45	4,91	7,16	6,02
S 16/6/6/5	16	6	6	42,4	oben	1,18	1,44	-0,26	0,38	2,51	4,90	6,57	5,37
					unten	0,94	1,16	-0,22	0,38	1,90	3,40	8,24	6,69

Zusammenstellung der Einzelergebnisse der Zugscherversuche mit Buche-Furniersperrholz verstärkten Holz-Holz-Verbindungen (Stabdübel d = 16 mm)

Versuch	d (mm)	λ	t (mm)	F_u (kN)	Anschluß	v_i (mm)	$v_{i,mod}$ (mm)	v_s (mm)	v_e (mm)	$v_{06,mod}$ (mm)	$v_{08,mod}$ (mm)	k_i (kN/mm)	k_s (kN/mm)
S 16/6/10/1	16	6	10	40,2	oben	0,90	1,04	-0,14	0,50	1,78	3,74	9,45	8,16
					unten	0,88	1,00	-0,12	0,51	1,70	3,35	9,68	8,50
S 16/6/10/2	16	6	10	43,2	oben	0,93	1,08	-0,14	0,53	2,14	4,84	9,11	7,90
					unten	1,00	1,12	-0,12	0,56	2,18	4,81	8,47	7,60
S 16/6/10/3	16	6	10	40,6	oben	1,13	1,31	-0,17	0,56	2,29	4,86	7,50	6,50
					unten	1,11	1,27	-0,15	0,56	2,22	4,78	7,64	6,71
S 16/6/10/4	16	6	10	38,8	oben	1,48	1,68	-0,21	0,60	2,67	5,32	5,76	5,05
					unten	1,23	1,43	-0,20	0,57	2,33	4,84	6,90	5,94
S 16/6/10/5	16	6	10	46,6	oben	0,72	0,85	-0,13	0,37	1,80	3,81	1,82	9,98
					unten	0,80	0,92	-0,12	0,37	1,93	4,19	0,64	9,28
S 16/6/15/1	16	6	15	55,2	oben	0,65	0,73	-0,08	0,51	1,85	4,45	4,22	2,69
					unten	0,67	0,76	-0,09	0,49	2,00	4,77	3,79	2,16
S 16/6/15/2	16	6	15	48,6	oben	0,98	1,14	-0,16	0,58	2,13	5,27	0,25	8,78
					unten	1,05	1,23	-0,18	0,60	2,10	4,34	9,50	8,15
S 16/6/15/3	16	6	15	51,4	oben	0,78	0,91	-0,13	0,50	2,00	5,12	2,84	0,94
					unten	0,96	1,10	-0,14	0,58	2,24	5,30	0,44	9,13
S 16/6/15/4	16	6	15	49,7	oben	0,83	0,94	-0,11	0,52	1,72	3,96	2,07	0,63
					unten	0,90	1,03	-0,13	0,60	1,97	5,01	1,17	9,72
S 16/6/15/5	16	6	15	53,5	oben	0,82	0,96	-0,13	0,51	2,09	5,14	2,17	0,47
					unten	0,82	0,94	-0,12	0,51	2,02	4,89	2,25	0,65

Zusammenstellung der Einzelergebnisse der Zugscherversuche mit Buche-Furniersperrholz verstärkten Holz-Holz-Verbindungen (Stabdübel d = 24 mm)

Versuch	d (mm)	λ	t (mm)	F_u (kN)	Anschluß	v_i (mm)	$v_{i,mod}$ (mm)	v_s (mm)	v_e (mm)	$v_{06,mod}$ (mm)	$v_{08,mod}$ (mm)	k_1 (kN/mm)	k_s (kN/mm)
S 24/4/10/1	24	4	10	69,8	oben	0,95	0,86	0,09	0,56	1,25	2,07	5,85	7,42
					unten	0,94	0,88	0,07	0,61	1,27	2,12	5,92	7,12
S 24/4/10/2	24	4	10	69,7	oben	1,18	1,09	0,09	0,56	1,70	3,77	2,68	3,73
					unten	1,17	1,05	0,12	0,56	1,60	3,31	2,79	4,26
S 24/4/10/3	24	4	10	64,4	oben	-	-	-	-	-	-	-	-
					unten	-	-	-	-	-	-	-	-
S 24/4/10/4	24	4	10	72,3	oben	1,04	0,98	0,06	0,60	1,60	3,71	4,36	5,27
					unten	1,07	1,02	0,06	0,64	1,48	2,57	3,97	4,78
S 24/4/10/5	24	4	10	67,8	oben	0,99	0,95	0,04	0,62	1,31	2,21	5,21	5,87
					unten	1,13	1,13	0,00	0,64	1,53	2,46	3,26	3,31
S 24/6/10/1	24	6	10	82,4	oben	0,80	0,67	0,13	0,63	1,33	2,65	0,31	4,22
					unten	0,79	0,70	0,09	0,66	1,38	2,84	0,57	3,35
S 24/6/10/2	24	6	10	78,2	oben	1,12	1,06	0,06	0,67	1,66	2,91	4,46	5,34
					unten	1,11	1,03	0,08	0,65	1,65	3,04	4,59	5,79
S 24/6/10/3	24	6	10	81,3	oben	1,08	1,09	-0,01	0,63	1,79	3,50	5,04	4,95
					unten	1,14	1,10	0,05	0,64	1,80	3,46	4,21	4,80
S 24/6/10/4	24	6	10	84,5	oben	1,09	1,03	0,07	0,50	1,87	3,59	4,87	5,85
					unten	1,16	1,10	0,06	0,51	1,97	3,75	3,97	4,78
S 24/6/10/5	24	6	10	78,9	oben	1,13	1,12	0,01	0,65	1,73	2,96	4,35	4,47
					unten	1,29	1,24	0,05	0,63	1,93	3,37	2,62	3,14

