

**ENTWICKLUNG UND PRÜFUNG NEUER VERBINDUNGSMITTEL AUS HARTHOLZ,
PRESSSCHICHTHOLZ UND ÄHNLICHEN HOLZHALTIGEN WERKSTOFFEN
FÜR TRAGENDE VERBINDUNGEN IM HOLZBAU**

Teil 2: Tragfähigkeits- und Verformungsverhalten von Verbindungen

A: Brettschichtholzverbindungen mit Stabdübeln
aus Kunstharzpreßholz

von

Jürgen Ehlbeck und Otto Eberhart

Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine
Abt. Ingenieurholzbau
Universität Fridericiana Karlsruhe
Univ.-Professor Dr.-Ing. Jürgen Ehlbeck
1989

VORWORT

Auf der Grundlage früherer Untersuchungen, nach denen Kunstharzpreßholz über mechanische Eigenschaften verfügt, die die Verwendung als Verbindungsmittel im Holzbau geeignet erscheinen ließen, wurden tragende Verbindungen von Brettschichtholzteilen mit Stabdübeln aus Kunstharzpreßholz untersucht. Dieses Forschungsprojekt hat nachgewiesen, daß die üblichen Theorien zur Beschreibung der Tragfähigkeit von Stabdübelverbindungen anwendbar sind, aber hinsichtlich einer weiteren möglichen Versagensart sowie des für spröde Werkstoffe im Vergleich zu Stabdübeln aus Stahl veränderten Stoffgesetzes modifiziert werden sollten.

Diese Arbeit entstand mit finanzieller Unterstützung des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau (Gesch.-Z. B I 6-80 01 86-7). Den Firmen Otto Bosse GmbH & Co KG in Stadthagen und Röchling Haren KG in Haren/Ems ist für die beratende Mitarbeit bei der Auswahl der untersuchten Stabdübel aus Kunstharzpreßschichtholz zu danken.

Die Untersuchungen wurden von Herrn Dipl.-Ing. O.Eberhart geleitet. Im Labor war für die Versuchsdurchführung und die Herstellung der Versuchskörper Herr G.Köhler verantwortlich. Bei den Auswertungen haben unsere Studenten, die Herren cand.ing. P.Schuler, cand.ing. R.Dinort, cand.ing. M.Steuerwald und Frau cand.ing. I.Wetzel tatkräftig mitgewirkt.

Allen Beteiligten ist für die Mitarbeit zu danken.

Jürgen Ehlbeck

INHALT

1	Ziel des Forschungsvorhabens	1
2	Auswertung des Schrifttums	3
3	Entwicklung einer theoretischen Tragfähigkeitshypothese	5
3.1	Theorie von Johansen, Moeller und Meyer	6
3.2	Diskussion und Erweiterung der Theorie	9
4	Biegeversuche an Stiften aus Kunstharzpressholz (KPH)	11
4.1	Versuchsmaterial	11
4.2	Versuchsprogramm	11
4.3	Versuchsdurchführung	12
4.4	Versuchsergebnisse	12
5	Zweischnittige Druckscherversuche mit Brettschichtholz und Stiften aus KPH	15
5.1	Versuchsmaterial	15
5.2	Prüfkörper und Versuchsprogramm	15
5.3	Versuchseinrichtung und -durchführung	17
5.4	Versuchsauswertung	18
5.5	Versuchsergebnisse	19
5.6	Vergleich des Rechenmodells mit den Versuchsergebnissen	25
6	Einschnittige Druckscherkörper mit Brettschichtholz und Stiften aus KPH	28
6.1	Versuchsergebnisse	28
6.2	Vergleich des Rechenmodells mit den Versuchsergebnissen	29
7	Zweischnittige Zugscherkörper mit Brettschichtholz und Stiften aus KPH	31
7.1	Versuchsergebnisse	31
7.2	Vergleich des Rechenmodells mit den Versuchsergebnissen	32
8	Zusammenfassung	34
9	Schrifttum	35

1 ZIEL DES FORSCHUNGSVORHABENS

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

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

Im ersten Teil dieser Forschungsarbeiten [1] wurden die physikalischen, im besonderen die mechanischen Eigenschaften von geeignet erscheinendem Kunstharzpreßholz untersucht. Im zweiten Teil war das Trag- und Verformungsverhalten von mechanischen Verbindungen zu erforschen, bei denen die nichtmetallischen, holzhaltigen Werkstoffe als Stifte oder Stabdübel einerseits sowie als Laschen und Knotenplatten andererseits eingesetzt werden.

Ein Teilziel war es deshalb, auf der Grundlage der bekannten Tragfähigkeitshypothesen für Verbindungen mit metallischen Stiften eine Erweiterung der bestehenden Theorie auf Stifte aus Kunstharzpreßholz (KPH) vorzunehmen und diese Erweiterung durch systematische Versuche an ein- und mehrschnittigen Verbindungen zu überprüfen.

Ein weiteres Teilziel besteht darin, durch systematische Versuche unter Variation der Parameter Plattenaufbau und Lochanteil am Bruttoquerschnitt für das Plattenmaterial Kerbfaktoren anzugeben, die beim Tragfähigkeitsnachweis von gelochten Platten aus KPH berücksichtigt werden müssen. Hierüber wird gesondert berichtet.

Die Untersuchung von Verbindungen mit Stiftmaterial aus KPH erstreckte sich im einzelnen auf die nachfolgenden Untersuchungen:

- Literaturdurchsicht und Sammlung bereits vorliegender Ergebnisse mit vergleichbaren Materialien,
- Erweiterung der bekannten Tragfähigkeitstheorie für Verbindungen mit metallischen Stiften auf Stifte aus KPH,
- Ermittlung der Tragfähigkeit und des Verformungsverhaltens von Stiften aus KPH und
- Überprüfung der erweiterten Theorie durch systematische Versuche an ein- und mehrschnittigen Verbindungen.

2 AUSWERTUNG DES SCHRIFTTUMS

Die Ergebnisse einer ausführlichen Literaturrecherche über die Herstellung und den Einsatz von nichtmetallischen, holzhaltigen Werkstoffen für tragende Verbindungen im Ingenieurholzbau wurde bereits im 1. Abschnitt des Forschungsvorhabens [1] durchgeführt und in dessen Abschlußbericht dokumentiert. Deshalb wird in diesem Abschnitt ausschließlich auf Literaturquellen bezug genommen, die über tragende Holzverbindungen mit nichtmetallischen Stiften berichten.

Über erste Versuche zur Ermittlung des Tragverhaltens von Verbindungen mit nichtmetallischen Verbindungsmitteln berichtet KRESS [2]. Er verwendete runde Holznägel (sog. "Biegedübel"), die aus Buchen- und Bongossiholz (ϕ 20mm, Länge = 100 mm) bestanden. Die aus den Bruchlasten mit einer pauschalen dreifachen Sicherheit ermittelten sog. "zulässigen" Belastungen wurden jedoch aufgrund der bei allen Versuchen beobachteten großen Nachgiebigkeiten nicht als maßgebend für die Festlegung der zulässigen übertragbaren Kräfte angesehen.

Über die nach CARL BRÖSEL benannte "Cabrölbauweise" wird in den Lehrbüchern von STOY [3], MÖNCK [4] und KOLLMANN [5] ausführlich berichtet.

Eine andere tragende Holzverbindung ohne Stahlbolzen wurde von FUCHS [6] entwickelt. Dabei handelte es sich um Rohrdübel aus Hartholz, Asbestzement oder Kunstpreßstoff mit einem Holzschraubengewinde auf der äußeren Mantelfläche. In die zu verbindenden Hölzer wurde ebenfalls ein Gewinde eingeschnitten, so daß neben einer möglichen Übertragung von Scherkräften auch der Zusammenhalt der Verbindungen ohne zusätzliche Heftbolzen gewährleistet war. TRYSNA [7] berichtet über eine Verwendung dieser Verbindungsmittel bei der Herstellung von Vollwandträgern für den Bau einer Salzspeicheranlage.

Neuere Versuche mit eisenfreien Verbindungen wurden von GEHRI [8] in Zürich durchgeführt. Geprüft wurden Fachwerkträger mit Knoten aus zwei- bis vierschnittigen Stabdübelverbindungen. Die Knotenplatten bestanden aus 7-lagigem Buchenfurniersperrholz und die stiftförmigen Verbindungsmittel aus Bongossi. Bei den geprüften Dübeldurchmessern von 7 bis 12 mm stellte sich für die Bongossidübel die gleiche Versagensart mit "Fließgelenken" wie für Stabdübel aus Stahl ein.

Auch KOLB und EPPLE [9] führten Druckscherversuche an zweiseitigen Stabdübelverbindungen mit nichtmetallischen Dübeln und Knotenplatten durch, um den Tragfähigkeitsbereich solcher Verbindungen abzuschätzen. Die Anzahl der orientierenden Versuche war jedoch zu gering, um gesicherte Angaben über die Tragfähigkeit einer solchen Verbindung machen zu können.

Ein erster Versuch, die Tragfähigkeit und das Verformungsverhalten von tragenden Holzverbindungen mit nichtmetallischen Stiften theoretisch zu erfassen und zu beschreiben, wurde von MEYER [10] unternommen. Experimentell untersuchte er Verbindungen mit quadratischen Eichenholznägeln ($a=14$ mm) und runden Lignostonestiften ($d=10$ mm). Erstmals wurde das auf den Arbeiten von JOHANSEN [11] beruhende Rechenmodell für Stiftverbindungen im Holzbau auch auf nichtmetallische Stifte übertragen. Die theoretisch zu erwartenden Bruchlasten wurden unter Berücksichtigung der Biegefestigkeit der Stifte sowie der Lochleibungsfestigkeit des Holzes ermittelt. Bei zwölf durchgeführten Tastversuchen betrug dabei das Verhältnis zwischen der tatsächlichen Bruchlast F_{\max} und der berechneten Tragfähigkeit R_u im Mittel 0,98.

Aufgrund dieses Schrifttums war zu erwarten, daß sich Stifte aus Kunstharzpreßholz als tragende Verbindungsmittel eignen und die Tragfähigkeit sowie das Verformungsverhalten von damit hergestellten Verbindungen nach systematischer Untersuchung theoretisch beschrieben werden können.

3 ENTWICKLUNG EINER THEORETISCHEN TRAGFÄHIGKEITS- HYPOTHESE

Die Theorie über die Tragfähigkeit von Holzverbindungen mit stiftförmigen mechanischen Verbindungsmitteln, die von JOHANSEN [11] entwickelt und später von MOELLER [12] und MEYER [13] erweitert wurde, wurde bisher nur für Verbindungen mit Stiften aus Stahl angewendet. Diese Theorie geht davon aus, daß sich sowohl der Stahl unter der Biegebeanspruchung als auch das Holz unter der Lochleibungsbeanspruchung ideal elastisch-plastisch verhalten.

Für die Stifte aus KPH trifft, wie bereits im 1. Forschungsabschnitt gezeigt wurde, diese Annahme des Werkstoffverhaltens nicht zu. Das Material verhält sich spröde.

Auf der Grundlage der bestehenden Theorie und der im 1. Forschungsabschnitt ermittelten Werkstoffkennwerte mußte daher eine Erweiterung auf Stifte aus KPH vorgenommen und diese Erweiterung durch gezielte Versuche überprüft werden.

Die folgenden Ausführungen beziehen sich, soweit nicht ausdrücklich anderes gesagt, auf zweischnittige Stiftverbindungen.

3.1 THEORIE VON JOHANSEN, MOELLER UND MEYER

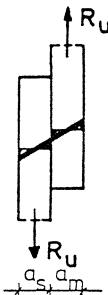
Unter der Annahme eines ideal elastisch-plastischen Werkstoffverhaltens der Stifte unter Biegebeanspruchung und des Holzes unter Lochleibungsbeanspruchung sind sowohl für ein- als auch für zweiseitige Verbindungen vier Bruchursachen zu unterscheiden.

Mit den folgenden Symbolen

R_u	rechnerische Tragfähigkeit eines Stiftes pro Scherfläche
f	Lochleibungsfestigkeit des Seitenholzes,
β	Verhältnis Lochleibungsfestigkeit des Mittelholzes f_m zur Lochleibungsfestigkeit des Seitenholzes f ,
f_y	rechnerische Fließspannung des Stahles,
a_m	Mittelholzdicke,
a_s	Seitenholzdicke,
d	Stiftdurchmesser
M_{\max}	Bruchmoment eines Stiftes

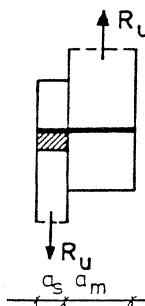
gelten für einschnittige Verbindungen folgende Beziehungen:

- Bruchursache 1



$$R_u = f \cdot d \cdot a_s \cdot \left[\frac{\sqrt{\beta + 2 \cdot \beta^2 \cdot \left(1 + \frac{a_m}{a_s} + \left(\frac{a_m}{a_s}\right)^2\right) + \beta^3 \cdot \left(\frac{a_m}{a_s}\right)^2} - \beta \cdot \left(1 + \frac{a_m}{a_s}\right)}{1 + \beta} \right] \quad (1)$$

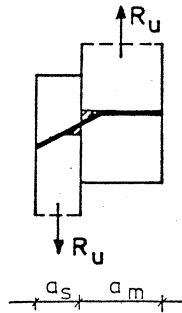
- Bruchursache 2



$$R_u = f \cdot d \cdot a_s \quad (2a)$$

$$R_u = f \cdot d \cdot a_m \cdot \beta \quad (2b)$$

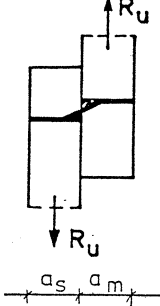
- Bruchursache 3



$$R_u = f \cdot d \cdot a_s \cdot \left[\frac{\sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{2}{3} \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot \left(\frac{d}{a_s}\right)^2 \cdot \frac{f_y}{f}} - \beta}{2 + \beta} \right] \quad (3a)$$

$$R_u = f \cdot d \cdot a_m \cdot \left[\frac{\sqrt{2 \cdot \beta^2 \cdot (1 + \beta) + \frac{2}{3} \cdot \beta \cdot (1 + 2 \cdot \beta) \cdot \left(\frac{d}{a_m}\right)^2 \cdot \frac{f_y}{f}} - \beta}{1 + 2 \cdot \beta} \right] \quad (3b)$$

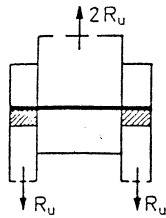
- Bruchursache 4



$$R_u = f \cdot d^2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{3 \cdot (1 + \beta)} \cdot \frac{f_y}{f}} \quad (4)$$

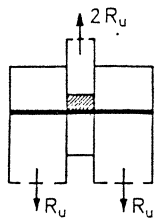
Für zweischnittige Verbindungen gelten folgende Beziehungen:

- Bruchursache 1



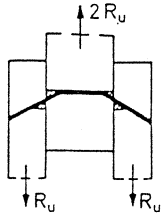
$$R_u = f \cdot d \cdot a_s \quad (5)$$

- Bruchursache 2



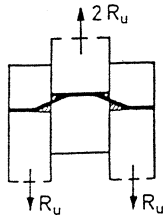
$$R_u = \frac{1}{2} \cdot f \cdot \beta \cdot d \cdot a_m \quad (6)$$

- Bruchursache 3



$$R_u = \left[\sqrt{\frac{2 \cdot (1 + \beta)}{\beta} + \frac{2}{3} \cdot \left(\frac{2 + \beta}{\beta}\right) \cdot \left(\frac{d}{a_s}\right)^2 \cdot \frac{f_y}{f}} - 1 \right] \cdot \frac{\beta}{2 + \beta} \cdot a_s \cdot d \cdot f \quad (7)$$

- Bruchursache 4



$$R_u = f \cdot d^2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{3 \cdot (1 + \beta)} \cdot \frac{f_y}{f}} \quad (8)$$

Maßgebend für die Tragfähigkeit R_u einer Verbindung ist dabei nach dieser Theorie der jeweils kleinste Wert, der sich aus den Gleichungen (1) ÷ (4) bzw. (5) ÷ (8) ergibt.

3.2 DISKUSSION UND ERWEITERUNG DER THEORIE

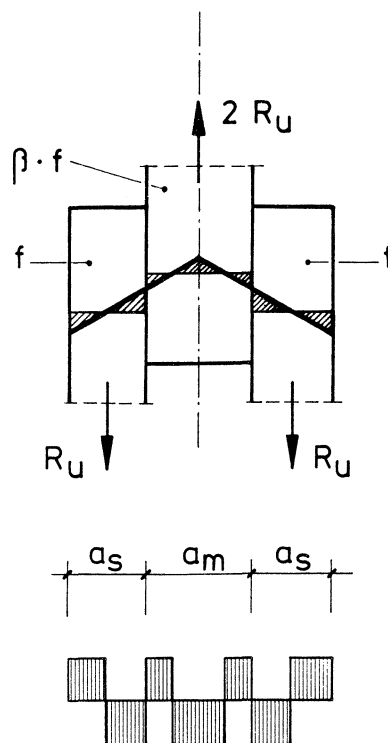
Die Stifte aus Kunstharzpreßholz besitzen bei Biegebeanspruchung keine ausgeprägte Fließgrenze, sondern weisen ein sprödes Verhalten auf. Daher war zu vermuten, daß für die zu untersuchenden Stiftverbindungen bei Versagen der Verbindungsmittel (d.h. bei den beschriebenen Bruchursachen 3 und 4) das Rechenmodell den Bruchzustand nicht ausreichend erfaßt bzw. beschreibt und zur rechnerischen Bestimmung der Tragfähigkeit nur teilweise herangezogen werden kann.

Ein weiterer Versagenszustand bei Versagen des Verbindungsmittels im Mittelholz wurde deshalb als Bruchursache 3a neu definiert.

Bruchursache 3a:

Die Bruchursache 3a wird durch das Auftreten nur eines Biegebruches des Stiftes in der Mitte des Mittelholzes sowie dem Erreichen der Lochleibungsfestigkeit im Holz charakterisiert.

Damit ergibt sich in Anlehnung an die Theorie von Johansen die folgende idealisierte Lochleibungsspannungsverteilung:



Aus der Bedingung, daß an der Stelle des Bruchmoments (maximales Moment) die Querkraft gleich Null sein muß, ergibt sich die rechnerische Tragfähigkeit R_u zu:

$$R_u = \left[\sqrt{\left(a_s + \frac{a_m}{2}\right)^2 + \frac{\beta + 1}{\beta} \cdot \left(\frac{4 \cdot M_{max}}{d \cdot f} + a_s^2 + \frac{\beta}{4} \cdot a_m^2\right)} - \left(a_s + \frac{a_m}{2}\right) \right] \cdot \frac{\beta}{\beta + 1} \cdot d \cdot f \quad (9)$$

4 BIEGEVERSUCHE AN STIFTEN AUS KUNSTHARZPRESSHOLZ (KPH)

Zur Überprüfung des erweiterten Rechenmodells wurden zur Bestimmung der Biegefestigkeit des zur Verfügung stehenden Rundmaterials aus geschichtetem KPH (sog. Kunstharzpreßschichtholz (KPSCH)) zunächst Biegeversuche in Anlehnung an DIN 52 186 (Prüfung von Holz - Biegeversuch) durchgeführt. Bei Variation der Parameter

- Verhältnis der Stützweite l_s zum Durchmesser d und
- Lage der Furnierschichten zur Belastungsrichtung

wurde in Vorversuchen untersucht, ob diese beiden Parameter einen signifikanten Einfluß auf die Biegefestigkeit des verwendeten Materials ausüben.

4.1 VERSUCHSMATERIAL

Nach Kontakten mit der Industrie fanden sich zwei Hersteller von KPH, die in der Lage waren, in ausreichender Menge Rundmaterial aus bereits im 1. Teil des Forschungsvorhabens untersuchtem Material liefern zu können. So war es möglich, die bei den Versuchen ermittelten Biegefestigkeiten mit den Herstellerangaben und den Ergebnissen des 1. Teils zu vergleichen und so neben der Herstellungskonstanz auch die Richtigkeit der Ergebnisse der Biegeversuche zu überprüfen. Im einzelnen stand das in Tabelle 1 (Anlage 1) zusammengestellte Rundmaterial zur Verfügung. Die Ergebnisse einer stichprobenartigen Maßkontrolle des Durchmessers des Rundmaterials sind in Tabelle 2 (Anlage 1) zusammengestellt.

4.2 VERSUCHSPROGRAMM

Als Vorversuche zur Überprüfung des Einflusses des Verhältnisses der Stützweite l_s zum Durchmesser d sowie der Lage der Ebene der Furnierschichten bezüglich der Belastungsrichtung wurden zunächst Biegeversuche mit dem Material D3 (Hersteller D, Durchmesser $d = 12\text{mm}$) durchgeführt. Eine Prüfung der anderen Stifte (C1 ÷ C4 und D1, D2 und

D4) war nicht erforderlich, da durch die Gleichartigkeit des Schichtaufbaues sowie der damit verbundenen Homogenität für diese Stifte ein gleiches Verhalten bei Biegebeanspruchung vorausgesetzt werden konnte.

Im Anschluß an die Vorversuche wurde die Biegefestigkeit aller zur Verfügung stehenden Stiftdurchmesser bei konstantem Verhältnis $l_s/d = 20$ bestimmt.

4.3 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Die Biegeversuche zur Bestimmung der Biegefestigkeiten der Stifte aus KPH wurden in Anlehnung an DIN 52 186 (Prüfung von Holz ; Biegeversuch) durchgeführt. Da es sich bei KPH um ein weitgehend homogenes Material handelt, erfolgte die Prüfung in einer Prüfeinrichtung entsprechend Bild 1 der o.a. Norm.

4.4 VERSUCHSERGEBNISSE

4.4.1 Versuche mit unterschiedlichem Stützweitenverhältnis l_s/d

Die Prüfung des Stiftmaterials D3 mit jeweils 10 Versuchen bei den Stützweitenverhältnissen $l_s/d = 7,5/10/12,5/15/20$ erbrachte die in Tabelle 3 (Anlagen 2 und 3) zusammengestellten Ergebnisse.

Bild 1 (Anlage 4) zeigt eine grafische Darstellung dieser Versuchswerte.

Für die Gesamtmenge (50 Versuche) ergab sich damit folgende Biegefestigkeit:

Mittelwert	302	N/mm ² ,
Standardabweichung	22	N/mm ² ,
Variationskoeffizient	7,2	%.

Ein Vergleich mit den Streuungen innerhalb der einzelnen Versuchsreihen zeigt keinen signifikanten Einfluß des Stützweitenverhältnisses l_s/d auf die Biegefestigkeit des Stiftmaterials.

Damit war die Voraussetzung gegeben, daß die ermittelten Biegefestigkeiten auch bei den Versuchen mit Verbindungen (als Druckscherkörper) herangezogen werden können, obwohl dann die statisch wirksame Stützweite nicht bekannt ist.

4.4.2 Versuche mit unterschiedlichem Winkel zwischen Furnierebene und Belastungsrichtung

Die Prüfung des Stiftmaterials D3 mit jeweils 6 bzw. 10 Versuchen bei einem Winkel zwischen Furnierebene und Belastungsrichtung von $\alpha = 0^\circ / 45^\circ / 90^\circ$ erbrachte die in Tabelle 4 (Anlage 5) zusammengestellten Ergebnisse.

Bild 2 (Anlage 6) zeigt eine grafische Darstellung dieser Versuchswerte. Für die Gesamtmenge (22 Versuche) ergab sich für die Biegefestigkeit:

Mittelwert	284	N/mm ² ,
Standardabweichung	19	N/mm ² ,
Variationskoeffizient	6,8	%.

Ein Vergleich mit den Streuungen innerhalb der einzelnen Versuchsreihen zeigt keinen signifikanten Einfluß des Winkels zwischen Furnierebene und Belastungsrichtung auf die Biegefestigkeit des Stiftmaterials.

Dieses Ergebnis ist für die Praxis insofern wichtig, daß bei der Herstellung von Verbindungen mit Stabdübeln aus KPH keine definierte Orientierung der Furnierlagen beachtet zu werden braucht.

4.4.3 Bestimmung der Biegefestigkeit des Stiftmaterials

Die Biegefestigkeit und das Bruchmoment aller anderen Stiftdurchmesser wurden mit einem konstanten Stützweitenverhältnis von $l_s/d = 20$ bestimmt.

Die Ergebnisse dieser Versuche sind für das Material des Herstellers C in Tabelle 5 (Anlagen 7 und 8) und für das des Herstellers D in Tabelle 6 (Anlagen 10 und 11) zusammengestellt.

Grafische Darstellungen der Versuchswerte geben für den Hersteller C Bild 3 (Anlage 9) und für den Hersteller D Bild 4 (Anlage 12) wieder. Für die Gesamtmenge des Herstellers C (39 Versuche) ergab sich dabei für die Biegefestigkeit:

Mittelwert	236	N/mm ² ,
Standardabweichung	23	N/mm ² ,
Variationskoeffizient	9,7	%.

Für die Gesamtmenge des Herstellers D (40 Versuche) ergab sich dabei für die Biegefestigkeit:

Mittelwert	279	N/mm ² ,
Standardabweichung	20	N/mm ² ,
Variationskoeffizient	7,3	%.

Obwohl die Gesamtmenge der beiden Hersteller keine größeren Streuungen als die einzelnen Versuchsreihen aufweisen, wurden bei der Anwendung und Überprüfung des Rechenmodells die Mittelwerte der einzelnen Versuchsreihen benutzt.

Es deutet sich aber auch an, daß die Biegefestigkeiten der KPH-Stifte mit steigendem Stiftdurchmesser abnehmen. Ob dieser Einfluß bei einer Tragfähigkeitsberechnung von Verbindungen mit KPH-Stiften berücksichtigt werden muß, kann aufgrund des Umfanges der vorliegenden Versuchsdaten nicht endgültig entschieden werden.

4.4.4 Vergleich der Ergebnisse mit den Herstellerangaben und den Ergebnissen des 1. Teils des Forschungsvorhabens

Ein Vergleich der Ergebnisse der durchgeführten Biegeversuche mit den Herstellerangaben sowie den Ergebnissen des 1. Teils des Forschungsvorhabens zeigt für den Hersteller D eine gute Übereinstimmung mit den Herstellerangaben, während die Biegefestigkeit des Materials des Herstellers C deutlich unterhalb der Angaben lag (siehe hierzu Tabelle 1, Anlage 1).

5 ZWEISCHNITTIGE DRUCKSCHERVERSUCHE MIT BRETTSCHICHTHOLZ UND STIFTEN AUS KPH.

Zur Überprüfung des Rechenmodells und zur Bestimmung des Trag- und Verformungsverhaltens der Stiftverbindungen wurden unter Variation der Schlankheit $\lambda = a_m/d$ und des Durchmessers d insgesamt 128 Einzelversuche an zweischnittigen Verbindungen aus Brettschichtholz durchgeführt. Die Belastung erfolgte grundsätzlich in Faserrichtung des Holzes.

5.1 VERSUCHSMATERIAL

Die Klimatisierung des Versuchsmaterials und die Durchführung der Versuche erfolgte im Prüflabor bei Normalklima 20/65 nach DIN 50 014. Die Holzfeuchte u , die nur stichprobenweise bestimmt wurde, da das Brettschichtholz längere Zeit in dem Normalklima gelagert war, lag zwischen 10 und 12 %.

Die Rohdichte der Seiten- und Mittelhölzer aus Brettschichtholz betrug für die Gesamtmenge (384 Mittel- und Seitenhölzer) aller verwendeten Hölzer:

Mittelwert	453	kg/m ³ ,
Standardabweichung	27	kg/m ³ ,
Variationskoeffizient	5,9	%,
5 % - Fraktile	409	kg/m ³ .

5.2 PRÜFKÖRPER UND VERSUCHSPROGRAMM

Die Prüfkörper entsprachen den Angaben nach Bild 5 (Anlage 13). Bild 6 (Anlage 13) zeigt eine Fotografie eines Versuchskörpers. Die Wahl der Stiftabstände untereinander und von den Holzrändern erfolgte nach den Bestimmungen der DIN 1052 für Stabdübel aus Stahl. Das Verhältnis Seitenholzdicke a_s zu Mittelholzdicke a_m war mit 0,75 bei allen Versuchen konstant. Das Vorbohren der Löcher erfolgte mit dem Nenndurchmesser der Stifte.

Auf eine versetzte Anordnung der Stifte wurde verzichtet, da nach Untersuchungen von EHLBECK/WERNER [14] bei einer Belastung parallel zur Faserrichtung kein signifikanter Einfluß zwischen versetzter und unversetzter Anordnung besteht.

Das Vorbohren der Löcher mit dem Nenndurchmesser der Stifte bedingte eine obere Begrenzung der Schlankheit der Verbindung. Prüfkörper mit Schlankheiten > 5 konnten trotz einer Verwendung von Gleitmitteln nicht mehr hergestellt werden. Beim Eintreiben kam es zur Zerstörung der Stifte.

Aufgrund dieser herstellungsbedingten Begrenzung wurde zur Überprüfung des Rechenmodells und der Tragfähigkeit der Verbindungen das in Tabelle 7 (Anlage 14) zusammengestellte Versuchsprogramm mit jeweils drei Prüfkörpern je Versuchsreihe aufgestellt.

Durch die Begrenzung der Schlankheit einerseits und die gewählten geometrischen Bedingungen andererseits wurde bei kleinen Schlankheiten die in DIN 1052 Teil 1 geforderte Mindestdicke von 24 mm teilweise unterschritten.

Die Bezeichnung der Probekörper erfolgte einheitlich nach dem folgenden Schema:

ABCCD.

Darin bedeuten:

A	Hersteller	C oder D
B	Durchmesser	1: Ø 8mm 2: Ø 10mm 3: Ø 12mm 4: Ø 16mm bei Hersteller C 4: Ø 20mm bei Hersteller D
CC	Schlankheit	
D	lfd. Nummer innerhalb einer Versuchsreihe.	

5.3 VERSUCHSEINRICHTUNG UND -DURCHFÜHRUNG

Sämtliche Messungen wurden mit elektrischen Meßwertaufnehmern vorgenommen. Für die Messung der Verschiebungen wurden zwei induktive Wegaufnehmer des Typs W20 verwendet. Die Meßsignalverstärkung und Meßdatenerfassung erfolgte mittels einer rechnergestützten Umschaltanlage (UPH 3200).

Zur Auswertung der Meßdaten und Darstellung der Versuchsergebnisse in grafischer Form wurde ein spezielles EDV - Programm verwendet.

Die Durchführung und Auswertung der Versuche erfolgte nach ISO 6891 ("Timber structures - Joints made with mechanical fasteners - General principles for the determination of strength and deformation characteristics";1983).

Ausgehend von einer erwarteten Höchstlast F_{est} wurden die Prüfkörper mit einer konstanten Verformungsgeschwindigkeit bis $0,4 \cdot F_{est}$ belastet. Nach 30 sec Wartezeit erfolgte eine Entlastung auf $0,1 \cdot F_{est}$. Nach erneuter Wartezeit von wiederum 30 sec wurde bis zum Erreichen der Höchstlast bzw. bis zu einer Verformung von mehr als 15 mm erneut belastet.

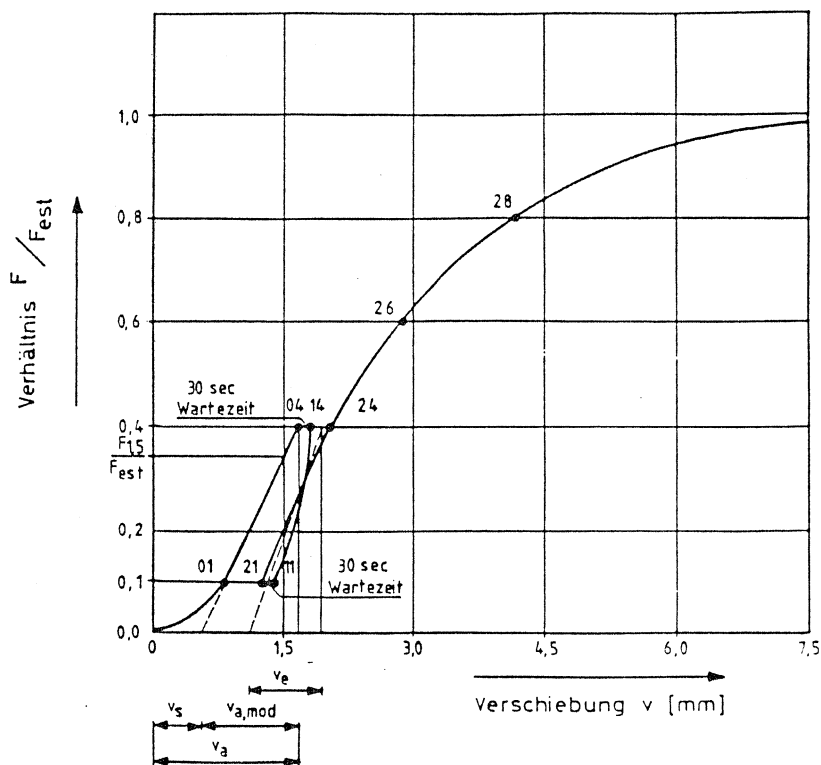
Die Verformungsgeschwindigkeit betrug im Bereich unterhalb $0,7 \cdot F_{est}$ 0,5mm/min und wurde ab $0,7 \cdot F_{est}$ kontinuierlich bis auf etwa 4 mm/min gesteigert. Die Versuchsdauer betrug damit jeweils etwa 10 min. Die Erfassung der Meßdaten erfolgte kontinuierlich in Intervallen von 5 Sekunden mittels der rechnergestützten Meßdatenerfassungsanlage.

Gemessen wurden die Verschiebungen zwischen Mittel- und Seitenholz. Als erwartete Höchstlast F_{est} wurde dabei die nach dem Rechenmodell maßgebende kleinste Tragfähigkeit $2 \cdot R_u$ definiert.

5.4 VERSUCHSAUSWERTUNG

Als Ergebnisse der Tragfähigkeitsversuche mit den Druckscherkörpern liegen Kraft-Verschiebungs-Diagramme sowie in tabellarischer Form die charakteristischen Werte vor.

Diese charakteristischen Verschiebungsgrößen wurden nach ISO 6891 ermittelt. Das nachfolgend abgebildete, idealisierte Kraft-Verschiebungs-Diagramm zeigt die angegebenen Verschiebungsgrößen nach ISO 6891.



Im einzelnen bedeuten:

- | | | |
|------------------------------------|-------------|-----------------------------------|
| - Anfangsverschiebung | v_a | $= v_{04}$ |
| - Anfangsverschiebung ohne Schlupf | $v_{a,mod}$ | $= 4/3 \cdot (v_{04} - v_{01})$ |
| - Versuchshöchstlast | F_{max} | |
| - Anfangsverschiebungsmodul | C | $= 0,4 \cdot F_{est} / v_a$ |
| - Verschiebungsmodul | C_{mod} | $= 0,4 \cdot F_{est} / v_{a,mod}$ |

5.5 VERSUCHSERGEBNISSE

5.5.1 Kraft-Verschiebungs-Diagramme

In den Bildern 7 bis 10, 13 bis 17, 19 bis 24, 27 bis 34, 37 bis 44, 47 bis 53, 55 bis 58 und 61 (Anlagen 15, 16, 18 bis 23, 25 bis 28, 30 bis 33, 35 bis 40 und 42) sind die Kräfte über die gemittelten Verschiebungen der Seitenhölzer gegenüber dem Mittelholz für jeweils eine Versuchsreihe aufgetragen.

Ebenfalls enthalten sind die absoluten Versuchshöchstlasten F_{\max} sowie die Angaben über Hersteller, erwarteter Bruchlast F_{est} , Durchmesser d des Stiftes und Schlankheit λ der Verbindung.

5.5.2 Versagensursachen und Versuchshöchstlasten

Bei allen zweischnittigen Druckscherkörpern wurde bis $0,4 \cdot F_{\text{est}}$ ein linearer Anstieg der Verschiebung gemessen. Bei weiterer Laststeigerung trat dann je nach Durchmesser der Stifte und Schlankheit der geprüften Verbindung eine unterschiedliche Versagensart auf.

Im folgenden wird dieses unterschiedliche Verhalten genauer dokumentiert:

Schlankheit 1,5:

Bilder 7 bis 10 (Anlagen 15 und 16)

Die Versuche mit Schlankheiten von 1,5 wurden aufgrund der daraus resultierenden Holzdicken mit Stiften der Durchmesser 12, 16 und 20 mm durchgeführt.

Bei diesen Durchmessern waren die Holzdicken der Seiten- und teilweise auch der Mittelhölzer kleiner als die nach DIN 1052 vorgeschriebene Mindestholzdicke von 24 mm.

Bei allen Versuchen war der Verlauf des Kraft-Verschiebungs-Diagrammes bis zum Erreichen der Höchstlast nahezu linear. Die Verschiebung bei Erreichen der Höchstlast betrug nur etwa 1 mm. Es trat entweder ein Holzversagen des Mittelholzes (Bruchursache 1) oder ein Biegebruch der Stifte im Mittelholz (Bruchursache 3a) auf.

Im weiteren Versuchsverlauf verhielten sich die Prüfkörper wie einschnittige Verbindungen.

Die Bilder 11 und 12 (Anlage 17) zeigen je zwei aufgetrennte Prüfkörper mit einer Schlankheit von 1,5.

Schlankheit 2,0:

Bilder 13 bis 17 (Anlagen 18 bis 20).

Die Versuche mit Schlankheiten von 2,0 wurden aufgrund der daraus resultierenden Holz厚cken mit Stiften der Durchmesser 10, 12, 16 und 20 mm durchgeführt.

Bei diesen Durchmessern waren die Holz厚cken der Seiten- und teilweise auch der Mittelhölzer kleiner als die nach DIN 1052 vorgeschriebene Mindestholzdicke von 24 mm.

Bei allen Versuchen war der Verlauf des Kraft-Verschiebungs-Diagrammes bis zum Erreichen der Höchstlast nahezu linear. Die Verschiebung bei Erreichen der Höchstlast betrug nur etwa 1 mm. Bei allen Prüfkörpern trat ein Biegebruch der Stifte im Mittelholz (Bruchursache 3a) auf.

Im weiteren Versuchsverlauf verhielten sich die Prüfkörper wie einschnittige Verbindungen.

Bild 18 (Anlage 20) zeigt zwei aufgetrennte Prüfkörper mit einer Schlankheit von 2,0.

Schlankheit 2,5:

Bilder 19 bis 24 (Anlagen 21 bis 23).

Die Versuche mit einer Schlankheit von 2,5 wurden in Hinsicht auf die Holzdicken mit Stiften der Durchmesser 10, 12, 16 und 20 mm durchgeführt. Bei diesen Durchmessern waren die Holzdicken der Seiten- und Mittelhölzer teilweise kleiner als die nach DIN 1052 vorgeschriebene Mindestholzdicke von 24 mm.

Bei allen Versuchen war der Verlauf der Kraft-Verschiebungs-Diagramme bis zur Höchstlast nahezu linear. Die Verschiebung unter der Höchstlast betrug 2÷3 mm. Bei allen Prüfkörpern trat ein Biegebruch der Stifte im Mittelholz (Bruchursache 3a) auf.

Im weiteren Versuchsverlauf verhielten sich die Prüfkörper wie einschnittige Verbindungen.

Die Bilder 25 und 26 (Anlage 24) zeigen je drei aufgetrennte Prüfkörper mit einer Schlankheit von 2,5.

Schlankheit 3,0:

Bilder 27 bis 34 (Anlagen 25 bis 28).

Die Versuche mit einer Schlankheit von 3,0 wurden mit Stiften der Durchmesser 8, 10, 12, 16 und 20 mm durchgeführt.

Bei allen Versuchen war der Verlauf der Kraft-Verschiebungs-Diagramme bis $0,4 \cdot F_{\text{est}}$ nahezu linear. Die Verschiebung unter der Höchstlast betrug etwa 3 mm. Bei den Prüfkörpern traten entweder ein Biegebruch der Stifte im Mittelholz (Bruchursache 3a) oder vier Biegebrüche (Bruchursache 4) auf.

