INSTITUT FÜR HOLZFORSCHUNG
DER UNIVERSITÄT MÜNCHEN
8 MÜNCHEN 40, WINZERERSTRASSE 45

F-86/15

Festigkeitsuntersuchung

großflächig

geklebter Holzverbindungen

P. Glos, D. Henrici und H. Horstmann

1989

Festigkeitsuntersuchung großflächig geklebter Holzverbindungen

Abschlußbericht 87501

Die Untersuchung wurde durchgeführt im Auftrag der
Deutschen Gesellschaft für Holzforschung, München
Projekt Nr. F-86/15
und gefördert mit Mitteln der
Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen (AIF)
Projekt Nr. 7127

P. Glos, D. Henrici und H. Horstmann
Institut für Holzforschung
Universität München
1989

Inhaltsverzeichnis Seite

1. Einleitung 4
   1.1 Allgemeines 4
   1.2 Zielsetzung 5
   1.3 Bisheriger Kenntnisstand 5
   1.4 Aufgabenstellung 8

2. Versuchsprogramm 9
   2.1 Gesamtübersicht 9
   2.2 Versuchsprogramm Grundverbindungen 9
   2.3 Versuchsprogramm Knotenverbindungen 11
   2.4 Versuchsprogramm Stabwerke 11
   2.5 Bewitterungsversuche an ausgewählten Grundverbindungen 12

3. Versuche an geleimten Grundverbindungen 13
   3.1 Wahl der Prüfkörperform 13
   3.2 Herstellung der Prüfkörper 14
   3.3 Versuchsdurchführung 15
   3.4 Ergebnisse der Versuche an Grundverbindungen 15
      3.4.1 Allgemeines 15
      3.4.2 Einfluß der Vorholzlänge bei unterschiedlichen Leimflächenlängen L_L 16
      3.4.3 Einfluß der Leimflächenlänge L_L 18
      3.4.4 Einfluß der Leimflächenbreite B_L 19
      3.4.5 Einfluß der Leimflächenform 19
      3.4.6 Einfluß des Verleimungswinkels α 20
      3.4.7 Einfluß der Dicke der Gurthölzer d 20
      3.4.8 Einfluß des Druckstabmaterials 21
      3.4.9 Einfluß der Preßtechnik 21
      3.4.10 Einfluß der Leimart 22

4. Versuche an praxisnahen geleimten Knotenverbindungen 23
   4.1 Wahl der Prüfkörperform 23
   4.2 Herstellung der Prüfkörper 26
   4.3 Versuchsdurchführung 26

Seite

4.4 Ergebnisse der Versuche an Knotenverbindungen 27
4.4.1 Allgemeines 27
4.4.2 Einfluß einer Momentenbeanspruchung der Leimfläche 27
4.4.3 Einfluß der Lagerungsart auf die Festigkeit eines Auflagerknotens 28
4.4.4 Einfluß einer ausmittigen Auflagerung eines 60^0-Auflagerknotens 28
4.4.5 Einfluß einer ausmittigen Auflagerung eines 30^0-Auflagerknotens 29
4.4.6 Einfluß der Art der Kraftübertragung in die Leimfläche 30

5. Versuche an geleimten Stabwerken 32
5.1 Wahl des Tragsystems 32
5.2 Herstellung der Stabwerke 32
5.2.1 Allgemeine Gesichtspunkte 32
5.2.2 Materialauswahl für die Stabwerksherstellung 33
5.2.3 Arbeitsgänge bei der Herstellung 34
5.3 Durchführung der Stabwerksprüfung 36
5.4 Ergebnisse der Stabwerksversuche 37
5.4.1 Bruchlasten und Bruchgeschehen 37
5.4.2 Durchbiegungen der Untergurtknoten 38
5.4.3 Scherfestigkeit der Stabwerksknoten 40

6. Zusammenfassung 44
6.1 Allgemeines 44
6.2 Grundverbindungen 45
6.3 Knotenverbindungen 46
6.4 Stabwerke 47

7. Schrifttum 49

Anlagen:
Anlagen 1 bis 18: Versuche an Grundverbindungen 51
Anlagen 19 bis 26: Versuche an Knotenverbindungen 70
Anlagen 27 bis 46: Versuche an Stabwerken 78

Festigkeitsuntersuchung großflächig geklebter Holzverbindungen

P. Glos, D. Henrici und H. Horstmann

1. Einleitung

1.1 Allgemeines

Leimverbindungen[1] spielen heute neben den mechanischen Verbindungsmitteln im Holzbau eine herausragende Rolle. Sie werden insbesondere bei der Herstellung von Brettschichtholz sowie im Rahmen bestehender bauaufsichtlicher Zulassungen für Fachwerkträger in Sonderbauweisen eingesetzt, wobei hier allerdings nur relativ kleinflächige Zapfen- oder Keilzinkenverbindungen zum Zuge kommen.

Die großflächige Verleimung tragender Knotenverbindungen, wie sie etwa bei der Verbindung von Gurten und Diagonalen beliebiger Stabwerke denkbar ist (Anlage 1), ist dagegen in DIN 1052 (Holzbauwerke - Berechnung und Ausführung) wegen fehlender Bemessungsgrundlagen nicht genannt und somit nicht allgemein zulässig, obwohl solche Stabwerke bereits vor über zwei Jahrzehnten hergestellt und zur Überdachung von Industriehallen, vermutlich über eine Zustimmung im Einzelfall, erfolgreich eingesetzt wurden.

Verleimte Tragwerke zeigen gegenüber solchen mit punktförmig wirkenden mechanischen Verbindungsmitteln eine höhere Steifigkeit und ein günstigeres Korrosions- und Brandverhalten, so daß der Übergang insbesondere auf großflächig geleimte Anschlüsse neuartige und wirtschaftliche Lösungsmöglichkeiten und damit neue Impulse für den Holzbau erwarten läßt.

---

[1] Nach DIN 16920 ist "Klebstoff" der Oberbegriff von "Leim". Der Begriff "Leim" ist dabei auf Klebstoffe aus wasserlöslichen tierischen, pflanzlichen oder synthetischen Grundstoffen beschränkt. Im Holzbau werden derzeit fast ausschließlich Leime eingesetzt, so daß hier ohne Beschränkung der Allgemeinheit der Begriff "Leim" entsprechend dem traditionellen Sprachgebrauch im allgemeinen Sinne des Begriffs "Klebstoff" verwendet wird.

Hier eröffnen sich Möglichkeiten etwa im Hinblick auf moderne aufgelöste Konstruktionen sowie Modernisierungs- oder Sanierungsaufgaben, wo beispielsweise die Nagelpreßleimung vorteilhaft eingesetzt werden könnte.

1.2 Zielsetzung

Die höhere Steifigkeit der großflächigen Leimverbindung und die damit wachsende Bedeutung der Nebenspannungen haben Auswirkungen auf das Festigkeitsverhalten der Verbindung, das mit den bisherigen Untersuchungsergebnissen von kleinflächigen Verbindungen nicht hinreichend sicher erfaßt werden kann.

Das Ziel vorliegender Arbeit war es deshalb, an geeigneten großflächig verleimten Holzverbindungen mit baupraktischen Abmessungen alle wesentlichen Einflußgrößen systematisch zu untersuchen, um die für eine Bemessung großflächiger Leimverbindungen notwendigen Grundlagen zu schaffen.

1.3 Bisheriger Kenntnisstand

Nach dem derzeitigen Kenntnisstand hängt die Festigkeit geleimter Holzverbindungen außer von der Scherfestigkeit des Leims und der Fügeteile von der Geometrie und den Beanspruchungsbedingungen des Prüfkörpers ab. Im wesentlichen sind hier zu nennen die Größe der Leimfläche, der Winkel zwischen Kraftrichtung und Faserrichtung der zu verleimenden Hölzer und nicht zuletzt die in der Verbindung auftretenden Querzugspannungen. Daneben sind noch Preßtechnik, Leim- und Holzart von Bedeutung.

Die wachsende Größe der Leimfläche reduziert die Scherfestigkeit von geleimten Holzverbindungen zum Teil beträchtlich, wie die Untersuchungen von GRAF u. EGNER (1938), EGNER (1954, 1962), KALINA (1965), DUTKO (1969) und KOLB (1974) gezeigt haben. Die Zahl der parallel zueinander liegenden Leimflächen ist dagegen nach KOMATSU (1984 b) ohne Bedeutung.

Bei geleimten Auflagerknoten (Anlage 1) fanden GLOS, HENRICI u. HORSTMANN (1987) bei geringen Leimflächenlängen wegen der hier dominanten Querzugspannungen zunächst allerdings ein An-

steigen der Scherfestigkeit mit der Leimflächenlänge. Erst nach Absinken der Querzugspannung unter die kritische Größe nahm die Scherfestigkeit mit wachsender Leimflächengröße wie bekannt ab.

Ein zunehmender Winkel zwischen Faser- und Kraftrichtung der zu verleimenden Hölzer (Verleimungswinkel α) verringert bei Vollholzverbindungen wegen der anisotropen Festigkeitseigenschaften des Holzes die Scherfestigkeit von Holzverbindungen ebenfalls in hohem Maße. Hier liegen u.a. Versuche von EGNER (1962), CHUGG u. PAREKH (1966), KOMATSU (1984 a), AVENT (1986) und GLOS, HENRICI u. HORSTMANN (1987) vor. Demgegenüber scheint der Verleimungswinkel bei Verbindungen aus Volholz und Buchenfurnierplatten nach den Untersuchungen von KALINA (1965) und KOLB u. FRECH (1979) nur eine untergeordnete Bedeutung für die Festigkeit der Holzverbindung zu besitzen.

EGNER (1962) hat darüber hinaus auch den Einfluß der Leimart, der Holzart sowie einer Klimabeanspruchung auf die Knotenfestigkeit untersucht.

Der Einfluß der Querzugspannungen wird wesentlich durch die Art der Kraftübertragung in die Leimfläche bestimmt. Seit HARTMANN (1938) wird hier zwischen Druckscheren und Zugscheren unterschieden. GRAF u. EGNER (1938) und DUTKO (1969) erhielten an Druckscherproben mit konventioneller Lagerung der Prüfkörper deutlich höhere Scherfestigkeiten als an Zugscherproben im wesentlichen deshalb, weil im Druckscherversuch Reibungskräfte geweckt werden, die dem Entstehen von Querzugspannungen entgegenwirken (HENRICI u. SCHEICHER, 1988).

Zwischen der konventionellen Druckscherfestigkeit und der Zugscherfestigkeit liegen die Scherfestigkeiten, die GLOS, HENRICI u. HORSTMANN (1987) an sogenannten Zug-Druckscherproben erhalten haben. Diese Beanspruchungsart liegt in etwa vor bei Auflagerknoten von Stabwerken mit flachgeneigten Obergurten (Anlage 1). Einen qualitativen Überblick über die Spannungsverteilung in der Leimfuge von Zug-Druck- und Zug-Zugscherproben zeigt Anlage 3.

Die grundsätzliche Eignung der Nagelpreßleimung für tragende Holzverbindungen steht seit der Arbeit von KOLB (1958) außer Zweifel. Weitere Untersuchungen stammen hier von ZORNIG u. VICK (1974), die auch bei Maschinennagelung noch ausreichend feste Leimverbindungen erhielten.

Analytische Untersuchungen über die Spannungsverteilung in Klebfugen wurden bereits 1909 von ARNOVLEVIC durchgeführt. Ohne Kenntnis dieser Arbeit entwickelte VOLKERSEN (1938), ausgehend von der Nietkraftverteilung in zugbeanspruchten Nietverbindungen, unter der Annahme eines linear-elastischen Klebstoffverhaltens sowie isotroper Fügeteilwerkstoffe, eine Theorie für die Schubspannungsverteilung in einer Klebschicht. Die Verbiegung der Fügeteile infolge ausmittigem Kraftangriff wurde nicht erfaßt. Erst GOLAND u. REISSNER (1944) berücksichtigten zusätzlich das Kräftegleichgewicht senkrecht zur Leimfläche, so daß mit Hilfe dieser Ansätze eine differenziertere Betrachtung der Spannungsverteilung in der Klebfuge möglich ist.

Sowohl die Spannungsverteilung nach Volkersen als auch die nach Goland und Reissner gilt für einschnittige Klebverbindungen und ist nicht ohne weiteres auf zweischnittige Verbindungen übertragbar, da in diesen Fällen eine Symmetrieachse bezüglich der Spannungen in der Leimfläche fehlt. Die Schubspannungsmaxima ergeben sich bei beiden Berechnungsansätzen am Überlappungsende, obwohl an unbelasteten Rändern aus Gleichgewichtsgründen keine Schubspannungen auftreten können. Diese Randbedingung wurde bei neueren Ansätzen u.a. von VOLKERSEN (1963) und HART-SMITH (1973) berücksichtigt, wodurch die Lösung wesentlich komplizierter wurde. Jedoch ändert sich der Maximalwert der Schubspannung, der bei dieser Theorie um die Fugendicke vom Außenrand abrückt, nur unwesentlich.

Rechnerische Untersuchungen für anisotrope Fügeteile wurden nach der Methode der finiten Elemente (FE-Methode) von EPPLE (1983) und AVENT (1986) durchgeführt. Wie schon bei der Theorie von Volkersen und Goland und Reissner erfolgte die Berechnung unter der Annahme eines linear-elastischen Materialverhaltens.

Das plastische Verhalten sowohl des Klebstoffs als auch der Fügeteile und die dadurch bedingte Spannungsumlagerung wurden

nicht berücksichtigt, so daß die rechnerischen hohen Spannungsspitzen ohne vergleichende Versuchsergebnisse keine Aussage über die tatsächliche Tragfähigkeit der Verbindung ermöglichen.

1.4 Aufgabenstellung

Trotz der zahlreichen Arbeiten zur Frage geleimter Holzverbindungen erscheinen die Zusammenhänge, die die Tragfähigkeit großflächig geleimter Holzverbindungen mit baupraktischen Abmessungen bestimmen, noch nicht hinreichend geklärt.

Ein besonderer Gesichtspunkt für die Beurteilung des Festigkeitsverhaltens einer geleimten Holzverbindung ist die bislang kaum untersuchte kombinative Wirkung dreier wesentlicher Einflußgrößen:

Die Größe der Leimfläche, die Form der Leimfläche und der Winkel zwischen Kraftrichtung und Faserrichtung der zu verleimenden Hölzer (Verleimungswinkel). Hinzu kommt im Falle eines Auflagerknotens als vierte Einflußgröße die vertikale Auflagerkraft, die den Spannungszustand in der Verbindung ebenfalls beeinflußt. Diese Einflußgrößen treten in baupraktischen Verbindungen, zum Beispiel nach Anlage 1, im allgemeinen gleichzeitig auf, was die Beurteilung der Einzeleinflüsse bisher erheblich erschwerte.

Zu untersuchen waren daher an geeigneten Prüfkörpern (Grundverbindungen) zunächst die Einzeleinflüsse aus Leimflächengeometrie und Verleimungswinkel, aus Prüfkörperform, Holzart, Preßtechnik und Leimart sowie vor allem der Einfluß der Querzugspannungen.

An weiteren Prüfkörpern (Knotenverbindungen) waren dann praxisnahe Beanspruchungen, wie sie bei einem Auflagerknoten oder einem Zugstoß vorliegen, zu untersuchen.

Die an den Grund- und Knotenverbindungen erhaltenen Ergebnisse sollten schließlich an geeigneten Stabwerken in einigen Großversuchen überprüft werden.

2. Versuchsprogramm

2.1 Gesamtübersicht

Aus der Aufgabenstellung ergab sich ein dreiteiliges Versuchsprogramm wie folgt:

Teilprogramm	Zahl der Prüfkörper	Bemerkung
Grundverbindungen	477	Prüfung der Einzeleinflüsse
Knotenverbindungen	147	Prüfung zusätzlicher praxisrelevanter Einflußgrößen
Stabwerke	6	10 m } Spannweite
	2	15 m }

Die einzelnen Teilprogramme werden in den folgenden Abschnitten im einzelnen erläutert. Bei den Grund- und Knotenverbindungen sowie den Stabwerken sollten die Bruchlast unter statischer Kurzzeitbelastung und definierten Feuchtebedingungen, bei den Stabwerken zusätzlich noch die Durchbiegungen bestimmt werden.

2.2 Versuchsprogramm Grundverbindungen

Im einzelnen wurden an Prüfkörpern nach Anlage 4 (Bild 3) folgende Einflußgrößen jeweils getrennt untersucht:

- Vorholzlänge bei rechteckiger Leimfläche:
  t_{vl} = 0, 5, 10 cm (Anlage 5, Bild 5 a,b)
- Leimflächenlänge:
  L_L = 5, 10, 15, 20, 30, 40 cm (Anlage 5, Bild 5 b-d)
- Leimflächenbreite:
  B_L = 10, 15, 20, 25 cm (Anlage 5, Bild 5 b-d)

- Form der Leimfläche :
  Rechteck, Parallelogramm ($\beta = 30^0$, 60^0), Kreis
  (Anlage 5, Bild 5 b-d)

- Verleimungswinkel:
  $\alpha = 0^o$, 15°, 30°, 60°, 90° (Anlage 5, Bild 5 b,c)

- Dicke der Gurthölzer:
  d = 1.5, 3.0, 4.0, 6.0 cm (Anlage 5, Bild 5 a)

- Material des Druckstabs:
  Fichtenholz (Fi), Bau-Furniersperrholz aus Buche (BFU)

- Preßtechnik:
  konventionelle (normale) Pressung (V_n), $p_L \approx 0.6$ N/mm2;
  Nagelpressung (N), $p_L \approx 0.2$ bis 0.3 N/mm^2 (bei 9 Nägeln
  auf 400 cm^2 Leimfläche)

- Leimart:
  Phenol-Resorcin-Formaldehyharzleim, Epoxidharzleim, PVAC-
  Leim

Das in Anlage 2 (Tabelle 1) dargestellte Versuchsprogramm umfaßt 49 Serien mit insgesamt 477 Prüfkörpern. Die Serien mit den eingeklammerten Nummern erscheinen doppelt und sind nur aus systematischen Gründen an der entsprechenden Stelle eingefügt. Der jeweilige Erstbuchstabe der Serienbezeichnung weist auf folgende Einflußgrößen hin :

V	Vorholzlänge l_{vl}
A	Leimflächengröße $A_L = L_L * B_L$
F	Form der Leimfläche
W	Verleimungs-Winkel α
D	Dicke der Zuggurthölzer d
N	Nagelpreßleimung
L	Leimart
B	Druckstab aus Buchenfurniersperrholz

Jede Einflußgröße wurde an einem Kollektiv von i.a. 10 Prüfkörpern untersucht. Im Regelfall wurde die Zug-Druck-Scherprüfung durchgeführt, eine rechteckige Leimfläche von $L_L * B_L = 20 * 15 = 300$ cm^2 und Zuggurthölzer aus Fichtenholz mit einer Dicke von d = 3 cm gewählt sowie als Leim Phenol-Resorcin-Formaldehydharzleim bei normaler Pressung verwendet.

2.3 Versuchsprogramm Knotenverbindungen

Im Anschluß an die Grundverbindungen wurden an besonderen Prüfkörpern, die in den Anlagen 20 bis 22 dargestellt sind, folgende, in einem Stabwerk auftretende Beanspruchungen untersucht :

- Momentenbeanspruchung der Prüfleimfläche, realisiert durch ausmittige Lasteinleitung in den Druckstab: e = 2, 5.5, 16.5 cm (Anlage 20, Bild 19)
- Querkraftbeanspruchung der Prüfleimfläche durch unterschiedliche Lagerung des Stabwerksknotens: Neigung des Druckstabs $\beta = 30^{\circ}, 60^{\circ}$ (Anlage 21, Bild 20 a bis c)
- Zug-Zugscherbeanspruchung der Prüfleimfläche eines Zugstoßes: Berücksichtigung unterschiedlicher Vorholzlängen l_{v1} und Zuggurtverlängerungen l_{v2} (Anlage 22, Bild 22)

Damit ergab sich das in Anlage 19 (Tabelle 2) dargestellte Versuchsprogramm mit 18 weiteren Serien (Nr.50 bis 67) und insgesamt 147 Prüfkörpern. Eine Serie umfaßt 5 bis 10 Prüfkörper. Die Serienbezeichnung weist auf folgende Einflußgrößen hin:

M Momentenbeanspruchung infolge Lastausmitte
Q Querkraftbeanspruchung der Leimfläche
Z Zug-Zugscherbeanspruchung der Leimfläche (Zugstoß)

2.4 Versuchsprogramm Stabwerke

Die Übertragbarkeit der erzielten Ergebnisse aus den Grund- und Knotenverbindungen sollte durch Versuche an Stabwerken nachgewiesen werden. Unter praxisnahen Randbedingungen wurden insgesamt 8 Stabwerke, und zwar 6 Stabwerke mit 10 m Spannweite und 2 Stabwerke mit 15 m Spannweite mit jeweils zwei identischen Ausführungen hergestellt und geprüft.

In Anlage 27 (Tabelle 3) ist das entsprechende Versuchsprogramm angegeben. Um einen Anhalt für das Verhältnis von Herstellungsaufwand und Nutzen (Tragfähigkeit) zu erhalten, wurden bei den Stabwerken drei unterschiedliche Typen von Knoten-

ausführungen, die in den Anlagen 29 bis 31 dargestellt sind, untersucht:

Typ I

Mittiger Diagonalen-Anschluß und zweiteiliger Gurtquerschnitt (2 * 3*20 cm^2). Die Zugdiagonale wird einteilig ausgeführt; nur Druckdiagonale an Gurte angeschlossen (Anlage 29, Bild 29)

Typ II

Ausmittiger Diagonalen-Anschluß und zweiteiliger Gurtquerschnitt (2 * 3*20 cm^2). Alle Diagonalen an Gurte angeschlossen. Die Druckdiagonalen werden stumpf auf die Zugdiagonalen aufgesetzt und nur über eine kleine Leimfläche an die Gurte angeschlossen (Anlage 30, Bild 30)

Typ III

Ausmittiger Diagonalen-Anschluß und dreiteiliger Gurtquerschnitt 3 * 3*20 cm^2 (Typ III a) bzw. 3 * 3.6*25 cm^2 (Typ III b) zur Erhöhung der Größe der Leimflächen und damit der Tragfähigkeit; alle Diagonalen an Gurte angeschlossen (Anlage 31, Bild 31)

Am Auflagerknoten waren die Druckdiagonalen bei allen Stabwerkstypen auf der ganzen Berührungsfläche mit dem Untergurt verleimt.
Es wurde generell eine flächige Auflagerung der Stabwerke gewählt (Druckdiagonale und Untergurt bündig, vgl. 4.4.3).

2.5 Bewitterungsversuche an ausgewählten Grundverbindungen

Zur Untersuchung des Klimaeinflusses auf die Festigkeit großflächig geleimter Holzverbindungen wurden 20 Prüfkörper aus den Grundverbindungen nach Anlage 4 (Bild 3) mit einem Verleimungswinkel von 90° einer Freibewitterung ausgesetzt. Antragsgemäß sollen diese Prüfkörper nach 5-jähriger Bewitterung geprüft werden. Die Bewitterungsversuche sind daher nicht Gegenstand dieses Berichts.

3. Versuche an geleimten Grundverbindungen[2]

3.1 Wahl der Prüfkörperform

Die Festigkeitsuntersuchungen sollten an Prüfkörpern durchgeführt werden, die einem realen Stabwerksknoten mit baupraktischen Abmessungen so weit wie möglich entsprechen. Da sich jedoch an einem praxisnahen Stabwerksknoten gemäß Anlage 1 verschiedene Einflußgrößen wie z.B. Leimflächenform, Winkel zwischen den Holzfaserrichtungen der Fügeteile (Diagonalstab und Gurt), Leimflächenlänge und -breite usw. überlagern, wurden zunächst an dem in Anlage 4 (Bild 3) und Anlage 5 (Bild 5) dargestellten Prüfkörper die einzelnen Einflußgrößen getrennt untersucht.

Dieser Prüfkörper besteht aus einem Zuggurt (2 Gurthölzer) und einem Druckstab. Zuggurt und Druckstab werden dabei unabhängig von der Leimflächenform mit einem Winkel α zwischen den Faserrichtungen der Fügeteile (Verleimungswinkel) verleimt (Anlage 5, Bild 5 b,c). Die Verlängerung des Druckstabes im Bereich der Lasteinleitung über die Leimfläche hinaus (Vorholzlänge l_{v1}) soll ein Aufreißen des Druckstabes infolge zu hoher Querzugbeanspruchung verhindern. Ebenso ist auch die Zuggurtverlängerung (l_{v2}) am Ende der Leimfläche eine praktisch übliche Maßnahme zur Erhöhung der Querzugtragfähigkeit.

In Anlage 3 (Bild 2 a - d) ist der mit Hilfe der FE-Methode ermittelte rechnerische Verlauf der Scher- und Querspannungen in der Leimfläche qualitativ dargestellt. Es wird deutlich, in welch hohem Maße die Spannungsverteilung von der Prüfkörperform und der Art der Krafteinleitung abhängt.

Im Falle des Zug-Druckprüfkörpers ergeben sich bei Anordnung eines Vorholzes l_{v1} im Vergleich zum Prüfkörper ohne Vorholz am Leimflächenanfang höhere Scherspannungen und wegen des größeren inneren Hebelarmes geringere Querdruckspannungen sowie geringere Querzugspannungen am Leimflächenende. Daher führt die

---

[2] Für die Mitwirkung bei den Versuchen mit Grund- bzw. Knotenverbindungen und Stabwerken sowie der Auswertung der Ergebnisse wird den Herren Dipl.Ing.(FH) H. Fuchs, U. Scheicher und H. Zistl herzlich gedankt.

Anordnung eines Vorholzes bei kleinen Leimflächenlängen, bei denen die Querzugspannungen maßgebend sind (GLOS, HENRICI u. HORSTMANN, 1987), zu einer Erhöhung der Tragfähigkeit.

Bei Prüfkörpern mit größeren Leimflächenlängen, bei denen die am Leimflächenanfang auftretende Scherspannungsspitze bei geringer Querdruckbeanspruchung für das Versagen der Verbindung maßgebend ist, wird die Tragfähigkeit bei Anwesenheit eines Vorholzes dagegen reduziert (Anlage 7). Die kritische Leimflächenlänge, bei der sich der Einfluß des Vorholzes umkehrt, liegt bei etwa L_L = 15 cm (Anlagen 9 und 10). Die rechnerischen Ergebnisse zeigen, daß der Scherspannungsverlauf in der Leimfläche eines realen Fachwerkknotens mit einer Leimflächenlänge von L_L = 20 cm infolge des Normalspannungszustandes in den Fügeteilen wie bei einem Prüfkörper mit Vorholz einen hohen Anfangswert erreicht. Gleichzeitig wirkt in diesem Bereich wie bei einem Prüfkörper ohne Vorholz eine hohe Querdruckspannung, so daß die Festigkeit des Stabwerkknotens auf Grund der hohen Scherspannungen am Leimflächenanfang geringer als die der Verbindung ohne Vorholz, aber infolge der gleichzeitig wirkenden hohen Querdruckspannungen größer als die der Verbindung mit Vorholz sein wird. Werden daher die Untersuchungen an Prüfkörpern mit Vorholz durchgeführt, erhält man bei entsprechender Leimflächenlänge Festigkeitswerte, die im Hinblick auf spätere Bemessungsvorschläge auf der sicheren Seite liegen.

Bei Prüfkörpern mit kürzeren Leimflächenlängen wird dagegen die Festigkeit der Verbindung ohne Vorholz maßgebend für die Berechnung der charakteristischen Tragfähigkeit. Dementsprechend wurden für die nachfolgend beschriebene Untersuchung der Einflußgrößen Prüfkörper mit und ohne Vorholz gewählt.

Mit Ausnahme des Zugstoßes (vgl. 4.1) wurden die Versuche an Prüfkörpern gemäß Anlage 5 durchgeführt, weil die Zug-Druckbelastung am besten geeignet erschien, um die Bedingungen in einem tatsächlichen Stabwerksknoten zu realisieren.

3.2 Herstellung der Prüfkörper

Die Prüfkörper wurden mit Ausnahme der Verbindungen des Abschnitts 3.4.7 aus 3 cm dicken Fichtenbrettern hergestellt, die

der Sortierklasse S13/S10 (früher Gkl. I/II) nach DIN 4074 entsprachen. Die Bretter wurden auf u ≈ 12% getrocknet und im Normalklima 20°C/65% relative Luftfeuchte (rLf) klimatisiert. Ihre Rohdichte lag im Bereich $370 \leq \rho_{12} \leq 510$ kg/m³. Für einen Prüfkörper wurden jeweils Bretter möglichst gleicher Rohdichte verwendet, für jede Serie wurde eine etwa gleiche Rohdichteverteilung angestrebt (Anlage 11).

Die Verleimung der Bretter erfolgte mit Ausnahme der in Abschnitt 3.4.10 beschriebenen Varianten mit Phenol-Resorcin-Formaldehydharzleim Kauresin 460 fl. (Härter 465 pv.). Dabei wurden die Bretter in der Prüfleimfläche entsprechend Anlage 4 (Bild 4) jeweils mit ihren linken Seiten zusammengeleimt. Der Leimauftrag betrug etwa 500 g/m² Leimfuge. Die Pressung bei Verleimung der Verbindung erfolgte mit Ausnahme der in Abschnitt 3.4.9 beschriebenen Varianten mit hydraulischen Pressen (normale Verleimung, Preßdruck $p_L = 0.6$ N/mm²). Nach der Herstellung wurden die Prüfkörper bis zur Prüfung im Normalklima 20°C/65% rLf gelagert.

3.3 Versuchsdurchführung

Für die Festigkeitsprüfung der Verbindungen wurde die in Anlage 6 dargestellte Prüfvorrichtung konstruiert, die durch einfachen Umbau die Prüfung aller Prüfkörperformen ermöglichte. Die Kraft wurde mit einem Lasthebel über ein Zuggestänge auf den Prüfkörper übertragen. Die Messung der Kraft erfolgte in Zuggurtachse (Anlage 6, Achse B) mit einer 500 kN-Kraftmeßdose.

3.4 Ergebnisse der Versuche an Grundverbindungen

3.4.1 Allgemeines

Die Tragfähigkeit von Leimverbindungen wird im wesentlichen von Scher- und Querspannungen in der Leimfläche bestimmt, die - auf die Leimfläche bezogen - durch ausmittig angreifende Zug- oder Druckkräfte in den Gurthölzern hervorgerufen werden. Die in Anlage 3 qualitativ dargestellte Spannungsverteilung in der

Leimfläche wurde unter der Annahme eines linear-elastischen Werkstoffverhaltens mit Hilfe der FE-Methode ermittelt. Die Spannungsspitzen am Leimflächenanfang und -ende werden durch Plastifizierung der Leimschicht und des Fügeteilwerkstoffs abgebaut und die Spannungen umgelagert. Weil das entsprechende Materialverhalten im einzelnen derzeit aber nicht bekannt ist, ist die rechnerische Ermittlung der tatsächlich in der Leimfläche auftretenden Bruchscherspannung nicht möglich. Im weiteren wird daher als Scherfestigkeit der Verbindung die aus

$$\tau_L = \frac{F}{2\ A_L}\ , \qquad \begin{matrix} F \ \ldots \text{ Bruchlast } (N) \\ A_L \ \ldots \text{ Leimfläche } (mm^2) \end{matrix} \qquad (1)$$

berechnete fiktive Bruchscherspannung angegeben.

Geprüft wurden 477 Prüfkörper, wovon 456 Prüfkörper in die Auswertung einbezogen wurden. Nicht berücksichtigt wurden 21 Prüfkörper, bei denen der Bruch außerhalb der Prüfleimfläche auftrat. Zusätzlich in die Auswertung einbezogen wurden 35 Festigkeitswerte aus einem bereits 1985/86 durchgeführten Forschungsvorhaben (Glos u.a., 1987).

3.4.2 Einfluß der Vorholzlänge bei unterschiedlicher Leimflächenlänge L_L

An Prüfkörpern der Serie V.., die in Anlage 5 (Bild 5 a, b) dargestellt sind, wurde bei rechteckförmiger Leimfläche für die Leimflächenlängen L_L = 5 cm und L_L = 20 cm ergänzend zu den Vorüberlegungen (vgl. 3.1) der Einfluß unterschiedlicher Vorholzlängen l_{v1} auf die Festigkeit der Verbindung untersucht. Die Leimflächenbreite betrug B_L = 15 cm, der Verleimungswinkel $\alpha = 0^o$. Die erzielten mittleren Scherfestigkeiten sind in Abhängigkeit von der Vorholzlänge in Anlage 7 zusammengestellt.

Bei kleinen Leimflächenlängen (L_L = 5 cm) steigt die Festigkeit mit zunehmender Vorholzlänge an. Dagegen wird bei größerer Leimflächenlänge (L_L = 20 cm) durch Anordnung eines Vorholzes die Festigkeit deutlich verringert, wobei sich die Verdoppelung der Vorholzlänge von l_{v1} = 5 cm auf l_{v1} = 10 cm kaum auswirkt. Die Ergebnisse für l_{v1} = 0 bei einer Leimflächenlänge von L_L = 20 cm sind GLOS, HENRICI u. HORSTMANN (1987) entnommen.