Zusammenstellung der Einzelergebnisse der Zugscherversuche mit Buche-Furniersperrholz verstärkten Holz-Holz-Verbindungen (Gewindestangen M8 und M20)

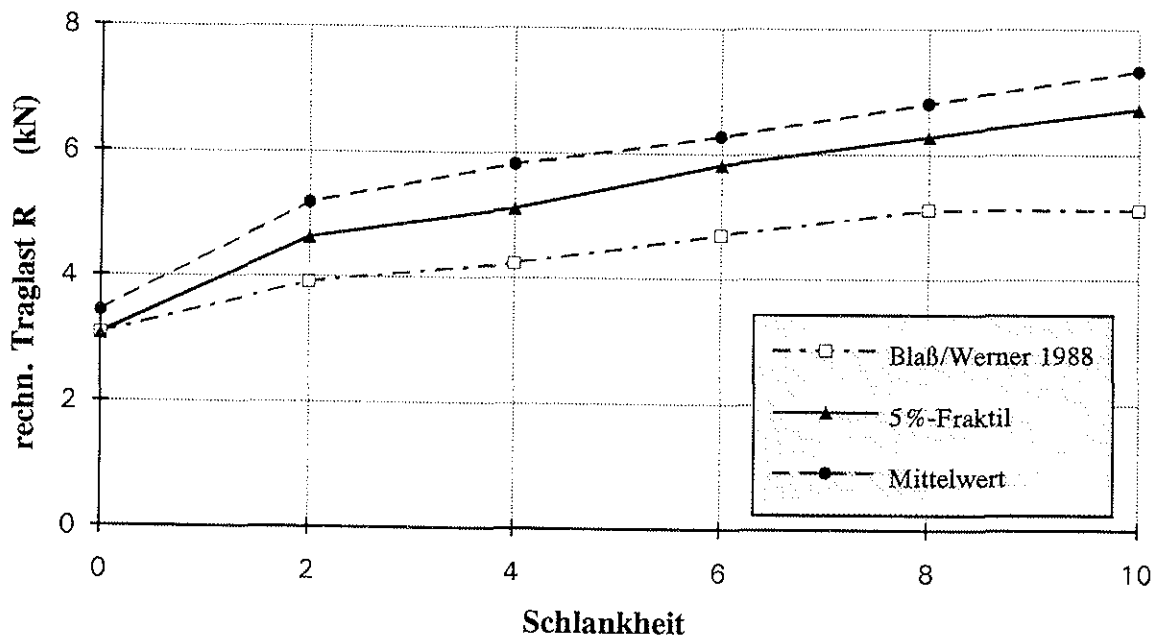
Versuch	d (mm)	λ	t (mm)	F_u (kN)	Anschluß	V_i (mm)	$V_{i,mod}$ (mm)	V_s (mm)	V_e (mm)	$V_{06,mod}$ (mm)	$V_{08,mod}$ (mm)	k_i (kN/mm)	k_s (kN/mm)
M 8/6/6/1	8	6	6	14,3	oben unten	1,49 1,47	1,65 1,61	-0,17 -0,14	0,41 0,45	2,84 2,85	6,07 6,25	2,02 2,03	1,82 1,86
M 8/6/6/2	8	6	6	15,3	oben unten	1,43 1,99	1,61 2,12	-0,17 -0,13	0,44 0,50	3,06 3,82	6,08 7,02	2,09 1,51	1,87 1,42
M 8/6/6/3	8	6	6	15,7	oben unten	1,33 1,77	1,46 1,90	-0,13 -0,13	0,35 0,51	2,86 3,82	5,47 7,48	2,26 1,70	2,05 1,58
M 8/6/6/4	8	6	6	15,0	oben unten	0,65 1,07	0,59 0,98	0,05 0,09	0,40 0,45	1,86 2,46	4,51 5,61	4,64 2,81	5,05 3,07
M 8/6/6/5	8	6	6	16,6	oben unten	1,35 1,52	1,44 1,63	-0,09 -0,11	0,31 0,37	2,95 3,61	5,41 7,02	2,22 1,98	2,09 1,84
M 8/8/6/1	8	8	6	16,6	oben unten	1,30 1,87	1,50 2,07	-0,20 -0,20	0,34 0,37	2,77 3,45	6,02 6,63	2,70 1,87	2,33 1,69
M 8/8/6/2	8	8	6	17,0	oben unten	2,07 1,77	2,26 1,93	-0,19 -0,16	0,45 0,48	3,66 3,24	7,07 6,13	1,69 1,98	1,55 1,81
M 8/8/6/3	8	8	6	17,8	oben unten	1,23 0,98	1,42 1,16	-0,19 -0,18	0,40 0,34	2,74 2,33	5,93 5,48	2,84 3,57	2,46 3,02
M 8/8/6/4	8	8	6	19,6	oben unten	1,37 1,42	1,49 1,62	-0,11 -0,20	0,43 0,39	3,39 3,47	6,83 6,66	2,55 2,47	2,35 2,16
M 8/8/6/5	8	8	6	18,7	oben unten	1,79 1,30	1,84 1,58	-0,05 -0,28	0,55 0,40	3,51 3,03	6,68 5,78	1,95 2,69	1,90 2,22
M 20/6/10/1	20	6	10	64,6	oben unten	1,55 1,75	1,65 2,00	-0,10 -0,25	0,54 0,55	2,87 3,26	5,63 5,82	8,73 7,72	8,19 6,76
M 20/6/10/2	20	6	10	64,1	oben unten	1,51 1,32	1,67 1,45	-0,16 -0,13	0,65 0,61	3,03 2,69	5,88 5,09	8,94 0,25	8,09 9,33
M 20/6/10/3	20	6	10	66,3	oben unten	1,38 1,43	1,54 1,55	-0,16 -0,12	0,61 0,65	2,79 2,69	5,02 4,83	9,79 9,43	8,76 8,69
M 20/6/10/4	20	6	10	63,8	oben unten	1,35 1,38	1,48 1,50	-0,13 -0,13	0,68 0,70	2,08 2,11	3,83 4,04	0,00 9,80	9,15 8,97
M 20/6/10/5	20	6	10	56,5	oben unten	2,32 1,91	2,50 2,14	-0,18 -0,23	0,81 0,76	3,25 2,77	5,73 4,90	5,82 7,07	5,40 6,31