Die Bilder 35 und 36 (Anlage 29) zeigen je vier aufgetrennte Prüfkörper mit einer Schlankheit von 3,0.

Schlankheit 3,5:

Bilder 37 bis 44 (Anlagen 30 bis 33).

Die Versuche mit einer Schlankheit von 3,5 wurden mit Stiften der Durchmesser 8, 10, 12, 16 und 20 mm durchgeführt.

Bei allen Versuchen war der Verlauf der Kraft-Verschiebungs-Diagramme bis $0,4 \cdot F_{\text{est}}$ nahezu linear. Die Verschiebung unter der Höchstlast betrug etwa 3 mm. Bei allen Prüfkörpern traten Biegebrüche der Stifte im Mittelholz und in den beiden Seitenhölzern (Bruchursache 4) auf.

Die Bilder 45 und 46 (Anlage 34) zeigen je vier aufgetrennte Prüfkörper mit einer Schlankheit von 3,5.

Schlankheit 4,0:

Bilder 47 bis 53 (Anlagen 35 bis 38).

Die Versuche mit einer Schlankheit von 4,0 wurden mit Stiften der Durchmesser 8, 10, 12, 16 und 20 mm durchgeführt.

Bei allen Versuchen war der Verlauf der Kraft-Verschiebungs-Diagramme bis $0,4 \cdot F_{\text{est}}$ nahezu linear. Die Verschiebung unter der Höchstlast betrug $1 \div 1,5$ mm. Bei allen Prüfkörpern traten Biegebrüche der Stifte im Mittelholz und in den beiden Seitenhölzern (Bruchursache 4) auf.

Bild 54 (Anlage 38) zeigt drei aufgetrennte Prüfkörper mit einer Schlankheit von 4,0.

Schlankheiten 4,5 und 5,0:

Bilder 55 bis 58 (Anlagen 39 und 40) bzw.

Bild 61 (Anlage 42).

Die Versuche mit einer Schlankheit von 4,5 und 5,0 wurden mit Stiften der Durchmesser 8, 10 und 12 mm durchgeführt.

Bei allen Versuchen war der Verlauf der Kraft-Verschiebungs-Diagramme bis $0,4 \cdot F_{\text{est}}$ nahezu linear. Die Verschiebung unter der Höchstlast betrug $1 \div 1,5$ mm. Bei allen Prüfkörpern traten Biegebrüche der Stifte im Mittelholz und in den beiden Seitenhölzern (Bruchursache 4) auf.

Die Bilder 59 und 60 (Anlage 41) zeigen je zwei aufgetrennte Prüfkörper mit einer Schlankheit von 4,5.

Bild 62 (Anlage 42) zeigt einen aufgetrennten Prüfkörper mit einer Schlankheit von 5,0.

5.5.3 Verschiebungsmodul

Die Auswertung der Versuche mit zweischnittigen Druckscherkörpern erfolgte nach ISO 6891.

Als charakteristische Größen liegen die Tragfähigkeit der Stifte je Scherfuge $F_{\max,s}$ sowie die Verschiebungsgrößen Anfangsverschiebung v_a , Anfangsverschiebung ohne Schlupf $v_{a,\text{mod}}$, der Anfangsverschiebungsmodul C sowie der Verschiebungsmodul C_{mod} vor.

Tabelle 8 (Anlage 43) enthält die Mittelwerte (Mittel aus drei Versuchen) dieser charakteristischen Größen aller durchgeführten Versuche.

Eine Überprüfung der Einflüsse der Parameter Durchmesser d des Stiftes, Schlankheit λ , mittlere Rohdichte ρ_m des BSH sowie Biegefestigkeit β_B des Stiftmaterials ergab die Regressionsgleichung:

$$C_{\text{mod}} = 874 \cdot d - 4550 \quad r = 0,90$$

$$C_{\text{mod}} \text{ in [N/mm]} \quad d \text{ in [mm]},$$

bzw. unter Berücksichtigung der mittleren Rohdichte der Versuchskörper:

$$C_{\text{mod}} = (1,9 \cdot d - 9,5) \cdot \rho_m \quad r = 0,88$$

$$C_{\text{mod}} \text{ in [N/mm]} \quad d \text{ in [mm]} \quad \rho_m \text{ in [kg/m}^3\text{]}.$$

Eine Darstellung des errechneten Verschiebungsmoduls C_{mod} pro Scherfläche und Stift in Abhängigkeit vom Stiftdurchmesser enthält Bild 63 (Anlage 44).

5.6 VERGLEICH DES RECHENMODELLS MIT DEN VERSUCHS- ERGEBNISSEN

Aufgrund der Ausführungen in den Abschnitten 3.1 und 3.2 waren bei den gewählten Abmessungen rechnerisch nur die Bruchursachen 2, 4 und 3a zu überprüfen.

Zur Bestimmung der rechnerischen Tragfähigkeiten wurden die folgenden Annahmen getroffen:

- Das Bruchmoment M_{\max} des Stiftes berechnet sich nach folgender Formel:

$$M_{\max} = \beta_B \cdot \pi \cdot d^3 / 32.$$

- Die Lochleibungsfestigkeit f des Holzes ist abhängig von der Rohdichte des Holzes und dem Durchmesser des Stiftes. Da im Vergleich zu Verbindungen mit Stabdübeln geringere Höchstlasten auftreten, wurde unter Berücksichtigung der gewählten Stiftabstände die Lochleibungsfestigkeit nach WHALE/ SMITH/ LARSEN [15] nach der Formel

$$f = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho$$

$$f \text{ in [N/mm}^2\text{]} \quad d \text{ in [mm]} \quad \rho \text{ in [kg/m}^3\text{]}$$

bestimmt.

- Eine geringere als die vorgeschriebene Mindestholzdicke von 24 mm hat aufgrund der kleineren Kräfte keinen besonderen Einfluß auf die Tragfähigkeit der Verbindungen.

Auf der Grundlage dieser Annahmen wurden die Tragfähigkeiten R_u entsprechend den Bruchursachen 2, 4 und 3a ermittelt und der kleinste dieser drei Werte multipliziert mit der Anzahl der Scherfugen als zu erwartende Versuchshöchstlast F_{est} definiert.

Bei der Berechnung dieser Tragfähigkeit R_u ergab sich, daß für Schlankheiten $\lambda = 1,5$ stets die Bruchursache 2 maßgebend wird, während für größere Schlankheiten die Bruchursachen 4 oder 3a maßgebend werden.

In Tabelle 9 (Anlage 45) sind die rechnerischen Tragfähigkeiten R_u den Versuchshöchstlasten je Stift und Scherfuge $F_{max,s}$ gegenübergestellt. Die in der Tabelle angegebenen Werte stellen dabei jeweils die Mittelwerte aus drei Versuchen jeder Versuchsreihe dar. Ebenfalls angegeben sind die errechneten Lochleibungsfestigkeiten auf der Grundlage der mittleren Rohdichten der drei Versuchskörper jeder Versuchsreihe.

Bild 64 (Anlage 46) zeigt eine grafische Darstellung des Verhältniswertes $F_{max,s}/R_{u,min}$ in Abhängigkeit von der Schlankheit $\lambda = a_m/d$.

Bild 65 (Anlage 47) zeigt einen direkten Vergleich der Versuchshöchstlasten $F_{max,s}$ mit den rechnerischen Tragfähigkeiten $R_{u,min}$.

Für die Gesamtmenge aller 128 Versuche ergaben sich dabei für den Quotienten $F_{max,s}/R_{u,min}$:

Mittelwert	0,95
Standardabweichung	0,13
Variationskoeffizient	13,9 %

Ein Vergleich der theoretisch zu erwartenden Bruchursachen mit den tatsächlich aufgetretenen Bruchbildern (siehe Abschnitt 5.5.2) ergibt eine gute Übereinstimmung.

Lediglich bei einer Schlankheit $\lambda = 3,5$ ist nach Theorie die Bruchursache 3a zu erwarten, während tatsächlich meist die Bruchursache 4 auftrat. Vergleicht man die theoretisch errechneten Höchstlasten dieser beiden Bruchursachen für $\lambda = 3,5$, so erkennt man, daß die beiden Rechenwerte eng zusammenliegen, im Bereich dieser Schlankheit also der Übergang von Bruchursache 3a auf Bruchursache 4 erfolgt.

6 EINSCHNITTIGE DRUCKSCHERKÖRPER MIT BRETTSCHICHTHOLZ UND STIFTEN AUS KPH

Aus den im Abschnitt 5 erhaltenen Ergebnissen war zu erwarten, daß sich einschnittige Verbindungen aus Brettschichtholz und Stiften aus KPH ebenfalls wie gleichartige Verbindungen mit Stiften aus Stahl verhalten.

Zur Überprüfung dieser Annahme wurden ergänzende Versuche mit einschnittigen (symmetrischen) Druckscherkörpern (KPH-Stifte des Herstellers D, Stiftdurchmesser $d = 12$ mm, Schlankheiten $\lambda = 1,5/1,75$ und $2,0$) durchgeführt.

Versuchsaufbau, Versuchsdurchführungen und Versuchsauswertungen erfolgten wie im Abschnitt 5 beschrieben.

Die Versuchskörper entsprachen zwar dem Bild 5 (Anlage 13), im Gegensatz zu den zweiseitigen Verbindungen waren die Stifte jedoch in der Mitte des Mittelholzes stumpf gestoßen.

Die Rohdichten aller zur Herstellung der Druckscherkörper verwendeten Seiten- und Mittelhölzer aus Brettschichtholz wurden bestimmt. Für die Gesamtmenge (27 Mittel- und Seitenhölzer) aller verwendeten Hölzer ergaben sich dabei für die Rohdichte:

Mittelwert	425	kg/m ³ ,
Standardabweichung	9,8	kg/m ³ ,
Variationskoeffizient	2,3	%.

6.1 VERSUCHSERGEBNISSE

6.1.1 Kraft-Verschiebungs-Diagramme

In den Bildern 66 bis 68 (Anlagen 48 und 49) sind die Kräfte über die gemittelten Verschiebungen der Seitenhölzer gegenüber dem Mittelholz für jeweils eine Versuchsreihe aufgetragen.

Ebenfalls enthalten sind die absoluten Versuchshöchstlasten F_{\max} sowie die Angaben über Hersteller, erwarteter Bruchlast F_{est} , Durchmesser d des Stiftes und Schlankheit λ der Verbindung.

6.1.2 Versagensursachen

Bei allen geprüften einschnittigen Druckscherkörpern wurde bis $0,4 \cdot F_{\text{est}}$ ein linearer Anstieg der Verschiebung gemessen. Bei weiterer Laststeigerung trat dann bei allen geprüften Schlankheiten die Bruchursache 3 (Gl. (3b), d.h. Biegebruch des Stiftes im "Seitenholz"; s. Abschnitt 3.1) auf.

6.1.3 Verschiebungsmodul

Die Auswertung der Versuche mit einschnittigen Druckscherkörpern erfolgte nach ISO 6891.

Als charakteristische Größen liegen die Tragfähigkeit der Stifte je Scherfuge $F_{\text{max,s}}$ sowie die Verschiebungsgrößen Anfangsverschiebung v_a , Anfangsverschiebung ohne Schlupf $v_{a,\text{mod}}$, der Anfangsverschiebungsmodul C sowie der Verschiebungsmodul C_{mod} vor.

Tabelle 10 (Anlage 49) enthält die Mittelwerte (Mittel aus drei Versuchen) dieser charakteristischen Größen aller durchgeführten Versuche.

6.2 VERGLEICH DES RECHENMODELLS MIT DEN VERSUCHS- ERGEBNISSEN

Zur Bestimmung der rechnerischen Tragfähigkeiten gelten die in Abschnitt 5.6 getroffenen Annahmen.

Auf der Grundlage dieser Annahmen wurden die Tragfähigkeiten R_u aus den Bruchursachen 1, 2, 3 und 4 (Da die Holzdicke a_s immer größer als a_m war, mit den Gleichungen (1), (2b), (3b) und (4)) ermittelt und der kleinste dieser vier Werte multipliziert mit der Anzahl der Scherfugen als zu erwartende Versuchshöchstlast F_{est} definiert.

Bei der Berechnung dieser Tragfähigkeit R_u ergab sich, daß für alle geprüften Schlankheiten $\lambda = 1,5 / 1,75$ und $2,0$ stets die Bruchursache 3 (Gleichung (3b)) maßgebend wird.

In Tabelle 11 (Anlage 50) sind die rechnerischen Tragfähigkeiten R_u den tatsächlichen Versuchsergebnissen gegenübergestellt.

Die in der Tabelle angegebenen Werte stellen dabei jeweils die Mittelwerte aus drei Versuchen jeder Versuchsreihe dar. Ebenfalls angegeben sind die errechneten Lochleibungsfestigkeiten.

Bild 69 (Anlage 50) zeigt eine grafische Darstellung des Verhältniswertes $F_{\max,s}/R_{u,\min}$ in Abhängigkeit von der Schlankheit $\lambda = a_m/d$.

Für die Gesamtmenge der 9 Versuche ergaben sich dabei für den Quotienten $F_{\max,s}/R_{u,\min}$:

Mittelwert	1,04
Standardabweichung	0,03
Variationskoeffizient	2,73 %

Ein Vergleich der theoretisch zu erwartenden Bruchursachen mit den tatsächlich aufgetretenen Bruchbildern (siehe Abschnitt 6.1.2) ergibt eine gute Übereinstimmung.

Auch bei den Versuchen mit einschnittigen Druckscherkörpern zeigte sich also eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den theoretisch erwarteten und den tatsächlich aufgetretenen Tragfähigkeiten.

7 ZWEISCHNITTIGE ZUGSCHERKÖRPER MIT BRETTSCHICHTHOLZ UND STIFTEN AUS KPH

Zur Überprüfung der Anwendbarkeit der Theorie auch auf Zugscherkörper wurden ergänzende Versuche mit zweischnittigen, symmetrischen Zugscherkörpern (KPH-Stifte des Herstellers D, Stiftdurchmesser $d = 12 \text{ mm}$, Schlankheiten $\lambda = 2,0/2,0/3,0/3,5$ und $4,0$) durchgeführt.

Versuchsaufbau, Versuchsdurchführungen und Versuchsauswertungen erfolgten wie in Abschnitt 5 beschrieben.

Die Versuchskörper entsprachen Bild 70 (Anlage 51).

Bild 71 (Anlage 51) zeigt eine Fotografie des Versuchsaufbaues.

Die Rohdichten aller zur Herstellung der Zugscherkörper verwendeten Seiten- und Mittelhölzer aus Brettschichtholz wurden bestimmt.

Für die Gesamtmenge (60 Mittel- und Seitenhölzer) aller verwendeten Hölzer ergaben sich dabei für die Rohdichte:

Mittelwert	437	kg/m^3 ,
Standardabweichung	6,3	kg/m^3 ,
Variationskoeffizient	1,4	%.

7.1 VERSUCHSERGEBNISSE

7.1.1 Kraft-Verschiebungs-Diagramme

In den Bildern 72 bis 76 (Anlagen 52 bis 54) sind die Kräfte über die gemittelten Verschiebungen der Seitenhölzer gegenüber dem Mittelholz für jeweils eine Versuchsreihe aufgetragen.

Ebenfalls enthalten sind die absoluten Versuchshöchstlasten F_{\max} sowie die Angaben über Hersteller, erwarteter Bruchlast F_{est} , Durchmesser d des Stiftes und Schlankheit λ der Verbindung.

7.1.2 Versagensursachen

Bei allen geprüften zweischnittigen Zugscherkörpern wurde bis $0,4 \cdot F_{\text{est}}$ ein linearer Anstieg der Verschiebung gemessen. Bei weiterer Laststeigerung trat dann bei allen geprüften Schlankheiten die Bruchursache 3a (s. Abschnitt 3.2) auf.

7.1.3 Verschiebungsmodul

Die Auswertung der Versuche mit zweischnittigen Zugscherkörpern erfolgte nach ISO 6891.

Als charakteristische Größen liegen die Tragfähigkeit der Stifte je Scherfuge $F_{\text{max,s}}$ sowie die Verschiebungsgrößen Anfangsverschiebung v_a , Anfangsverschiebung ohne Schlupf $v_{a,\text{mod}}$, der Anfangsverschiebungsmodul C sowie der Verschiebungsmodul C_{mod} vor.

Tabelle 12 (Anlage 54) enthält die Mittelwerte (Mittel aus drei Versuchen) dieser charakteristischen Größen aller durchgeführten Versuche.

7.2 VERGLEICH DES RECHENMODELLS MIT DEN VERSUCHS- ERGEBNISSEN

Zur Bestimmung der rechnerischen Tragfähigkeiten gelten die in Abschnitt 5.6 getroffenen Annahmen.

Auf der Grundlage dieser Annahmen wurden die Tragfähigkeiten R_u aus den Bruchursachen 2, 4 und 3a ermittelt und der kleinste dieser drei Werte multipliziert mit der Anzahl der Scherfugen als zu erwartende Versuchshöchstlast F_{est} definiert.

Bei der Berechnung dieser Tragfähigkeit R_u ergab sich, daß für alle geprüften Schlankheiten stets die Bruchursache 3a maßgebend wird.

In Tabelle 13 (Anlage 55) sind die rechnerischen Tragfähigkeiten R_u den tatsächlichen Versuchsergebnissen gegenübergestellt.

Die in der Tabelle angegebenen Werte stellen dabei jeweils die Mittelwerte aus drei Versuchen jeder Versuchsreihe dar. Ebenfalls angegeben sind die errechneten Lochleibungsfestigkeiten.

Bild 77 (Anlage 55) zeigt eine grafische Darstellung des Verhältniswertes $F_{\max,s}/R_{u,\min}$ in Abhängigkeit von der Schlankheit $\lambda = a_m/d$.

Für die Gesamtmenge der 15 Versuche ergaben sich dabei für den Quotienten $F_{\max,s}/R_{u,\min}$:

Mittelwert	0,90
Standardabweichung	0,05
Variationskoeffizient	5,28 %

Ein Vergleich der theoretisch zu erwartenden Bruchursachen mit den tatsächlich aufgetretenen Bruchbildern (siehe Abschnitt 6.1.2) ergibt eine gute Übereinstimmung.

Die bei den Versuchen mit zweischnittigen Zugscherkörpern erreichten Höchstlasten lagen im Mittel um 10% unter den errechneten Tragfähigkeiten. Auf diesen Effekt wurde auch von EHLBECK/WERNER in [14] hingewiesen, wo bei vergleichenden Versuchen mit Zug- und Druckscherkörpern mit Stiften aus Stahl eine um 20% reduzierte Tragfähigkeit festgestellt wurde.

8 ZUSAMMENFASSUNG

Zur Ermittlung der Tragfähigkeit und des Verformungsverhaltens von tragenden Holzverbindungen aus Brettschichtholz mit nichtmetallischen Stiften aus Kunstharzpreßholz wurden die Biegefestigkeiten dieser Stifte bestimmt und 128 zweischnittige und 9 einschnittige Druckscherkörper sowie 15 zweischnittige Zugscherkörper nach ISO 6891 geprüft.

Die Bestimmung der Biegefestigkeiten der Stifte ergab, daß das Verhältnis Stützweite/Durchmesser ebensowenig wie die Lage der Furnierschichten zur Belastungsrichtung einen signifikanten Einfluß auf die Biegefestigkeit haben. Das Material verhält sich spröde.

Die Versuchskörper wurden mit den Schlankheiten $\lambda = 1,5$ bis $5,0$ hergestellt. Verbindungen mit größeren Schlankheiten konnten trotz Aufbringen eines Gleitmittels auf die Stifte nicht hergestellt werden.

Die bei den Versuchen nach ISO 6891 aufgetretenen Bruchbilder zeigen, daß die Theorie von Johansen über die Tragfähigkeit von Holzverbindungen mit stiftförmigen mechanischen Verbindungsmitteln die beobachteten Versagensarten nur teilweise beschreibt. Bei einer Vielzahl von Versuchen trat ein einzelner Bruch der Stifte im Mittelholz der zweischnittigen Verbindungen auf. Aufgrund dieser Tatsache wurde die Theorie um eine neu definierte Bruchursache 3a erweitert.

Ein Vergleich der so berechneten Tragfähigkeiten mit den Versuchshöchstlasten ergab bei den ein- und zweischnittigen Druckscherkörpern eine gute Übereinstimmung. Die Tragfähigkeiten der Zugscherkörper lagen dagegen um etwa 10 % unterhalb der errechneten Tragfähigkeiten.

Der Verschiebungsmodul C_{mod} der Stifte aus KPH in derartigen Verbindungen kann nach der Gleichung

$$C_{\text{mod}} = (1,9 \cdot d - 9,5) \cdot \rho_m$$

$$C_{\text{mod}} \text{ in [N/mm]} \quad d \text{ in [mm]} \quad \rho_m \text{ in [kg/m}^3\text{].}$$

bestimmt werden. Dabei entspricht ρ_m der mittleren Rohdichte der miteinander verbundenen Brettschichtholzteile.

9 **SCHRIFTTUM**

- [1] Ehlbeck,J.;Freiseis,R.;Hättich,R.: Entwicklung und Prüfung neuer Verbindungsmittel aus Hartholz, Preßschichtholz und ähnlichen holzhaltigen Werkstoffen für tragende Verbindungen im Holzbau. 1.Abschnitt: Mechanische und physikalische Eigenschaften von ausgewählten holzhaltigen Werkstoffen; Forschungsbericht der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abt. Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen, Universität (TH) Karlsruhe, 1985.
- [2] Kress, F.: Der Zimmerpolier, 11. Aufl.,Otto Maier Verlag, Ravensburg, 1959.
- [3] Stoy, W.: Der Holzbau, 3. Aufl., Berlin, 1942.
- [4] Mönck, W.: Holzbau I, 2. Aufl., VEB Verlag, Berlin, 1961.
- [5] Kollmann, F.: Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe, Bd. II, 2. Aufl., Springer-Verlag, Berlin-Göttingen-Heidelberg, 1955.
- [6] Fuchs, H.: Eisensparende Stabverbindungsmittel für den Holzbau. Bauwelt 28 (1937), Nr. 47, S. 1060/61.
- [7] Trysna, F.: Binder einer Salzspeicheranlage. Der Bauingenieur 20 (1939), Nr. 25/26, S. 333-339.

- [8] Gehri, E.: Betrachtungen zum Tragverhalten von Bolzenverbindungen im Holzbau. Schweizer Ingenieur und Architekt 51/52 (1980), S. 1336-1344.
- [9] Kolb, H.;Epple, A.: Mechanische metallfreie Holzverbindungen, Prüfungsbericht Nr. I.4-34435/Ee/Is der FMPA Baden-Württemberg, Stuttgart, 1982.
- [10] Meyer, A.: Die Tragfähigkeit von Nagelverbindungen bei statischer Belastung, Habilitationsschrift, Technische Hochschule Braunschweig, 1953.
- [11] Johansen,K.W.: Forsoeg med traeforbindelser (in dänisch); Bygningsstatistiske Meddelelser No.2; 1941.
- [12] Moeller, T.: En ny metod foer beraekning av spikfoerband (in dänisch); Chalmers Tekniska Hoegskola Handlingar No.117; 1951.
- [13] Meyer, A.: Die Tragfähigkeit von Nagelverbindungen bei statischer Belastung; Holz als Roh- und Werkstoff 15(2):96-109; 1957.
- [14] Ehlbeck,J.;Werner,H.: Untersuchungen über die Tragfähigkeit von Stabdübelverbindungen; Holz als Roh- und Werkstoff 46:281-288; (1988).
- [15] Whale,L.R.J.;Smith,I.;Larsen,H.J.: Design of nailed and bolted joints - Proposals for the revision of existing formulae in draft EUROCODE 5 and the CIB CODE;W18-Timber structures 20-7-1; 1987.

Tabelle 1: Zusammenstellung des zur Verfügung stehenden Rundmaterials aus Kunstharzpressholz (KPH)

Hersteller (Bezeichnung wie in [1])		C	D
interne Firmenbezeichnung		8121	HI/2/30
Holztyp		Schichtholz	Schichtholz
Biegefestigkeit nach Herstellerangabe	[N/mm ²]	290	270
Biegefestigkeit nach [1]	[N/mm ²]	254	212
ermittelte Biegefestigkeit	[N/mm ²]	236	279

Tabelle 2: Zusammenstellung der an dem Rundmaterial durchgeführten Maßkontrollen

Probenbezeichnung	Hersteller	Solldurchmesser d [mm]	gemessener Durchmesser	
			Kleinstwert	- Größtwert [mm]
C1	C	8,0	8,12	8,15
C2	C	10,0	10,00	10,02
C3	C	12,0	12,13	12,18
C4	C	16,0	16,12	16,17
D1	D	8,0	8,13	8,16
D2	D	10,0	9,97	10,00
D3	D	12,0	12,09	12,15
D4	D	20,0	20,07	20,14

Tabelle 3:

Versuche zur Bestimmung der Biegefestigkeit des Rundmaterials unter Variation des Verhältnisses l_s/d
Vorversuche mit Stabdübeln $\varnothing 12$ mm (D3)

l_s/d	Versuchsnummer	Bruchlast F_{\max} [kN]	Bruchmoment M_{\max} [Nmm]	Biegefestigkeit β_B [N/mm ²]
7,5	1	2180	49050	289
7,5	2	2240	50400	297
7,5	3	2350	52875	312
7,5	4	2450	55125	323
7,5	5	2100	47250	279
7,5	6	2290	51525	304
7,5	7	2310	51975	306
7,5	8	2190	49275	290
7,5	9	2160	48600	286
7,5	10	2460	55350	326
Mittelwert		2273	51143	301
Standardabweichung		122	2737	16
Variationskoeffizient [%]				5,4
10,0	1	1700	51000	301
10,0	2	1770	53100	313
10,0	3	1690	50700	290
10,0	4	1640	49200	290
10,0	5	1550	46500	274
10,0	6	1740	52200	308
10,0	7	1870	56100	331
10,0	8	1940	58200	343
10,0	9	1800	54000	318
10,0	10	1860	55800	329
Mittelwert		1756	52680	311
Standardabweichung		117	3513	21
Variationskoeffizient [%]				6,7
12,5	1	1250	46875	276
12,5	2	1470	55125	325
12,5	3	1430	53625	316
12,5	4	1580	59250	349
12,5	5	1480	55500	327
12,5	6	1420	53250	314
12,5	7	1530	57375	338
12,5	8	1500	56250	332
12,5	9	1410	52875	312
12,5	10	1440	54000	318
Mittelwert		1451	54413	321
Standardabweichung		88	3309	20
Variationskoeffizient [%]				6,1

Tabelle 3:

Fortsetzung
 Versuche zur Bestimmung der Biegefestigkeit des Rundmaterials unter Variation
 des Verhältnisses l_s/d
 Vorversuche mit Stabdübeln \varnothing 12 mm (D3)

l_s/d	Versuchs- nummer	Bruchlast F_{\max} [kN]	Bruchmoment M_{\max} [Nmm]	Biegefestigkeit β_B [N/mm ²]
15,0	1	1210	54450	321
15,0	2	1040	46800	276
15,0	3	1160	52200	308
15,0	4	1030	46350	273
15,0	5	1090	49050	289
15,0	6	1060	47700	281
15,0	7	1090	49050	289
15,0	8	1060	47700	281
15,0	9	1150	51750	305
15,0	10	1120	50400	297
Mittelwert		1101	49545	292
Standardabweichung		58	2619	15
Variationskoeffizient [%]				5,3
20,0	1	824	49440	291
20,0	2	778	46680	275
20,0	3	774	46440	274
20,0	4	768	46080	272
20,0	5	740	44400	262
20,0	6	780	46800	276
20,0	7	874	52440	309
20,0	8	804	48240	284
20,0	9	880	52800	311
20,0	10	790	47400	279
Mittelwert		801	48072	283
Standardabweichung		46	2738	16
Variationskoeffizient [%]				5,7

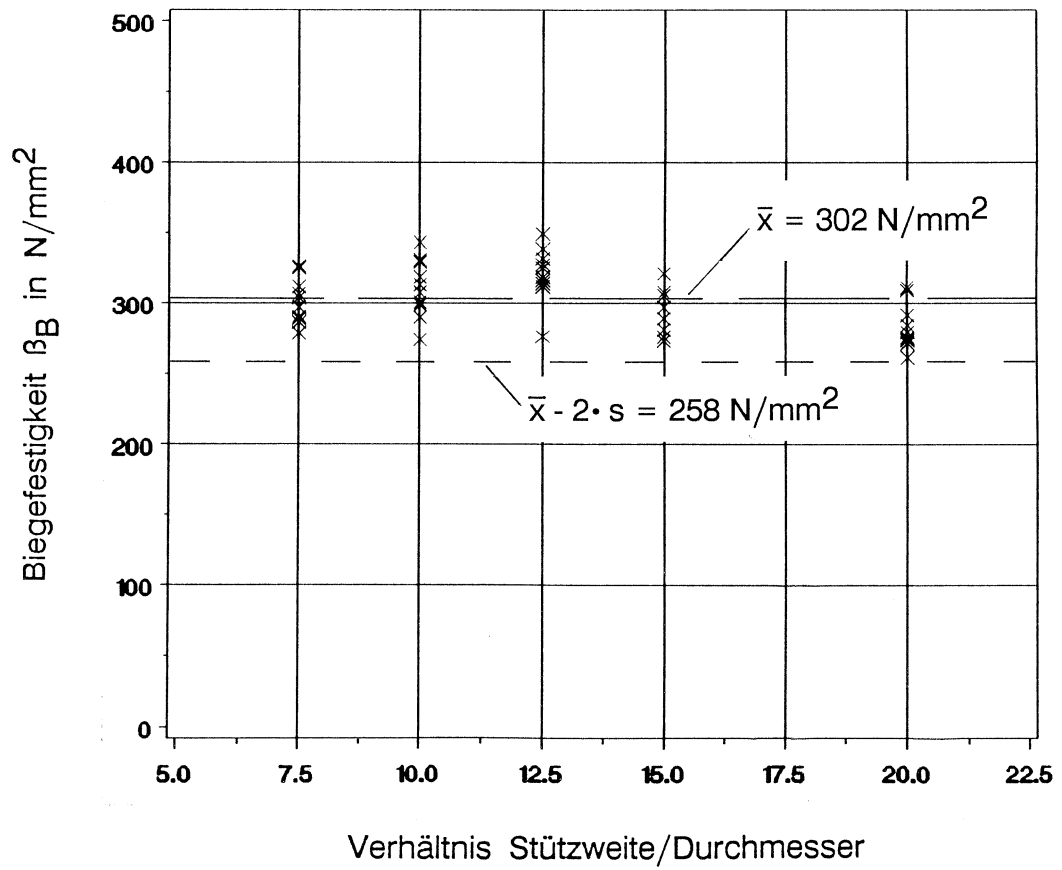


Bild 1:

Biegefestigkeit des Rundmaterials in Abhängigkeit vom Verhältniss l_s/d ;
 Vorversuche mit Stabdübeln $\varnothing 12 \text{ mm}$ (D3)

Tabelle 4: Versuche zur Bestimmung der Biegefestigkeit des Rundmaterials unter Variation des Winkels zwischen Furnierebene und Belastungsrichtung
Vorversuche mit Stabdübeln \varnothing 12 mm (D3)

Winkel [°]	Versuchs- nummer	Bruchlast F_{\max} [kN]	Bruchmoment M_{\max} [Nmm]	Biegefestigkeit β_B [N/mm ²]
0	1	824	49440	291
0	2	778	46680	275
0	3	774	46440	274
0	4	768	46080	272
0	5	740	44400	262
0	6	780	46800	276
0	7	874	52440	309
0	8	804	48240	284
0	9	880	52800	311
0	10	790	47400	279
Mittelwert		801	48072	283
Standardabweichung		46	2738	16
Variationskoeffizient [%]				5,7
45	1	836	50160	296
45	2	814	48840	288
45	3	676	40560	239
45	4	710	42600	251
45	5	754	45240	267
45	6	808	48480	286
Mittelwert		766	45980	271
Standardabweichung		64	3828	23
Variationskoeffizient [%]				8,3
90	1	906	54360	320
90	2	820	49200	290
90	3	832	49920	294
90	4	864	51840	306
90	5	816	48960	289
90	6	792	47520	280
Mittelwert		838	50300	297
Standardabweichung		41	2439	14
Variationskoeffizient [%]				4,9

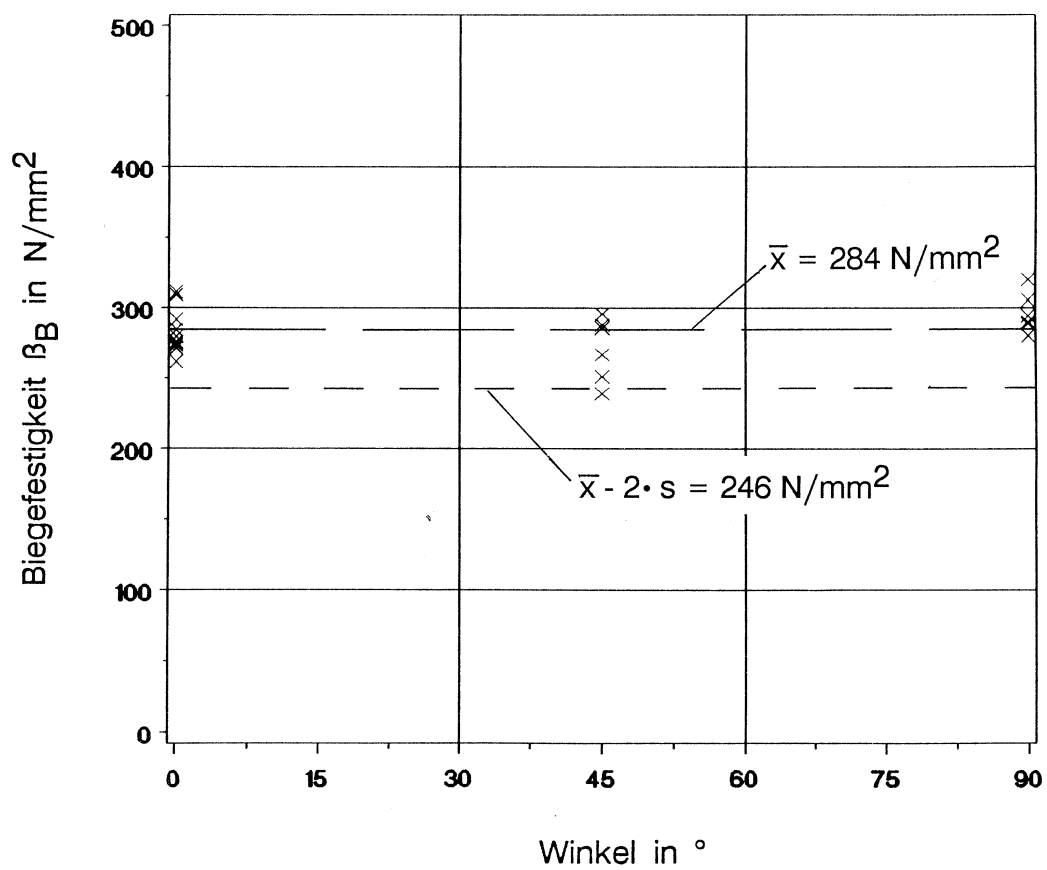


Bild 2:

Biegefestigkeit des Rundmaterials unter Variation
des Winkels zwischen Furnierebene und Belastungsrichtung
Vorversuche mit Stabdübeln $\varnothing 12 \text{ mm}$ (D3)

Tabelle 5: Versuche zur Bestimmung der Biegefestigkeit des Rundmaterials
Hersteller C

Durchmesser d [mm]	Versuchs- nummer	Bruchlast F_{\max} [kN]	Bruchmoment M_{\max} [Nmm]	Biegefestigkeit β_B [N/mm ²]
8	1	290	11600	231
8	2	276	11040	220
8	3	286	11440	228
8	4	344	13760	274
8	5	300	12000	239
8	6	324	12960	258
8	7	322	12880	256
8	8	280	11200	223
8	9	314	12560	250
8	10	354	14160	282
Mittelwert		309	12360	246
Standardabweichung		27	1081	22
Variationskoeffizient [%]				8,7
10	1	432	21600	220
10	2	400	20000	204
10	3	378	18900	193
10	4	516	25800	263
10	5	398	19900	203
10	6	422	21100	215
10	7	406	20300	207
10	8	430	21500	219
10	9	416	20800	212
10	10	528	26400	269
Mittelwert		433	21630	220
Standardabweichung		50	2494	25
Variationskoeffizient [%]				11,5

Tabelle 5:

Fortsetzung

Versuche zur Bestimmung der Biegefestigkeit des Rundmaterials

Hersteller C

Durchmesser d [mm]	Versuchs- nummer	Bruchlast F_{\max} [kN]	Bruchmoment M_{\max} [Nmm]	Biegefestigkeit β_B [N/mm ²]
12	1	624	37440	221
12	2	726	43560	257
12	3	768	46080	272
12	4	748	44880	265
12	5	724	43440	256
12	6	750	45000	265
12	7	630	37800	223
12	8	628	37680	222
12	9	638	38280	226
12	10	744	44640	263
Mittelwert		698	41880	247
Standardabweichung		60	3593	21
Variationskoeffizient [%]				8,6
16	1	1610	128800	320 *
16	2	1060	84800	211
16	3	1240	99200	247
16	4	1200	96000	239
16	5	1160	92800	231
16	6	1080	86400	215
16	7	1140	91200	227
16	8	1250	100000	249
16	9	1150	92000	229
16	10	1210	96800	241
Mittelwert		1166	93244	232
Standardabweichung		66	5308	13
Variationskoeffizient [%]				12,7

* Ausreißer nach Ausreißertest nach DIXON

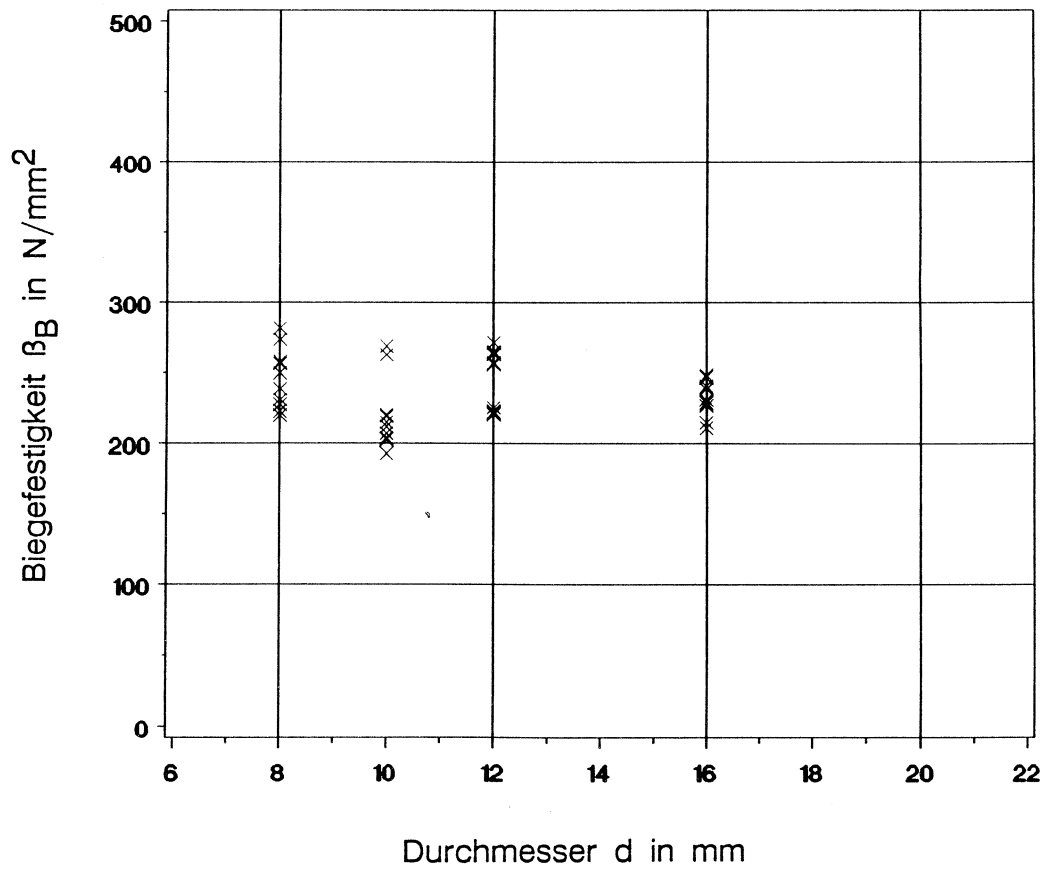


Bild 3:

Biegefestigkeit des Rundmaterials
Hersteller C

Tabelle 6:

Versuche zur Bestimmung der Biegefestigkeit des Rundmaterials
Hersteller D

Durchmesser d [mm]	Versuchs- nummer	Bruchlast F_{\max} [kN]	Bruchmoment M_{\max} [Nmm]	Biegefestigkeit β_B [N/mm ²]
8	1	394	15760	312
8	2	382	15280	304
8	3	394	15760	314
8	4	344	13760	274
8	5	350	14000	279
8	6	352	14080	280
8	7	392	15680	312
8	8	380	15200	302
8	9	398	15920	317
8	10	326	13040	259
Mittelwert		371	14848	295
Standardabweichung		26	1032	21
Variationskoeffizient [%]				7,0
10	1	578	28900	294
10	2	534	26700	272
10	3	500	25000	255
10	4	560	28000	285
10	5	536	26800	273
10	6	518	25900	264
10	7	546	27300	278
10	8	518	25900	264
10	9	518	25900	264
10	10	572	28600	291
Mittelwert		538	26900	274
Standardabweichung		26	1288	13
Variationskoeffizient [%]				4,8

Tabelle 6:

Fortsetzung

Versuche zur Bestimmung der Biegefestigkeit des Rundmaterials

Hersteller D

Durchmesser d [mm]	Versuchs- nummer	Bruchlast F_{\max} [kN]	Bruchmoment M_{\max} [Nmm]	Biegefestigkeit β_B [N/mm ²]
12	1	824	49440	291
12	2	778	46680	275
12	3	774	46440	274
12	4	768	46080	272
12	5	740	44400	262
12	6	780	46800	276
12	7	874	52440	309
12	8	804	48240	284
12	9	880	52800	311
12	10	790	47400	279
Mittelwert		801	48072	283
Standardabweichung		46	2738	16
Variationskoeffizient [%]				5,7
20	1	2150	215000	274
20	2	2030	203000	258
20	3	2110	211000	269
20	4	2210	221000	281
20	5	2210	221000	281
20	6	2140	214000	272
20	7	2060	206000	262
20	8	2210	221000	281
20	9	1910	191000	243
20	10	1740	174000	222
Mittelwert		2077	207700	264
Standardabweichung		152	15181	19
Variationskoeffizient [%]				7,3

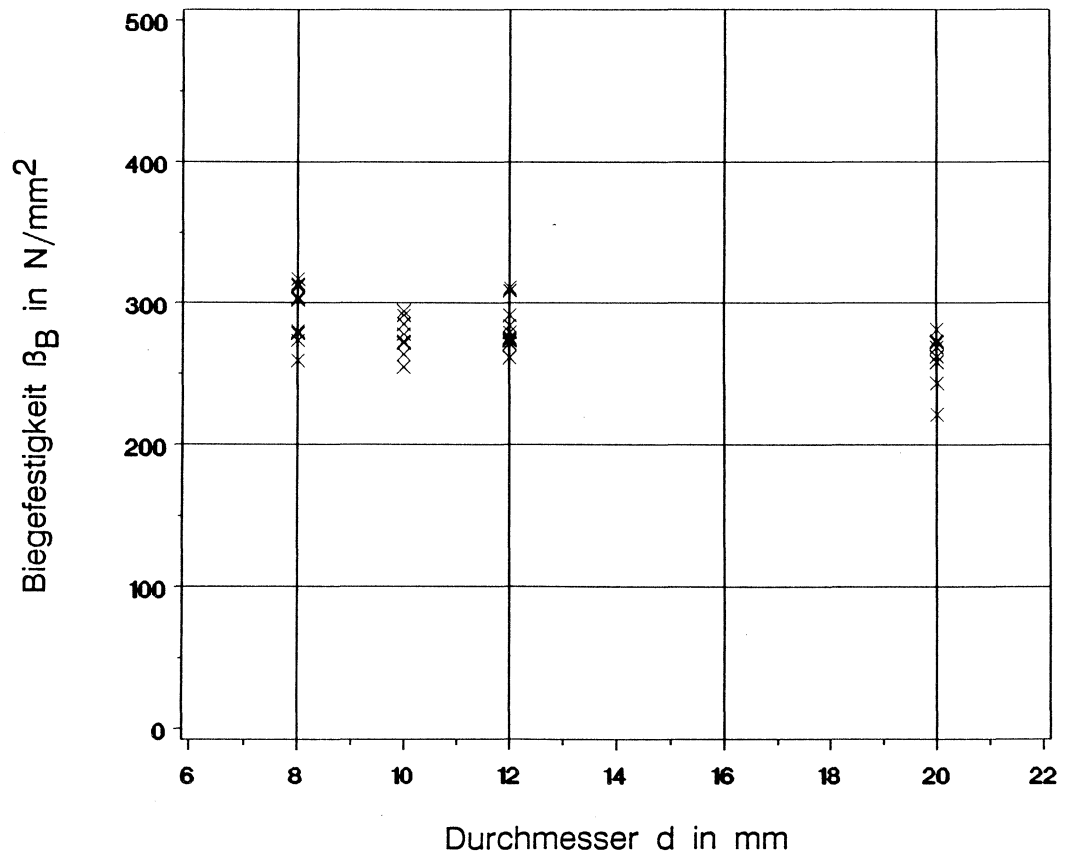


Bild 4:

Biegefestigkeit des Rundmaterials
Hersteller D

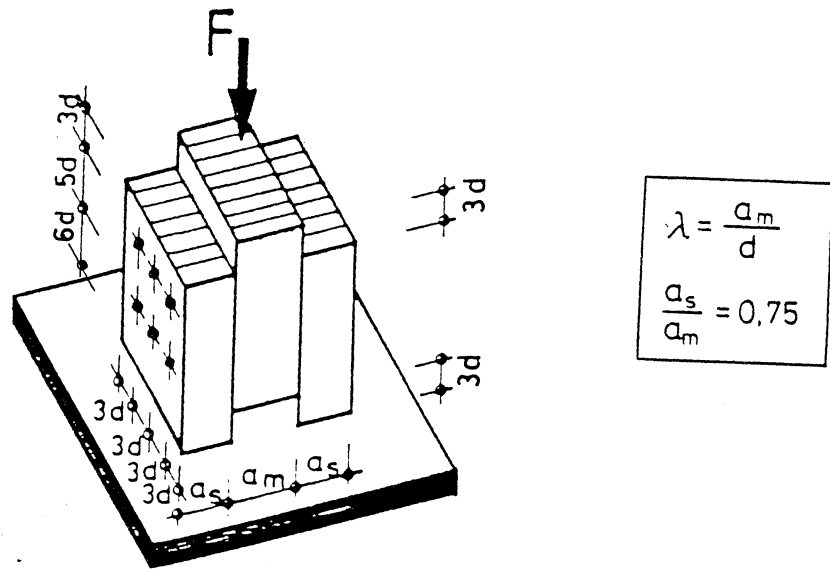


Bild 5:

Abmessungen der Prüfkörper für die Druckscherversuche

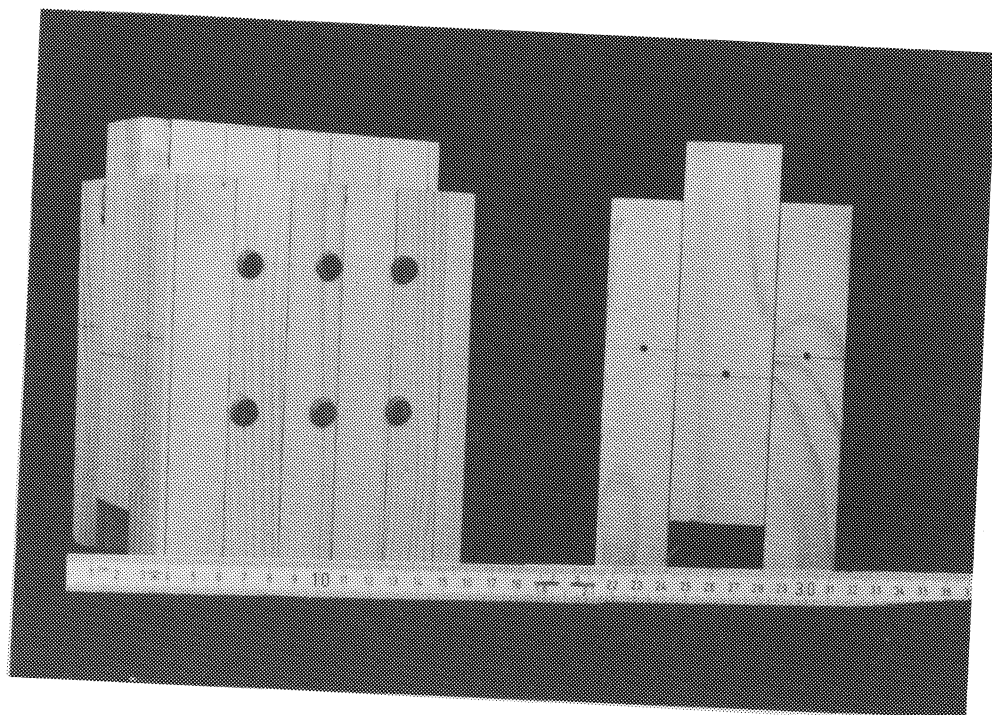


Bild 6:

Prüfkörper für die Druckscherversuche

Tabelle 7: Versuchsprogramm mit zweischnittigen Druckscherkörpern
(3 Prüfkörper je Versuchsreihe)

Proben- bezeichnung	Hersteller	Durchmesser d [mm]	geprüfte Schlankheiten							
			1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
C1	C	8	-	-	-	X	X	X	X	-
C2	C	10	-	X	X	X	X	X	X	-
C3	C	12	X	X	X	X	X	X	-	-
C4	C	16	X	X	X	X	X	-	-	-
D1	D	8	-	-	-	X	X	X	X	-
D2	D	10	-	X	X	X	X	X	X	-
D3	D	12	X	X	X	X	X	X	-	X
D4	D	20	X	-	X	X	X	X	-	-

