

TRAGFÄHIGKEIT VON BALKENSCHUHEN  
UNTER ZWEIACHSIGER BEANSPRUCHUNG

von

Jürgen Ehlbeck und Rainer Görlacher

---

Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine  
Abt. Ingenieurholzbau  
Universität Fridericiana Karlsruhe  
o.Prof.Dr.-Ing. Jürgen Ehlbeck

1984

## V O R W O R T

Diese Arbeit entstand in den Jahren 1982 bis 1984 im Auftrage und mit Unterstützung der Entwicklungsgemeinschaft Holzbau (EGH) in der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung (DGfH). Die finanziellen Mittel wurden vom Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft und Verkehr und von der Deutschen Holzwirtschaft bereitgestellt. Zusätzliche finanzielle Hilfen erfolgten durch die Hersteller von Stahlblechformteilen. Allen Förderern dieses Projektes sei auch an dieser Stelle gedankt.

Das Hauptziel der Arbeit bestand darin, für zweiachsig (schräg) beanspruchte Balkenschuhanschlüsse, für die z.Zt. in den allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen dieser Holzverbindungsmittel keine Angaben enthalten sind, Bemessungsgrundlagen zu schaffen, um die entsprechenden bauaufsichtlichen Regelwerke ergänzen zu können.

Planung und Durchführung der Versuche erfolgte unter der Anleitung des Herrn Dipl.-Ing. Rainer Görlacher. Den Bau der eigens entwickelten Versuchseinrichtung sowie die Herstellung und Prüfung der Versuchskörper besorgten die Herren Günter Kranz und Johann Lafferthon. Bei der Darstellung der Ergebnisse halfen die wissenschaftlichen Hilfskräfte des Lehrstuhls für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen.

Allen Beteiligten sei für die gute Zusammenarbeit gedankt.

Jürgen Ehlbeck

## I n h a l t

1	Ziel des Forschungsvorhabens	1
2	Auswertung des Schrifttums	2
3	Versuche	3
3.1	Versuchsprogramm und Versuchsaufbau	3
3.2	Versuchsmaterial	4
3.3	Versuchsdurchführung	5
4	Ergebnisse der Versuche	7
5	Auswertung der Versuche	11
6	Vorschlag für die Bemessung von Balken- schuhanschlüssen unter zweiachsiger Beanspruchung	14
7	Zusammenfassung	17
8	Schrifttum	19

## 1 Ziel des Forschungsvorhabens

Balkenschuhe als Stahlblechformteile für die Verbindung von rechteckigen, vorwiegend rechtwinklig zueinander verlaufenden Holzträgern aus Bauschnittholz oder Brettschichtholz haben sich bewährt. Ihr Tragverhalten ist rechnerisch kaum erfaßbar und wurde zur Erteilung allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassungen durch Versuche erforscht. Dabei wurde zunächst nur der Lastfall betrachtet, bei dem die Kräfte im anzuschließenden Träger (Nebenträger) parallel zu einer Hauptachse des Trägerquerschnittes wirken (einachsige Biegung). Bei geneigten Nebenträgerquerschnitten mit zweiachsiger Biegung wird auch der Balkenschuh durch eine resultierende Kraft beansprucht, die unter einem Winkel zu den Balkenschuhachsen wirkt. Dieser Beanspruchungsfall tritt beispielsweise bei geneigten Dachkonstruktionen auf und führt zu veränderten Beanspruchungen sowohl der Blechteile des Balkenschuhes als auch der Nagelanschlüsse in Haupt- und Nebenträger. Ziel der Untersuchung war es daher, die Tragfähigkeit und das Verformungsverhalten derartiger Balkenschuhanschlüsse durch Versuche zu bestimmen und daraus sich ergebende Modifizierungen der zulässigen Balkenschuhbelastungen herzuleiten.

## 2 Auswertung des Schrifttums

Untersuchungen von VAN DER PUT (1983) befassen sich allgemein mit der Tragfähigkeit von Balkenschuhanschlüssen. Durch Versuche und durch theoretische Lösungsansätze wurde in dieser Arbeit die Tragfähigkeit von Balkenschuhen unter ein- und zweiachsiger Beanspruchung beschrieben. Die gezeigten Lösungsansätze wurden bei diesem Forschungsvorhaben zwar beachtet, konnten jedoch nicht auf die untersuchten Balkenschuhformen übertragen werden, da es vorrangig darum ging, die in Deutschland anerkannten Berechnungsgrundlagen (z.Zt. in allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen geregelt), die nur die einachsige Beanspruchung erfassen, für die Fälle der zweiachsigen Beanspruchung zu modifizieren.

### 3 Versuche

Es war zu erwarten, daß in erster Linie folgende Parameter einen signifikanten Einfluß auf die Tragfähigkeit eines Balkenschuhanschlusses haben:

- Winkel zwischen Kraftrichtung und Symmetrieachse des Balkenschuhes, d.h. Zusammenwirken der in Richtung der beiden Hauptachsen angreifenden Kraftkomponenten bei zweiachsiger Beanspruchung,
- Balkenschuhgröße und Balkenschuhgeometrie,
- Nebenträgerhöhe.

Querzugbeanspruchungen im Hauptträger, die die Tragfähigkeit eines Balkenschuhanschlusses unter besonderen Bedingungen entscheidend beeinflussen, sollten durch entsprechende Anordnung der Balkenschuhe am Hauptträger möglichst vermieden werden und werden in dieser Arbeit nicht näher behandelt (siehe hierzu EHLBECK/GÖRLACHER, 1983).

#### 3.1 Versuchsprogramm und Versuchsaufbau

Es wurden vier Versuchsreihen durchgeführt, bei denen grundsätzlich nur eine Prüfkörperform entsprechend Bild 1 (Anlage 1) gewählt wurde, um Einflüsse der Versuchsträgergeometrien auf die Versuchsergebnisse auszuschalten. Die Abmessungen der Hauptträger betragen einheitlich  $B_H \times H_H \times L_H = 10 \times 25 \times 150$  cm mit einer Stützweite von  $l_H = 125$  cm. Die Nebenträgerhöhe  $H_N$  wurde zwischen  $1,07 \cdot H$  und  $1,5 \cdot H$  ( $H =$  Balkenschuhhöhe) variiert, während die Stützweite der Nebenträger in allen Fällen mit  $L_N = l_N = 10 \cdot H_N$  festgelegt wurde. Zwischen der Stirnfläche des

Nebenträgers und dem Hauptträger bestand ein 3 mm breiter Spalt. Die Lasteinleitung in den Nebenträger erfolgte über eine speziell entwickelte Prüfeinrichtung Bild 2 (Anlage 2) durch zwei Einzellasten, die im Abstand  $a = 2 \cdot H_N$  vom Nebenträgerende entfernt angriffen. Die zweiachsige Beanspruchung unter einem Winkel  $\alpha$  zwischen Krafrichtung und der Symmetrieachse des Balkenschuhes (= Querschnittsachse  $y - y$  des Nebenträgers) erfolgte dadurch, daß eine Komponente  $F_{\parallel} = F$  (= Kolbenkraft der Prüfmaschine) im Abstand  $B_N/2$  vom Nebenträgerrand in Richtung der Querschnittsachse  $y - y$  und gleichzeitig eine Komponente  $F_{\perp} = F \cdot \tan \alpha$  im Abstand von 2,5 cm vom oberen Nebenträgerrand in Richtung parallel der Querschnittsachse  $z - z$  in den Nebenträger eingeleitet wurden. Der theoretische Lastangriffspunkt der beiden schräg auf den Nebenträger einwirkenden Kräfte  $F_{\alpha} = F/\cos \alpha$  lag damit auf der Querschnittsachse  $y - y$  des Nebenträgers genau 2,5 cm unterhalb der Nebenträgeroberkante. Damit wurde simuliert, daß die Komponente  $F_{\perp}$  in der Regel auch in der Praxis (z.B. bei aufgenagelter Dachschalung) infolge der Einschlagtiefe der Nägel unterhalb der Trägeroberkante angreift.

Die in den einzelnen Versuchsreihen gewählten Balkenschuhe, die von fünf verschiedenen Balkenschuhherstellern stammten, Neigungswinkel  $\alpha$  sowie die Nebenträgerhöhen  $H_N$  sind in Tabelle 1 (Anlage 3) zusammengestellt. Zusätzlich ist die Anzahl der Einzelversuche für jede Versuchsreihe angegeben.

### 3.2 Versuchsmaterial

Für die Versuche kamen Balkenschuhe zur Anwendung, die bereits bauaufsichtlich zugelassen waren oder für die zum Zeitpunkt dieser Untersuchungen die Zulassungsverfahren liefen. Um die Untersuchungen möglichst repräsentativ durchzuführen und die Ergebnisse auf alle derzeit zugelassenen oder zuzulassenden Balkenschuhe

übertragen zu können, wurden in jeder Versuchsreihe Balkenschuhe unterschiedlicher Hersteller verwendet. Einen Überblick über die wichtigsten Kenngrößen der Balkenschuhe enthalten die Tabelle 2 (Anlage 4) sowie Bild 3 und 4 (Anlage 5 und 6). Die Nagelung der Balkenschuhe erfolgte in jedem Einzelfalle mit den in den einschlägigen Zulassungen vorgeschriebenen Nägeln bzw. mit den in neuen Zulassungen vorgesehenen Nägeln. Alle Nägel besitzen allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen für die Stahlblech-Holz-Nagelung.

Das Brettschichtholz für die Versuchsträger stammte aus mehreren Lieferungen zweier deutscher Holzleimbaubetriebe. Die Lagerung der Träger zur Klimatisierung und die Durchführung der Versuche erfolgte im Prüflabor bei Normalklima 20/65 DIN 50 014, so daß sich eine Ausgleichsfeuchtigkeit des Holzes von etwa 12 % eingestellt hatte. Da das Tragverhalten von Balkenschuhanschlüssen nicht primär von den Holzeigenschaften abhängt und Brettschichtholz in der Regel aus Lamellen unterschiedlicher Güte bestehen kann, konnte eine detaillierte Ermittlung der Holzeigenschaften unterbleiben.

### 3.3 Versuchsdurchführung

Die Hauptträger wurden als Einfeldträger ( $l_H = 125 \text{ cm}$ ) derart gelagert, daß der Balkenschuhanschluß in Feldmitte lag. An den Enden waren die Hauptträger seitlich geführt, so daß eine torsionssteife Einspannung vorlag (Gabellagerung). Die Kräfte wurden von zwei Prüfkolben einer 400 kN-Prüfmaschine über die in Bild 2 (Anlage 2) dargestellte Prüfeinrichtung in den Nebenträger eingeleitet. Bedingt durch das Kraftumleitungssystem der Prüfeinrichtung betragen die Kräfte am Nebenträger:

$$F_{\parallel} = F$$

(3.1a, b)

$$F_{\perp} = F_{\parallel} \cdot \tan \alpha = F \cdot \tan \alpha$$

Dabei ist  $F$  die Kolbenkraft der Prüfmaschine.

Die Nebenträger und damit auch die Balkenschuhanschlüsse wurden auf diese Weise mit einer konstanten Kraftzunahme der Kolbenkraft von 5 kN/min belastet. Bei den Versuchsreihen mit  $\alpha = 90^\circ$  wurden die Prüfkörper um  $90^\circ$  gedreht, so daß die Kolbenkraft der Prüfmaschine unmittelbar der Komponente  $F_{\perp}$  entsprach. Für diesen Fall gilt also:

$$F_{\perp} = F \quad (3.2)$$

Jeweils ein Prüfkörper jeder Reihe wurde zunächst ohne Zwischenentlastung bis zum Bruch belastet. Die restlichen Prüfkörper wurden anfangs nur bis zu etwa 40 % dieser Höchstlast belastet. Nach 2 min Wartezeit erfolgte eine Zwischenentlastung auf etwa 10 % der Höchstlast, danach schließlich eine Wiederbelastung bis zum Versagen der Prüfkörper.

Mit Hilfe induktiver Wegaufnehmer, deren Anordnung in Bild 5 (Anlage 7) dargestellt ist, wurden die gegenseitigen Verschiebungen zwischen Haupt- und Nebenträger gemessen. Daraus wurden die zur Beurteilung der Verformungen des Balkenschuhanschlusses benötigten Schwerpunktsverschiebungen des Nebenträgers gegenüber dem Hauptträger sowie die Verdrehungen des Nebenträgers berechnet.

#### 4 Ergebnisse der Versuche

Die aufnehmbaren Höchstlasten der Balkenschuhanschlüsse der vier Versuchsreihen sind in den Tabellen 3 bis 6 (Anlagen 8 bis 11) zusammengestellt. Die angegebenen Werte  $\max F_{\parallel}$  stellen die Kraftkomponente in Richtung der Symmetrieachse des Balkenschuhanschlusses dar und entsprechen mit Ausnahme der Versuche mit  $\alpha = 90^\circ$  der Prüfkolbenlast  $F$  der Prüfmaschine. Die Komponente  $\max F_{\perp}$  - rechtwinklig zur Symmetrieachse des Balkenschuhes wirkend - errechnet sich über den Winkel  $\alpha$ . Dieser Winkel blieb, bedingt durch die großen Verformungen, während des Versuchsablaufes nicht konstant. Es wurden jedoch mit Hilfe induktiver Wegaufnehmer Messungen durchgeführt, die eine Berechnung des tatsächlich vorhandenen Neigungswinkels bei jeder Lasthöhe ermöglichten. Die Bruchlastkomponenten  $\max F_{\perp}$  wurden auf diese Weise mit dem zum Zeitpunkt des Versagens vorhandenen Winkel  $\alpha$  berechnet. Die ebenfalls angegebene Bruchlast  $\max F_{\alpha}$  ist die vektorielle Summe der beiden Komponenten  $\max F_{\parallel}$  und  $\max F_{\perp}$ .

Die Tragfähigkeit der Prüfkörper war durch mehrere Bruchursachen begrenzt:

##### - Fall A

Versagen der Nebenträger infolge reiner Schubbeanspruchung durch Querkraft (trat nur bei  $\alpha = 0^\circ$  auf) oder infolge Zusammenwirkens von Schub-, Torsions- und Querkzugkräften (bei  $\alpha \neq 0^\circ$ ); bei Auftreten dieser Bruchursache war der Balkenschuh in allen Fällen bereits erheblich deformiert. Bild 7 (Anlage 12) zeigt die Draufsicht auf das Stirnende eines Nebenträgers nach Erreichen der Höchstlast (Hauptträger wurde entfernt) (Versuch 2.15.1).

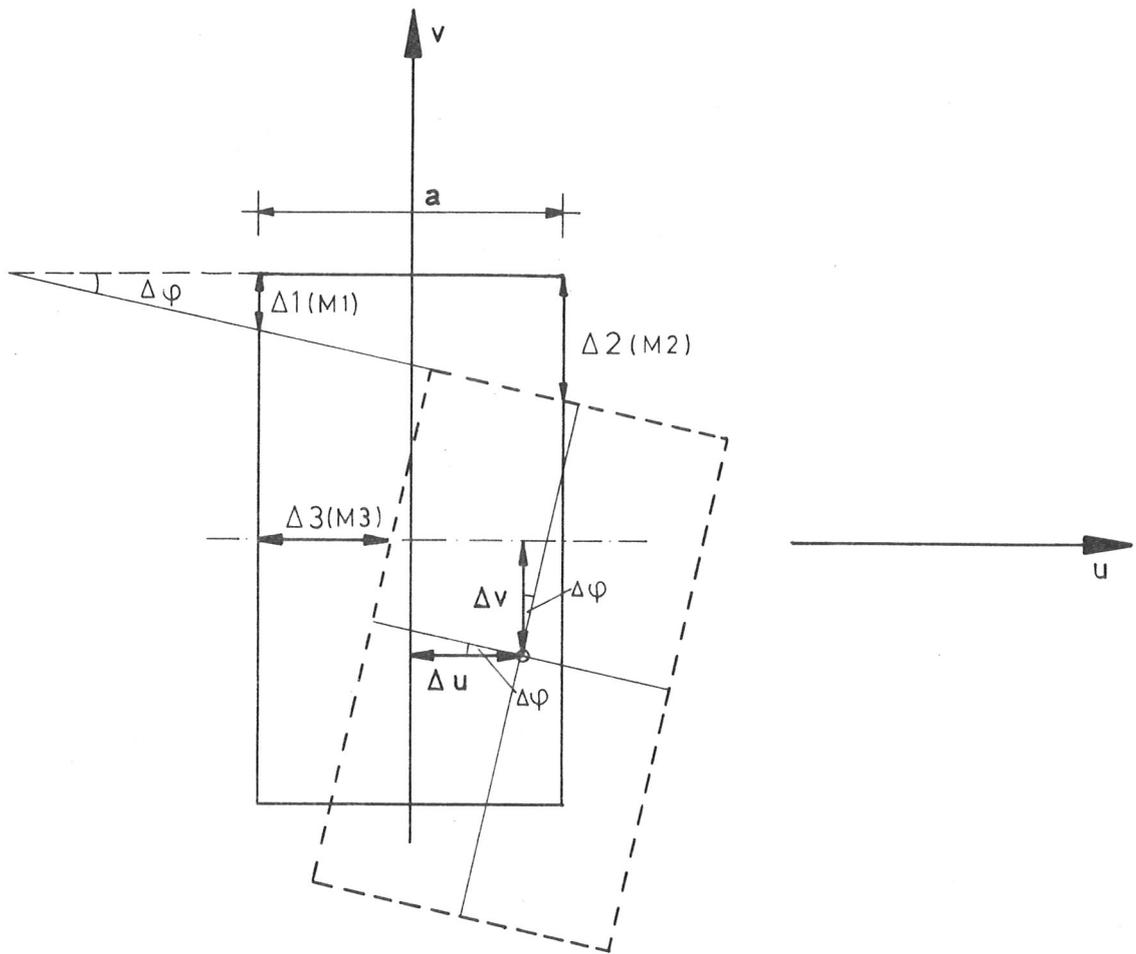
- Fall B

Große Deformationen des Balkenschuhes (Eindrückungen in den Nebenträger) und der Nägel, jedoch ohne Versagen der Nebenträger; deutlicher Lastabfall.

- Fall C

Erreichen einer Verschiebung von 10 mm der Schwerachse des Nebenträgers gegenüber dem Hauptträger im Anschlußbereich. Die Last konnte nach Erreichen dieser Verformung zwar noch gesteigert werden, die Definition einer "Bruchverformung" von 10 mm war jedoch angebracht, da eine definitive Höchstlast mit anschließendem Lastabfall bei einigen Versuchen wegen zu großer Verschiebungen und Verdrehungen der Nebenträger nicht mehr erreicht wurde. Es wurde daher davon ausgegangen, daß Belastungen, die erst nach Anschlußverformungen von mehr als 10 mm aufgenommen werden, nicht mehr als "Sicherheitsreserve" angesehen werden können.