Um die Versuchsergebnisse besser interpretieren zu können, wurden die rechnerischen Scher- und Querspannungsverläufe in der Leimfläche mit Hilfe der FE-Methode ermittelt. Bei Prüfkörpern ohne Vorholz (l_{v1} = 0) muß sich die unmittelbar am Leimflächenanfang in den Druckstab eingeleitete Druckkraft zu den Leimflächen hin ausbreiten, so daß der Leimflächenanfang nicht die maximale Belastung erfährt. Die rechnerischen Scherspannungen sind also geringer (Anlage 3, Bild 2 a) als bei Verbindungen mit Vorholz, bei denen aufgrund der im Druckstab vor der Leimfläche über den Querschnitt verteilten Normalkraft der Leimflächenanfang stark belastet wird und eine hohe Anfangsscherspannung auftritt (Anlage 3, Bild 2 b).

Die Scherspannungen in der Leimfläche werden von Spannungen senkrecht zur Leimfläche überlagert. Verbindungen mit Vorholz übertragen durch Pressung zwischen Gurthölzern und Druckstab auch vor der Leimfläche Querdruckspannungenn, so daß sich der innere Hebelarm der Querdruck- und -zugkraft vergrößert und die bei kleinen Leimflächenlängen (L_L = 5 cm) maßgebende Querzugspannung am Leimflächenende (GLOS, HENRICI u. HORSTMANN, 1987) deutlich verringert und die Tragfähigkeit erhöht wird.

Bei einer größeren Leimflächenlänge (L_L = 20 cm) hat dagegen das Vorholz rechnerisch keinen Einfluß mehr auf die Querzugspannungen am Leimflächenende, so daß die Scherspannungen maßgebend für das Versagen der Verbindung werden. Die größte Querdruckspannung tritt im Fall l_{v1} = 5 cm wegen der Pressung zwischen Gurtholz und Druckstab am Vorholzanfang, im Fall l_{v1} = 0 am Leimflächenanfang auf, so daß Prüfkörper ohne Vorholz wegen der günstigeren Spannungskombination aus Scher- und hoher Querdruckspannung (Anlage 8) bei langen Leimflächen eine höhere Tragfähigkeit liefern. Für L_L = 20 cm ergab sich für eine Vorholzlänge von l_{v1} = 10 cm rechnerisch der gleiche Scherspannungswert und -verlauf wie für l_{v1} = 5 cm. Da die Querzugspannungen bei dieser Länge keinen Einfluß haben, müssen diese Verbindungen die gleiche Tragfähigkeit aufweisen. Durch die Versuche wurden die rechnerischen Ergebnisse bestätigt.

Für die nachfolgenden Parameteruntersuchungen erschien somit die Vorholzlänge von l_{v1} = 5 cm für Leimflächenlängen von L_L = 20 cm ausreichend. Für diese Leimflächenlänge liegen die an

Prüfkörpern mit Vorholz ermittelten Festigkeiten auf der sicheren Seite. Dagegen wird für kurze Leimflächen durch Anordnung eines Vorholzes durch verringerte Querzugspannungen eine gegenüber der tatsächlichen Tragfähigkeit zu hohe Festigkeit erzielt, so daß nachfolgend die kritische Leimflächenlänge zu ermitteln ist, bis zu der die an Prüfkörpern ohne Vorholz ermittelten Festigkeiten maßgebend für die Berechnung der charakteristischen Tragfähigkeit sind.

3.4.3 Einfluß der Leimflächenlänge L_L

In den Anlagen 9 und 10 ist für Prüfkörper der Serie AL.. mit Vorholz (l_{v1} = 5 cm) und ohne Vorholz (l_{v1} = 0) die Bruchlast (Anlage 9) und die Scherfestigkeit (Anlage 10) in Abhängigkeit von der Leimflächenlänge L_L dargestellt. Die Breite der rechteckförmigen Leimfläche betrug bei den Prüfkörpern mit Vorholz B_L = 15 cm, der Verleimungswinkel $\alpha = 0^o$. Die Festigkeitswerte für Prüfkörper ohne Vorholz sind mit Ausnahme der Serie VL 1 (L_L = 5 cm) GLOS, HENRICI u. HORSTMANN (1987) entnommen. Die Leimflächen dieser Verbindungen waren quadratisch, der Verleimungswinkel betrug ebenfalls $\alpha = 0^o$. Da die Leimflächenbreite keinen Einfluß auf die Festigkeit der Verbindung hat (vgl. 3.4.4), konnten die an Prüfkörpern mit $B_L = L_L$ ermittelten Bruchlasten auf eine einheitliche Breite von B_L = 15 cm umgerechnet und mit in die Auswertung einbezogen werden.

Bei den Prüfkörpern mit Vorholz steigen die Bruchlasten mit zunehmender Leimflächenlänge an (Anlage 9), die Festigkeiten sinken im untersuchten Längenbereich zwischen 5 und 40 cm von 3.7 N/mm^2 auf 1.4 N/mm^2 dagegen kontinuierlich ab (Anlage 10). Sowohl für L_L = 30 cm als auch für L_L = 40 cm beträgt die Bruchlast der Verbindung F = 166 kN (Anlage 9), d.h. ab einer Länge von L_L = 30 cm kann trotz einer Vergrößerung der Leimflächenlänge die aufnehmbare Last nicht mehr gesteigert werden.

Für Prüfkörper ohne Vorholz steigen im Bereich kleiner Leimflächenlängen (L_L < 20 cm) nicht nur die Bruchlasten deutlich an, auch die Festigkeit nimmt mit wachsender Leimflächenlänge zu, da sich die bei diesen Prüfkörpern maßgebenden Querzugspannungen am Leimflächenende durch Vergrößerung des inneren Hebel-

arms der Querzug- und -druckkraft (vgl. 3.4.2) mit zunehmender Leimflächenlänge abbauen (GLOS u.a., 1987). Für größere Leimflächenlängen ($L_L \geq 20$ cm) verlieren die Querzugspannungen dagegen ihren Einfluß, die Scherspannungen am Leimflächenanfang bestimmen die Tragfähigkeit der Verbindung. Die Festigkeiten sinken mit zunehmender Leimflächenlänge, sind jedoch höher als die Festigkeiten der Prüfkörper mit $l_{v1} = 5$ cm. Die erhöhte Tragfähigkeit der Prüfkörper ohne Vorholz im Bereich $L_L \geq 20$ cm ist auf die gegenüber Prüfkörpern mit Vorholz günstigere Kombination der Scher- und Querdruckspannungen am Leimflächenanfang zurückzuführen (vgl. 3.4.2).

Die kritische Leimflächenlänge, bis zu der die an Prüfkörpern ohne Vorholz erzielten Festigkeiten maßgebend für die Berechnung einer charakteristischen Tragfähigkeit sind, beträgt nach Anlage 9 bzw. 10 etwa 15 cm. Bei Längen über 15 cm werden die Festigkeiten der Prüfkörper mit Vorholz ausschlaggebend.

3.4.4 Einfluß der Leimflächenbreite B_L

An den in Anlage 5 (Bild 5 a-c) dargestellten Prüfkörpern der Serie AB.. und FP.. wurden Leimflächenbreiten zwischen $B_L = 10$ und 25 cm bei rechteck- sowie parallelogrammförmiger Leimfläche ($L_L = 20$ cm) untersucht. Die Vorholzlänge betrug $l_{v1} = 5$ cm, die Neigung der Leimfläche $\beta = 30^o$ und 60° (Bild 5 c). Die erzielten Festigkeiten sind in Anlage 12 wiedergegeben. Es ist kein statistisch signifikanter Einfluß der Leimflächenbreite B_L auf die Festigkeit der Leimverbindung zu erkennen.

3.4.5 Einfluß der Leimflächenform

Den Einfluß der Leimflächenform auf die Scherfestigkeit zeigt Anlage 13. Untersucht wurden an Prüfkörpern der Serie F.. rechteck-, parallelogramm- und kreisförmige Leimflächen (Anlage 5) mit Längen zwischen 5 und 40 cm und $B_L = 15$ cm. Der Verleimungswinkel zwischen den Faserrichtungen der verleimten Fügeteile betrug $\alpha = 0^o$, die Vorholzlänge $l_{v1} = 5$ cm. Im gesamten Untersuchungsbereich ergibt sich kein signifikanter Einfluß der Leimflächenform auf die Festigkeit der Leimverbindungen.

3.4.6 Einfluß des Verleimungswinkels α

Anlage 14 zeigt für Prüfkörper der Serie W.. mit einer rechteckigen und einer parallelogrammförmigen Leimfläche von $A_L = 20 * 15$ cm^2 den Einfluß des Winkels zwischen den Holzfaserrichtungen der Fügeteile (Verleimungswinkel α). Mit zunehmendem Winkel sinkt die Festigkeit aufgrund der Anisotropie des Holzes deutlich ab. Diese Versuche zeigen, daß die bereits 1921 in den USA für fehlerfreie Kleinproben empirisch ermittelte Hankinson-Formel (For. Prod. Lab., 1921) auch für Prüfkörper mit praxisnahen Abmessungen in sehr guter Näherung angewendet werden kann.

3.4.7 Einfluß der Dicke der Gurthölzer d

In Anlage 15 ist für Prüfkörper der Serie D.. der Einfluß der Gurtholzdicke d auf die Festigkeit der Verbindung dargestellt. Für die Untersuchungen wurde eine rechteckförmige Leimfläche von $A_L = 15 * 15$ cm^2 bei einem Verleimungswinkel $\alpha = 0^o$ gewählt, da sich in den zuvor durchgeführten Versuchen für diese Länge sowohl für Prüfkörper ohne als auch für Prüfkörper mit Vorholz l_{v1} nahezu gleiche Festigkeiten ergaben.

Wäre entsprechend den Verbindungen ohne Vorholz auch bei den Prüfkörpern mit Vorholz die Querzugspannung am Leimflächenende maßgebend für die Festigkeit der Verbindung, müßte sich bei einem dünneren Gurtholz (d = 1.5 cm) aufgrund der geringeren Ausmitte der Zuggurtkraft und somit geringeren Querzugspannungen am Leimflächenende eine höhere Festigkeit der Verbindung ergeben. Bei konstanter Druckstabdicke wurden Gurtholzdicken von d = 1.5 cm, 3.0 cm, 4.0 und 6.0 cm untersucht.

Für d = 1.5 cm und d = 6.0 cm wurden mit $\tau_L = 2.47$ N/mm^2 und 2.55 N/mm^2 nahezu gleiche Festigkeiten erzielt. Serie D40 mit Gurtholzdicken von d = 4.0 cm wies mit $\tau_L = 3.10$ N/mm^2 die höchste Festigkeit auf. Die Festigkeitsunterschiede zwischen den Verbindungen mit d = 1.5 cm und d = 4.0 cm sowie den mit d = 4.0 cm und 6.0 cm sind jeweils statistisch gesichert. Dies weist darauf hin, daß sich dem Einfluß der ausmittigen Zuggurtkraft ein weiterer Einfluß unterschiedlicher Steifigkeit der

Fügeteile überlagert. Um eine eindeutige Aussage über den Einfluß der Dicke der Gurthölzer treffen zu können, werden im Anschluß an dieses Forschungsvorhaben ergänzende Berechnungen nach der FE-Methode durchgeführt.

3.4.8 Einfluß des Druckstabmaterials

Bei Verleimungen von Vollholz mit Furnierplatten stellten KALINA (1965) und KOLB u. FRECH (1979) fest, daß der Verleimungswinkel zwischen der Kraft- und Faserrichtung der Deckfurniere und der Kraft- und Faserrichtung angeleimter Vollhölzer keinen wesentlichen Einfluß auf die Festigkeit der Verleimung hat.

Da sich bei der Verleimung von Vollhölzern mit zunehmendem Verleimungswinkel α eine deutliche Festigkeitsabnahme herausstellte (vgl. 3.4.6, Anlage 14), sollte bei Verleimungswinkeln $\alpha > 0^{o}$ der Druckstab aus Bau-Furniersperrholz aus Buche (BFU-BU 100) nach DIN 68705, T.5, hergestellt werden, um die Tragfähigkeit zu erhöhen. Die an Prüfkörpern der Serie BFU.. mit einer rechteckigen Leimfläche von $A_L = 20 * 15$ cm^2 für die Verleimungswinkel $\alpha = 0^{o}$, 30°, 60° und 90° erzielten Festigkeiten sind in Anlage 16 dargestellt.

Während sich für $\alpha = 0^{o}$ die Festigkeit der Verbindungen mit BFU-Druckstab etwas verringerte, konnte für $\alpha = 30^{o}$ und $\alpha = 60^{o}$ eine höhere Festigkeit erreicht werden als bei den Prüfkörpern mit einem Druckstab aus Fichtenholz.

Für $\alpha = 90^{o}$ ergab sich für die Prüfkörper mit BFU-Druckstab sogar eine höhere Festigkeit als für die Verbindungen mit Fi-Druckstab und faserparalleler Verleimung ($\alpha = 0^{o}$). Die Erklärung dieser Ergebnisse erfordert weitere ergänzende Untersuchungen, die nach der FE-Methode in einem anschließenden Forschungsvorhaben durchgeführt und erläutert werden sollen.

3.4.9 Einfluß der Preßtechnik

Bereits in früheren Untersuchungen (GLOS u.a., 1987) wurde festgestellt, daß die Nagelpressung der konventionellen (normalen) Pressung gleichwertig ist. In diesem Forschungsvorhaben

wurde daraufhin mit der Serie N.. der Einfluß der Nagelart und -anzahl bei der Nagelpreßleimung untersucht.

Die Nagelpressung einer rechteckförmigen Leimfläche von A_L = 20 * 15 cm^2 bei einem Verleimungswinkel von $\alpha = 0^o$ und einer Vorholzlänge von l_{vl} = 5 cm erfolgte durch 9 auf die Fläche gleichmäßig verteilte Nägel. Als Nägel wurden glatte Nägel und Rillennägel verwendet. Anlage 17 zeigt, daß mit beiden Nagelarten gegenüber der normalen Pressung geringe Festigkeitserhöhungen erzielt wurden, die statistisch jedoch nicht gesichert sind. Zwischen den beiden Nagelarten ergaben sich keine Unterschiede in der Tragfähigkeit der Leimverbindung.

Da die Herstellung mit glatten Nägeln einfacher und wirtschaftlicher ist, wurde die Wirkung einer Reduzierung der Nagelanzahl von 9 auf 5 Nägel je Leimfläche nur für glatte Nägel untersucht. Es konnte mit 5 Nägeln die gleiche Festigkeit erzielt werden wie bei normaler Pressung mit einem Preßdruck von p_L = 0.6 N/mm^2.

Die Nagelpressung einer parallelogrammförmigen Leimfläche (30° - Parallelogramm) mit 9 glatten Nägeln lieferte einen geringen, statistisch jedoch nicht gesicherten Festigkeitsunterschied gegenüber der normalen Pressung der Parallelogrammfläche.

3.4.10 Einfluß der Leimart

Da sich bei den bisherigen Versuchen herausstellte, daß eine Vergrößerung der Leimflächenlänge von L_L = 30 cm auf L_L = 40 cm keine Erhöhung der Festigkeit bewirkt, sollte durch Verwendung einer Leimart mit größerer Plastizität untersucht werden, ob sich bei einer Länge von L_L = 40 cm die lastübertragende Leimflächenlänge und somit die Tragfähigkeit erhöhen läßt. Aus diesem Grund wurde an Prüfkörpern der Serie Le.. mit einer rechteckigen Leimfläche von A_L = 40 * 15 cm^2 und einem Verleimungswinkel von $\alpha = 0^o$ der Einfluß der Leimart auf die Tragfähigkeit untersucht.

Wie Anlage 18 zeigt, lieferte die Verleimung der Fügeteile mit Epoxidharz (Araldit AV 138, Härter HV 953 u) bzw. PVAc-Leim (Vinnapas-Dispersion DPN 15) gegenüber der Phenol-Resorcin-

Formaldehydharz-Verleimung eine statistisch signifikante Festigkeitssteigerung, die bis zu 35% betrug. Dieses Ergebnis bestätigt, daß durch die größere Plastizität der Epoxid- bzw. PVAc-Leime die am Leimflächenanfang auftretende Scherspannungsspitze abgebaut und ein größerer Anteil der Leimflächenlänge zur Kraftübertragung herangezogen werden konnte. Der Festigkeitsunterschied zwischen der Epoxidharz- und der PVAc-Verleimung erwies sich als nicht signifikant.

4. Versuche an praxisnahen Knotenverbindungen

4.1 Wahl der Prüfkörperform

Bei der Untersuchung der einzelnen Einflußgrößen in Abschnitt 3 wurden die Prüfkörper (Anlage 5) durch eine - auf die Leimfläche bezogen - ausmittige Gurtnormalkraft belastet, die Scher- und Querspannungen in der Leimfläche hervorrief.

In einem Stabwerk treten infolge der großflächigen Verleimung der Stäbe jedoch außerdem Momente und Querkräfte in den Knotenpunkten auf. Um die Auswirkung dieser zusätzlichen Leimflächenbeanspruchung auf die Festigkeit der Verbindung festzustellen, wurden praxisnahe Knotenverbindungen unter spezieller Belastung geprüft.

Zunächst sollte an Prüfkörpern der Serie M.. entsprechend Anlage 20 zusätzlich zur Beanspruchung infolge der Gurtnormalkraft der Einfluß einer Momentenbeanspruchung der Leimfläche untersucht werden, indem der Druckstab ausmittig gelagert wurde.

Um einen Bezug zu den Grundverbindungen herstellen zu können, wurde ein Vorholz mit l_{v1} = 5 cm angeordnet. Zur Erfassung einer herstellungsbedingten ungewollten Ausmitte der Stabkräfte wurde eine Ausmitte der Druckkraft gegenüber der eingeleiteten Zugkraft von e = 2 cm gewählt. Das auftretende Moment wurde durch zwei entsprechende Auflagerungen bzw. Halterungen im Abstand von 112.5 cm aufgenommen (Anlage 20). Die Lager waren außerhalb der Prüfleimfläche angeordnet, um eine gleichzeitige

Beanspruchung der Leimfläche durch eine Auflagerkraft zu vermeiden.

Da sich bei einem Auflagerknoten herstellungsbedingt ein Verleimungswinkel $\alpha > 0^{o}$ ergibt, wurde bei den Verbindungen mit e = 2 cm zusätzlich der Verleimungswinkel variiert (Anlage 20). Im Hinblick auf die bei Auflagerknoten ($\alpha > 0^{o}$) auftretende Ausmitten wurden bei der Serie M.. noch weitere Ausmitten untersucht. So ergibt sich für einen 60°-Auflagerknoten (Anlage 21) mit einer üblichen Zuggurtbreite von 20 cm bei Einleitung der resultierenden Auflagerkraft auf der Hälfte einer 20 cm langen Leimfläche eine Ausmitte der Auflagerkraft bezüglich des Leimflächenmittelpunktes von etwa 5.5 cm. Bei einem 30°-Auflagerknoten beträgt die Ausmitte der Auflagerkraft geometrisch bedingt das Dreifache der Ausmitte bei einem 60°-Knoten. Deshalb wurde bei den Prüfkörpern der Serie M.. für den Verleimungswinkel $\alpha = 60^{o}$ außerdem eine Ausmitte von e = 5.5 cm und für $\alpha = 30^{o}$ eine Ausmitte von e = 16.5 cm untersucht.

Die Einleitung der Druckkraft erfolgte wie schon bei den Parameteruntersuchungen an den Grundverbindungen über eine 3 cm dicke Stahlplatte. Bei einer Lastausbreitung unter einem Winkel von 1:1.5 innerhalb der Platte verteilt sich die Druckkraft unter Berücksichtigung des Punktlagerdurchmessers auf eine Höhe von 12 cm. Um die gleiche Lastausbreitungshöhe wie bei den momentenfreien Prüfkörpern zu erhalten, wurde daher der Druckstab bei den Prüfkörpern der Serie M.. um das Maß der Ausmitte e über die Leimfläche hinaus verbreitert (Anlage 20).

Die Auswirkung einer zur Scherspannung infolge der Gurtkraft senkrechten Scherbeanspruchung der Leimfläche durch eine Auflagerkraft wurde anschließend an Prüfkörpern der Serie Q.. mit Auflagerknoten gemäß Anlage 21 (Bild 20 a-c) untersucht.

Der entsprechend den Grundverbindungen 9 cm dicke Druckstab war mit den 3 cm dicken Gurthölzern unter dem Winkel α verleimt. Als Verleimungswinkel wurde $\alpha = \beta = 30^{o}$ bzw. 60° gewählt, um einen Bezug zu den Grundverbindungen mit parallelogrammförmiger Leimfläche (Anlage 5, Bild 5 c) bzw. mit Verleimungswinkeln $\alpha = 30^{o}$ und 60° herstellen zu können. Die Leimfläche betrug $A_L = 20 * 15$ cm^2, die Fasern der Fügeteile verliefen jeweils parallel zu den Außenkanten der Hölzer.

Um die Unterschiede zwischen einer weniger aufwendigen flächigen Auflagerung und einer Lagerung über ein genau ausgerichtetes Punktlager mit einer definierten Ausmitte der Auflagerkraft zu untersuchen, wurden die Lagerungsmöglichkeiten eines 60°-Auflagerknotens variiert, wobei die Auflagerung bei allen Varianten über eine Stahlplatte (200 * 150 * 30 mm^3) erfolgte, um so auch bei flächiger Auflagerung eine definierte Auflagerfläche zu erhalten. Bei Prüfkörpern nach Anlage 21 (Bild 20) wurden die folgenden Lagerungen gewählt:

- flächige Lagerung des 1 cm über die Gurthölzer vorspringenden Druckstabes. Auflagerfläche des Druckstabes A_A = 20 * 9 cm^2 (Bild 20 a).
- flächige Lagerung des gesamten Knotens im Bereich der Leimfläche bei bündiger Verleimung von Zuggurt und Druckstab. Auflagerfläche A_A = 20 * 15 cm^2 (Bild 20 b).
- Punktlagerung des gesamten Knotens im Bereich der Leimfläche, wobei die Lagerung entsprechend den mit Auflagerung gemäß Bild 20 a bzw. 20 b erzielten Ergebnissen entweder nur über den Druckstab oder aber über den gesamten Knoten erfolgen sollte. Dementsprechend ergibt sich die Auflagerfläche zu A_A = 20 * 9 bzw. 20 * 15 cm^2. Das Punktlager wurde so angeordnet, daß die Wirkungslinie der resultierenden Auflagerkraft durch den Leimflächenmittelpunkt verlief (Bild 20 c).
- Punktlagerung des gesamten Knotens im Bereich der Leimfläche mit bezüglich des Leimflächenmittelpunktes ausmittig eingeleiteter Auflagerkraft; gewählte Ausmitte e = 8.7 cm.

Ergänzend zu den 60°-Auflagerknoten sollte untersucht werden, wie sich ein 30°-Auflagerknoten bei entsprechender Lagerung verhält. Als Lagerungsarten wurden gewählt:

- flächige Lagerung entsprechend Anlage 21, Bild 20 a oder 20 b, je nach Ergebnissen der Untersuchung des 60°-Auflagerknotens, Auflagerfläche A_A = 20 * 9 bzw. 20 * 15 cm^2.
- Punktlagerung mit e = 8.7 cm nach Bild 20 c entsprechend Auflagerung des 60°-Knotens.
  Auflagerfläche A_A = 20 * 9 bzw. 20 * 15 cm^2.
- Punktlagerung mit e = 5.7 cm nach Bild 20 c, um die Auswirkung einer Reduzierung der Ausmitte zu untersuchen.

Als weitere praxisnahe Prüfkörperform wurde an Prüfkörpern der Serie Z.. der häufig erforderliche Zugstoß untersucht, der in Anlage 22 (Bild 22) dargestellt ist. Bei dieser Verbindung, bei der die Leimfläche einer Zug-Zugscherbeanspruchung unterworfen ist, werden auf Grund der ungünstigen Kombination aus hohen Scher- und Querzugspannungen am Leimflächenende (Anlage 3, Bild 2 c-d) geringere Festigkeiten erwartet als bei Zug-Druckscherbeanspruchung der Leimfläche.

Auch bei diesen Prüfkörpern sollte der Einfluß eines Vorholzes l_{v1} (Anlage 22, Bild 22) untersucht werden. Eine Zuggurtverlängerung l_{v2} entsprechend den Zug-Druckverbindungen (Anlage 5, Bild 5 a-d) ist bei einem Zugstoß unüblich, so daß die Verbindungen zunächst mit $l_{v2} = 0$ hergestellt und geprüft wurden. Um die Wirkung einer Zuggurtverlängerung auf die Querzugtragfähigkeit festzustellen, wurden zusätzlich Prüfkörper mit $l_{v2} = 5$ cm untersucht.

4.2 Herstellung der Prüfkörper

Die Prüfkörper wurden analog den Grundverbindungen (vgl. 3.2.) aus 3 cm dicken, auf $u \approx 12$ % getrockneten und im Normalklima 20°C/65% rLf klimatisierten Fichtenbrettern ($370 \leq \rho_{12} \leq 510$ kg/m^3) hergestellt. Die Rohdichteverteilung sollte für jede Serie entsprechend Abschnitt 3.2 etwa gleich sein. Die Verleimung erfolgte wie bei den Grundverbindungen mit Kauresin 460 fl. (Härter 465 pv.) bei gleicher Leimauftragsmenge und hydraulischer (normaler) Pressung mit einem Preßdruck von $p_L = 0.6$ N/mm^2.

4.3 Versuchsdurchführung

Zur Festigkeitsprüfung wurde die in Anlage 6 dargestellte Prüfeinrichtung verwendet. Die Kraftmessung erfolgte in Zuggurtachse mit einer 500 kN-Kraftmeßdose.

4.4 Ergebnisse der Versuche an Knotenverbindungen

4.4.1. Allgemeines

Analog zur Auswertung der Parameteruntersuchungen in Abschnitt 3 wird auch bei den unter Momenten- bzw. Zug-Zugscherbeanspruchung geprüften Verbindungen sowie bei den Auflagerknoten die Scherfestigkeit entsprechend Gleichung (1) als fiktive Bruchscherspannung berechnet.

Untersucht wurden 147 Prüfkörper, wovon 140 in die Auswertung einbezogen wurden. Bei 7 Verbindungen erfolgte der Bruch außerhalb der Prüfleimfläche, sie wurden bei der Auswertung nicht berücksichtigt.

4.4.2 Einfluß einer Momentenbeanspruchung der Leimfläche

Anlage 23 zeigt die bei einer ausmittig abgenommenen Auflagerkraft für eine Rechteckfläche A_L = 20 *15 cm^2 und einen Verleimungswinkel $\alpha \geq 0^o$ erzielten Festigkeiten der Serie M.. . Gleichzeitig sind in Anlage 23 die an den entsprechenden Grundverbindungen mit mittiger Krafteinleitung erzielten Festigkeiten eingetragen.

Die Verbindungen mit zusätzlicher Momentenbeanspruchung wiesen mit Ausnahme der faserparallelen Verleimung ($\alpha = 0^o$) höhere Tragfähigkeiten auf. Die Festigkeitsunterschiede gegenüber den Verbindungen mit momentenfreier Belastung sind statistisch gesichert. Diese erhöhte Tragfähigkeit der Verbindungen mit e = 2 cm ist vermutlich auf die Vergrößerung des Druckstabquerschnitts und die somit erhöhte Druckstabsteifigkeit zurückzuführen.

Zur Klärung der Versuchsergebnisse werden weitere Untersuchungen nach der FE-Methode in einem anschließenden Forschungsvorhaben durchgeführt.

Die Vergrößerung der Ausmitte auf e = 16.5 cm bei $\alpha = 30^o$ reduzierte gegenüber der Serie mit e = 2.0 cm die Festigkeit um etwa 75%, bei $\alpha = 60^o$ lieferte eine Ausmitte von e = 5.5 cm trotz des ungünstigeren Verleimungswinkels nur eine um etwa 10% geringere Scherfestigkeit.

4.4.3 Einfluß der Lagerungsart auf die Festigkeit eines Auflagerknotens

An den Auflagerknoten entsprechend Anlage 21, dessen Druckstab mit den 2 Gurthölzern unter einem Winkel $\alpha = 60^{o}$ verleimt war, wurde der Einfluß unterschiedicher Auflagerung und damit unterschiedlicher Querkraftbeanspruchung der Leimfläche auf die Festigkeit an Prüfkörpern der Serie Q.. untersucht. Die hier jeweils erzielten Festigkeiten sind in Anlage 24 zusammengestellt.

Die flächige Lagerung des 60°-Auflagerknotens nur über den 1 cm vorspringenden Druckstab (Anlage 21, Bild 20 a) lieferte mit $\tau_L = 1.44$ N/mm^2 die geringste Festigkeit. Bei flächiger Lagerung des gesamten Knotens (Druckstab und Gurthölzer bündig, Bild 20 b) wurde nahezu die gleiche Tragfähigkeit erzielt, wie bei Lagerung des Knotens über ein Punktlager mit e = 0 (Bild 20 c), so daß davon auszugehen ist, daß sich bei flächiger Lagerung gemäß Bild 20 b die Resultierende der Auflagerdruckspannungen so einstellt, daß deren Wirkungslinie entsprechend der Auflagerkraft bei Punktlagerung mit e = 0 durch den Schnittpunkt der Wirkungslinien von Zuggurt- und Druckstabkraft geht.

Aufgrund dieser Ergebnisse wurde der Einfluß einer ausmittigen Punktlagerung auf die Festigkeit an einem Auflagerknoten untersucht, dessen Zuggurt und Druckstab bündig miteinander verleimt waren.

4.4.4 Einfluß einer ausmittigen Auflagerung eines 60°-Auflagerknotens

Der zusätzliche Einfluß einer in der Praxis häufig nicht zu vermeidenden Ausmitte der Auflagerkraft auf die Festigkeit der Knotenverbindung wurde an Prüfkörpern der Serie Q 60.. untersucht. Die Lagerung erfolgte über ein Punktlager mit einer definierten Ausmitte von e = 8.7 cm. Die Ergebnisse der Prüfung gehen ebenfalls aus Anlage 24 hervor. Aufgrund der zusätzlichen Momentenbeanspruchung der Leimfläche ergab sich ein deutlicher Festigkeitsabfall von 36 % gegenüber der Punktlagerung mit e = 0. Bei dieser Lagerungsart wirken in der Leimfläche Scher-

und Querspannungen infolge der Gurtnormalkraft, Scherspannungen senkrecht dazu infolge der Auflagerkraft und Torsionsspannungen aufgrund der Ausmitte der Auflagerkraft.

4.4.5 Einfluß einer ausmittigen Auflagerung eines 30°-Auflagerknotens

Entsprechend dem 60°-Auflagerknoten erfolgte auch bei einem Knoten, dessen Stäbe unter 30° verleimt waren, die Auflagerung über ein Punktlager mit e = 8.7 cm. Die Festigkeitswerte des 30°-Auflagerknotens der Serie Q 30.. lagen im Mittel etwa 160% über den Werten des 60°-Auflagerknotens (Anlage 24).

Diese Tragfähigkeitserhöhung ist zum einen auf den geringeren Verleimungswinkel zurückzuführen, zum anderen auf die günstigere Lage der Resultierenden der Auflagerdruckspannungen bezogen auf die Leimflächen- bzw. Auflagerlänge. Die unterschiedlichen geometrischen Verhältnisse sind in Bild 21 der Anlage 22 dargestellt.

Bei einem 60°-Auflagerknoten greift die resultierende Auflagerkraft bei einer Ausmitte von e = 8.7 cm nahezu am Auflagerende an. In diesem Bereich überlagern sich die aus der Auflagerkraft herrührenden Scherspannungsspitzen den dort wirkenden Querzugspannungen.

Dagegen liegt bei einem 30°-Auflagerknoten der Angriffspunkt der Auflagerkraft infolge der Geometrie des Prüfkörpers im mittleren Bereich der Auflagerlänge, wo nur geringe Querspannungen wirken. Eine Verringerung der Ausmitte bei $\alpha = 30°$ auf e = 5.7 cm lieferte eine Festigkeitsminderung von etwa 18% (Anlage 24). Dies kann darauf zurückgeführt werden, daß die Auflagerkraft bei dieser Ausmitte am Leimflächenanfang angreift und sich somit die Scherspannungsspitzen infolge der Auflagerkraft und der Gurtzugkraft ungünstig überlagern.

Die flächige Auflagerung des Knotens (Druckstab und Zuggurt bündig) ohne definierte Ausmitte lieferte eine Tragfähigkeit, die zwischen den Werten für die Lagerung mit einer Ausmitte von e = 8.7 cm bzw. 5.7 cm liegt. Dies läßt darauf schließen, daß sich die Resultierende der Auflagerspannungen mit einer Aus-

mitte von 5.7 cm ≤ e ≤ 8.7 cm bezogen auf den Schnittpunkt der Stabkräfte einstellt. Da nur eine geringe Prüfkörperanzahl je Serie untersucht wurde, ist eine statistisch gesicherte Aussage nicht möglich.

Aufgrund der erzielten Ergebnisse sollte in der Praxis die Lagerung eines Fachwerks nur über die Druckdiagonalen vermieden werden, da durch die eingeleitete Auflagerkraft der untere Leimflächenrand stärker belastet wird als bei gleichzeitiger Lagerung über Druckstab und Gurthölzer. In diesem Fall müssen sich Zuggurt und Druckstab aus Verträglichkeitsgründen gleich stark zusammendrücken.

