

Alg-Sitzungen:

7.12.79 in Stuttgart

30.10.80 in Berlin

79/13

VERSUCHE MIT EINGELEIMTEN GEWINDESTANGEN

Forschungsarbeit
durchgeführt im Auftrag der Entwicklungsgemeinschaft Holzbau
in der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung e.V.
mit Förderung des
Bundesministeriums für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau

von
Karl Möhler und Klaus Hemmer
Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen
Universität Karlsruhe (TH)
1981

Inhaltsverzeichnis :

1.	Ziel des Forschungsvorhabens	1
2.	Auswertung der Literatur und einschlägige Untersuchungen	1
3.	Karlsruher Versuche 1980	7
3.1	Herstellung und Ausbildung der Probekörper	7
3.2	Durchführung der Versuche	10
4.	Versuchsergebnisse	11
4.1	Versuchsreihe HA	11
4.2	Versuchsreihe HQ	13
4.3	Versuchsreihe SA	15
4.4	Versuchsreihe SQ	15
4.5	Materialeigenschaften	15
5.	Zusammenfassung der Versuchsergebnisse	16
6.	Vorschlag für Bemessungsregeln	17
6.1	Axiale Zug- oder Druckbeanspruchung von in Hirnholz faserparallel eingeleimten Gewindestählen	17
6.2	Axiale Zug- und Druckbeanspruchung von senkrecht zur Faser eingeleimten Gewindestählen	17
6.3	Querbelastung von in Hirnholz faserparallel eingeleimten Gewindestählen	18
6.4	Querbelastung von in Seitenholz senkrecht zur Faserrichtung eingeleimten Gewindestählen	18
7.	Literaturangabe	20

23 Anlagen (16 Bilder, 8 Tabellen)

Versuche mit eingeleimten Gewindestangen

1. Ziel des Forschungsvorhabens

In Brettschichtholz eingeleimte Gewindestangen aus Stahl können bei Beanspruchung in Schaftrichtung zur Aufnahme von Zug- und Druckkräften, bei Beanspruchung quer zur Schaftrichtung (Abscheren) zur Herstellung von Anschlüssen und Stößen herangezogen werden. Sie bieten daher Vorteile bei der Ausbildung von Stützenfüßen, Träger-Auflagerungen, ausgeklinkten und durchbrochenen Trägern, eingespannten Stützen und Rahmen, bei denen quer oder längs zur Faserichtung des Holzes wirkende Beanspruchungen aufgenommen werden müssen. Je nach dem Anwendungsbereich können die Gewindestangen quer oder längs zur Faser eingeleimt werden. Anwendungsbeispiele sind in Bild 1, Anlage 1 dargestellt. Da in der derzeit gültigen DIN 1052 "Berechnung und Ausführung von Holzbauwerken" wegen mangelnder Unterlagen Berechnungsangaben fehlen, sollten unter Heranziehung ausländischer Untersuchungen und eigener bei anderen Forschungsvorhaben und Einzeluntersuchungen erhaltenen Ergebnisse und durch weitere Versuche die Grundlagen für die Ausführung und Bemessung von Konstruktionen mit eingeleimten Gewindestangen erarbeitet und entsprechende Vorschläge für die Aufnahme in die z.Zt. in Bearbeitung befindliche Neufassung der DIN 1052 gemacht werden.

2. Auswertung der Literatur und einschlägige Untersuchungen

Bei Durchsicht der Literatur stellt man fest, daß bisher in keiner Holzbauvorschrift Bemessungsgrundlagen für eingeleimte Gewindestähle enthalten sind, obwohl diese wiederholt bei Einzelausführungen in den letzten 10 Jahren zur Anwendung kamen. Ein Anwendungsbeispiel ist in [1] mit den zugehörigen Versuchen beschrieben, aus denen zwar die