Zusammenstellung der Einzelergebnisse der Zugscherversuche mit Buche-Furniersperrholz verstärkten Holz-Holz-Verbindungen (Gewindestangen M12)

Versuch	d (mm)	λ	t (mm)	F_u (kN)	Anschluß	v_i (mm)	$v_{i,mod}$ (mm)	v_s (mm)	v_e (mm)	$v_{06,mod}$ (mm)	$v_{08,mod}$ (mm)	k_1 (kN/mm)	k_s (kN/mm)
M 12/6/6/1	12	6	06	29,0	oben unten	1,21 1,17	1,30 1,33	-0,09 -0,16	0,40 0,39	2,46 2,57	4,84 5,24	4,55 4,70	4,23 4,15
M 12/6/6/2	12	6	06	26,5	oben unten	1,23 1,29	1,38 1,44	-0,15 -0,15	0,42 0,45	2,25 2,48	4,31 5,04	4,46 4,25	3,99 3,81
M 12/6/6/3	12	6	06	31,0	oben unten	0,84 1,32	1,00 1,42	-0,16 -0,09	0,24 0,39	2,36 2,95	5,09 5,95	6,57 4,16	5,49 3,88
M 12/6/6/4	12	6	06	28,3	oben unten	1,21 1,31	1,31 1,53	-0,10 -0,21	0,43 0,39	2,58 2,82	5,54 5,93	4,54 4,18	4,19 3,60
M 12/6/6/5	12	6	06	27,7	oben unten	1,19 1,09	1,37 1,25	-0,18 -0,16	0,42 0,43	2,53 2,29	5,47 4,44	4,22 4,60	3,66 4,00
M 12/8/6/1	12	8	6	30,8	oben unten	1,28 1,40	1,44 1,60	-0,16 -0,19	0,43 0,47	2,91 3,24	6,02 6,48	4,30 3,92	3,83 3,45
M 12/8/6/2	12	8	6	31,3	oben unten	1,27 1,03	1,38 1,11	-0,11 -0,08	0,45 0,43	2,75 2,21	5,36 4,52	4,32 5,34	3,99 4,95
M 12/8/6/3	12	8	6	30,0	oben unten	1,40 1,74	1,50 1,91	-0,10 -0,17	0,50 0,52	2,81 3,38	5,60 6,52	3,93 3,16	3,67 2,88
M 12/8/6/4	12	8	6	34,2	oben unten	1,01 0,99	1,08 0,91	-0,06 0,08	0,42 0,28	2,54 2,06	5,06 4,32	5,43 5,58	5,11 6,04
M 12/8/6/5	12	8	6	31,9	oben unten	1,12 1,59	1,18 1,61	-0,06 -0,02	0,46 0,52	2,74 3,36	5,78 6,66	4,90 3,45	4,64 3,42
M 12/4/6/1	12	4	6	25,0	oben unten	0,50 0,68	0,60 0,77	-0,11 -0,09	0,29 0,37	1,56 1,80	3,51 4,09	9,04 6,63	7,46 5,83
M 12/4/6/2	12	4	6	21,3	oben unten	0,99 0,99	1,11 1,14	-0,12 -0,15	0,36 0,39	1,54 1,61	2,64 2,69	4,56 4,55	4,07 3,94
M 12/4/6/3	12	4	6	27,4	oben unten	0,74 0,82	0,81 0,91	-0,07 -0,09	0,32 0,35	1,97 2,21	4,32 4,90	6,06 5,51	5,57 4,95
M 12/4/6/4	12	4	6	25,9	oben unten	0,93 0,91	1,03 1,01	-0,10 -0,10	0,38 0,37	2,17 2,16	4,87 4,26	4,84 4,95	4,36 4,44
M 12/4/6/5	12	4	6	27,2	oben unten	0,78 0,84	0,85 0,94	-0,07 -0,10	0,37 0,37	2,06 2,23	4,29 4,80	5,77 5,36	5,27 4,77