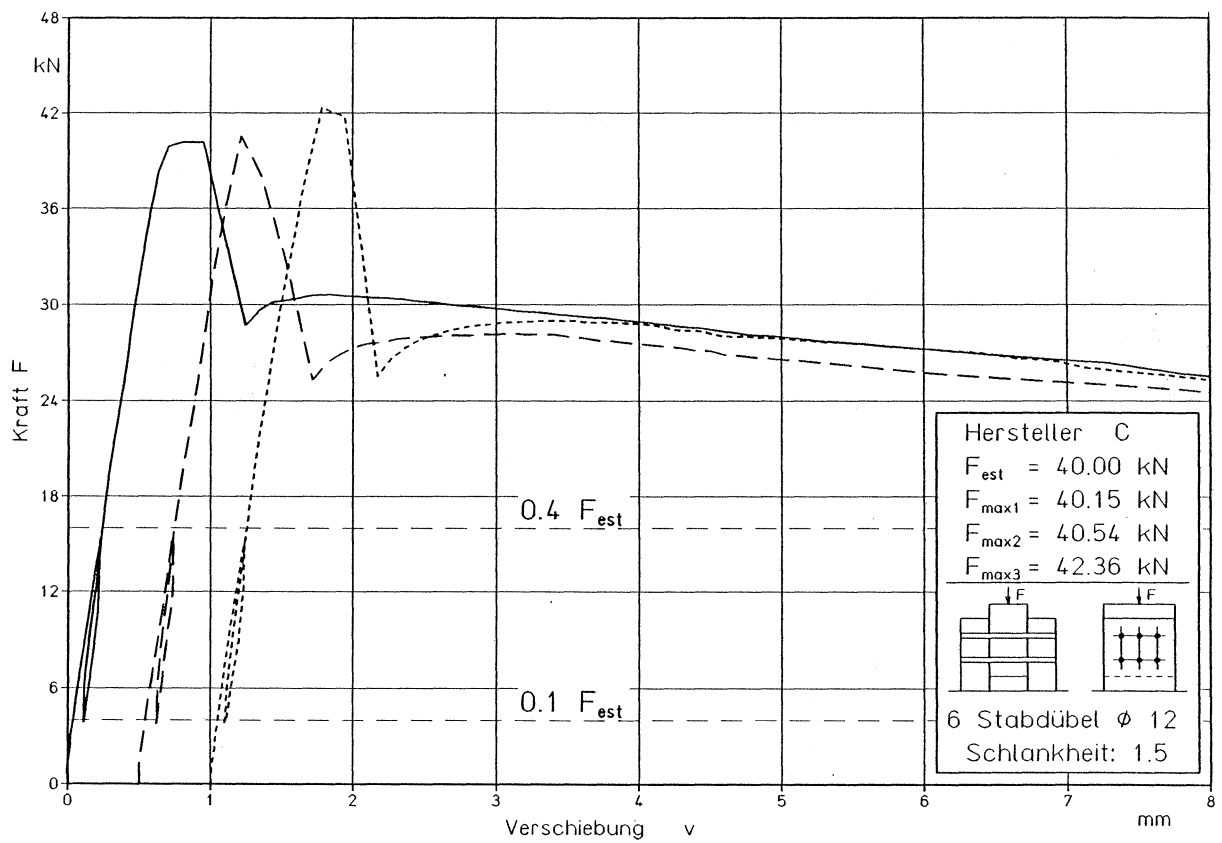


Bild 7: Kraft-Verschiebungs-Diagramme C315

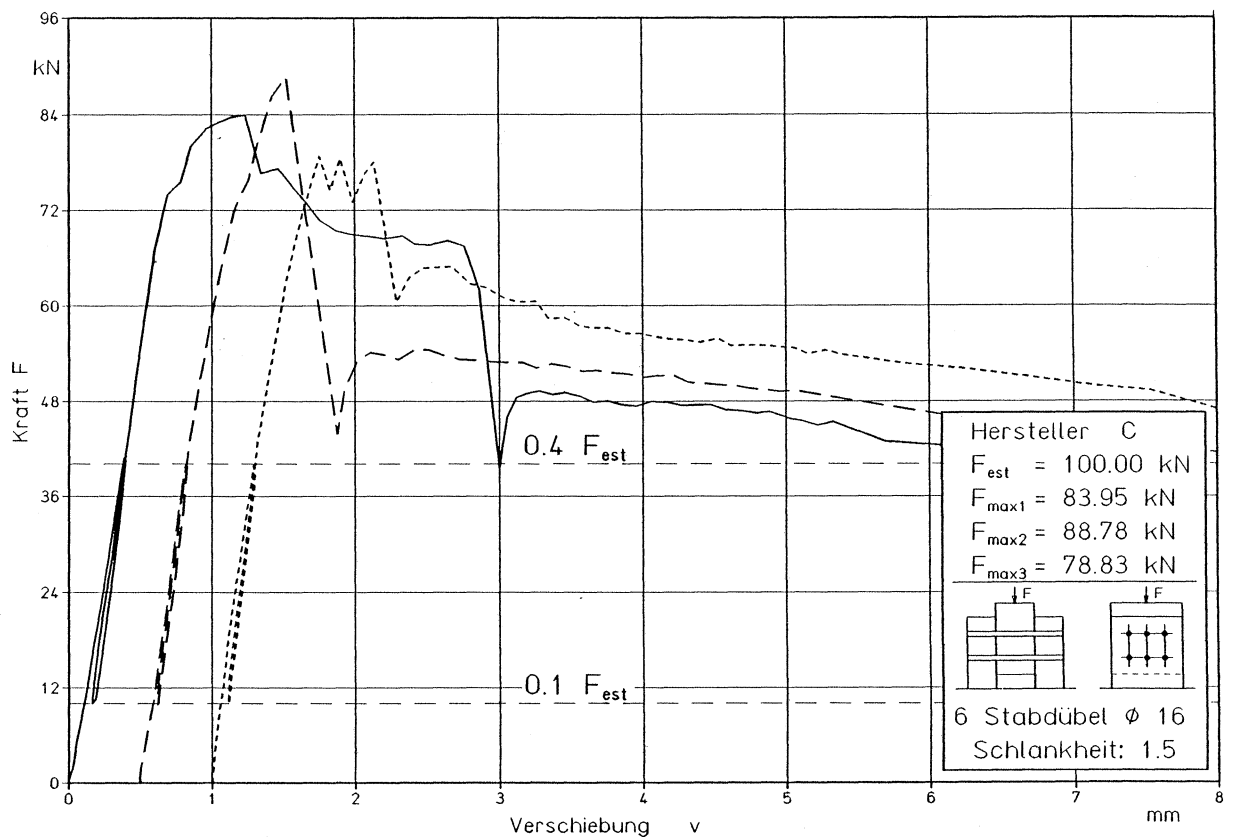


Bild 8: Kraft-Verschiebungs-Diagramme C415

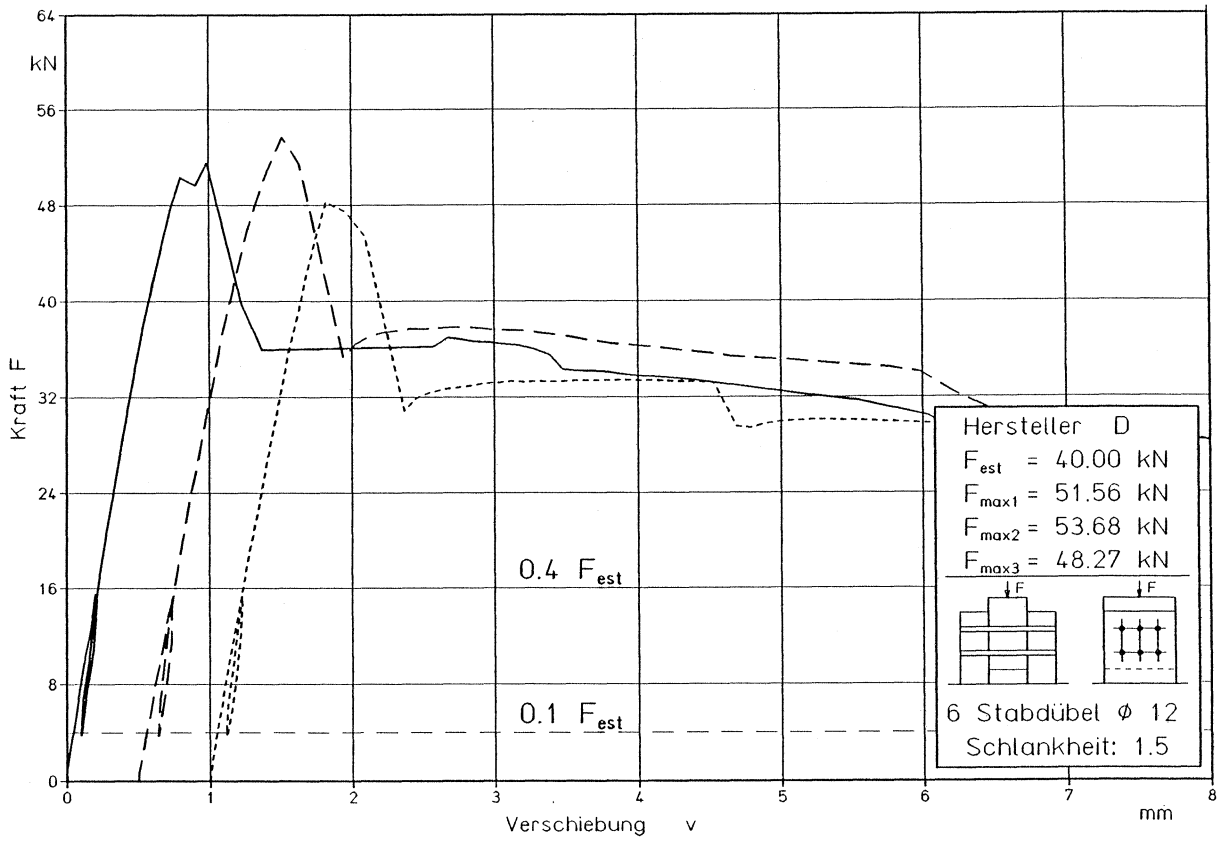


Bild 9: Kraft-Verschiebungs-Diagramme D315

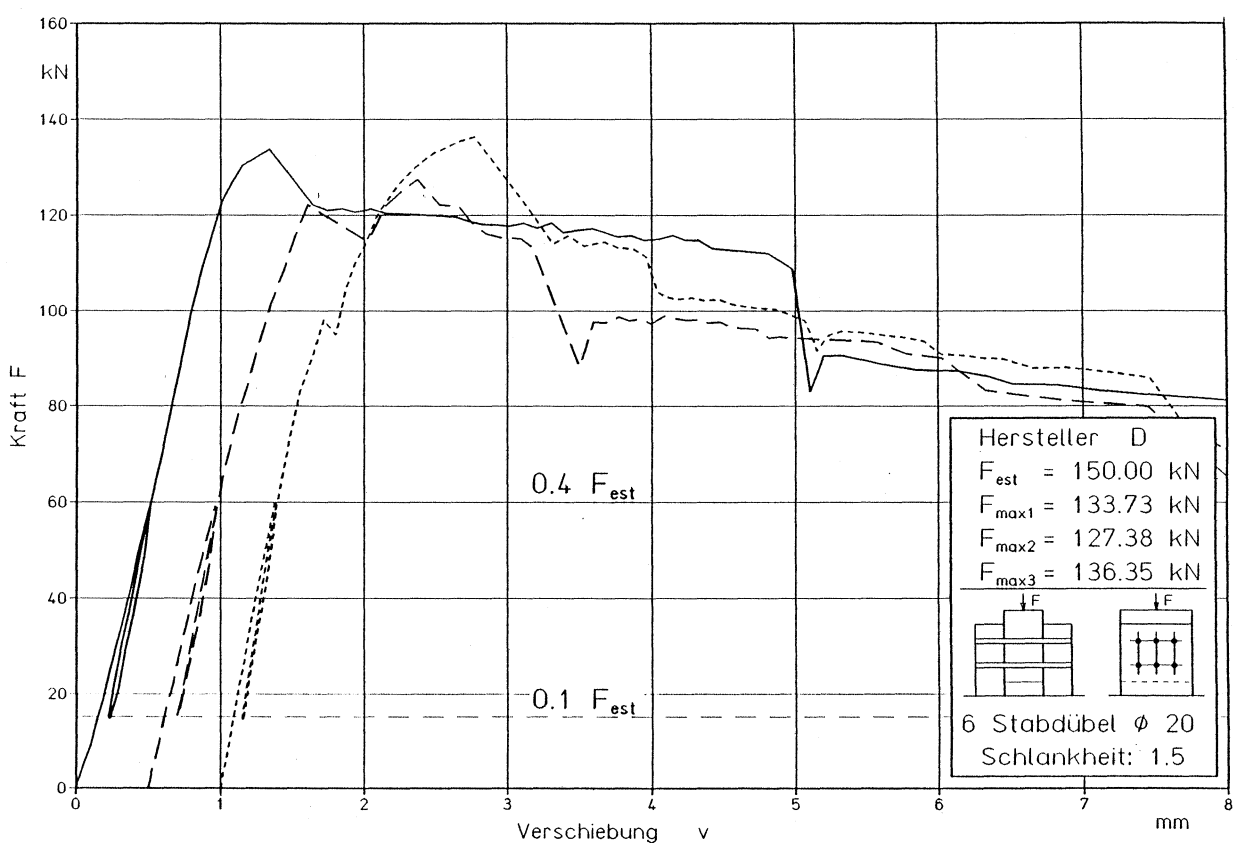


Bild 10: Kraft-Verschiebungs-Diagramme D415

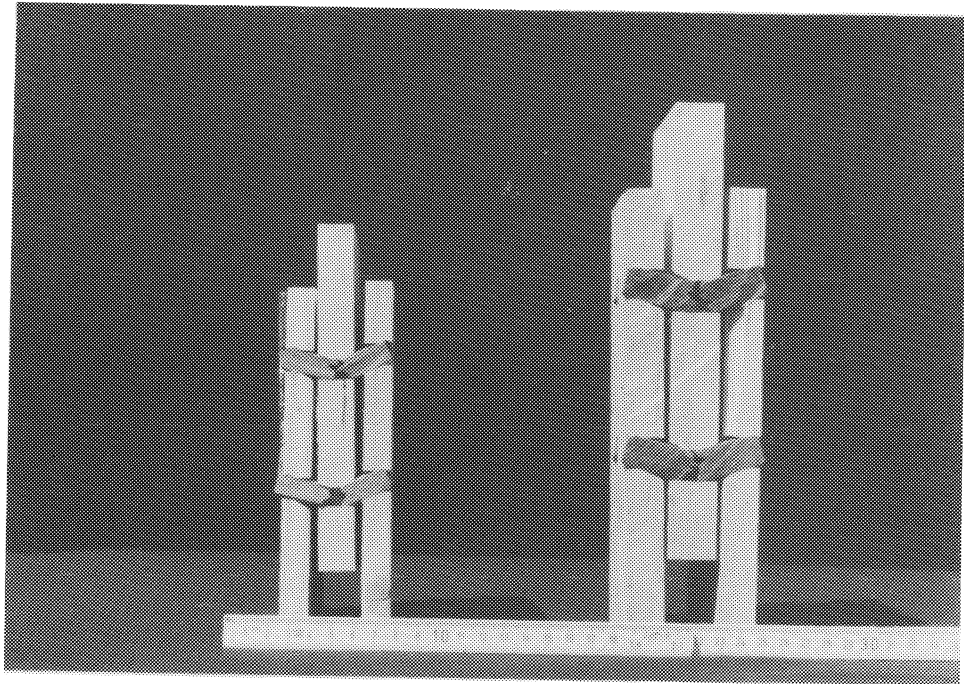


Bild 11: Aufgetrennte Versuchskörper C315 und C415

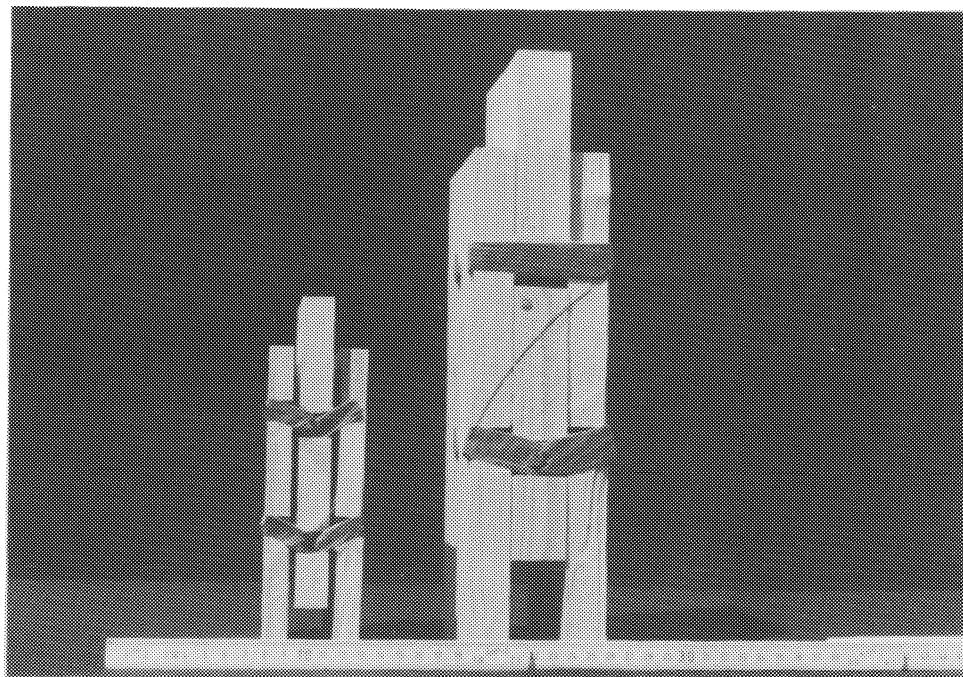


Bild 12: Aufgetrennte Versuchskörper D315 und D415

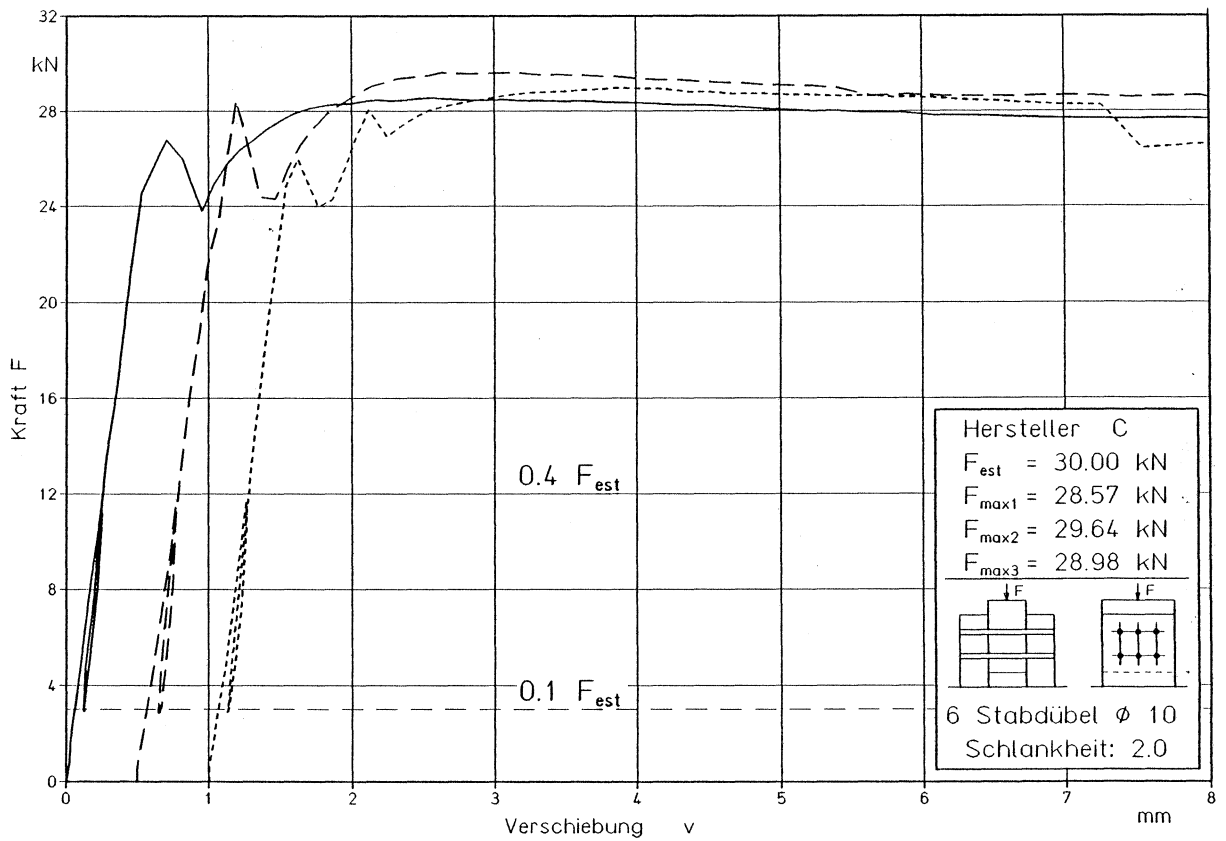


Bild 13: Kraft-Verschiebungs-Diagramme C220

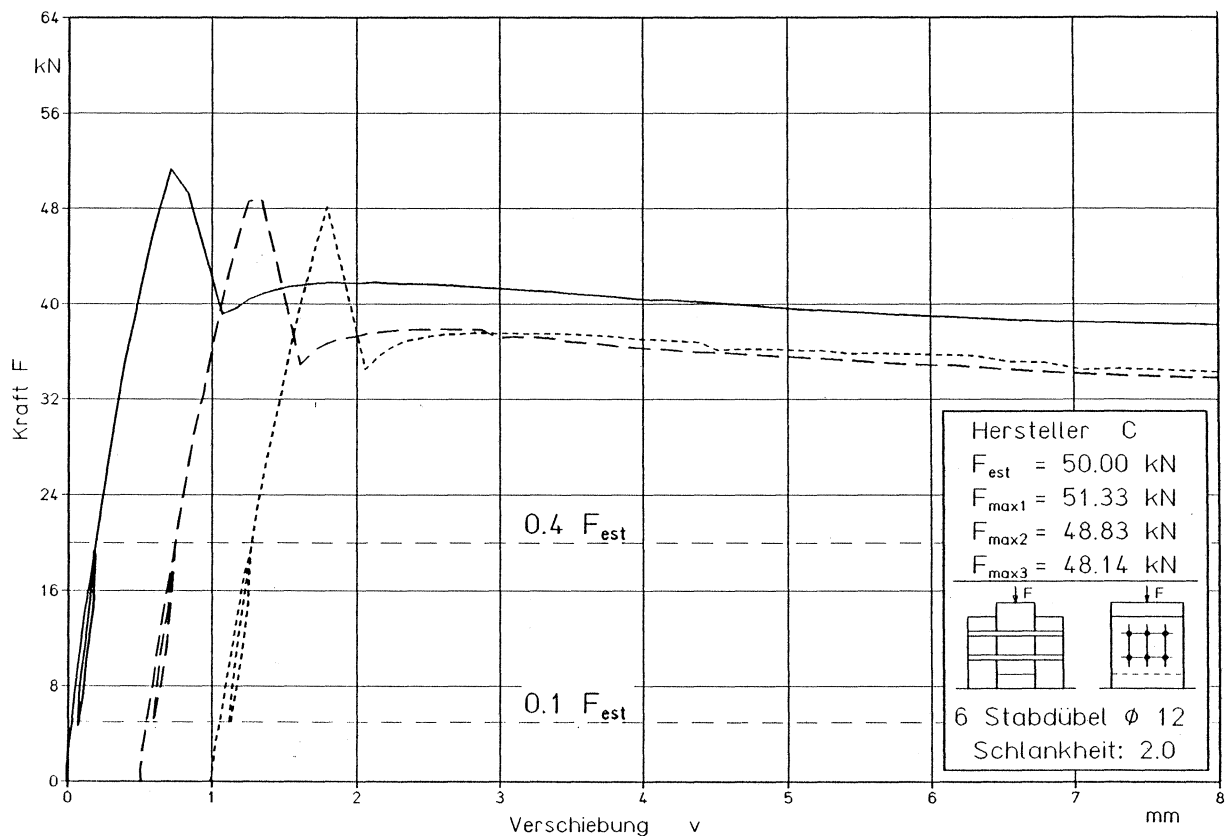


Bild 14: Kraft-Verschiebungs-Diagramme C320

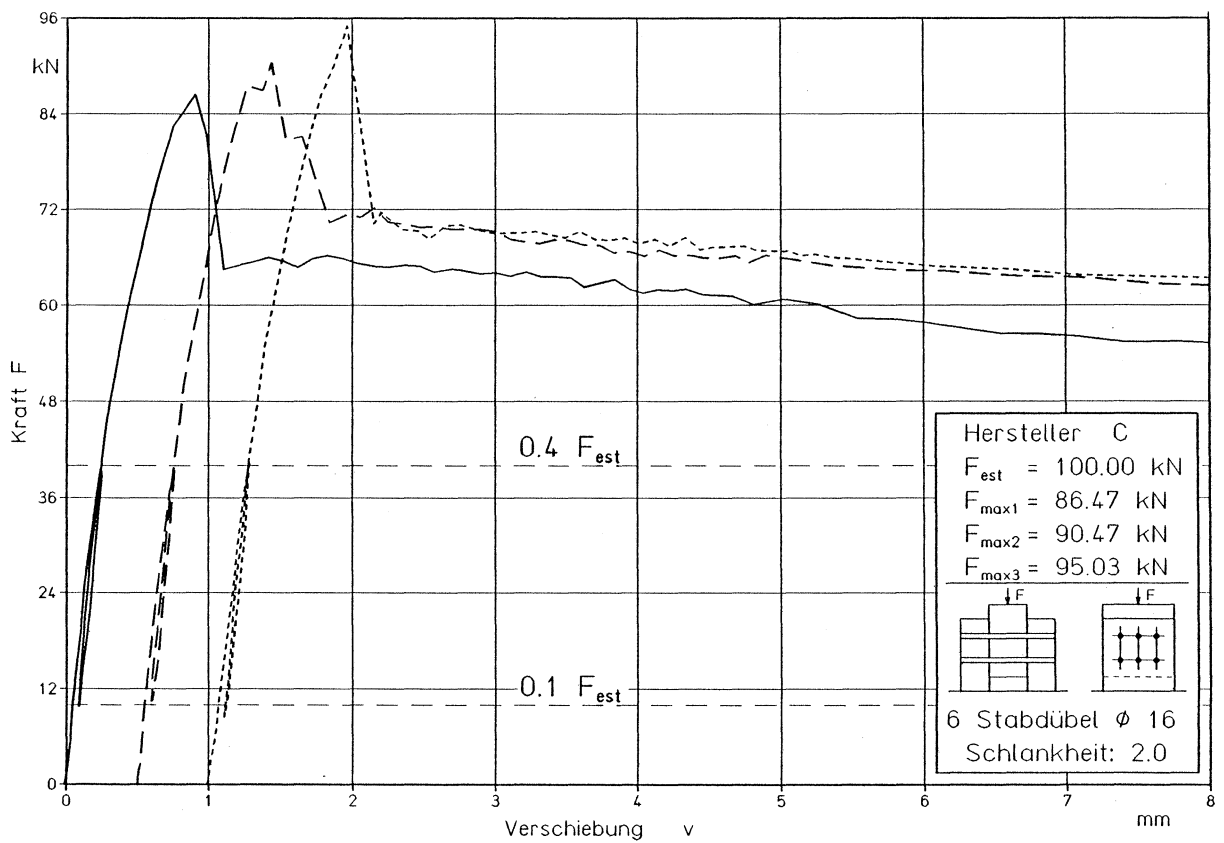


Bild 15: Kraft-Verschiebungs-Diagramme C420

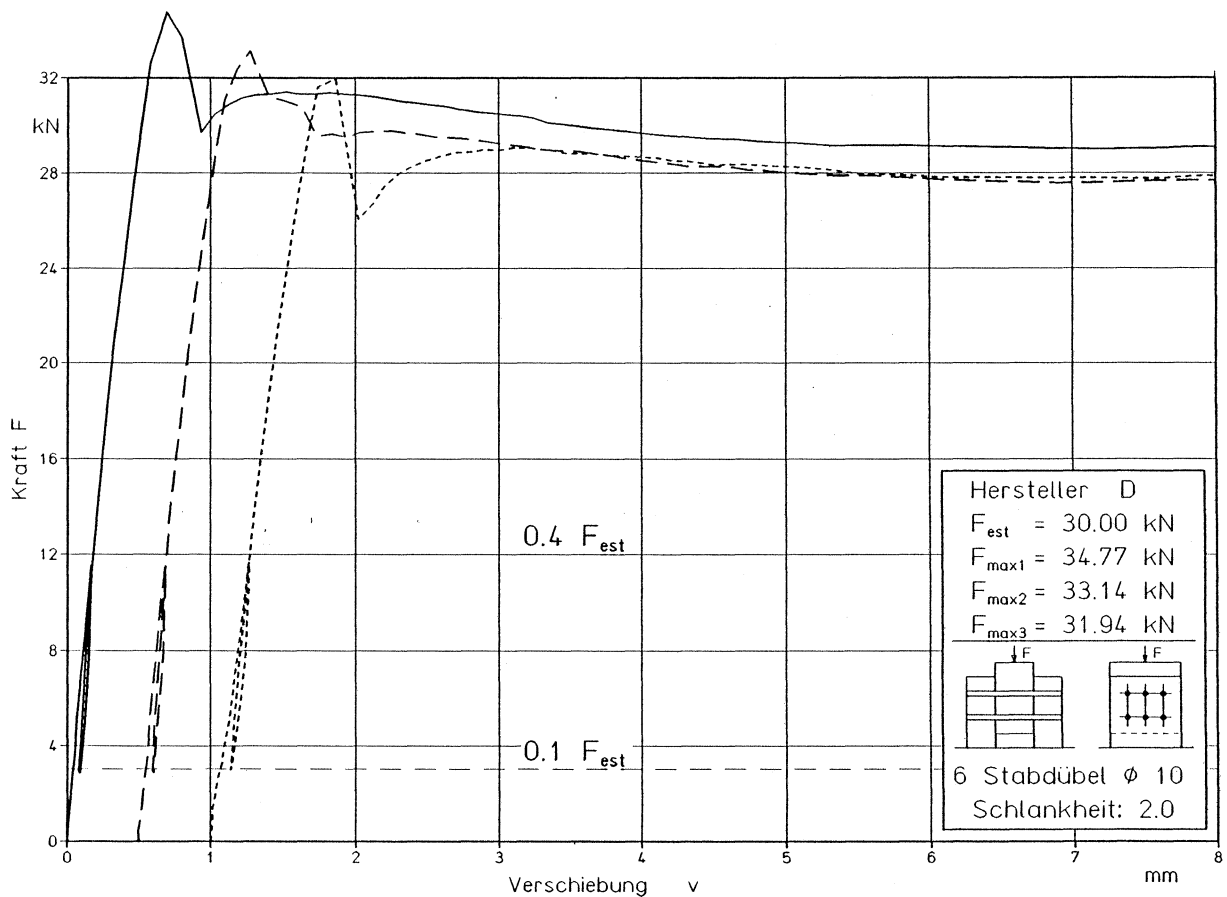


Bild 16: Kraft-Verschiebungs-Diagramme D220

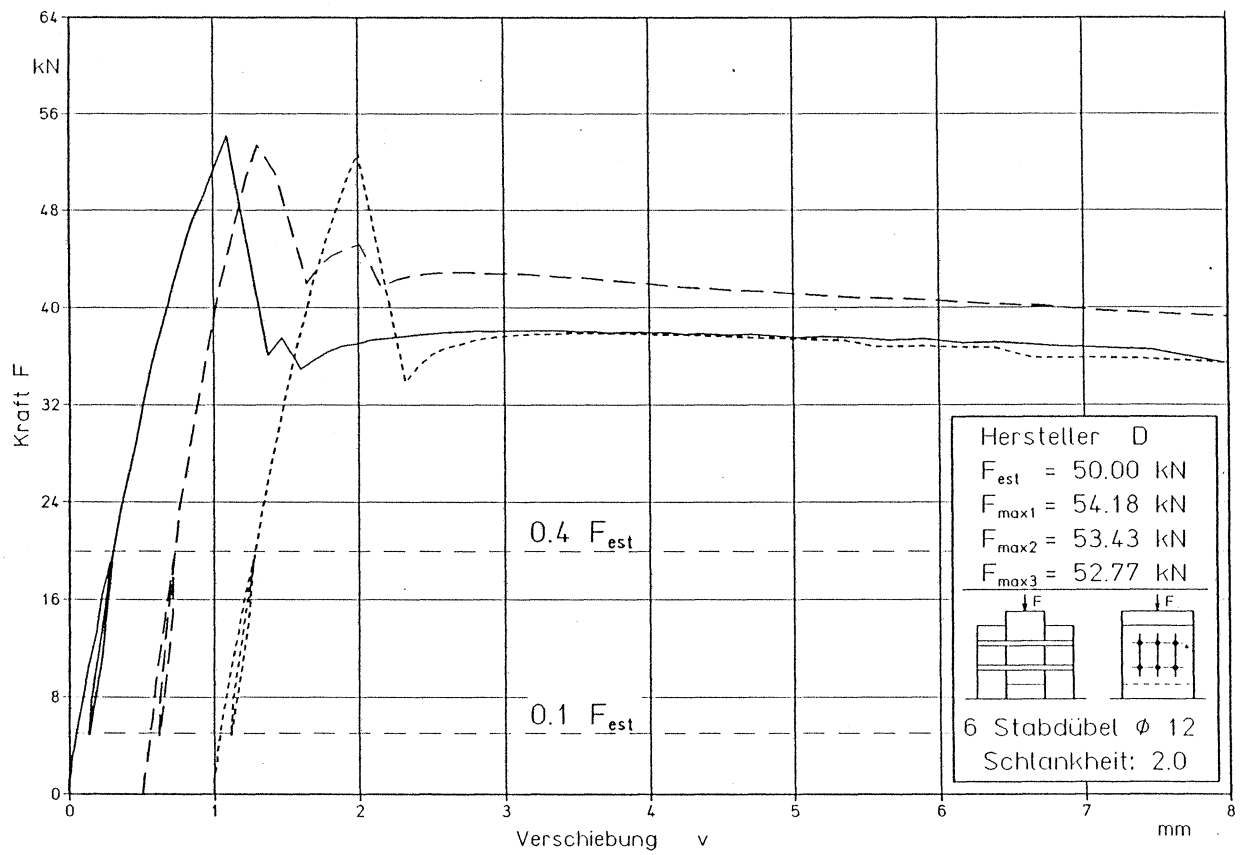


Bild 17: Kraft-Verschiebungs-Diagramme D320

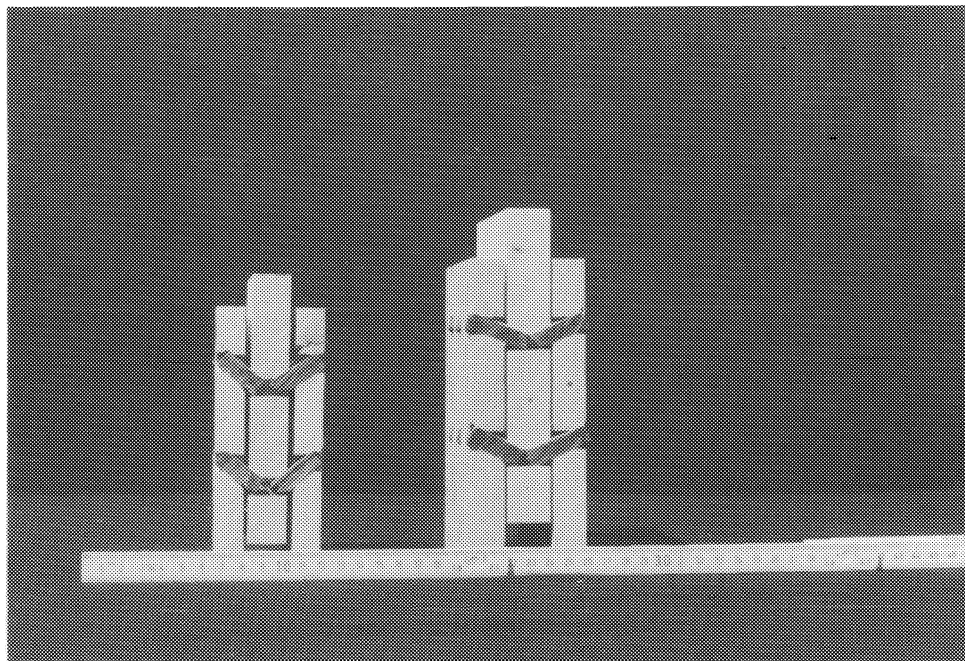


Bild 18:

Aufgetrennte Versuchskörper D220 und D320

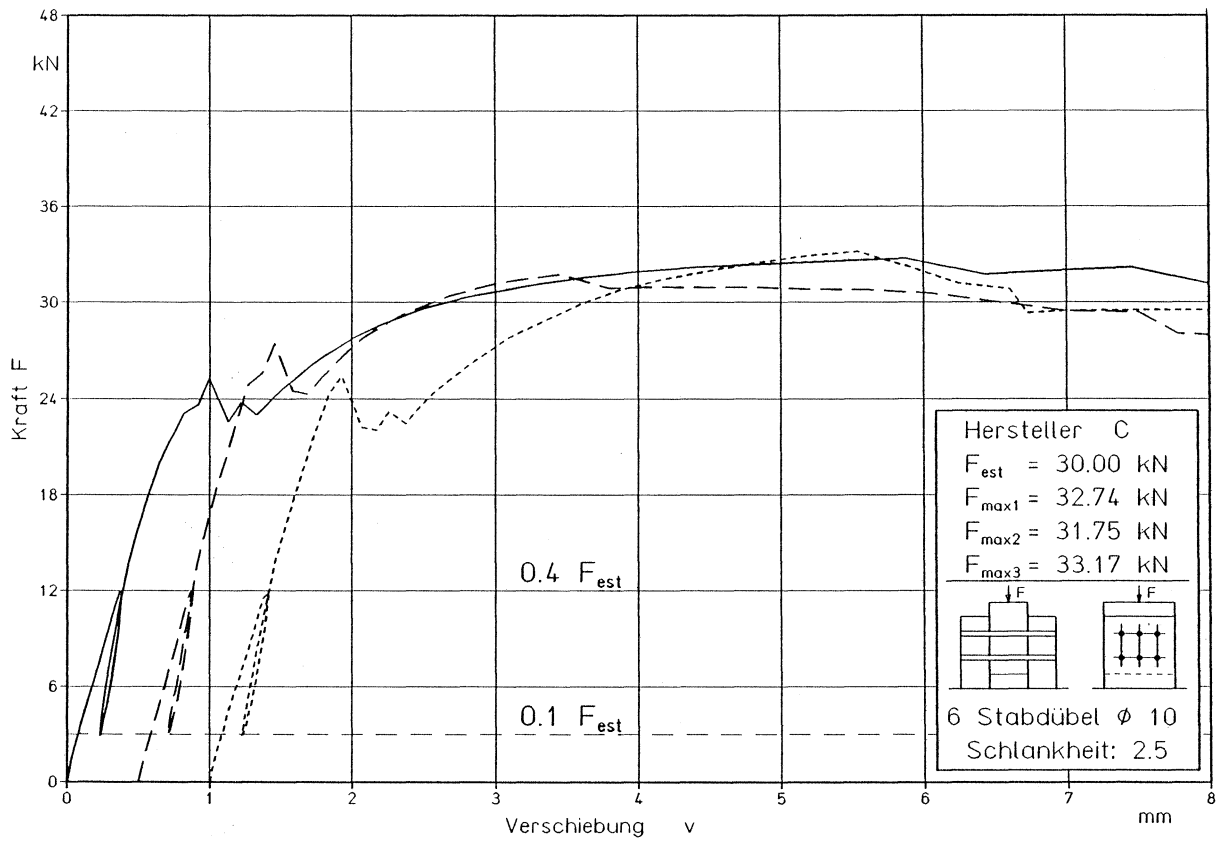


Bild 19: Kraft-Verschiebungs-Diagramme C225

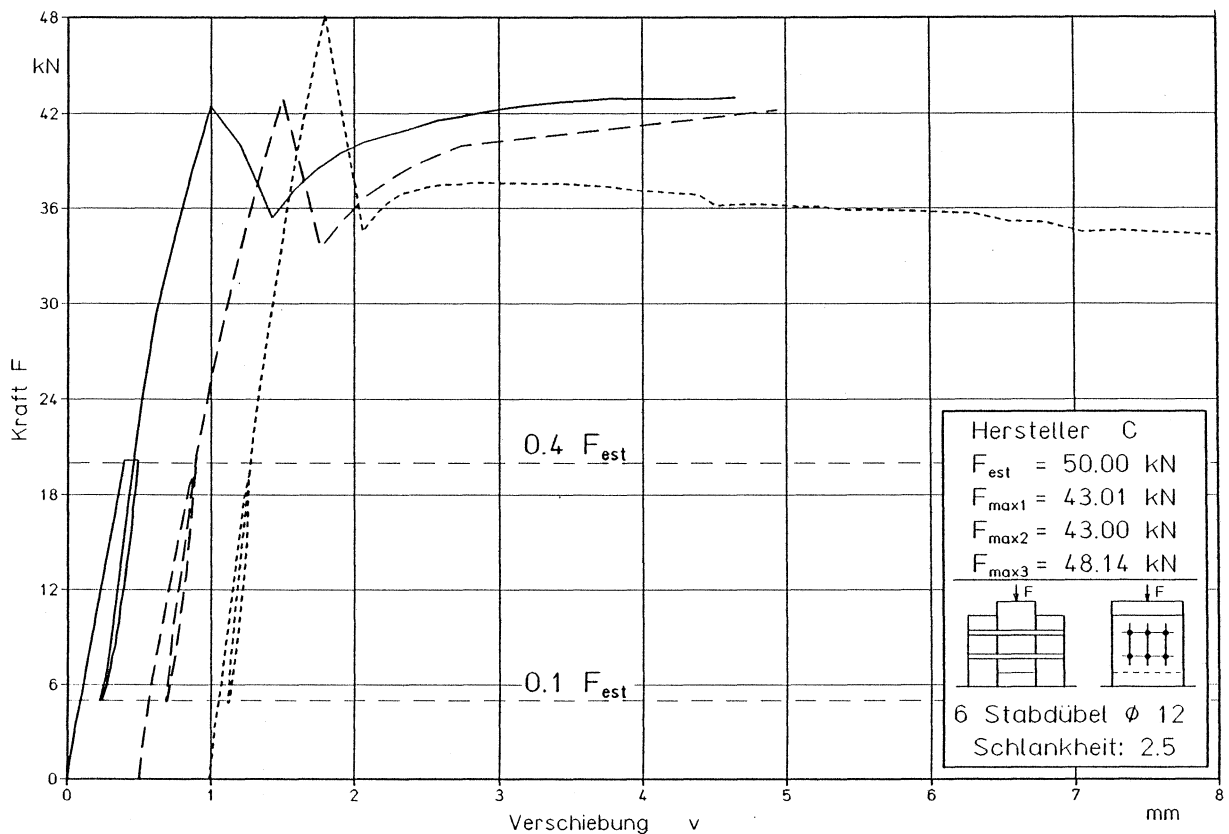


Bild 20: Kraft-Verschiebungs-Diagramme C325

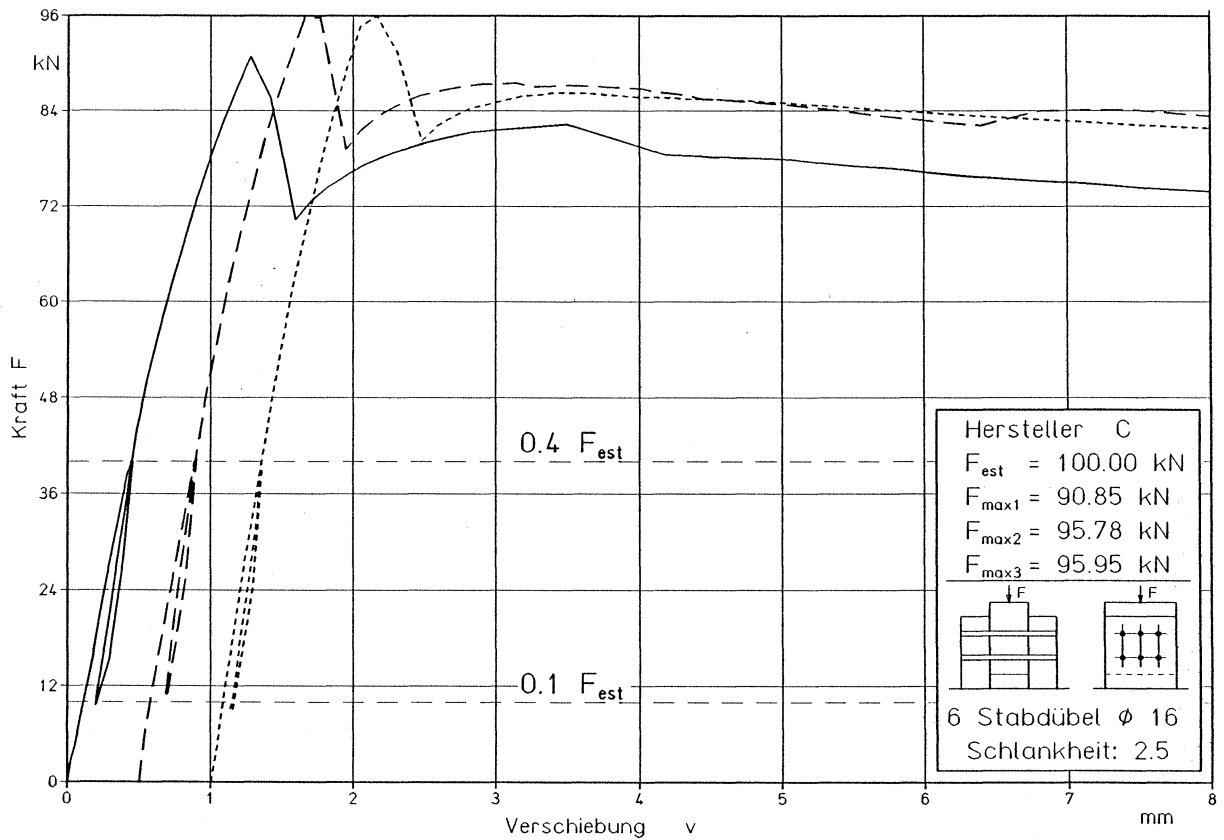


Bild 21: Kraft-Verschiebungs-Diagramme C425

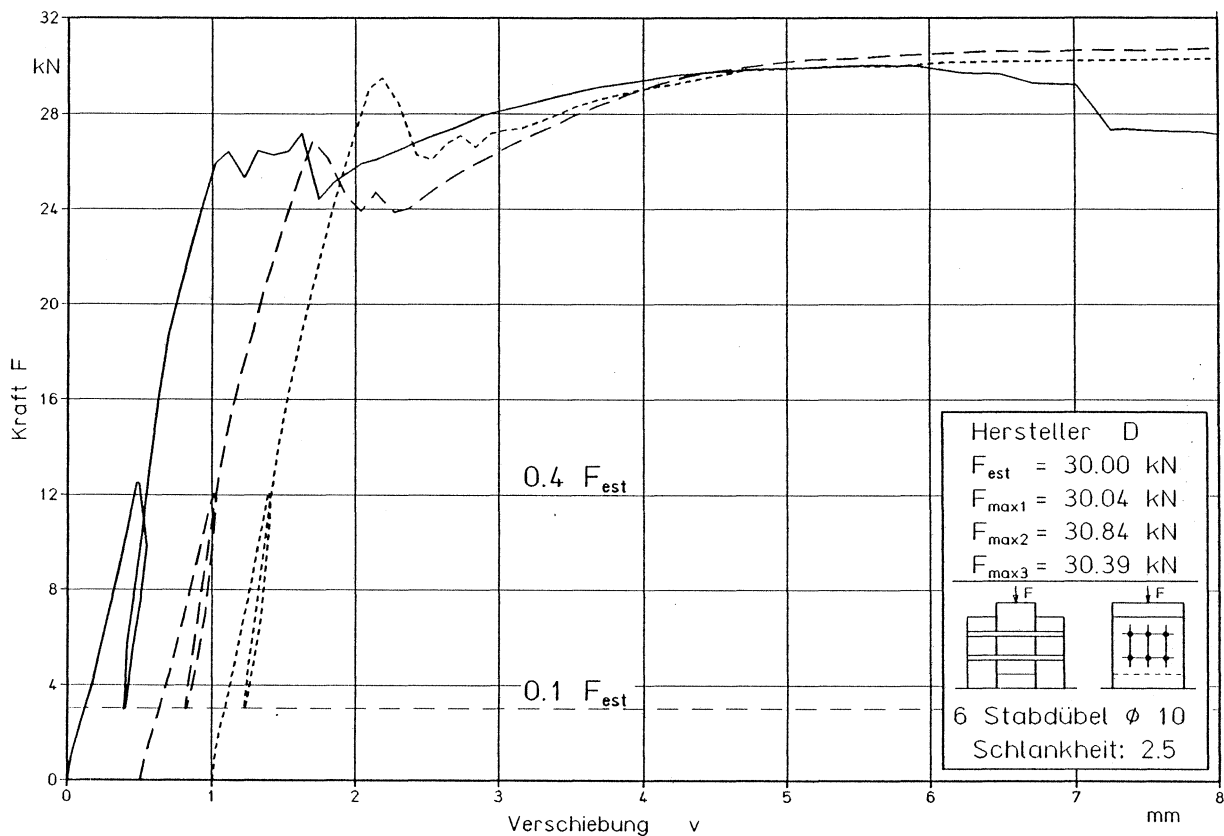


Bild 22: Kraft-Verschiebungs-Diagramme D225

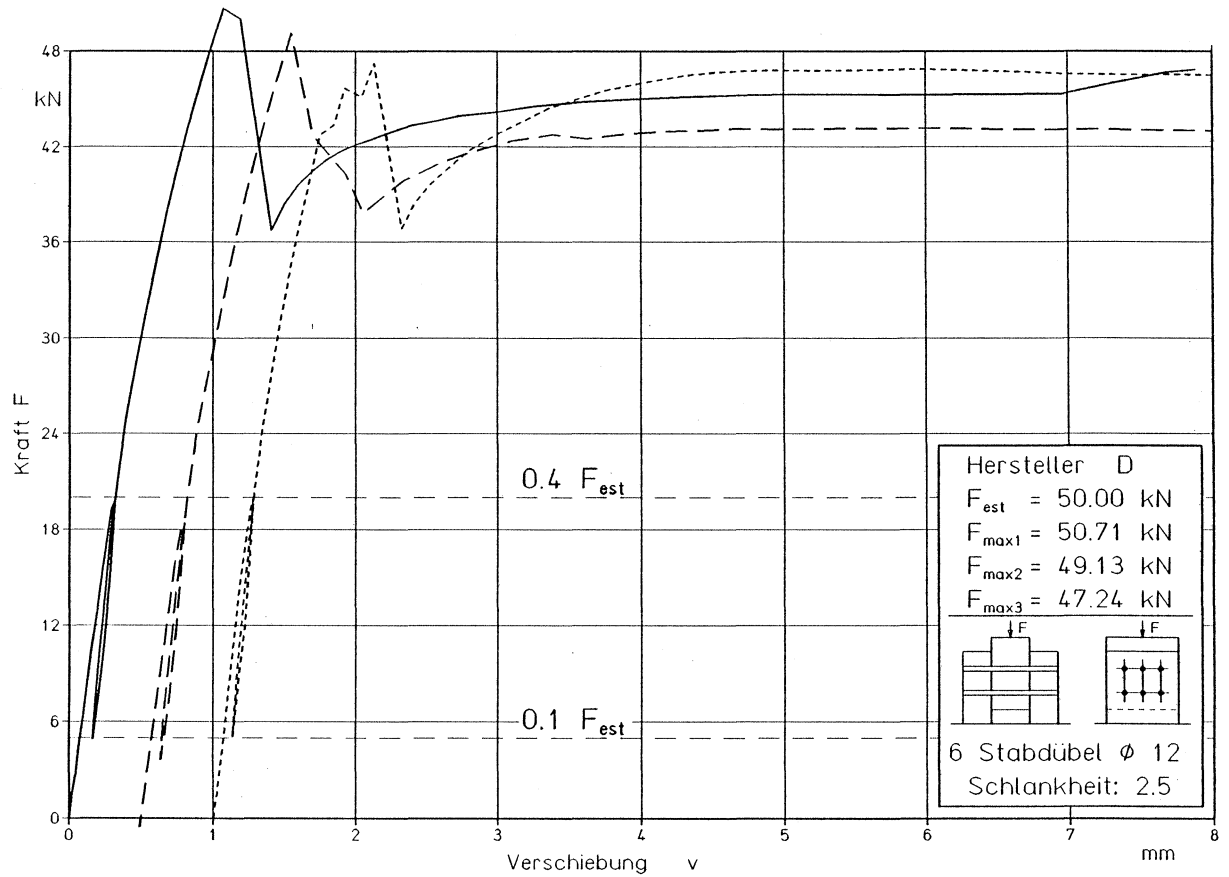


Bild 23: Kraft-Verschiebungs-Diagramme D325

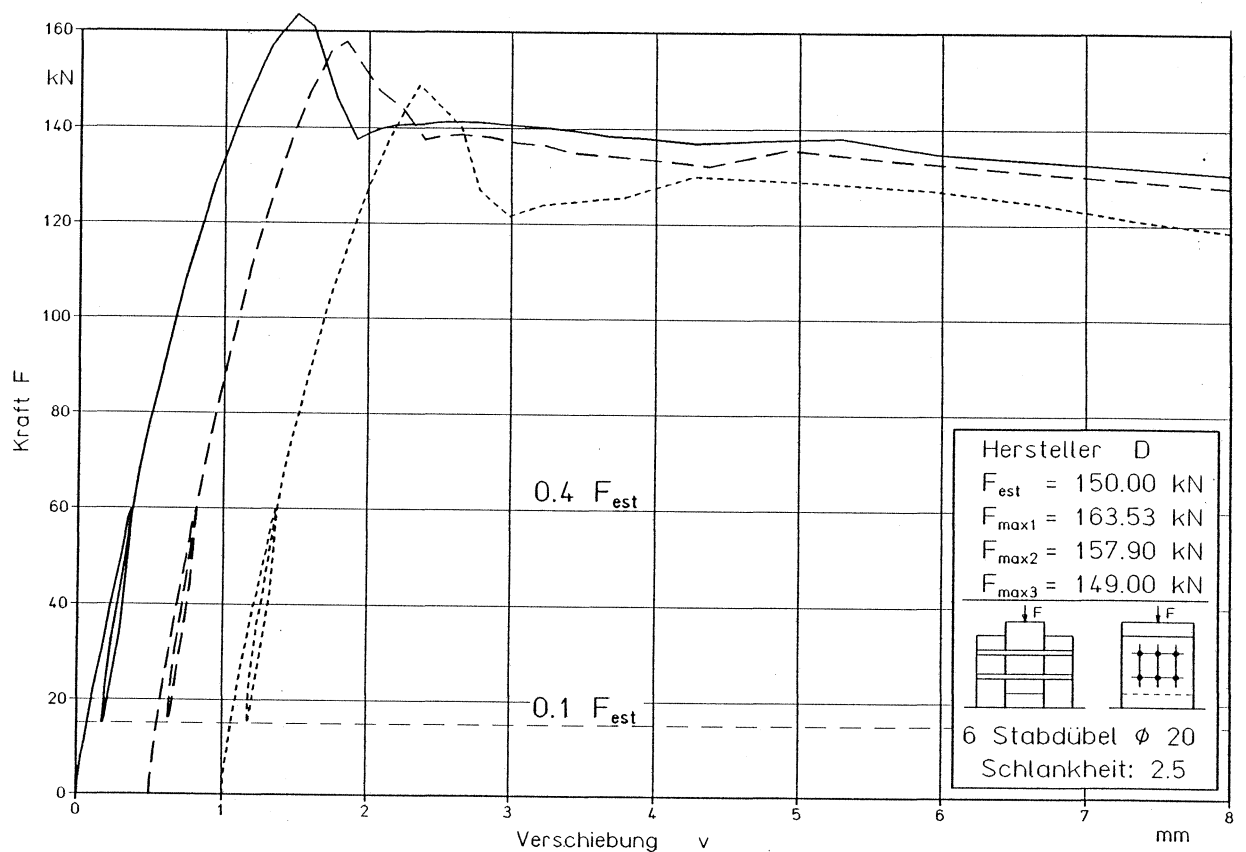


Bild 24: Kraft-Verschiebungs-Diagramme D425

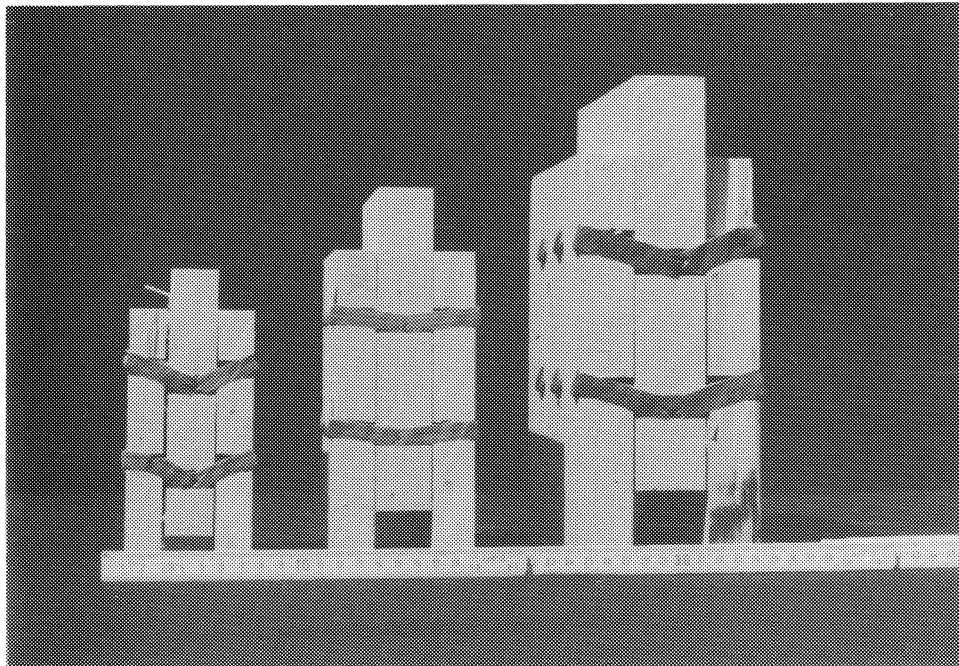


Bild 25:

Aufgetrennte Versuchskörper C225, C325 und C425

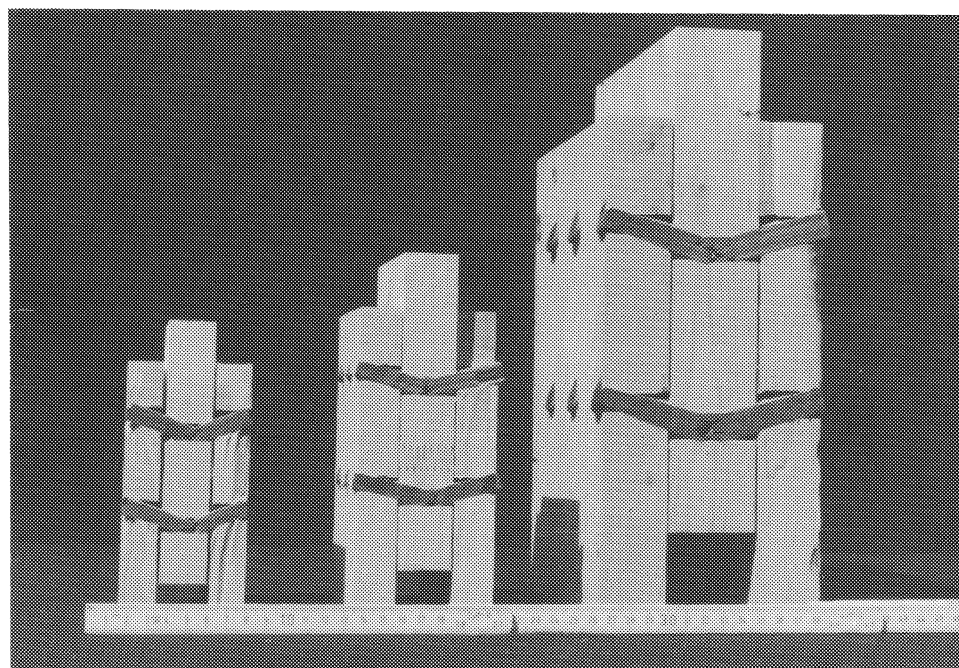


Bild 26:

Aufgetrennte Versuchskörper D225, D325 und D425

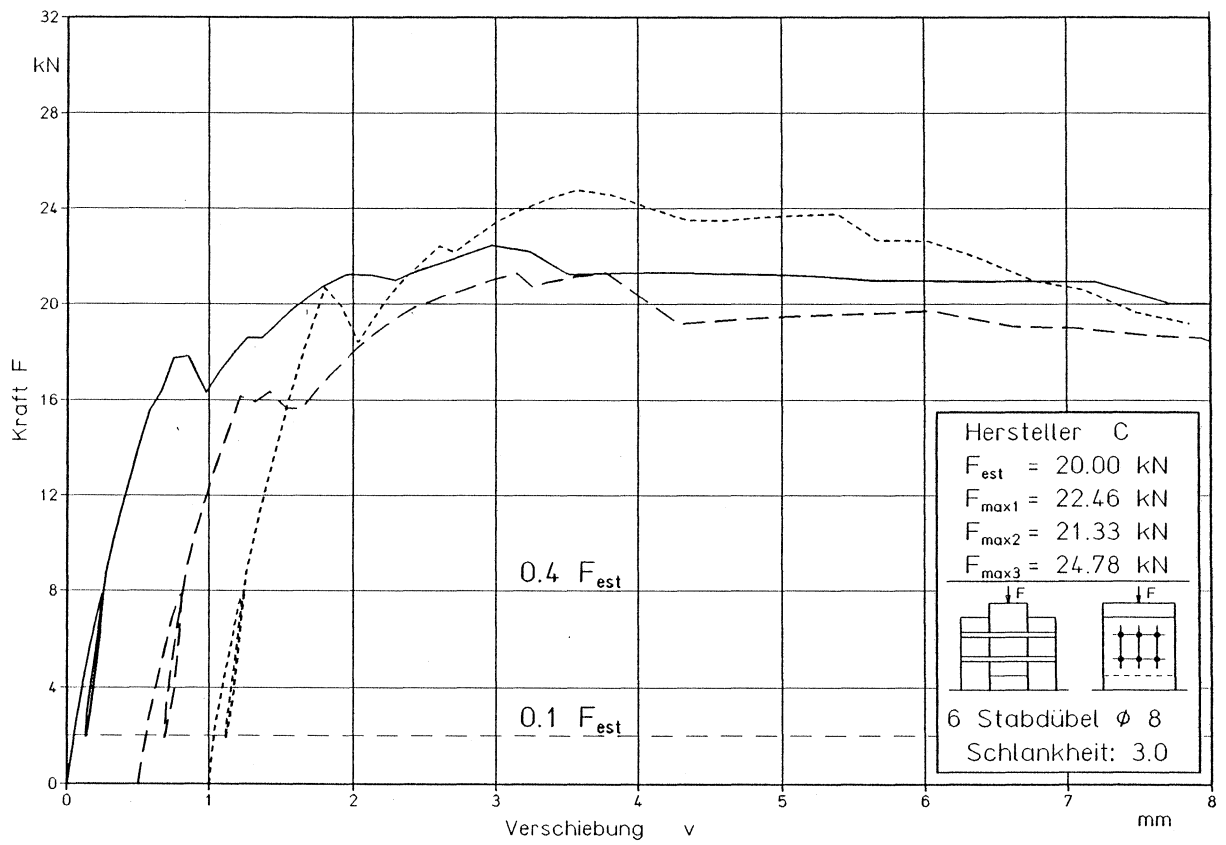


Bild 27: Kraft-Verschiebungs-Diagramme C130

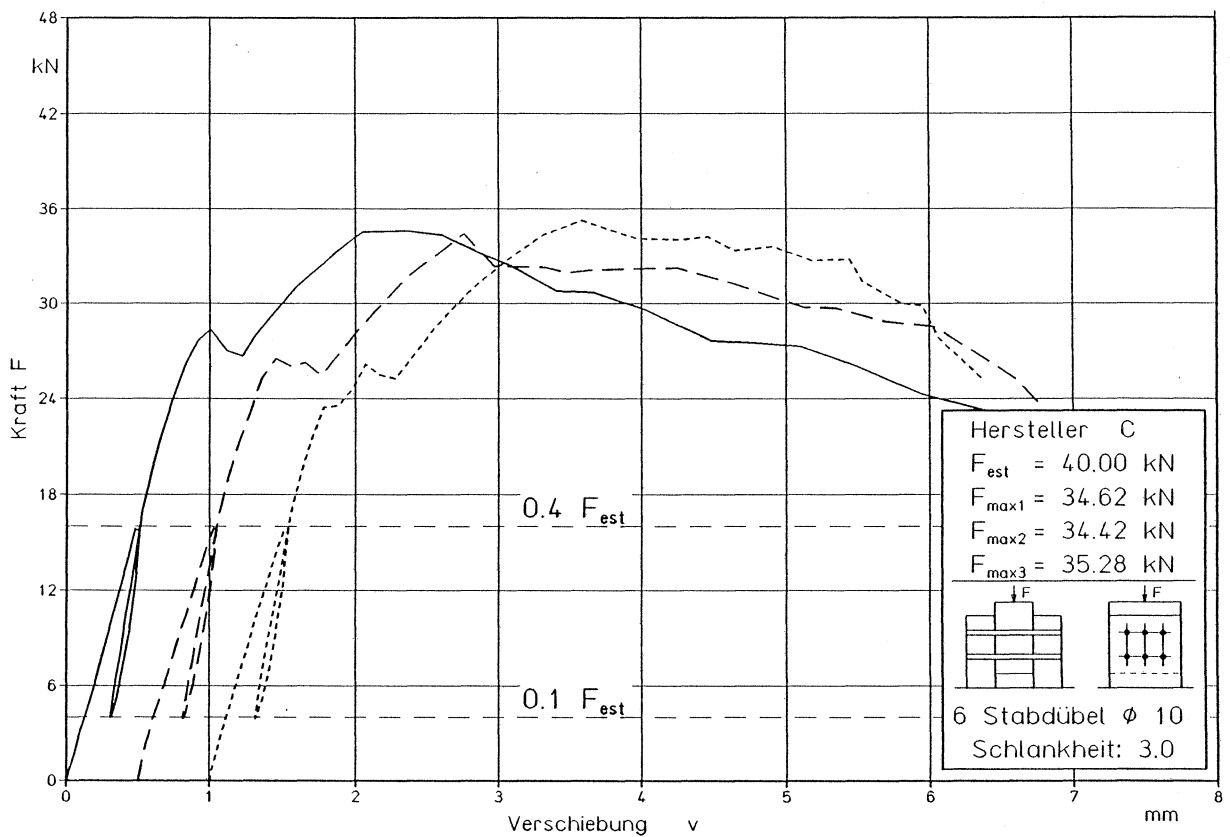


Bild 28: Kraft-Verschiebungs-Diagramme C230

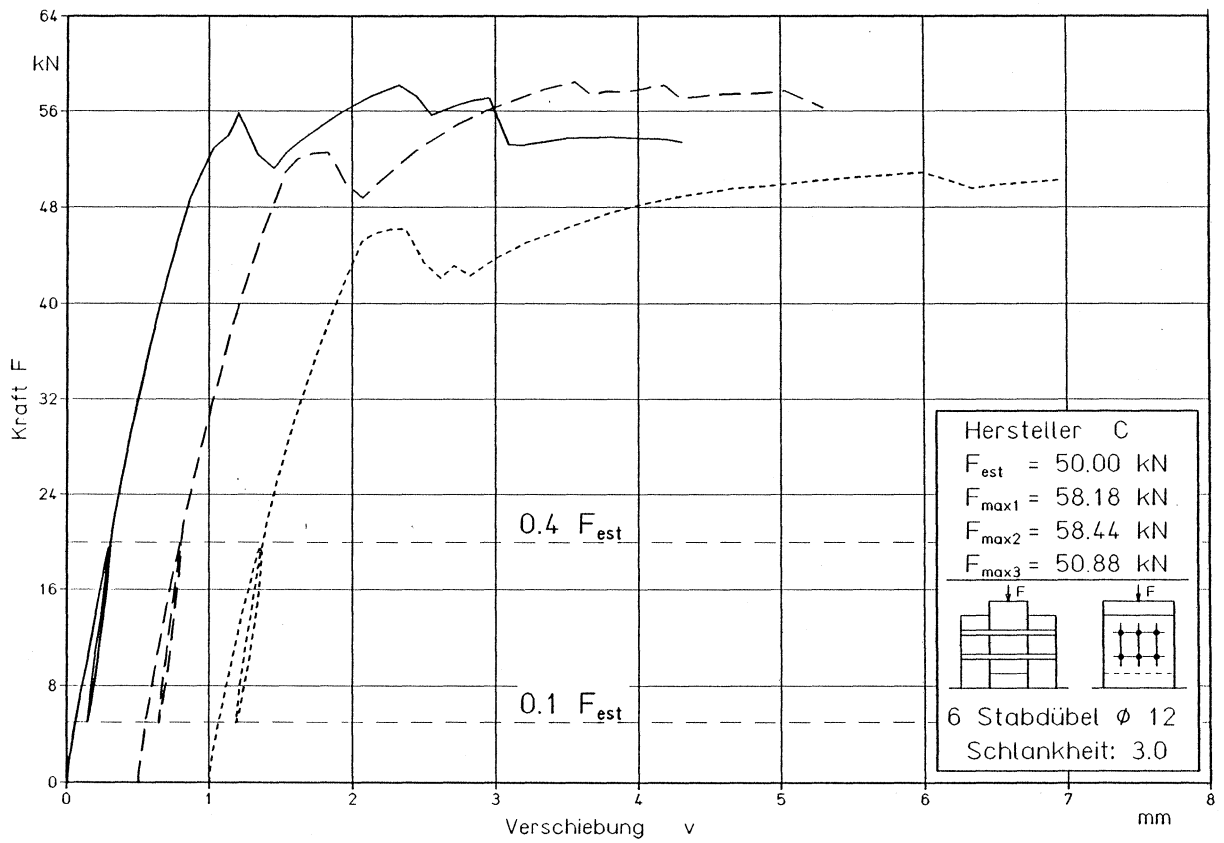


Bild 29: Kraft-Verschiebungs-Diagramme C330

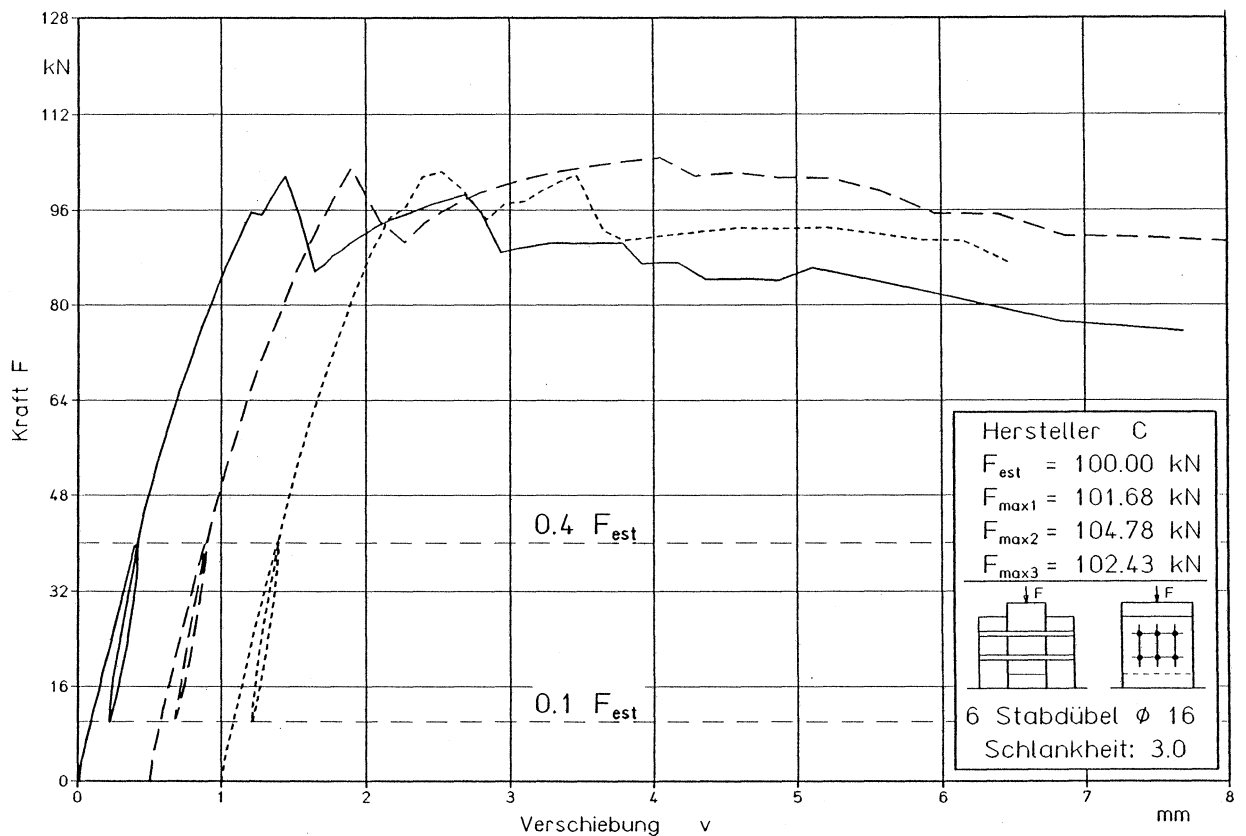


Bild 30: Kraft-Verschiebungs-Diagramme C430

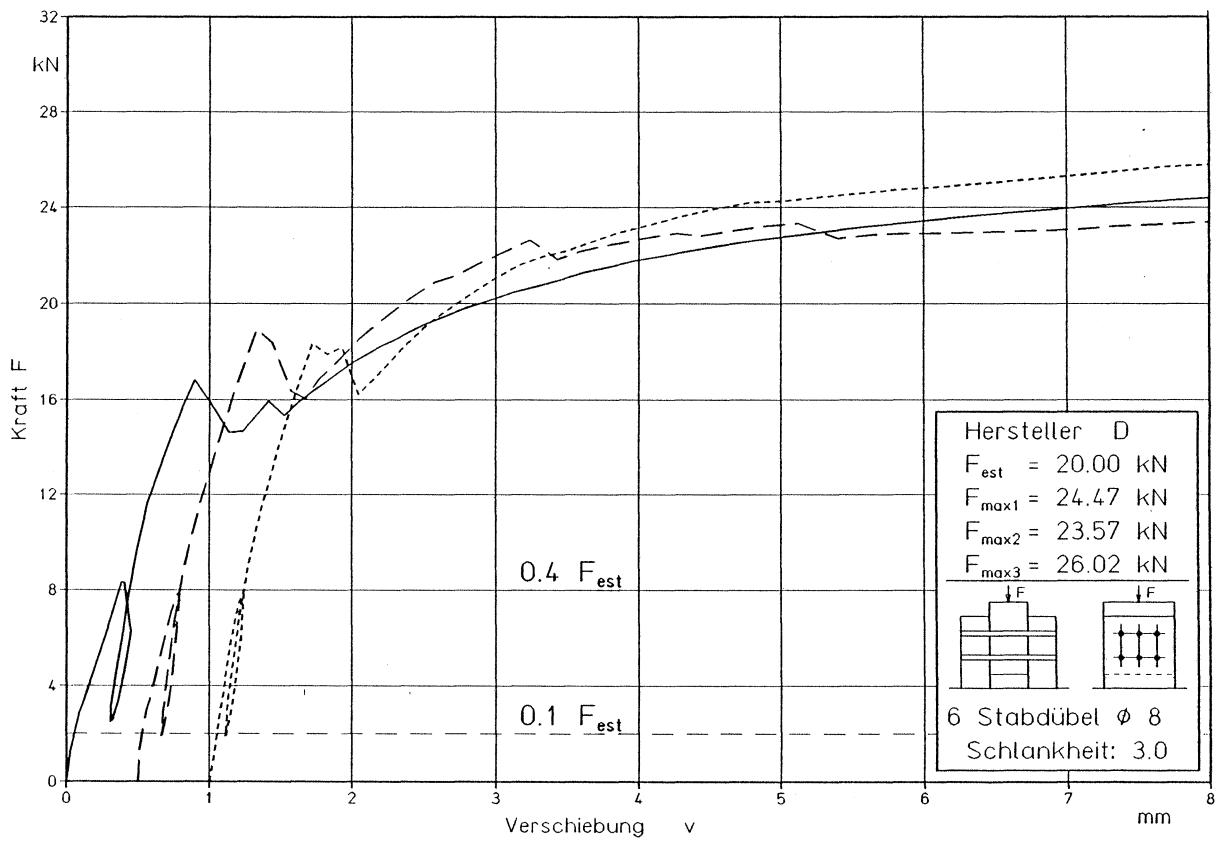


Bild 31: Kraft-Verschiebungs-Diagramme D130

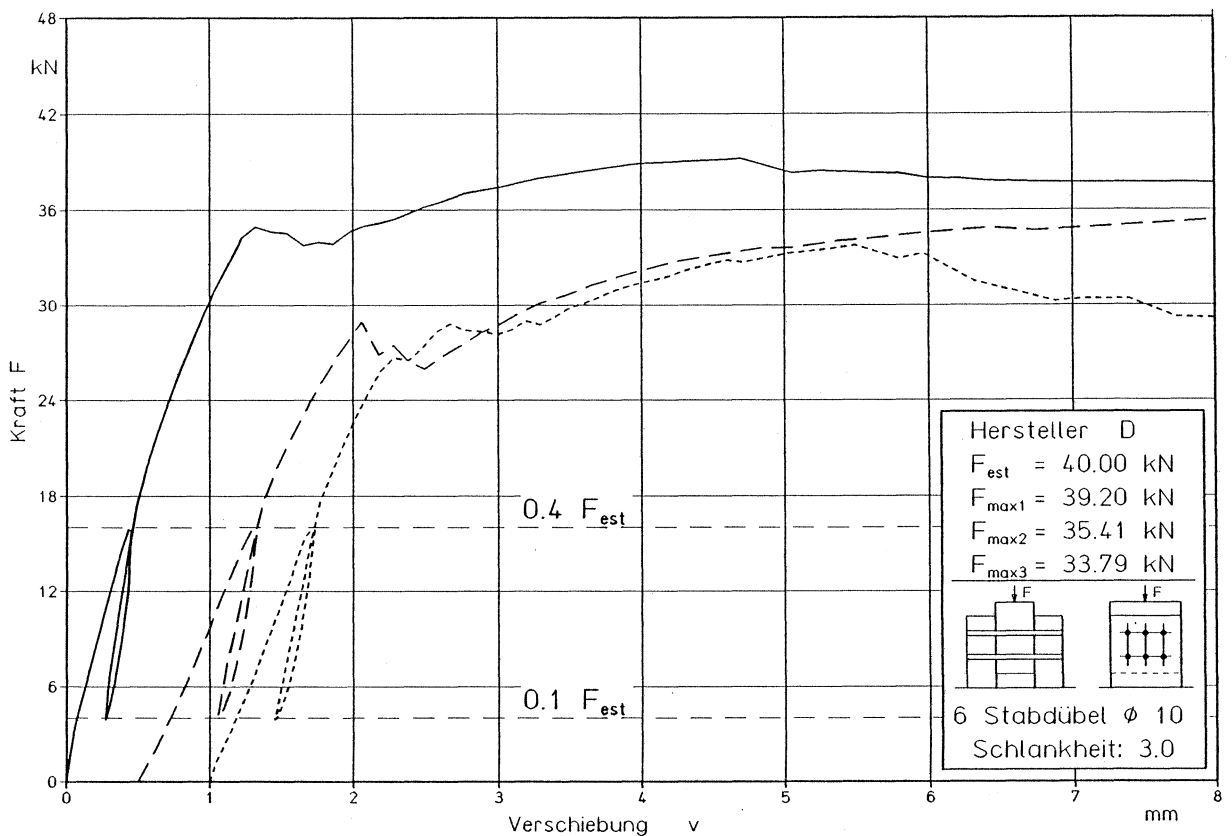


Bild 32: Kraft-Verschiebungs-Diagramme D230

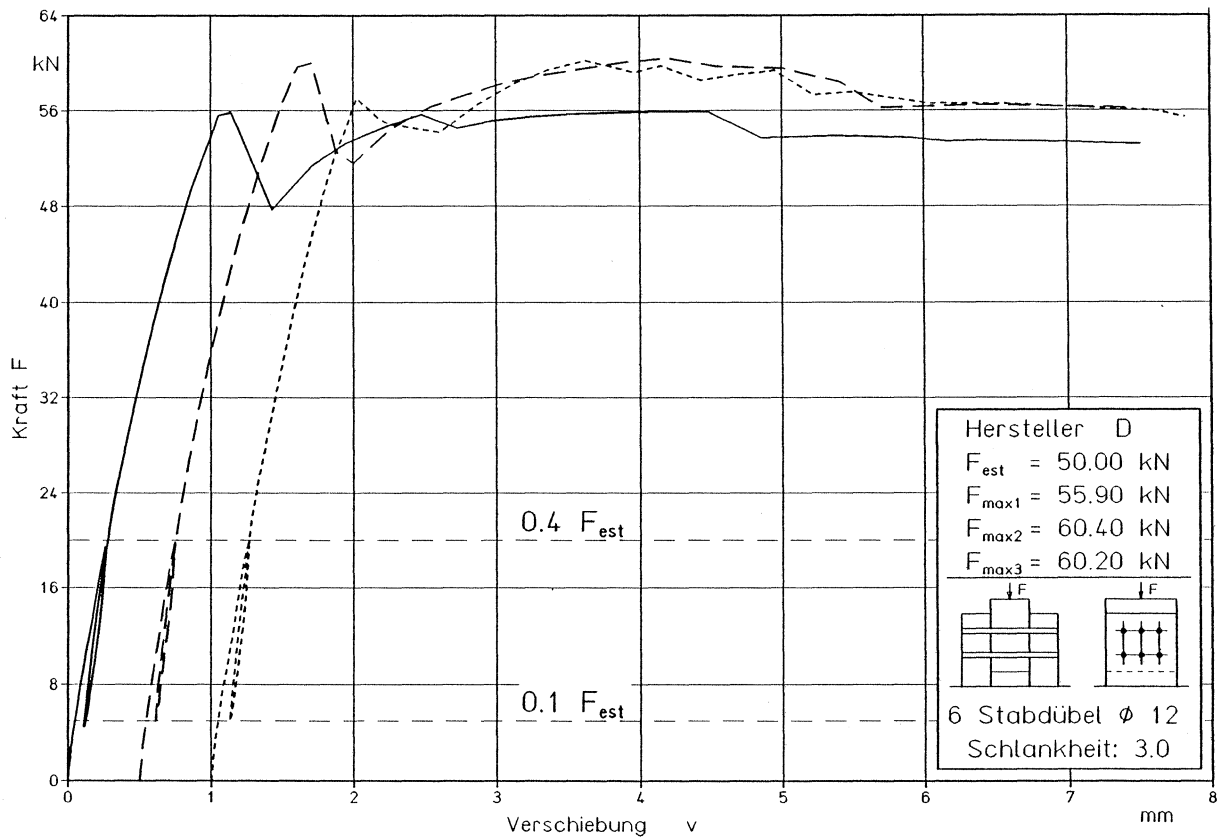


Bild 33: Kraft-Verschiebungs-Diagramme D330

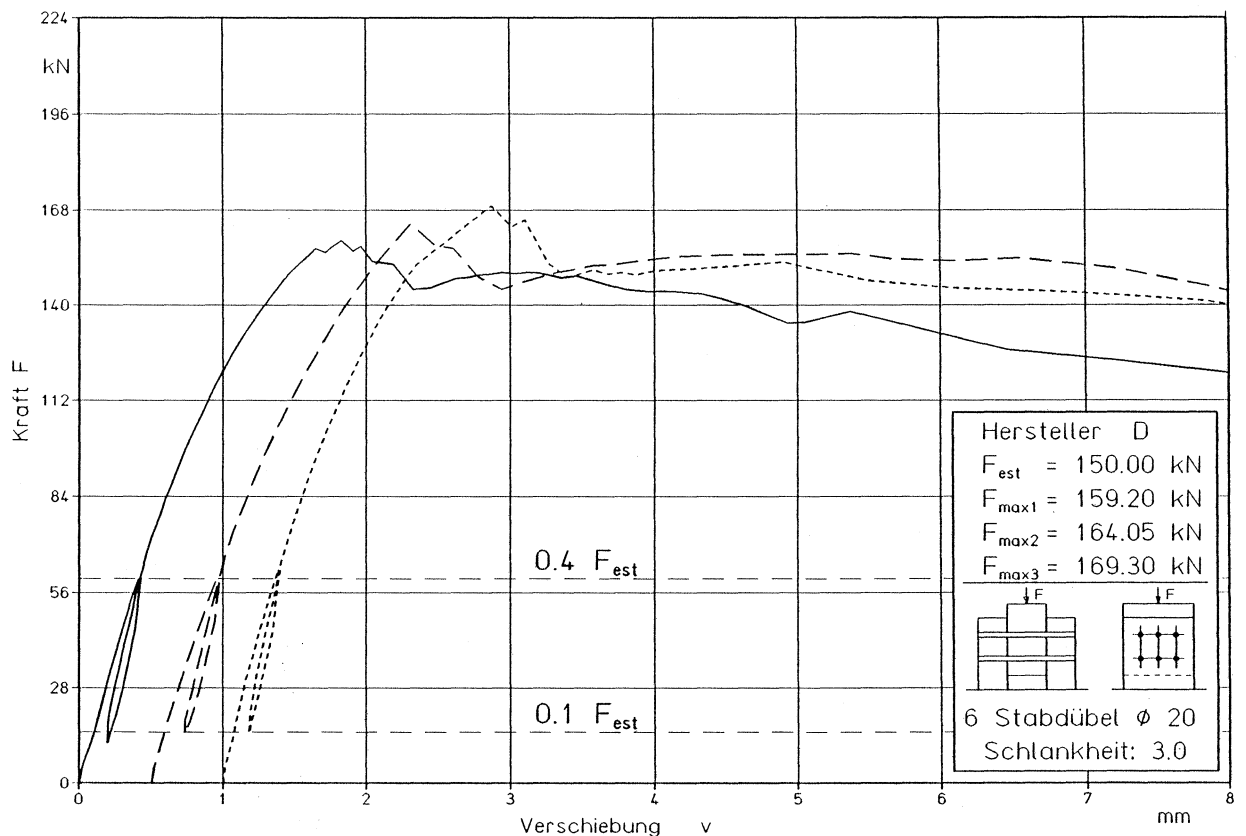


Bild 34: Kraft-Verschiebungs-Diagramme D430

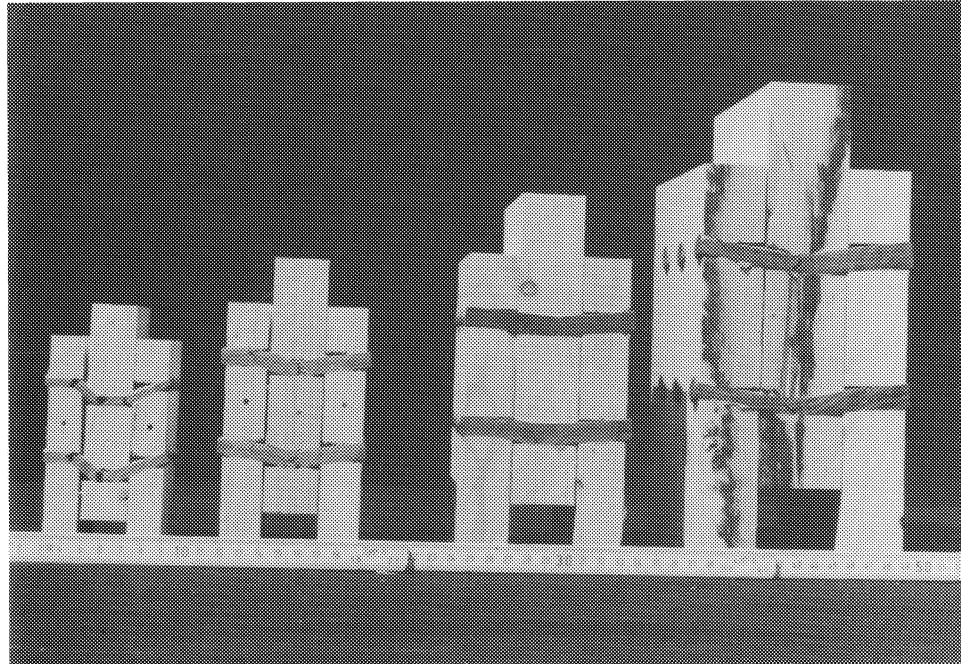


Bild 35:

Aufgetrennte Versuchskörper C130, C230, C330 und C430

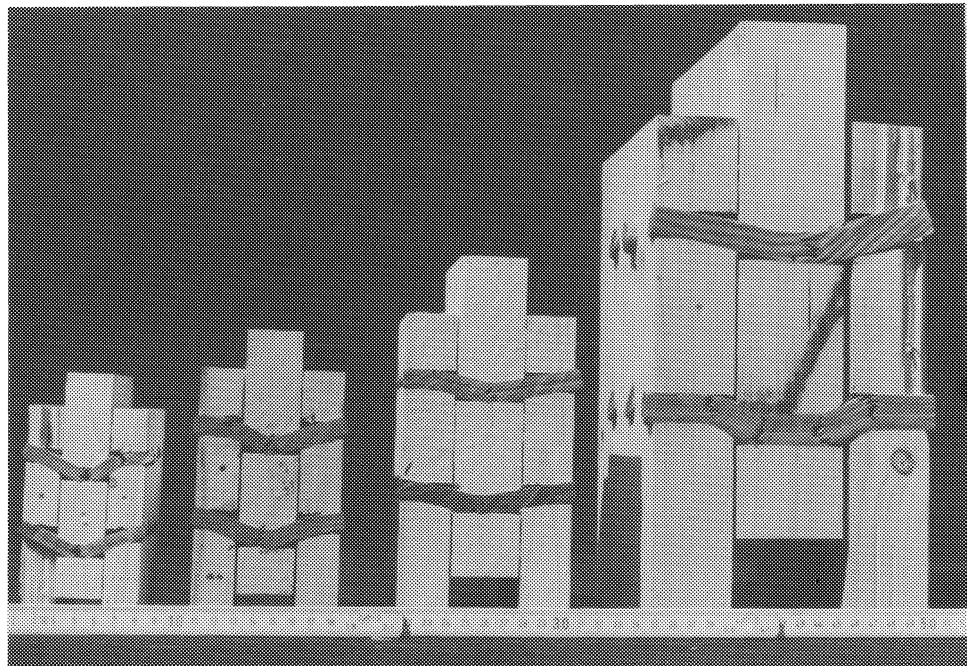


Bild 36:

Aufgetrennte Versuchskörper D130, D230, D330 und D430

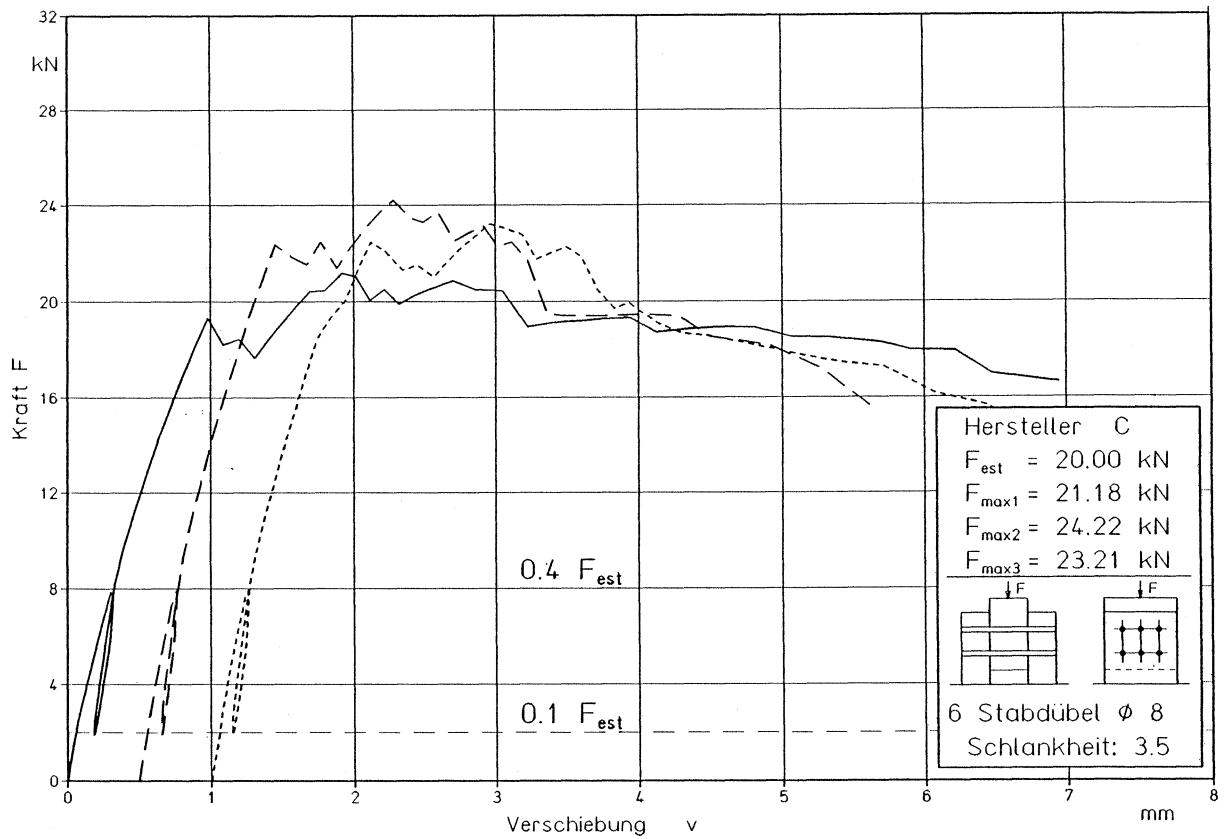


Bild 37: Kraft-Verschiebungs-Diagramme C135

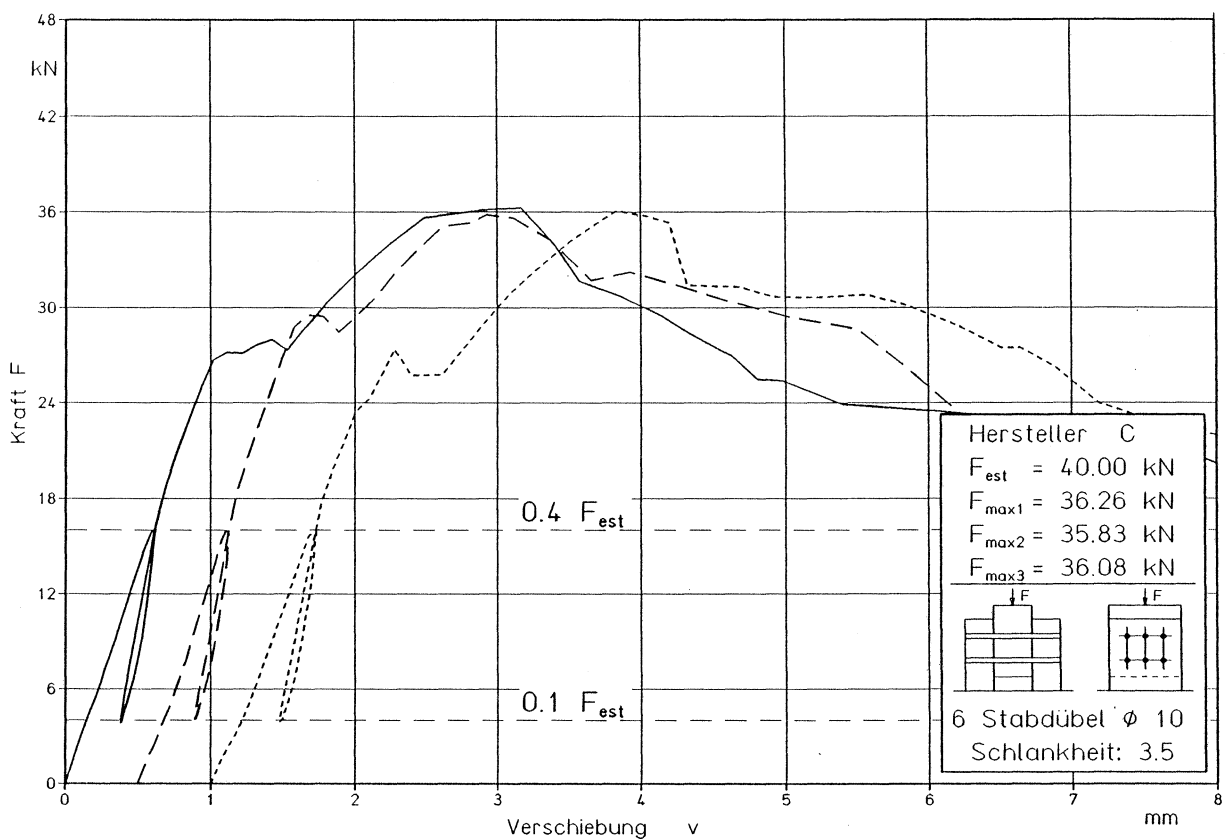


Bild 38: Kraft-Verschiebungs-Diagramme C235

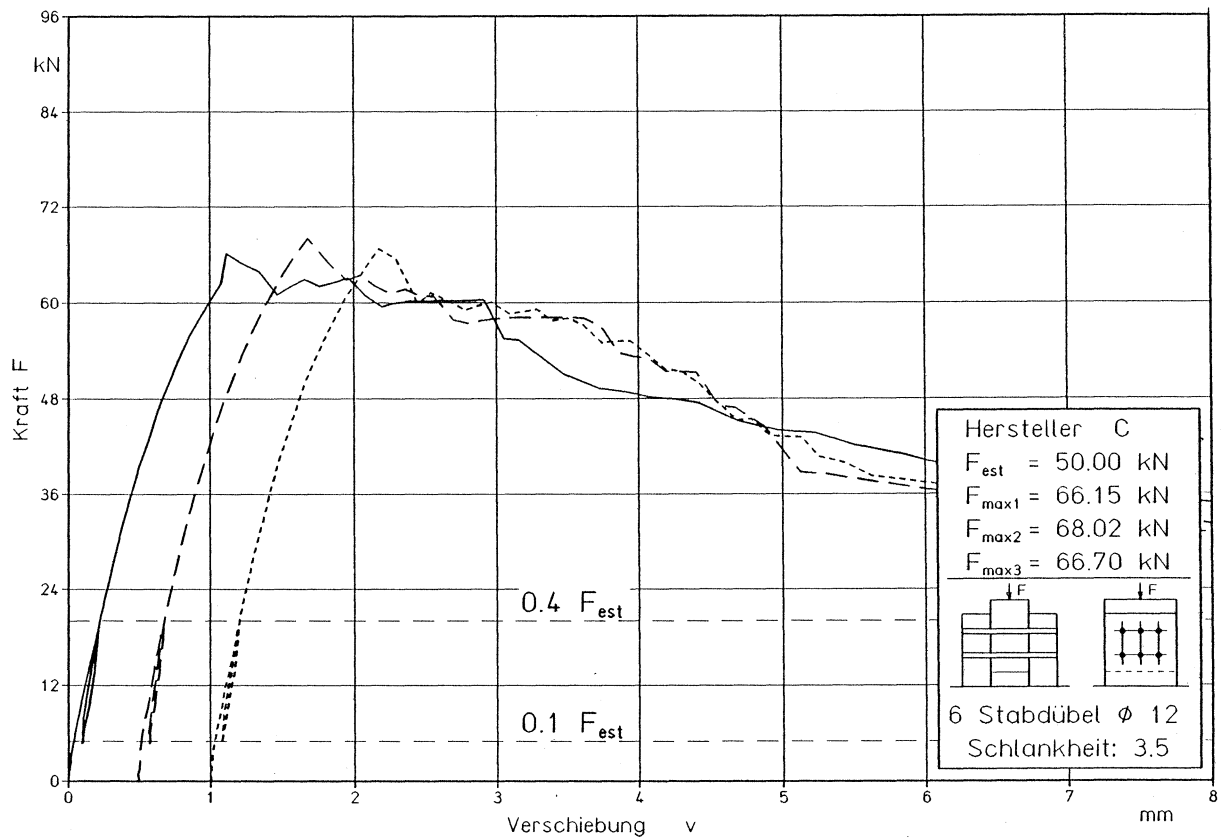


Bild 39: Kraft-Verschiebungs-Diagramme C335

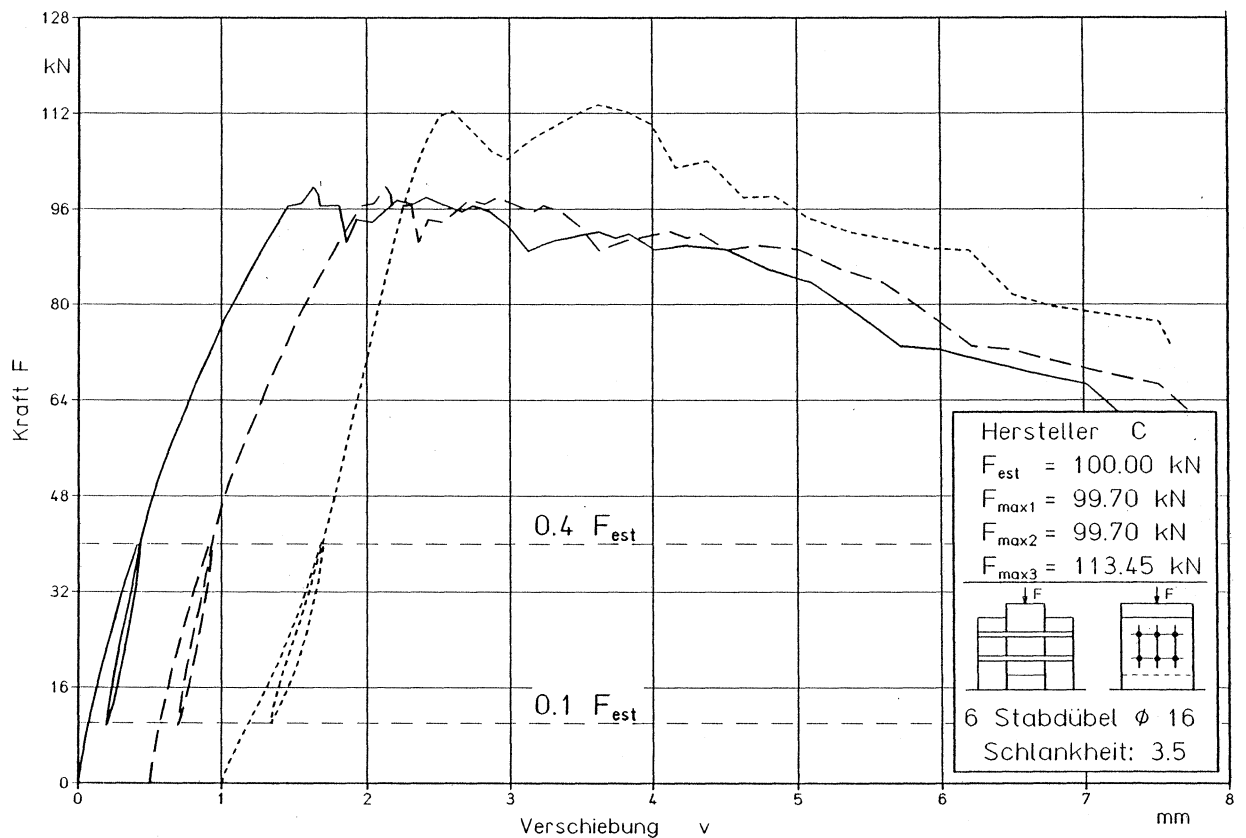


Bild 40: Kraft-Verschiebungs-Diagramme C435

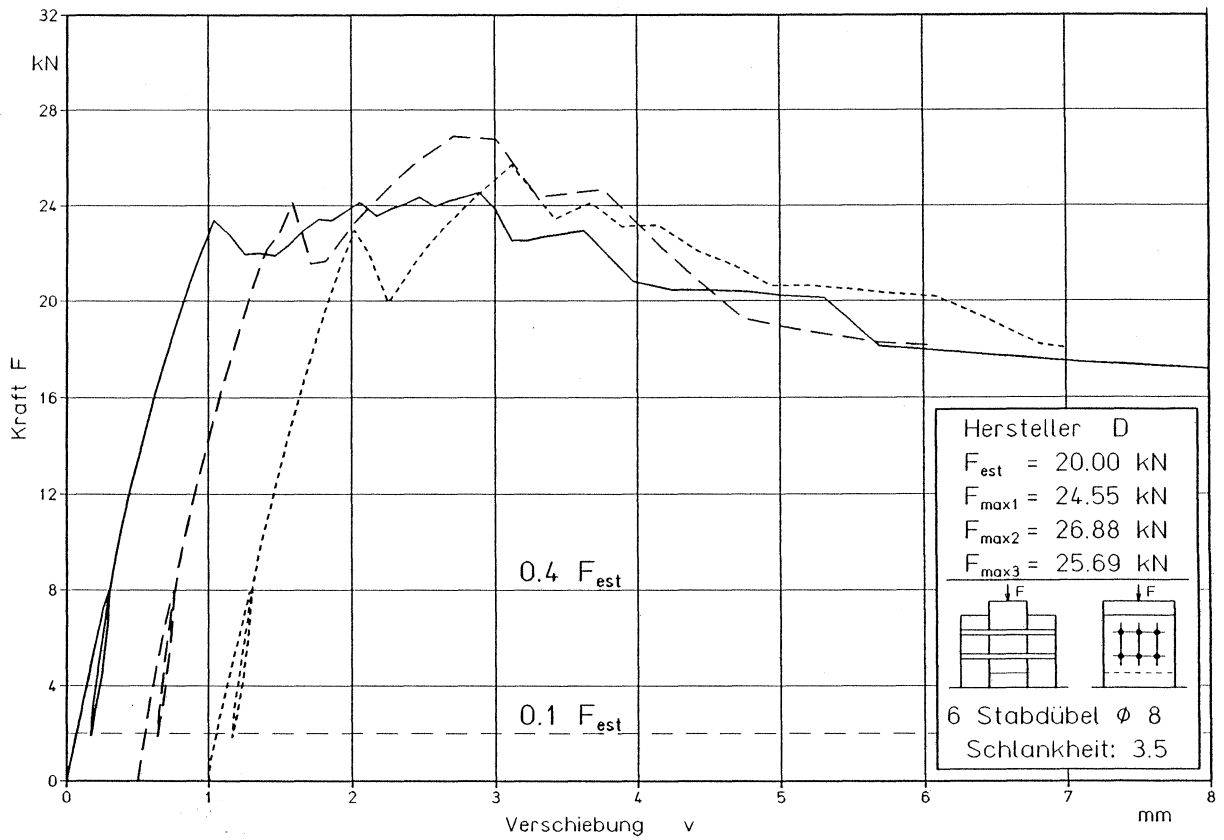


Bild 41: Kraft-Verschiebungs-Diagramme D135

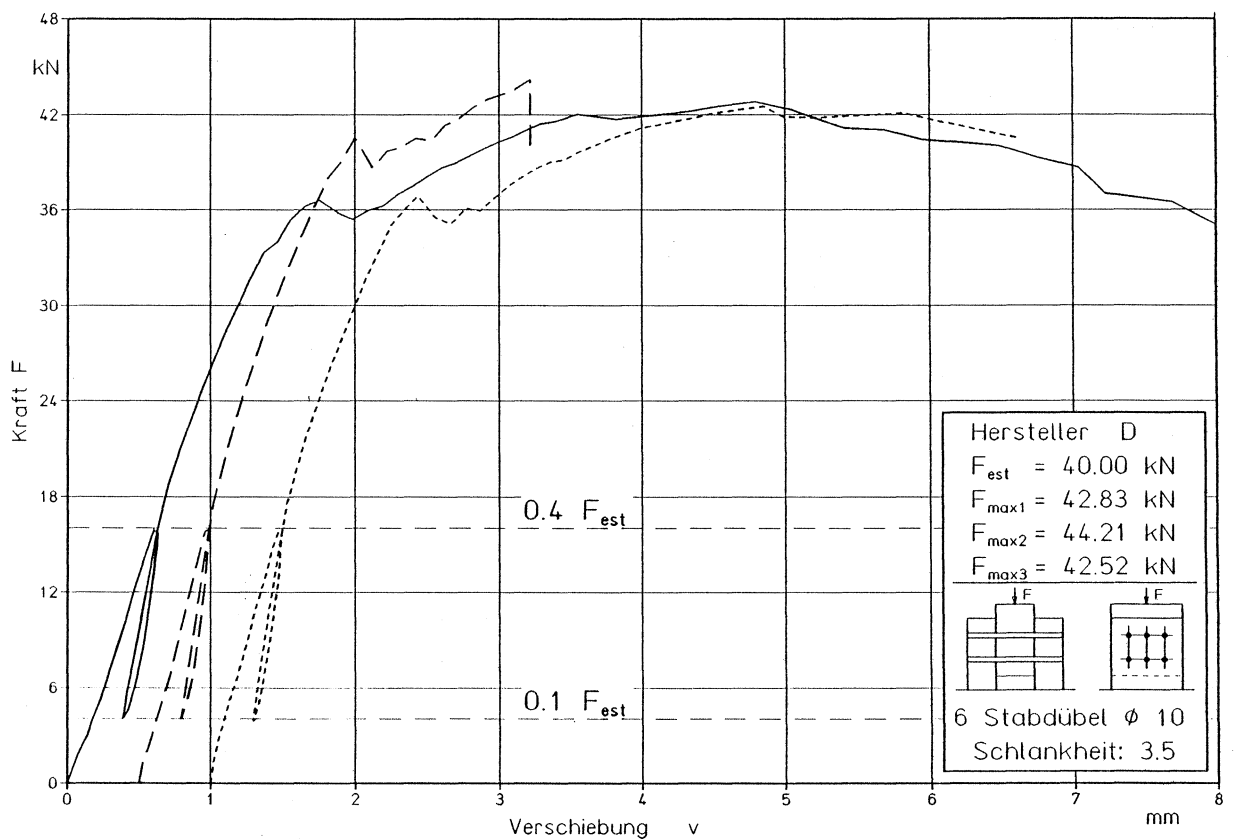


Bild 42: Kraft-Verschiebungs-Diagramme D235

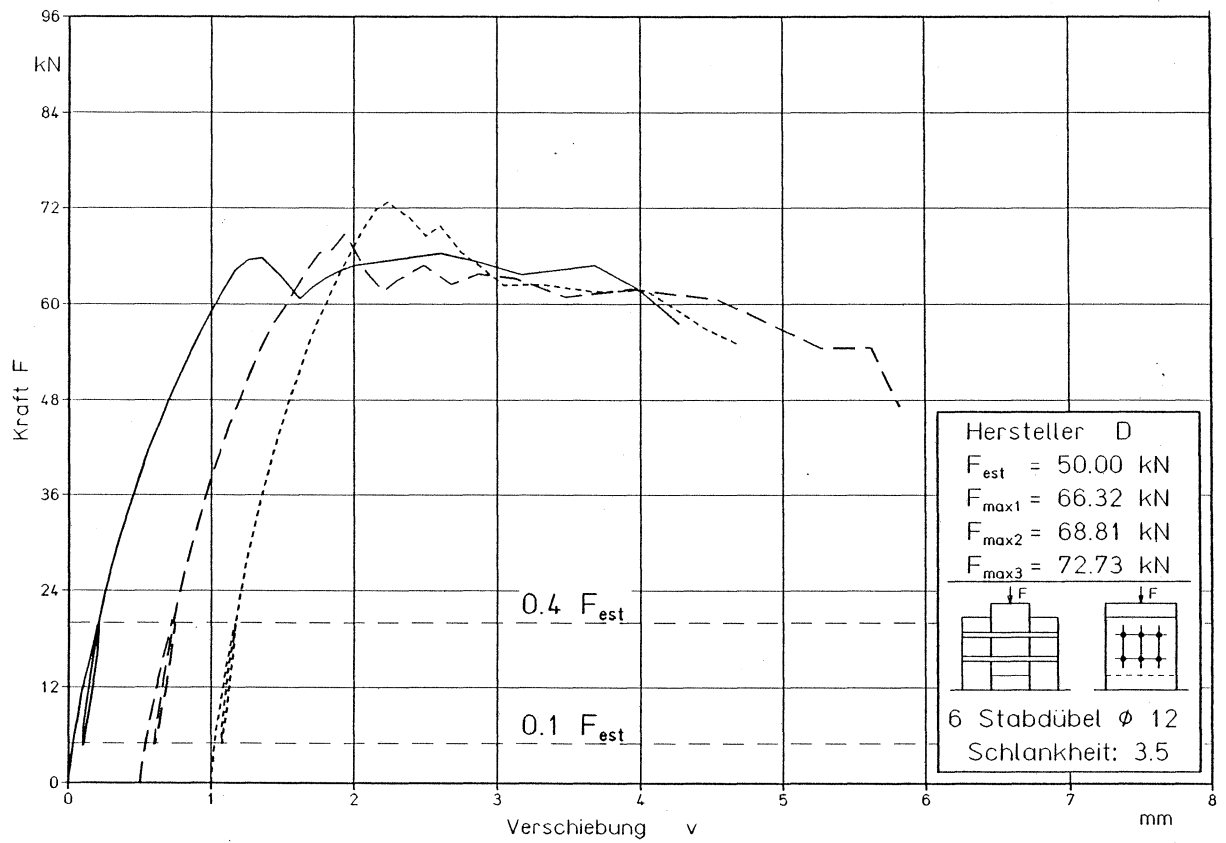


Bild 43: Kraft-Verschiebungs-Diagramme D335

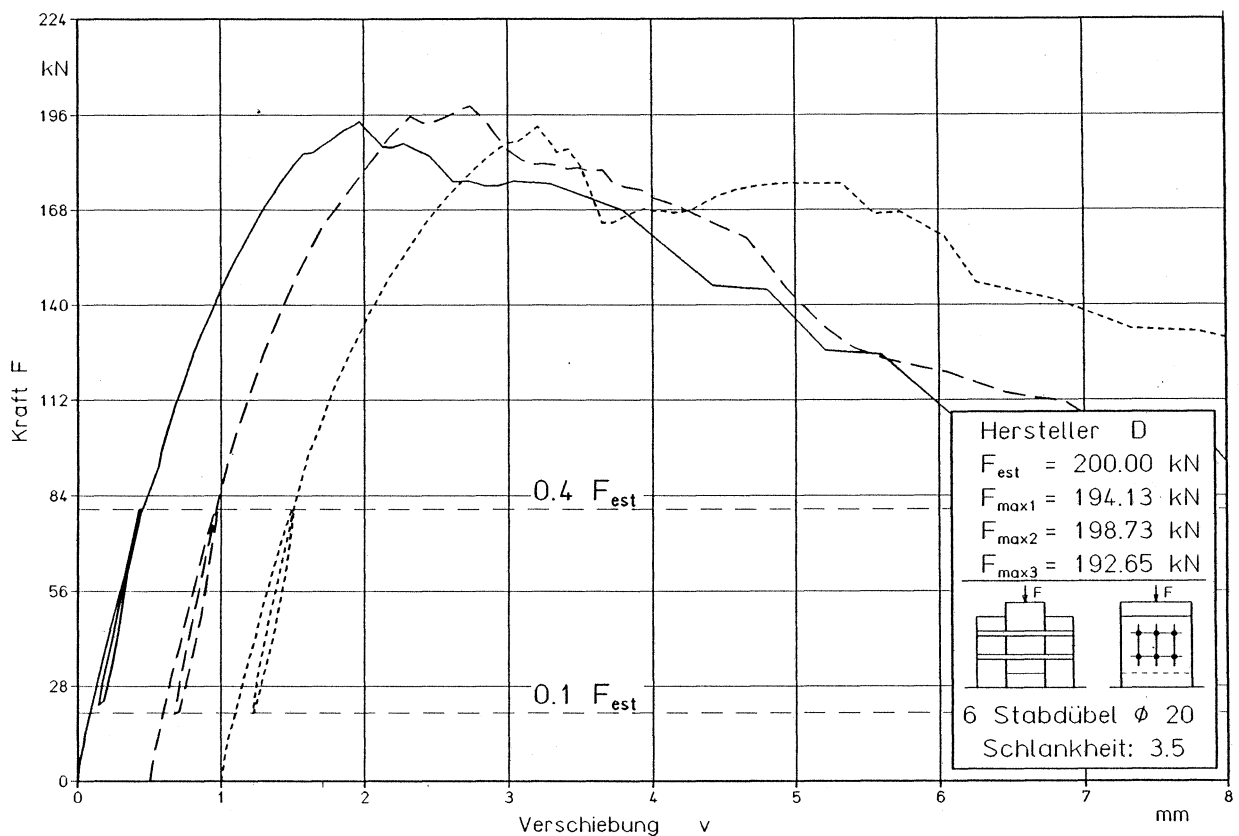


Bild 44: Kraft-Verschiebungs-Diagramme D435

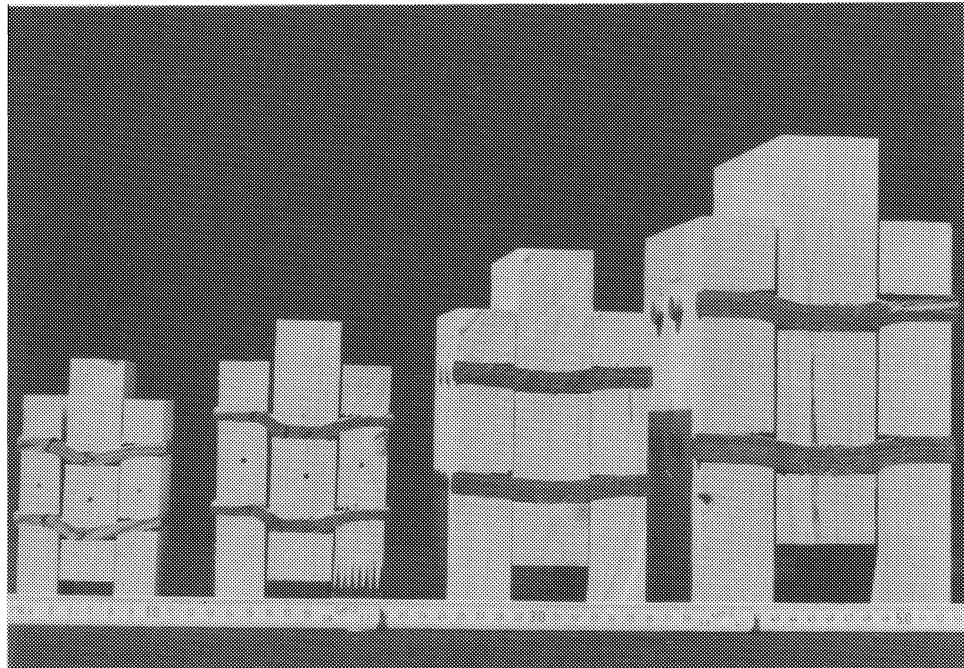


Bild 45: Aufgetrennte Versuchskörper C135, C235, C335 und C435

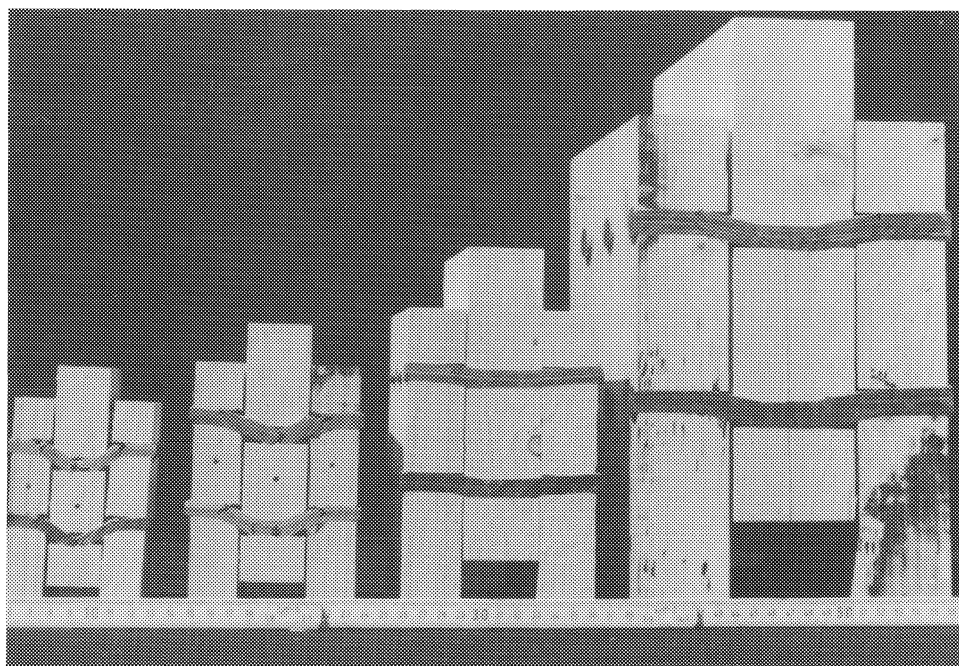


Bild 46: Aufgetrennte Versuchskörper D135, D235, D335 und D435

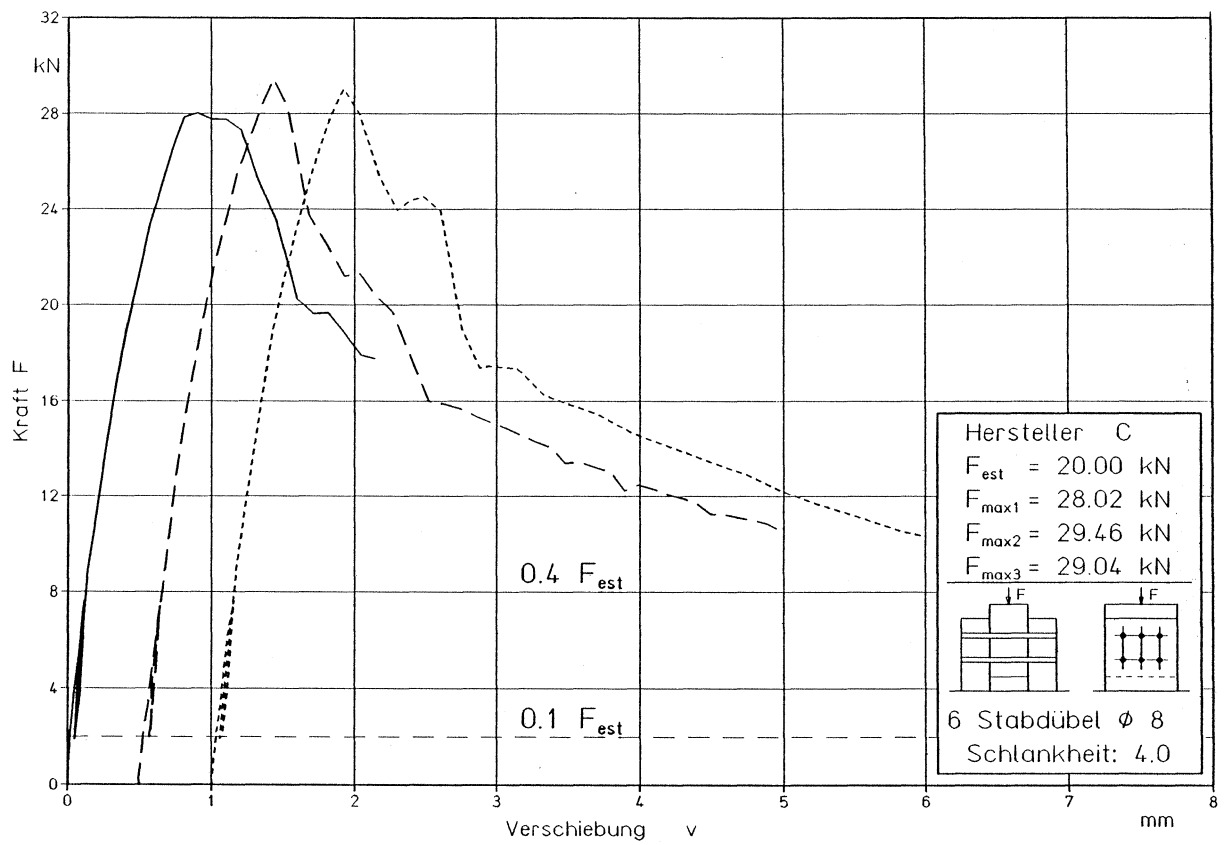


Bild 47: Kraft-Verschiebungs-Diagramme C140

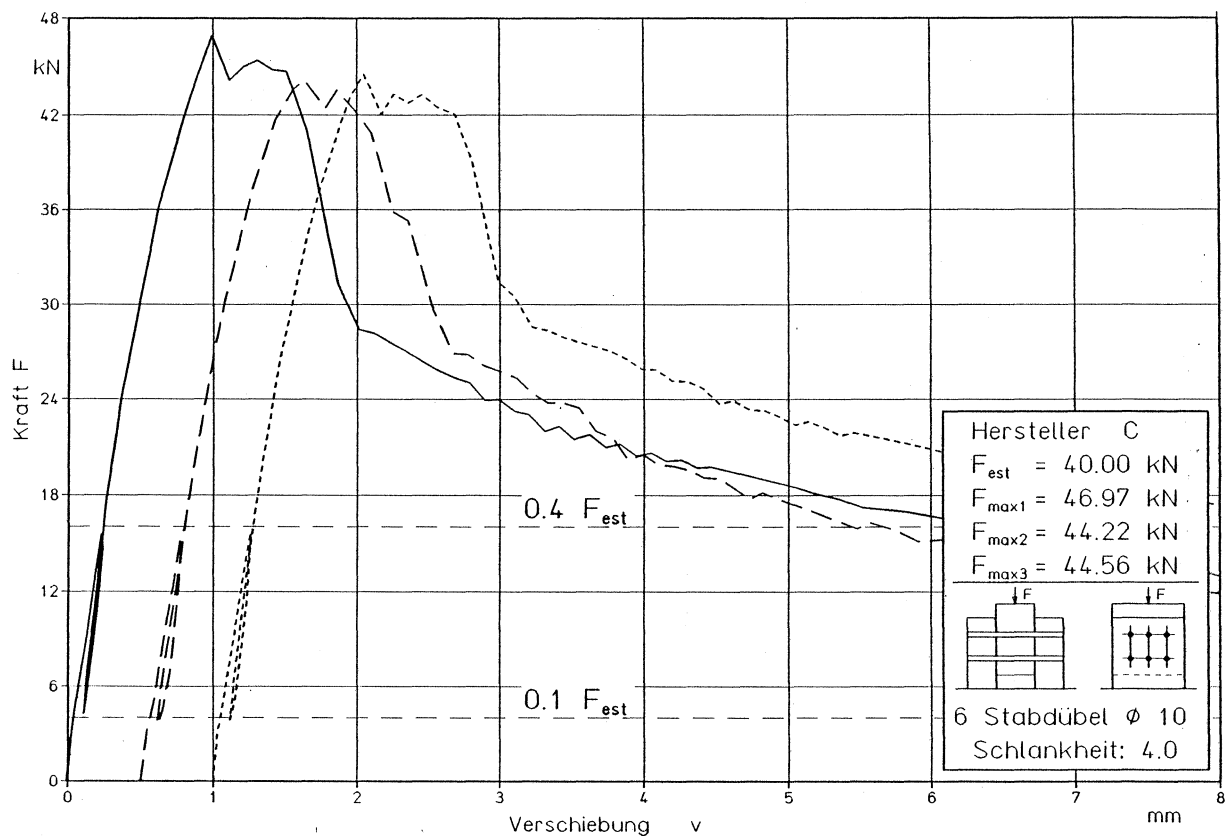


Bild 48: Kraft-Verschiebungs-Diagramme C240

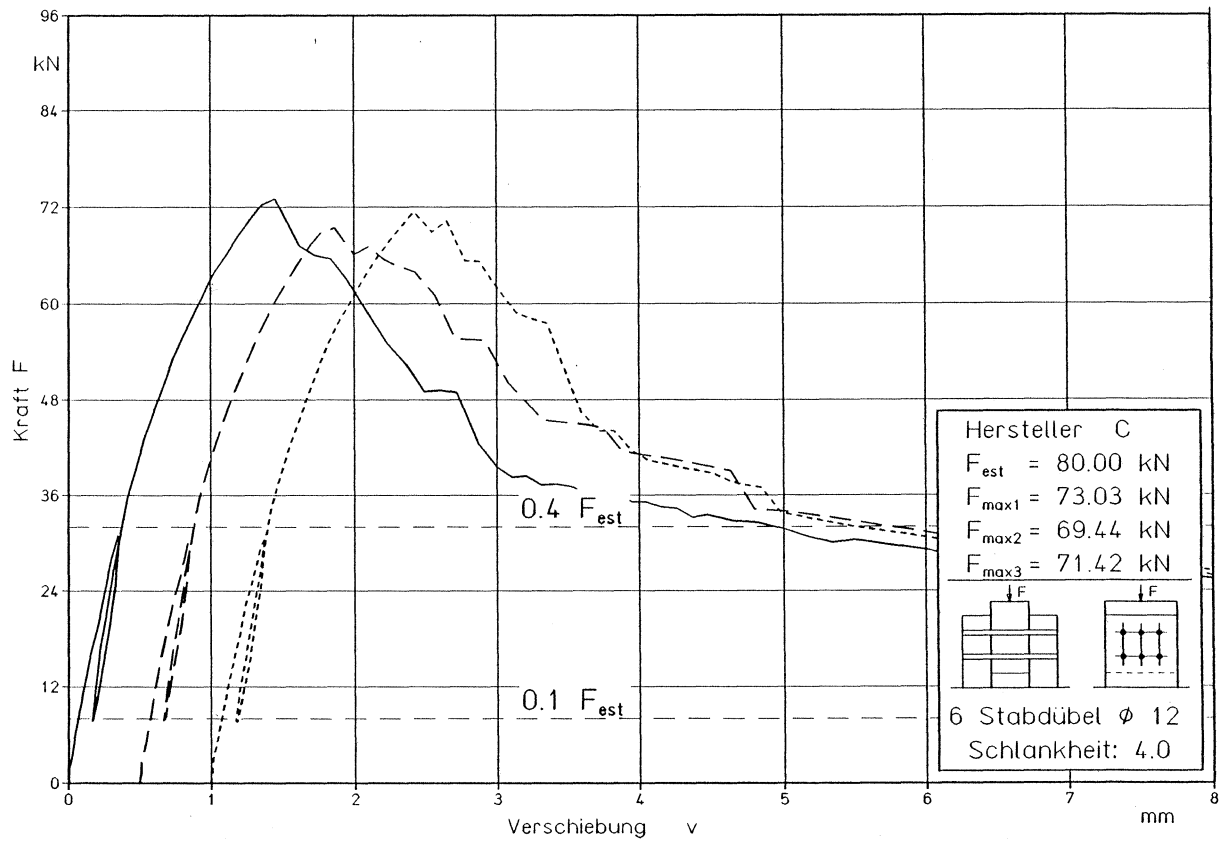


Bild 49: Kraft-Verschiebungs-Diagramme C340

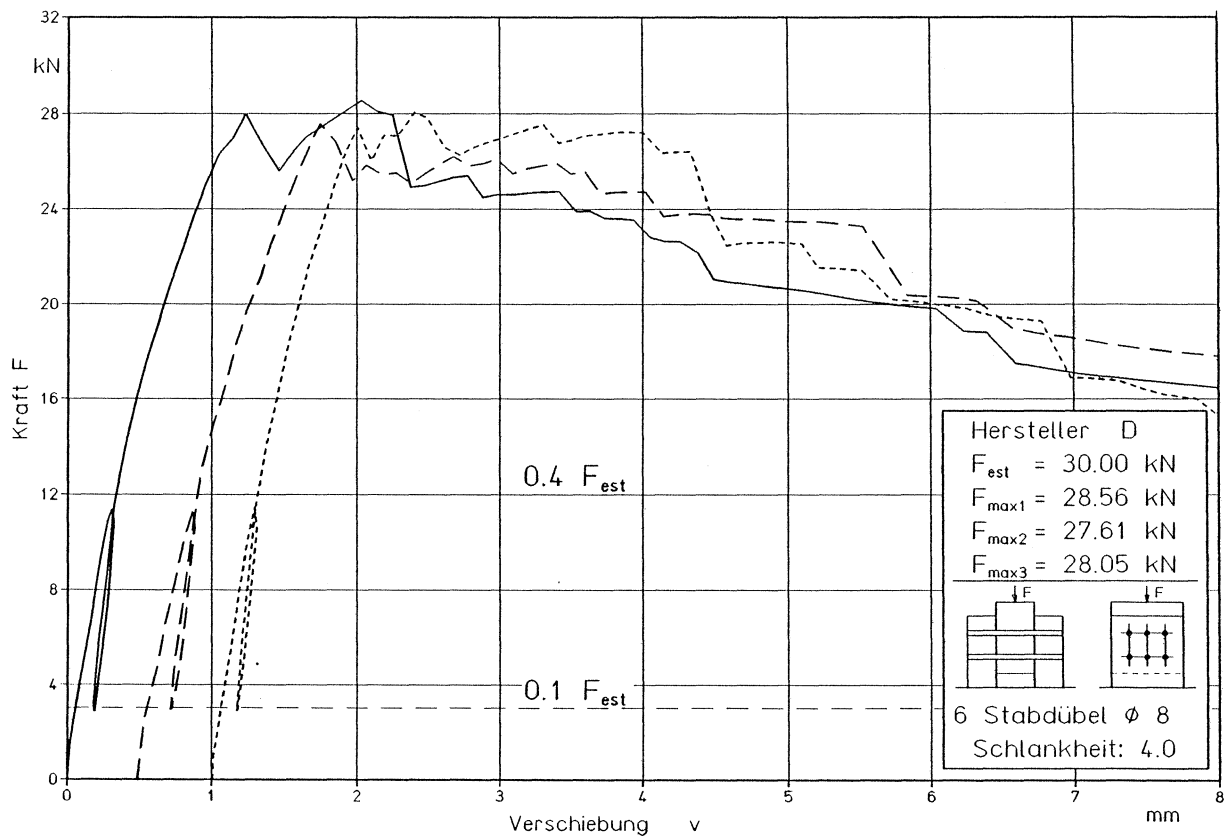


Bild 50: Kraft-Verschiebungs-Diagramme D140

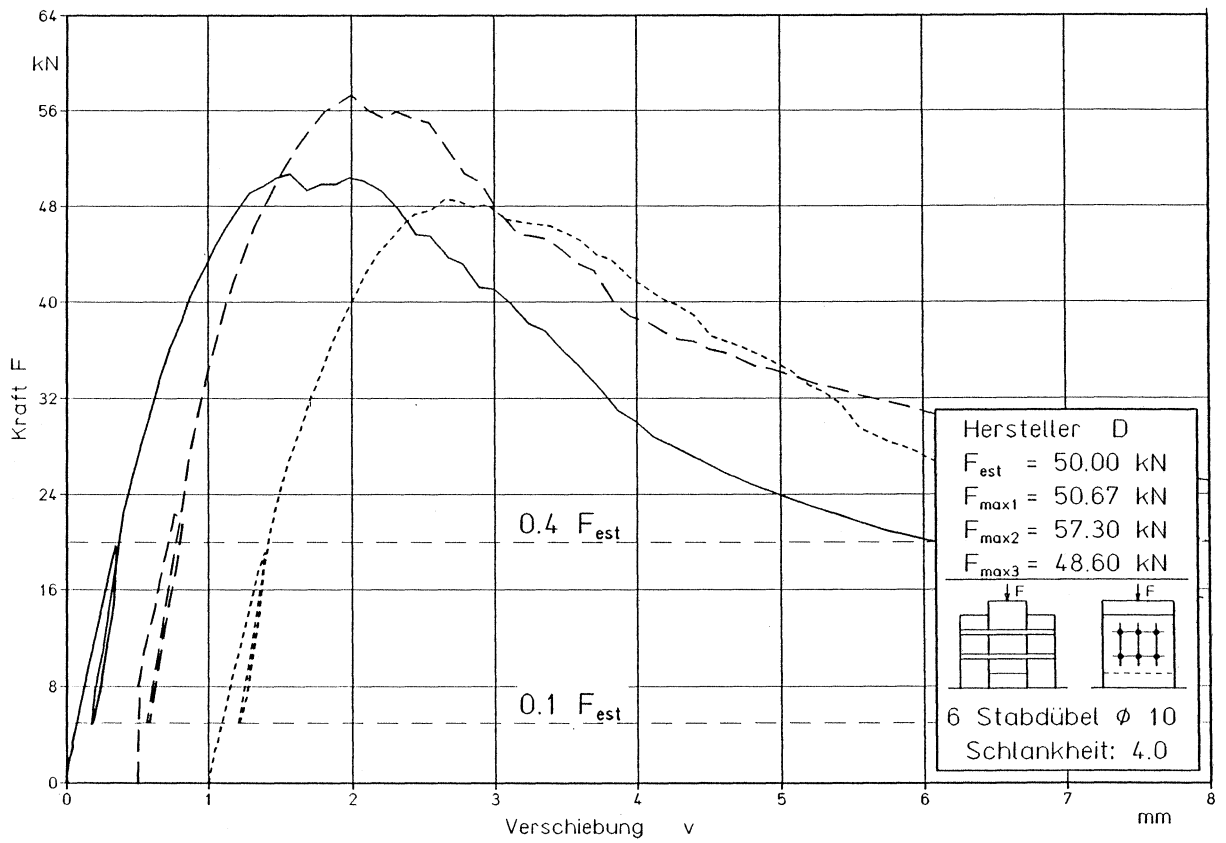


Bild 51: Kraft-Verschiebungs-Diagramme D240

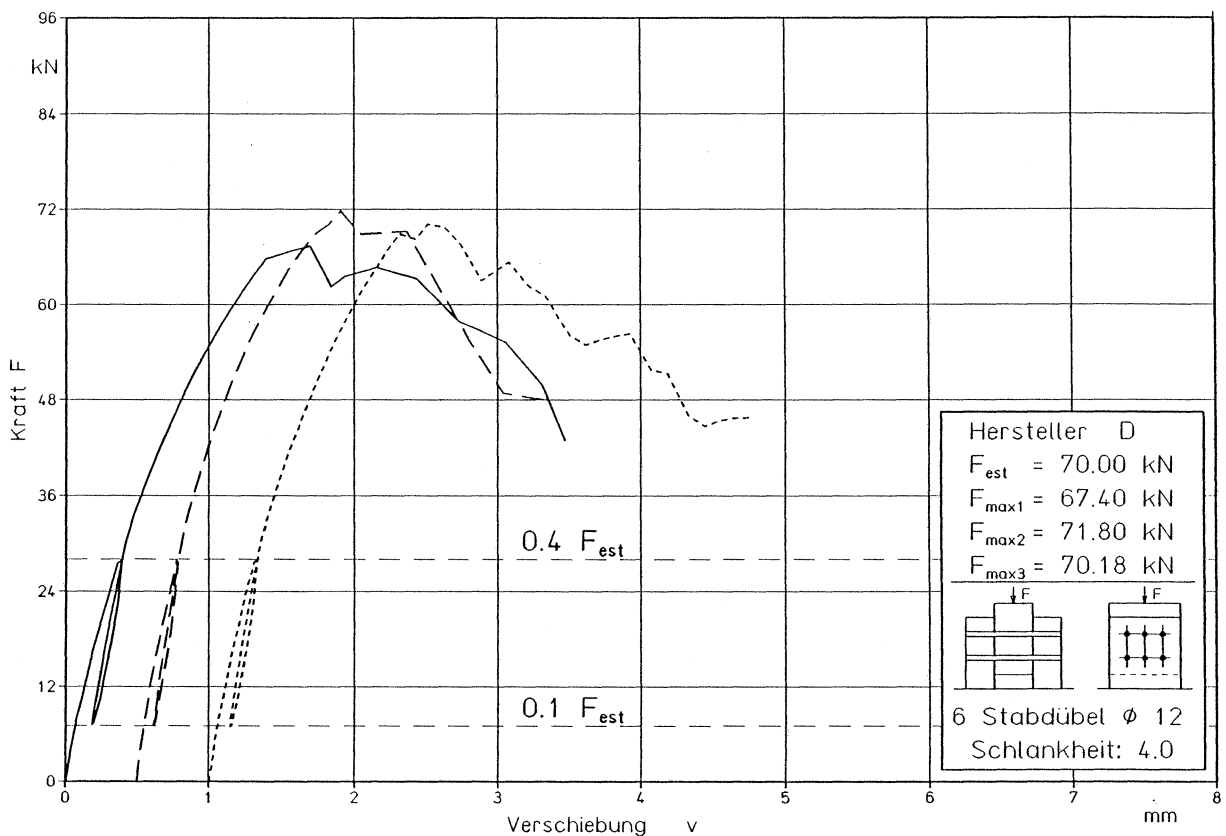


Bild 52: Kraft-Verschiebungs-Diagramme D340

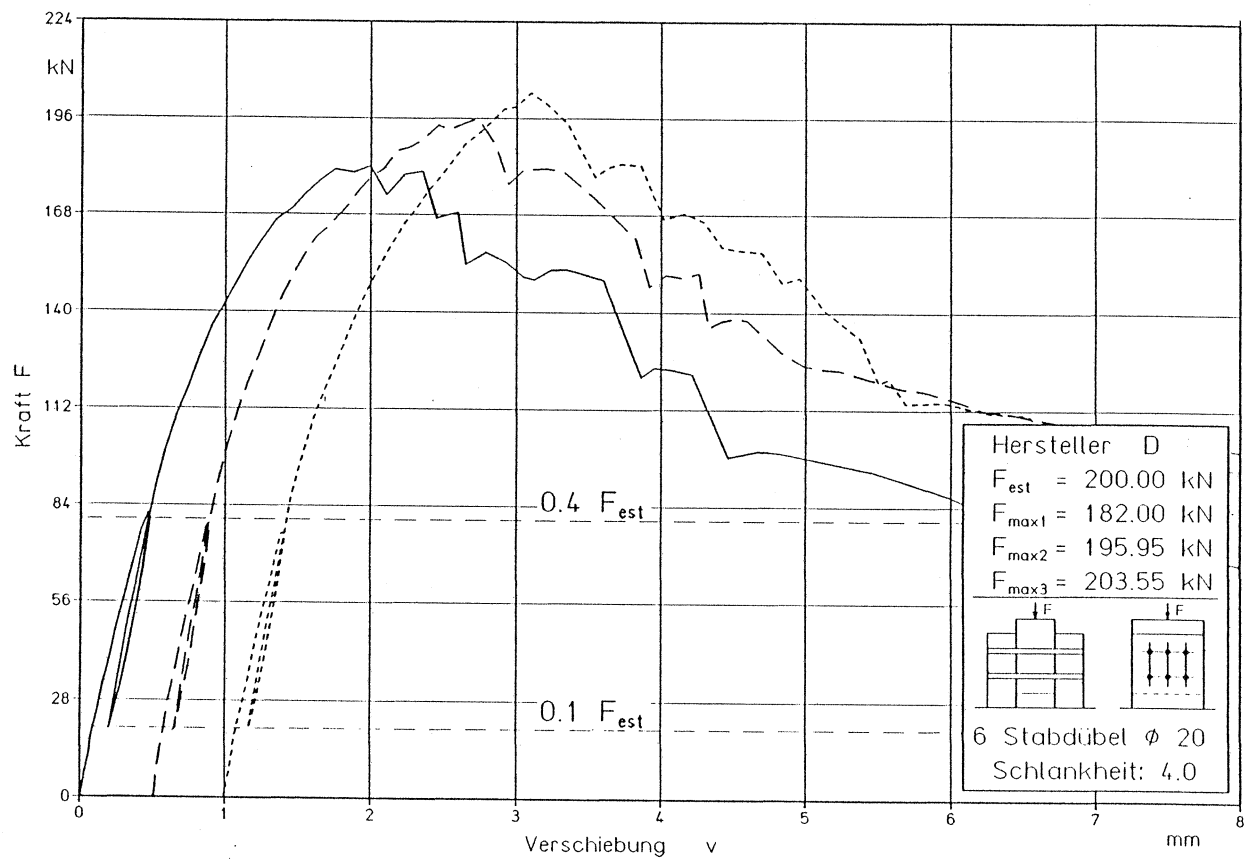


Bild 53: Kraft-Verschiebungs-Diagramme D440

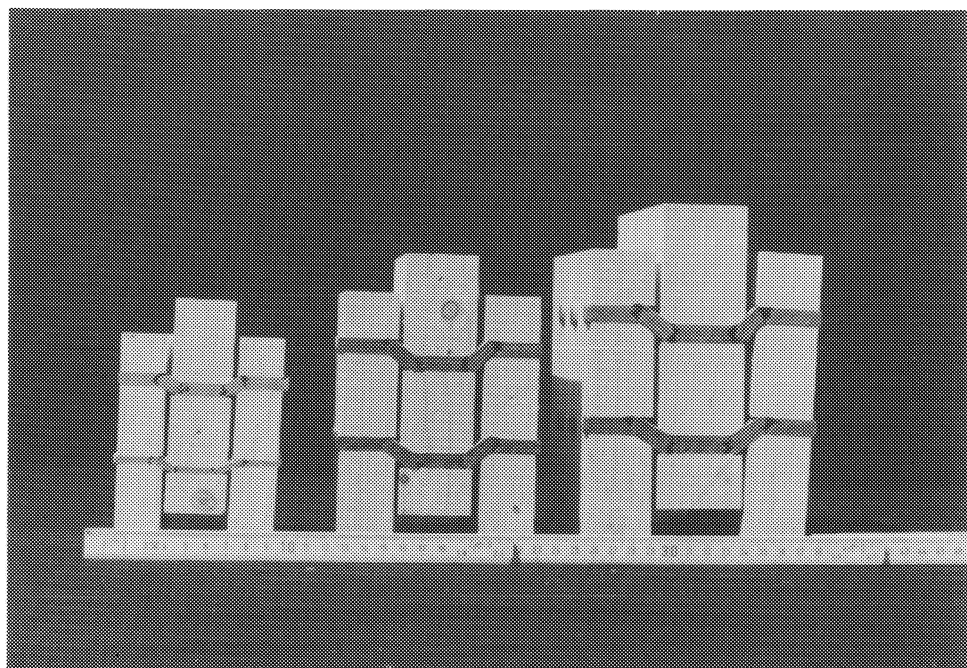


Bild 54:

Aufgetrennte Versuchskörper C140, C240 und C340

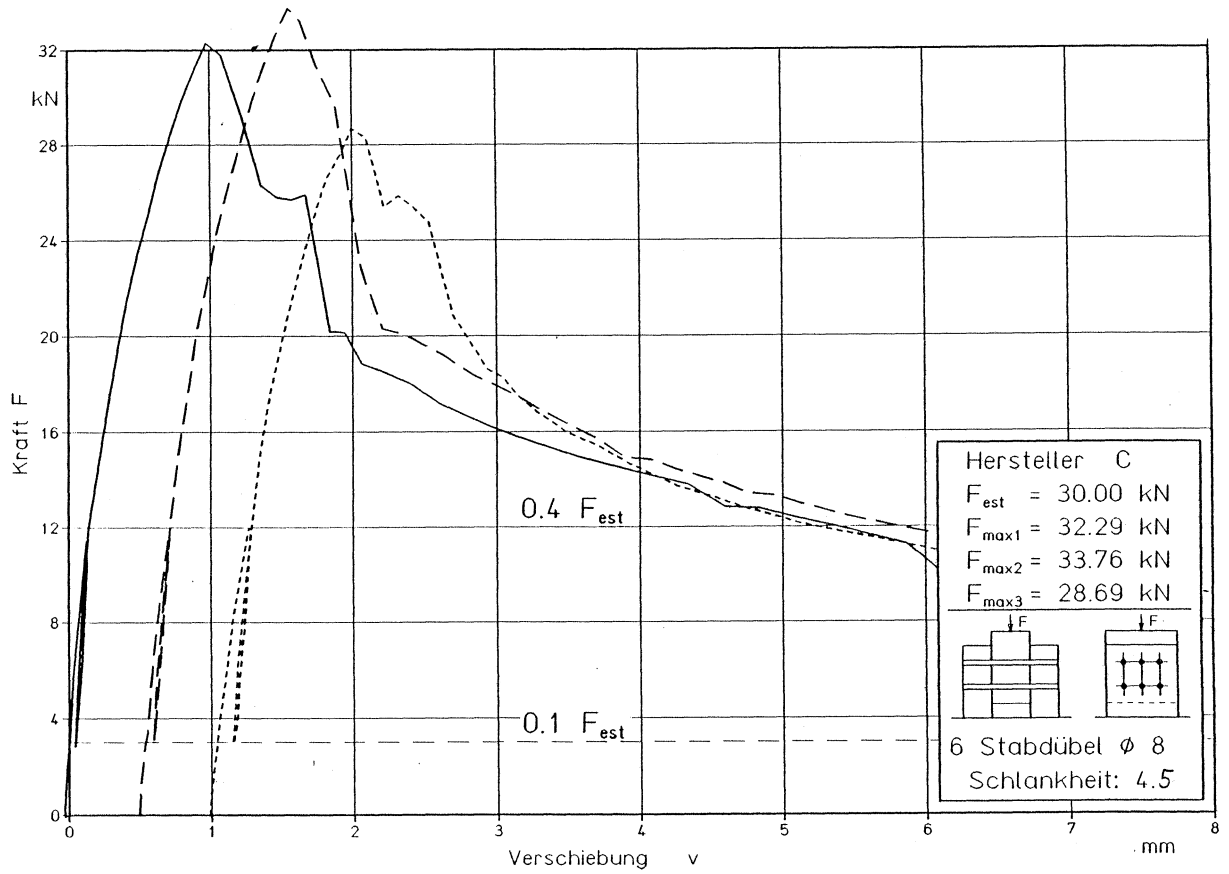


Bild 55: Kraft-Verschiebungs-Diagramme C145

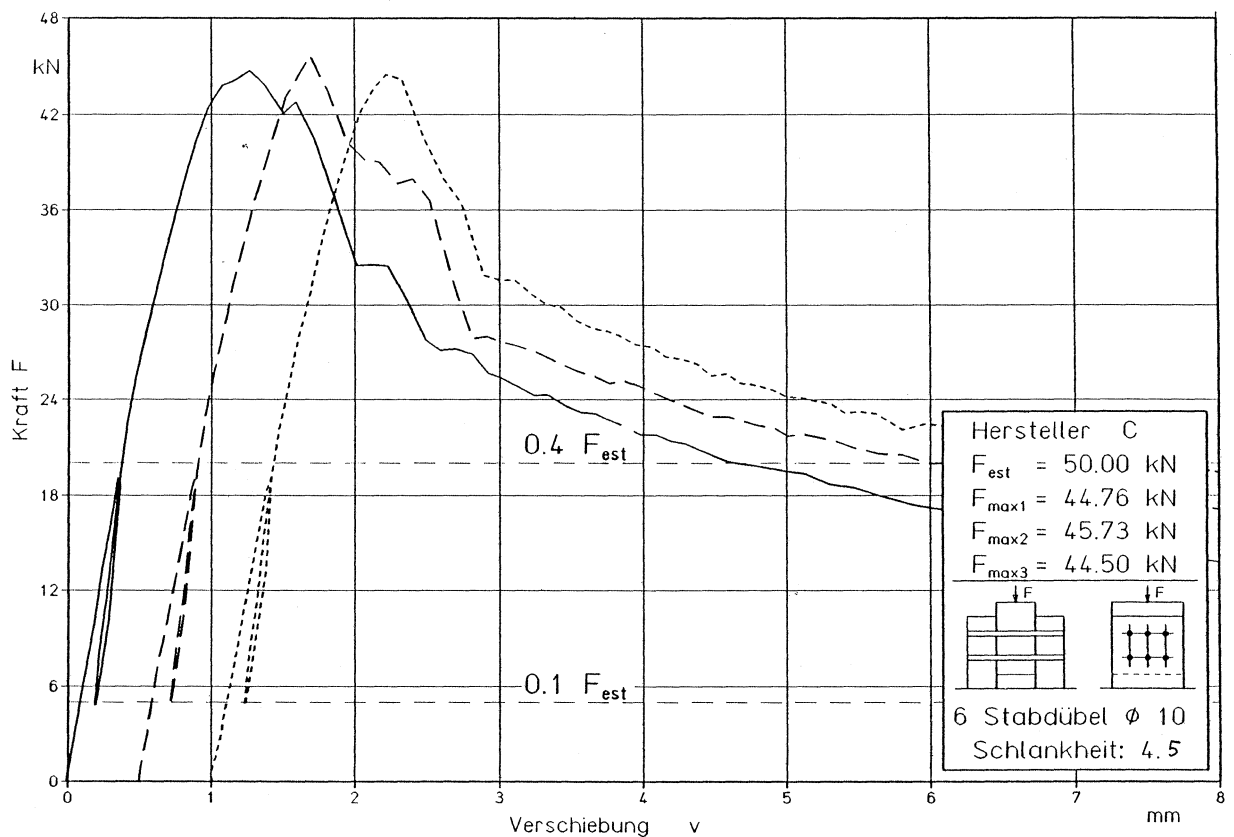


Bild 56: Kraft-Verschiebungs-Diagramme C245

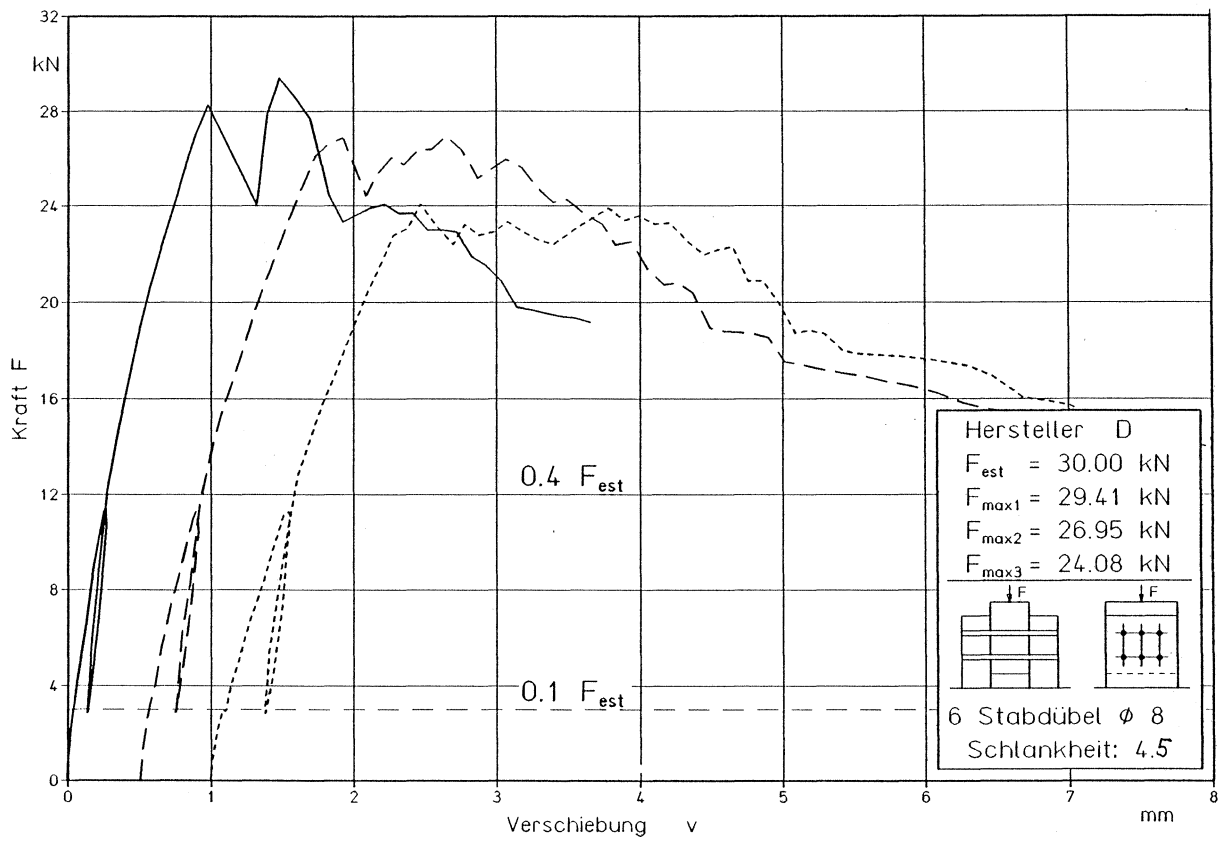


Bild 57: Kraft-Verschiebungs-Diagramme D145

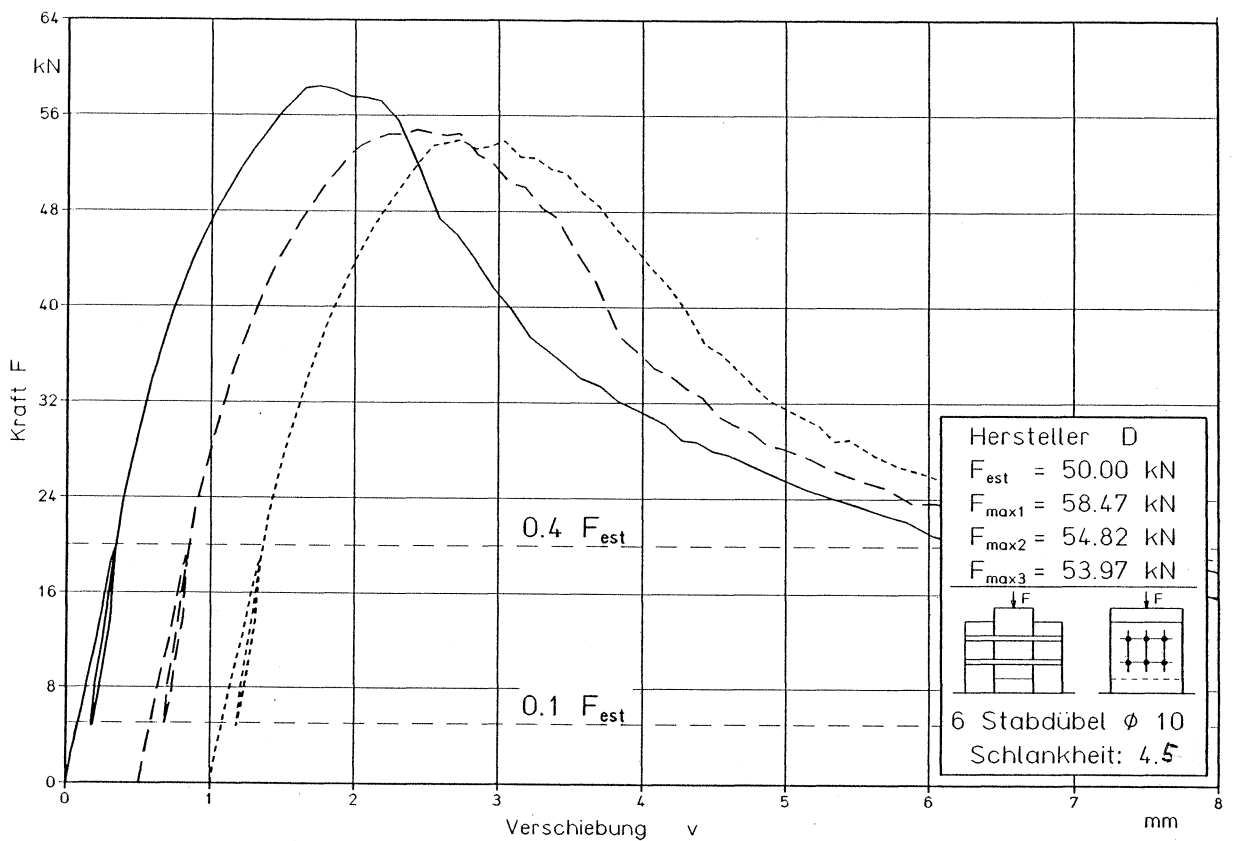


Bild 58: Kraft-Verschiebungs-Diagramme D245

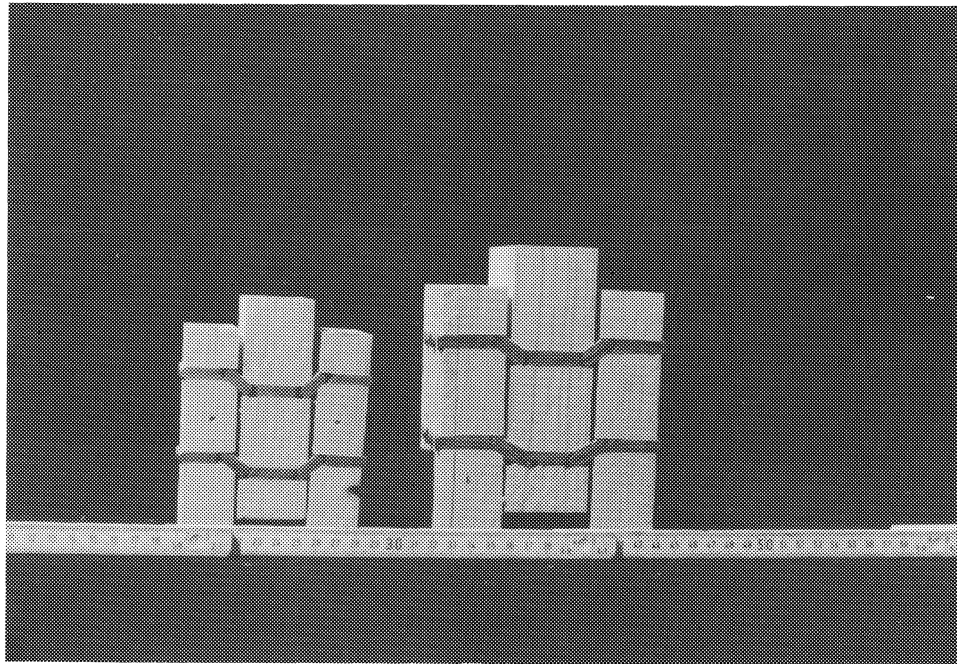


Bild 59:

Aufgetrennte Versuchskörper C145 und C245

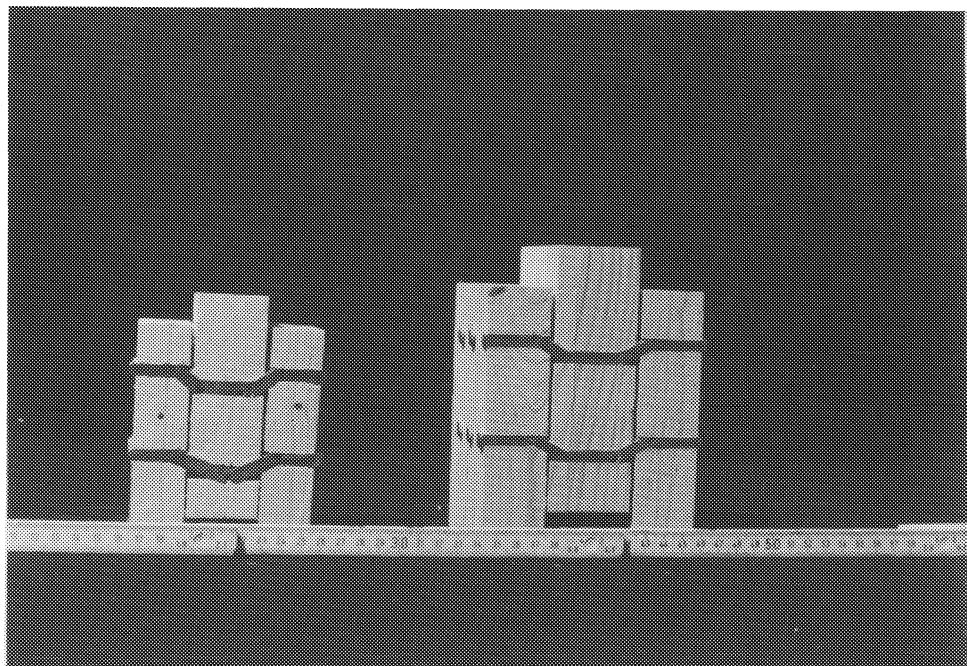


Bild 60:

Aufgetrennte Versuchskörper D145 und D245

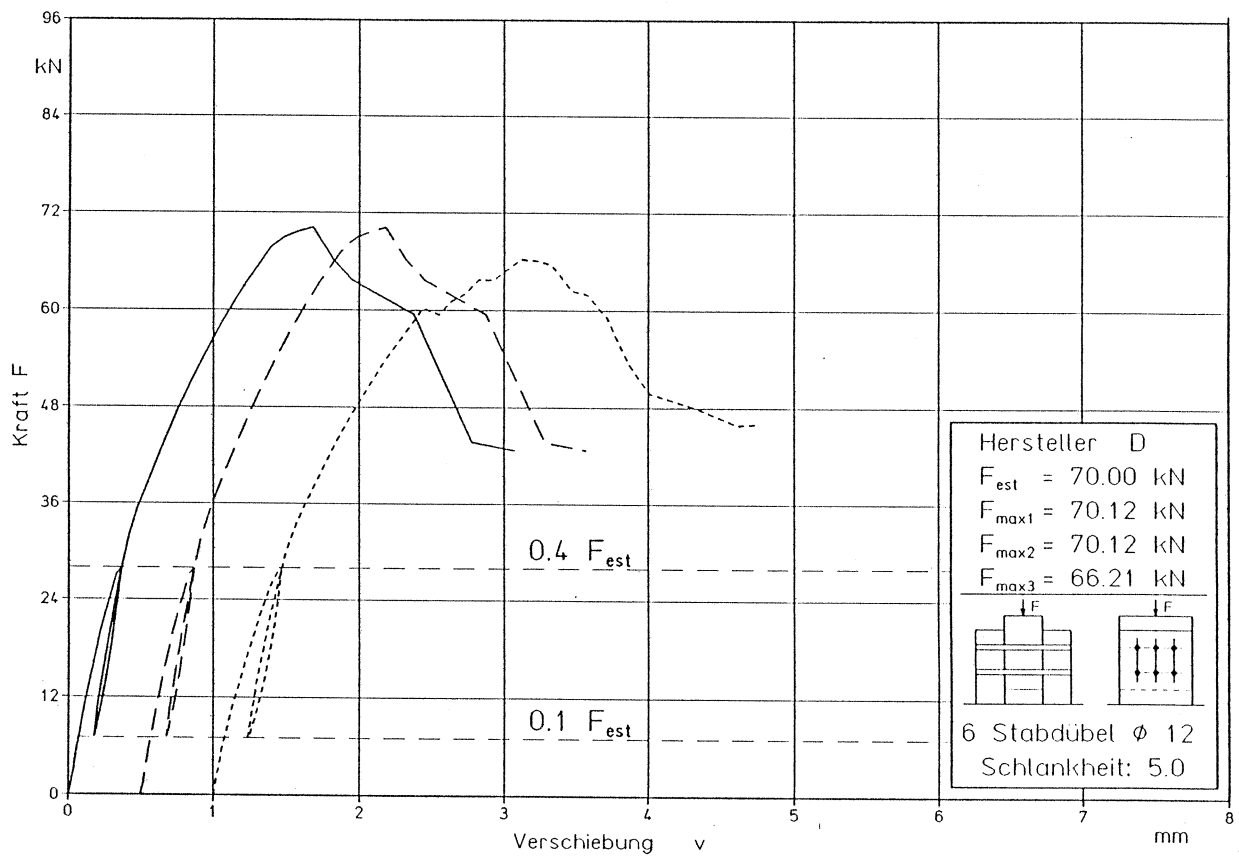


Bild 61: Kraft-Verschiebungs-Diagramme D350

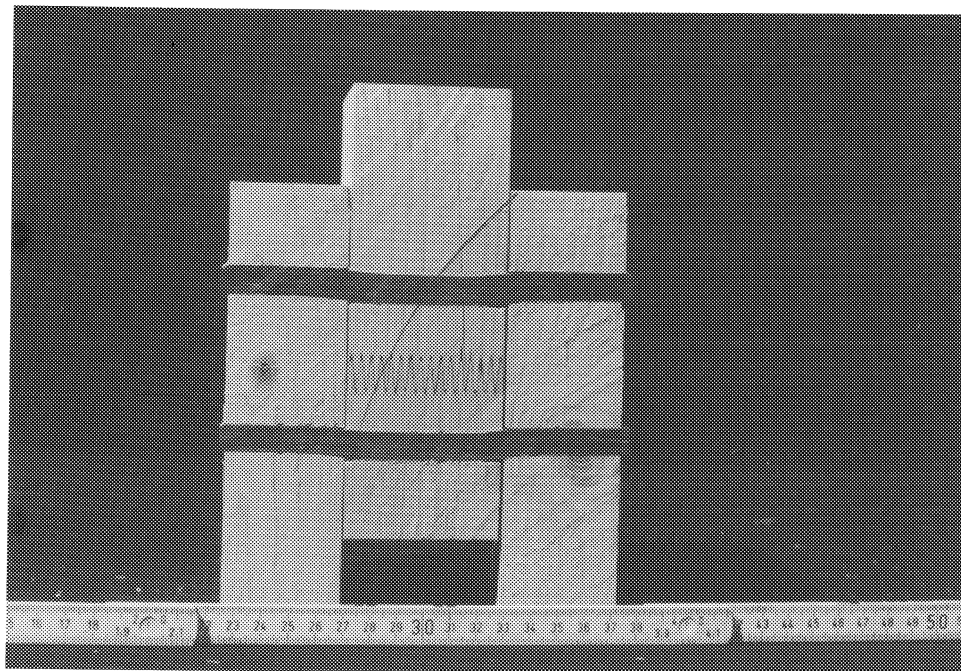


Bild 62: Aufgetrennter Versuchskörper D350

Tabelle 8:

Zusammenstellung der Ergebnisse der Versuche mit
zweischrittigen Druckscherkörpern
Verschiebungsgrößen nach ISO 6891 und Versuchshöchstlasten
Mittelwerte der Versuchsreihen aus jeweils drei Versuchen

Versuchs- bezeichnung	Versuchs- höchstlast je Stift und Scherfuge $F_{\max,s}$ [N]	Anfangsver- schiebung v_a [mm]	Anfangsver- schiebung ohne Schlupf $v_{a,mod}$ [mm]	Anfangsver- schiebungs- modul C [N/mm]	Verschiebungs- modul C_{mod} [N/mm]
C130	1905	0,25	0,27	2683	2470
C135	1906	0,28	0,29	2416	2300
C140	2403	0,13	0,14	5192	4831
C145	2632	0,20	0,23	5611	4735
C220	2422	0,26	0,26	3877	3885
C225	2713	0,37	0,39	2691	2587
C230	2898	0,51	0,52	2634	2577
C235	3005	0,63	0,59	2135	2249
C240	3771	0,25	0,27	5291	4918
C245	3750	0,38	0,39	4382	4290
C315	3418	0,24	0,26	5643	5155
C320	4119	0,23	0,25	7498	6821
C325	3584	0,37	0,39	4525	4276
C330	4653	0,31	0,33	5453	5096
C335	5580	0,19	0,22	8875	7659
C340	5941	0,35	0,38	7524	7091
C415	6988	0,33	0,33	10245	10266
C420	7555	0,25	0,26	13467	12784
C425	7849	0,40	0,41	8498	8268
C430	8580	0,40	0,41	8442	8074
C435	8690	0,50	0,52	7042	6591
D130	2057	0,29	0,33	2373	2154
D135	2142	0,28	0,29	2422	2290
D140	2339	0,33	0,36	3094	2841
D145	2234	0,40	0,46	2732	2405
D220	2774	0,20	0,21	5080	5061
D225	2535	0,46	0,46	2182	2167
D230	3011	0,64	0,64	2230	2171
D235	3599	0,51	0,51	2636	2656
D240	4349	0,33	0,37	5154	4560
D245	4646	0,33	0,34	4980	4924
D315	4264	0,22	0,23	6012	5813
D320	4455	0,26	0,28	6567	6196
D325	4086	0,29	0,28	5828	5881
D330	4903	0,26	0,28	6541	6013
D335	5774	0,19	0,22	8831	7791
D340	5816	0,32	0,35	7458	6833
D350	5735	0,37	0,39	6411	6055
D415	11041	0,45	0,45	11277	11221
D425	13068	0,34	0,38	14660	13329
D430	13682	0,42	0,43	12057	11581
D435	16264	0,46	0,49	14595	13668
D440	16153	0,41	0,43	16639	15609

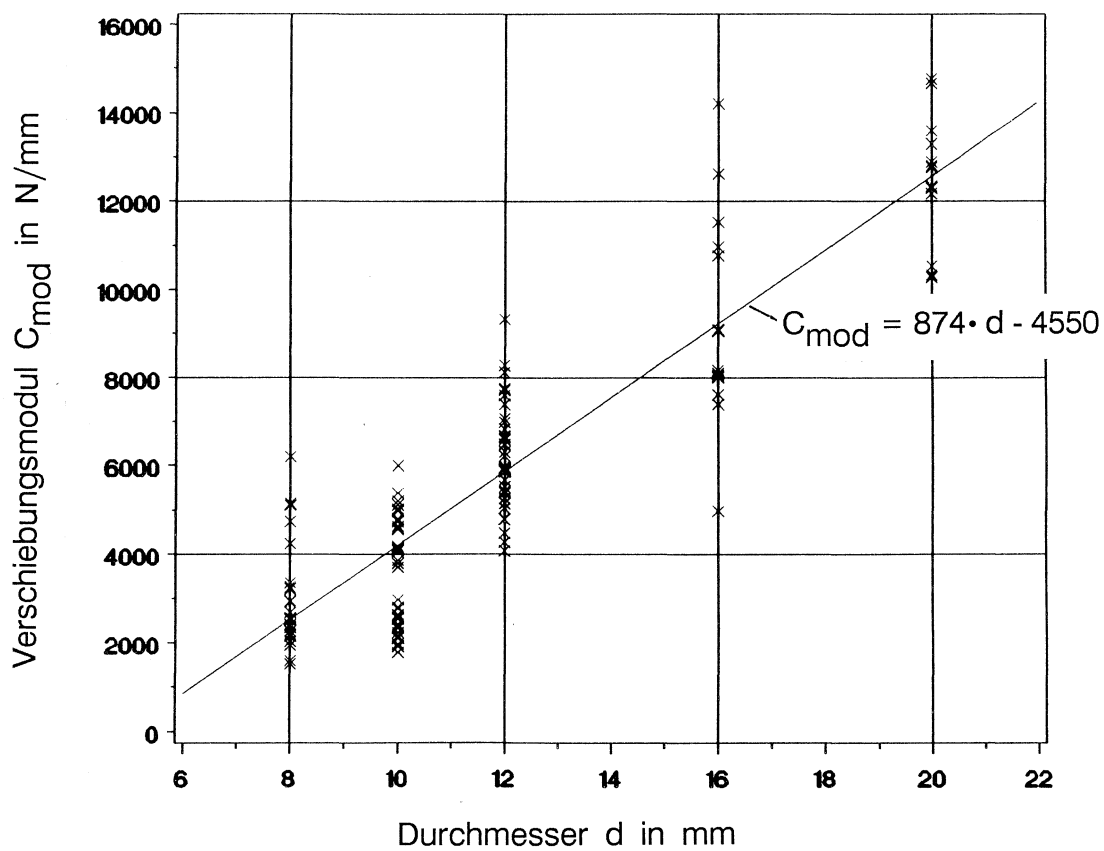


Bild 63:

Verschiebungsmodul C_{mod} in Abhängigkeit vom Durchmesser d ermittelt nach ISO 6891; 128 Einzelwerte

Tabelle 9:

Gegenüberstellung der Versuchshöchstlasten je Stift und Scherfuge
mit den theoretisch errechneten Tragfähigkeiten $R_{u,i}$;
Auswertung mit mittlerer Lochleibungsfestigkeit nach Whale/Smith/Larsen
mit $f = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_m$; Mittel aus jeweils drei Versuchen

Versuchs- bezeichnung	rechnerische Lochleibungs- festigkeit	rechnerische Tragfähigkeit Bruchursache 2	rechnerische Tragfähigkeit Bruchursache 4	rechnerische Tragfähigkeit Bruchursache 3a	Versuchs- höchstlast je Stift und Scherfuge $F_{\max,s}$ [N]	Verhältnis $\frac{F_{\max,s}}{R_{u,\min}}$
	f [N/mm ²]	R_{u2} [N]	R_{u4} [N]	R_{u3a} [N]		
C130	35,1	3367	2634	<u>2354</u>	1905	0,81
C135	36,2	4055	2676	<u>2650</u>	1906	0,72
C140	30,7	3932	<u>2465</u>	2525	2403	0,97
C145	30,9	4447	<u>2472</u>	2756	2632	1,06
C220	33,7	3367	3814	<u>2910</u>	2422	0,83
C225	34,3	4285	3848	<u>3207</u>	2713	0,85
C230	34,0	5105	3833	<u>3506</u>	2898	0,83
C235	33,9	5935	<u>3827</u>	3847	3005	0,79
C240	33,5	6698	<u>3803</u>	4176	3771	0,99
C245	32,2	7255	<u>3732</u>	4411	3750	1,00
C315	31,5	<u>3404</u>	5630	4029	3418	1,00
C320	32,3	4652	5700	<u>4258</u>	4119	0,97
C325	31,8	5724	5655	<u>4525</u>	3584	0,79
C330	34,9	7537	5924	<u>5281</u>	4653	0,88
C335	31,5	7943	5630	<u>5329</u>	5580	1,05
C340	30,7	8837	<u>5555</u>	5680	5941	1,07
C415	29,8	<u>5729</u>	9438	6756	6988	1,22
C420	29,4	7535	9374	<u>6978</u>	7555	1,08
C425	32,1	10271	9789	<u>7948</u>	7849	0,99
C430	32,8	12587	9892	<u>8820</u>	8580	0,97
C435	33,3	14905	9965	<u>9784</u>	8690	0,89
D130	35,2	3378	2889	<u>2465</u>	2057	0,83
D135	35,3	3948	2892	<u>2684</u>	2142	0,80
D140	29,3	3751	2637	<u>2508</u>	2339	0,93
D145	30,4	4372	<u>2684</u>	2789	2234	0,83
D220	34,6	3462	4316	<u>3211</u>	2774	0,86
D225	34,1	4259	4281	<u>3402</u>	2535	0,75
D230	32,8	4916	4199	<u>3585</u>	3011	0,84
D235	32,1	5622	4157	<u>3837</u>	3599	0,94
D240	32,2	6445	<u>4163</u>	4181	4349	1,05
D245	32,5	7303	<u>4178</u>	4563	4646	1,11
D315	33,0	<u>3560</u>	6162	4403	4264	1,20
D320	32,0	4602	6067	<u>4462</u>	4455	1,00
D325	37,2	6688	6543	<u>5256</u>	4086	0,78
D330	35,0	7551	6346	<u>5462</u>	4903	0,90
D335	35,1	8846	6359	<u>5968</u>	5774	0,97
D340	34,9	10056	<u>6343</u>	6471	5816	0,92
D350	33,4	12039	<u>6208</u>	7324	5735	0,92
D415	28,9	<u>8659</u>	15472	11048	11041	1,27
D425	30,4	15208	15883	<u>12446</u>	13068	1,05
D430	30,7	18399	15947	<u>13516</u>	13682	1,01
D435	31,4	21945	16124	<u>14937</u>	16264	1,09
D440	29,3	23400	15574	<u>15336</u>	16153	1,05

Die unterstrichenen und fettgedruckten Werte sind die rechnerisch maßgebenden Tragfähigkeiten.

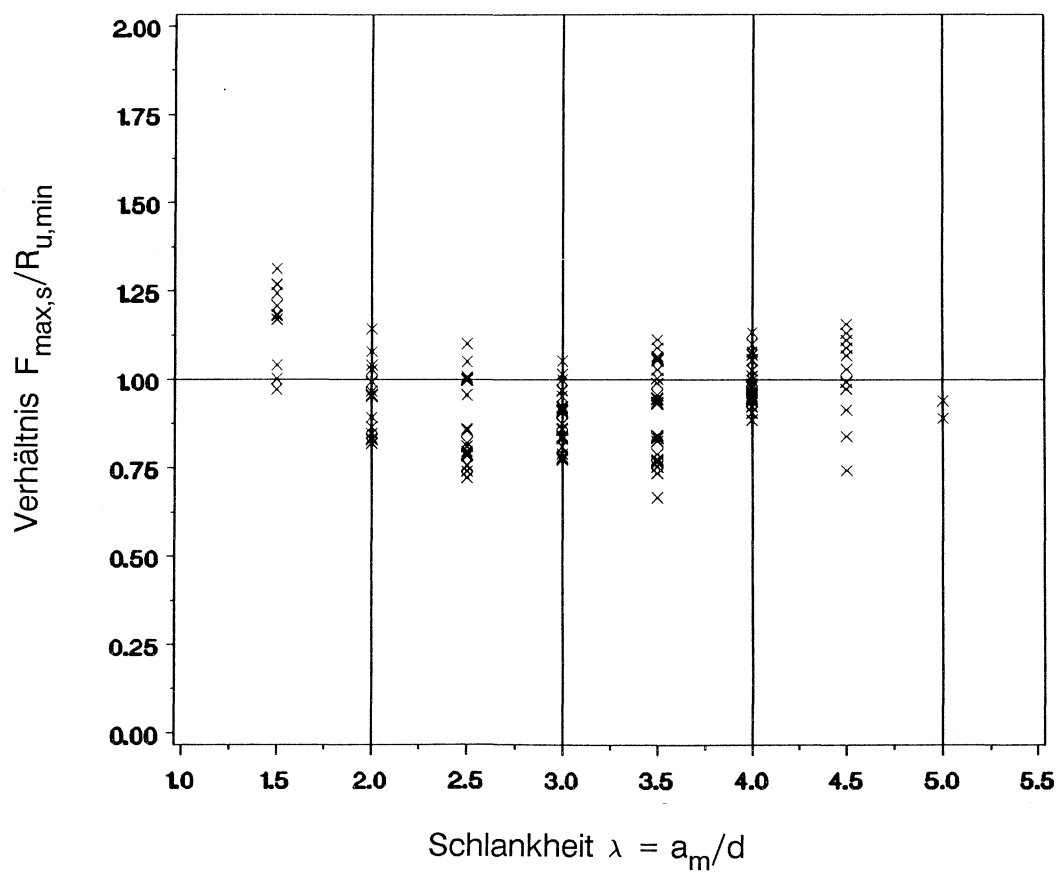


Bild 64:

Verhältnis $F_{\max,s}/R_{u,\min}$ in Abhängigkeit von der Schlankheit;
 Auswertung mit Lochleibungsfestigkeit nach Whale/Smith/Larsen
 mit $f = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_m$; 128 Einzelwerte

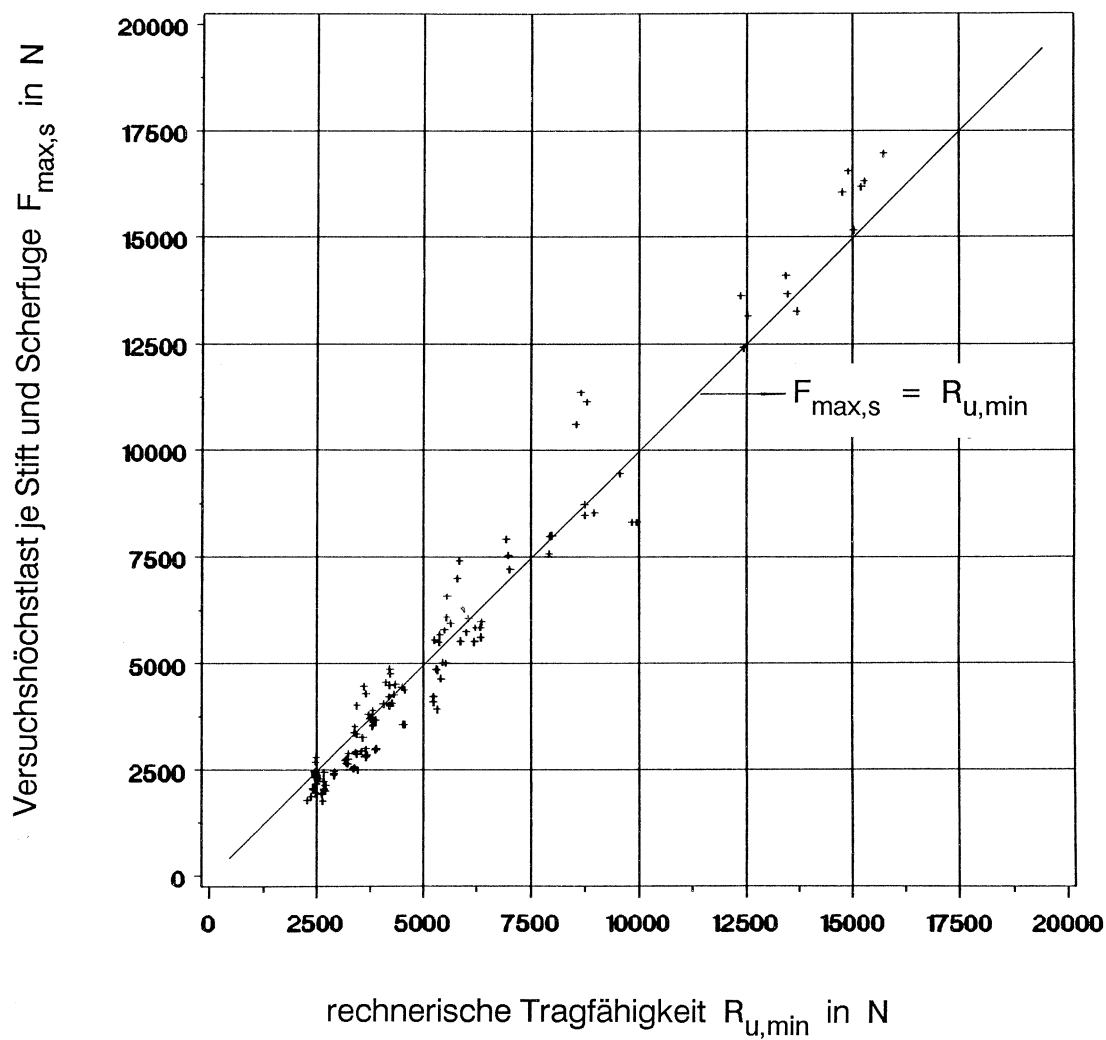


Bild 65:

Vergleich der Versuchshöchstlasten $F_{\max,s}$ mit den rechnerisch maßgebenden Tragfähigkeiten $R_{u,min}$; Auswertung mit Lochleibungsfestigkeit nach Whale/Smith/Larsen mit $f = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_m$; 128 Einzelwerte