Für die Praxis ist eine Auflagerung über ein genau ausgerichtetes Punktlager mit e = 0 häufig infolge der Geometrie nicht möglich bzw. auch nicht erforderlich (Anlage 24). Die flächige Lagerung des Auflagerknotens sollte jedoch elastisch gebettet sein, um eine ungewollte, herstellungsbedingte Ausmitte der Krafteinleitung in Dickenrichtung des Prüfkörpers zu verhindern.

4.4.6 Einfluß der Art der Kraftübertragung in die Leimfläche

Ergänzend zu den Untersuchungen von GLOS u.a. (1987) wurde die Tragfähigkeit eines geleimten Zugstoßes (Anlage 22, Bild 22) jeweils mit und ohne Anordnung eines Vorholzes l_{v1} bzw. einer Zuggurtverlängerung l_{v2} an Prüfkörpern der Serie Z.. ermittelt. Die entsprechenden rechnerischen Spannungsverteilungen sind qualitativ in Anlage 3 (Bild 2 c,d) dargestellt.

In Anlage 25 und 26 sind die bei Leimflächenlängen von L_L = 10 cm und L_L = 20 cm erzielten Festigkeiten von Prüfkörpern unter Zug-Druck- bzw. Zug-Zugbeanspruchung in Abhängigkeit von der Vorholzlänge l_{v1} bzw. der Zuggurtverlängerung l_{v2} einander gegenübergestellt.

Bei Verbindungen ohne Vorholzlänge (l_{v1} = 0) wirkt sich bei der kürzeren Leimfläche von L_L = 10 cm die Beanspruchungsart nicht auf die Festigkeit aus, da diese Verbindungen sowohl bei Zug-Zug- als auch bei Zug-Druckbeanspruchung infolge zu hoher

Querzugbeanspruchung am Leimflächenende versagen. Dagegen ist bei der größeren Leimfläche von L_L = 20 cm die Tragfähigkeit des Zugstoßes deutlich geringer als die der Zug-Druckverbindungen, da bei dem Zugstoß mit l_{v1} = 0 die ungünstige Kombination aus hoher Scher- und Querzugspannung am Leimflächenende (Anlage 3, Bild 2 c) die Tragfähigkeit bestimmt. Bei der Zug-Druckverbindung wird dagegen die Scherspannung am Leimflächenanfang bei gleichzeitiger Querdruckspannung maßgebend für die Festigkeit. Daher weisen bei entsprechend langer Leimfläche die Verbindungen ohne Vorholz bei unterschiedlicher Beanspruchungsart der Leimfläche unterschiedliches Tragverhalten auf.

Die Anordnung einer Zuggurtverlängerung l_{v2} erhöht bei einer Leimflächenlänge von L_L = 10 cm die Querzugtragfähigkeit am Leimflächenende und somit die Tragfähigkeit der Verbindung. Bei Leimflächenlängen von L_L = 20 cm hat die Verlängerung jedoch keinen Einfluß.

Durch ein Vorholz l_{v1} wird bei einer kleineren Leimflächenlänge (L_L = 10 cm) ebenso wie bei Zug-Druckbeanspruchung der Leimfläche (vgl. 3.4.2) auch bei einem Zugstoß (Zug-Zugbeanspruchung) durch Aufnahme der Querdruckspannungen vor der Leimfläche und Vergrößerung des inneren Hebelarms eine Reduzierung der Querzugspannungen am Leimflächenende bewirkt und die Tragfähigkeit erhöht. Bei einer größeren Leimflächenlänge (L_L = 20 cm) wird dagegen anders als bei Zug-Druckbeanspruchung durch Anordnung eines Vorholzes l_{v1} die Festigkeit nicht beeinflußt. Der geringe Festigkeitsunterschied (Anlage 26) gegenüber dem Zugstoß ohne Vorholz ist statistisch nicht gesichert.

Bei den Verbindungen mit Vorholz (l_{v1} = 5 cm) ergeben sich sowohl für L_L = 10 cm als auch für L_L = 20 cm keine statistisch gesicherten Festigkeitsunterschiede zwischen Zug-Druck- und Zug-Zugprüfkörpern. Die Beanspruchungsart der Leimfläche hat somit bei Verbindungen, deren Versagensursache gleich ist (L_L = 10 cm mit l_{v1} = 0 cm: Versagen infolge zu hoher Querzugspannungen; L_L = 10 und 20 cm mit l_{v1} = 5 cm: Versagen infolge zu hoher Scherspannungen), keinen Einfluß auf die Festigkeit.

5. Versuche an geleimten Stabwerken

5.1 Wahl des Tragsystems

Nach Rücksprache mit Tragwerksplanern wurde ein parallelgurtiges System ohne Pfosten und mit einer Diagonalenneigung von etwa 45° gewählt, da dieser Tragwerkstyp in der Praxis eine besonders hohe Akzeptanz findet. Anlage 28 (Bild 27) zeigt das System; die gewählten drei Typen von Knotenverbindungen wurden bereits in Abschnitt 2.4 beschrieben und sind in den Anlagen 29 bis 31 dargestellt.

Die Schlankheit der Stabwerke wurde mit H/L = 1/10 festgelegt. Die Stäbe wurden so bemessen, daß bei der Prüfung ein Versagen der Leimflächen zu erwarten war. Die Zuordnung der Querschnitte zu den einzelnen Stabwerkstypen und eine kurze Beschreibung der jeweiligen Diagonalenanschlüsse zeigt Anlage 27 (Tabelle 3).

5.2 Herstellung der Stabwerke

5.2.1 Allgemeine Gesichtspunkte

Die einzelnen Bretter wurden zu Stäben möglichst gleicher Rohdichte zusammengefaßt. Die Stäbe wurden dann im Stabwerk im allgemeinen so angeordnet, daß deren Rohdichte der Beanspruchung entsprechend im Stabwerk verteilt war. Die Rohdichte der Diagonalstäbe mußte demnach vom Stabwerkauflager zum Stabwerkinneren hin abnehmen, die der Gurtstäbe dagegen entsprechend zunehmen.

Aus diesem Grunde und wegen der höheren Scherfestigkeit bei einem Verleimungswinkel von 45° (Anlage 16) wurden die beiden äußeren Diagonalstäbe, also die Stäbe 1-2 und 2-3 bzw. 9-10 und 10-11 (Anlage 28, Bild 27) aus Buchenfurnierplatten (BFU) ausgeführt.

Bei der Verleimung wurde darauf geachtet, daß in der Prüfleimfläche soweit möglich die jeweils linken Brettseiten aufeinandertrafen. Die Stoßlaschen der Gurte bestanden bei den 10m-Stabwerken aus Fichtenbrettern, bei den 15m-Stabwerken

dagegen aus Buchenfurnierplatten. Sie wurden 60 cm lang ausgeführt. Ein Beispiel für einen Untergurtstoß ist in Anlage 28 (Bild 28) dargestellt.

Im Gegensatz zu den Grund- und Knotenverbindungen wurden die Stabwerke unter praxisüblichen Bedingungen gefertigt[3]. Um die Gefahr von Fehlverleimungen zu verringern, erfolgte die Verleimung der Stabwerke brettweise. Allerdings erhöhte sich dadurch der Herstellungsaufwand im Vergleich zu einer getrennten Herstellung der Gurte und Diagonalen und anschließender Schiebeleimung nicht unerheblich. Bei allen Stabwerken wurden die Druckstäbe (Aussteifung !) und die zweiteiligen Zugdiagonalen mit vollflächig eingeleimten Futterhölzern ausgefüttert (Anlagen 29 bis 31).

5.2.2 Materialauswahl für die Stabwerksherstellung

Schnittholz

Bei einem oberbayerischen Sägewerk wurden Fichtenholzbretter in den erforderlichen Rohabmessungen 4*24 bzw. 5*28 cm^2 eingeschnitten und von Mitarbeitern des Instituts für Holzforschung vor Ort nach Sortierklasse S13/S10 nach DIN 4074 (1989) (früher Gkl. I/II) sortiert. Für die Zugstäbe wurden Bretter mit möglichst kleinen Ästen ausgesucht.

Die Bretter wurden dann im Institut für Holzforschung entsprechend den zu erwartenden Klimata bei Herstellung bzw. Prüfung der Stabwerke (Anlage 32) auf etwa 8% (Nr.1-6) bzw. 11% (Nr.7,8) technisch getrocknet. Die Rohdichte der Bretter bei diesen Feuchten wurde jeweils aus den Abmessungen und dem Gewicht des Gesamtbretts bestimmt und lag
für die 10m-Stabwerke im Bereich

$$370 \leq \rho_8 \leq 493 \ kg/m^3, \qquad \bar{\rho}_8 = 431 \ kg/m^3$$

[3] Die Stabwerke wurden bei der Fa. Rathgeber GmbH & Co KG, Leonbergerstr. 23, 7032 Sindelfingen, hergestellt. Herrn Rathgeber sei an dieser Stelle für sein Entgegenkommen und die gute Zusammenarbeit herzlich gedankt.

für die 15m-Stabwerke im Bereich

$$381 \leq \rho_{11} \leq 506 \text{ kg/m}^3, \quad \bar{\rho}_{11} = 432 \text{ kg/m}^3$$

Baufurnierplatten

Für die äußeren Diagonalstäbe und einen Teil der Stoßlaschen war 13-lagiges Bau-Furniersperrholz aus Buche (BFU-BU 100) nach DIN 68705, T.5, mit dem Aufbau Nr. 13 nach Beiblatt 1 dieser Norm vorgesehen (vgl. 5.2.1). Hierfür wurden 3.1 cm und 3.85 cm dicke Platten vom Typ Delignit der Firma Blomberger Holzindustrie beschafft[4]. Die Platten besaßen eine Rohdichte von etwa 790 kg/m^3.

Leim

Für die Verleimung der Stabwerke wurde der Phenol-Resorcin-Formaldehydharzleim Kauresin 460 fl. (100 Gew.-Teile) mit dem Härter 465 pv. (25 Gew.-Teile) der Firma Türmerleim[4] verwendet.

5.2.3 Arbeitsgänge bei der Herstellung

Die Sortierung, grobe Ablängung und Positionierung der Bretter erfolgte im Institut für Holzforschung, alle weiteren Arbeitsgänge bei der Firma Rathgeber in Sindelfingen.

In Anlage 32 (Tabelle 4) sind für die einzelnen Stabwerke die Herstellungsbedingungen und die zeitliche Reihenfolge der Verleimung sowie die mittleren Stabwerksrohdichten, die aus den mittleren Rohdichten der Einzelstäbe bestimmt wurden, angegeben.

In einem ersten Arbeitsgang wurden die Fichtenbretter allseitig auf die Endmaße 3*20 bzw. 3.6*25 cm^2 zugehobelt und nach den Arbeitsplänen zugeschnitten. Da die Bretter wie üblich ohne vorheriges Abrichten gehobelt wurden, waren sie teilweise etwas verworfen, was beim Verleimen durch das Pressen in etwa ausgeglichen wurde. Die auf die erforderliche Breite zuge-

---

[4] Den genannten Firmen sei an dieser Stelle für die kostenlose Bereitstellung des Materials herzlich gedankt.

schnittenen BFU-Platten wurden auf die Enddicke von 3.0 cm bzw. 3.6 cm beidseitig ausgehobelt.

In einem zweiten Arbeitsgang wurden zur Kontrolle der Positionierung und der Paßgenauigkeit der Zuschnitte die Bretter bzw. Furnierplattenstreifen auf einer vorbereiteten Schablone ohne Leim (trocken) zu dem gewünschten Stabwerk lagenweise zusammengelegt und die zu beleimenden Flächen gekennzeichnet.

Dabei zeigte sich, daß die geplanten satten Stumpfstöße bei Typ II wegen unvermeidbarer Toleranzen beim Zuschnitt und bei der Herstellung der Schablone in der Praxis nicht genau genug realisiert werden konnten. Bei Typ III ergab sich, daß bereits geringe Überlängen der Brettdiagonalen sich bei der Zulage derart aufaddierten, daß nachgeschnitten werden mußte. Anzustreben waren hier daher eher knappere Zuschnittmaße.

In einem dritten Arbeitsgang wurden die Bretter bzw. Furnierplattenstreifen nach dem Auseinanderlegen an den gekennzeichneten Flächen mit einer Gupfo-Handwalze bei einem Auftrag (beidseitig) von etwa 500 g/m^2 Leimfuge beleimt. Die Gebrauchsdauer des Leims betrug unter den herrschenden Bedingungen etwa 2½ h (BASF, 1985). Zur Minimierung der offenen Zeit wurde entsprechend viel Personal zur Verteilung und Zulage der beleimten Bretter eingesetzt, zwei Mann für den Leimauftrag (Anlage 32).

Während die Stabwerkstypen I und III wie erwähnt lagenweise zu den gewünschten Stabwerken zusammengelegt wurden, konnten die Diagonalstäbe für Typ II bereits am Vortag zu den Abmessungen 9*20 cm^2 zusammengeleimt werden, was die Verleimung des Gesamtstabwerks außerordentlich erleichterte.

In einem vierten und letzten Arbeitsgang wurden Einzel-Spindel-Pressen an den Knoten, Stößen und großflächig beleimten Druckstäben angesetzt und in einem ersten Durchgang angezogen, wobei die Kraft mit Hilfe einer Schlag-Schraub-Maschine auf einen Preßdruck von etwa 0.6 N/mm^2 eingestellt wurde. Alle Spindelpressen wurden in einem zweiten Durchgang nochmals nachgezogen. Allgemein bei den Fugen austretende Leimschnüre ließen einen ausreichenden Leimauftrag erkennen.

Die äußeren Stoßlaschen der Gurte wurden bei den 10m-Stabwerken mittels Nagelpressung, bei den 15m-Stabwerken mit Spindelpressen gepreßt. Nach etwa 15 bis 20 Minuten war der Preßvorgang abgeschlossen. Die Pressen wurden nach etwa 24 h wieder abgenommen.

Abschließende Bemerkungen

Bei dem als erstem verleimten Stabwerk 2 vom Typ I konnten wegen Anlaufschwierigkeiten die Pressen erst nach einer Zeit von etwa $t \approx 2\frac{1}{2}$ h nach Beginn des Leimauftrags angesetzt werden. Die Zusammenstellung in Anlage 32 läßt aber erkennen, daß mit fortschreitender Routine und steigendem Personaleinsatz die Zeit t bis zum Ansetzen der Pressen bis auf eine 3/4 h reduziert werden konnte.

Die Verleimung der Stabwerke 3 und 4 vom Typ II erfolgte wegen der Vorfertigung der Diagonalen in einem Paket. Der Stabwerktyp II eignet sich daher ungeachtet der Stumpfstoßproblematik bei den Druckdiagonalen fertigungstechnisch am ehesten für einen wirtschaftlichen Einsatz in der Praxis.

Nach der Verleimung wurden die Stabwerke in der Halle der Firma Rathgeber etwa 14 Tage gelagert und anschließend ins Otto-Graf-Institut der FMPA Stuttgart transportiert.

5.3 Durchführung der Stabwerksprüfung

Die Prüfung der Stabwerke erfolgte im Otto-Graf-Institut der FMPA Stuttgart[5]. Die Stabwerke wurden im Prüfrahmen der FMPA auf waagrecht verschieblichen Stahlrollen bei der vorgesehenen Stützweite gelagert. Zur Verteilung der Auflagerlast wurden Stahlplatten, zur Verteilung der Knotenlast Buchenholzplatten zwischengelegt. Die Stabwerke wurden in den Obergurtknoten gegen seitliches Ausweichen abgestützt.

---

[5] Für ihr Entgegenkommen und ihre Unterstützung bei der Prüfung sei hier den Herren Dr. Aicher, Dr. Dieterle, OBR Radovic, Dr. Völkel und Dr. Werner gedankt.

Die Belastung der Stabwerke erfolgte nach dem Schema der Anlage 28 (Bild 27) in den Obergurtknoten durch hydraulisch arbeitende Einzelkraftzylinder. Nach einer Vorlast von 5 kN/Knoten (10m-Stabwerke) bzw. 10 kN/Knoten (15m-Stabwerke) und anschließender Entlastung wurde die Belastung in Stufen von ΔF = 4 kN/Knoten zügig bis zum Bruch des Stabwerks erhöht. Der Bruch trat im allgemeinen nach 20 bis 30 Minuten ein. Die einzelnen Laststufen wurden mit einer Datenerfassungsanlage vom Typ OPTILOG der FMPA Stuttgart erfaßt.

Die Durchbiegungen des Stabwerks wurden auf der Vorder- und Rückseite des Untergurts in den Knoten 3, 5, 7 und 9 gemessen. Hierzu wurde die Belastung jeweils etwa 1 Minute lang konstant gehalten. Als Meßeinrichtung diente ein zwischen den Auflagern in Höhe der Untergurtachse gespannter Faden sowie jeweils eine in den Meßpunkten auf einen Spiegel (Ausschaltung der Parallaxe) aufgeklebte Maßskala.

Die Ablesung der Durchsenkung des Stabwerks erfolgte mittels einer Handlupe mit einer Genauigkeit von 1 mm, wobei 2/10 mm noch hinreichend genau abgeschätzt werden konnten. Die Meßwerte wurden lastabhängig in ein Protokoll übertragen.

5.4 Ergebnisse der Stabwerksversuche

5.4.1 Bruchlasten und Bruchgeschehen

Als Bruchlast des Stabwerks wird die Einzellast F_B definiert, die auf den Knoten zum Zeitpunkt des Bruchs einwirkte. Die Gesamtbruchlast des Stabwerks war damit $5 * F_B$.
In Anlage 33 (Tabelle 5) sind die Bruchlasten und die jeweiligen mittleren Rohdichten der Stabwerke zusammengestellt.

Der Vergleich der Ergebnisse zeigt, daß von dem jeweils geprüften Stabwerkspaar das Stabwerk mit der höheren mittleren Rohdichte im allgemeinen auch die größere Bruchlast aufwies. Außerdem stieg die Bruchlast im allgemeinen mit der Erhöhung der Zahl und Größe der Gurtquerschnitte bzw. der Leimanschlußflächen an.

Die Ausmittigkeit der Diagonalenanschlüsse und die Art der Knotenverbindung scheinen demgegenüber keinen wesentlichen Einfluß auf die Bruchlast der Stabwerke zu besitzen.

In Anlage 33 sind ferner diejenigen Knotenpunkte (K) angegeben, die für den Bruch des Stabwerks als primär verantwortlich beurteilt wurden. Bei Stabwerk 5 versagte eine Stoßlasche, bei Stabwerk 7 die Mittellamelle c des dreiteiligen Untergurtes bei einer rechnerischen Zugspannung von etwa 22 N/mm^2. Beide Stabwerke versagten also nicht in den Leimflächen der Knoten und wurden daher nicht in die Auswertung der Scherfestigkeit miteinbezogen.

Bei den Stabwerken vom Typ II (Diagonalenstumpfstöße) wurde bei etwa 28 kN Knotenlast ein erster Teilbruch in den kleinen Leimanschlußflächen beobachtet, so daß danach die Abtragung der Diagonalendruckkraft unmittelbar auf die Zugdiagonale über Kontaktstoß erfolgte.

In den Anlagen 44 bis 46 (Bilder 38 bis 42) sind einige charakteristische gebrochene Knoten und Bruchbilder dargestellt. In Bild 41 ist deutlich der Unterschied im "Leimbruchanteil" von Fi-Fi- und BFU-Fi-Verbindungen zu erkennen.

5.4.2 Durchbiegungen der Untergurtknoten

In den Anlagen 34 bis 36 (Bilder 33 bis 36) sind die in den Untergurtknoten 3, 5, 7 und 9 gemessenen Durchbiegungen f sowie die jeweils hieraus berechneten Regressionsgeraden eingezeichnet. Die Messungen bestätigen bis auf f_3 bzw. f_9 bei Stabwerk 6 (Anlage 35, Bild 35) hinreichend genau die Symmetrie der Durchbiegungen ($f_3 \approx f_9$, $f_5 \approx f_7$).

Der bei Typ II bereits erwähnte Teilbruch der Stabwerke 3 und 4 bei 28 kN Knotenlast macht sich in Bild 34 (Anlage 34) insbesondere in den durch die Diagonalstäbe höher beanspruchten Knoten K3 und K9 in Form eines zum Teil ausgeprägten Knicks in der Durchbiegungslinie von f_3 bzw. f_9 bemerkbar. Ab diesem Knick ist ein größerer Durchbiegungsanstieg zu erkennen. Bei Typ II sind die Regressionsgeraden daher nur bis zu der Knotenlast 28 kN bestimmt worden.

Der Knick in der Durchbiegungslinie muß auf das vorzeitige Versagen der kleinen Leimanschlußflächen bei den Diagonalenstumpfstößen zurückgeführt werden, wodurch das Stabwerk für F > 28 kN weicher wird, da die Druckkraft nun quer zur Faser des Holzes in die Zugdiagonale abgetragen werden muß. Daraus folgt für die Berechnung der Stabanschlüsse, daß wegen der kraftschlüssigen Verbindung der Diagonalstäbe untereinander die Gurte nach dem Teilbruch nur noch für die Differenzschnittgrößen anzuschließen sind, was bei der Auswertung der Scherfestigkeit zu beachten ist.

In Anlage 37 (Tabelle 6) sind für alle Tragwerkssysteme die aus einer statischen Berechnung sich ergebenden Schnittkräfte und Durchbiegungen unter der Annahme E = 10 000 N/mm^2 (DIN 1052) bei einer Knotenlast von F = 100 kN zusammengestellt. Diese Berechnung, bei der die vorhandenen Ausmitten der Diagonalenanschlüsse berücksichtigt und vereinfachend für alle Stäbe der gleiche E-Modul angenommen wurde[6], erfolgte nach der Stabwerkstheorie (alle Stäbe biegesteif angeschlossen) und am Beispiel des Tragwerks vom Typ II zum Vergleich nach der Fachwerkstheorie (alle Stäbe gelenkig angeschlossen). Anhand der Tabelle 6 konnten dann die Schnittkräfte der einzelnen Stabwerke durch Umrechnung auf die jeweiligen Bruchlasten einfach bestimmt werden.

In Anlage 38 (Tabelle 7) sind für eine Knotenlast von F = 20 kN, die etwa noch im Bereich der Gebrauchslast liegt, die rechnerischen Durchbiegungen unter Berücksichtigung der tatsächlichen E-Moduli angegeben. Diese wurden aus der mittleren Stabwerksrohdichte, der gemessenen Holzfeuchte zum Zeitpunkt der Prüfung, einer Ästigkeit von 20% (Grenzwert für Sortierklasse S13 nach DIN 4074) und für einen aus der Bruchaufnahme geschätzten mittleren Druckholzanteil von etwa 10% nach GLOS (1978) berechnet.

In Anlage 39 (Tabelle 8) werden schließlich die rechnerisch ermittelten sowie die gemessenen Durchbiegungen miteinander

---

[6] Berücksichtigt man E_{BFU} = 6370 N/mm^2 (DIN 68705, T.5), so erhöht sich die maximale rechnerische Durchbiegung des Fachwerks um etwa 3.6%.

verglichen. Wie ersichtlich, verhalten sich die Stabwerke vom Typ I und II im Versuch etwas weicher, die Stabwerke vom Typ III dagegen etwas steifer als rechnerisch ermittelt. Diese Erscheinung kann auf die größeren Leimanschlußflächen des Stabwerks vom Typ III zurückgeführt werden, welche die Knotensteifigkeit des Tragsystems erhöhen.

Der Vergleich der im Versuch gemessenen Durchbiegungen zeigt, daß das Stabwerk mit der jeweils höheren Rohdichte auch eine etwas geringere Durchbiegung aufweist. Die Zusammenstellung zeigt schließlich noch, daß das Stabwerk nur unwesentlich steifer ist als das Fachwerk, so daß die Durchbiegungen vergleichbarer biegesteifer Stabwerke auch nach der einfacheren Fachwerktheorie berechnet werden können.

5.4.3 Scherfestigkeit der Stabwerksknoten

Allgemeines

In Anlage 40 (Bild 37) ist das Prinzip der Auswertung dargestellt. Überlagert werden die aus den resultierenden Schnittgrößen ΔN, ΔQ und $\Delta M = M_T$ am Knoten sich ergebenden Leimscherspannungen. Wie sich jedoch zeigt, kann der Einfluß der Querkräfte bei der folgenden Auswertung vernachlässigt werden. Das Torsionswiderstandsmoment W_T der gegebenen Leimfläche wird für eine flächengleiche quadratische Ersatzfläche ermittelt. Bei Stabwerkstyp I und II sind jeweils zwei und bei Stabwerkstyp III vier Leimflächen bei der Auswertung zu berücksichtigen.

Scherfestigkeiten

Anlage 41 (Tabelle 9) zeigt die Ermittlung der Scherfestigkeit der Stabwerksknoten. Eingetragen sind die nach Anlage 37 ermittelten, beim Bruch im Stabwerk auftretenden und von den Leimflächen zu übertragenden resultierenden Schnittgrößen, ferner die jeweils gebrochenen Knoten, die beteiligten Stäbe, die vorhandenen Querschnittsgrößen sowie schließlich die nach einer Analyse der gebrochenen Knoten abgeschätzten "Leimbruch-

anteile" in den Bruchebenen (Anlage 31, Bild 32). Die jeweils berücksichtigte Leimfläche ist in den Anlagen 29 bis 31 (Bild 29 bis 31) schraffiert dargestellt.

Als "Leimbruchanteil" wurde der Anteil der Leimfläche ohne erkennbaren Holzfaserbesatz im Verhältnis zur gesamten Leimfläche eines Stabanschlusses definiert. Unsicherheiten in der Bewertung ergaben sich vor allem bei den BFU-Leimflächen, was wohl der Grund für die im allgemeinen höheren Schätzwerte bei den BFU-Fi-Verbindungen sein dürfte (Anlage 41).

Bei den Stabwerken vom Typ I waren die Diagonalen wegen ihrer kraftschlüssigen Verbindung untereinander für die Differenzschnittgrößen an die Gurte anzuschließen. Bei Typ III war dagegen der unmittelbare Anschluß jeder einzelnen Diagonalen an die Gurte zu beachten. Bei den Stabwerken vom Typ II waren jedoch je nach Lastbereich jeweils eine der beiden Anschlußarten zu berücksichtigen:

Im Bereich F < 28 kN Knotenlast war bis zum Versagen der kleinen Leimanschlußflächen beim Stumpfstoß der Druckdiagonalen ein unmittelbarer Anschluß aller Diagonalen an die Gurte gegeben.

Im Bereich F > 28 kN Knotenlast mußte dagegen nach dem Versagen der kleinen Leimanschlußflächen die Druckkraft über Kontaktstoß auf die Diagonale übertragen werden, so daß wegen der nun kraftschlüssigen Verbindung der Diagonalen untereinander der Anschluß wie bei Typ I nur noch für die Differenzschnittgrößen erfolgen konnte. Die Scherfestigkeit wurde sowohl für die Teilbruchlast von 28 kN als auch für die Endbruchlast von 52 kN ermittelt. Die Stabwerke Nr. 5 und 7 wurden nicht in die Auswertung miteinbezogen, weil ein Leimflächenbruch hier nicht auftrat.

In Anlage 41 (Tabelle 9) ist der Normalkraftanteil (τ_N) und der Torsionsanteil (τ_T) sowie die durch Überlagerung berechnete Gesamtscherfestigkeit (τ_L) der Stabwerksknoten angegeben. Im Mittel beträgt der Torsionsanteil etwa 40% des Normalkraftanteils. Nur bei Stabwerk 8 (K2, Stab 2-3) steigt dieser Anteil wegen des besonders hohen Torsionsmoments auf etwa 105% an.

In Anlage 42 (Tabelle 10) werden die aus den Stabwerksversuchen und den an Grundverbindungen erhaltenen Scherfestigkeiten miteinander verglichen. Hierzu war zunächst eine geschlossene Darstellung der Ergebnisse aus den Versuchen an Grundverbindungen abzuleiten, die den Zusammenhang zwischen Scherfestigkeit, Leimflächenlänge und Verleimungswinkel aufzeigt:

Fi-Fi-Verbindungen

Für Fi-Fi-Verbindungen läßt sich dieser Zusammenhang durch einen Produktansatz der Form

$$\tau(L_L,\alpha) = \tau(L_L) * f(\alpha) \qquad (2)$$

darstellen. Für $\tau(L_L)$ erhält man für die Mittelwerte der Ergebnisse aus den Grundverbindungen (Anlage 10, $\alpha = 0^o$, $l_{V1} = 5$ cm) im Bereich $50 \leq L_L \leq 400$ mm mit guter Näherung die Beziehung

$$\tau(L_L) = 4.3 * e^{-0,0028 * L_L} \qquad (3)$$

wobei die Leimflächenlänge (Überlappungslänge) L_L in mm einzusetzen ist. Die maximale Abweichung der Gl.(3) gegenüber den Versuchswerten liegt bei etwa ± 3%.

Für die Funktion $f(\alpha)$, die den Einfluß des Verleimungswinkels beschreibt, kann entsprechend der Hankinson-Formel (For. Prod. Lab., 1921) eine sinusförmige Abhängigkeit angenommen werden. Vereinfachend wird hier ein Ansatz entsprechend der Formel für die zulässige Spannung schräg zur Faser des Holzes nach DIN 1052, T.1, gewählt. Aus den Versuchswerten (Anlage 16) ergibt sich in sehr guter Anpassung die Beziehung

$$f(\alpha) = 1 - 0.70 * \sin \alpha \qquad (4)$$

BFU-Fi-Verbindungen

Für die Scherfestigkeit von BFU-Fi-Verbindungen wird die gleiche Abhängigkeit von der Leimflächenlänge angenommen wie für Fi-Fi-Verbindungen. Jedoch muß entsprechend den Ver-

suchsergebnissen nach Anlage 16 für $\alpha = 0^{o}$ ein Reduktionsfaktor von 0.86 eingeführt werden.

Die Abhängigkeit der Scherfestigkeit von BFU-Fi-Verbindungen vom Verleimungswinkel α wird schließlich ohne formelmäßige Erfassung direkt der Anlage 16 entnommen.

Die nach den entwickelten Beziehungen ermittelten rechnerischen Scherfestigkeiten $\tau_{0L} = \tau(L_L)*f(\alpha)$ der Stabwerksknoten sind in Anlage 42 zusammengestellt. In den letzten beiden Spalten sind die Verhältnisse der Scherfestigkeiten aus Stabwerksversuchen und Grundversuchen angegeben. Wie man erkennt, liegen diese Verhältnisse beim Normalkraftanteil im Bereich von 0.48 bis 1.31, bei zusätzlicher Berücksichtigung des Torsionsanteils im Bereich von 0.50 bis 1.78. Im letzteren Fall ist der Variationskoeffizient V, ein Maß für die Streuung, um etwa 20% größer.

Bei den niedrigeren Verhältniswerten liegt die Vermutung nahe, daß es sich hier um Sekundärbrüche handeln könnte. Der niedrigste Wert wurde bei Stabwerk 2 (K3) erreicht, wo der Bruch ausnahmsweise in den Ebenen 2/3 auftrat (BFU-Fi-Verbindung, Anlage 41).

Im Durchschnitt liegt die Scherfestigkeit bei Berücksichtigung nur des Normalkraftanteils um etwa 8% unter bzw. bei zusätzlicher Berücksichtigung des Torsionsanteils um etwa 26% über derjenigen der Grundversuche (Anlage 42, Tabelle 10).

Da sich für die Praxis aus Vereinfachungsgründen empfiehlt, nur den Normalkraftanteil bei der Ermittlung der Leimscherspannung zu berücksichtigen, ergibt sich in diesem Fall aus den Stabwerkversuchen ein Reduktionsfaktor von durchschnittlich 0.92 gegenüber den in Abschnitt 3 erzielten Ergebnissen.

Anlage 43 zeigt die ermittelten Scherfestigkeitsverhältnisse der Stabwerksknoten in der Reihenfolge der zeitlichen Herstellung der Stabwerke (Anlage 32). Es wurden zusätzlich die über die gebrochenen Knoten gemittelten Scherfestigkeitsverhältnisse eines jeden Stabwerks eingetragen. Man erkennt deutlich, daß die mittleren Verhältniswerte mit abnehmender Verleimungszeit t im allgemeinen ansteigen. In dem Maße, in dem infolge

kürzerer Verleimungszeiten die Wahrscheinlichkeit einer Fehlverleimung also abnimmt, steigt die Scherfestigkeit des Stabwerkknotens entsprechend an.

Berechnet man schließlich als Stabwerkskennziffer den Quotient aus Bruchlast und Summe der Leimflächen (A_{LG}) eines Stabanschlusses (Innenknoten), so erkennt man, daß die Tragfähigkeit des Stabwerks von der Art der Knotenausbildung (Ausmitte, Stumpfstoß) nahezu unabhängig ist. Die Tragfähigkeit hängt also in erster Linie von der Größe der verfügbaren Leimanschlußflächen ab.

6. Zusammenfassung

6.1 Allgemeines

Das Ziel vorliegender Arbeit war es, an geeigneten großflächig verleimten Holzverbindungen mit baupraktischen Abmessungen die wesentlichen Einflußgrößen für das Festigkeitsverhalten dieser Verbindungen systematisch zu untersuchen, um die für eine Bemessung großflächiger Leimverbindungen notwendigen Grundlagen zu schaffen.