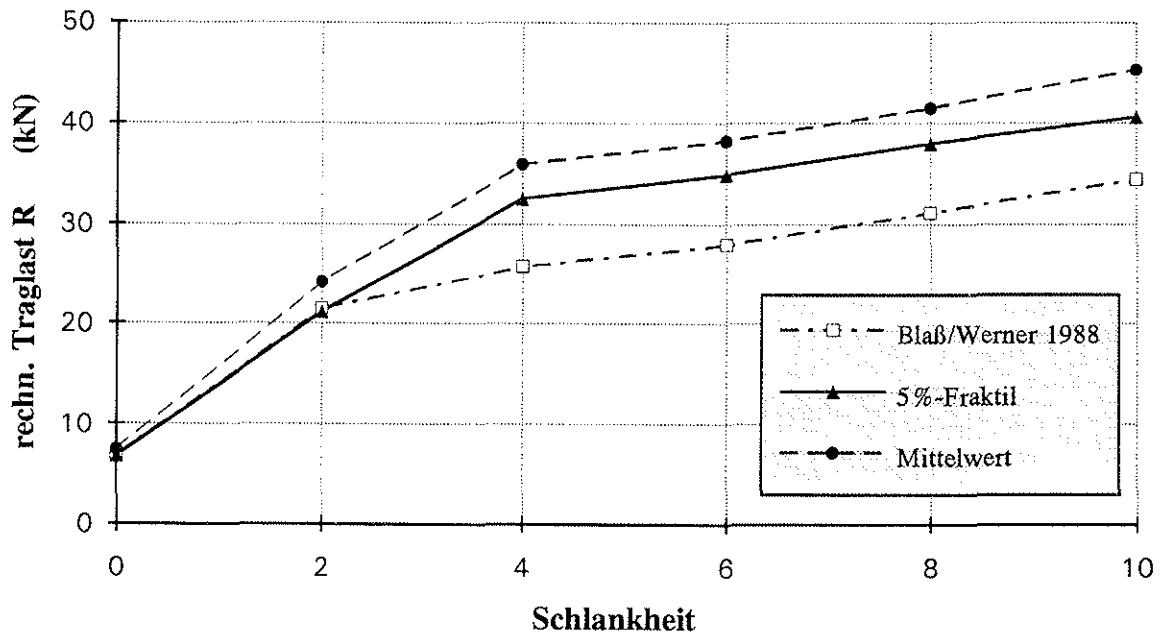
Rechnerische Traglasten von Buche-Furniersperrholz verstärkten Holz-Holz-Verbindungen unter einer Belastung in Faserrichtung

Holzart: Fichte
 Verstärkungswerkstoff: Bau-Furniersperrholz aus Buche
 Verbindungsmittel: Stabdübel aus Rundstahl St 37 K
 Dicke der Verstärkung: $t = t_1 = t_2 = 6 \text{ mm}$



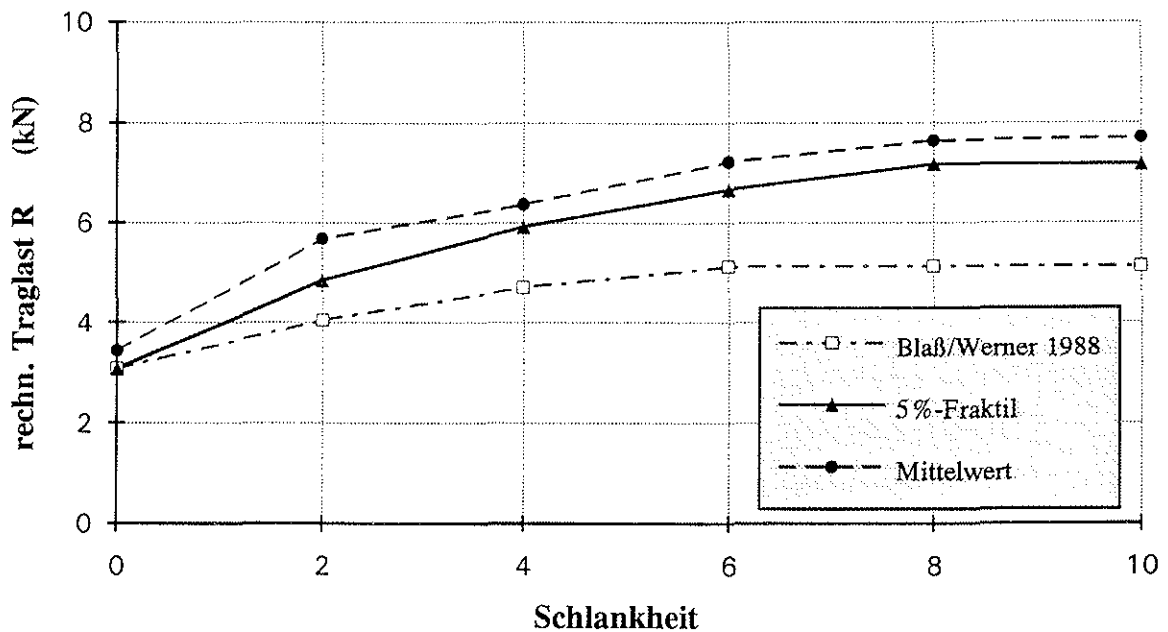
Traglast eines Stabdübels pro Scherfläche in Abhängigkeit von der Schlankheit

($d = 8 \text{ mm}$; $s_1/s_2 = 0,50$; $t = 6 \text{ mm}$)