Aufgrund der Verformungsmessungen an den drei Meßstellen M1 bis M3 (siehe Bild 5/Anlage 7) wurden die relativen Verschiebungen  $\Delta u$  und  $\Delta v$  zwischen Haupt- und Nebenträger sowie die Verdrehungen  $\Delta\varphi$  des Nebenträgers ermittelt.



Mit den Meßwerten  $\Delta 1$ ,  $\Delta 2$  und  $\Delta 3$  an den drei Meßstellen ergeben sich:

$$\tan \Delta \varphi = \frac{\Delta 2 - \Delta 1}{a} \quad (4.1)$$

mit  $a = B_N$  = Abstand der Meßstellen M1 und M2 voneinander,

$$\Delta \ddot{u} = \frac{\Delta 3 - \tan \Delta \varphi \frac{\Delta 1 + \Delta 2}{2}}{1 + \tan^2 \Delta \varphi} \quad (4.2)$$

und

$$\Delta v = \frac{\Delta 3 \cdot \tan \Delta \varphi + \frac{\Delta 1 + \Delta 2}{2}}{1 + \tan^2 \Delta \varphi} \quad (4.3)$$

In den Bildern 8 bis 24 (Anlagen 13 bis 21) sind die Last-Verformungsdiagramme einiger Versuche angegeben. Die nicht dargestellten Diagramme der übrigen Versuche zeigten einen weitgehend ähnlichen Verlauf. Da auch alle Entlastungskurven nach einer Last von etwa  $0,4 \cdot \max F$  ähnlich verliefen, wurde wegen der Übersichtlichkeit der Darstellung nur die Entlastung für den Versuch 1.30.3 exemplarisch aufgezeichnet.

Aus den Last-Verformungsdiagrammen wurden diejenigen Lasten ( $F_{1,5}$ ) bestimmt, bei denen zwischen Haupt- und Nebenträgern Verschiebungen von 1,5 mm (als vektorielle Summe aus  $\Delta u$  und  $\Delta v$ ) auftraten. Diese Lasten und die zugehörigen Winkel  $\alpha$ , sind in den Tabellen 3 bis 6 (Anlagen 8 bis 11) für alle Einzelversuche aufgelistet.

## 5 Auswertung der Versuche

In den Bildern 25 bis 32 (Anlagen 22 bis 25) sind die Höchstkräfte bzw. die Kräfte bei einer Verschiebung zwischen Haupt- und Nebenträger von 1,5 mm graphisch dargestellt. Dabei ist auf der Abszisse jeweils die Kraftkomponente  $F_{\perp}$ , auf der Ordinate die Kraftkomponente  $F_{\parallel}$  aufgetragen.

Mit diesen Versuchsdaten wurden Regressionen unter Zugrundelegung einer Ellipsenfunktion als Näherungsgleichung durchgeführt:

$$\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 = 1 \quad (5.1)$$

Diese Gleichung läßt sich durch die Substitutionen

$$\bar{x} = x^2$$

und (5.2a, b)

$$\bar{y} = y^2$$

linearisieren. Es entsteht die Geradengleichung:

$$\bar{y} = - \left(\frac{b}{a}\right)^2 \cdot \bar{x} + b^2 \quad (5.3)$$

Nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate lassen sich die Konstanten in Gl. (5.3) und damit auch die Konstanten der Ellipsengleichung bestimmen. Die auf diese Weise berechneten Regressionsgleichungen und ihr Verlauf sind in die Bilder 25 bis 32 eingetragen. Die Halbachsen dieser Ellipsen stellen die maximalen

Beanspruchungen  $\max F_{\parallel}$  parallel bzw.  $\max F_{\perp}$  senkrecht zur Symmetrieachse des Balkenschuhs dar.

Eine Zusammenstellung aller Regressionsgleichungen enthält Tabelle 7 (Anlage 26). Dabei wurden auch die Quotienten aus  $\max F_{\parallel}$  und  $\max F_{\perp}$  sowie  $F_{\parallel 1,5}$  und  $F_{\perp 1,5}$  berechnet. Es ist zu erkennen, daß die Quotienten aus den Bruchlasten mit denjenigen aus den Belastungen bei 1,5 mm Verschiebung gut übereinstimmen. Weiterhin ist eine Zunahme des Quotienten mit größer werdendem Verhältnis von Nebenträgerhöhe  $H_N$  zu Balkenschuhhöhe  $H$  festzustellen.

Für einen Nachweis für Balkenschuhanschlüsse unter zweiachsiger Beanspruchung wird vereinfachend daher der Zusammenhang zwischen den Beanspruchungen in den beiden Hauptrichtungen mit

$$\frac{\max F_{\parallel}}{\max F_{\perp}} = \frac{F_{\parallel 1,5}}{F_{\perp 1,5}} = 2,5 \cdot \frac{H_N}{H} \quad (5.4)$$

angenommen. Diese Abhängigkeit erfaßt die Versuchsergebnisse gut und ist in Bild 33 (Anlage 26) dargestellt.

Ist die maximale Beanspruchung  $\max F_{\parallel}$  parallel zur Symmetrieachse des Balkenschuhs bekannt, dann läßt sich ein Tragfähigkeitsnachweis also mit der Interaktionsformel

$$\left(\frac{F_{\parallel}}{\max F_{\parallel}}\right)^2 + \left(\frac{F_{\perp}}{\max F_{\perp}}\right)^2 = 1 \quad (5.5)$$

durchführen. Dabei sind:

$$\begin{aligned} \max F_{\parallel} &= \text{Tragfähigkeit des Balkenschuhs parallel} \\ &\text{zu einer Symmetrieachse (einachsige} \\ &\text{Beanspruchung)} \end{aligned}$$

$\max F_{\perp}$  = Tragfähigkeit des Balkenschuhs senkrecht zur Symmetrieachse; sie kann aus der Beziehung

$$\max F_{\perp} = 0,4 \cdot \max F_{\parallel} \cdot \frac{H}{H_N}$$

abgeschätzt werden.

$H_N$  = Nebenträgerhöhe

$H$  = Höhe des Balkenschuhs

$F_{\parallel}$ ,  $F_{\perp}$  = Komponenten der am Balkenschuh angreifenden Kraft  $F_{\alpha}$

6 Vorschlag für die Bemessung von Balkenschuhanschlüssen  
unter zweiachsiger Beanspruchung

Die am Balkenschuh unter einem Winkel  $\alpha$  zur Symmetrieachse des Balkenschuhs angreifende Kraft  $F_\alpha$  läßt sich in

$$F_{\parallel} = F_\alpha \cos \alpha \quad (6.1)$$

$$F_{\perp} = F_\alpha \sin \alpha \quad (6.2)$$

zerlegen. Ausgehend vom Tragfähigkeitsnachweis (Gl. 5.5) wird der Nachweis für die zulässige Belastung mit

$$\left(\frac{F_{\parallel}}{\text{zul } F_{\parallel}}\right)^2 + \left(\frac{F_{\perp}}{\text{zul } F_{\perp}}\right)^2 \leq 1 \quad (6.3)$$

geführt. Dabei kann

$$\text{zul } F_{\perp} = 0,4 \cdot \text{zul } F_{\parallel} \cdot \frac{H}{H_N} \quad (6.4)$$

angenommen werden. Somit ergibt sich

$$\left(\frac{F_\alpha \cdot \cos \alpha}{\text{zul } F_{\parallel}}\right)^2 + \left(\frac{F_\alpha \cdot \sin \alpha}{0,4 \cdot \text{zul } F_{\parallel} \cdot \frac{H}{H_N}}\right)^2 \leq 1. \quad (6.5)$$

././.

Nach Umformung erhält man hieraus schließlich

$$\text{zul } F_{\alpha} \leq \text{zul } F_{\parallel} \cdot \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \alpha + \left(2,5 \cdot \frac{H_N}{H} \cdot \sin \alpha\right)^2}} \quad (6.6)$$

Darin bedeuten:

$\text{zul } F_{\parallel}$  = zulässige Belastung einer Balkenschuhverbindung in Richtung der Symmetrieachse des Balkenschuhs, z.B. entsprechend den gegenwärtigen Bestimmungen der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen,

$H_N$  = Höhe des angeschlossenen Nebenträgers,

$H$  = Höhe des Balkenschuhes,

$\alpha$  = Winkel zwischen Kraft  $F_{\alpha}$  und Symmetrieachse des Balkenschuhes.

Mit Gl. (6.6) wurden sämtliche Versuche ausgewertet. Die Ergebnisse sind in den Tabellen 8 bis 11 (Anlagen 27 bis 30) zusammengestellt. Dabei sind im einzelnen angegeben:

- Verhältnis  $H_N/H$  von Nebenträgerhöhe zur Balkenschuhhöhe,
- Winkel  $\alpha_1$  zwischen Kraftrichtung und Symmetrieachse des Balkenschuhes im Augenblick des Bruches (Bruchlast  $\max F_{\alpha}$ ),

- Bruchlast  $\max F_{\alpha}$
- Winkel  $\alpha_2$  zwischen Kraftrichtung und Symmetrieachse des Balkenschuhes unter der Kraft  $F_{1,5}$ ,
- Kraft  $F_{1,5}$  bei einer Verschiebung zwischen Haupt- und Nebenträger von 1,5 mm,
- zu  $F_{\parallel}$  nach der in den allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen angegebenen Beziehung

$$\text{zul } F_{\parallel} = n_N \cdot 0,75 \text{ [kN]}$$

( $n_N$  = Anzahl der Nägel im Nebenträger),

- zulässige Belastung zu  $F_{\alpha_1}$  nach Gl. (6.6) unter dem Winkel  $\alpha_1$ ,
- zulässige Belastung zu  $F_{\alpha_2}$  nach Gl. (6.6) unter dem Winkel  $\alpha_2$ ,
- Quotient aus  $\max F_{\alpha}$  und zu  $F_{\alpha_1}$ ,
- Quotient aus  $F_{1,5}$  und zu  $F_{\alpha_2}$ .

Die Quotienten aus  $\max F_{\alpha}$  und zu  $F_{\alpha_1}$  sowie  $F_{1,5}$  und zu  $F_{\alpha_2}$  sind in Bild 34 (Anlage 31) aufgetragen. Die Sicherheiten gegenüber den Bruchwerten liegen im Mittel bei 5,4 bei einem Variationskoeffizienten von 21 %. Nur bei einem Versuch war die Verschiebung zwischen Haupt- und Nebenträger bei zu  $F_{\alpha_2}$  geringfügig größer als 1,5 mm.

././.

## 7 Zusammenfassung

Durch Prüfung von Balkenschuhanschlüssen mit Balkenschuhen verschiedener Hersteller wurde das Trag- und Verformungsverhalten unter zweiachsiger Beanspruchung untersucht. In Abhängigkeit von den wichtigsten Einflußparametern, nämlich

- Balkenschuhgröße,
- Kombination der Kraftkomponenten bei zweiachsiger Beanspruchung,
- Nebenträgerhöhe,

wurde ein Tragfähigkeitsnachweis in der Form

$$\left(\frac{F_{\parallel}}{\max F_{\parallel}}\right)^2 + \left(\frac{F_{\perp}}{\max F_{\perp}}\right)^2 = 1$$

$$\text{mit } \max F_{\perp} = 0,4 \cdot \max F_{\parallel} \cdot \frac{H}{H_N}$$

entwickelt.

Daraus wurde als Vorschlag für die Bemessung einer Balkenschuhverbindung abgeleitet:

$$\text{zul } F_{\alpha} \leq \text{zul } F_{\parallel} \cdot \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \alpha + \left(2,5 \frac{H_N}{H} \cdot \sin \alpha\right)^2}}$$

mit  $\text{zul } F_{\alpha}$  = zulässige resultierende Kraft am Balkenschuh unter einem Winkel  $\alpha$  zwischen Kraftrichtung und Symmetrieachse des Balkenschuhes,

- zul  $F_{\parallel}$  = zulässige Belastung einer Balkenschuhverbindung in Richtung der Symmetrieachse des Balkenschuhs (nach allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen),
- $H_N$  = Höhe des angeschlossenen Nebenträgers,
- $H$  = Höhe des Balkenschuhes,
- $\alpha$  = Winkel zwischen Kraftrichtung der Kraft  $F_{\alpha}$  und der Symmetrieachse des Balkenschuhes.

Diese Bemessungsgleichung ergibt eine im Mittel über 5-fache Sicherheit gegenüber Bruch, während die Verschiebung der Schwerachse des Nebenträgers gegenüber dem Hauptträger dabei geringer als 1,5 mm ist. Für kleine Winkel  $\alpha$ , z.B. bis  $15^\circ$ , könnte bei geringfügiger Einbuße an Bruchsicherheit auf eine gegenüber dem Fall  $\alpha = 0$  reduzierte zulässige Belastung verzichtet werden. Dies ist jedoch gegebenenfalls vom Verhältnis  $H_N/H$  (= Nebenträgerhöhe/Balkenschuhhöhe) abhängig zu machen.

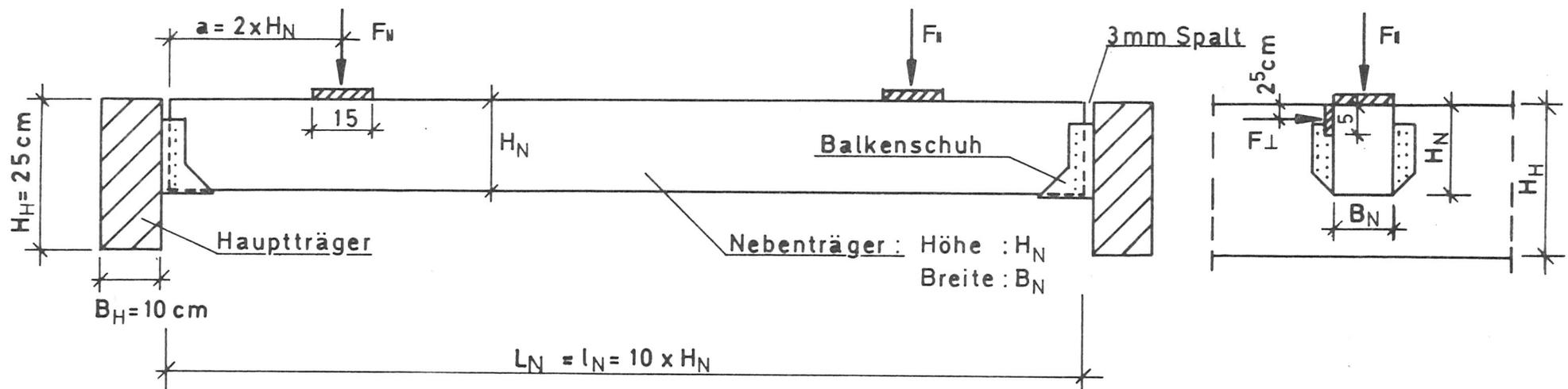
8    Schrifttum

Institut für Bautechnik: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen für Balkenschuhe als Holzverbindungsmittel (1981 bis 1984).

van der Put: Verbindingen met plaatstalen schoenen. Rapport 4 - 83 - 1, Stevin-Laboratorium van der afdeling der Civiele Techniek der Technische Hogeschool, Delft, 1983.

Ehlbeck, J. und Görlacher, R.: Tragverhalten von Queranschlüssen mittels Stahlformteilen, insbesondere Balkenschuhen, im Holzbau. Forschungsbericht der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abt. Ingenieurholzbau, Universität Karlsruhe (TH) 1983.