verhältnismäßig hohe Belastbarkeit einer quer zur Faserrichtung eingeleimten Gewindestange mit metrischem Gewinde hervorgeht, aber keine allgemeinen Bemessungsgrundlagen abgeleitet werden können. Die Versuche zeigten aber, daß Haftfestigkeiten von mehr als 5 N/mm^2 , bezogen auf die Haftfläche, erreicht wurden. Für ohne Verleimen in quer zur Faserrichtung vorgebohrte Löcher eingedrehte Gewindestangen sind in [2] Ausführungs- und Bemessungsregeln angegeben, wobei darauf hingewiesen wird, daß die aufnehmbare Belastung einer Gewindestange einerseits durch die Längsspannung im maßgebenden Gewindequerschnitt (Spannungsquerschnitt), andererseits durch die aufnehmbare "Haftspannung" zwischen Stahl und Holz bestimmt wird. Die für Douglas-fir und Lärche ausnutzbaren Haftspannungen dürfen hiernach je nach Durchmesser zwischen 6 und 30 mm bei Langzeitbelastung die Werte 2,1 bis $1,4 \text{ N/mm}^2$ nicht überschreiten (siehe Bild 2, Anlage 2). Die angegebenen Bohrlochdurchmesser von 0,70 bis 0,75 mal Nenndurchmesser sollen ein volles Fassen der Gewindegänge im Holz gewährleisten. Eine Übertragung dieser Bemessungsregeln auf europäische Nadelhölzer muß u.E. durch Versuche überprüft werden, zumal diese Werte nur für Douglas-fir und Lärche mit einer Mindestdarrohdichte von $0,51 \text{ g/cm}^3$ gelten. Aus den Festlegungen geht aber hervor, daß durch die mechanische Verankerung der Gewindeflächen im Holz ähnlich wie bei Holzschrauben wesentliche Haftspannungen aufgenommen werden können, die bei eingeleimten Gewindestangen bei einem Bohrlochdurchmesser kleiner als dem Gewindeaußendurchmesser zur Kraftaufnahme herangezogen werden können.

Grundlegende Untersuchungen über die Eignung verschiedener Leimarten für das Einleimen von Gewindestangen, das Herstellungsverfahren der Bohrlöcher und anderer Parameter wurden bereits 1975 von EDLUND [3] veröffentlicht. Dabei waren 4 Leimtypen getestet worden, nämlich ein Epoxydharz, ein Resorcinharz und 2 Polyurethanleime. Neben Gewindestählen mit üblicher Gewindeausbildung waren auch solche mit Trapezgewinde, wie es üblicherweise bei Holzschrauben vorliegt, sowie glatte Rundstäbe verwendet worden. Die Durchmesser betragen 12,5 und 19 mm. Die Löcher wurden mit einem Durchmesser gleich dem Mittel aus Kern- und Außendurchmesser gebohrt, wenn die Gewindestangen eingedreht werden sollten. Diese Regelung erschien deshalb als vorteilhaft gegenüber dem Bohren mit etwas größerem Durchmesser als der Gewindeaußendurchmesser, da hierbei etwa 1/2 bis 2/3 der maximalen Haftfestigkeit durch die mechanische Verankerung des Gewindes im Holz wirksam wird. Die Stäbe hatten eine V-förmige Längsnut von mindestens 1,5 mm² Querschnitt, um eine gute Verteilung des Leimes beim Eindrehen zu erzielen und ein Ausfließen des überschüssigen Leimes zu ermöglichen. Die beiden Polyurethankleber und der Resorcinleim erwiesen sich bezüglich der Herstellungsbedingungen als vorteilhafter als der Epoxydharzleim, obwohl dieser im allgemeinen etwas höhere Haftfestigkeitswerte ergab. Aufgrund der durchgeführten Untersuchungen wird von EDLUND eine zulässige Haftspannung bezogen auf die Außenfläche von 1,3 N/mm² vorgeschlagen, was einer 3-fachen Sicherheit gegenüber der nachgewiesenen 5 %-Fraktile von 4 N/mm² entspricht. Dabei müssen gewisse Bedingungen bezüglich Einleimlänge, Randabstand und Feuchteeinwirkungen eingehalten werden. Die Versuchsergebnisse lassen erkennen, daß die Belastbarkeit der eingeleimten Gewindestangen bei größerer Einleimlänge praktisch dann erreicht ist, wenn