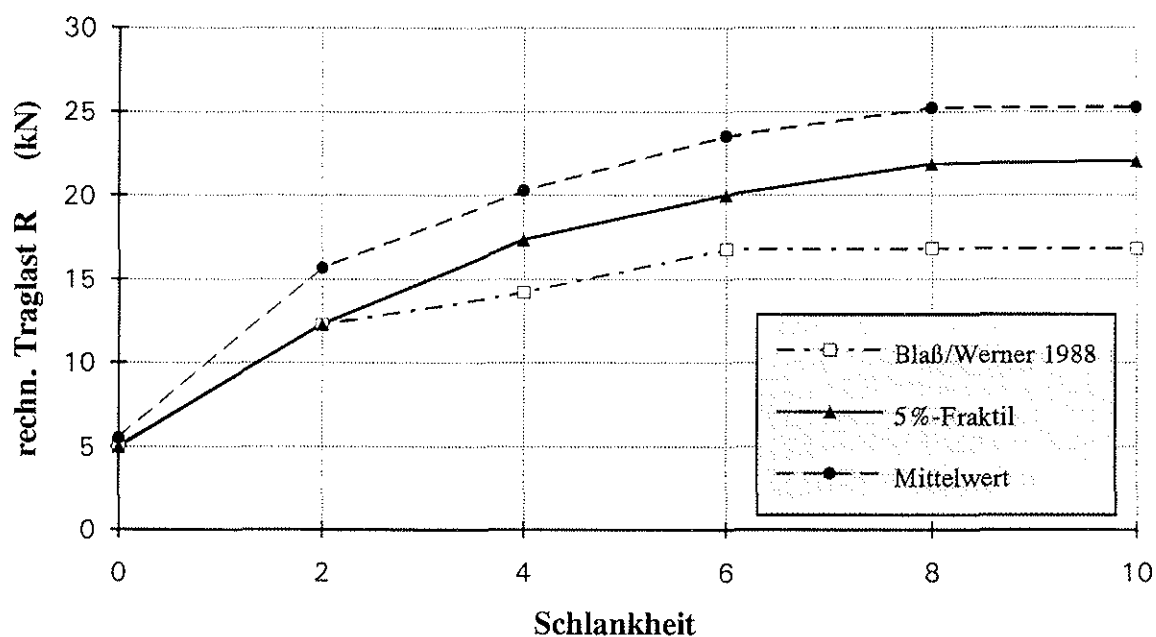
Traglast eines Stabdübels pro Scherfläche in Abhängigkeit von der Schlankheit

($d = 24 \text{ mm}$; $s_1/s_2 = 0,50$; $t = 6 \text{ mm}$)



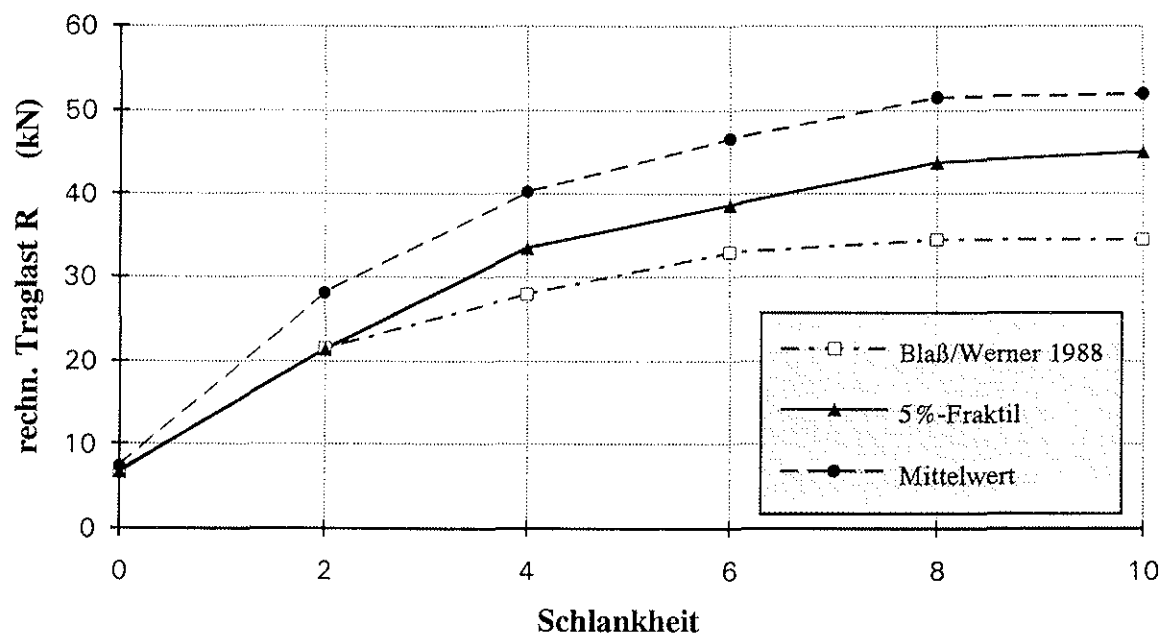
Traglast eines Stabdübels pro Scherfläche in Abhängigkeit von der Schlankheit

($d = 8 \text{ mm}$; $s_1/s_2 = 0,75$; $t = 6 \text{ mm}$)