Weil sich bei einer geleimten Holzverbindung im allgemeinen verschiedene wesentliche Einflußgrößen, wie beispielsweise Größe und Form der Leimfläche und der Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung der zu verleimenden Hölzer, überlagern, wurde zur getrennten Untersuchung der Einflußgrößen und zur praktischen Überprüfung der Ergebnisse ein dreiteiliges Versuchsprogramm entwickelt:

An sogenannten Grundverbindungen wurden zunächst systematisch die Einzeleinflüsse aus Prüfkörper- und Leimflächengeometrie, Verleimungswinkel, Holzart, Preßtechnik und Leimart auf die Tragfähigkeit einer großflächigen Leimverbindung untersucht.

An sogenannten Knotenverbindungen wurden anschließend der Einfluß einer zusätzlich wirkenden Momenten- und Querkraftbeanspruchung sowie einer Zug-Zugscherbeanspruchung der Leimfläche ermittelt.

Die Übertragbarkeit der erzielten Ergebnisse auf reale Konstruktionen wurde abschließend an Versuchen mit 10 m und 15 m langen Stabwerken überprüft.

Zur Untersuchung des Klimaeinflusses auf die Festigkeit geleimter Holzverbindungen wurden 20 Prüfkörper aus den Grundverbindungenn einer Freibewitterung ausgesetzt. Diese Prüfkörper werden nach einer 5-jährigen Klimaeinwirkung geprüft. Die Bewitterungsversuche waren daher nicht Gegenstand dieses Berichts.

6.2 Grundverbindungen

An 477 Prüfkörpern mit praxisnahen Abmessungen wurde bei Zug-Druckscherbeanspruchung der Leimfläche der Einfluß der Leimflächen- und Fügeteilgeometrie sowie der Prüfkörperform auf das Festigkeitsverhalten einer großflächigen Leimverbindung jeweils getrennt untersucht. Die Grundverbindung bestand aus einem zweiteiligen Zuggurt und einem dazwischengeleimten einteiligen Druckstab.

Es wurde gezeigt, daß die unbeleimte Länge des Druckstabs vor der Leimfläche (Vorholzlänge l_{vl}) die Spannungsverteilung in der Leimfläche wesentlich beeinflußt. Bei kurzen Leimflächen (L_L = 5 cm) nahmen mit zunehmender Vergrößerung der Vorholzlänge l_{vl} die maßgebenden Querzugspannungen am Leimflächenende ab, die Tragfähigkeit der Verbindung wurde dementsprechend erhöht.

Bei langen Leimflächen (L_L = 20 cm) wurden dagegen die erhöhten Scherspannungen am Leimflächenanfang maßgebend, so daß sich hier ein Vorholz negativ auf die Festigkeit auswirkte. Die kritische Leimflächenlänge L_L, bis zu der die Festigkeiten der Prüfkörper ohne Vorholz maßgebend für die Berechnung einer charakteristischen Bruchlast waren, betrug etwa 15 cm. Für Längen über 15 cm waren die Festigkeiten der Prüfkörper mit Vorholz ausschlaggebend.

Bei der Variation der Leimflächenlänge zwischen 5 und 40 cm war bei Prüfkörpern mit Vorholz ein kontinuierlicher Abfall der Festigkeit von 3.7 auf 1.4 N/mm^2 zu beobachten. Gleiches war bei der Vergrößerung des Verleimungswinkels α von 0° bis 90° der Fall, wo die Festigkeit auf etwa 30% ihres Ausgangswertes

absank. Leimflächenform und -breite hatten dagegen keinen erkennbaren Einfluß auf die Festigkeit der Leimverbindung.

Die Variation der Dicke d der Zuggurthölzer ergab, daß sich dem Einfluß der ausmittigen Zuggurtkraft ein weiterer Einfluß auf die Scherfestigkeit der Verbindung überlagert, der aus der unterschiedlichen Steifigkeit der Fügeteile herrührt.

Zur Klärung der an Prüfkörpern mit einem Druckstab aus Buchenfurnierplatten erzielten Ergebnisse werden derzeit ergänzende rechnerische Untersuchungen nach der FE-Methode durchgeführt, über die zu einem späteren Zeitpunkt berichtet wird.

Die Verleimung der Prüfkörper durch Nagelpressung mit unterschiedlicher Nagelart und -anzahl hatte gegenüber der konventionellen Pressung keinen Einfluß auf die Festigkeit. Durch die Verwendung von Leimen mit erhöhter Plastizität konnte die Tragfähigkeit der Verbindung jedoch verbessert werden.

6.3 Knotenverbindungen

Eine Leimverbindung z.B. in einem Stabwerk wird nicht nur durch Gurtnormalkräfte beansprucht, sondern auch durch Querkräfte und Biegemomente. Ferner sind bei einem Gurtstoß oft Zugkräfte zu übertragen. Diese Einflüsse auf die Scherfestigkeit der Knotenverbindung wurden an 147 Prüfkörpern untersucht.

Um den Einfluß einer zusätzlichen Biegebeanspruchung zu untersuchen, wurde zunächst an 60 Prüfkörpern, die im wesentlichen den Grundverbindungen entsprachen, bei Variation des Verleimungswinkels α die Druckkraft mit einer definierten Ausmitte gegenüber der Zuggurtkraft in den Druckstab eingeleitet. Bei faserparalleler Verleimung führte dies zu einem Absinken der Tragfähigkeit gegenüber den momentenfreien Prüfkörpern, bei Verleimungswinkeln $\alpha > 0^0$ wurde durch eine ausmittige Druckstablagerung die Festigkeit dagegen teilweise erhöht.

Die Wirkung unterschiedlicher Lagerungsmöglichkeiten eines Auflagerknotens und die daraus resultierende Beanspruchung der Leimfläche durch eine Querkraft wurde an 30^0- und 60^0-Auflagerknoten untersucht. Die an insgesamt 45 Prüfkörpern erzielten Ergebnisse belegen, daß eine flächige Lagerung der gesamten Verbindung im Leimflächenbereich einer Punktlagerung mit e = 0

in der Regel gleichwertig war. Dagegen reduzierte die Lagerung eines Auflagerknotens nur über die Druckdiagonalen ebenso wie eine Punktlagerung mit einer - bezogen auf den Leimflächenmittelpunkt - ausmittig wirkenden Auflagerkraft die Tragfähigkeit des Auflagerknotens und sollte daher vermieden werden.

Da die Zuggurthölzer eines weitgespannten Stabwerks herstellungsbedingt durch Zugstöße miteinander verbunden sind, wurde an 42 Prüfkörpern mit Leimflächenlängen von L_L = 10 cm und 20 cm und unterschiedlicher Vorholzlänge und Zuggurtverlängerung auch die Tragfähigkeit einer Zug-Zugscherverbindung untersucht. Der Vergleich mit den entsprechenden durch Zug-Druckscheren beanspruchten Prüfkörpern zeigte, daß bei Verbindungen, deren Versagensursache gleich war, die Beanspruchungsart der Leimfläche keinen Einfluß auf die Festigkeit hatte.

6.4 Stabwerke

Zur Überprüfung der Übertragbarkeit der an Grund- und Knotenverbindungen erzielten Scherfestigkeiten wurden sechs 10m- und zwei 15m-Stabwerke in vier unterschiedlichen Ausführungsarten geprüft. Je Ausführungsart wurden zwei identische Stabwerke hergestellt.

Als Tragsystem wurde ein parallelgurtiges System ohne Pfosten mit einer Diagonalenneigung von etwa 45^0 und einer Schlankheit von 1:10 gewählt. Die vier Stabwerkausführungen unterschieden sich durch die Ausmitte der Diagonalenanschlüsse, die Art des Diagonalenanschlusses sowie durch die Querschnittsabmessungen der Bretter (3*20 bzw. 3.6*25 cm^2), aus denen die einzelnen Stäbe zusammengeleimt waren. Die Stabwerke wurden in den Obergurtknoten durch Einzelkräfte belastet. Es wurden die Bruchlasten und die Durchbiegungen der Untergurtknoten bestimmt.

Die Gesamtbruchlasten der Stabwerke lagen je nach Größe der Leimanschlußflächen zwischen 195 kN und 480 kN. Dies entsprach Knotenlasten von 39 kN bis 96 kN. Wie sich zeigte, war die Höhe der Bruchlast in erster Linie von der Größe der verfügbaren Leimanschlußflächen in den Knoten abhängig.

Die Scherfestigkeiten der Stabwerksknoten, die aus den Bruchlasten und der Knotengeometrie berechnet wurden, lagen bei Berücksichtigung nur der Normalkräfte zwischen 0.68 N/mm^2 und 2.41 N/mm^2, bei zusätzlicher Berücksichtigung auch der Torsionsmomente in den Knoten zwischen 0.85 N/mm^2 und 2.82 N/mm^2. Der Einfluß der Querkräfte konnte demgegenüber vernachlässigt werden.

Die erzielten Scherfestigkeiten der Stabwerksknoten lagen damit im Mittel bei etwa 92% (nur Normalkräfte) bzw. bei 126% (zusätzlich Torsionsmomente) derjenigen Festigkeitswerte, die rechnerisch aufgrund der Knotengeometrie des Stabwerks aus den Grundversuchen abgeleitet wurden.

Eine vergleichende Berechnung der Stabkräfte nach der Stabwerkstheorie (biegesteife Stabanschlüsse) und nach der Fachwerkstheorie (gelenkige Stabanschlüsse) zeigte, daß großflächig verleimte biegesteife Stabwerke vom untersuchten Typ vereinfachend als Fachwerke berechnet und bemessen werden können. Dabei ist gegenüber den an Grundverbindungen erhaltenen Scherfestigkeiten ein Abminderungsfaktor von im Mittel 0.92 zu berücksichtigen.

Die Versuche zeigten ferner, daß die Art der Stabwerksausführung keinen erkennbaren Einfluß auf die Höhe der Bruchlast ausübte. Dagegen wurde mit der Verkürzung der Verleimungszeiten bei der Herstellung der Stabwerke im allgemeinen eine Erhöhung der Scherfestigkeiten erreicht.

Die Durchbiegungen der Stabwerke, die beim Bruch je nach Stabwerkstyp zwischen etwa 32 mm und 46 mm lagen, ließen eine leichte Rohdichteabhängigkeit erkennen. Sie lagen bei einer vergleichbaren Knotenlast (20 kN) bei den Stabwerkstypen I und II um bis etwa 16% über, bei dem etwas steiferen Stabwerkstyp III dagegen um bis etwa 14% unter den entsprechenden Rechenwerten. Im Vergleich zur Stabwerksberechnung ergaben sich bei einer Berechnung nach der Fachwerkstheorie durchschnittlich um etwa 5% größere Durchbiegungen. Dies zeigt, daß auch die Durchbiegungen großflächgig verleimter Stabwerke vereinfachend und für die Praxis hinreichend genau nach der Fachwerkstheorie berechnet werden können.

7. Schrifttum

Arnovlevic, I. 1909: Das Verteilungsgesetz der Haftspannungen bei axial beanspruchten Verbundstäben. Z. f. Arch. u. Ing.-Wesen, Hannover

Avent, R. R. 1986: Design Criteria For Epoxy Repair of Timber Structures. Journal of Struct. Engineering Vol 112, No. 2

BASF, 1985: Verarbeitungshinweise für Kauresin-Leim 460 flüssig mit Härter 468,465,469 Pulver im Holzleimbau. Türmerleimwerke, Ludwigshafen

Chugg, W.A.; Parekh, G.J. 1966: The effect of grain direction on the shear strength and durability of glued joints in two softwoods. Research Report C/RR/24; S.T. No. 106, 13 S. Timber Research and Development Assoc., High-Wycombe, Bucks./UK

Dutko, P. 1969: Die Grundlagen des Holzleimbaus. Bauingenieur-Praxis, Heft 51. Berlin, München: W. Ernst & Sohn

Egner, K. 1954: Technologische Grundlagen der Dreieck-Streben-Bauweise. Holz-Zbl. 80: 111 - 114

Egner, K. 1962: Versuche über die Tragfähigkeit und Beständigkeit von Schrägverleimungen. Berichte aus der Bauforschung, Heft 25, Holzleimbau. Berlin: W. Ernst & Sohn

Epple, A. 1983: Untersuchungen über Einflüsse auf die Spannungsverteilung in aufgeleimten Holzlaschen und hölzernen Knotenplatten. Dissertation, Universität Hamburg

Forest Products Laboratory 1921: Investigation of crushing strength of spruce at varying angles of grain. US Air Service Information Circular Vol. III, No. 259, Washington

Glos, P. 1978: Zur Bestimmung des Festigkeitsverhaltens von Brettschichtholz bei Druckbeanspruchung aus Werkstoff- und Einwirkungskenngrößen. Berichte zur Zuverlässigkeitstheorie der Bauwerke, Heft 35, LKI der TU München

Glos, P.; Henrici, D.; Horstmann, H. 1987: Festigkeit großflächig geleimter Holzverbindungen. Holz Roh-Werkstoff 45: 355 - 364

Goland, M.; Reissner, E. 1944: The Stresses in Cemented Joints. Journal appl. Mech. 11 (1): 1 - 17

Graf, O.; Egner, K. 1938: Versuche mit geleimten Laschenverbindungen aus Holz. Holz Roh-Werkstoff 1: 460 - 464

Hartmann, F. 1938 a: Die Festigkeit von geleimten Laschenverbindungen aus Holz. Holz Roh-Werkstoff 1: 176 - 177

Hartmann, F. 1938 b: Versuche mit geleimten Laschenverbindungen aus Holz. Holz Roh-Werkstoff 1: 601 - 602

Hart-Smith, L.J. 1973: Adhesive Bonded Single-Lap Joints. Techn. Rep. NASA CR 112236

Henrici, D.; Scheicher, U. 1988: Druckscherfestigkeit von Leimverbindungen bei reibungsfreier Lagerung der Prüfkörper. Holz Roh-Werkstoff 46: 315

Kalina, M. 1965: Die Scherbeanspruchung in Knotenplatten aus Sperrholz bei geleimten Fachwerkträgern. Holz Roh-Werkstoff 23: 394 - 396

Kolb, H. 1958: Versuche über die Verwendung von Nägeln zur Erzeugung eines ausreichenden Preßdrucks bei der Bauholzleimung. Holz Roh-Werkstoff 16: 28 - 35

Kolb, H. 1974: Versuche mit verleimten Holzbauteilen. Holz Roh-Werkstoff 31: 257-262

Kolb, H.; Frech, P. 1979: Festigkeitsverhalten von Leimverbindungen zwischen Baufurnierplatten und Brettschichtholz. Forschungsbericht H 33031, FMPA Stuttgart, Otto-Graf-Institut

Komatsu, K. 1984 a: Application of fracture mechanics to the strength of cross-lapped glued timber joints. FRI Bulletin No. 61, 33 S., For. Res. Inst., New Zealand Forest Service, Rotorua, New Zealand

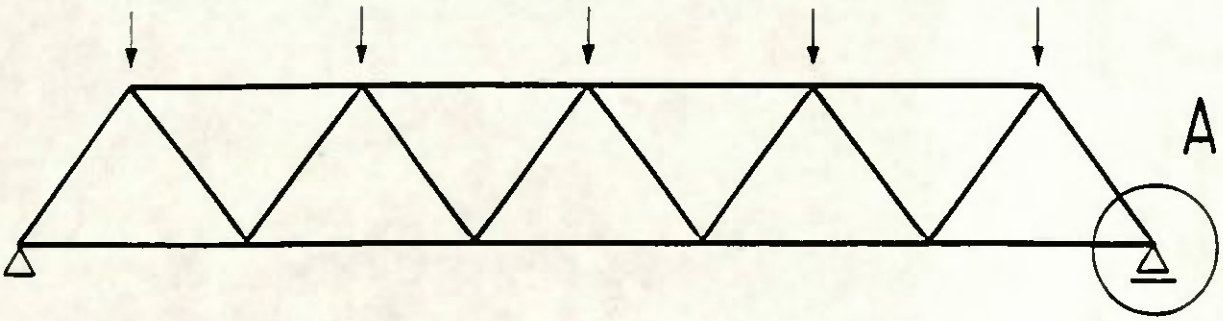
Komatsu, K. 1984 b: Effect of member thickness and number of gluelines on the strength and design of cross-lapped glued timber joints. FRI Bulletin No. 62, 29 S., For. Res. Inst., New Zealand Forest Service, Rotorua, New Zealand

Volkersen, O. 1938: Die Nietkraftverteilung in zugbeanspruchten Nietverbindungen mit konstanten Laschenquerschnitten. Lufo Bd. 15, Lfg. 1/2 : 41 - 47

Volkersen, O. 1963: Neuere Untersuchungen zur Theorie der Klebverbindungen. Jahrbuch 1963 der WGLR: 299 - 306

Zornig, H.F.; Vick, C.B. 1974: Methods of nailing and adhesive consistency affect the strength of nailed-glued construction joints. For. Prod. J. 24 (12): 17 -22

Anlage 1 bis 18: Versuche an Grundverbindungen



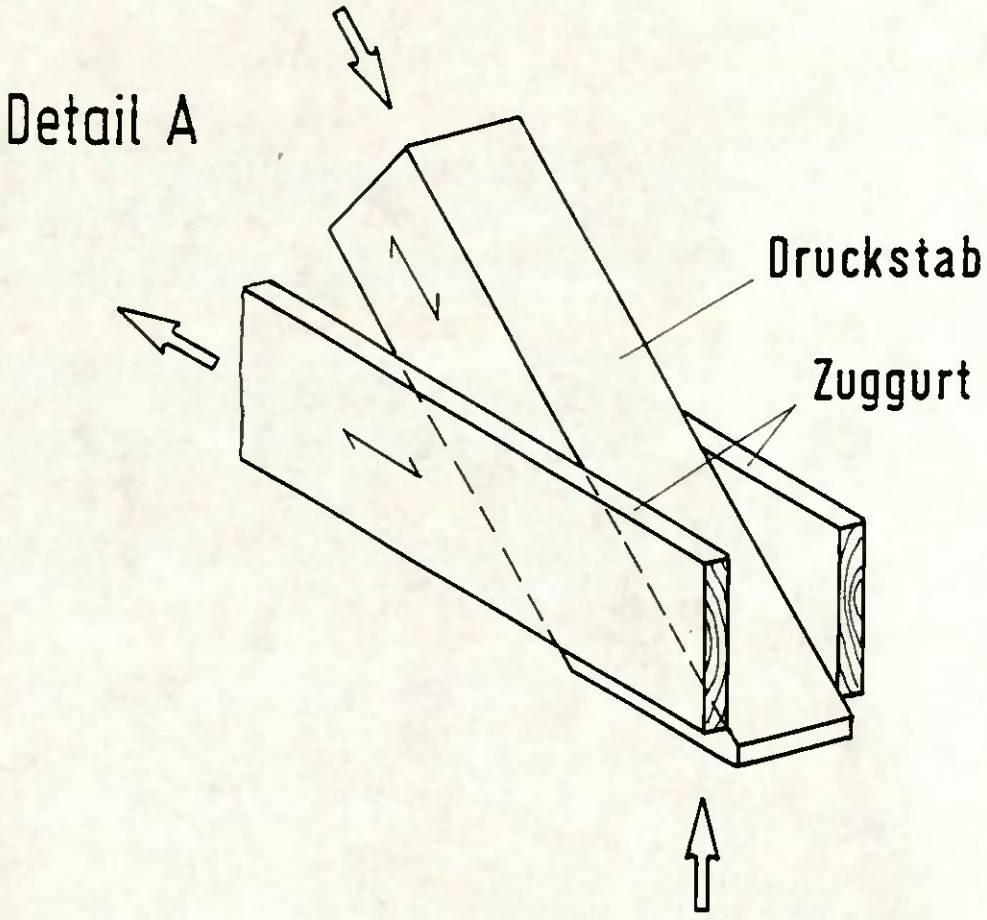


Bild 1: Stabwerksystem mit Auflagerknoten

Lfd. Nr.	Serie	Zahl der Prüfkörper n	Variierte Einflussgrösse	Vorholzlänge l_{v1} [cm]	Geometrie der Leimfläche L_L [cm]	B_L [cm]	Form	Verleimwinkel α	Gurtholzdicke d [cm]	Presstechnik	Leimart	Druckstabmaterial
1	VL 1	10	Vorholzlänge	0	5	15	Rechteck	0°	3.0	V_n	Resorcin	Fi
2	VL 2	10		5	5	15						
3	VL 3	10		10	5	15						
4	VL 4	7		10	20	20						
(2)	AL 5	(10)	Grösse der Leimfläche $A_L = L_L \cdot B_L$	5	(5)	15	Rechteck	0°	3.0	V_n	Resorcin	Fi
5	AL 10	10			10							
6	AL 15	10			15							
7	AL 20	10			20							
8	AL 30	10			30							
9	AL 40	10			40							
10	AB 10	10			20	10						
11	AB 20	10				20						
12	AB 25	10				25						
13	FP3L-15	10	Form der Leimfläche und Grösse	5	15	15	30°-Parallelogramm	0°	3.0	V_n	Resorcin	Fi
14	FP3L-20	10			20							
15	FP3L-30	10			30							
16	FP3L-40	10			40							
17	FP3B-10	10			20	10						
18	FP3B-20	10				20						
19	FP3B-25	10				25						
20	FP6L-15	10			15	15	60°-Parallelogramm					
21	FP6L-20	10			20							
22	FP6L-30	10			30							
23	FP6L-40	10			40							
24	FP6B-10	10			20	10						
25	FP6B-20	10				20						
26	FP6B-25	10				25						
27	FK-15	10			15	15	Kreis[1)]					
28	FK-25	10			25	25						
(7)	WR 0	(10)	Verleimungswinkel und Form	5	20	15	Rechteck	(0°)	3.0	V_n	Resorcin	Fi
29	WR15	10						15°				
30	WR30	10						30°				
31	WR60	10						60°				
32	WR90	10						90°				
(21)	WP 0	(10)			20	15	60°-Parallelogramm	(0°)				
33	WP15	10						15°				
34	WP30	10						30°				
35	WP60	10						60°				
36	WP90	10						90°				

[1)] $L_L = 2r$

Fortsetzung S. 53

Tabelle 1: Versuchsprogramm Grundverbindungen:
Übersicht über die untersuchten Einflussgrössen und die Serienbezeichnung

Anlage 2

Fortsetzung von S. 52

Lfd. Nr.	Serie	Zahl der Prüfkörper n	Variierte Einflussgrösse	Vorholzlänge l_{v1} [cm]	Geometrie der Leimfläche L_L [cm]	B_L [cm]	Form	Verleimwinkel α	Gurtholzdicke d [cm]	Presstechnik	Leimart	Druckstabmaterial
37	D15	10	Dicke der Zuggurthölzer d	5	15	15	Rechteck	0°	1.5	V_n	Resorcin	Fi
(6)	D30	(10)							(3.0)			
38	D40	6							4.0			
39	D60	6							6.0			
40	BFU 0	10	Druckstabmaterial	5	20	15	Rechteck	0°	3.0	V_n	Resorcin	BFU
41	BFU30	10						30°				
42	BFU60	10						60°				
43	BFU90	10						90°				
44	NR9R	10	Presstechnik	5	20	15	Rechteck	0°	3.0	N_1	Resorcin	Fi
45	NR9G	10								N_2		
46	NR5G	10								N_3		
47	NP9G	10					30°-Par.			N_2		
(9)	LeRes	(10)	Leimart	5	40	15	Rechteck	0°	3.0	V_n	(Resor.)	Fi
48	LeEpo	10									Epoxid	
49	LePVA	8									PVAc	

Σ 477

Tabelle 1: (Fortsetzung) Versuchsprogramm Grundverbindungen:
Übersicht über die untersuchten Einflussgrössen und die Serienbezeichnung

Fi Fichtenholz
BFU Baufurniersperrholz aus Buche
V_n normale Verleimung, $p_L = 0.6$ N/mm²
N... Nagelpreßleimung, $p_L \approx 0.2 \div 0.3$ N/mm²

N_1: 9 Rillennägel
N_2: 9 glatte Nägel
N_3: 5 glatte Nägel

Fortsetzung Anlage 2

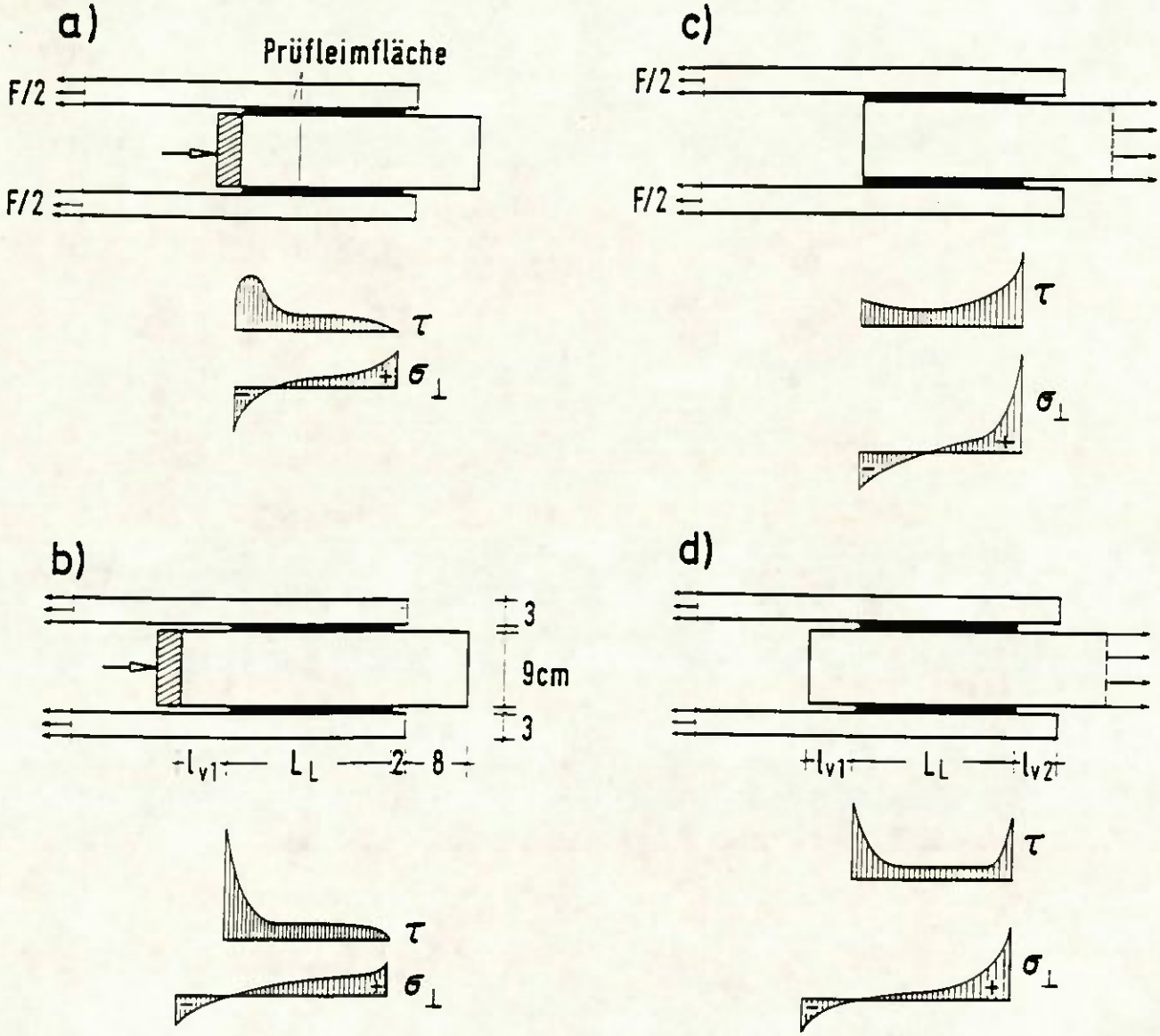


Bild 2: Spannungsverteilung in Leimscherfugen in Abhängigkeit von der Art der Kraftübertragung in die Leimfläche mit und ohne Vorholz l_{v1}
a), b) Zug-Druck-Prüfkörper
c), d) Zug-Zug-Prüfkörper

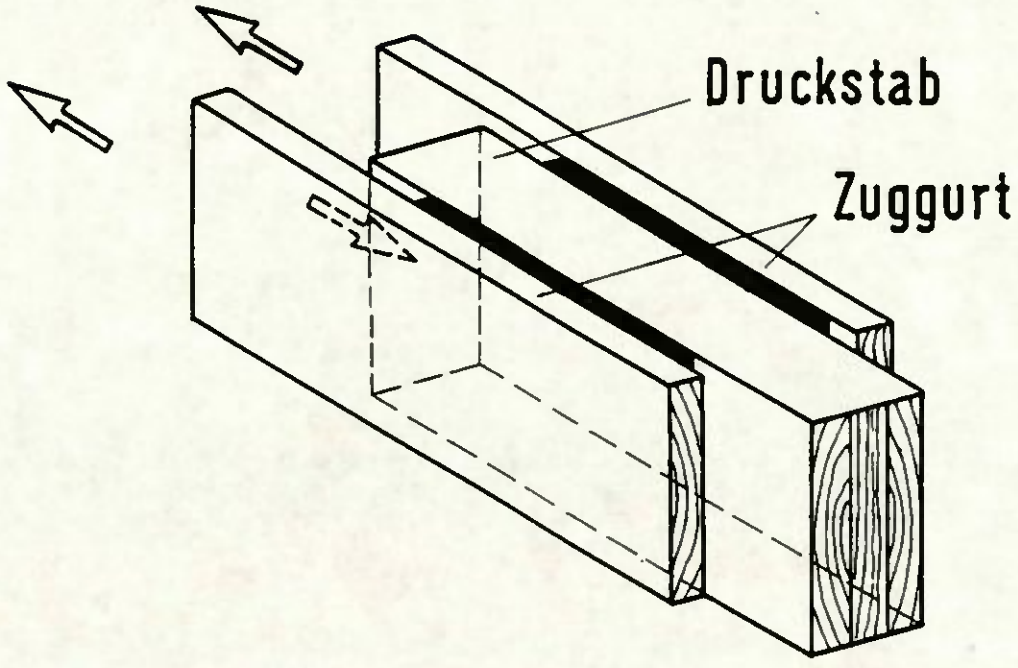


Bild 3: Prüfkörper der Grundverbindungen.
Zug-Druck-Prüfkörper

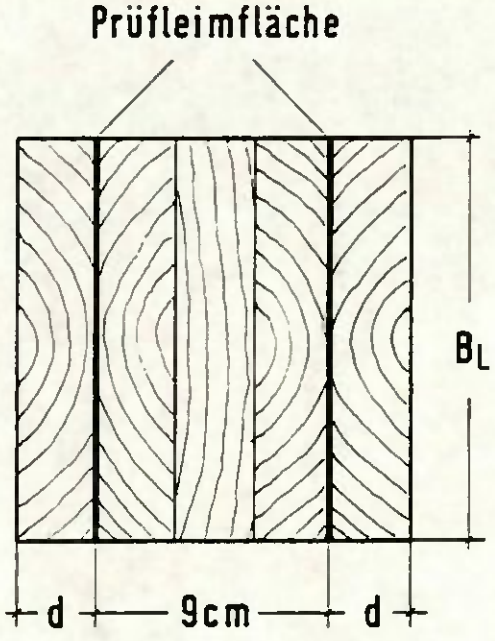
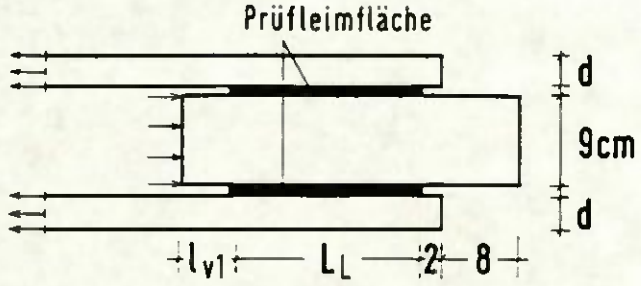
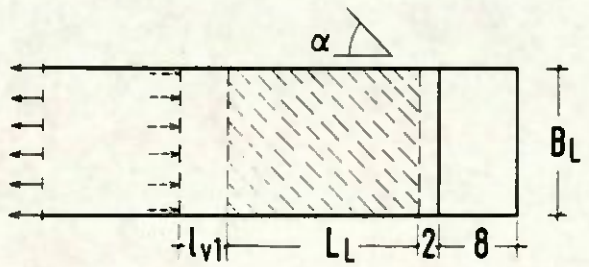


Bild 4: Anordnung der Gurthölzer (Jahrringlage) bezüglich der Prüfleimfläche

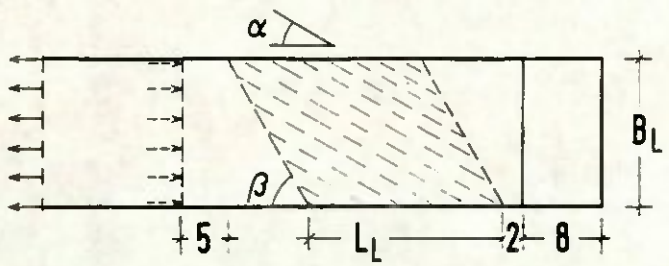
a) Draufsicht



b) Ansicht



c) Ansicht



d) Ansicht

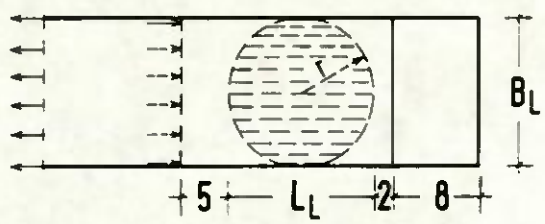


Bild 5: Prüfkörper der Grundverbindungen.
Zug-Druck-Prüfkörper mit unterschiedlichen Leimflächenformen