## Seitenansicht



## Draufsicht

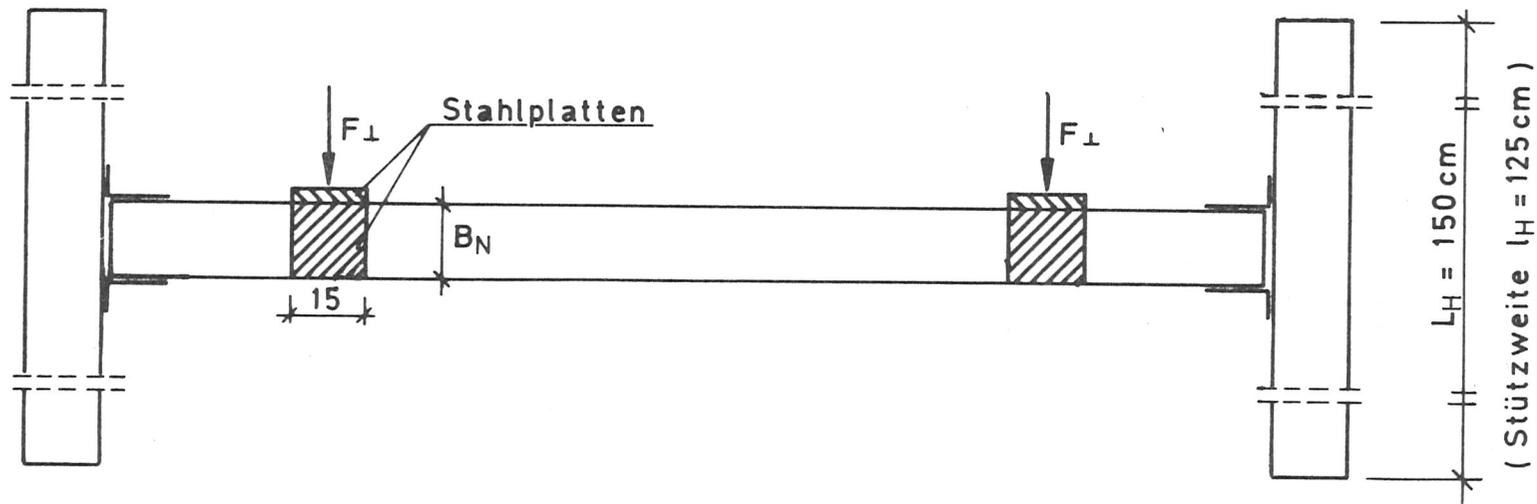


Bild 1: Form und Abmessungen der Prüfkörper für alle Versuche

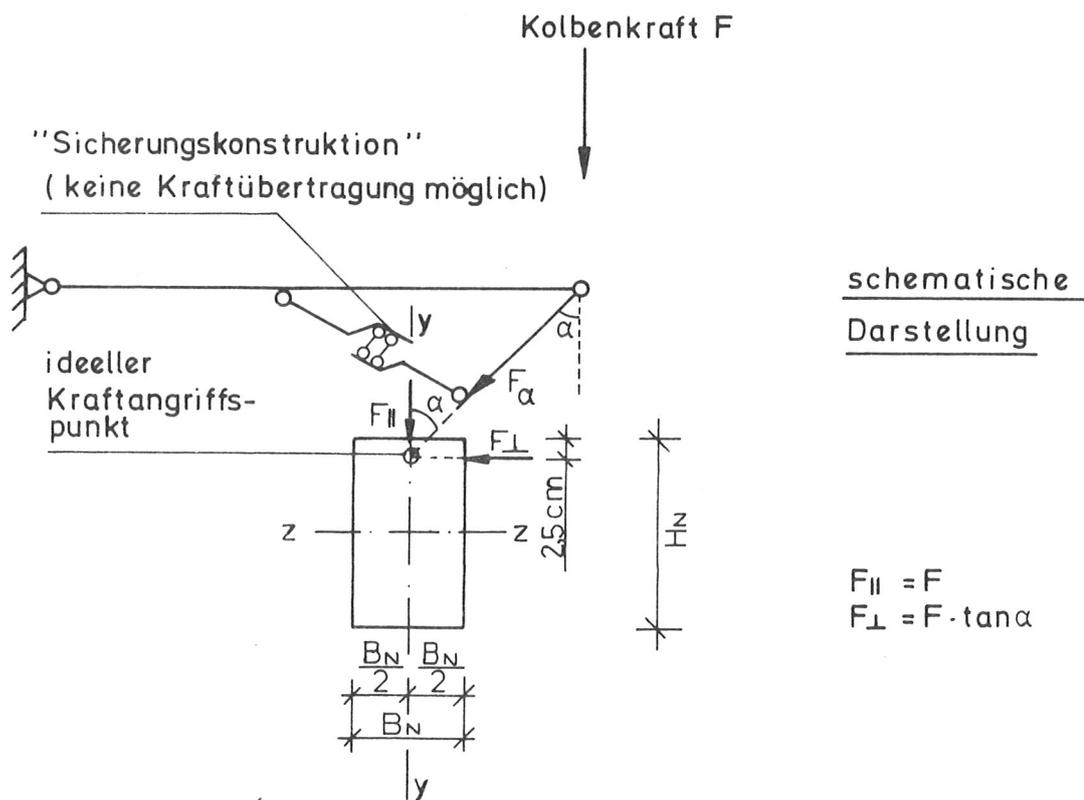
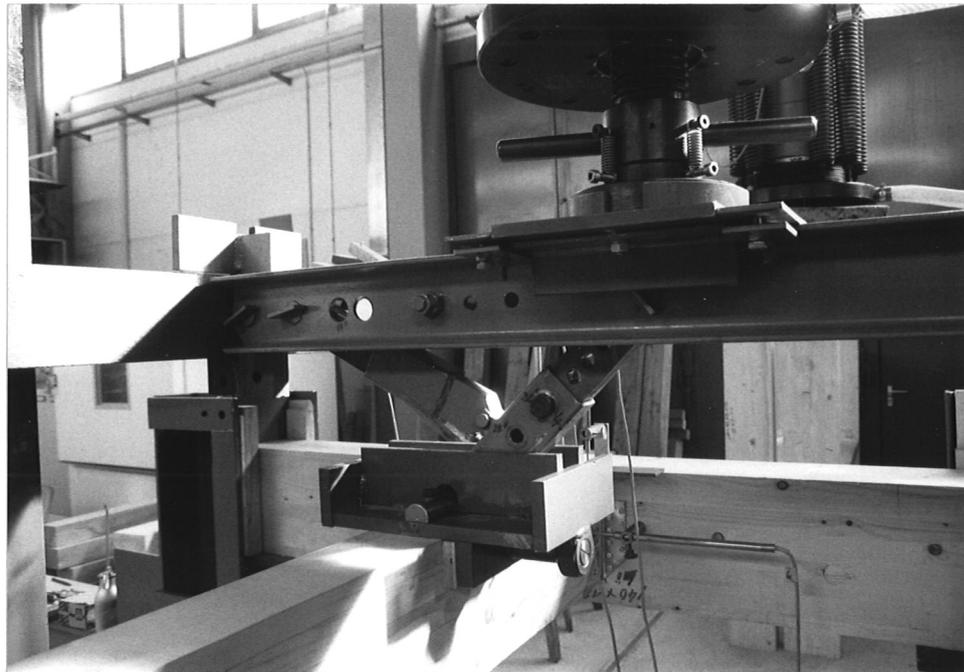


Bild 2: Prüfvorrichtung zur Krafteinleitung in den Nebenträger

Tabelle 1: Zusammenstellung aller Versuche

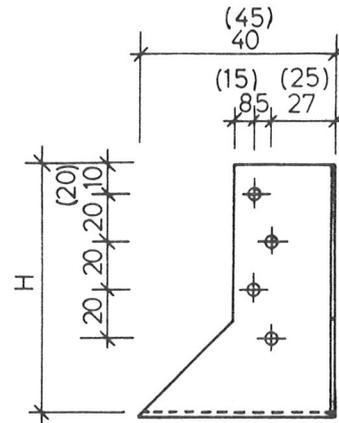
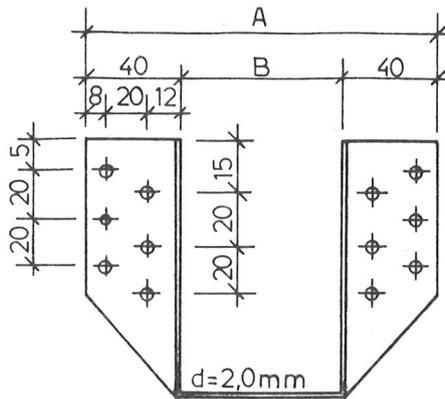
Versuchsreihe	Balkenschuhtyp B × H [mm × mm]	Herstell- firma der B.-Schuhe	$\alpha$ [°]	$H_N$ [cm]	Anzahl der Versuche
1.0	100 × 140	B, C	0	15	6
1.15	100 × 140	A, D, E	15	15	3
1.30	100 × 140	A, D, E	30	15	3
1.45	100 × 140	A, D, E	45	15	3
1.90	100 × 140	B, C	90	15	2
2.15	100 × 140	A, D, E	15	21	3
2.30	100 × 140	A, D, E	30	21	3
2.45	100 × 140	A, D, E	45	21	3
2.90	100 × 140	B, C	90	21	2
3.0	60 × 100	A, B, C	0	12	8
3.15	60 × 100	A, B	15	12	3
3.45	60 × 100	A, B	45	12	3
3.90	60 × 100	B, C	90	12	2
4.0	140 × 180	A, B, C	0	22	9
4.15	140 × 180	A, B, D	15	22	3
4.45	140 × 180	A, B, D	45	22	3
4.90	140 × 180	B, C	90	22	2

Tabelle 2: Äußere Abmessungen der für die Versuche verwendeten Balkenschuhe sowie verwendete Nageltypen und deren Anzahl im Hauptträger ( $n_H$ ) und Nebenträger ( $n_N$ )

B x H (Größe)	60 x 100			100 x 140					140 x 180			
Hersteller	A	B	C	A	B	C	D	E	A	B	C	D
A*)	140	144	144	180	184	184	184	184	220	224	224	224
Nägeln	4 x 40	4 x 40	4 x 40	4 x 50	4 x 50	4 x 50	4 x 50	4 x 50	4 x 60	4 x 60	4 x 60	4 x 60
$n_H$	16	16	14	24	20	22	16	22	28	28	30	26
$n_N$	8	8	10	12	12	14	10	12	16	16	18	14

\*) A = Gesamtbreite des Balkenschuhes (siehe Bild 3 und 4)

Hersteller A

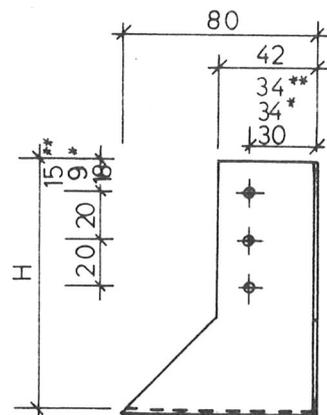
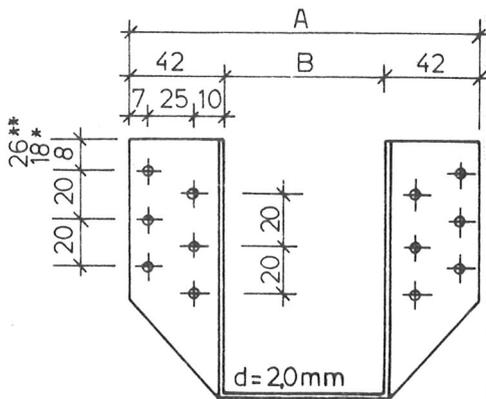


Nagelloch  $\phi$  5,0mm

Typ 60 x 100 , 100 x 140 und 140 x 180

(Werte in Klammern gelten für Balkenschuh Typ 140 x 180)

Hersteller B



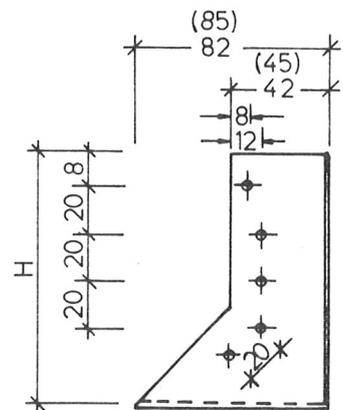
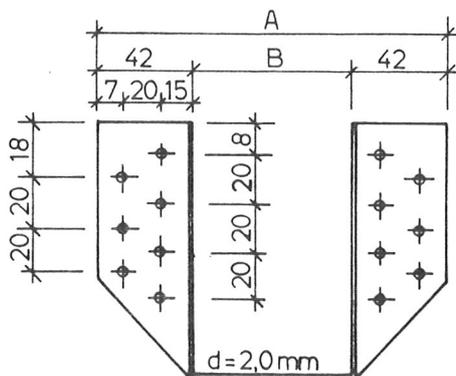
Nagelloch  $\phi$  4,8 mm

Typ 60 x 100 , 100 x 140 und 140 x 180

(\*Werte gelten für Balkenschuh Typ 100 x 140 ;

\*\*Werte gelten für Balkenschuh Typ 140 x 180 )

Hersteller C



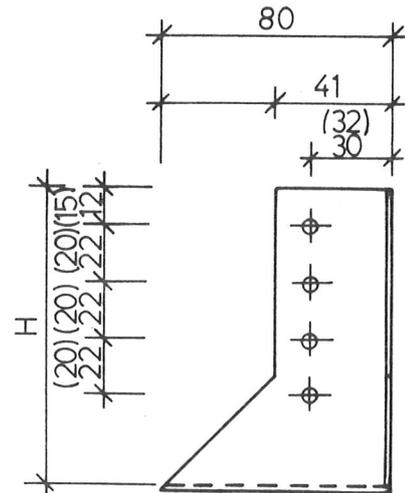
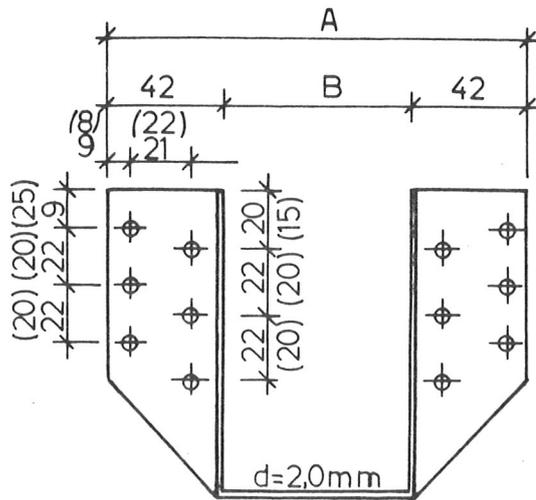
Nagelloch  $\phi$  5,0mm

Typ 60 x 100 , 100 x 140 und 140 x 180

(Werte in Klammern gelten für Balkenschuh Typ 140 x 180)

Bild: 3 Form und Abmessungen der verwendeten Balkenschuhe der Hersteller A, B und C

Hersteller D

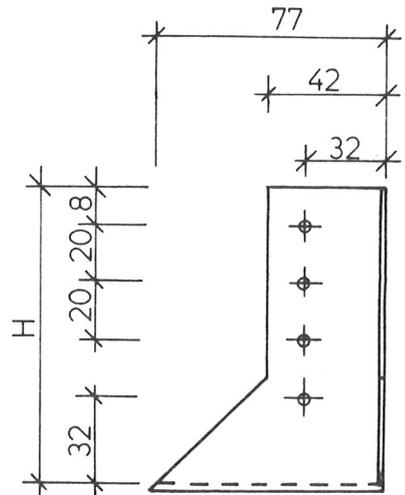
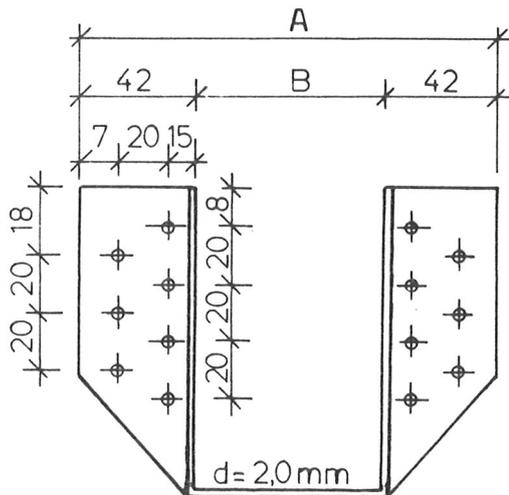


Nagelloch  $\phi$  4,5mm

Typ 100 x 140 und 140 x 180

(Werte in Klammern gelten für Balkenschuh Typ 140 x 180)

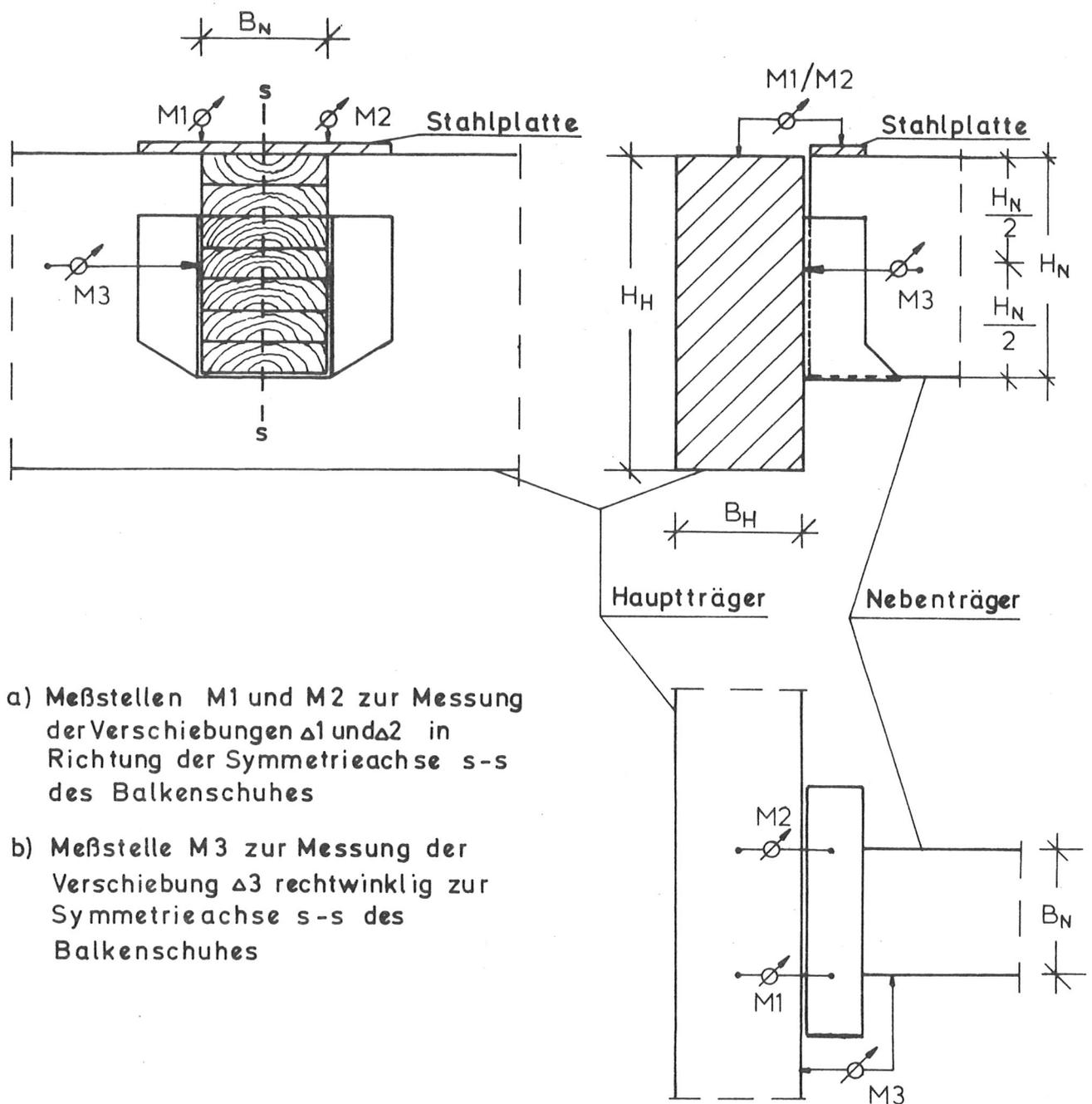
Hersteller E



Nagelloch  $\phi$  4,8mm

Typ 100 x 140

Bild 4: Form und Abmessungen der verwendeten Balkenschuhe der Hersteller D und E



**Bild: 5** Anordnung der Meßstellen (induktive Wegaufnehmer) zur Messung der gegenseitigen Verschiebungen zwischen Haupt- und Nebenträger

Tabelle 3: Zusammenstellung der Versuchsergebnisse der Reihe 1  
(Balkenschuh 100 x 140, Nebenträgerhöhe  $H_N = 150$  mm)

Versuch Nr.	Herstellfirma des Balkenschuhs	max $F_{\parallel}$ [kN]	max $F_{\perp}$ [kN]	$\alpha$ (bei max F) [°]	max $F_{\alpha}$ [kN]	$F_{\parallel 1,5}$ [kN]	$F_{\perp 1,5}$ [kN]	$\alpha$ (bei $F_{1,5}$ ) [°]	$F_{1,5}$ [kN]	Bruch- ursache (siehe Abschn.4)
1. 0.1	B	45,6	0	0	45,6	15,8	0	0	15,8	Fall C
1. 0.2	B	42,7	0	0	42,7	15,2	0	0	15,2	Fall C
1. 0.3	B	45,2	0	0	45,2	17,0	0	0	17,0	Fall C
1. 0.4	C	47,0	0	0	47,0	15,4	0	0	15,4	Fall C
1. 0.5	C	46,0	0	0	46,0	15,0	0	0	15,0	Fall C
1. 0.6	C	50,9	0	0	50,9	16,2	0	0	16,2	Fall C
1.15.1	A	34,0	12,4	20	36,2	17,7	5,1	16	18,4	Fall B
1.15.2	D	31,4	10,8	19	33,2	12,6	3,6	16	13,1	Fall B
1.15.3	E	28,7	9,3	18	30,2	14,2	4,1	16	14,8	Fall A
1.30.1	A	26,4	19,2	36	32,6	10,9	6,5	31	12,7	Fall B
1.30.2	D	24,6	17,9	36	30,4	10,6	6,6	32	12,5	Fall B
1.30.3	E	24,9	18,1	36	30,8	9,8	6,1	32	11,6	Fall B
1.45.1	A	16,5	20,4	51	26,2	7,6	7,9	46	10,9	Fall C
1.45.2	D	16,0	19,8	51	25,4	6,5	7,0	47	9,5	Fall C
1.45.3	E	17,5	21,6	51	27,8	8,4	8,7	46	12,1	Fall C
1.90.1	C	0	19,9	90	19,9	0	8,9	90	8,9	Fall A
1.90.2	B	0	24,6	90	24,6	0	8,5	90	8,5	Fall A