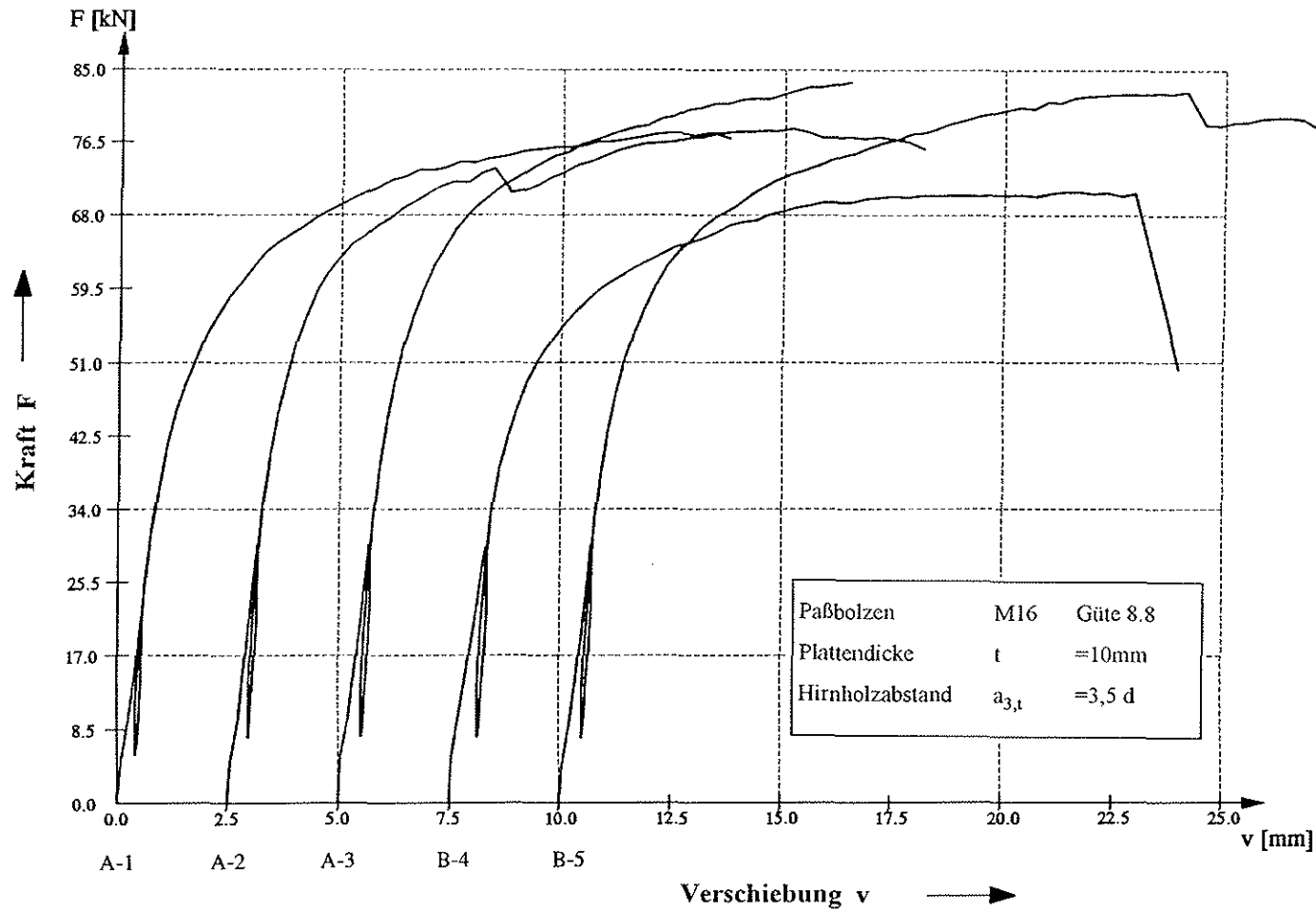
Traglast eines Stabdübels pro Scherfläche in Abhängigkeit von der Schlankheit

(d = 16 mm; $s_1/s_2 = 0,75$; t = 6 mm)



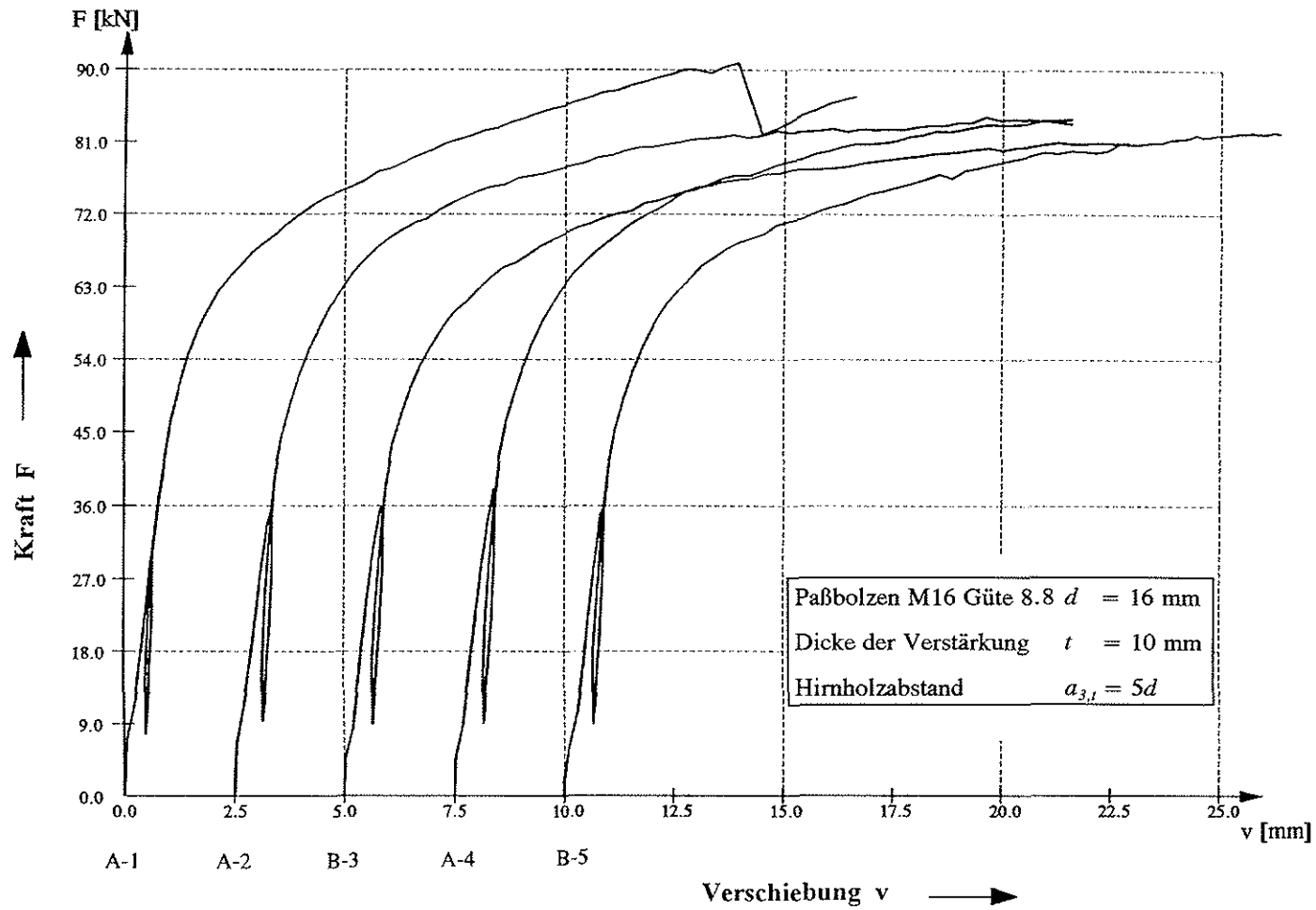
Traglast eines Stabdübels pro Scherfläche in Abhängigkeit von der Schlankheit