auch die Fließgrenze im Gewindequerschnitt erreicht ist. Für kleinere Einleimlängen wurde stets von einer über die Haftlänge gleichmäßig verteilten Haftspannung ausgegangen. Die Randabstände sollen mindestens $4 d$ betragen und Feuchteänderungen des Holzes von mehr als 20 % nicht auftreten. Temperaturänderungen bis $+ 50^{\circ}\text{C}$ ergaben keine nachteilige Beeinflussung des Tragverhaltens. Die aufgenommenen Last-Ausziehweg-Diagramme ließen kurz vor Erreichen der Bruchlast eine deutliche Verschiebungszunahme erkennen, woraus E D L U N D den Schluß zog, daß auch ein gewisses Zusammenwirken mehrerer Gewindestähle in einem Anschluß vorausgesetzt werden kann.

RIBERHOLT, der bereits 1973 [4] und 1976 [5] erste Berichte über Versuche mit eingeleimten Gewindestählen vorgelegt hatte, hat 1978 einen ausführlichen Forschungsbericht [6] veröffentlicht, der im Januar 1979 auch in deutscher Sprache erschienen ist. Bei diesen Untersuchungen wurde weitgehend von den Ergebnissen von [3] bis [5] ausgegangen, indem der Bohrlochdurchmesser mit $0,5 (d_a + d_k)$ gewählt und die Gewindestangen mit einer Längsnut versehen wurden, sowie alle Versuchskörper mit Resorcinleim hergestellt wurden. Dabei wurden neben axialen Belastungen der eingeleimten Gewindestangen wie in [3] auch Querbelastungen von in Hirnholz eingeleimten Gewindestangen untersucht, außerdem wurden Versuche mit kombinierter Quer- und Axialbelastung durchgeführt. Bei den Axialzug- und Einpreßversuchen wurde der Einfluß von Feuchtezyklen auf die erreichbare Haftspannung festgestellt, sowie Schwellbelastungen mit der $0,75$ - und $0,60$ -fachen statischen Bruchlast P_B als oberer Last und $0,1 P_B$ als unterer Last durchgeführt. Da nach den Empfehlungen der EGH bei vorstehendem Forschungsvorhaben in erster Linie

Anschlußversuche zu den in [6] mitgeteilten Untersuchungen durchzuführen waren, sind die Ergebnisse der statischen Kurzzeitversuche aus [6] in Tabelle 1, Anlage 3, zusammengestellt. Dabei sind die Haftbruchspannungen, wie allgemein üblich, gleichmäßig auf die Einleimlänge verteilt angenommen und als Bruchfläche die durch den Gewindeaußendurchmesser und die Einleimlänge festgelegte Zylinderfläche eingesetzt. In dieser Fläche trat bei den Ausziehversuchen auch stets das Versagen ein. 4 und 16 Feuchtezyklen bestehend aus 2 Stunden Wasserbad, 48 Stunden bei 100 % Luftfeuchtigkeit und 24 Stunden Trocknung bei 50°C ergaben keinen eindeutigen Festigkeitsabfall.

Bei den Querbelastungsversuchen trat das Versagen vorwiegend durch Erreichen der Lochleibungsfestigkeit des Holzes ein, worauf die Gewindestange sich stark verbog, so daß die bei einer Verschiebung von 7,5 mm vorhandene Last als "Bruchlast" angesehen wurde. Die Werte der Tabelle 1 lassen erkennen, daß bei 65 mm Probenbreite, bei der bei allen Probekörpern das Versagen durch Spalten des Holzes verursacht wurde, die geringsten Bruchwerte auftraten, während bei 90 mm und 115 mm Breite praktisch die gleichen Werte erreicht wurden. Ein Abstand zur belasteten Kante von 6 d brachte die volle Festigkeit, während bei 4 d mit einem Abfall von ca. 10 % gerechnet werden muß. Bei schwellender Querbelastung wurden 10^5 Lastspiele noch etwa mit 0,63facher statischer Vergleichslast erreicht. Als Ergebnis der Versuche mit kombinierter Verbindung wird schließlich die Interaktionsgleichung:

$$\left(\frac{\text{vorhandene Querlast}}{\text{Bruch-Querlast}}\right)^2 + \left(\frac{\text{vorhandene Axiallast}}{\text{Bruch-Axiallast}}\right)^2 \leq 1$$

vorgeschlagen.