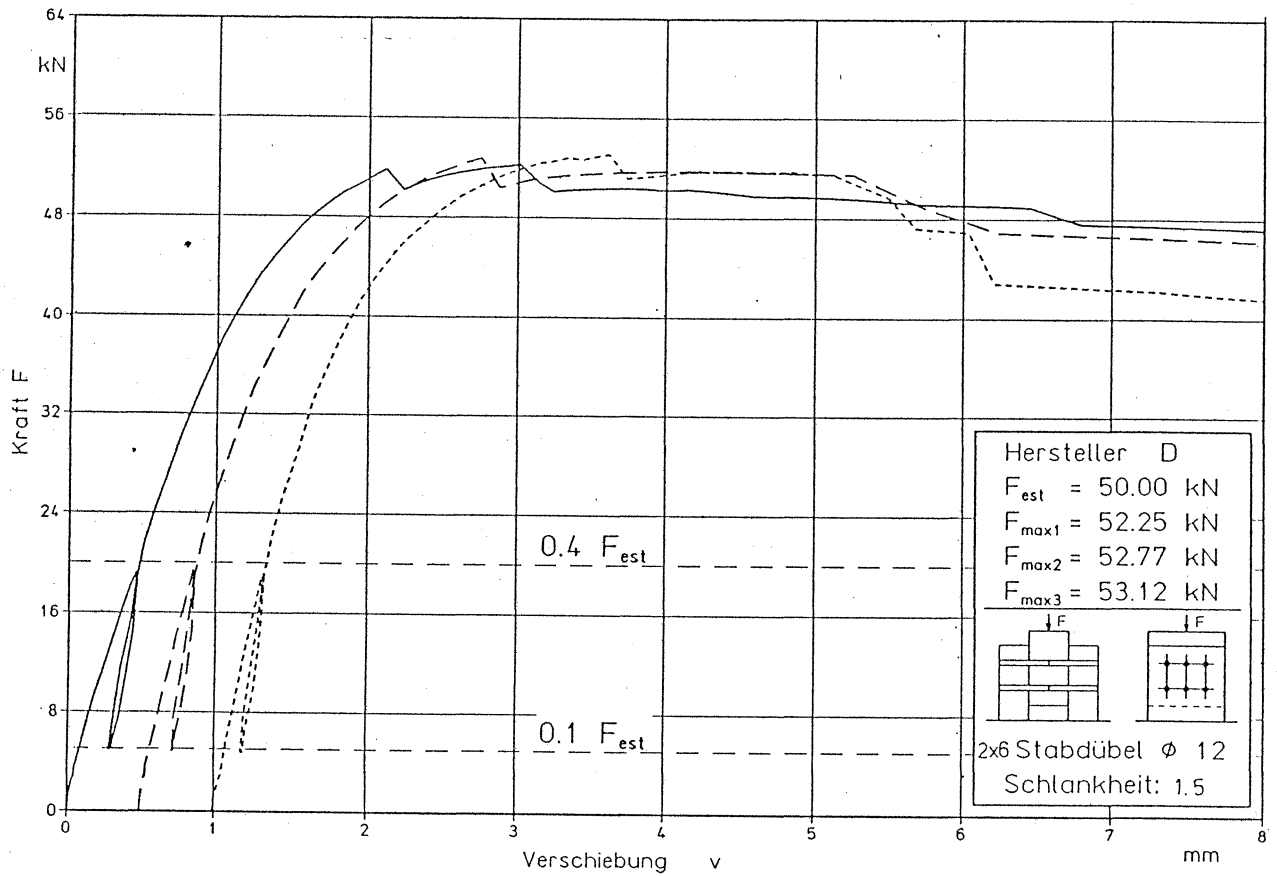


Bild 66: Kraft-Verschiebungs-Diagramme D330

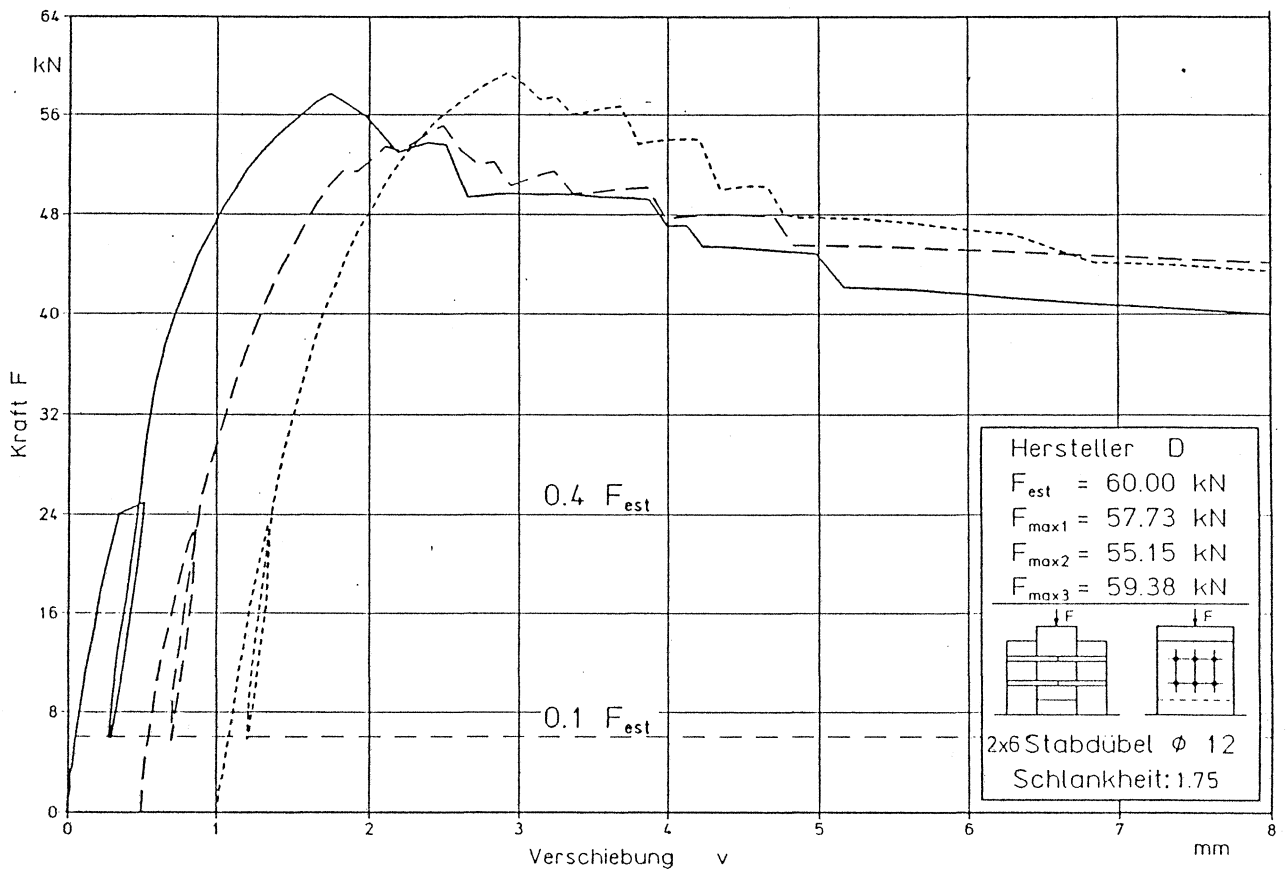


Bild 67: Kraft-Verschiebungs-Diagramme D335

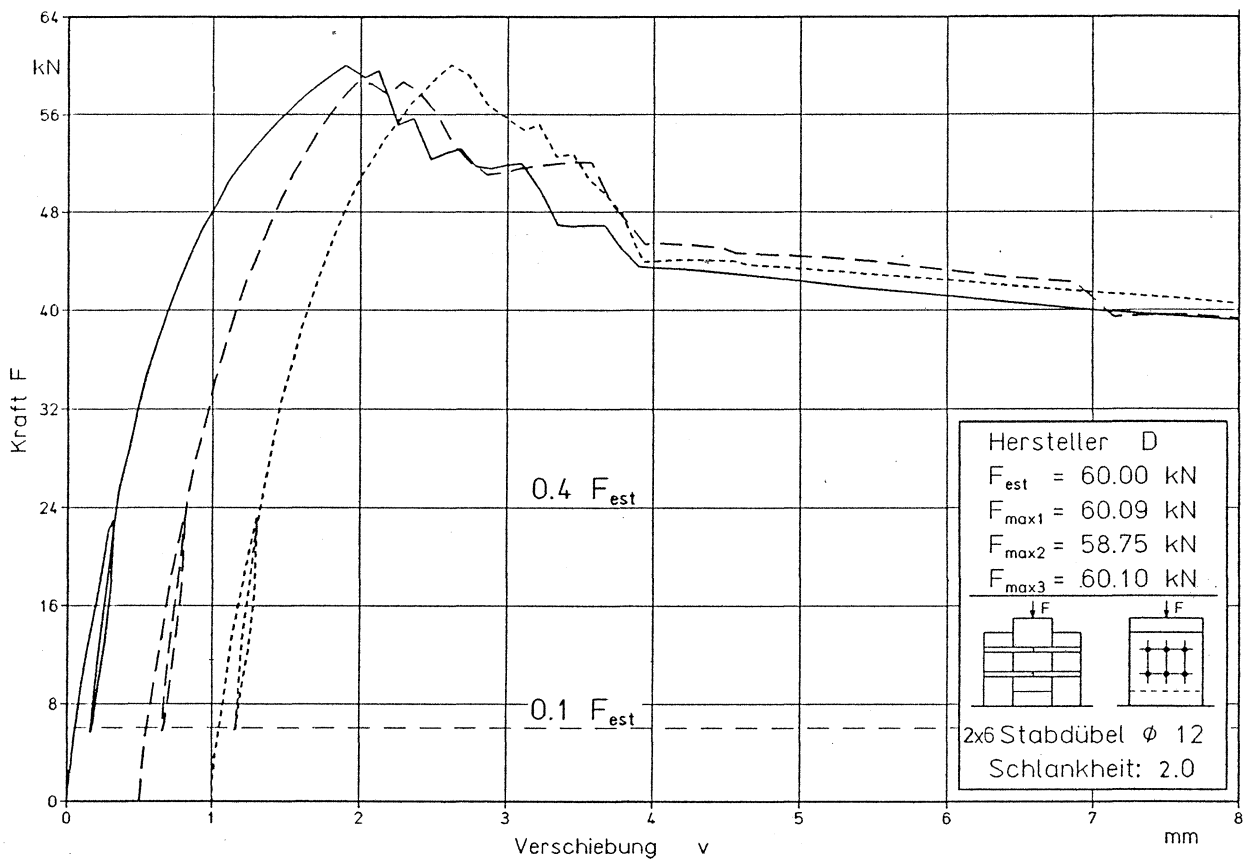


Bild 68: Kraft-Verschiebungs-Diagramme D340

Tabelle 10: Zusammenstellung der Ergebnisse der Versuche mit einschnittigen Druckscherkörpern mit den Stiften D3 (ϕ 12mm) Verschiebungsgrößen nach ISO 6891 und Versuchshöchstlasten Mittelwerte der Versuchsreihen aus jeweils drei Versuchen

Schlankheit	Versuchshöchstlast je Stift und Scherfuge	Anfangsverschiebung	Anfangsverschiebung ohne Schlupf	Anfangsverschiebungsmodul	Verschiebungsmodul
λ	$F_{max,s}$ [N]	v_a [mm]	$v_{a,mod}$ [mm]	C [N/mm]	C_{mod} [N/mm]
1,50	4393	0,38	0,41	4559	4261
1,75	4785	0,35	0,39	5745	5178
2,00	4971	0,31	0,34	6491	5831

Tabelle 11:

Gegenüberstellung der Versuchshöchstlasten je Stift und Scherfuge mit den errechneten Tragfähigkeiten R_u ;
 Auswertung mit mittlerer Lochleibungsfestigkeit nach Whale/Smith/Larsen mit $f = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_m$
 Mittel aus jeweils drei Versuchen mit den Stiften D3 (ϕ 12mm)

Schlankheit λ	rechnerische Lochleibungsfestigkeit f [N/mm ²]	rechnerische Tragfähigkeiten der möglichen Bruchursachen				Versuchshöchstlast je Stift und Scherfuge $F_{max,s}$ [N]	Verhältnis $\frac{F_{max,s}}{R_{u,min}}$
		R_{u1}	R_{u2b}	R_{u3b}	R_{u4}		
1,50	30,2	5232	6515	<u>4312</u>	5895	4393	1,02
1,75	31,5	6365	7926	<u>4575</u>	6020	4785	1,05
2,00	30,5	7050	8779	<u>4668</u>	5927	4971	1,06

Die unterstrichenen und fettgedruckten Werte sind die rechnerisch maßgebenden Tragfähigkeiten.

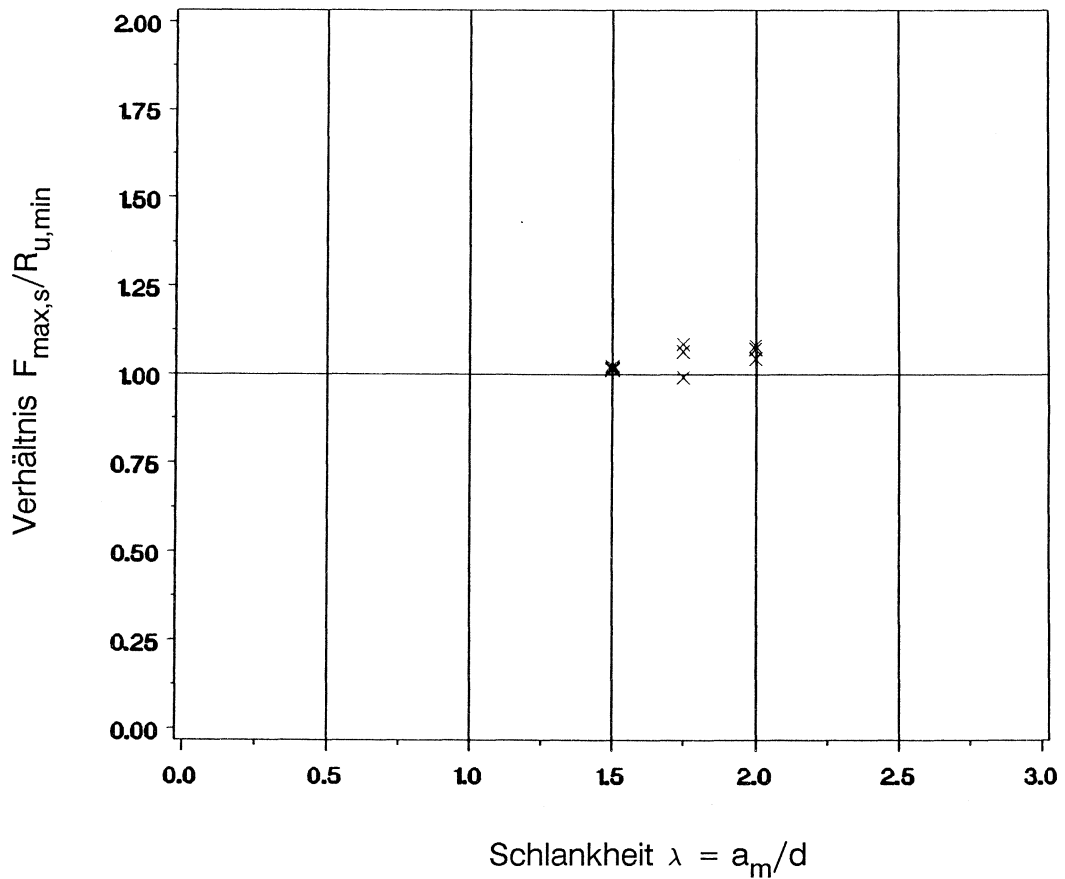


Bild 69:

Verhältnis $F_{max,s}/R_{u,min}$ in Abhängigkeit von der Schlankheit;
 Auswertung mit Lochleibungsfestigkeit nach Whale/Smith/Larsen mit $f = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_m$; 9 Einzelwerte

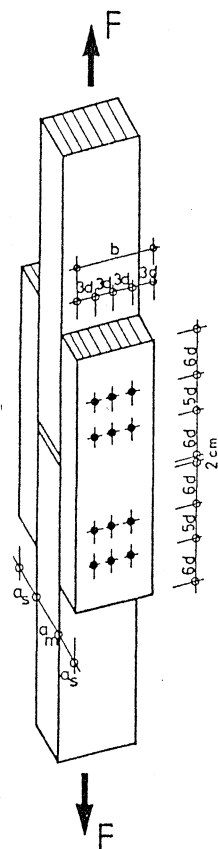


Bild 70:

Abmessungen der Prüfkörper für die Zugscherversuche

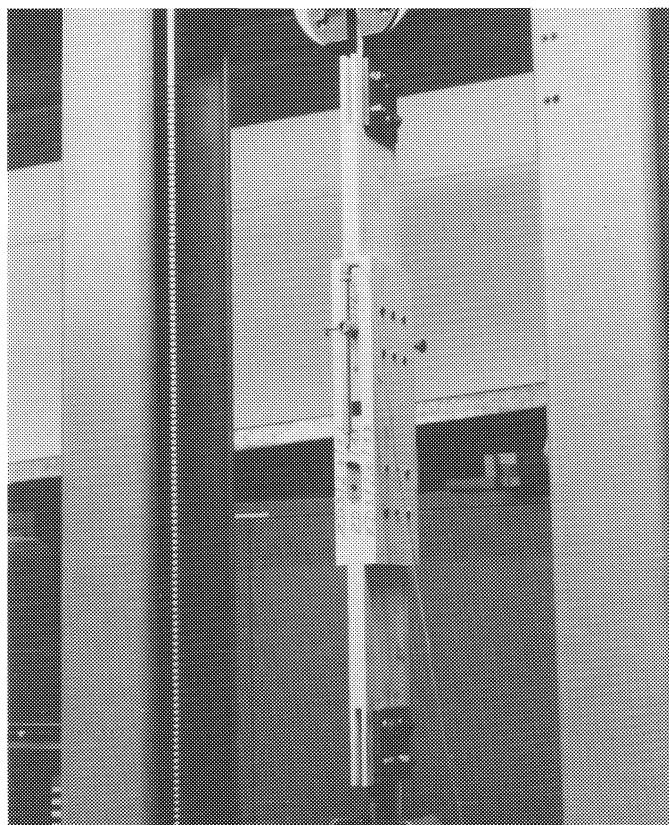


Bild 71:

Eingebauter Zugscherkörper vor der Prüfung

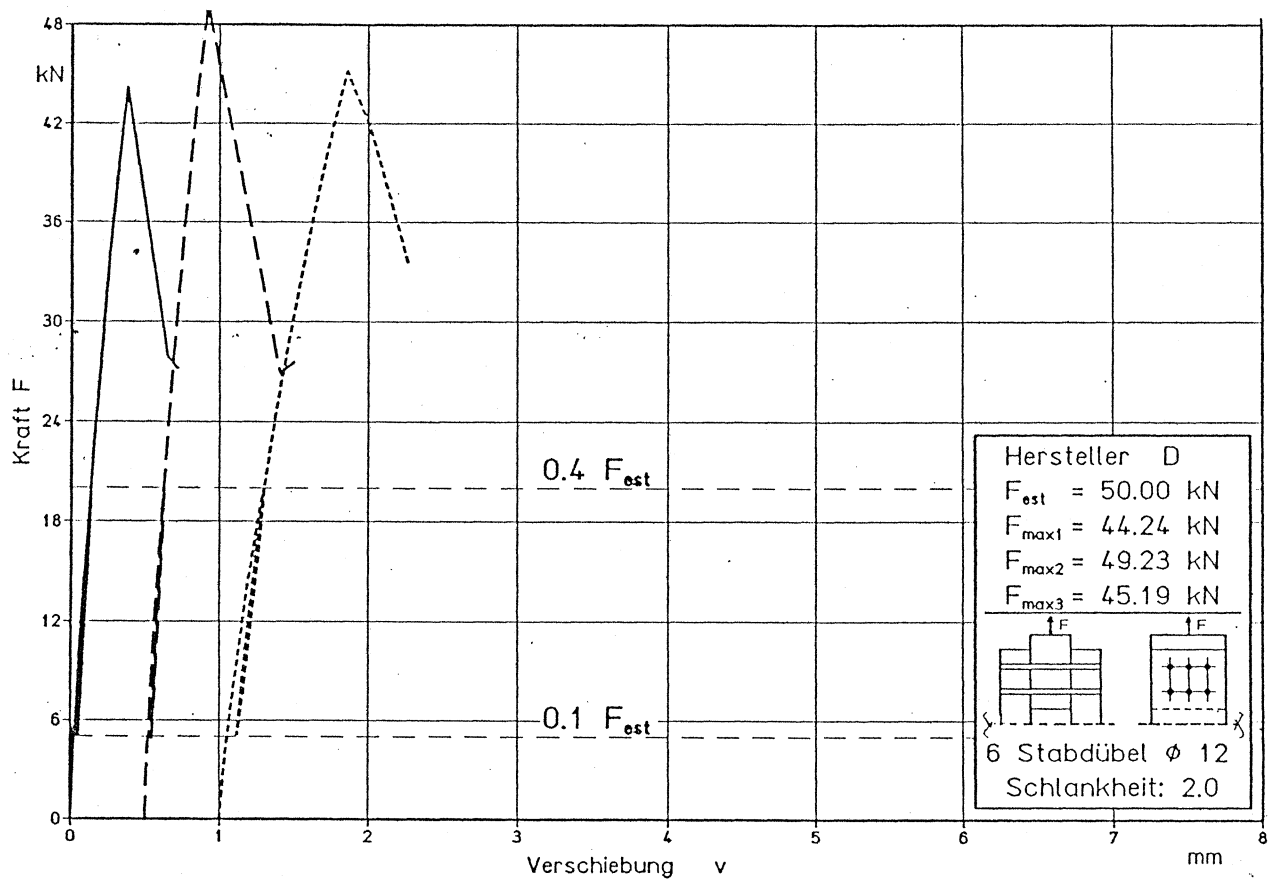


Bild 72: Kraft-Verschiebungs-Diagramme D320

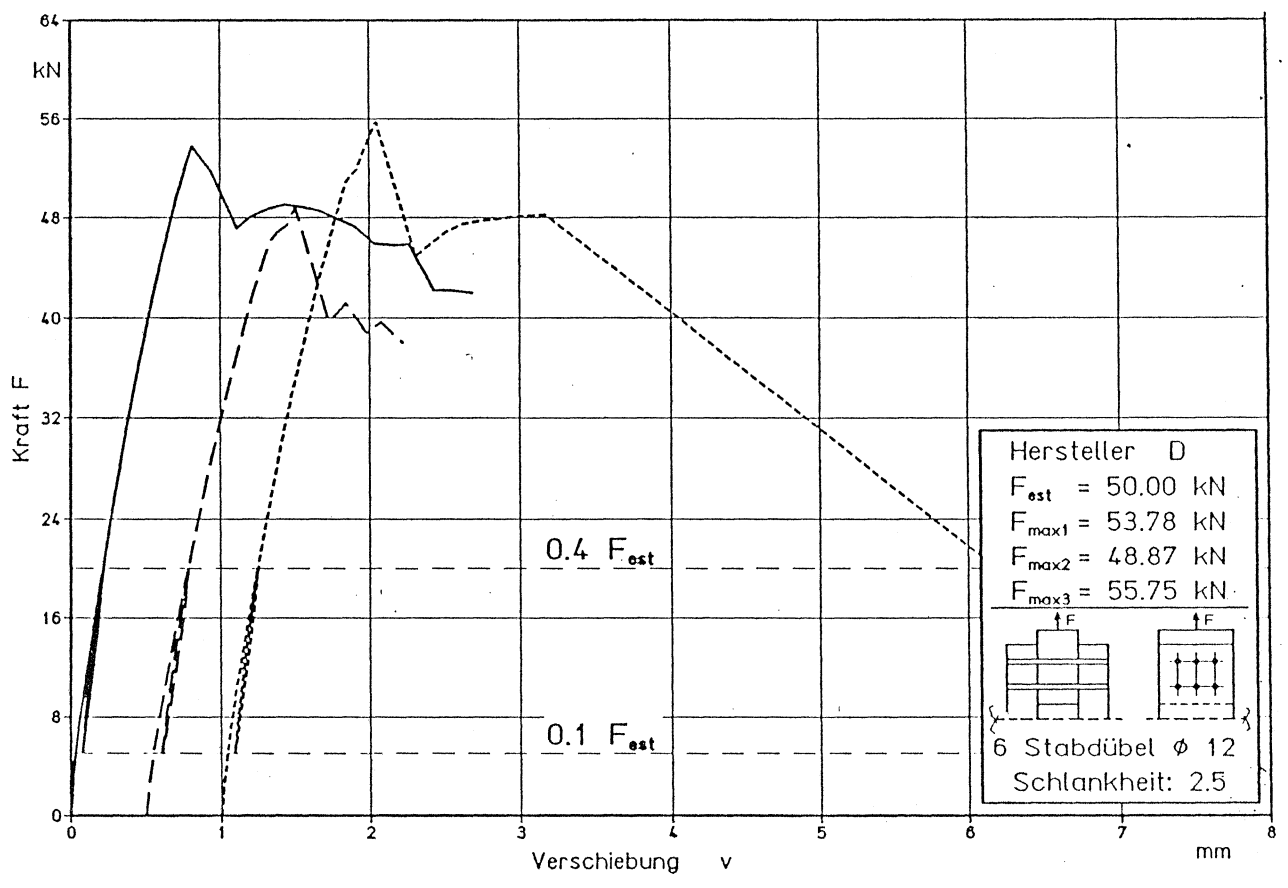


Bild 73: Kraft-Verschiebungs-Diagramme D325

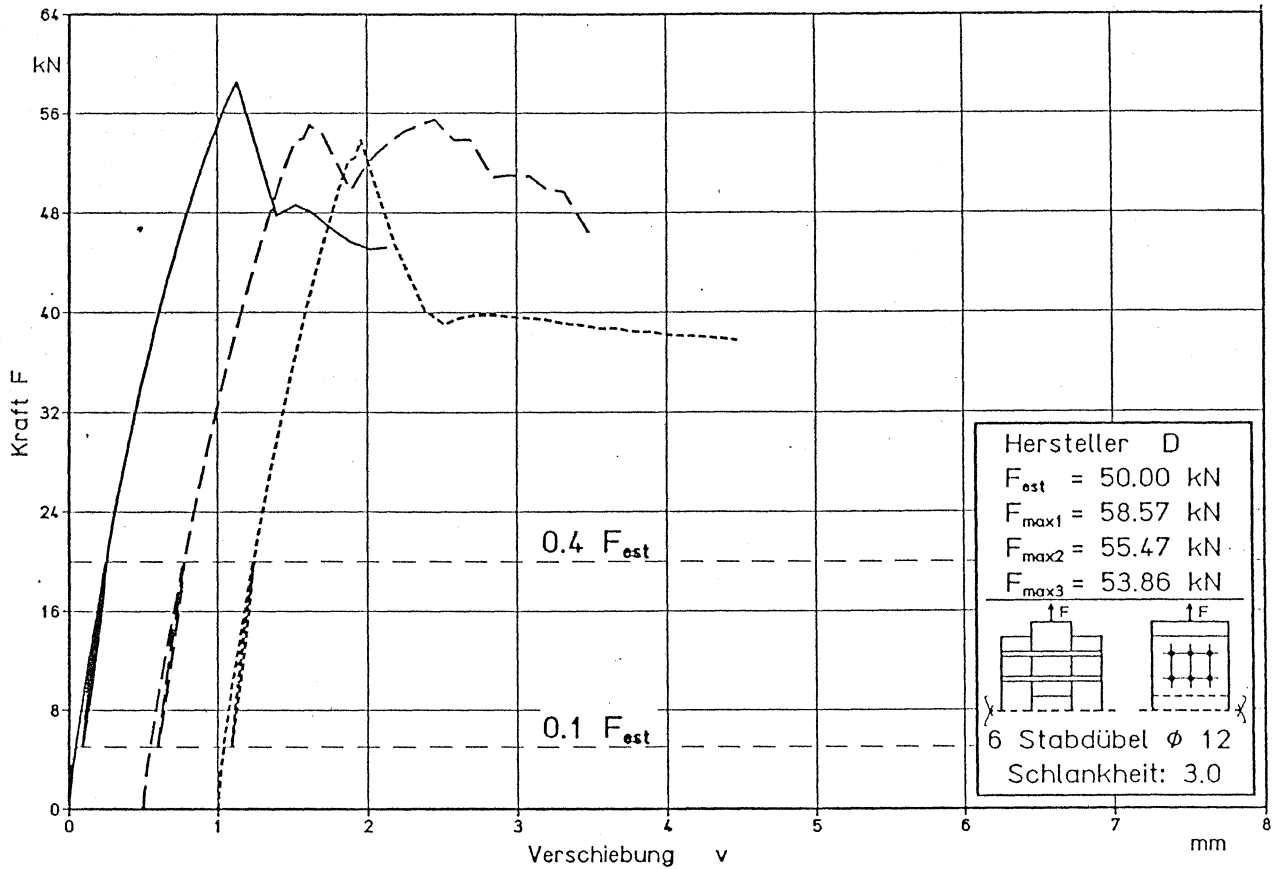


Bild 74: Kraft-Verschiebungs-Diagramme D330

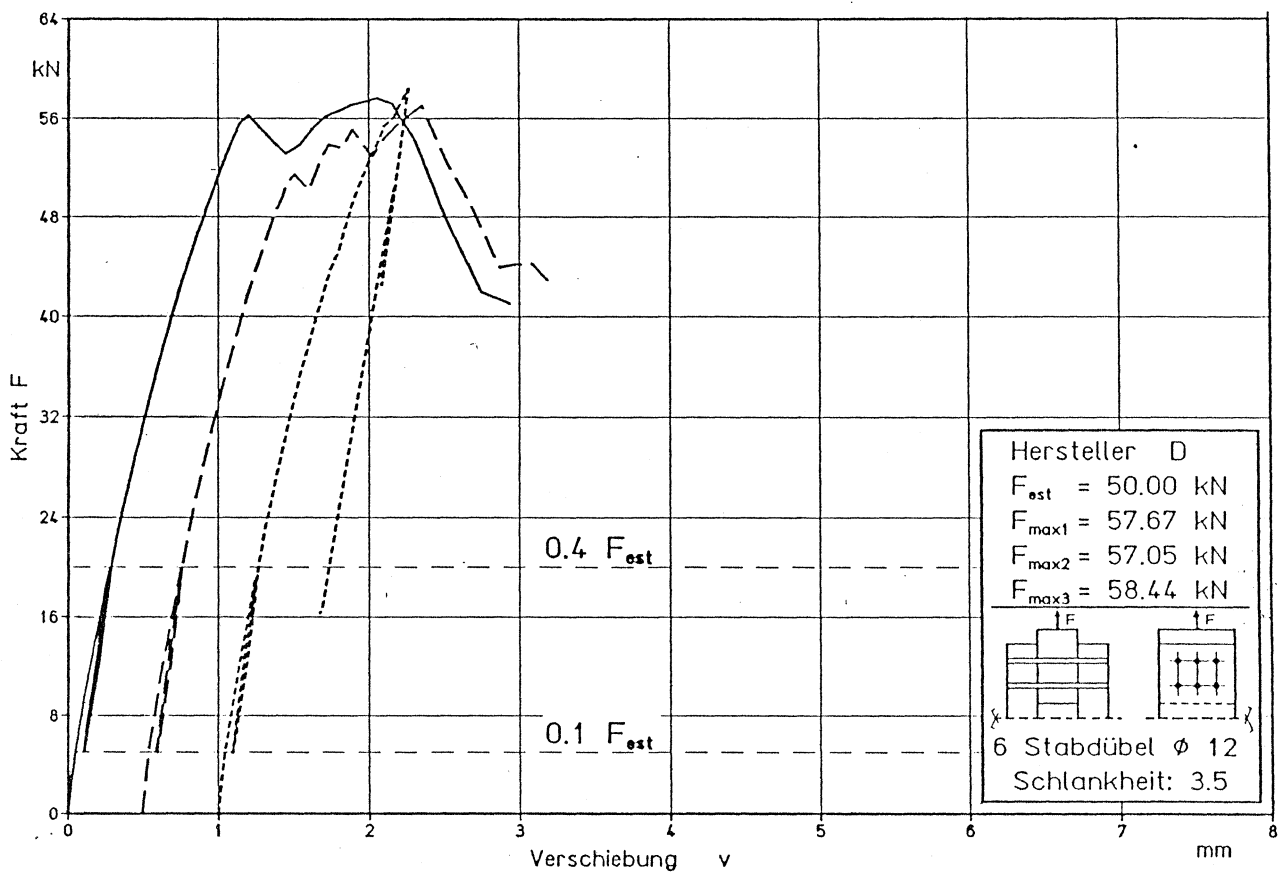


Bild 75: Kraft-Verschiebungs-Diagramme D335

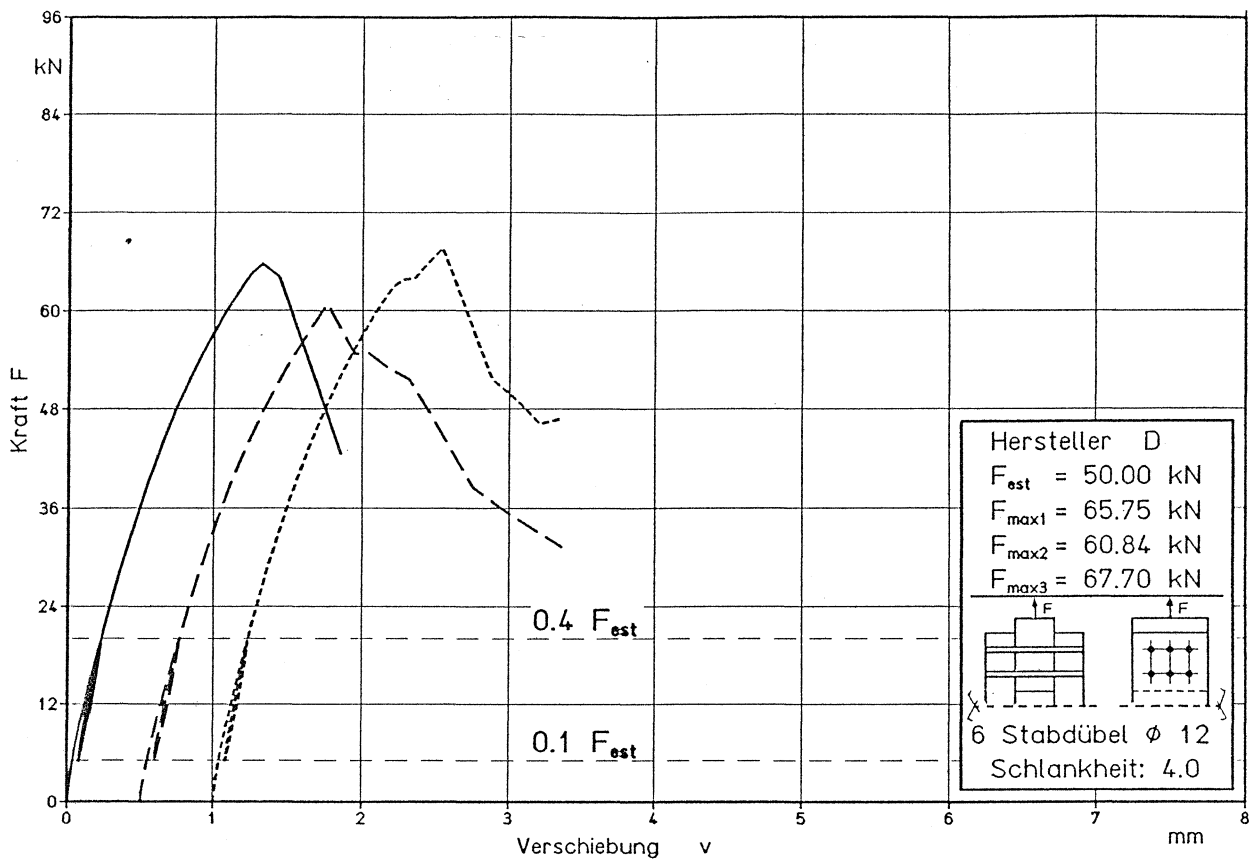


Bild 76: Kraft-Verschiebungs-Diagramme D340

Tabelle 12: Zusammenstellung der Ergebnisse der Versuche mit zweischnittigen Zugscherkörpern mit den Stiften D3 ($\phi 12\text{mm}$); Verschiebungsgrößen nach ISO 6891 und Versuchshöchstlasten; Mittelwerte der Versuchsreihen aus jeweils drei Versuchen

Schlankheit	Versuchshöchstlast je Stift und Scherfuge	Anfangsverschiebung	Anfangsverschiebung ohne Schlupf	Anfangsverschiebungsmodul	Verschiebungsmodul
λ	$F_{max,s}$ [N]	v_a [mm]	$v_{a,mod}$ [mm]	C [N/mm]	C_{mod} [N/mm]
2,0	3852	1,81	1,98	1084	996
2,5	4400	2,43	2,70	696	628
3,0	4664	2,52	2,76	664	605
3,5	4810	2,60	2,85	644	587
4,0	5397	2,38	2,61	704	640

Tabelle 13:

Gegenüberstellung der Versuchshöchstlasten je Stift und Scherfuge mit den errechneten Tragfähigkeiten R_u ;
 Auswertung mit mittlerer Lochleibungsfestigkeit nach Whale/Smith/Larsen mit $f = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_m$;
 Mittel aus jeweils drei Versuchen mit den Stiften D3 (ϕ 12mm)

Schlankheit λ	rechnerische Lochleibungsfestigkeit f [N/mm ²]	rechnerische Tragfähigkeit Bruchursache 2 R_{u2} [N]	rechnerische Tragfähigkeit Bruchursache 4 R_{u4} [N]	rechnerische Tragfähigkeit Bruchursache 3a R_{u3a} [N]	Versuchshöchstlast je Stift und Scherfuge $F_{max,s}$ [N]	Verhältnis $\frac{F_{max,s}}{R_{u,min}}$
2,0	31,5	4529	6020	<u>4420</u>	3852	0,87
2,5	31,9	5738	6061	<u>4730</u>	4400	0,93
3,0	31,6	6822	6032	<u>5064</u>	4664	0,92
3,5	31,1	7829	5983	<u>5418</u>	4810	0,89
4,0	31,7	9133	6045	<u>5974</u>	5397	0,90

Die unterstrichenen und fettgedruckten Werte sind die rechnerisch maßgebenden Tragfähigkeiten.

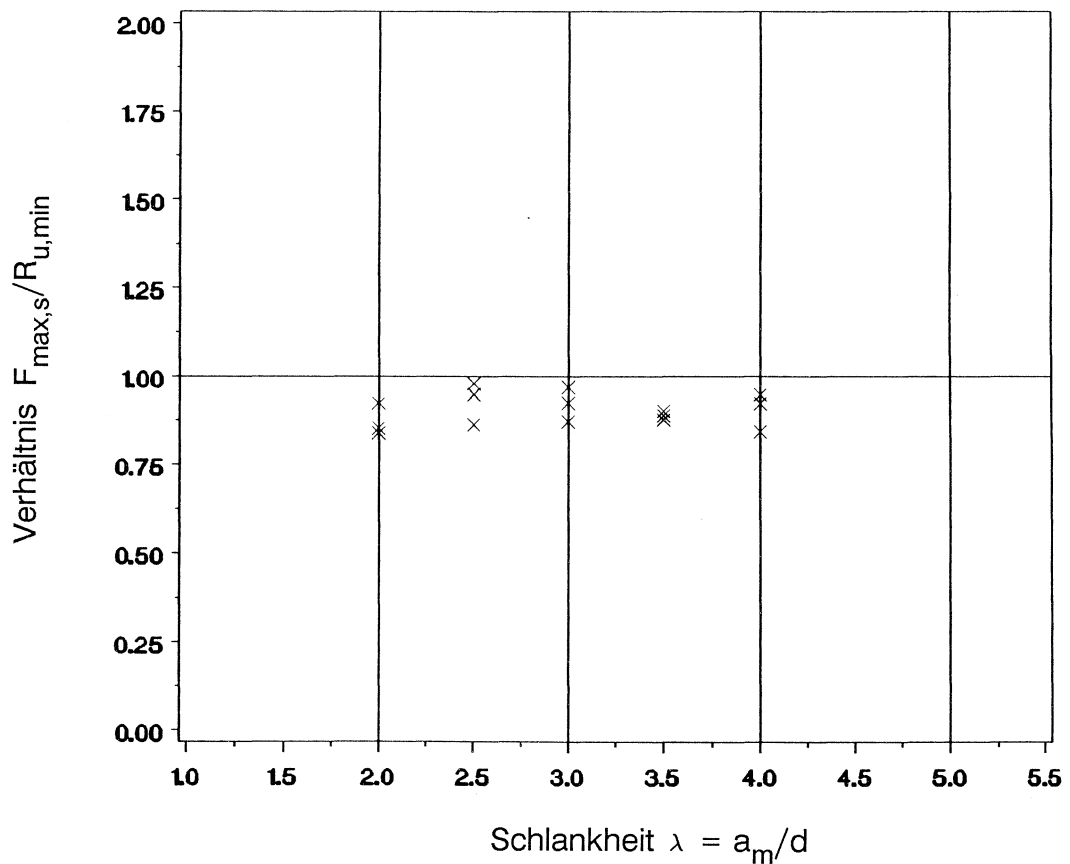


Bild 77:

Verhältnis $F_{max,s}/R_{u,min}$ in Abhängigkeit von der Schlankheit;
 Auswertung mit Lochleibungsfestigkeit nach Whale/Smith/Larsen mit $f = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_m$; 15 Einzelwerte