(d = 24 mm; $s_1/s_2 = 0,75$; t = 6 mm)



Last-Verschiebungsdiagramme
Versuchsreihe: 3,5d10M16

Zugscherversuche mit Preßfurniersperrholz verstärkten Holz-Holz-Verbindungen



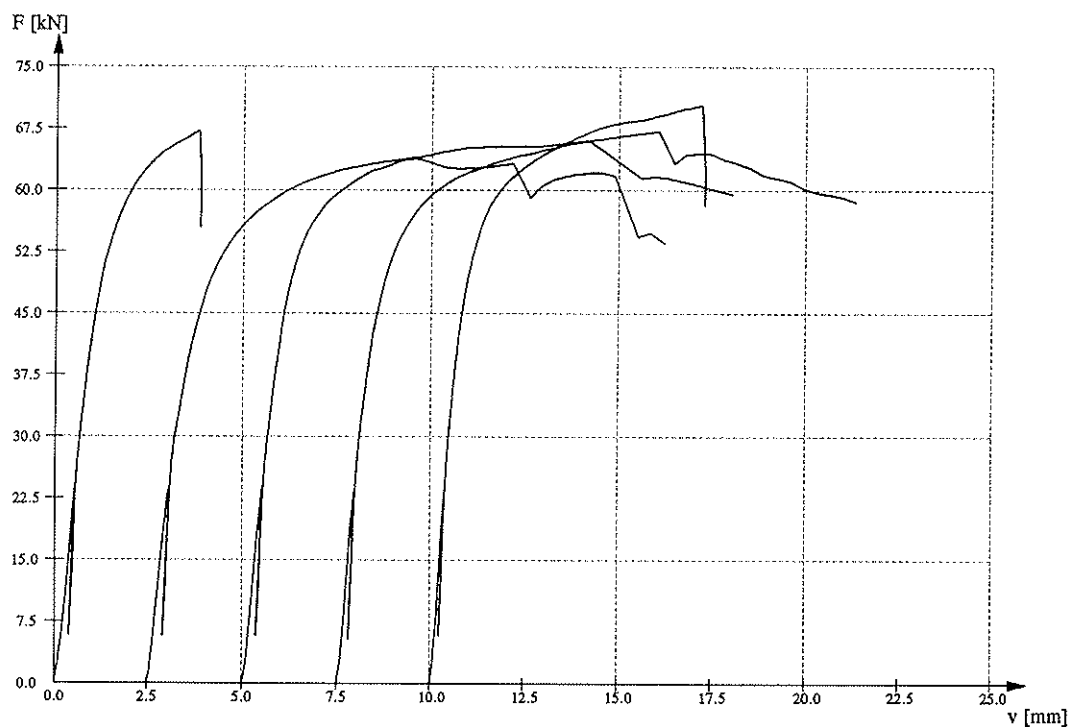
Last-Verschiebungsdiagramme

Versuchsreihe: 5,0d10M16

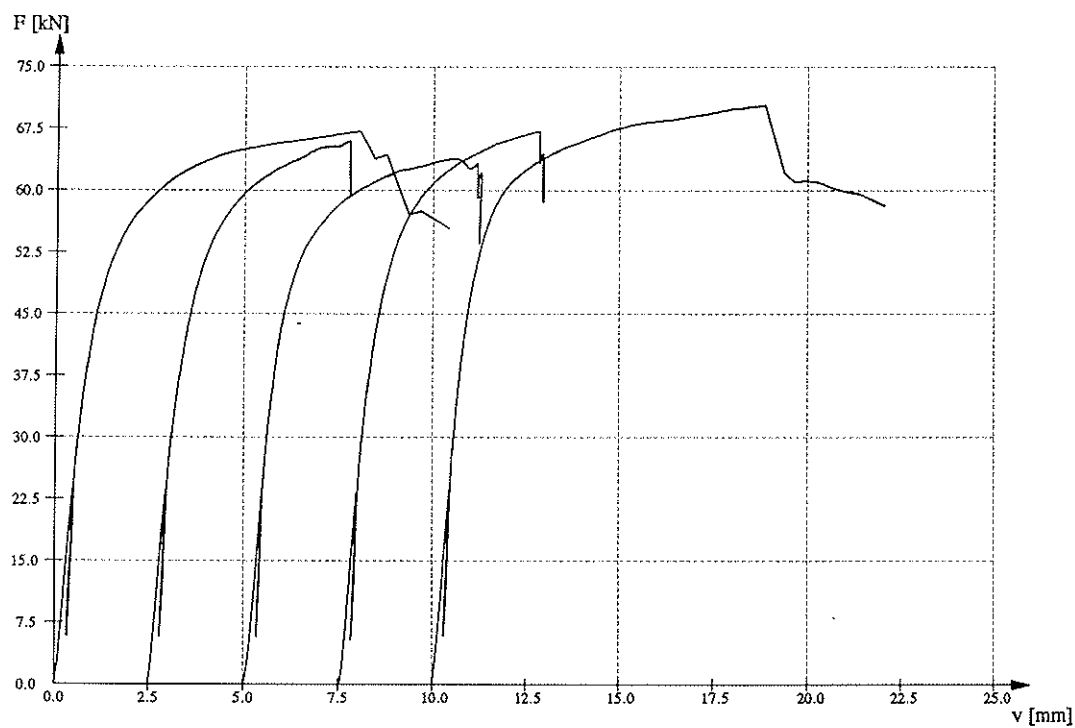
Zugscherversuche mit Preßfurniersperrholz verstärkten Holz-Holz-Verbindungen

Zusammenstellung der Einzelergebnisse der Zugscherversuche mit Preßfurniersperrholz verstärkten Holz-Holz-Verbindungen (Paßbolzen M16 Güte 8.8)

Versuch	t (mm)	d (mm)	F _u (kN)	v _i (mm)	v _{i,mod} (mm)	v _s (mm)	v _e (mm)	v _{06,mod} (mm)	v _{08,mod} (mm)	k _i (kN/mm)	k _s (kN/mm)
3,5d10M16/A-1	10	16	78,2	0,61	0,64	-0,04	0,15	1,47	3,15	19,75	18,65
3,5d10M16/A-2	10	16	77,7	0,67	0,67	0,00	0,27	1,15	2,28	22,52	22,39
3,5d10M16/A-3	10	16	84,0	0,68	0,73	-0,05	0,24	1,32	2,68	22,19	20,66
3,5d10M16/B-4	10	16	71,0	0,83	0,96	-0,12	0,23	1,40	2,88	17,96	15,68
3,5d10M16/B-5	10	16	83,0	0,70	0,71	-0,01	0,28	1,32	3,03	21,38	21,21
5,0d10M16/A-1	10	16	91,5	0,63	0,72	-0,09	0,21	1,52	4,24	23,82	20,89
5,0d10M16/A-2	10	16	83,5	0,79	0,89	-0,09	0,22	1,40	2,98	22,66	20,31
5,0d10M16/B-3	10	16	81,0	0,83	0,82	0,01	0,32	1,30	3,25	21,76	21,92