**Tabelle 4:** Zusammenstellung der Versuchsergebnisse der Reihe 2  
(Balkenschuh 100 x 140, Nebenträgerhöhe  $H_N = 210$  mm)

Versuch Nr.	Herstellfirma des Balkenschuhs	max $F_{  }$	max $F_{\perp}$	$\alpha$ (bei max F)	max $F_{\alpha}$	$F_{  1,5}$	$F_{\perp1,5}$	$\alpha$ (bei $F_{1,5}$ )	$F_{1,5}$	Bruch- ursache (siehe Abschn.4)
		[kN]	[kN]	[°]	[kN]	[kN]	[kN]	[°]	[kN]	
2.15.1	A	29,5	11,9	22	31,8	12,3	3,5	16	12,8	Fall A
2.15.2	D	24,0	9,7	22	25,9	8,7	2,5	16	9,1	Fall A
2.15.3	E	28,7	11,6	22	31,0	13,8	4,0	16	14,4	Fall A
2.30.1	A	17,5	13,2	37	21,9	7,7	4,8	32	9,1	Fall C
2.30.2	D	15,7	11,8	37	19,6	5,2	3,1	31	6,1	Fall C
2.30.3	E	17,8	13,4	37	22,3	8,4	5,2	32	9,9	Fall C
2.45.1	A	11,8	14,6	51	18,8	3,9	4,2	47	5,7	Fall C
2.45.2	D	11,0	13,6	51	17,5	2,6	2,7	46	3,7	Fall C
2.45.3	E	11,6	14,3	51	18,4	5,1	5,5	47	7,5	Fall C
2.90.1	C	0	11,7	90	11,7	-	2,9	0	2,9	Fall C
2.90.2	B	0	11,8	90	11,8	-	6,1	0	6,1	Fall C

Tabelle 5: Zusammenstellung der Versuchsergebnisse der Reihe 3  
(Balkenschuh 60 x 100, Nebenträgerhöhe  $H_N = 120$  mm)

Versuch Nr.	Herstellfirma des Balkenschuhs	max $F_{\parallel}$ [kN]	max $F_{\perp}$ [kN]	$\alpha$ (bei max F) [°]	max $F_{\alpha}$ [kN]	$F_{\parallel 1,5}$ [kN]	$F_{\perp 1,5}$ [kN]	$\alpha$ (bei $F_{1,5}$ ) [°]	$F_{1,5}$ [kN]	Bruch- ursache (siehe Abschn.4)
3. 0.1	A	25,3	0	0	25,3	12,0	0	0	12,0	Fall A
3. 0.2	A	19,0	0	0	19,0	9,2	0	0	9,2	Fall A
3. 0.3	A	25,8	0	0	25,8	10,0	0	0	10,0	Fall A
3. 0.4	B	25,5	0	0	25,5	7,0	0	0	7,0	Fall C
3. 0.5	B	27,9	0	0	27,9	8,5	0	0	8,5	Fall C
3. 0.6	B	26,2	0	0	26,2	8,0	0	0	8,0	Fall C
3. 0.7	C	28,0	0	0	28,0	6,5	0	0	6,5	Fall C
3. 0.8	C	31,0	0	0	31,0	11,0	0	0	11,0	Fall C
3.15.1	A	16,7	6,1	20	17,8	6,4	1,8	16	6,7	Fall A
3.15.2	B	17,9	6,5	20	19,0	6,2	1,8	16	6,4	Fall A
3.15.3	B	16,5	5,7	19	17,5	6,0	1,7	16	6,2	Fall A
3.45.1	A	6,8	7,8	49	10,4	3,0	3,1	46	4,3	Fall A
3.45.2	B	7,1	8,5	50	11,0	2,8	2,9	46	4,0	Fall A
3.45.3	B	7,6	9,4	51	12,1	2,3	2,4	46	3,3	Fall C
3.90.1	C	0	10,6	90	10,6	0	3,4	90	3,4	Fall A
3.90.2	B	0	9,8	90	9,8	0	3,0	90	3,0	Fall A

Tabelle 6: Zusammenstellung der Versuchsergebnisse der Reihe 4  
(Balkenschuh 140 x 180, Nebenträgerhöhe  $H_N = 220$  mm)

Versuch Nr.	Herstellfirma des Balkenschuhs	max $F_{  }$	max $F_{\perp}$	$\alpha$	max $F_{\alpha}$	$F_{  1,5}$	$F_{\perp1,5}$	$\alpha$	$F_{1,5}$	Bruch- ursache (siehe Abschn.4)
		[kN]	[kN]	[°]	[kN]	[kN]	[kN]	[°]	[kN]	
4. 0.1	A	64,0	0	0	64,0	24,2	0	0	24,2	Fall C
4. 0.2	A	64,3	0	0	64,3	22,3	0	0	22,3	Fall C
4. 0.3	A	64,2	0	0	64,2	26,5	0	0	26,5	Fall C
4. 0.4	B	60,2	0	0	60,2	22,8	0	0	22,8	Fall C
4. 0.5	B	58,5	0	0	58,5	19,5	0	0	19,5	Fall C
4. 0.6	B	61,5	0	0	61,5	21,2	0	0	21,2	Fall C
4. 0.7	C	62,6	0	0	62,6	22,4	0	0	22,4	Fall C
4. 0.8	C	61,1	0	0	61,1	19,7	0	0	19,7	Fall C
4. 0.9	C	68,5	0	0	68,5	22,7	0	0	22,7	Fall C
4.15.1	A	49,8	20,1	22	53,7	20,0	5,7	16	20,8	Fall B
4.15.2	D	54,2	21,9	22	58,5	18,8	5,4	16	19,6	Fall B
4.15.3	B	48,9	19,8	22	52,7	20,0	5,7	16	20,8	Fall B
4.45.1	A	23,5	29,0	51	37,3	9,8	10,5	47	14,4	Fall C
4.45.2	D	23,8	29,4	51	37,8	10,1	10,8	47	14,8	Fall C
4.45.3	B	22,0	27,2	51	35,0	9,0	9,7	47	13,2	Fall C
4.90.1	C	0	27,3	90	27,3	0	9,9	90	9,9	Fall A
4.90.2	B	0	23,6	90	23,6	0	6,3	90	6,3	Fall A

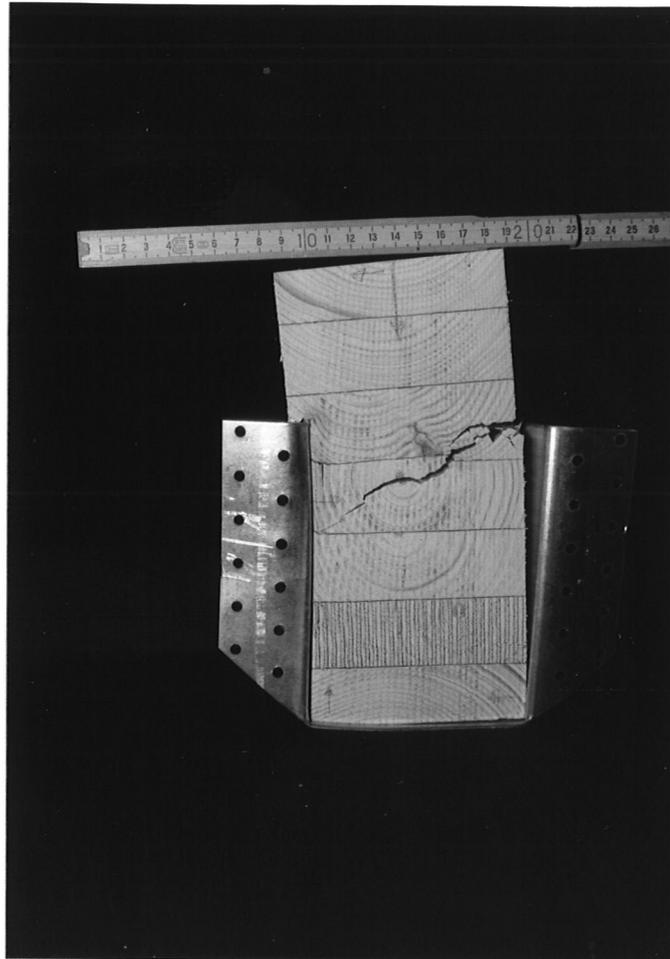


Bild 7: Balkenschuhanschluß nach Erreichen der Höchstlast (Hauptträger wurde entfernt); Versuch 2.15.1, Balkenschuh 100 x 140,  $\alpha = 15^\circ$ ; Nebenträgerbruch und starke Deformation des Balkenschuhes