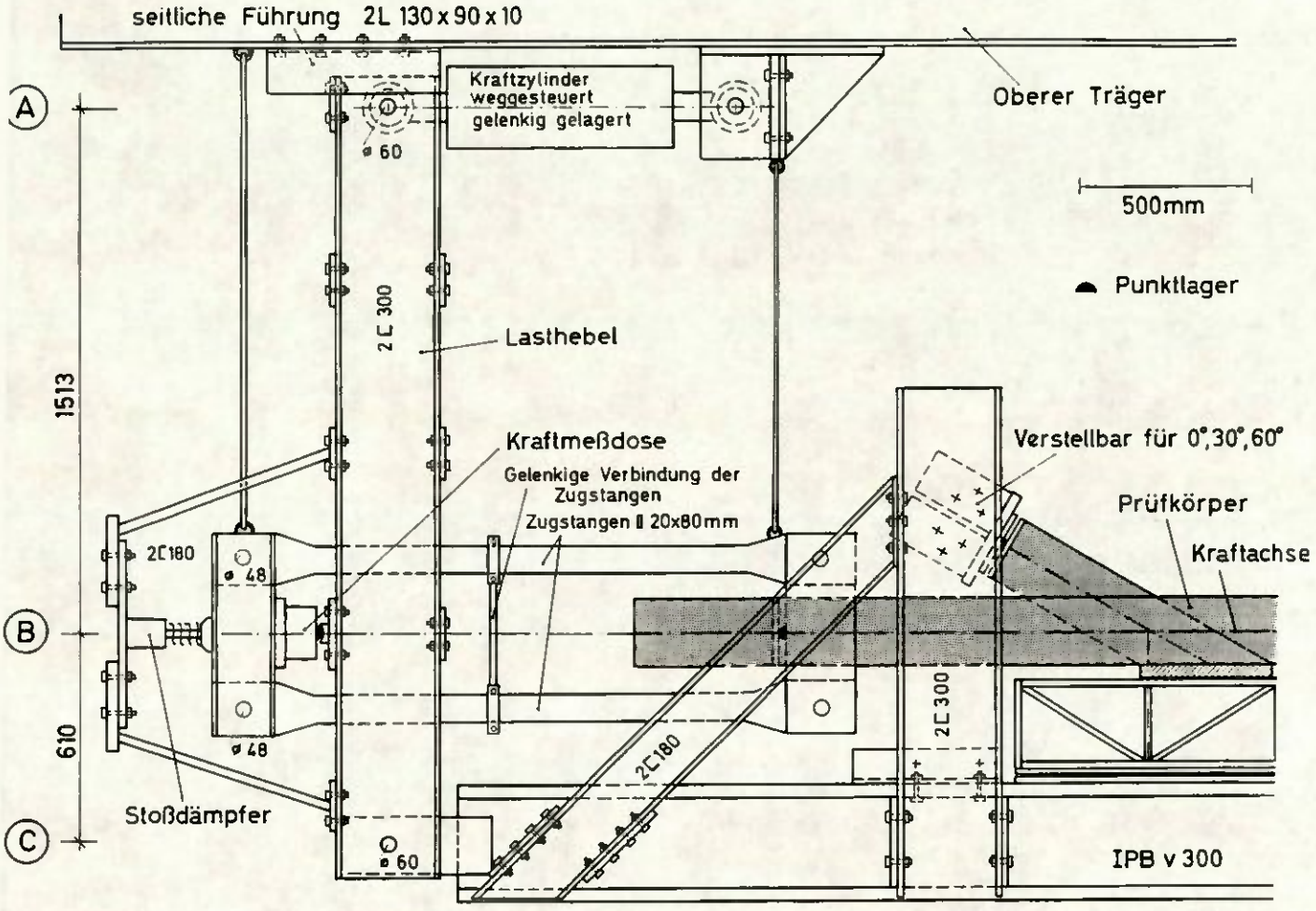


Bild 6: Prüfvorrichtung für Grund- und Knotenverbindungen

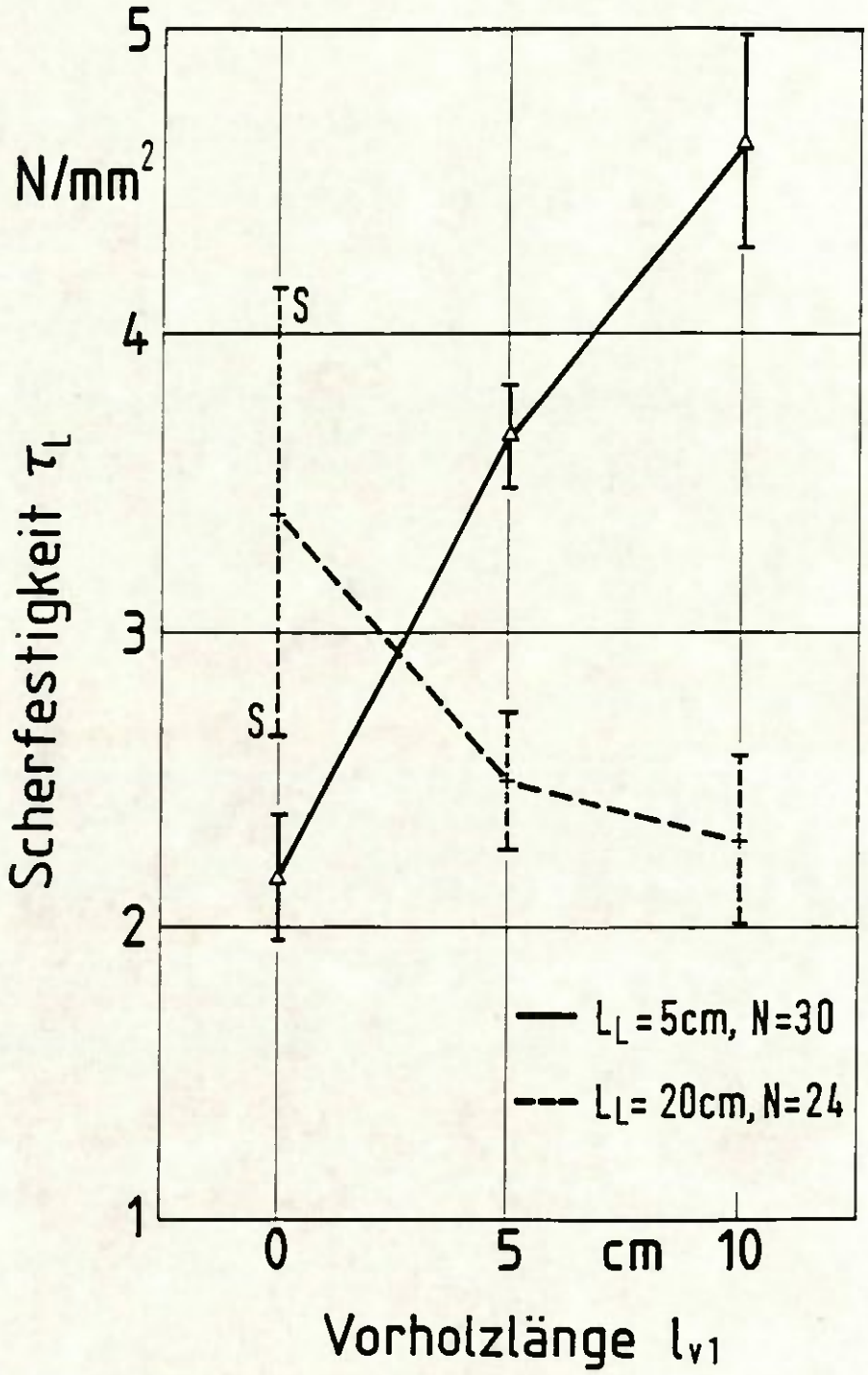


Bild 7: Einfluß der Vorholzlänge l_{v1} auf die Scherfestigkeit τ_L bei unterschiedlicher Leimflächenlänge L_L (L_L = 5 cm, L_L = 20 cm, B_L = 15 cm, $\alpha = 0°$)
s = Standardabweichung

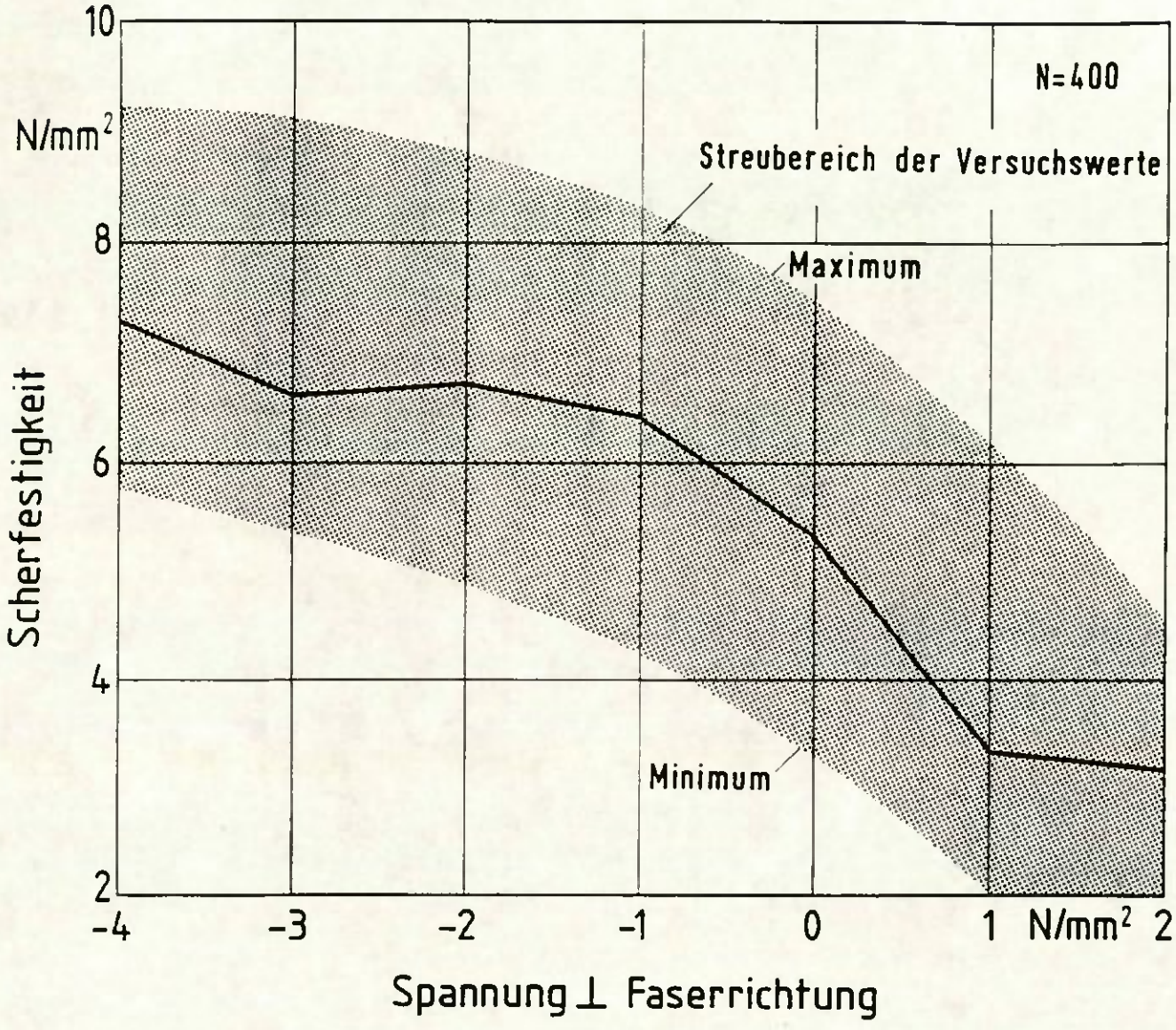


Bild 8: Einfluß der Spannungen senkrecht zur Faserrichtung auf die Holzscherfestigkeit τ (nach Spengler, 1982)

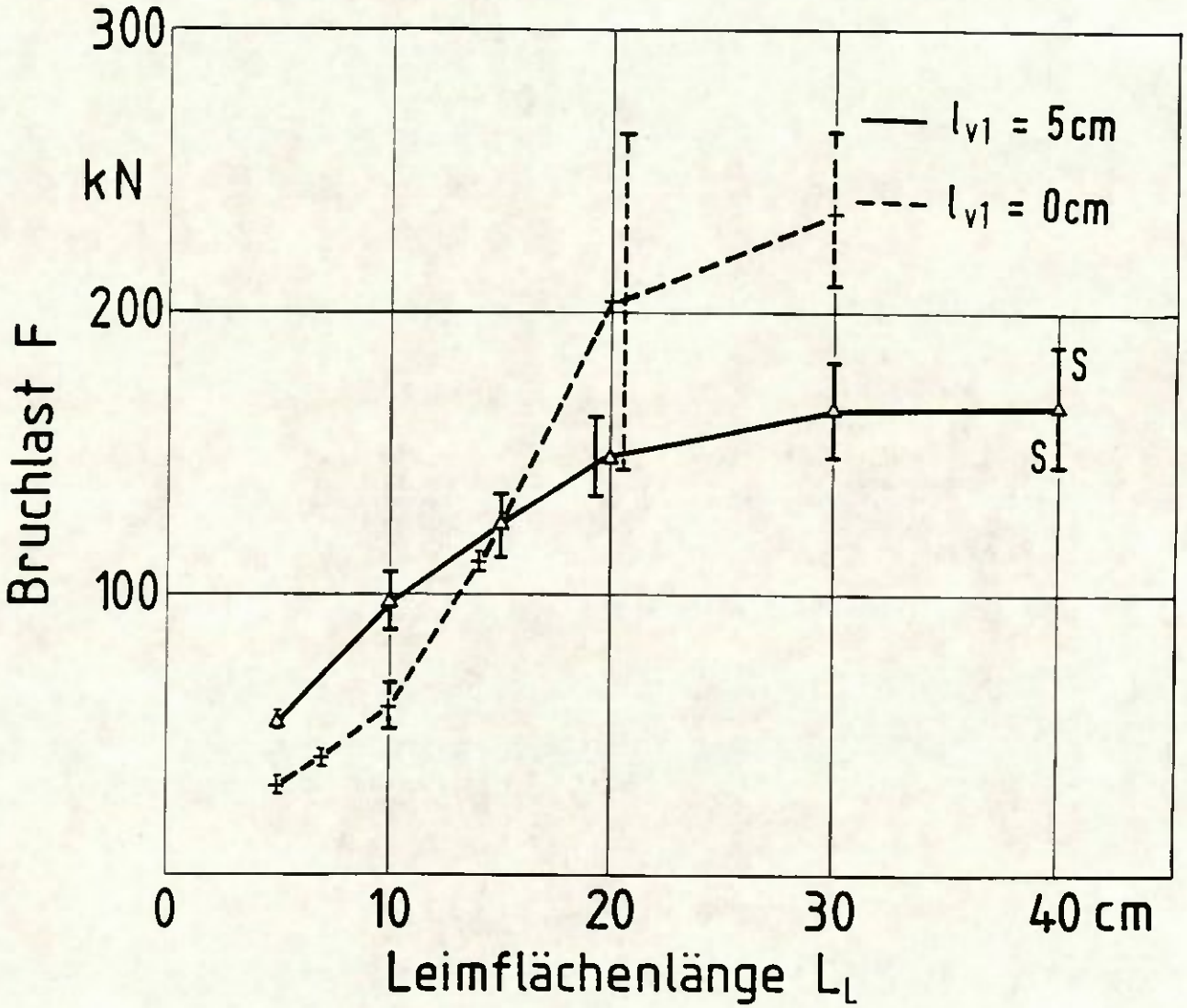


Bild 9: Einfluß der Leimflächenlänge L_L und des Vorholzes l_{v1} auf die Bruchlast F
(B_L = 15 cm, α = 0°)
s = Standardabweichung

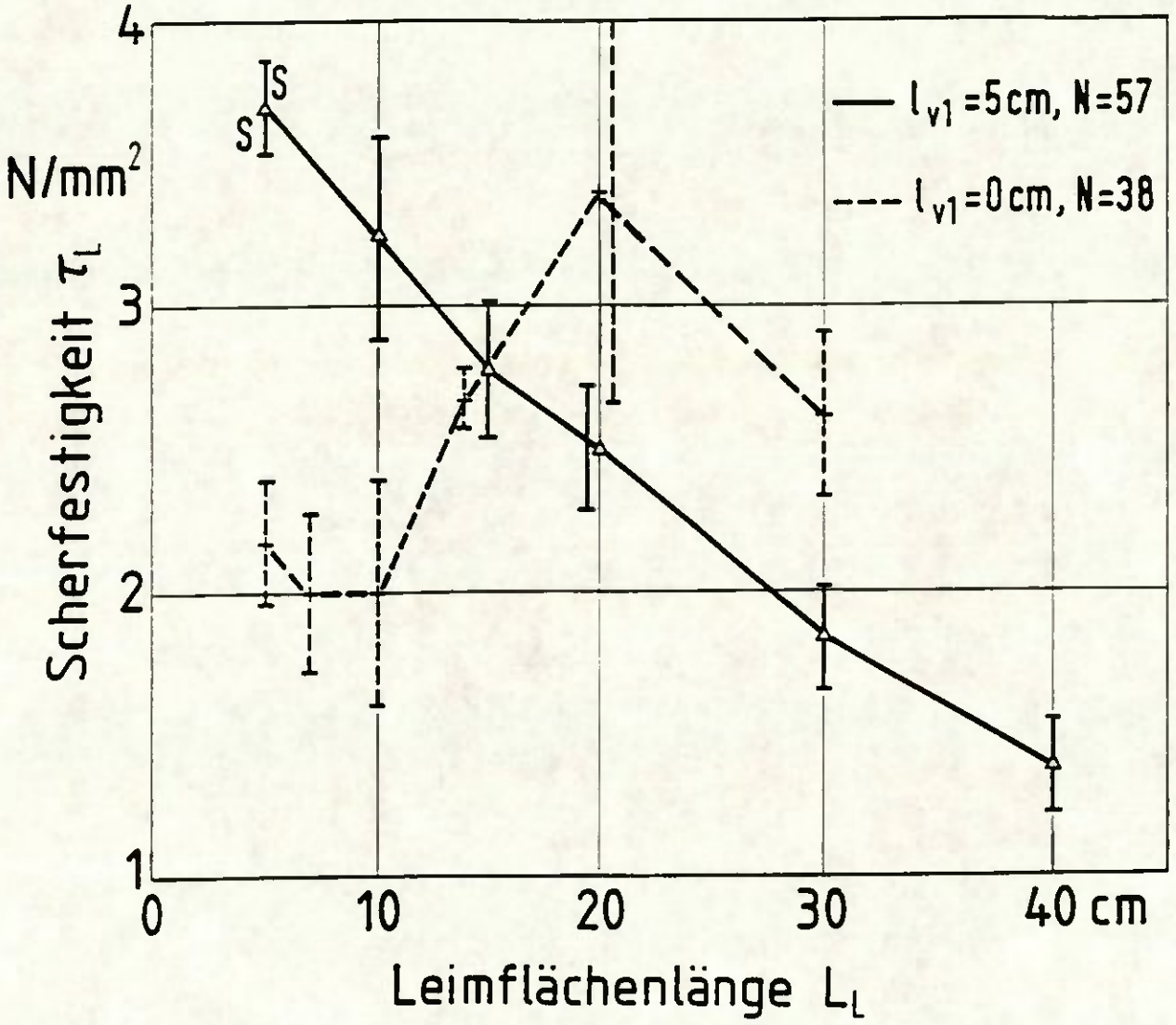


Bild 10: Einfluß der Leimflächenlänge L_L und des Vorholzes l_{v1} auf die Scherfestigkeit τ_L
(B_L = 15 cm, α = 0°)
s = Standardabweichung

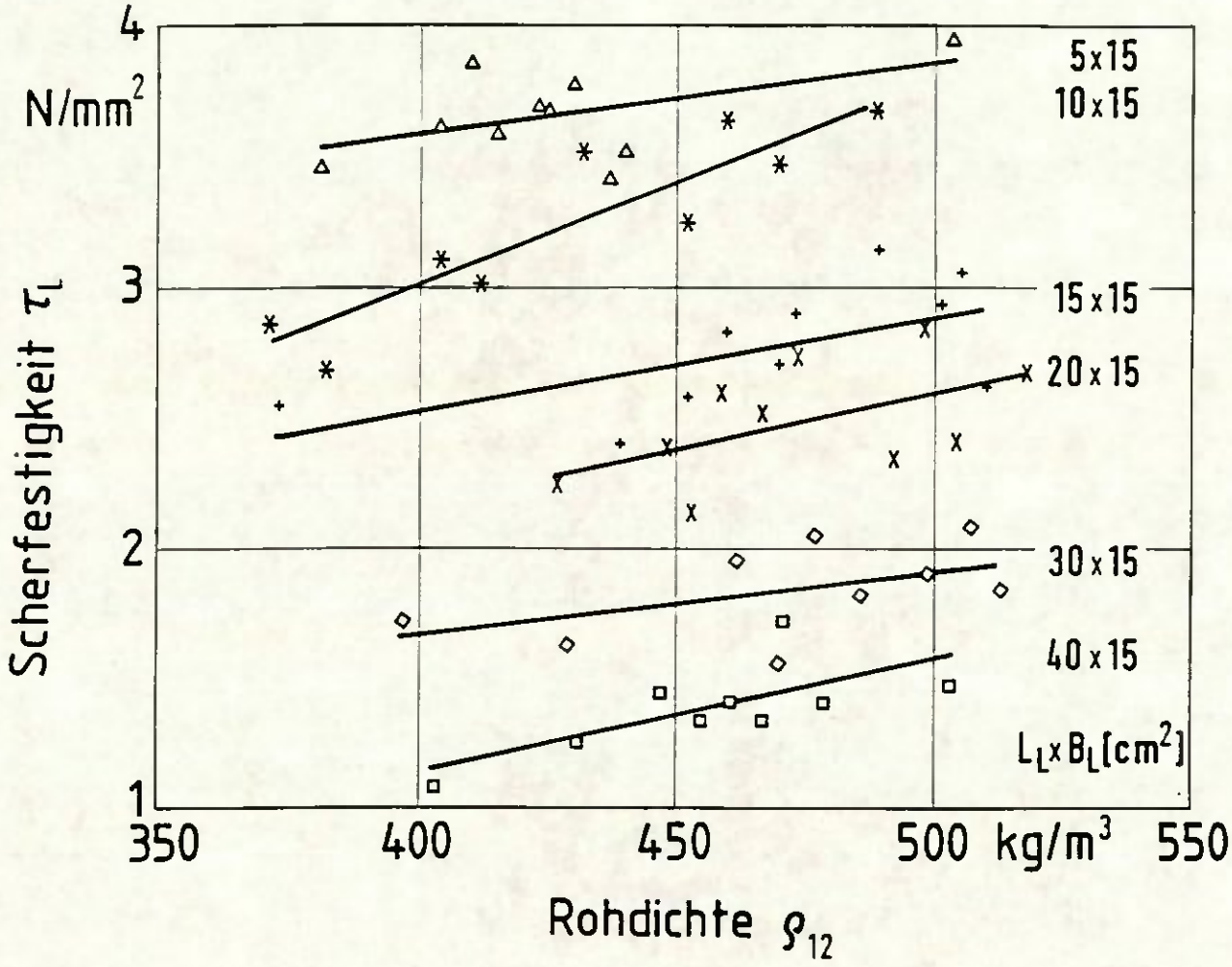


Bild 11: Einfluß der Rohdichte auf die Scherfestigkeit τ_L (Versuchsdaten entsprechend Bild 10, l_{v1} = 5 cm)

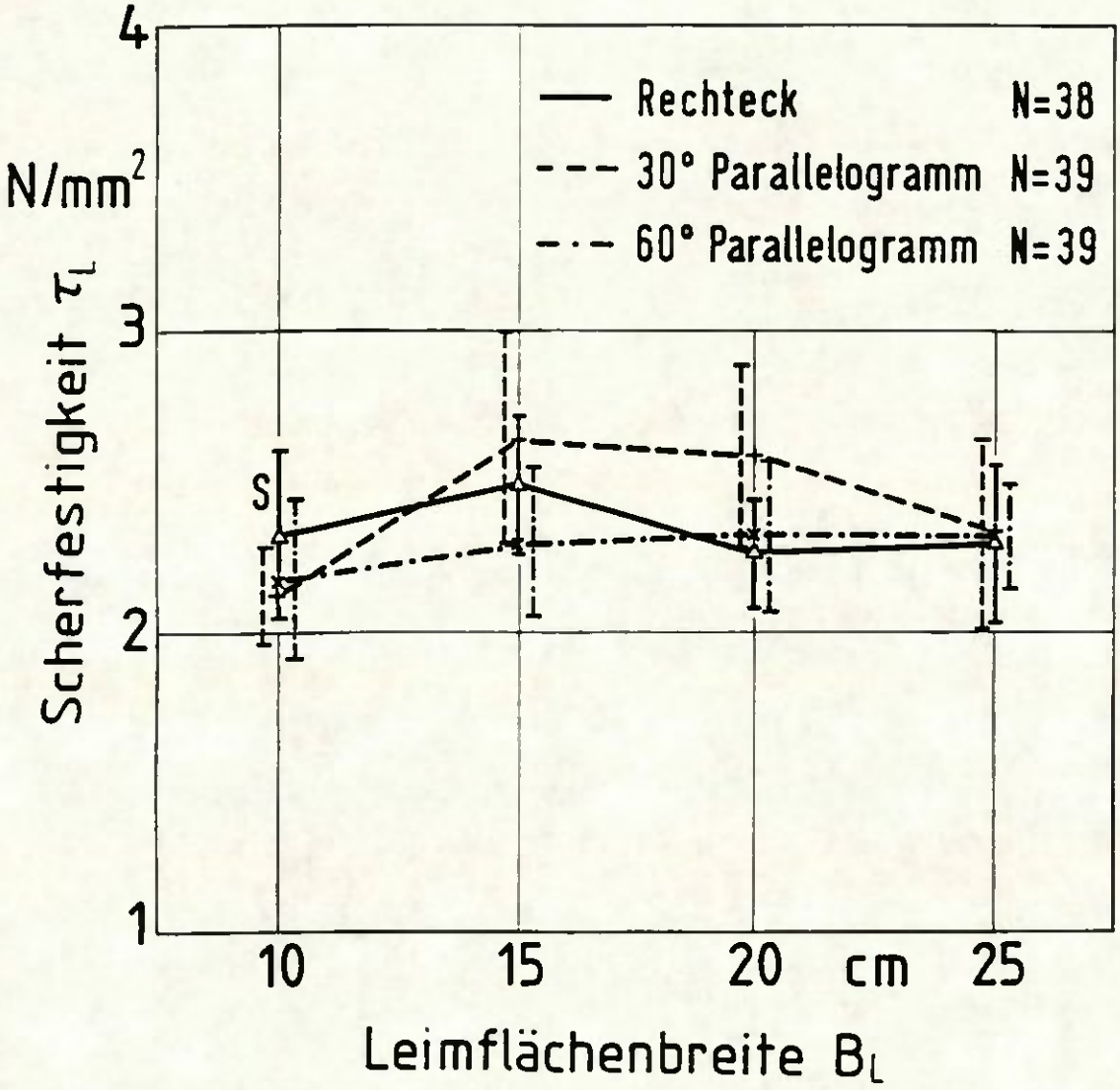


Bild 12: Einfluß der Leimflächenbreite B_L auf die Scherfestigkeit τ_L
(L_L = 20 cm, l_{v1} = 5 cm, α = 0°)

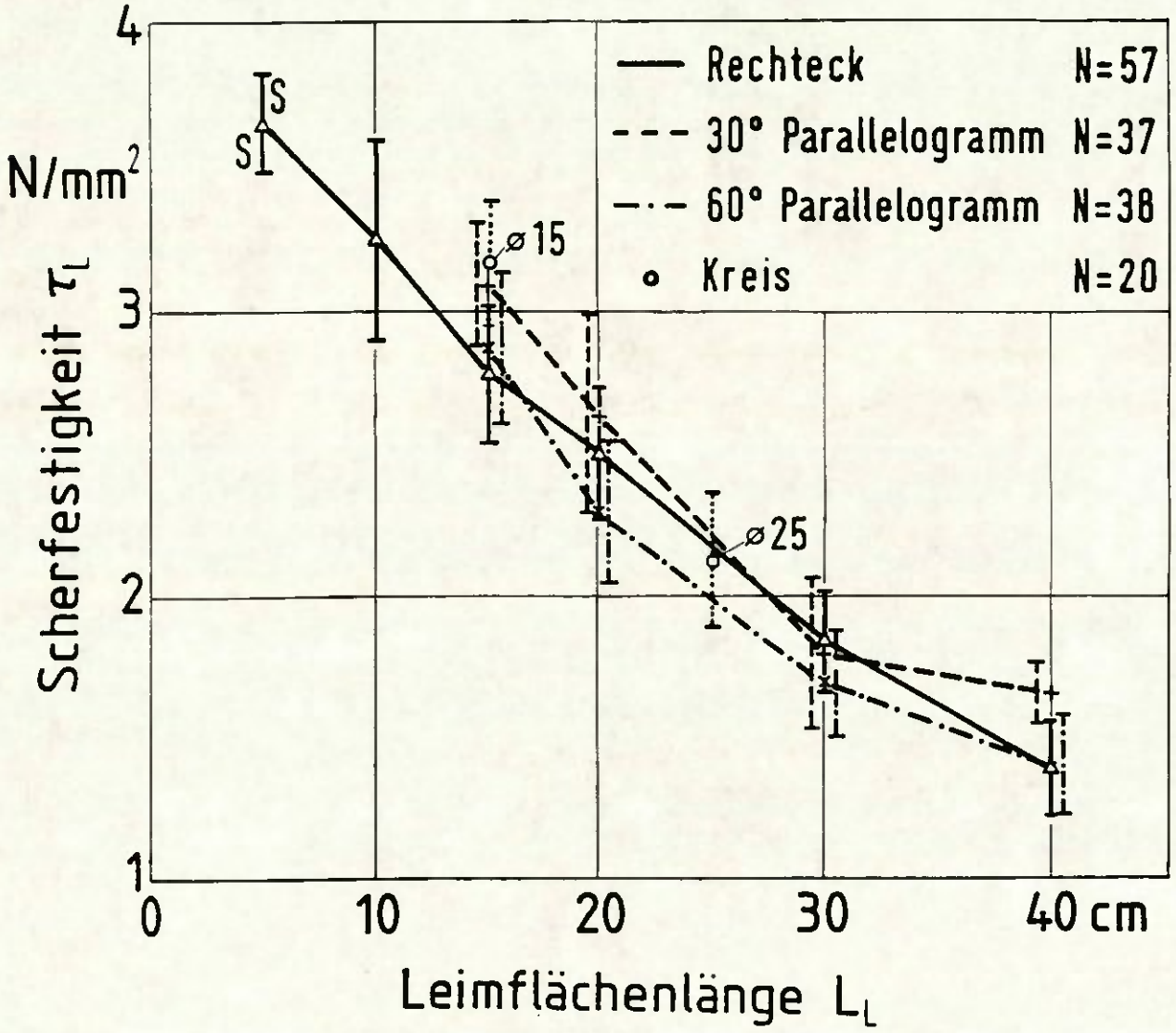


Bild 13: Einfluß der Leimflächenform auf die Scherfestigkeit τ_L bei verschiedenen Leimflächenlängen L_L
(B_L = 15 cm, l_{v1} = 5 cm, α = 0°)
s = Standardabweichung