Im Rahmen einer Forschungsarbeit [7] wurden in Karlsruhe Versuche mit eingeleimten Gewindestählen nach System Upat und System Buchholz durchgeführt. Bei beiden Systemen wurden die Bohrlöcher 2 mm größer als der Nenndurchmesser des Gewindestahles gebohrt. Bei Upat wird der Hohlraum wie bei den Upat-Verbundankern für den Massivbau durch in einer Glasampulle befindliche Harz- und Härterteile ausgefüllt, während beim System Buchholz die Gewindestähle bereits mit einem Härter-Quarzsandgemisch von ca. 1 mm Dicke beschichtet sind und das Harz in dossierter Menge in das Bohrloch eingegossen wird. Nach Einführen der beschichteten Schraube wird die Reaktion in Gang gesetzt und nach einer gewissen Aushärtezeit entsteht eine tragende Verbindung zwischen Holz und Gewindestahl. Nach diesem Verfahren können in der Regel nur kurze Einleimungslängen hergestellt werden. Die erreichten Bruchscherspannungen (Haftspannungen) sind in Tabelle 2, Anlage 4, zusammengestellt. Sie sind bei beiden Systemen praktisch gleich und wurden durch die Wechsellagerung nicht beeinträchtigt. Bei Einleimungslängen von 6 bis 8 mal Bohrlochdurchmesser wurden mittlere Haftfestigkeiten von 6,9 bis 8,7 N/mm² erreicht.

Ebenfalls in [7] sind Versuche beschrieben, bei denen Schrauben M 36 in Bohrlöchern \varnothing 38 mm auf 600 mm Länge mittels Epoxydharzleim eingeleimt waren. Die Schraubestähle hatten eine Zugfestigkeit von 375 N/mm², entsprachen also Güte 4.6 nach DIN 267. Obwohl bei den Versuchen das Versagen bei axialem Druck durch Ausknicken der Schrauben verursacht wurde, wurde im Mittel von 6 Einzelwerten eine rechnerische Haftspannung von 6,73 N/mm² erreicht. Beim Versagen betrug die rechnerische Druckspannung im Schaftquerschnitt 474 N/mm², lag also wesentlich über der Zugfestigkeit des Schraubenmaterials.

Die Auswertung der bereits vorliegenden Literatur zeigte somit, daß das Einleimen von Gewindestählen in Holz, vornehmlich in Brettschichtholz, eine tragfähige Verbindung zwischen Stahl und Holz ermöglicht, wobei die Gewindestähle sowohl in Axialrichtung auf Zug oder Druck als auch in Querrichtung auf Abscheren beansprucht werden können.

3. Karlsruher Versuche 1980

3.1 Herstellung und Ausbildung der Probekörper

Für die Versuche wurde Brettschichtholz der Güteklasse I/II aus europ. Fichte verwendet, das vor Herstellung der Versuchskörper mindestens 1 Monat bei Normalklima gelagert war. Die Gewindestangen bestanden aus Stahl mit metrischem Gewinde M 16 und M 30. In Anlehnung an die in [6] beschriebene Arbeitsweise wurde Resorcinleim (Kauresin 440) verwendet und die Gewindestangen mit einer Längsrille von ca. 7 mm^2 (Breite = 3,5 mm, Tiefe = 2 mm) Querschnitt bei M 16 und 12 mm^2 (Breite = 3,5 mm, Tiefe = 3,5 mm) Querschnitt bei M 30 versehen. Als Bohrlochdurchmesser wurde der mittlere Durchmesser aus Außen- und Kerndurchmesser gewählt, also bei M 16 $d_B = 14,7 \text{ mm}$ und bei M 30 $d_B = 27,8 \text{ mm}$. Die Bohrlochtiefe betrug ca. 1 cm mehr als die beabsichtigte Einleimungslänge.