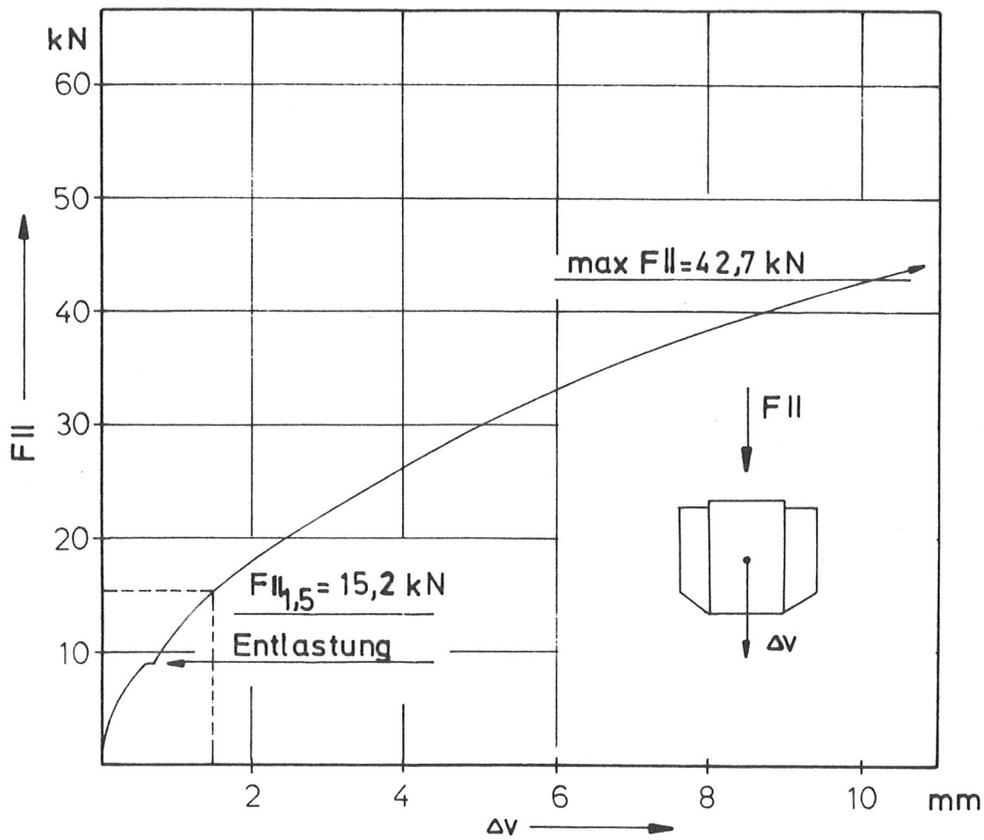


Bild 8: Last-Verformungsdiagramm , Versuch 1.0.2

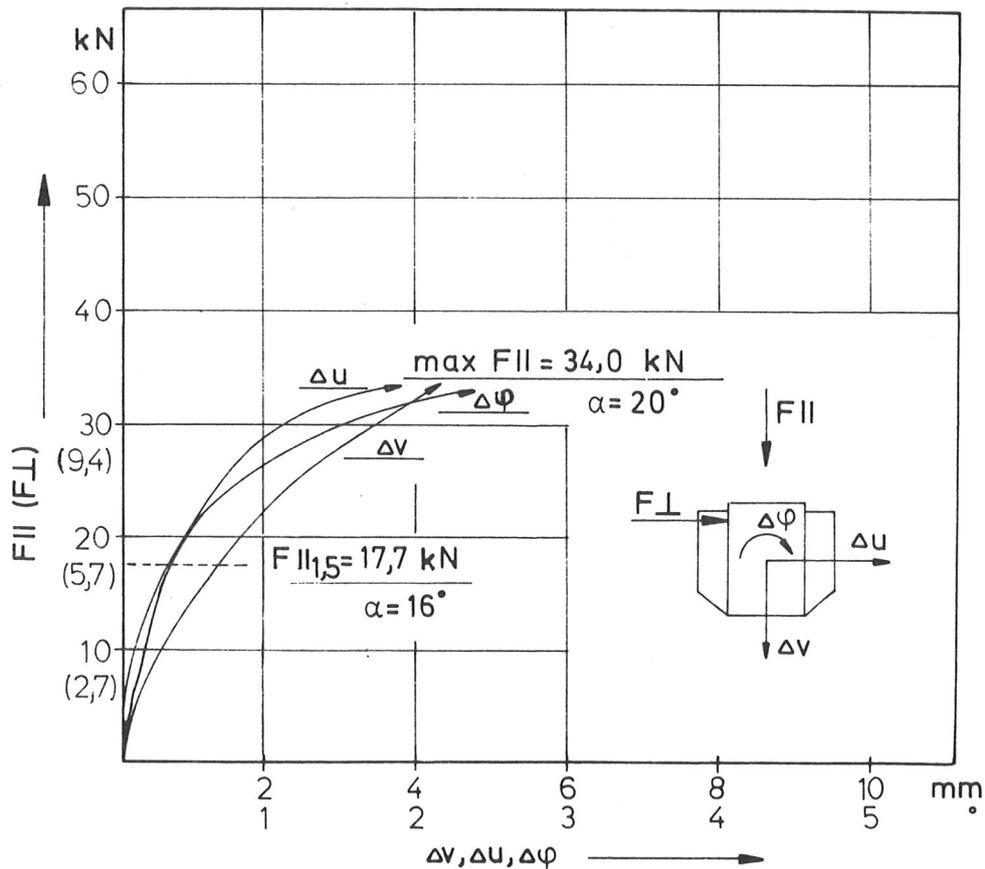


Bild 9: Last - Verformungsdiagramm , Versuch 1.15.1

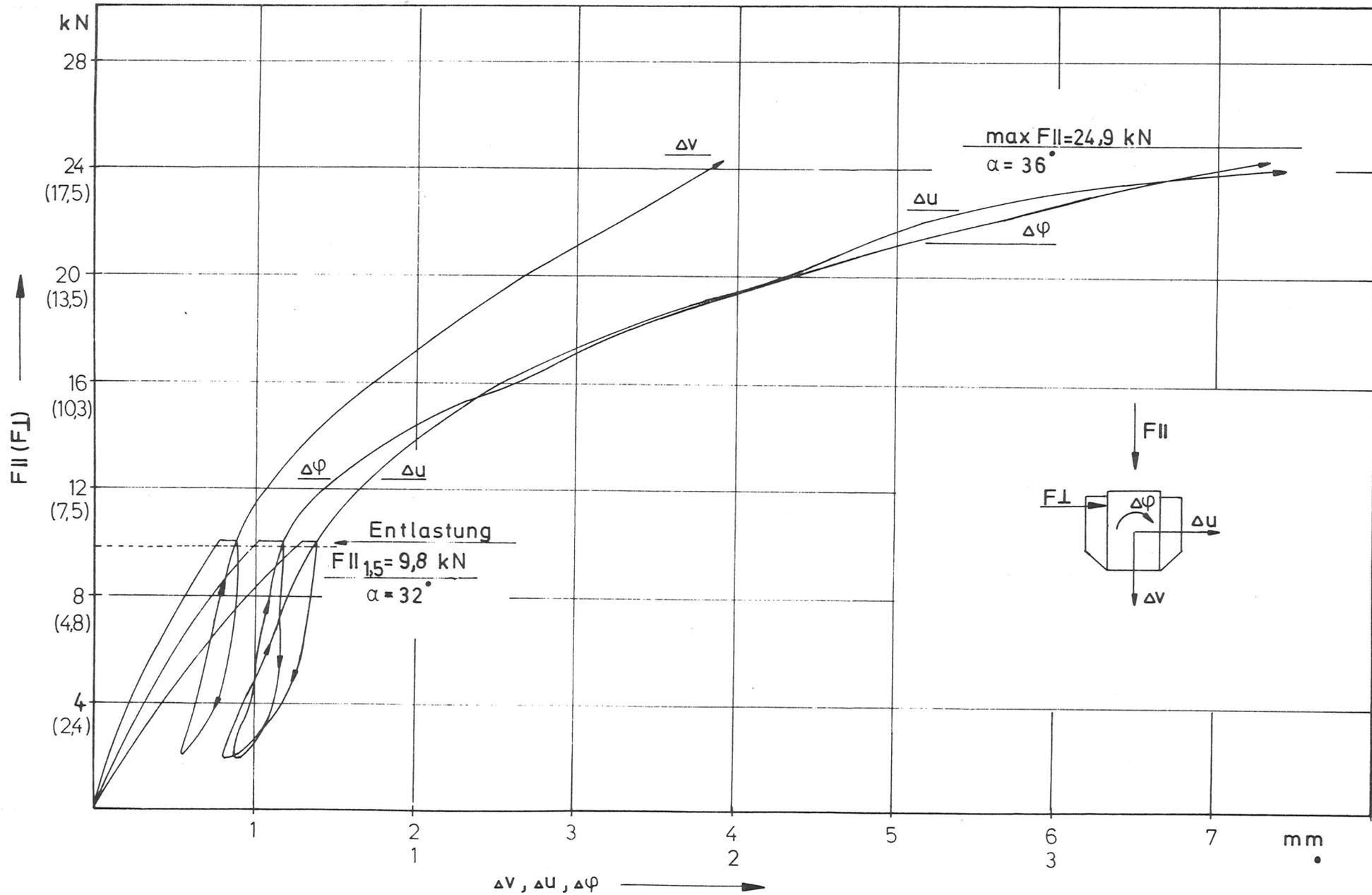


Bild 10: Last - Verformungsdiagramm , Versuch 1.30.3

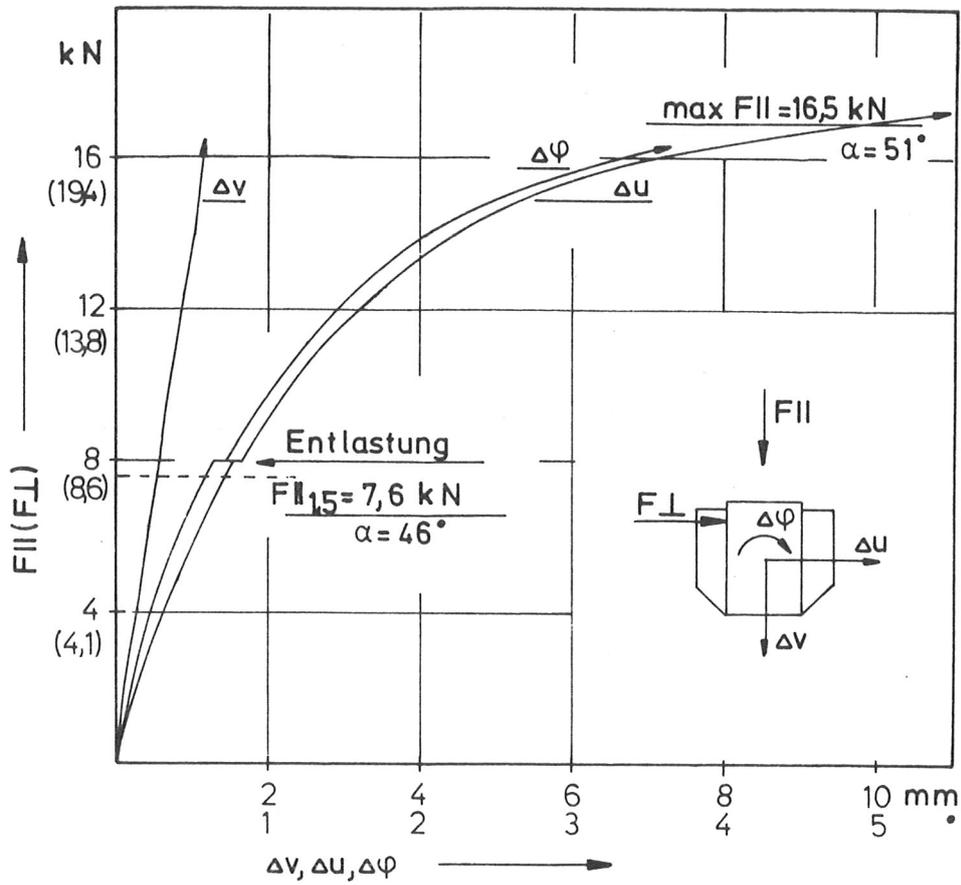


Bild 11: Last-Verformungsdiagramm , Versuch 1.45.1

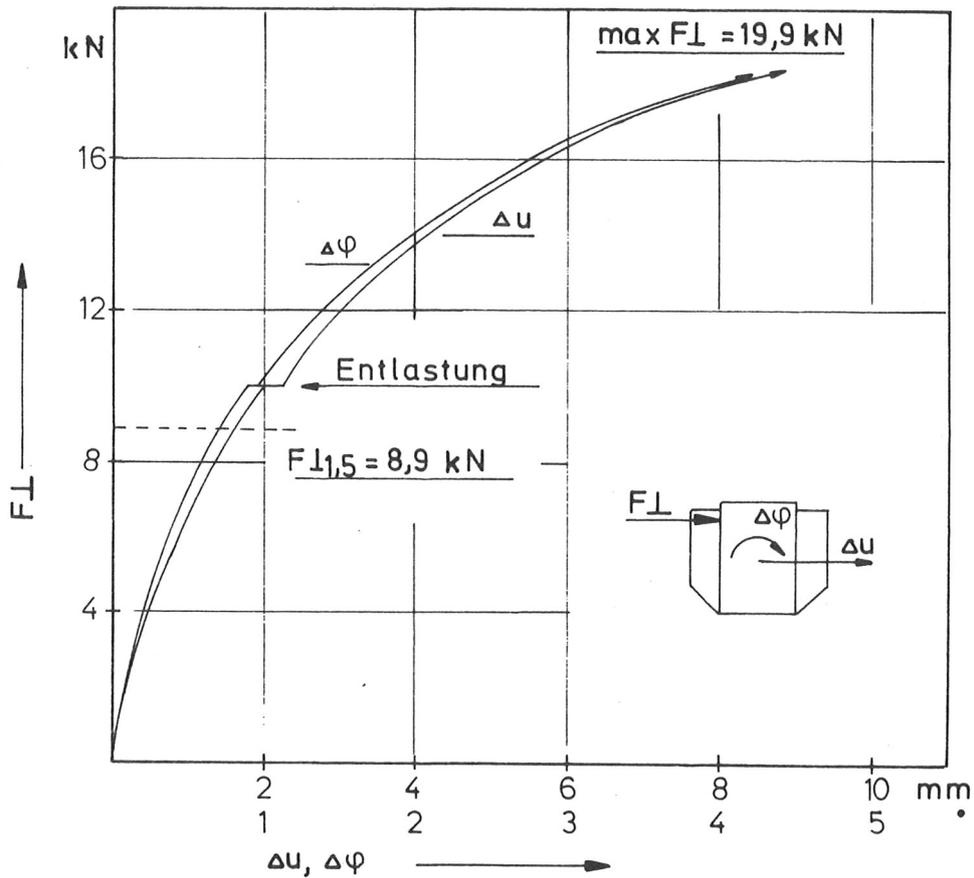


Bild 12: Last-Verformungsdiagramm , Versuch 1.90.1

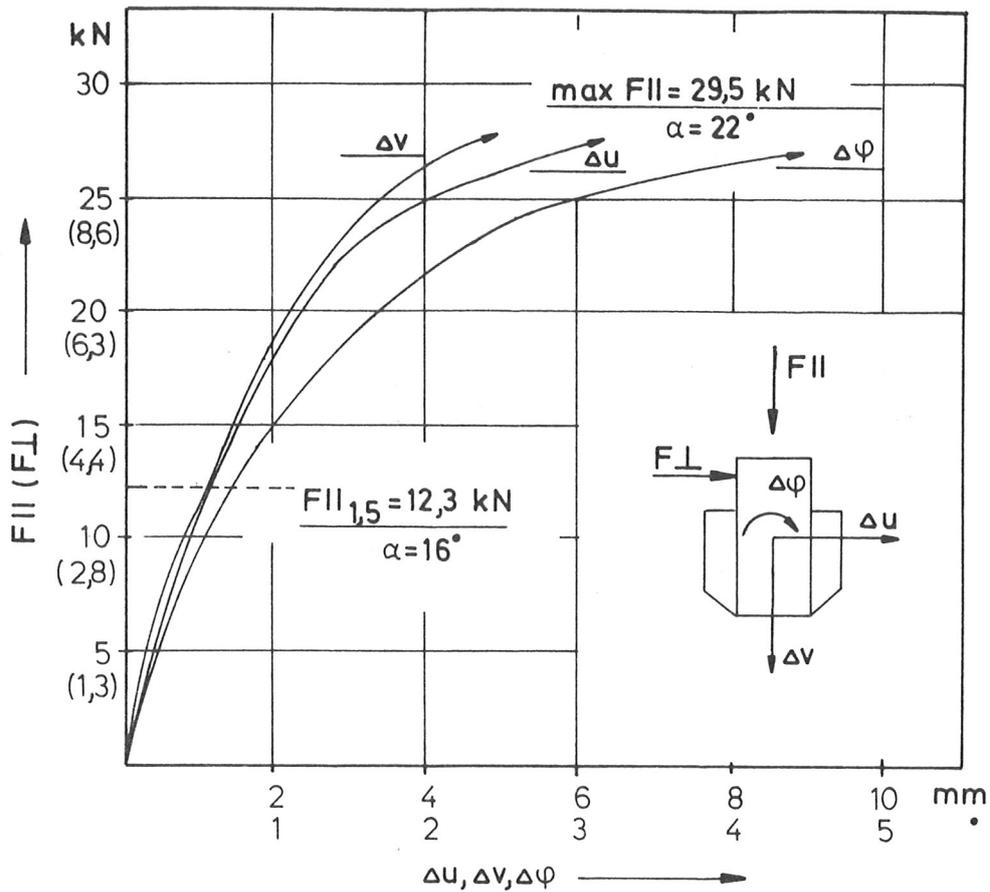


Bild 13: Last - Verformungsdiagramm , Versuch 2.15.1

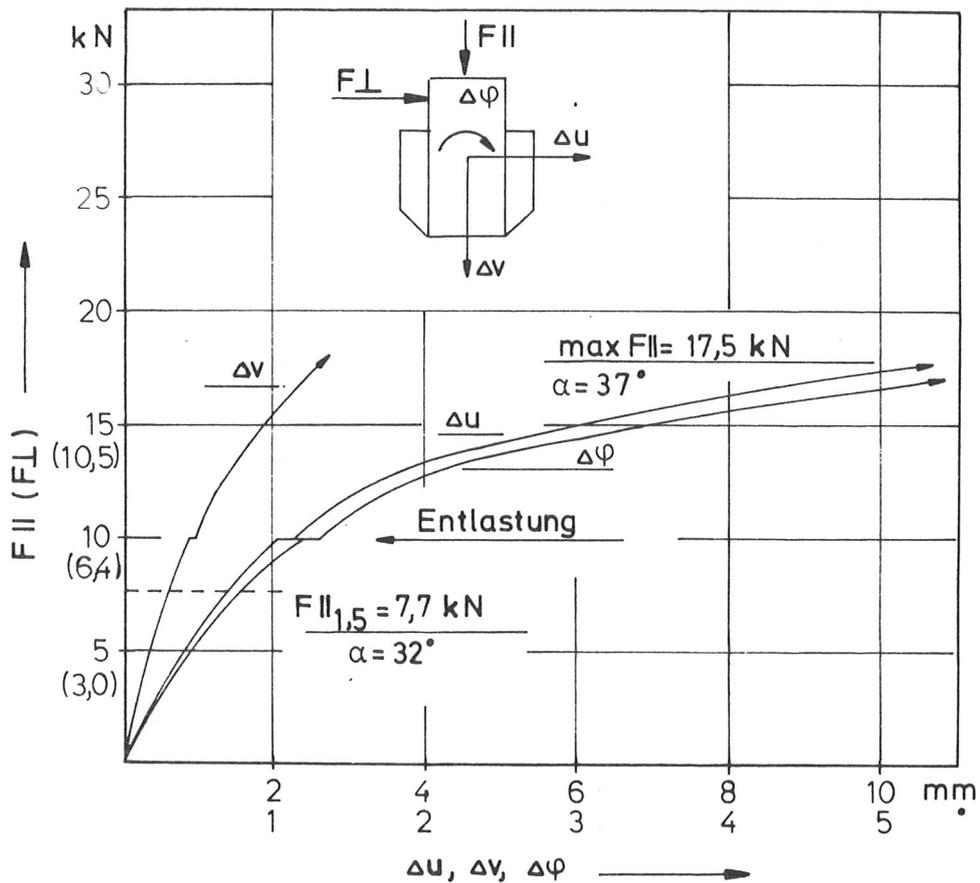


Bild 14: Last - Verformungsdiagramm , Versuch 2.30.1

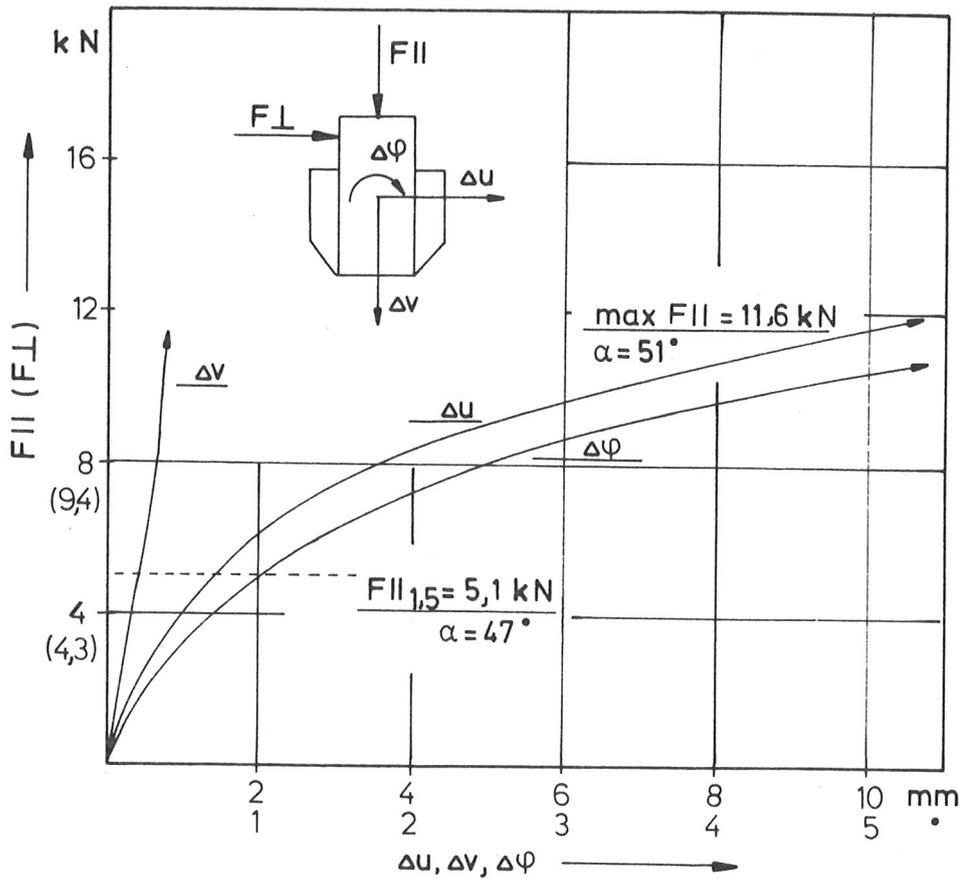


Bild 15: Last - Verformungsdiagramm , Versuch 2.45.3

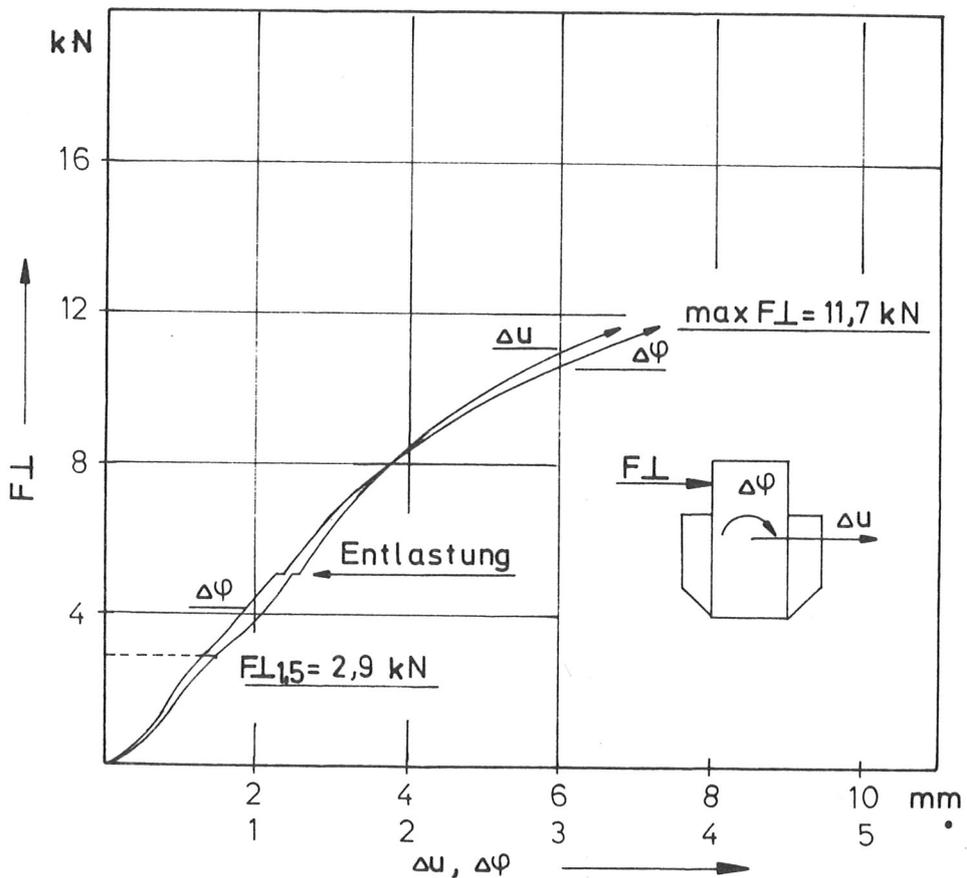


Bild 16: Last - Verformungsdiagramm , Versuch 2.90.1

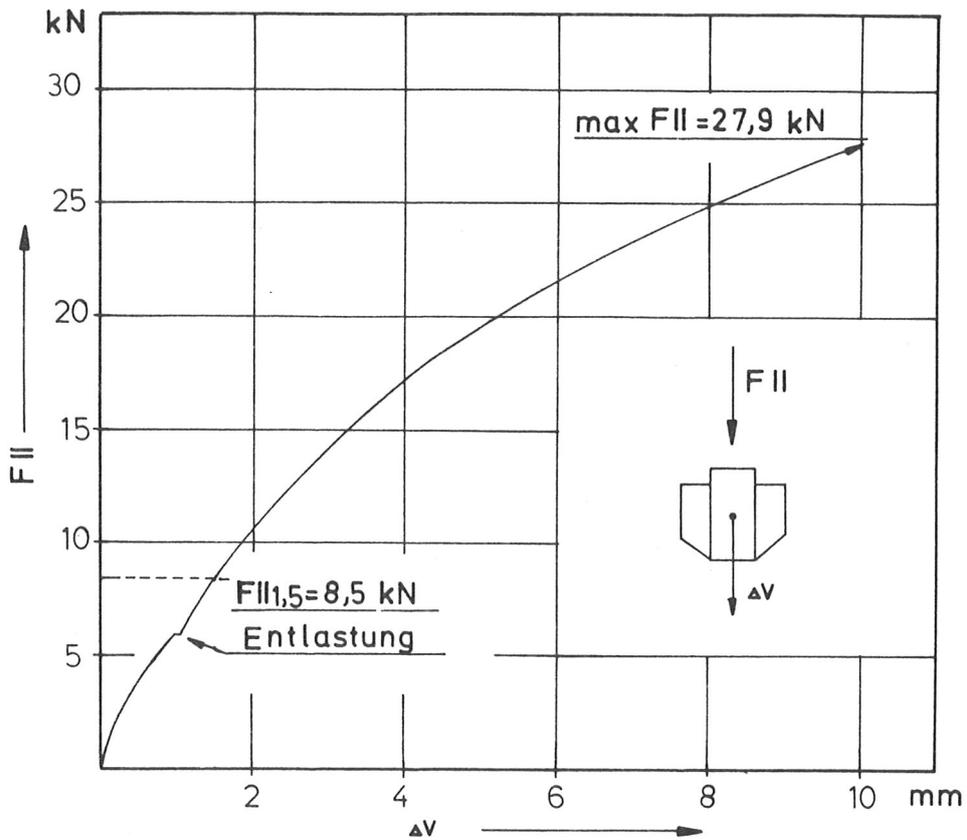


Bild 17: Last - Verformungsdiagramm , Versuch 3.0.5