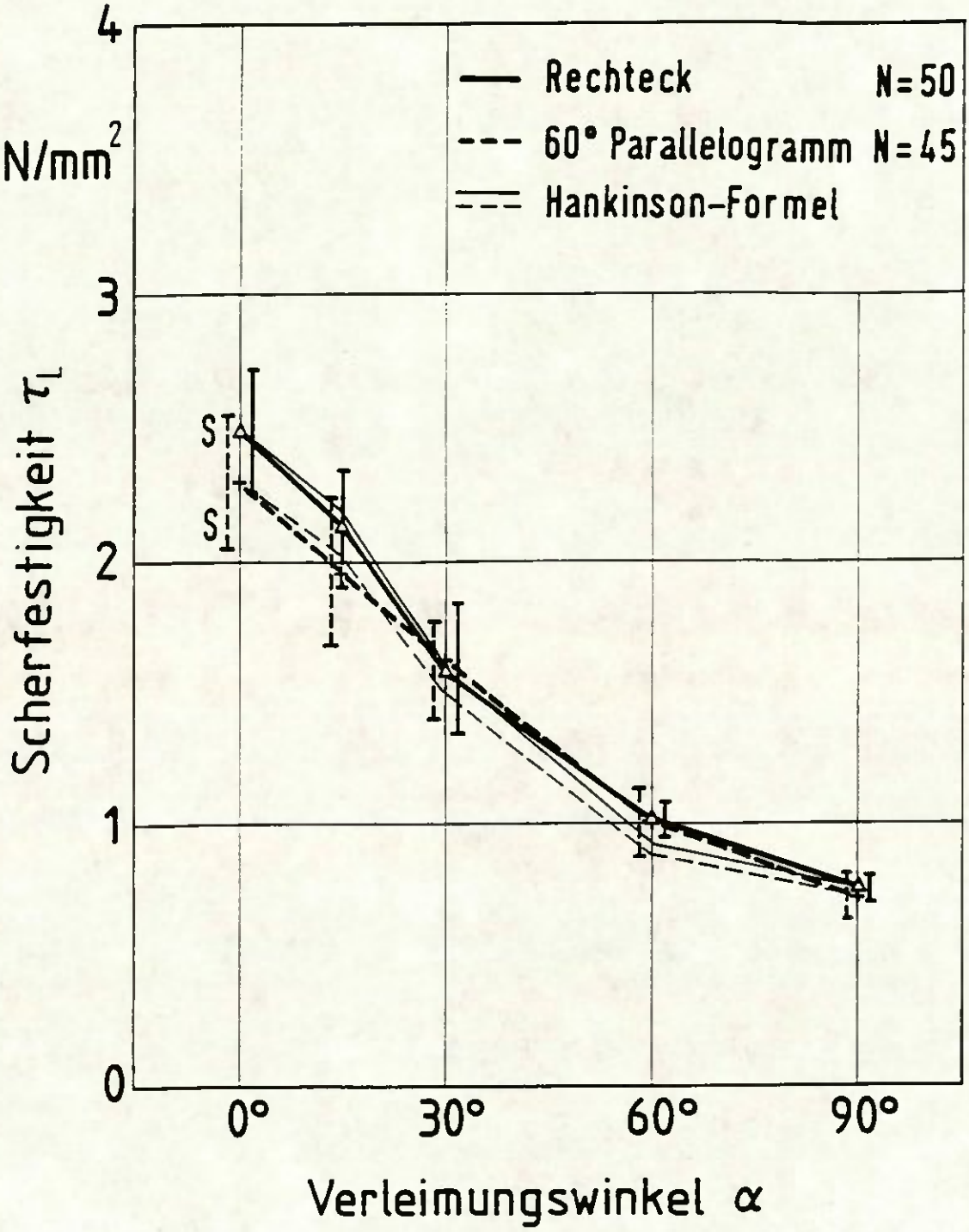


Bild 14: Einfluß des Verleimungswinkels α auf die Scherfestigkeit τ_L
(L_L = 20 cm, B_L = 15 cm, l_{v1} = 5 cm)
s = Standardabweichung

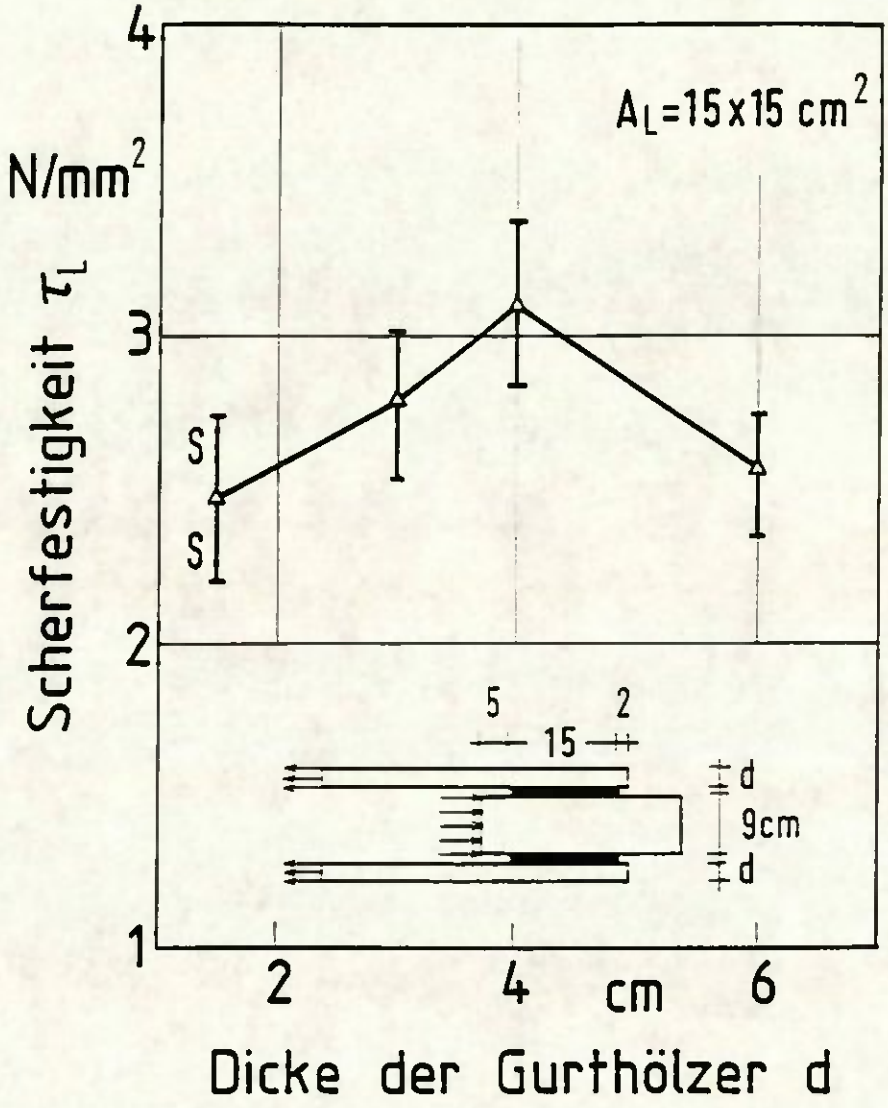


Bild 15: Einfluß der Dicke d der Gurthölzer auf die Scherfestigkeit τ_L
(L_L = 15 cm, B_L = 15 cm, l_{v1} = 5 cm, α = 0°)
s = Standardabweichung

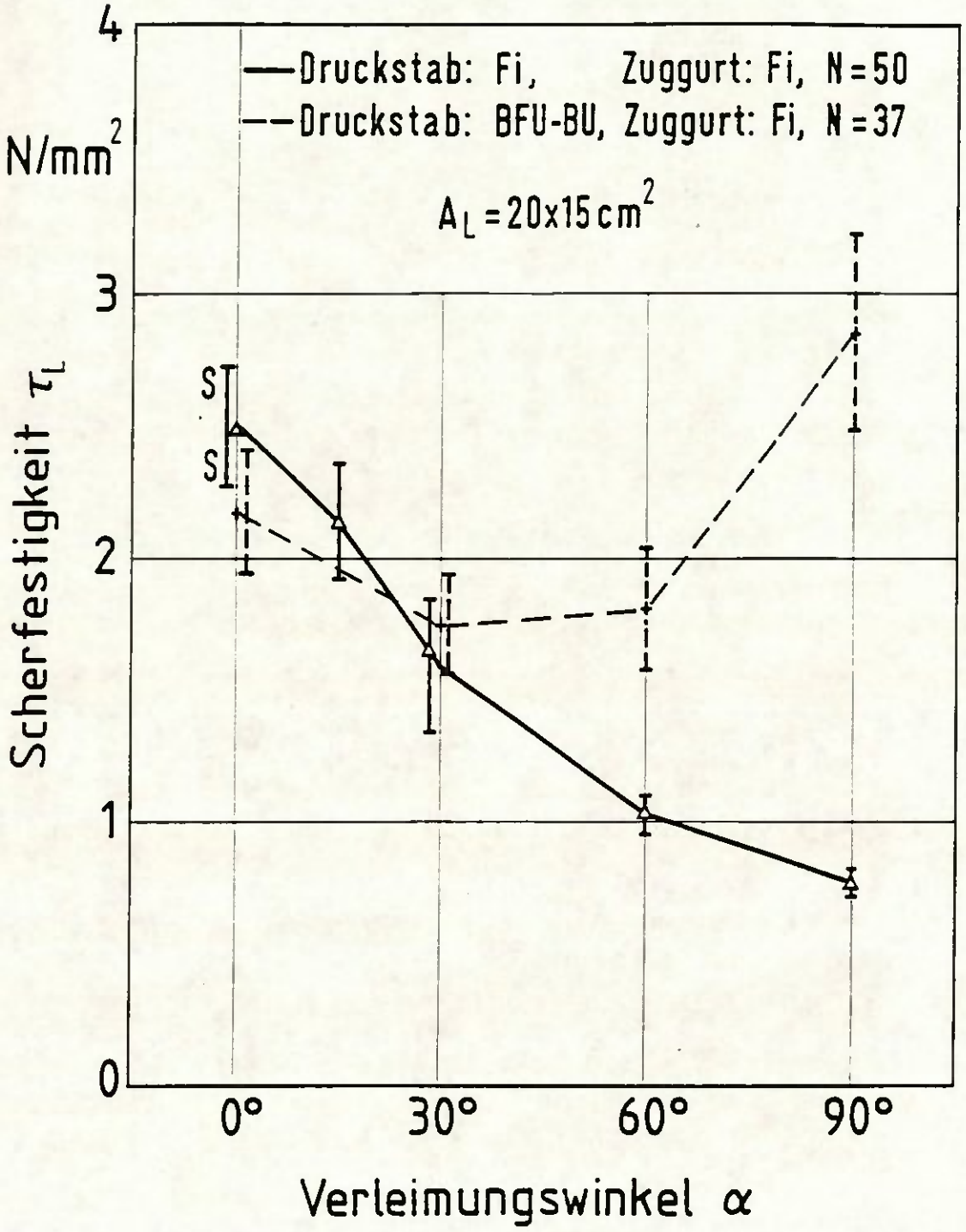


Bild 16: Einfluß des Druckstabmaterials auf die Scherfestigkeit τ_L bei verschiedenem Verleimungswinkel α
(L_L = 20 cm, B_L = 15 cm, l_{vl} = 5 cm)
s = Standardabweichung

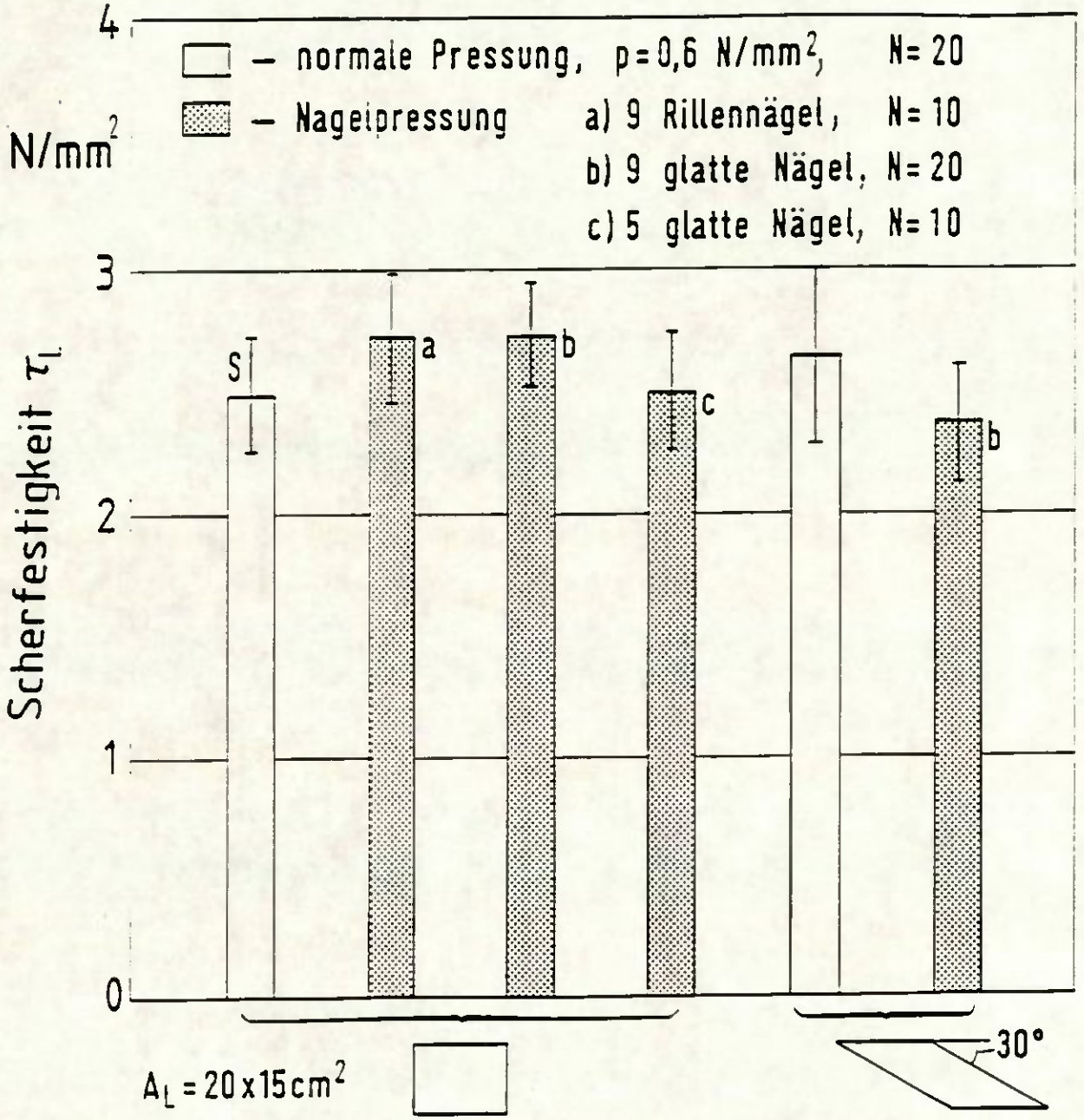


Bild 17: Einfluß der Preßtechnik auf die Scherfestigkeit τ_L
(L_L = 20 cm, B_L = 15 cm, l_{v1} = 5 cm, α = 0°)
s = Standardabweichung

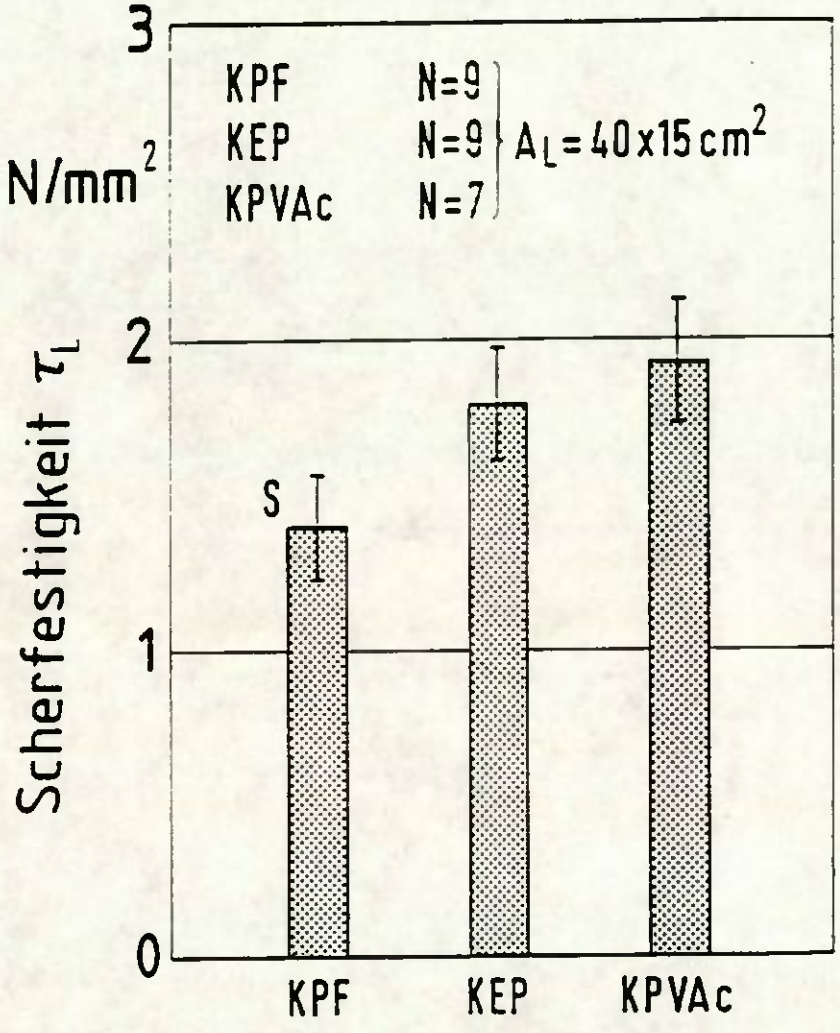


Bild 18: Einfluß der Leimart auf die Scherfestigkeit τ_L
(L_L = 40 cm, B_L = 15 cm, l_{vl} = 5 cm, α = 0°)
s = Standardabweichung

Anlage 19 bis 26: Versuche an Knotenverbindungen

Lfd. Nr.	Serie	n	Ausmitte e [cm]	Verleimwinkel α	Neigung Druckstab β	Lagerart nach Bild	Art der Kraftübertragung in die Leimfläche	Vorholzlänge l_{v1} [cm]	Vorholzlänge l_{v2} [cm]	Geometrie der Leimfläche L_L [cm]	Geometrie der Leimfläche B_L [cm]	Geometrie der Leimfläche Form	Bemerkung
50	M 002	10		0°									
51	M 302	10		30°									
52	M 602	10	2.0	60°	0°		Zug-Druck-	5	2	20	15	Recht-	Momenten-
53	M 902	10		90°		19	Scheren					eck	beanspru-
													chung des
54	M3017	10	16.5	30°									Knotens
55	M 606	10	5.5	60°									
56	Q 301	5	-			20b						30°-	verschie-
57	Q 302	5	5.7	30°	30°	20c		0	2	20	15	Paral-	dene Lage-
58	Q 303	5	8.7			20c						lelogr.	rung des
							Zug-Druck-						Auflager-
59	Q 601	8	-			20a	Scheren					60°-	knotens
60	Q 602	7	0	60°	60°	20b		0	2	20	15	Paral-	(Querkraft
61	Q 603	7	8.7			20c						lelogr.	beanspru-
62	Q 604	8	-			20c							chung)
63	Z1000	6						0	0				
64	Z1005	10						0	5			Recht-	Stoss
65	Z1055	10					Zug-Zug-	5	5	10	20	eck	eines
			0	0°	0°	-	Scheren						Zuggurts
66	Z2005	10						0	5				
67	Z2055	6						5	5	20	20		

Σ 147

Tabelle 2: Versuchsprogramm Knotenverbindungen:
Übersicht über die untersuchten Einflussgrössen und die Serienbezeichnung

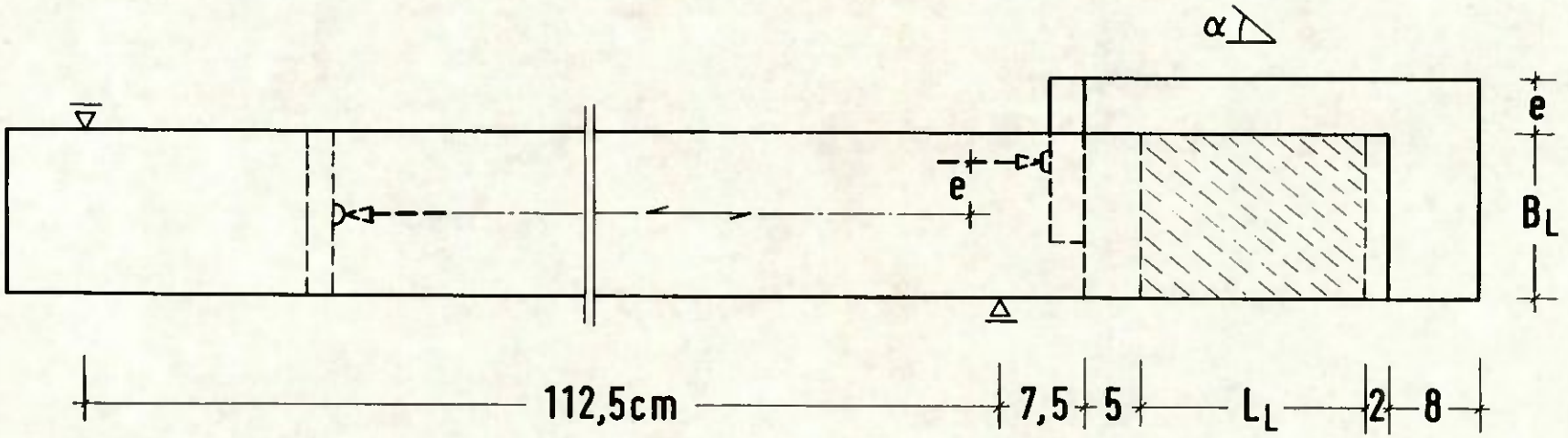


Bild 19: Prüfkörper der Knotenverbindungen.
Zug-Druck-Prüfkörper mit Momentenbeanspruchung
infolge Lastausmitte e

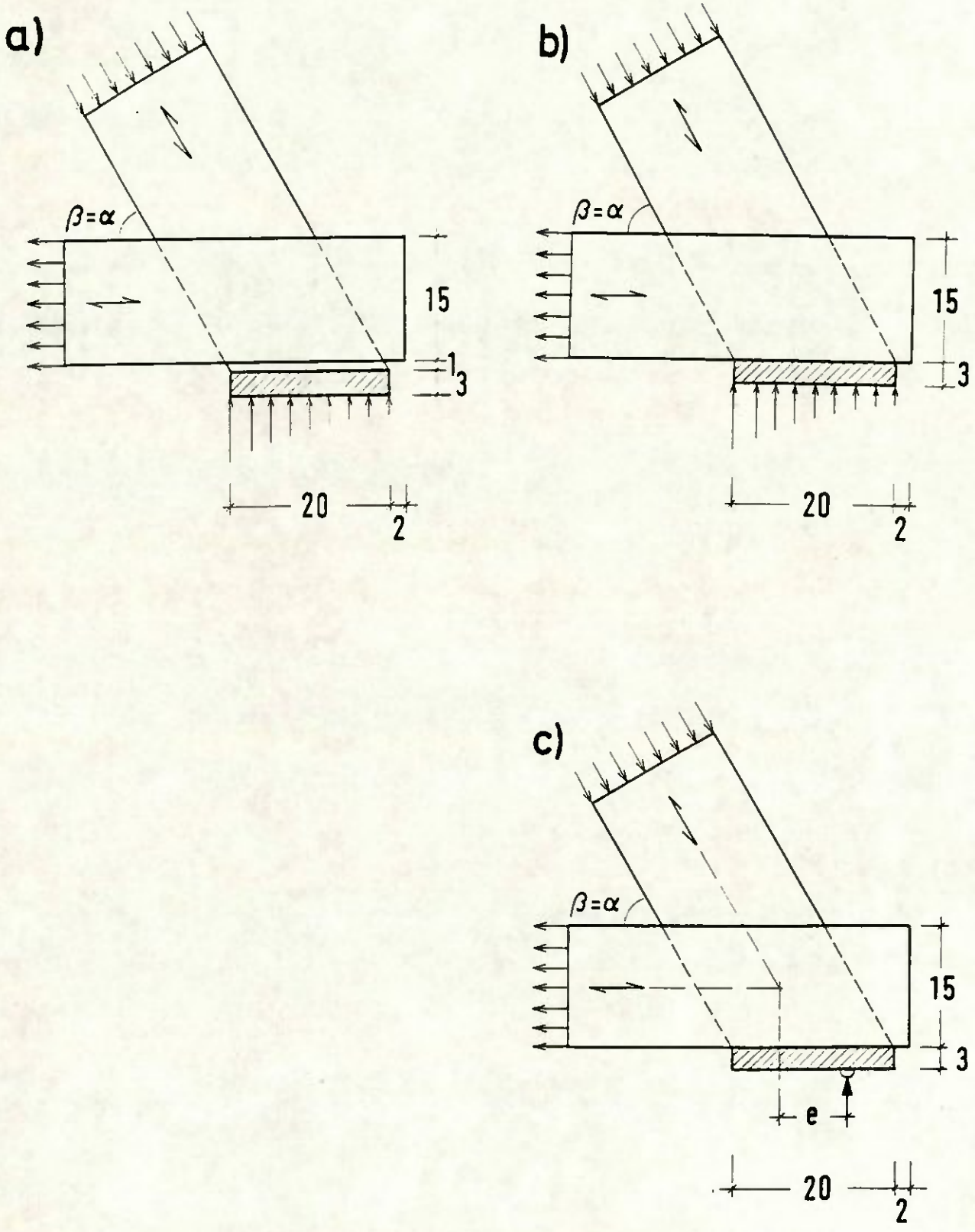


Bild 20: Prüfkörper der Knotenverbindungen.
Zug-Druck-Prüfkörper als Auflagerknoten mit unterschiedlicher Art der Lagerung, Maße in cm

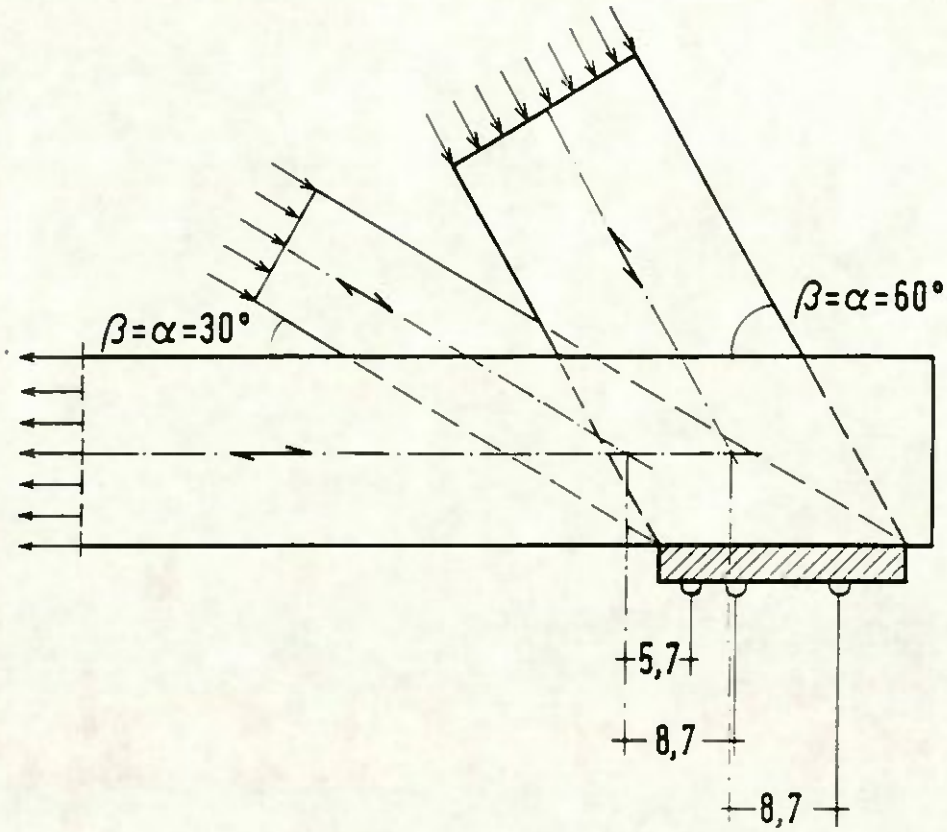


Bild 21: Angriffspunkt der Auflagerkraft in Abhängigkeit von der Ausmitte und der Neigung des Druckstabes

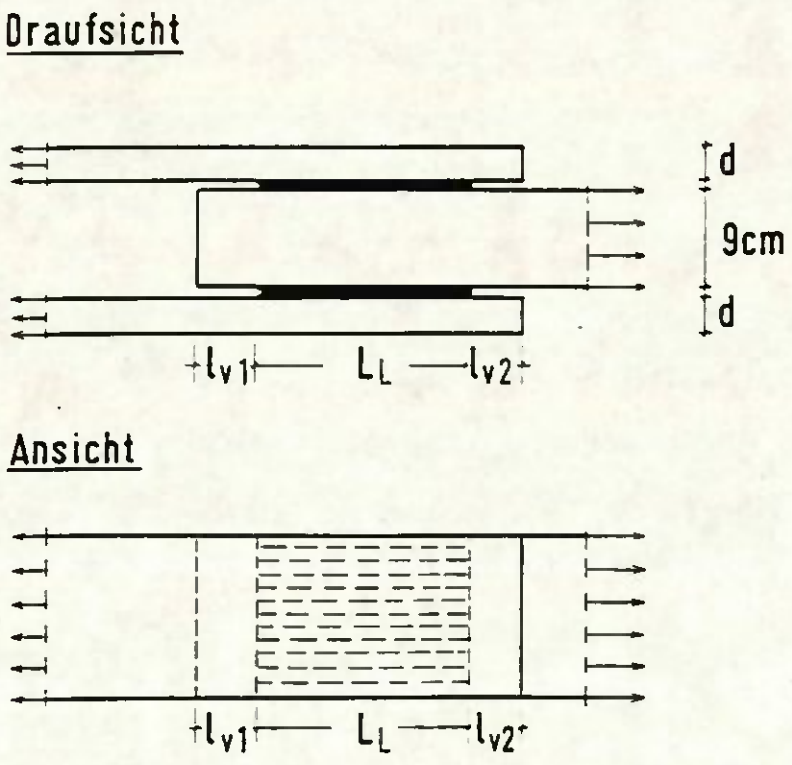


Bild 22: Prüfkörper der Knotenverbindungen.
Zug-Zug-Prüfkörper

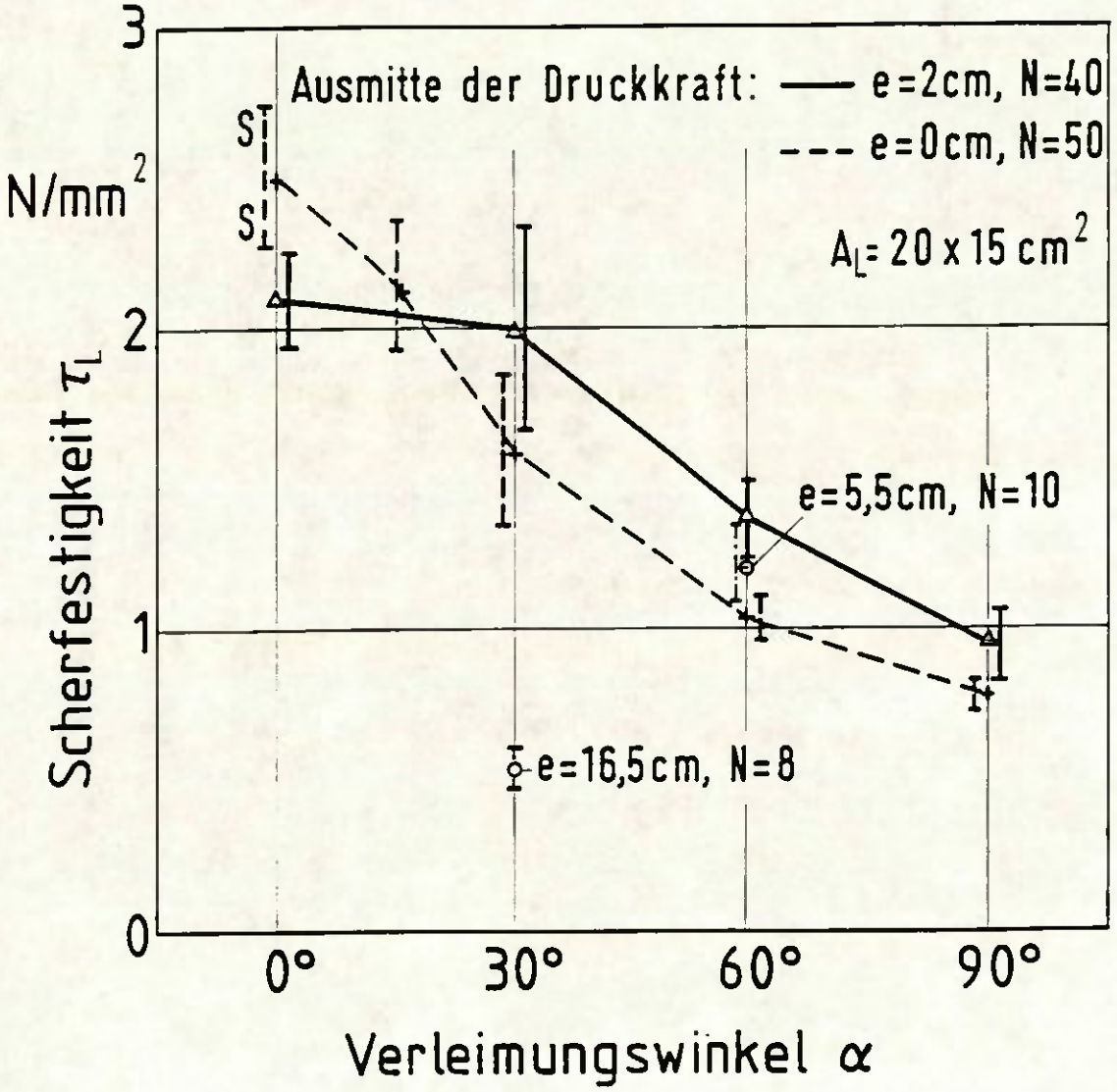


Bild 23: Einfluß der Ausmitte e der Druckkraft auf die Scherfestigkeit τ_L bei verschiedenem Verleimungswinkel α
(L_L = 20 cm, B_L = 15 cm, l_{v1} = 5 cm)
s = Standardabweichung