5,0d10M16/A-4	10	16	84,0	0,81	0,82	-0,02	0,33	1,26	3,01	22,30	21,85
5,0d10M16/B-5	10	16	81,4	0,84	0,81	0,04	0,26	1,28	3,04	21,35	22,28



Oberer Anschluß



Unterer Anschluß

Last-Verschiebungsdiagramme

Versuchsreihe: St 12/40/7

Zugscherversuche mit Buche-Furniersperrholz verstärkten Stahlblech-Holz-Verbindungen mit Stabdübeln

Zusammenstellung der Einzelergebnisse der Zugscherversuche mit Buche-Furniersperrholz verstärkten Stahlblech-Holz-Verbindungen

Versuch	d (mm)	max F (kN)	max v (mm)	Anschluß	v_i (mm)	$v_{i,mod}$ (mm)	v_s (mm)	v_e (mm)	$v_{06,mod}$ (mm)	$v_{08,mod}$ (mm)	k_i (kN/mm)	k_s (kN/mm)
St 12/14/7-1	12	33,6	8,1	oben	0,54	0,49	0,06	0,23	0,86	1,40	11,01	12,27
				unten	0,49	0,46	0,03	0,23	0,86	1,66	12,37	13,13
St 12/14/7-2	12	33,0	11,7	oben	0,57	0,55	0,02	0,23	1,04	2,01	10,52	10,89
				unten	0,48	0,47	0,01	0,24	0,87	1,55	12,55	12,88
St 12/14/7-3	12	31,9	5,7	oben	0,53	0,48	0,05	0,23	0,80	1,30	11,37	12,58
				unten	0,50	0,42	0,07	0,22	0,73	1,34	12,09	14,23
St 12/14/7-4	12	33,6	6,7	oben	0,46	0,42	0,04	0,22	0,81	1,54	13,10	14,44
				unten	0,49	0,43	0,07	0,21	0,81	1,45	12,17	14,11
St 12/14/7-5	12	35,2	8,9	oben	0,50	0,49	0,01	0,10	0,87	1,57	12,06	12,26
				unten	0,44	0,41	0,03	0,23	0,76	1,39	13,67	14,68