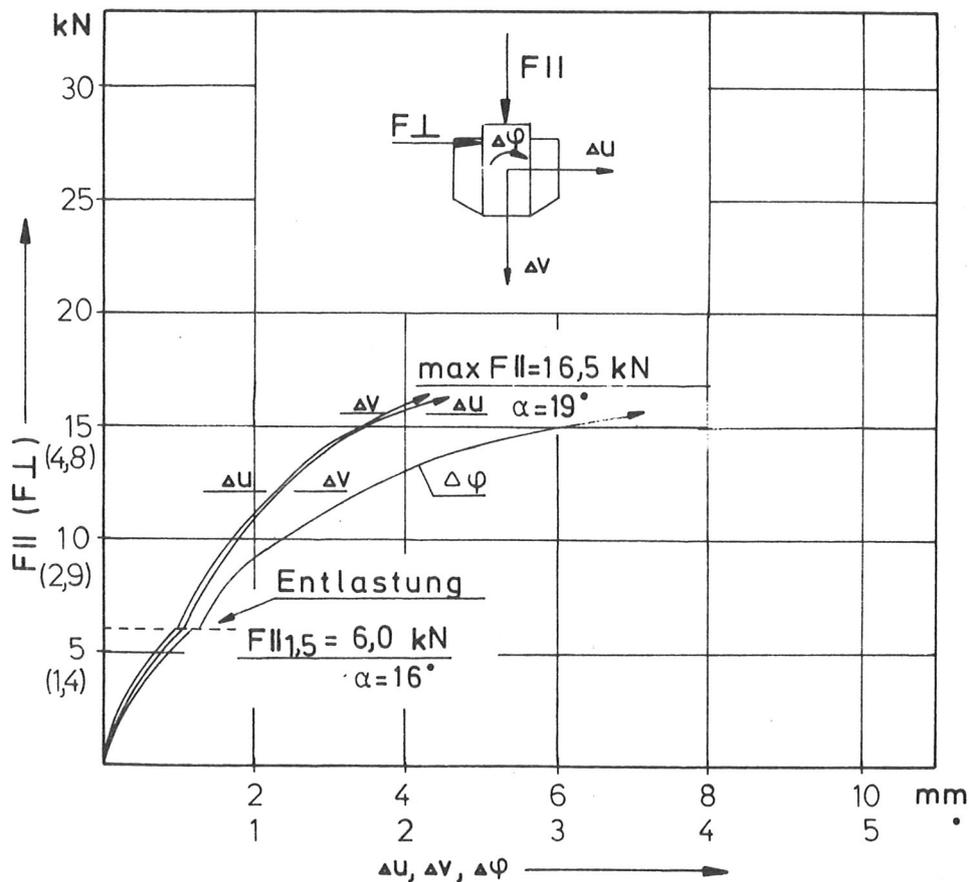


Bild 18: Last - Verformungsdiagramm , Versuch 3.15.3

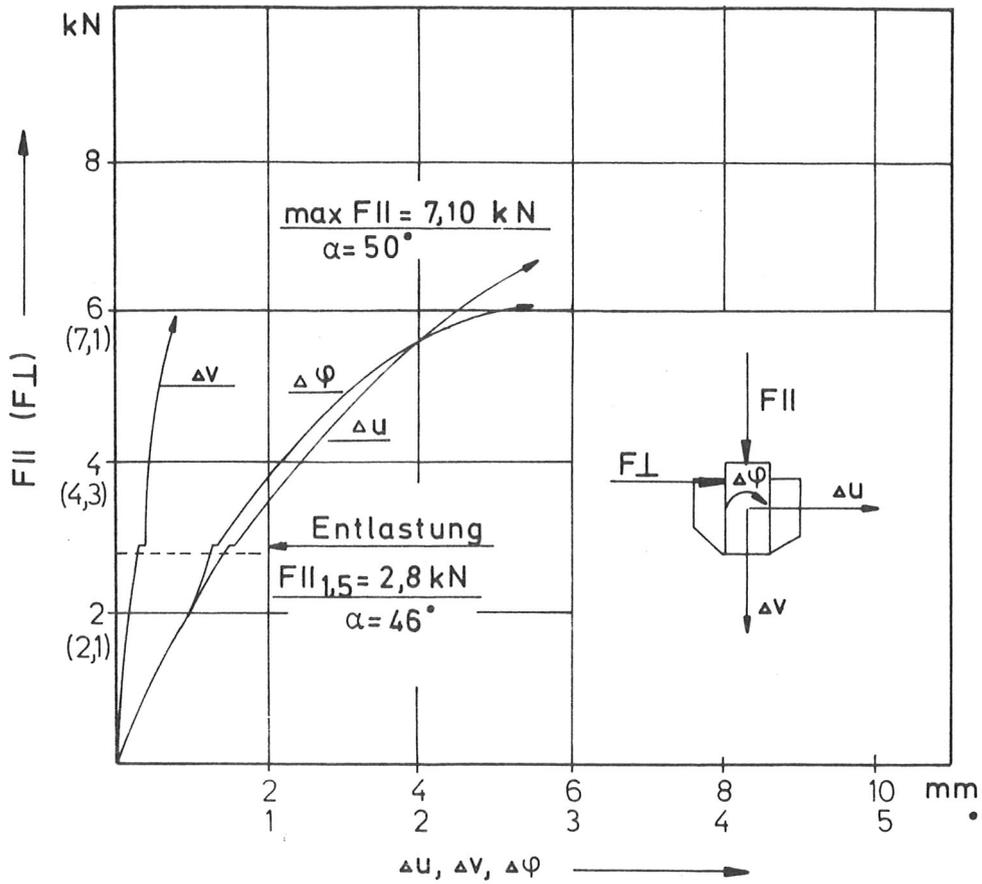


Bild 19: Last - Verformungsdiagramm , Versuch 3.45.2

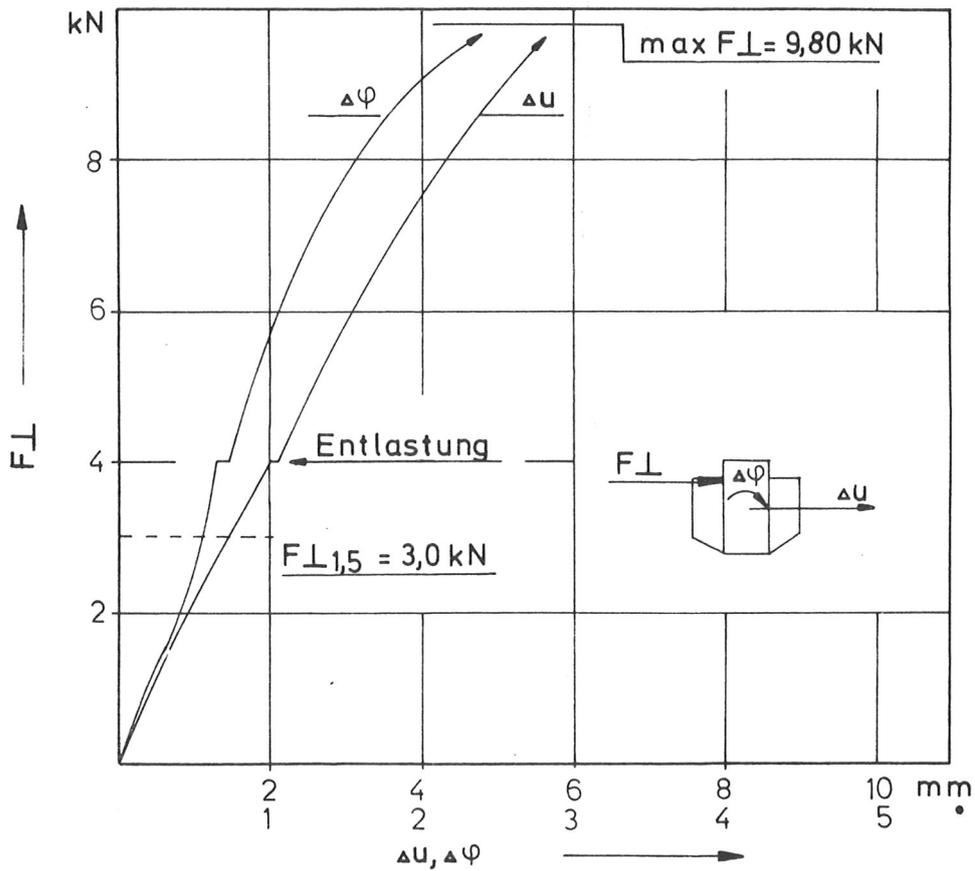


Bild 20: Last - Verformungsdiagramm , Versuch 3.90.2

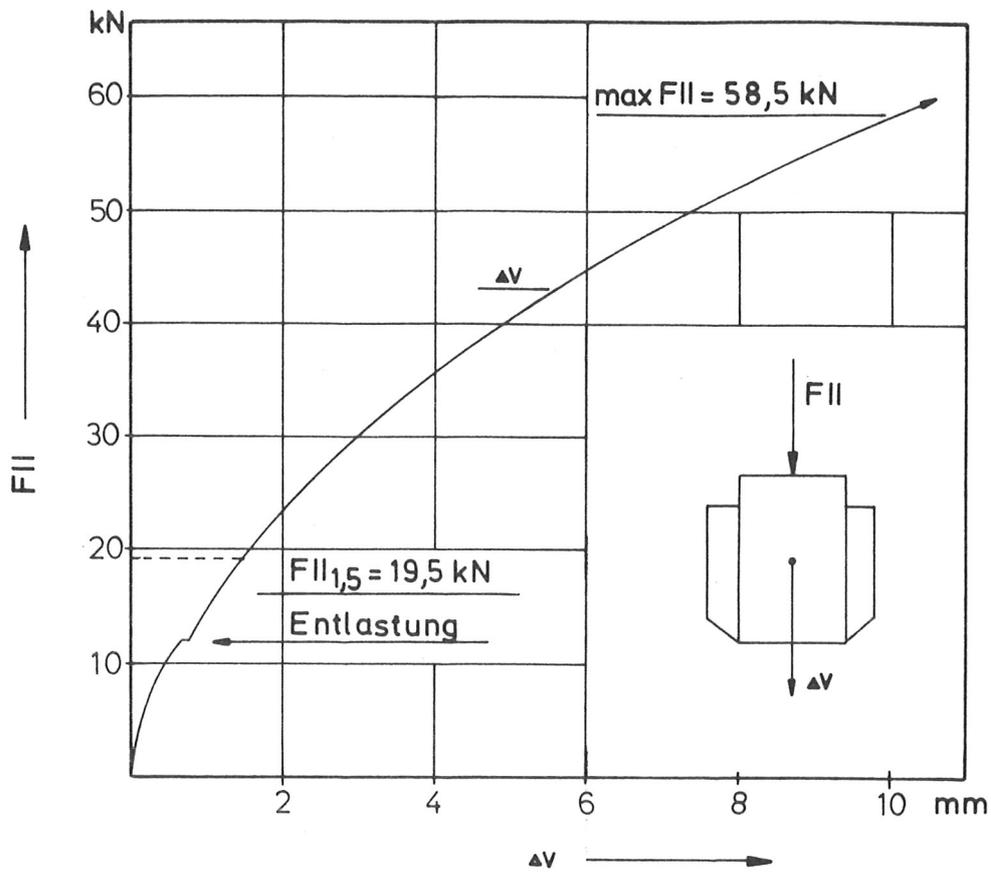


Bild 21: Last - Verformungsdiagramm , Versuch 4.0.5

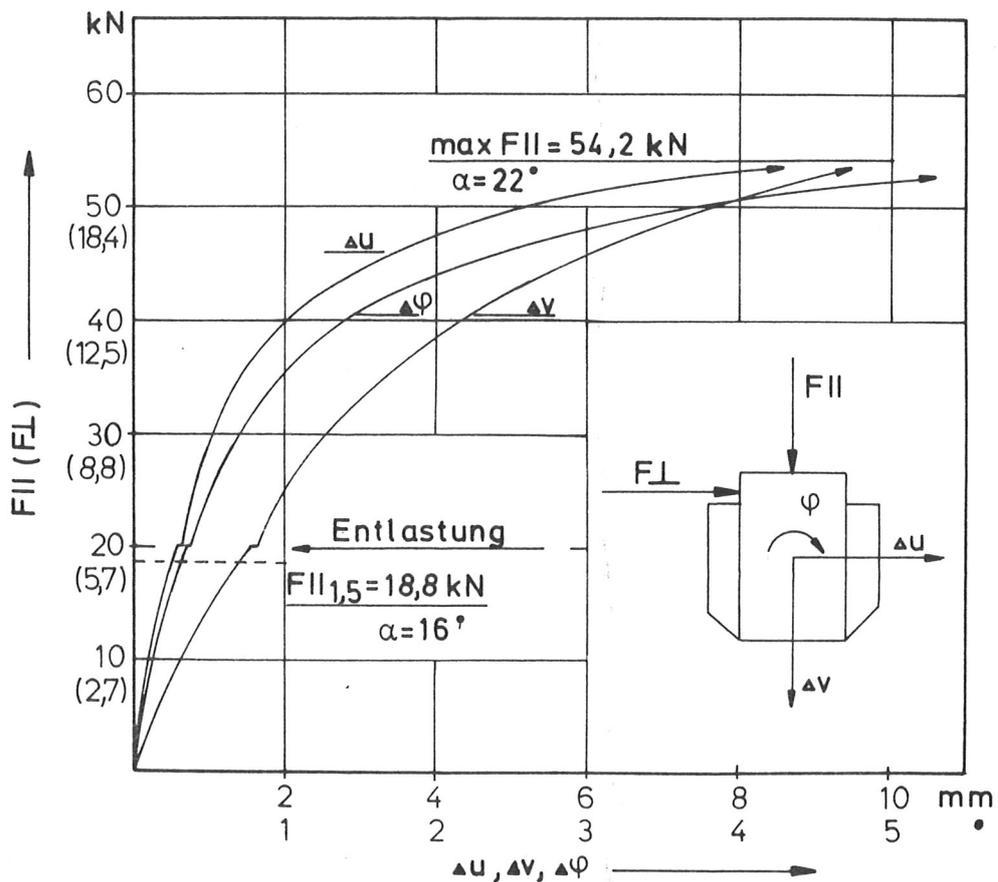


Bild 22: Last - Verformungsdiagramm , Versuch 4.15.2

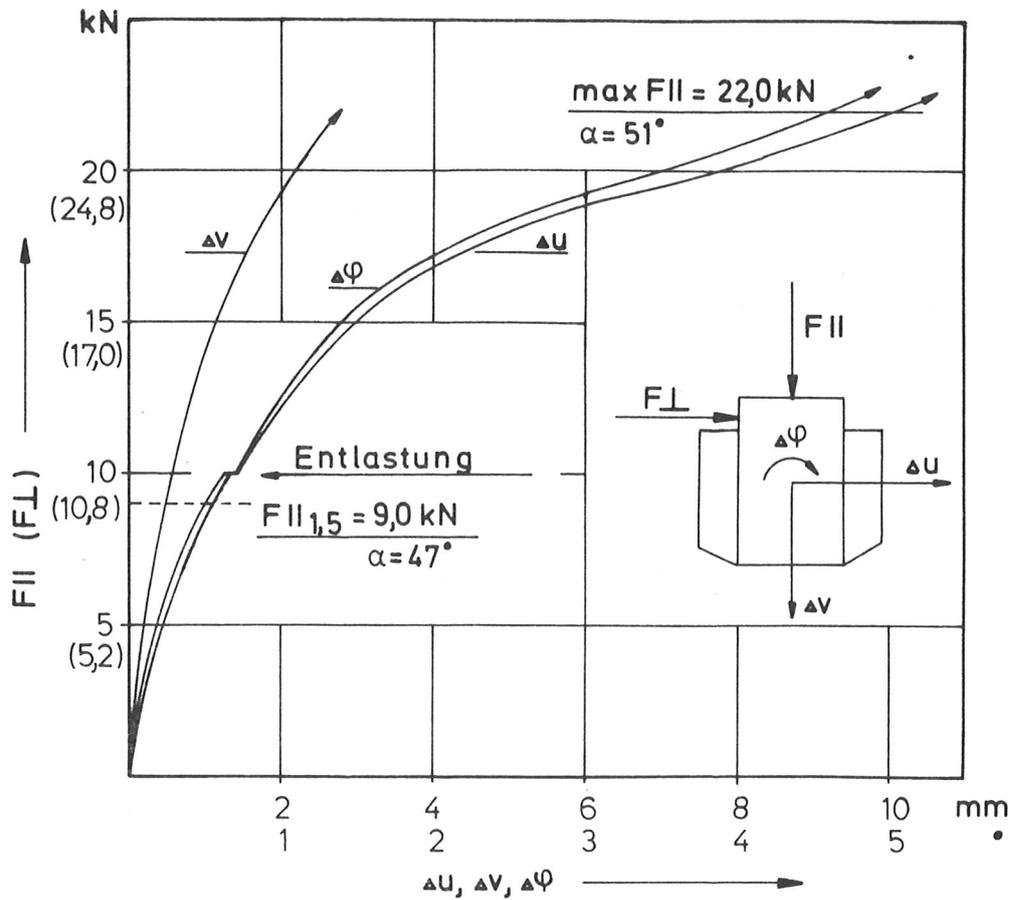


Bild 23: Last - Verformungsdiagramm , Versuch 4.45.3

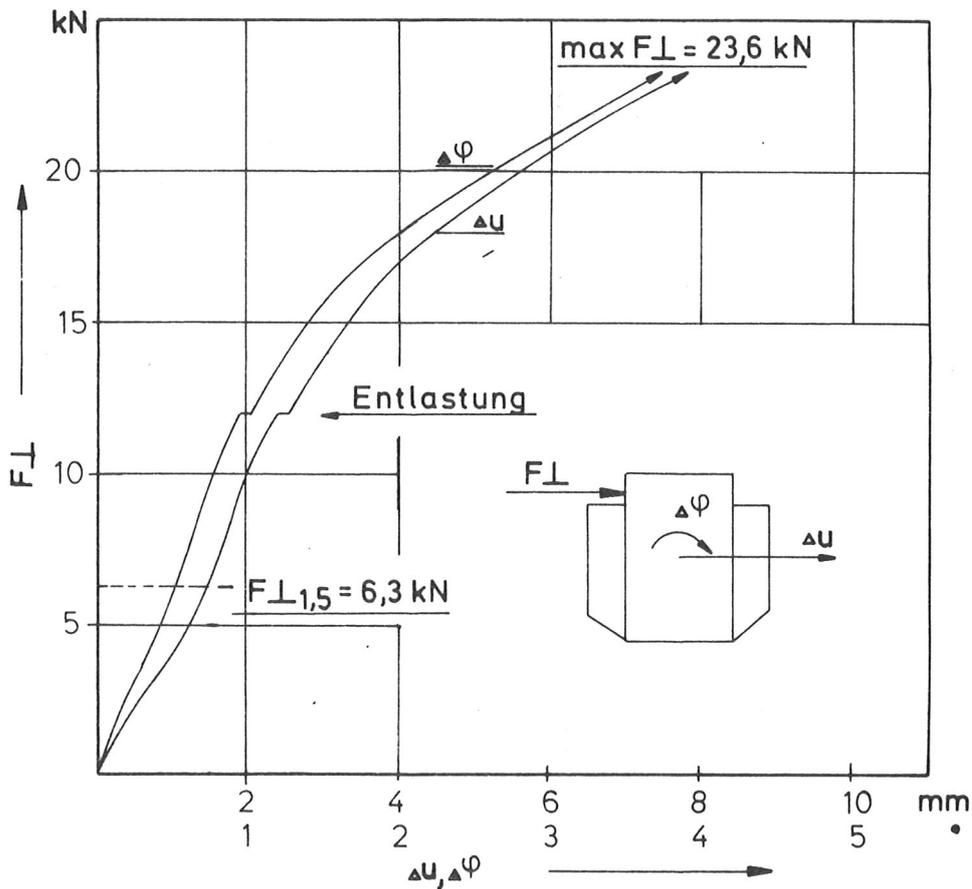


Bild 24: Last - Verformungsdiagramm , Versuch 4.90.2

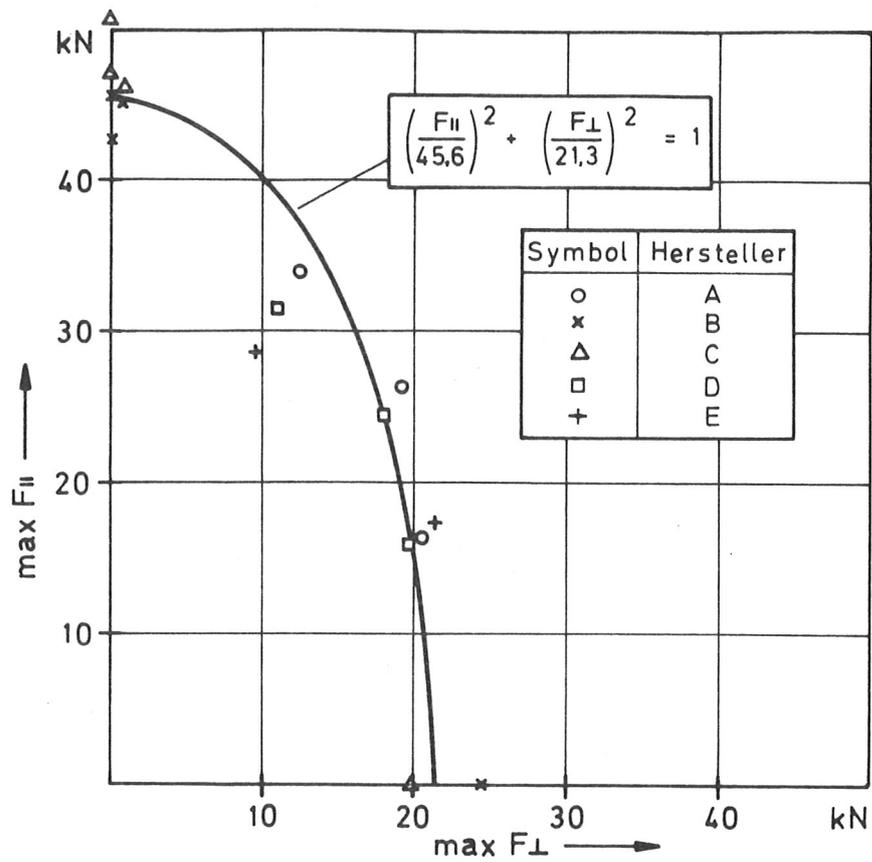


Bild 25: Zusammenhang zwischen  $\max F_{II}$  und  $\max F_{\perp}$  der Versuchsreihe 1 (Balkenschuh 100 x 140),  $H_N = 150$  mm)

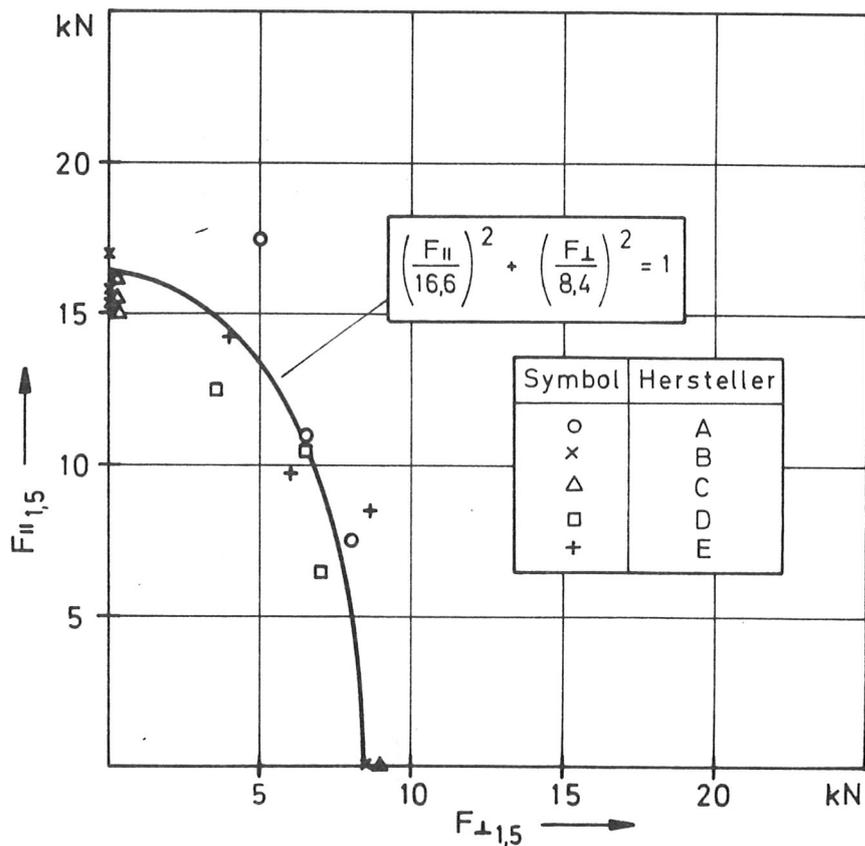