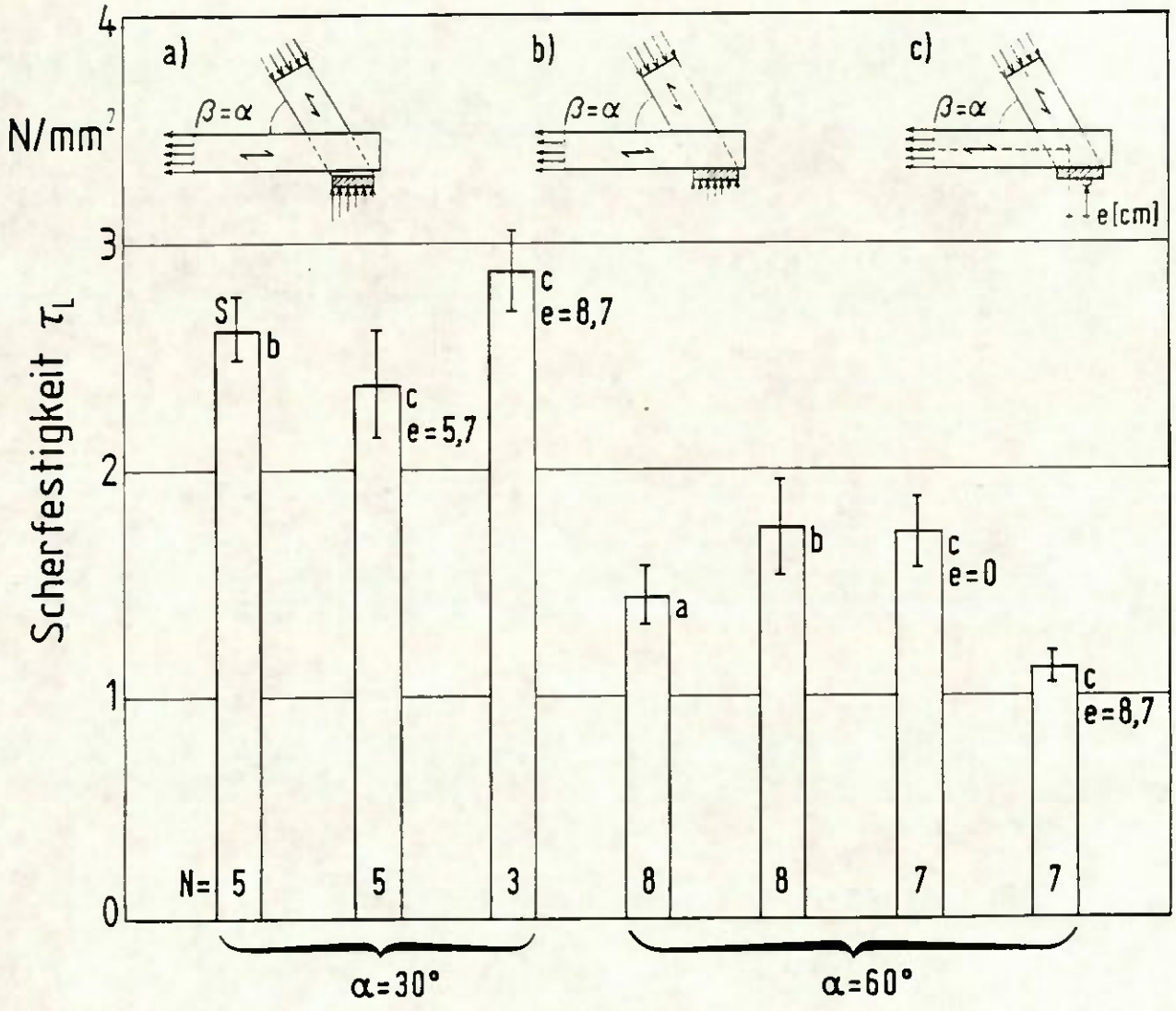


Bild 24: Einfluß der Lagerungsart eines Stabwerkauflagerknotens auf die Scherfestigkeit τ_L der Knotenverbindung
(L_L = 20 cm, B_L = 15 cm, $\alpha = \beta = 30^0$ bzw. 60^0)
s = Standardabweichung

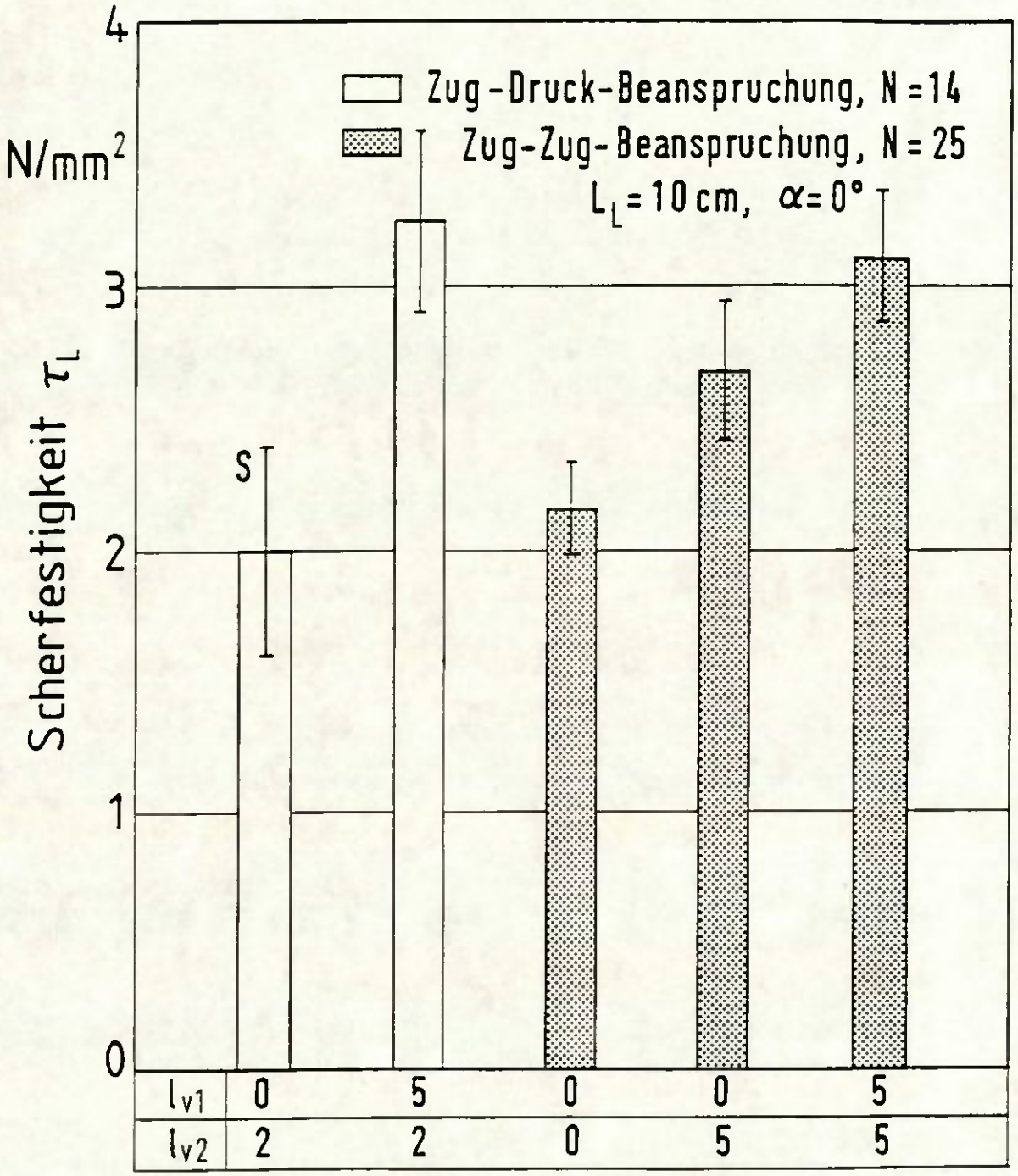


Bild 25: Einfluß der Art der Kraftübertragung in die Prüfleimfläche auf die Scherfestigkeit τ_L bei unterschiedlicher Vorholzlänge l_{v1} und Zuggurtverlängerung l_{v2} (L_L = 10 cm, α = 0°)
s = Standardabweichung

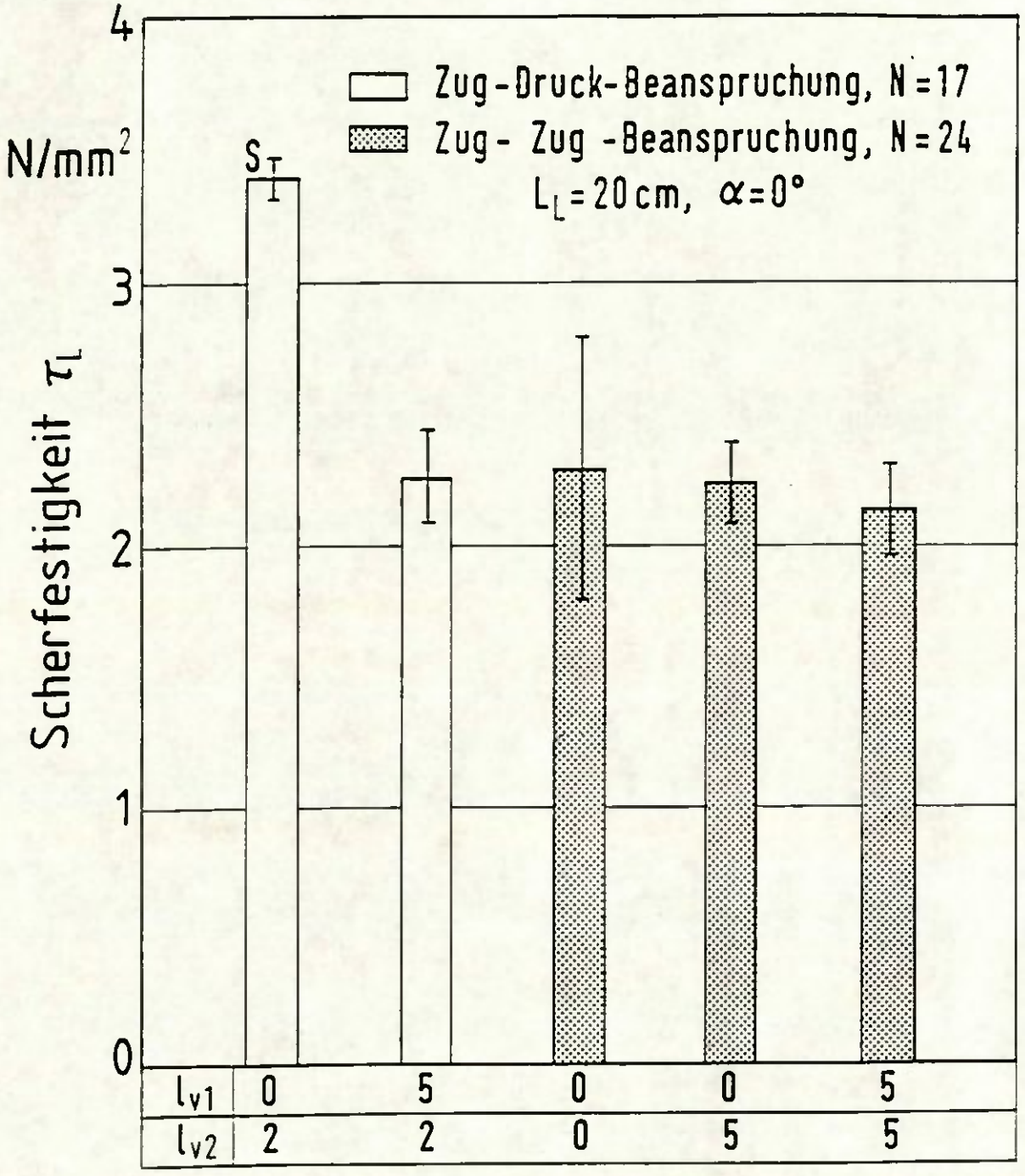


Bild 26: Einfluß der Art der Kraftübertragung in die Prüfleimfläche auf die Scherfestigkeit τ_L bei unterschiedlicher Vorholzlänge l_{v1} und Zuggurtverlängerung l_{v2} (L_L = 20 cm, α = 0°)
s = Standardabweichung

Anlage 27 bis 46: Versuche an Stabwerken

Stabwerk Typ	Nr.	Spann-weite [m]	Brett-quer-schnitt [cm²]	Zahl der Gurte	Anschluß der Diagonalen Aus-mitte e [cm]	Anschlußart
I	1 2	10	3*20	2	0	mittig, Diagonalen direkt miteinander verbunden u. zinkenartig ineinandergreifend (Anlage 29)
II	3 4				8.84	ausmittig, Diagonalen an Gurte angeschlossen. "Stumpfstoß"der Druck-diagonale (Anlage 30)
IIIa	5 6			3		ausmittig, Diagonalen an Gurte angeschlossen. Symmetrischer "Gehrungsstoß" (Anlage 31)
IIIb	7 8	15	3.6*25	3	10.9	

Tabelle 3: Versuchsprogramm Stabwerke

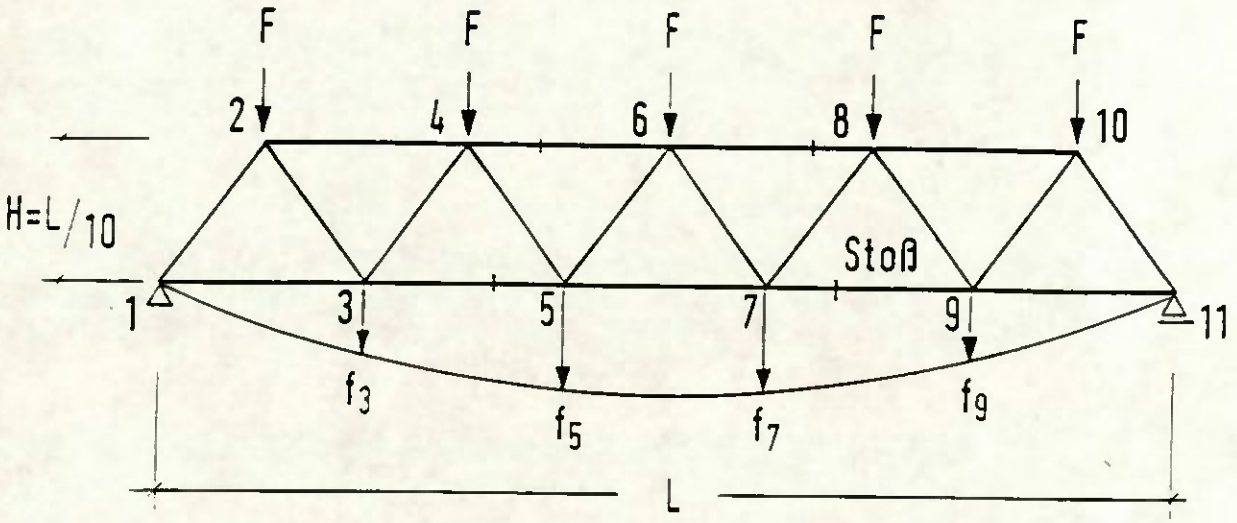


Bild 27: Stabwerk. Statisches System, Bezeichnung der Knoten und Lastanordnung

Untergurtstoß bei Typ III

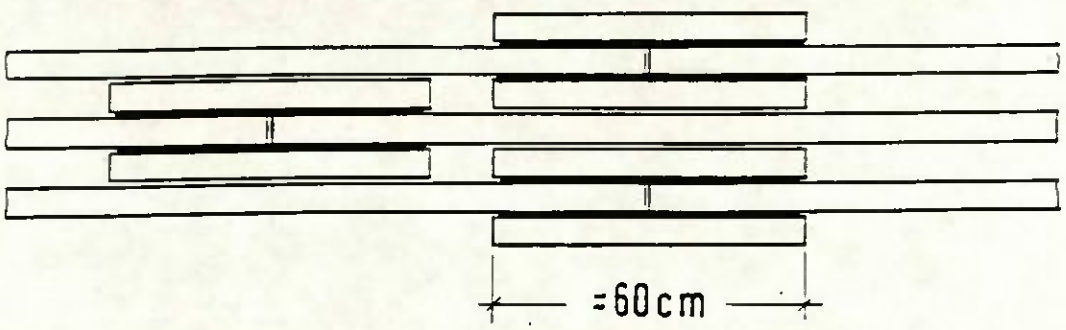


Bild 28: Stoßausbildung im Zuggurt am Beispiel von Stabwerktyp III

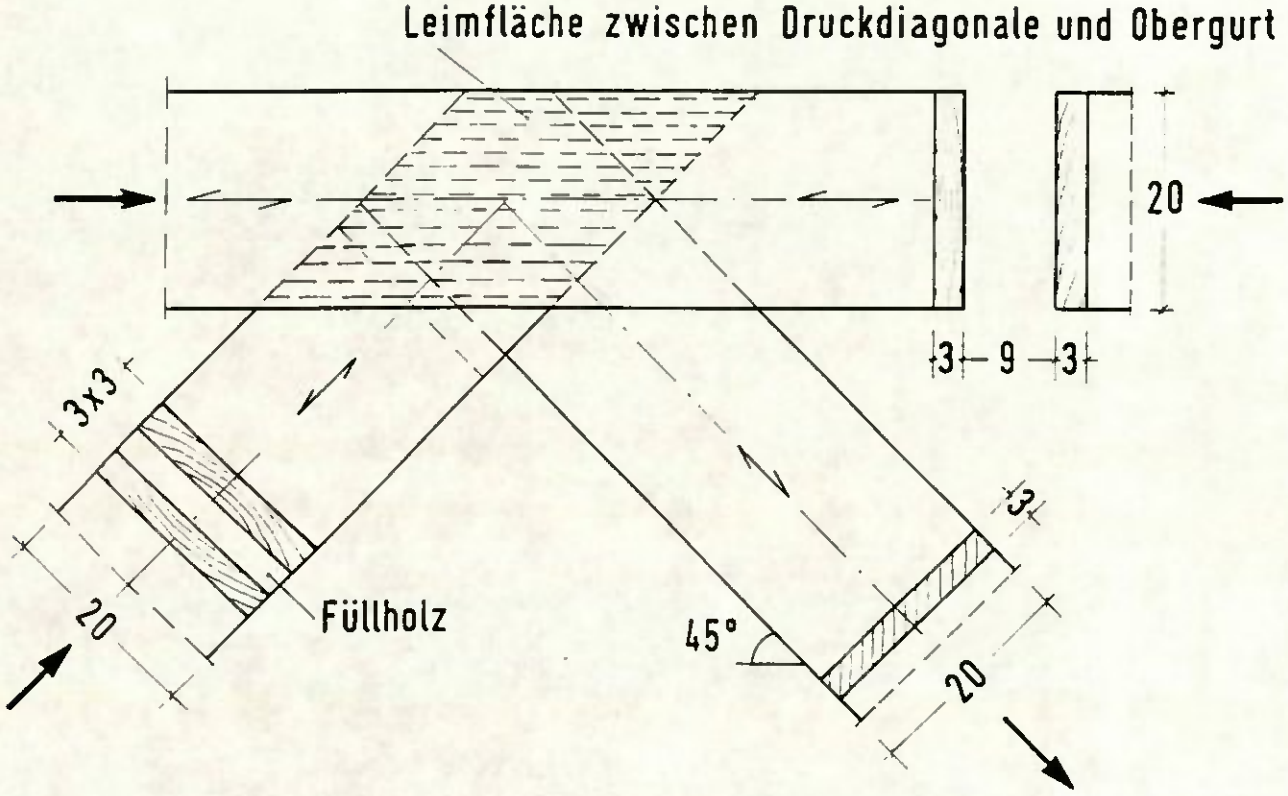


Bild 29: Stabwerkknoten Typ I.
Mittiger Diagonalenanschluß, einteilige Zugdiagonale zwischen zweiteilige Druckdiagonale geleimt. Nur Druckdiagonale an Gurte angeschlossen. Maße in cm

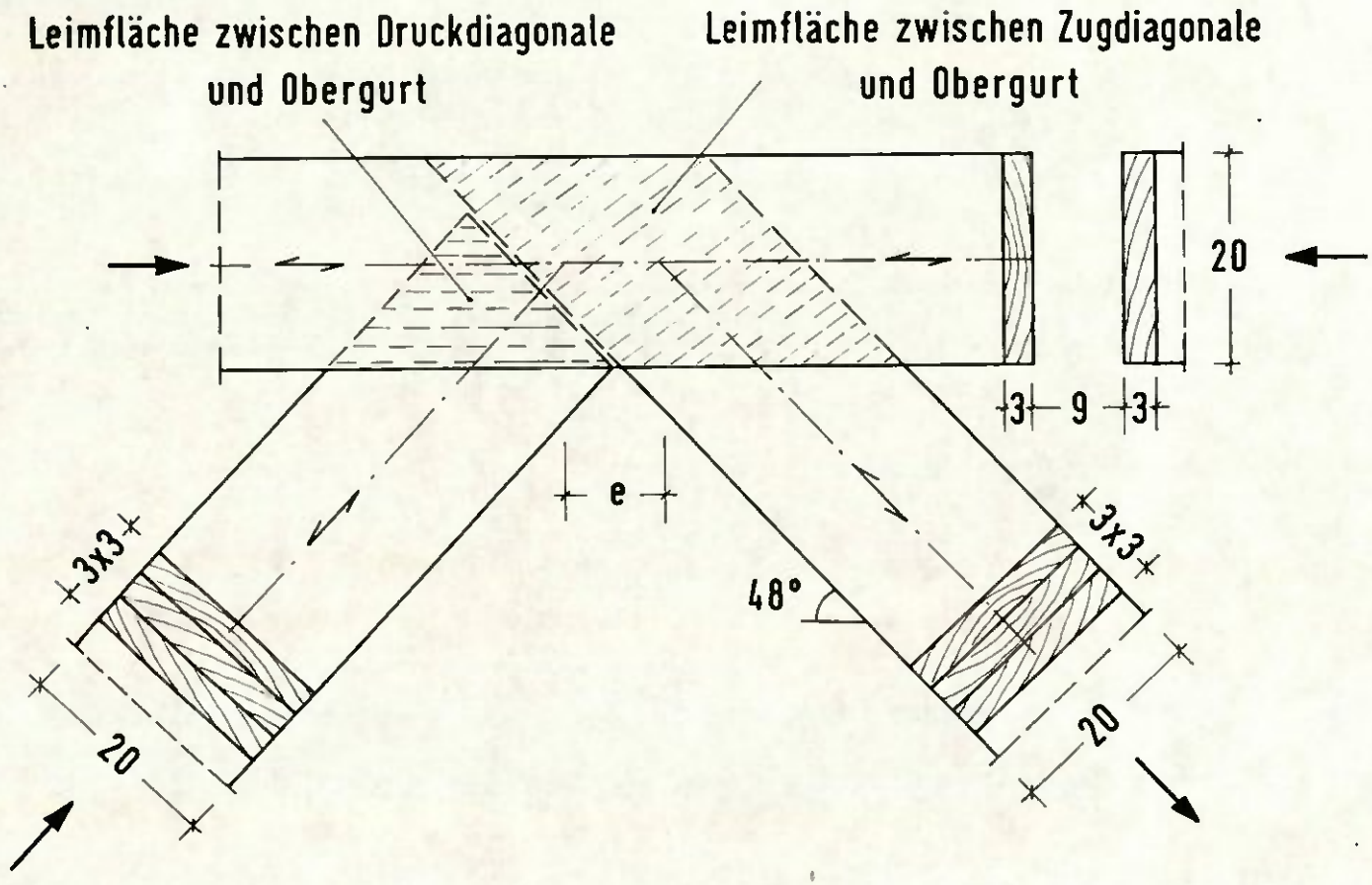


Bild 30: Stabwerkknoten Typ II.
Ausmittiger Diagonalenanschluß, dreiteilige Zug- und Druckdiagonale.
"Stumpfstoß" der Druckdiagonalen, beide Diagonalen an Gurte angeschlossen. Maße in cm

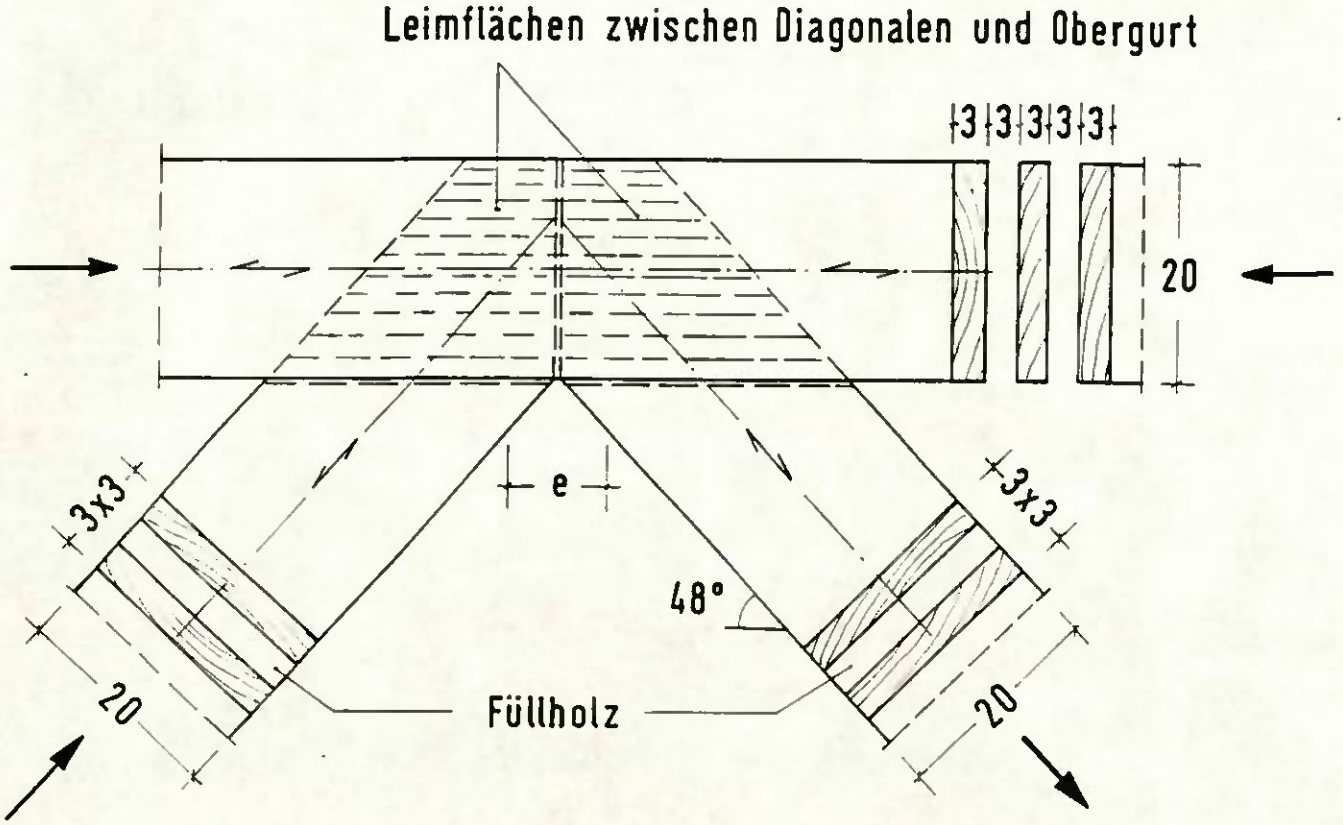


Bild 31: Stabwerkknoten Typ IIIa.
Ausmittiger Diagonalenanschluß, dreiteilige Gurte und zweiteilige Diagonalen mit "Gehrungsstoß", beide Diagonalen untereinander nicht verbunden und an Gurte angeschlossen. Maße in cm

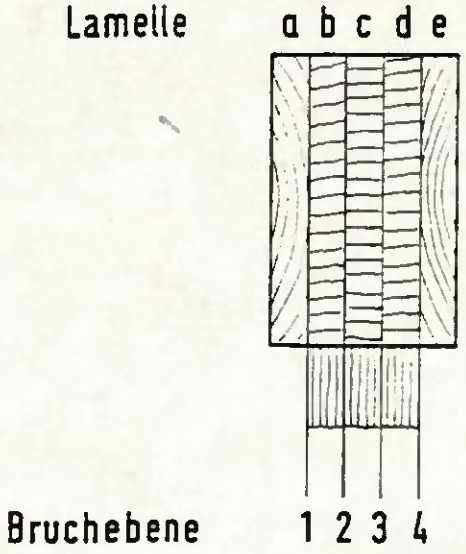


Bild 32: Gurtquerschnitt. Bezeichnung der Lamellen und Bruchebenen

Datum der Herstellung	Stabwerk Typ	Stabwerk Nr.	Spannweite [m]	Mittlere Rohdichte ρ_u [kg/m³] 1)	t [h]	Zahl der beim Beleimen vorhandenen Personen	Klima bei Herstellung °C/%rLf
22.2.89	I	2	10	449	2.5	5 - 6 2)	20/60
23.2.89		1		399	2.0		
23.2.89	III a	5		417	2.0 bis 1.5		
24.2.89		6		456			
24.2.89	II	3		406	1.25		
24.2.89		4		455			
1.6.89	III b	7	15	408	0.75	8 -10 2)	23/55
2.6.89		8		456			

1) u ≈ 8% (Nr. 1-6), u ≈ 11% (Nr. 7,8)
2) davon zwei Personen für Leimauftrag

Tabelle 4: Herstellungsbedingungen für die Stabwerke

Stabwerk Typ	Nr.	Bruchlast F_B [kN]	Mittlere Rohdichte ρ_u [kg/m³]	ρ_0 [kg/m³] 1)	Angaben zum Bruch: gebrochene Knoten	Bemerkung
I	1	39	399	379	K2,K4	-
	2	51	449	428	K1,K3,K4	-
II	3	52	406	386	K9,K10	Teilbruch bei 28 kN am Diagonalenstumpfstoß
	4	52	455	434	K9,K10	
IIIa	5	59	417	396	-	Bruch im Untergurt-Stoß zwischen K7 und K9
	6	72	456	435	K9,K11	-
IIIb	7	92	408	381	-	Untergurt-Bruch bei 76 kN in Lamelle c zwischen K5 und K7
	8	96	456	427	K2,K3	-

1) umgerechnet nach DIN 52182

Tabelle 5: Bruchlasten der Stabwerke und Bruchursache

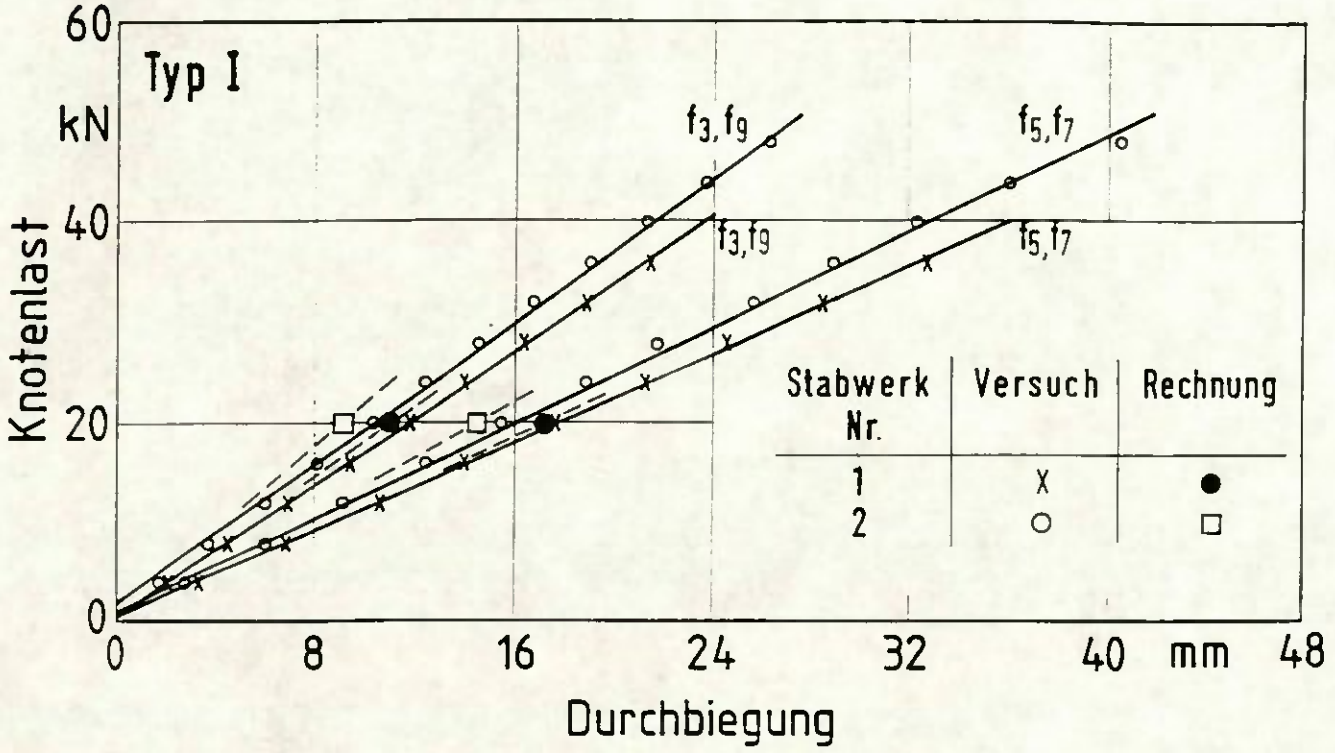


Bild 33: Last-Durchbiegungs-Diagramm der Stabwerke vom Typ I. Rechnerische Vergleichswerte nach Stabwerksberechnung mit E-Moduli nach Anlage 38