Bild 26: Zusammenhang zwischen  $F_{II,1,5}$  und  $F_{\perp,1,5}$  der Versuchsreihe 1 (Balkenschuh 100 x 140),  $H_N = 150$  mm)

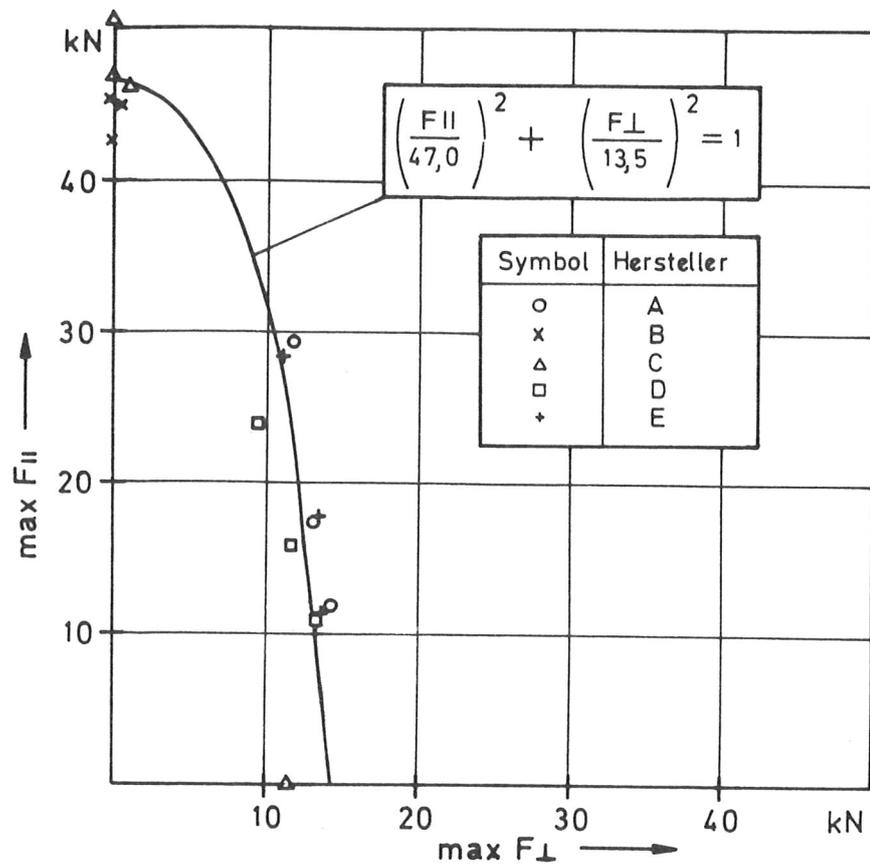


Bild 27: Zusammenhang zwischen  $\max F_{II}$  und  $\max F_{\perp}$  der Versuchsreihe 2 (Balkenschuh 100 x 140,  $H_N = 210$  mm)

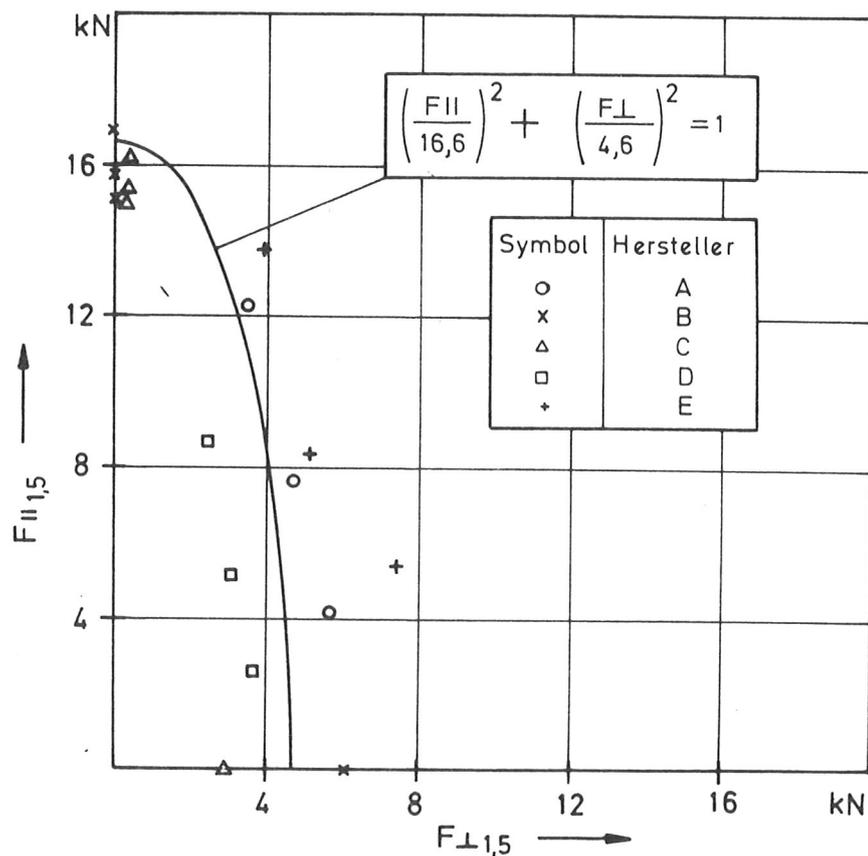
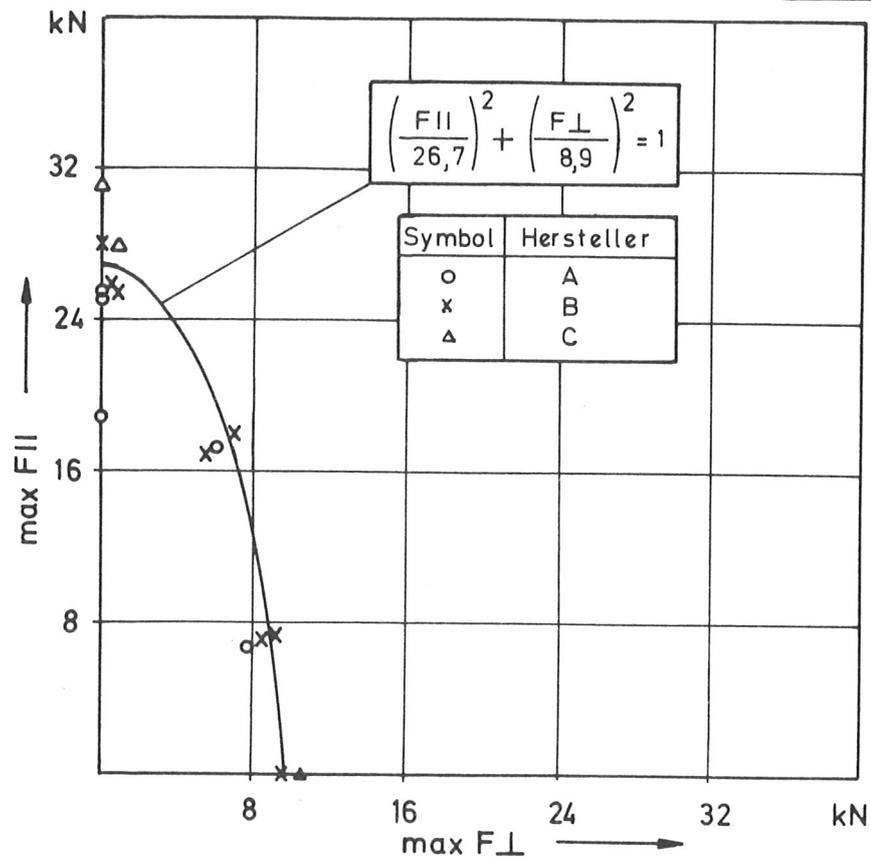
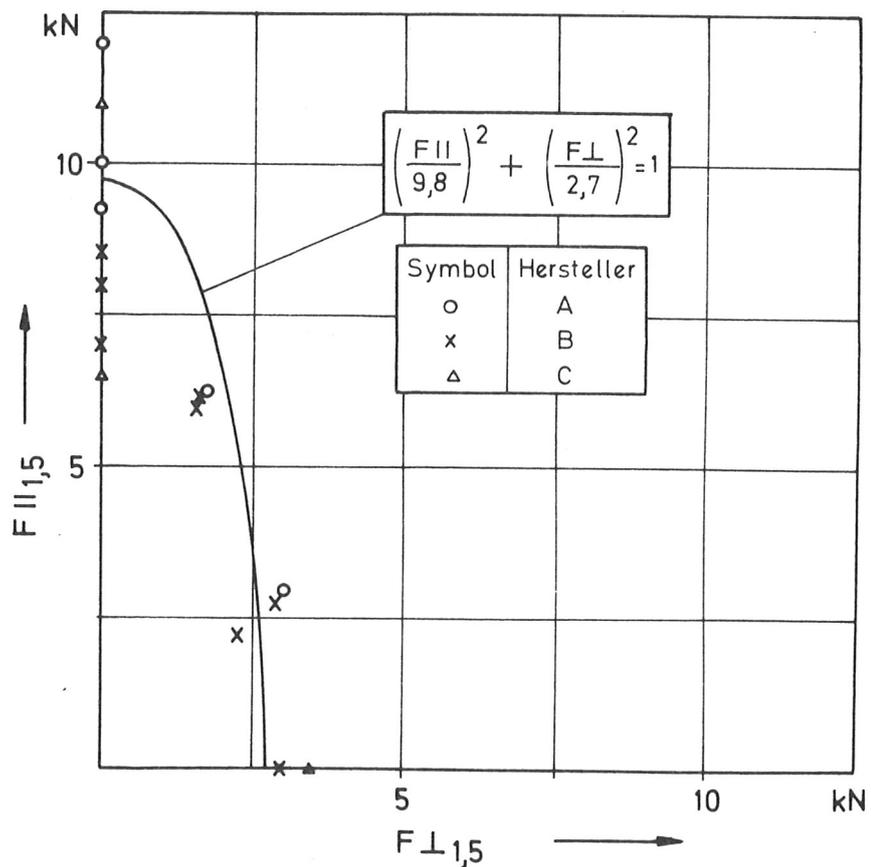


Bild 28: Zusammenhang zwischen  $F_{II,15}$  und  $F_{\perp,15}$  der Versuchsreihe 2 (Balkenschuh 100 x 140,  $H_N = 210$  mm)



**Bild 29:** Zusammenhang zwischen max F<sub>||</sub> und max F<sub>⊥</sub> der Versuchsreihe 3 (Balkenschuh 60x100, H<sub>N</sub> = 120 mm)



**Bild 30:** Zusammenhang zwischen F<sub>||,5</sub> und F<sub>⊥,5</sub> der Versuchsreihe 3 (Balkenschuh 60x100, H<sub>N</sub> = 120 mm)

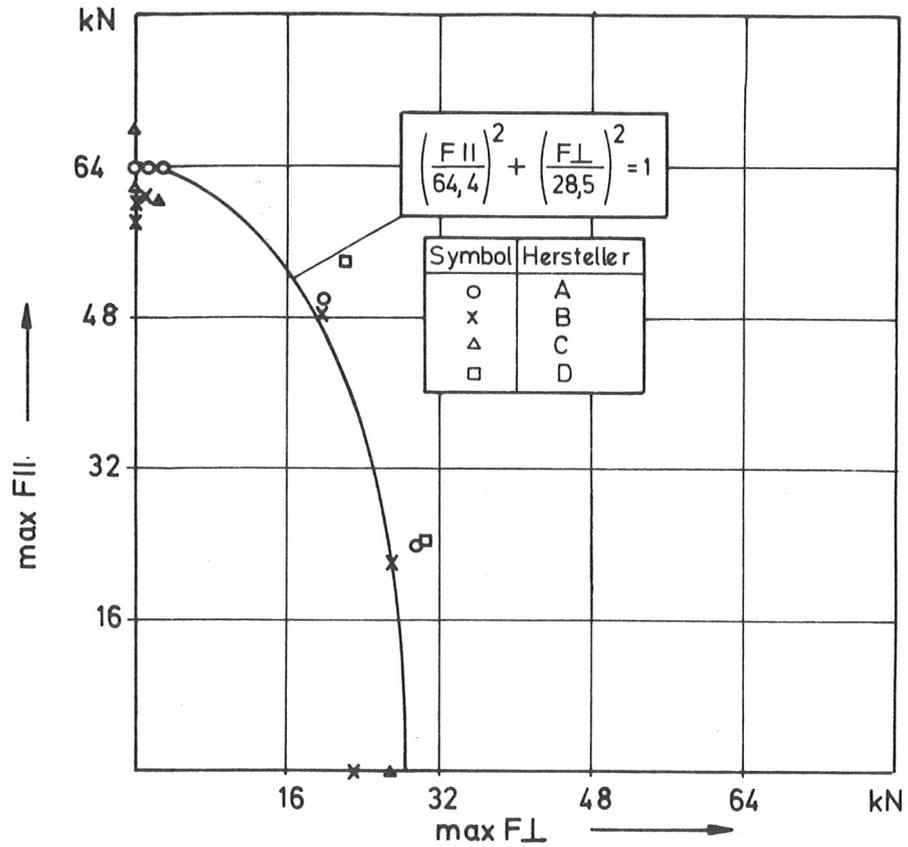


Bild 31: Zusammenhang zwischen  $\max F_{||}$  und  $\max F_{\perp}$  der Versuchsreihe 4 (Balkenschuh 140 x 180,  $H_N = 220$  mm)

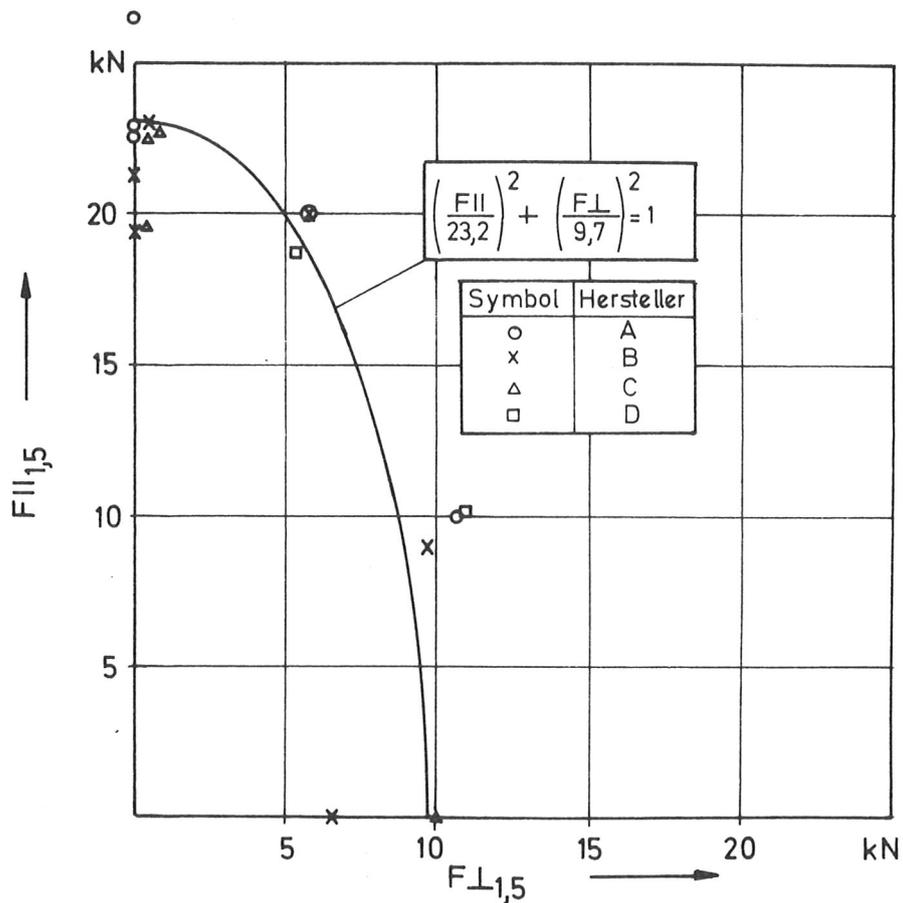


Bild 32: Zusammenhang zwischen  $F_{||,15}$  und  $F_{\perp,15}$  der Versuchsreihe 4 (Balkenschuh 140 x 180,  $H_N = 220$  mm)

Tabelle 7: Zusammenstellung der Regressionsgleichungen zur Beschreibung des Tragverhaltens der Balkenschuhanschlüsse

Versuchsreihe	Balkenschuh B x H	$H_N/H$	max $F_{\parallel}$ [kN]	max $F_{\perp}$ [kN]	$\frac{\max F_{\parallel}}{\max F_{\perp}}$	$F_{\parallel 1,5}$ [kN]	$F_{\perp 1,5}$ [kN]	$\frac{F_{\parallel 1,5}}{F_{\perp 1,5}}$
1	100 x 140	1,07	45,6	21,3	2,1	16,6	8,4	2,0
2	100 x 140	1,5	47,0	13,5	3,5	16,6	4,6	3,6
3	60 x 100	1,2	26,7	8,9	3,0	9,8	2,7	3,6
4	140 x 180	1,2	64,4	28,5	2,3	23,2	9,7	2,4

### Regressionsgleichungen

$$a) \left( \frac{F_{\parallel}}{\max F_{\parallel}} \right)^2 + \left( \frac{F_{\perp}}{\max F_{\perp}} \right)^2 = 1$$

$$b) \left( \frac{F_{\parallel}}{F_{\parallel 1,5}} \right)^2 + \left( \frac{F_{\perp}}{F_{\perp 1,5}} \right)^2 = 1$$

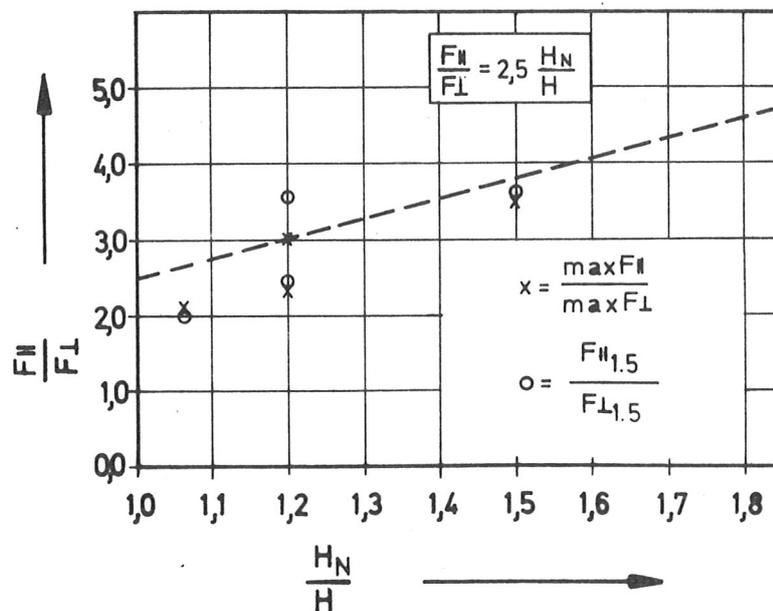


Bild 33: Zusammenhang zwischen dem Quotienten  $\frac{F_{\parallel}}{F_{\perp}}$  und  $\frac{H_N}{H}$

Tabelle 8: Vergleich der Versuchsergebnisse mit der zulässigen Belastung nach Gl. (6.6) (Reihe 1)

Versuch Nr.	$H_N/H$	$\alpha_1$ [°]	$\max F_\alpha$ [kN]	$\alpha_2$ [°]	$F_{1,5}$ [kN]	zul $F_{  }$ [kN]	zul $F_{\alpha_1}$ [kN]	zul $F_{\alpha_2}$ [kN]	$\frac{\max F_\alpha}{\text{zul } F_{\alpha_1}}$	$\frac{F_{1,5}}{\text{zul } F_{\alpha_2}}$
1. 0.1	1,07	0	45,6	0	15,8	9,0	9,0	9,0	5,1	1,8
1. 0.2	1,07	0	42,7	0	15,2	9,0	9,0	9,0	4,7	1,7
1. 0.3	1,07	0	45,2	0	17,0	9,0	9,0	9,0	5,0	1,9
1. 0.4	1,07	0	47,0	0	15,4	10,5	10,5	10,5	4,5	1,5
1. 0.5	1,07	0	46,0	0	15,0	10,5	10,5	10,5	4,4	1,4
1. 0.6	1,07	0	50,9	0	16,2	10,5	10,5	10,5	4,8	1,5
1.15.1	1,07	20	36,2	16	18,4	9,0	6,9	7,4	5,2	2,5
1.15.2	1,07	19	33,2	16	13,1	7,5	5,8	6,2	5,7	2,1
1.15.3	1,07	18	30,2	16	14,8	9,0	7,1	7,4	4,3	2,0
1.30.1	1,07	36	32,6	31	12,7	9,0	5,1	5,5	6,4	2,3
1.30.2	1,07	36	30,4	32	12,5	7,5	4,2	4,5	7,2	2,8
1.30.3	1,07	36	30,8	32	11,6	9,0	5,1	5,4	6,0	2,1
1.45.1	1,07	51	26,2	46	10,9	9,0	4,1	4,4	6,4	2,5
1.45.2	1,07	51	25,4	47	9,5	7,5	3,5	3,6	7,3	2,6
1.45.3	1,07	51	27,8	46	12,1	9,0	4,1	4,4	6,8	2,8
1.90.1	1,07	90	19,9	90	8,9	10,5	3,9	3,9	5,1	2,3
1.90.2	1,07	90	24,6	90	8,5	9,0	3,4	3,4	7,2	2,5

Tabelle 9: Vergleich der Versuchsergebnisse mit der zulässigen Belastung nach Gl. (6.6) (Reihe 2)

Versuch Nr.	$H_N/H$	$\alpha_1$ [°]	max $F_\alpha$ [kN]	$\alpha_2$ [°]	$F_{1,5}$ [kN]	zul $F_{  }$ [kN]	zul $F_{\alpha_1}$ [kN]	zul $F_{\alpha_2}$ [kN]	$\frac{\max F_\alpha}{\text{zul } F_{\alpha_1}}$	$\frac{F_{1,5}}{\text{zul } F_{\alpha_2}}$
2.15.1	1,5	22	31,8	16	12,8	9,0	5,3	6,4	6,0	2,0
2.15.2	1,5	22	25,9	16	9,1	7,5	4,5	5,3	5,8	1,7
2.15.3	1,5	22	31,0	16	14,4	9,0	5,3	6,4	5,8	2,3
2.30.1	1,5	37	21,9	32	9,1	9,0	3,8	4,2	5,8	2,2
2.30.2	1,5	37	19,7	31	6,1	7,5	3,1	3,5	6,4	1,7
2.30.3	1,5	37	22,3	32	9,9	9,0	3,8	4,2	5,9	2,4
2.45.1	1,5	51	18,8	47	5,7	9,0	3,0	3,2	6,3	1,8
2.45.2	1,5	51	17,5	46	3,7	7,5	2,5	2,7	7,0	1,4
2.45.3	1,5	51	18,4	47	7,5	9,0	3,0	3,2	6,1	2,3
2.90.1	1,5	90	11,7	90	2,9	10,5	2,8	2,8	4,2	1,0
2.90.2	1,5	90	11,8	90	6,1	9,0	2,4	2,4	4,9	2,5

Tabelle 10: Vergleich der Versuchsergebnisse mit der zulässigen Belastung nach Gl. (6.6) (Reihe 3)

Versuch Nr.	$H_N/H$	$\alpha_1$ [°]	$\max F_\alpha$ [kN]	$\alpha_2$ [°]	$F_{1,5}$ [kN]	zul $F_{  }$ [kN]	zul $F_{\alpha_1}$ [kN]	zul $F_{\alpha_2}$ [kN]	$\frac{\max F_\alpha}{\text{zul } F_{\alpha_1}}$	$\frac{F_{1,5}}{\text{zul } F_{\alpha_2}}$
3. 0.1	1,2	0	25,3	0	12,0	6,0	6,0	6,0	4,2	2,0
3. 0.2	1,2	0	19,0	0	9,2	6,0	6,0	6,0	3,2	1,5
3. 0.3	1,2	0	25,8	0	10,0	6,0	6,0	6,0	4,3	1,7
3. 0.4	1,2	0	25,5	0	7,0	6,0	6,0	6,0	4,3	1,2
3. 0.5	1,2	0	27,9	0	8,5	6,0	6,0	6,0	4,7	1,4
3. 0.6	1,2	0	26,2	0	8,0	6,0	6,0	6,0	4,4	1,3
3. 0.7	1,2	0	28,0	0	6,5	7,5	7,5	7,5	3,7	0,9
3. 0.8	1,2	0	31,0	0	11,0	7,5	7,5	7,5	4,1	1,5
3.15.1	1,2	20	17,8	16	6,7	6,0	4,3	4,7	4,1	1,4
3.15.2	1,2	20	19,0	16	6,4	6,0	4,3	4,7	4,4	1,4
3.15.3	1,2	19	17,5	16	6,2	6,0	4,4	4,7	4,0	1,3
3.45.1	1,2	49	10,4	46	4,3	6,0	2,5	2,6	4,2	1,7
3.45.2	1,2	50	11,0	46	4,0	6,0	2,5	2,6	4,4	1,5
3.45.3	1,2	51	12,1	46	3,3	6,0	2,5	2,6	4,8	1,3
3.90.1	1,2	90	10,6	90	3,4	7,5	2,5	2,5	4,2	1,4
3.90.2	1,2	90	9,8	90	3,0	6,0	2,0	2,0	4,9	1,5

Tabelle 11: Vergleich der Versuchsergebnisse mit der zulässigen Belastung nach Gl. (6.6) (Reihe 4)

Versuch Nr.	$H_N/H$	$\alpha_1$ [°]	max $F_\alpha$ [kN]	$\alpha_2$ [°]	$F_{1,5}$ [kN]	zul $F_{  }$ [kN]	zul $F_{\alpha_1}$ [kN]	zul $F_{\alpha_2}$ [kN]	$\frac{\max F_\alpha}{\text{zul } F_{\alpha_1}}$	$\frac{F_{1,5}}{\text{zul } F_{\alpha_2}}$
4. 0.1	1,2	0	64,0	0	24,2	12,0	12,0	12,0	5,3	2,0
4. 0.2	1,2	0	64,3	0	22,3	12,0	12,0	12,0	5,4	1,9
4. 0.3	1,2	0	64,2	0	26,5	12,0	12,0	12,0	5,4	2,2
4. 0.4	1,2	0	60,2	0	22,8	12,0	12,0	12,0	5,0	1,9
4. 0.5	1,2	0	58,5	0	19,5	12,0	12,0	12,0	4,9	1,6
4. 0.6	1,2	0	61,5	0	21,2	12,0	12,0	12,0	5,1	1,8
4. 0.7	1,2	0	62,6	0	22,4	13,5	13,5	13,5	4,6	1,7
4. 0.8	1,2	0	61,1	0	19,7	13,5	13,5	13,5	4,5	1,5
4. 0.9	1,2	0	68,5	0	22,7	13,5	13,5	13,5	5,1	1,7
4.15.1	1,2	22	53,7	16	20,8	12,0	8,2	9,5	6,5	2,2
4.15.2	1,2	22	58,5	16	19,6	10,5	7,2	8,3	8,1	2,4
4.15.3	1,2	22	52,7	16	20,8	12,0	8,2	9,5	6,4	2,2
4.45.1	1,2	51	37,3	47	14,4	12,0	5,0	5,2	7,5	2,8
4.45.2	1,2	51	37,8	47	14,8	10,5	4,3	4,6	8,8	3,2
4.45.3	1,2	51	35,0	47	13,2	12,0	5,0	5,2	7,0	2,5
4.90.1	1,2	90	27,3	90	9,9	13,5	4,5	4,5	6,1	2,2
4.90.2	1,2	90	23,6	90	6,3	12,0	4,0	4,0	5,9	1,6

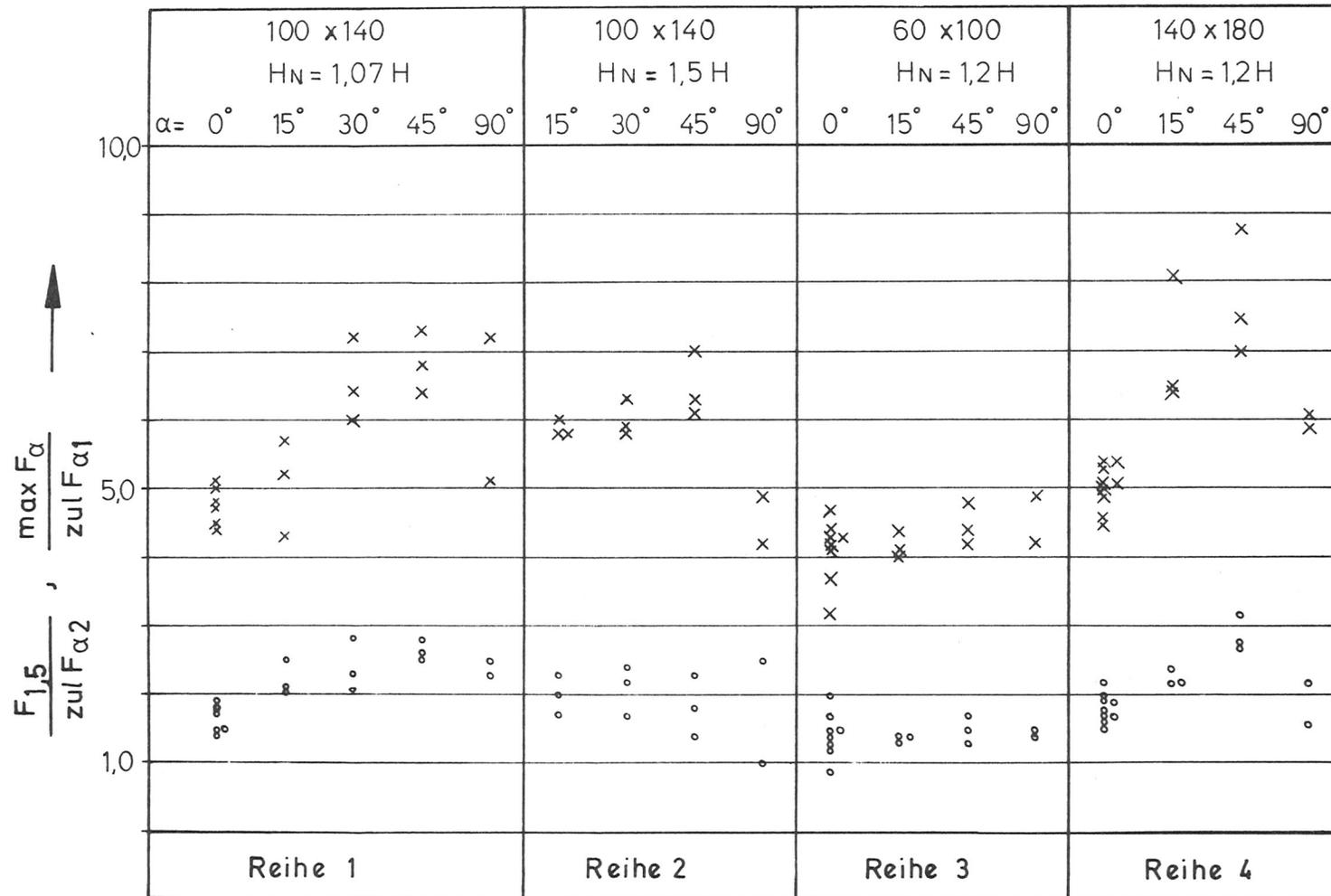


Bild 34: Quotienten  $\frac{\max F_\alpha}{\text{zul } F_{\alpha 1}}$  und  $\frac{F_{1,5}}{\text{zul } F_{\alpha 2}}$  sämtlicher Versuche