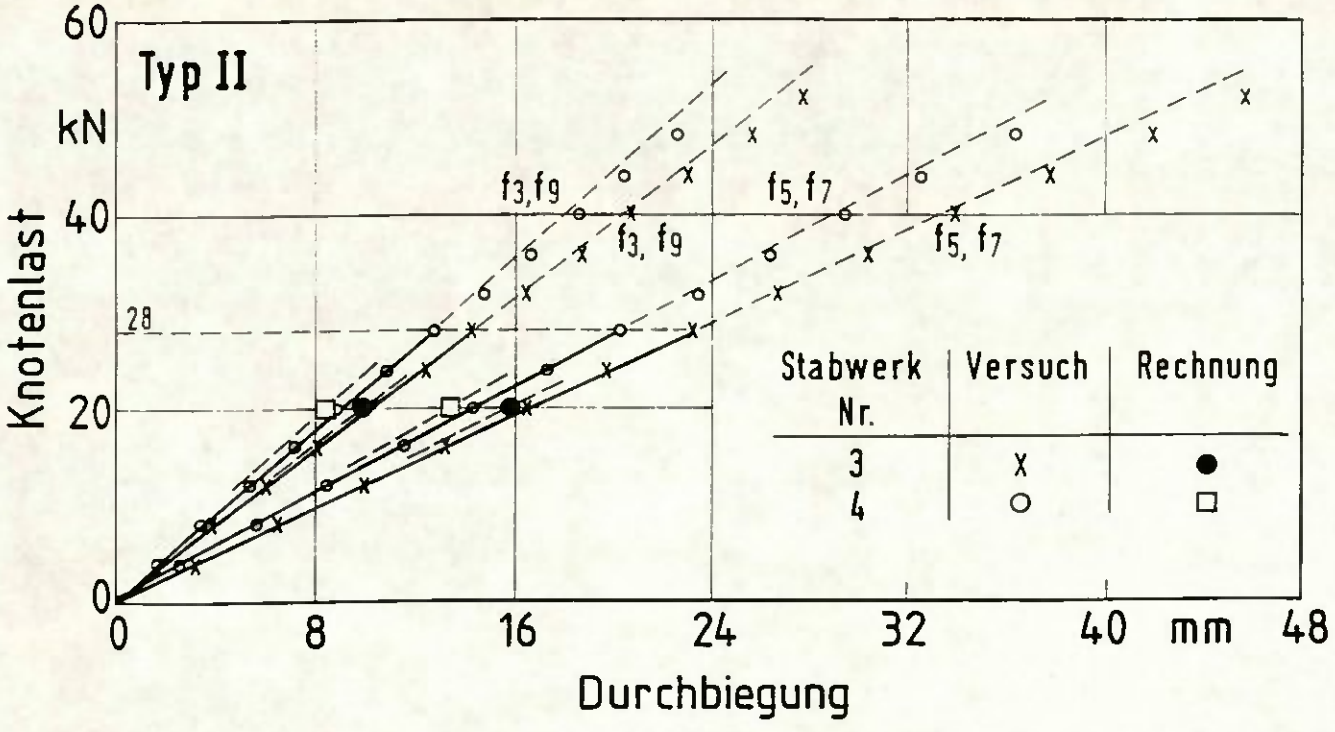


Bild 34: Last-Durchbiegungs-Diagramm der Stabwerke vom Typ II. Rechnerische Vergleichswerte nach Stabwerksberechnung mit E-Moduli nach Anlage 38

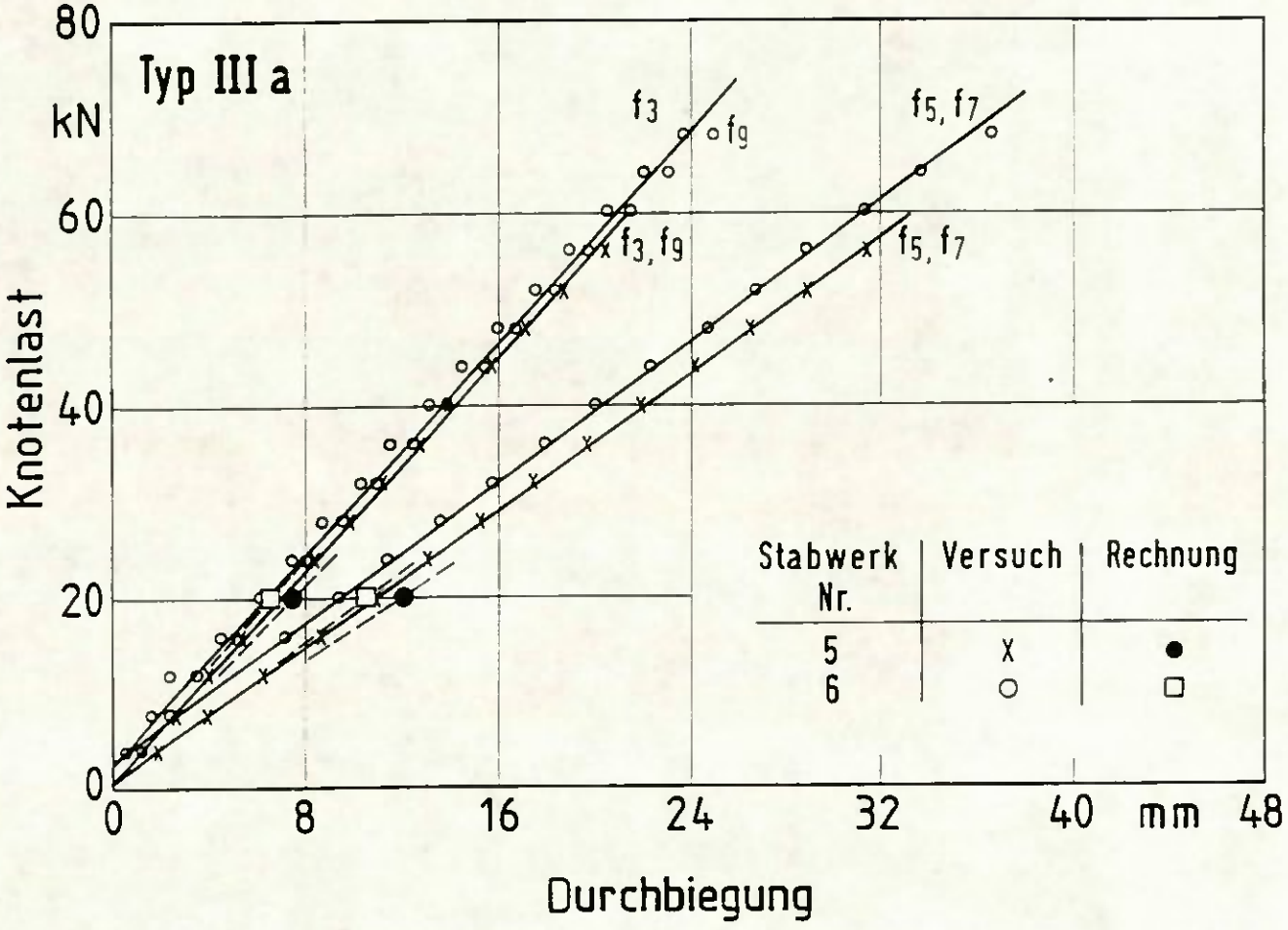


Bild 35: Last-Durchbiegungs-Diagramm der Stabwerke vom Typ IIIa.
Rechnerische Vergleichswerte nach Stabwerksberechnung mit E-Moduli nach Anlage 38

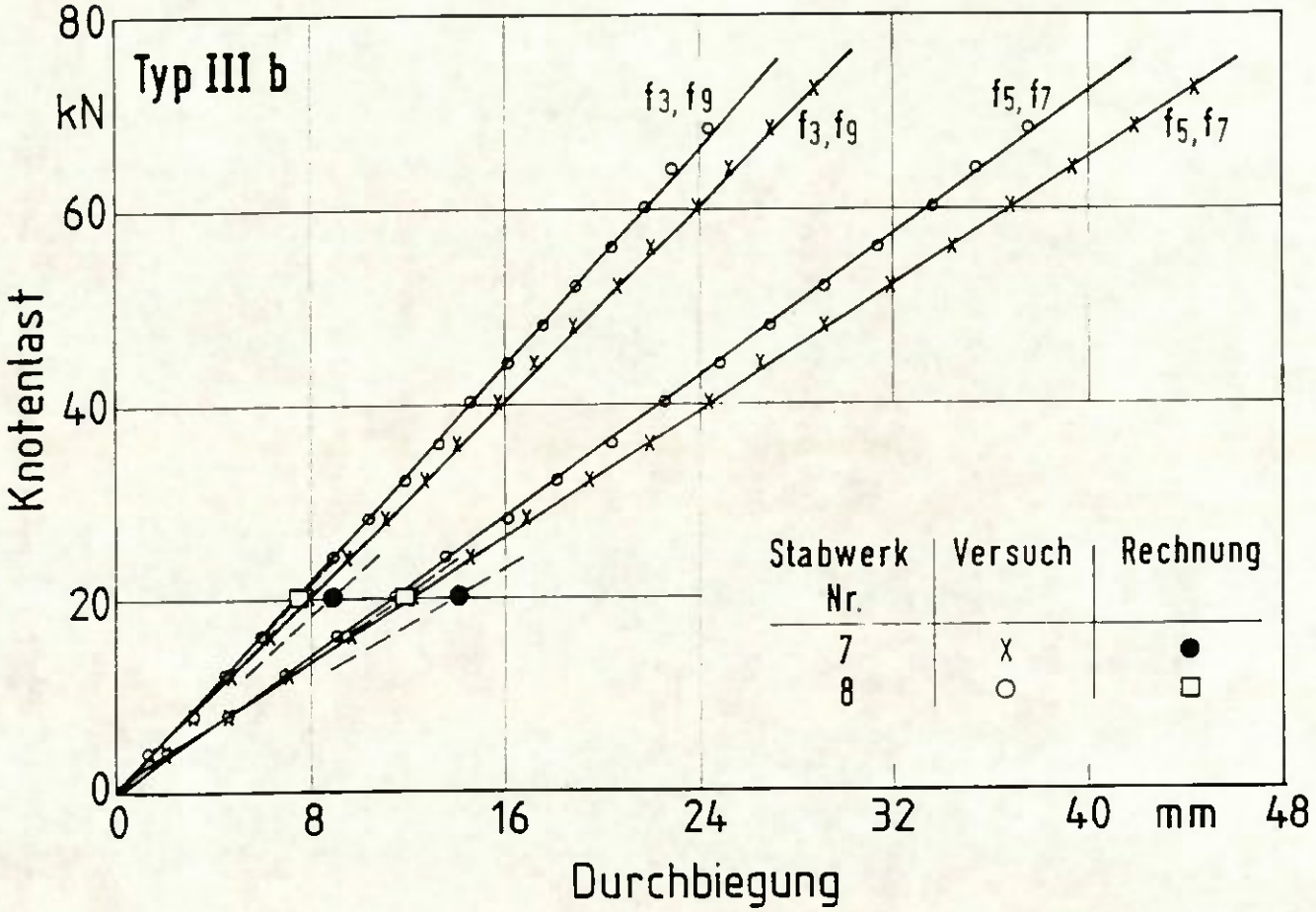
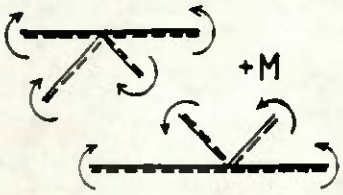


Bild 36: Last-Durchbiegungs-Diagramm der Stabwerke vom Typ IIIb.
Rechnerische Vergleichswerte nach Stabwerksberechnung mit E-Moduli nach Anlage 38



Bez.	Dim.	Tragwerk-Typ I Stabwerk	II Stabwerk	II Fachwerk	III a Stabwerk	III b Stabwerk
			Untergurte			
N_{13}	kN	249.4	240.1	250.0	241.3	243.2
N_{35}	kN	535.7	533.0	550.0	536.1	540.2
N_{57}	kN	630.4	630.4	650.0	634.0	638.5
M_{13}	kNm	-2.20	-0.75	-	-1.40	-1.55
M_{31}	kNm	4.65	2.05	-	2.65	2.50
M_{35}	kNm	1.85	3.60	-	4.30	5.05
M_{53}	kNm	3.70	2.40	-	2.80	2.55
M_{57}	kNm	3.30	3.40	-	3.95	4.20
			Obergurte			
N_{24}	kN	-390.4	-392.9	-400.0	-392.6	-394.8
N_{46}	kN	-588.4	-590.6	-600.0	-590.7	-593.6
M_{24}	kNm	-1.45	5.25	-	5.15	6.70
M_{42}	kNm	10.60	5.95	-	4.15	3.60
M_{46}	kNm	8.20	7.40	-	6.05	6.60
M_{64}	kNm	9.05	7.90	-	6.15	6.35
			Diagonalstäbe			
N_{12}	kN	-350.7	-345.6	-353.6	-346.0	-347.8
N_{23}	kN	199.1	212.4	212.2	211.7	212.8
N_{34}	kN	-203.9	-205.5	-212.2	-208.5	-210.3
N_{45}	kN	71.7	76.0	70.7	74.3	73.7
N_{56}	kN	-64.8	-63.6	-70.7	-66.1	-67.3
M_{12}	kNm	2.20	0.75	-	1.40	1.55
M_{21}	kNm	-0.60	-1.75	-	-2.85	-3.80
M_{23}	kNm	-0.80	-10.45	-	-9.40	-11.15
M_{32}	kNm	-0.40	7.10	-	6.50	7.90
M_{34}	kNm	3.20	4.50	-	5.10	6.00
M_{43}	kNm	0.90	1.35	-	-0.45	-0.80
M_{45}	kNm	-3.30	-8.80	-	-6.50	-7.15
M_{54}	kNm	0.75	2.85	-	1.80	2.15
M_{56}	kNm	0.30	0.55	-	1.45	1.70
M_{65}	kNm	7.30	6.15	-	3.75	3.95
			Durchbiegungen			
$f_{3,9}$	mm	56.1	51.9	53.0	41.2	41.5
$f_{5,7}$	mm	88.1	82.4	84.1	65.3	65.7

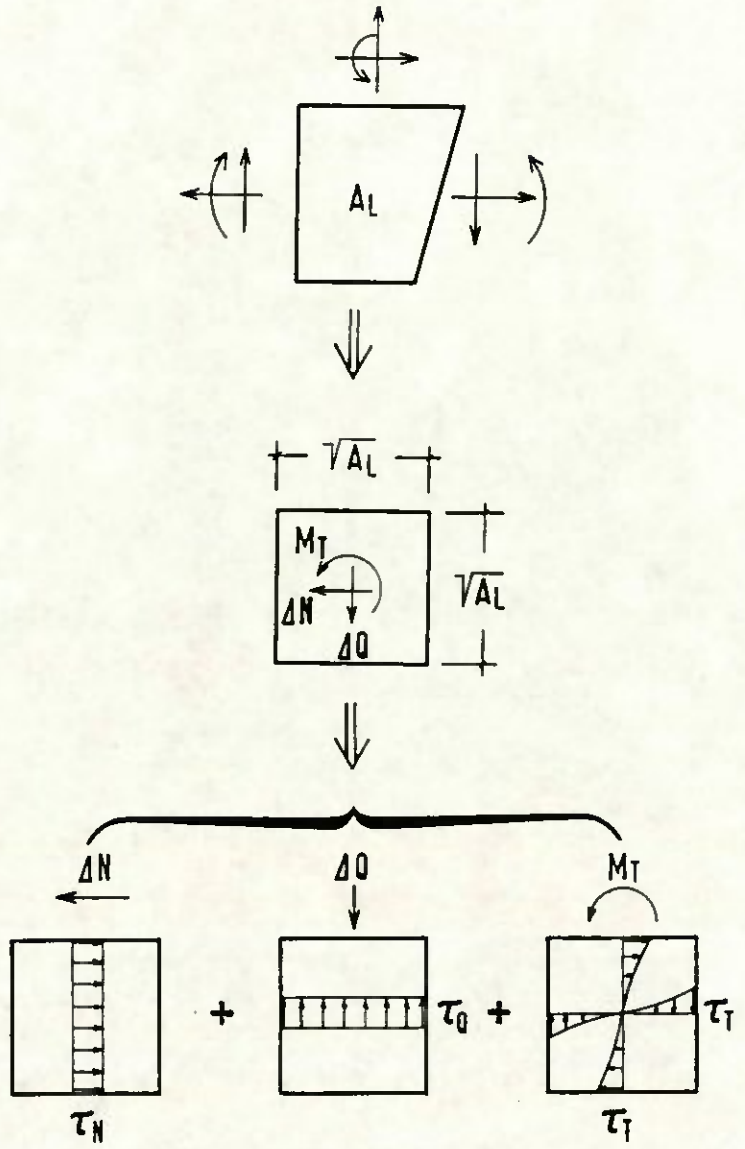
Tabelle 6: Rechnerische Schnittkräfte und Durchbiegungen für Knotenlast F = 100 kN unter der Annahme E = 10000 N/mm^2

Tragwerk		u	ρ_o	E	Durchbiegung			
					Stabwerk		Fachwerk	
Typ	Nr.	[%]	[kg/m³]	[N/mm²]	$f_{3,9}$	$f_{5,7}$	$f_{3,9}$	$f_{5,7}$ [mm]
I	1	7.5	379	10200	11.0	17.3	-	-
	2	7.7	428	12200	9.2	14.4	-	-
II	3	7.8	386	10400	10.0	15.8	10.2	16.1
	4	8.0	434	12400	8.4	13.3	8.6	13.6
IIIa	5	7.6	396	10900	7.6	12.0	-	-
	6	8.0	435	12400	6.6	10.5	-	-
IIIb	7	10.7	381	9400	8.8	14.0	-	-
	8	10.9	427	11200	7.4	11.7	-	-

Tabelle 7: Rechnerische Durchbiegungen für Knotenlast F = 20 kN und mittlere Druck-E-Moduli aus Holzeigenschaften berechnet nach Glos (1978)

Tragwerk		berechnet als				aus Regression der Messwerte						Verhältnis			
		Stabwerk		Fachwerk						Mittelwerte		Stabwerk		Fachwerk	
Typ	Nr.	$f_{3,9}$	$f_{5,7}$	$f_{3,9}$	$f_{5,7}$	f_3	f_5	f_7	f_9	$f_{3,9}$	$f_{5,7}$	(5)/(1)	(6)/(2)	(5)/(3)	(6)/(4)
		1	2	3	4					5	6				
		[mm]				[mm]				[mm]					
I	1	10.9	17.2	-	-	11.5	17.8	17.7	11.9	11.7	17.8	1.07	1.03	-	-
	2	9.1	14.4	-	-	10.6	15.9	15.9	10.5	10.6	15.9	1.16	1.10	-	-
II	3	9.9	15.8	10.2	16.1	10.3	16.8	16.9	10.3	10.3	16.9	1.04	1.07	1.01	1.05
	4	8.4	13.3	8.6	13.6	9.2	14.5	14.4	9.2	9.2	14.5	1.10	1.09	1.07	1.07
III a	5	7.5	12.0	-	-	6.9	10.8	10.8	7.0	7.0	10.8	0.93	0.90	-	-
	6	6.6	10.5	-	-	6.2	9.3	9.5	6.7	6.5	9.4	0.98	0.90	-	-
III b	7	8.8	14.0	-	-	7.8	12.1	12.0	7.9	7.9	12.1	0.90	0.86	-	-
	8	7.4	11.7	-	-	7.3	11.4	11.2	7.4	7.4	11.3	1.00	0.97	-	-
											$\bar{x}$	1.02	0.99	1.04	1.06
											v %	8.5	9.6		

Tabelle 8: Vergleich von berechneten und gemessenen Durchbiegungen für Knotenlast F = 20 kN



Scherfestigkeit

$$\tau_L = \max \begin{cases} \sqrt{\tau_N^2 + (\tau_Q + \tau_T)^2} & \tau_Q > \tau_N \\ \sqrt{\tau_Q^2 + (\tau_N + \tau_T)^2} & \tau_N \geq \tau_Q \end{cases}$$

für $\tau_Q \approx 0$:

$$\tau_L = \tau_N + \tau_T$$

$$\tau_N = \frac{\Delta N}{n \cdot A_L}, \quad \tau_Q = \frac{\Delta Q}{n \cdot A_L}, \quad \tau_T = \frac{M_T}{n \cdot W_T}$$

n= Anzahl der Leimflächen, $\quad W_T \approx 0{,}208 \cdot A_L^{3/2}$

Bild 37: Ansatz zur Berechnung der Spannungen in der Leimfläche zur Auswertung der Stabwerkversuche

Stabwerk Typ	Nr.	Bruchlast je Knoten F_B [kN]	gebr. Knoten	rechnerisch in die Leimfläche zu übertragende Schnittgrößen: beteiligte Stäbe	ΔN [kN]	M_T [kNm]	Querschnittsgrössen A_L [cm²]	W_T [cm³]	Scherfestigkeit τ_N [N/mm²]	τ_T [N/mm²]	ges. τ_L [N/mm²]	Holzart	Bruch ebenen	Leimbruchanteil [%]
I	1	39	K2	2-4	152	0.57	566	2801	1.34	0.10	1.44	BFU-Fi	1/4	10/20
			K4	4-2	77	0.93	"	"	0.68	0.17	0.85	Fi-Fi	1/4	5/10
				4-6										
	2	51	K1	1-3	127	1.12	566	2801	1.12	0.20	1.32	BFU-Fi	1/4	15/20
			K3	3-2	102	0.20	383	1559	1.33	0.06	1.39	BFU-Fi	2/3	5/65
			K4	4-2	101	1.23	566	2801	0.89	0.22	1.11	Fi-Fi	1/4	5/10
				4-6										
II	3	28 Teilbr.	K9	9-8	58	1.26	201	593	1.44	1.06	2.50	Fi-Fi	1	40
			K10	10-11	97	0.49	"	"	2.41	0.41	2.82	BFU-Fi	1/4	60/25
		52	K9	9-7	152	0.80	542	2625	1.40	0.15	1.55	BFU-Fi	4	60
				9-11										
			K10	10-8	204	2.73	"	"	1.88	0.52	2.40	BFU-Fi	1/4	60/25
	4	28 Teilbr.	K9	9-8	58	1.26	201	593	1.44	1.06	2.50	Fi-Fi	1/4	20/65
			K10	10-11	97	0.49	"	"	2.41	0.41	2.82	BFU-Fi	1/4	75/50
		52	K9	9-7	152	0.80	542	2625	1.40	0.15	1.55	BFU-Fi	4	65
				9-11										
			K10	10-8	204	2.73	"	"	1.88	0.52	2.40	BFU-Fi	1/4	75/50
III a	6	72	K9	9-8	150	3.67	359	1415	1.04	0.65	1.69	BFU-Fi	1/4	5/30
				9-10	152	4.68	"	"	1.06	0.83	1.89	BFU-Fi	1/4	5/30
			K11	11-9	174	1.01	542	2625	0.80	0.10	0.90	BFU-Fi	1/4	20/25
III b	8	96	K2	2-1	334	3.65	563	2779	1.48	0.33	1.81	BFU-Fi	1/4	10/25
				2-3	204	10.70	"	"	0.91	0.96	1.87	BFU-Fi	1/4	10/25
			K3	3-2	204	7.58	"	"	0.91	0.68	1.59	BFU-Fi	1	15
				3-4	202	5.76	"	"	0.90	0.52	1.42	Fi-Fi	1	15

Tabelle 9: Auswertung der Scherfestigkeit aus Stabwerkversuchen

Stab-werk Nr.	aus Stabwerkversuchen: Bruch-last je Knoten [kN]	gebr. Knoten	τ_N [N/mm²]	τ_L [N/mm²]	Holz-art	Geometrie der Leimfläche L_L [cm]	Geometrie der Leimfläche α [°]	aus Grundversuchen: $\tau(L_L)$ [N/mm²]	$f(\alpha)$ [1]	τ_{0L} [N/mm²]	$\frac{\tau_N}{\tau_{0L}}$	$\frac{\tau_L}{\tau_{0L}}$
1	39	K2	1.34	1.44	BFU-Fi	28	45	1.69	0.82	1.39	0.96	1.04
		K4	0.68	0.85	Fi-Fi	28	45	1.96	0.51	1.00	0.68	0.85
2	51	K1	1.12	1.32	BFU-Fi	:	45	2.12	0.82	1.74	0.64	0.76
		K3	1.33	1.39	BFU-Fi	20	90	2.12	1.30	2.76	0.48	0.50
		K4	0.89	1.11	Fi-Fi	:	45	2.46	0.51	1.25	0.71	0.89
3	28	K 9	1.44	2.50	Fi-Fi	10	48	3.25	0.48	1.56	0.92	1.60
	Teilbr.	K10	2.41	2.82	BFU-Fi	10	48	2.79	0.82	2.29	1.05	1.23
	52	K 9	1.40	1.55	BFU-Fi	27	48	1.74	0.82	1.43	0.98	1.08
		K10	1.88	2.40	BFU-Fi	"	48	1.74	0.82	1.43	1.31	1.68
4	28	K 9	1.44	2.50	Fi-Fi	10	48	3.25	0.48	1.56	0.92	1.60
	Teilbr.	K10	2.41	2.82	BFU-Fi	10	48	2.79	0.82	2.43	1.05	1.23
	52	K 9	1.40	1.55	BFU-Fi	27	48	1.74	0.82	1.43	0.98	1.08
		K10	1.88	2.40	BFU-Fi	"	48	1.74	0.82	1.43	1.31	1.68
6	72	K 9	1.04	1.69	Fi-Fi	27	48	2.02	0.48	0.97	1.07	1.74
			1.06	1.89	BFU-Fi	27	48	1.74	0.82	1.43	0.74	1.32
		K11	0.80	0.90	BFU-Fi	27	48	1.74	0.82	1.43	0.56	0.63
8	96	K 2	1.48	1.81	BFU-Fi	34	48	1.43	0,82	1.17	1.26	1.55
			0.91	1.87	BFU-Fi	34	48	1.43	0.82	1.17	0.78	1.60
		K 3	0.91	1.59	BFU-Fi	34	48	1.43	0.82	1.17	0.78	1.36
			0.90	1.42	Fi-Fi	34	48	1.66	0.48	0.80	1.13	1.78
										$\bar{x}$	0.92	1.26
										V %	26	31
										n	20	20

1) Faktor für BFU-Fi-Verbindungen: 0.86

Tabelle 10: Vergleich der Scherfestigkeiten aus Stabwerk- und Grundversuchen

Stabwerk Typ	Nr.	Bruchlast je Knoten F_B [kN]	Gebrochener Knoten	Festigkeitsverhältnisse $\frac{\tau_N}{\tau_{0L}}$	Mittelwert	$\frac{\tau_L}{\tau_{0L}}$	Mittelwert	A_{LG} 1) [cm²]	Kennziffer $\frac{\overline{F_B}}{A_{LG}}1000$ [N/mm²]	Verleimzeit t [h]
I	2	51	k1 k3 k4	0.64 0.48 0.71	0.61	0.76 0.50 0.89	0.72	1132	0.40	2.5
	1	39	k2 k4	0.96 0.68	0,82	1.04 0.85	0.94			2.0
III a	6	72	k9 k11	1.07 0.74 0.56	0.79	1.74 1.32 0.63	1.23	1436	0.50	2.0 bis 1.5
II	3	28	k9 k10	1.01 1.68	1.10	1.75 1.97	1.44	1084	0.48	1.25
		52	k9 k10	0.90 0.82		0.99 1.05				
	4	28	k9 k10	1.01 1.68	1.10	1.75 1.97	1.44	1084	0.48	1.25
		52	k9 k10	0.90 0.82		0.99 1.05				
III b	8	96	k2 k3	1.26 0.78 0.78 1.13	0.99	1.55 1.60 1.36 1.78	1.57	2252	0.43	0.75

1) Summe der Leimanschlußflächen der Gurte an die Druckdiagonale (Typ I, III) bzw. Zugdiagonale (Typ II) in einem Innenknoten

Tabelle 11: Scherfestigkeitsverhältnisse, angeordnet in der Reihenfolge der Stabwerkherstellung nach Anlage 32

Bild 38: Stabwerk 1 mit Knoten 4 (von hinten) nach der Prüfung

Bild 39: Stabwerk 6 mit Knoten 11 (von hinten) nach der Prüfung

Bild 40: Stabwerk 8 mit Knoten 2 (von schräg vorne) nach der Prüfung

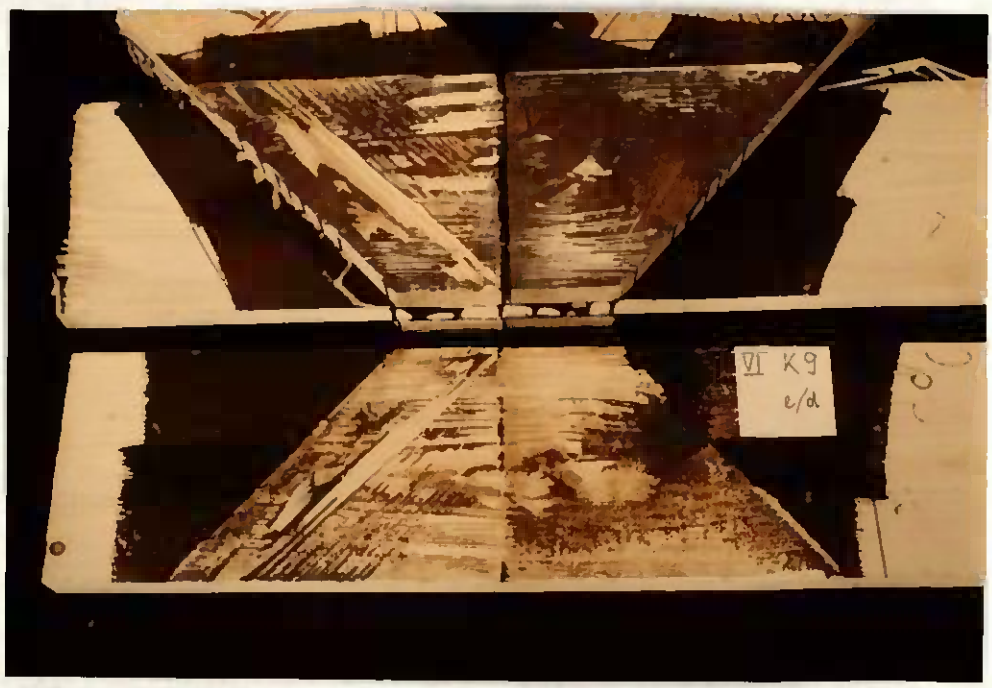


Bild 41: Bruchbild von Knoten 9, Stabwerk 6, in Bruchebene 4 (Lamelle e/d)
Links Fi-Fi-, rechts BFU-Fi-Verbindung

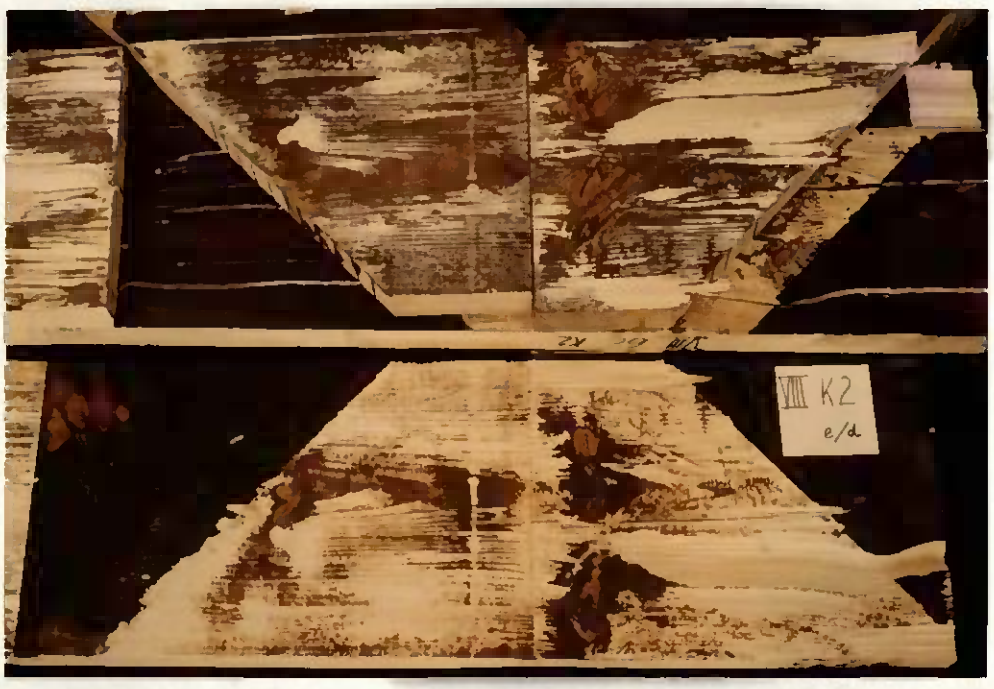


Bild 42: Bruchbild von Knoten 2, Stabwerk 8, in Bruchebene 4 (Lamelle e/d)