Die Einleimung der Gewindestangen ging wie folgt vor sich:

Nach dem Ausblasen der Bohrlöcher mittels Druckluft wurde das vertikal stehende Bohrloch etwa bis zur halben Höhe mit Leim gefüllt und die Gewindestangen, die am oberen Ende eine einseitig geschlossene Mutter besaßen, mittels Gabelschlüssel eingedreht. Dabei stieg der Leim in der Längsrille hoch und wurde durch die Eindrehbewegung auf die gesamte Kontaktfläche Stahl-Holz verteilt. Gegen Ende

des Eindrehvorganges trat der überschüssige Leim an der Holzoberfläche aus und wurde entfernt. Das Austreten des Leimes ist ein sicheres Zeichen dafür, daß die ganze Gewindeaußenfläche mit dem benachbarten Holz mit Leim benetzt und der Gewindegrund mit Leim gefüllt ist. Dies konnte durch Aufspalten der Probekörper nach dem Belastungsversuch nachgewiesen werden, wobei in keinem einzigen Fall eine Fehlverleimung aufgetreten war.

Nach Herstellung der Probekörper wurden diese zur Aushärtung des Leimes mindestens 7 Tage bei Normalklima gelagert und anschließend dem Belastungsversuch unterworfen.

Für die einzelnen Versuchsreihen wurden folgende Prüfkörper hergestellt:

Versuchsreihe HA

Die Prüfkörper dieser Versuchsreihe sind in Bild 3, Anlage 5 dargestellt. Die in die Hirnholzflächen faserparallel eingeleimten Gewindestangen wurden einer axialen Zugbelastung unterworfen, wobei die Hauptversuche mit M 16 und 10 d Einleimungslänge durchgeführt wurden. Die Randabstände betragen stets $4 d = 64$ mm, beim 2-Stangenkörper wurde der gegenseitige Abstand a von $3 d = 48$ mm und $6 d = 96$ mm untersucht. Mit M 16 wurden auch Körper mit 16 d Einleimungslänge und mit M 30 Körper mit 10 d Einleimungslänge dem axialen Zugversuch unterworfen. (Aus der Bezeichnung der einzelnen Gruppen nach Bild 3 kann die Anzahl der Gewindestangen und der Durchmesser entnommen werden, wobei "H" bedeutet, daß der Stahl in die Hirnholzfläche eingeleimt und "A" axial belastet wurde).

Versuchsreihe HQ

Die Ausbildung der Körper geht aus Bild 4, Anlage 6, hervor, wobei auch das Aufbringen der Querbelastung angedeutet ist. Für die Hauptgruppe M 16, $\lambda_E = 10 d$ wurden die Randabstände 4d und 6d und beim Doppelkörper der gegenseitige Abstand 3d und 6d in Lastrichtung bei jeweils 4 d Randabstand untersucht.

Versuchsreihe SA

Bei dieser Versuchsreihe wurden die Gewindestangen senkrecht zur Faserrichtung im Abstand von 4 d vom Balkenende eingeleimt und axial auf Zug belastet. Die Zusammenstellung der Versuchskörper enthält Bild 5, Anlage 7. Während in [6] die senkrecht zur Faserrichtung eingeleimten Gewindestangen axial auf Druck beansprucht wurden und dabei ein verhältnismäßig großer Abstand vom Balkenende vorlag, sollte in dieser Versuchsreihe das Verhalten von Endverankerungen überprüft werden, die bei Windsog, Einspannungen oder bei angehängten Lasten auf Zug beansprucht werden, wobei auch Querkzugbeanspruchungen des Holzes auftreten und für das Versagen maßgebend werden können.

Versuchsreihe SQ

Bei den in Bild 6, Anlage 8, dargestellten Versuchskörpern, bei denen die Gewindestangen ebenfalls senkrecht zur Faser eingeleimt waren, wurden diese durch in Faserrichtung wirkende Querlasten beansprucht, wobei der Mindestrandabstand in Kraftrichtung mit einer Ausnahme 4 d betrug.

Materialeigenschaften

Die Holzeigenschaften Rohdichte, Holzfeuchtigkeit und Druckfestigkeit wurden an aus 10 verschiedenen Reststücken stichprobenweise entnommenen Druckkörper 40/40/80 mm festgestellt.

Von den Gewindestählen wurden aus je 3 Reststücken der beiden Durchmesser Zugproben nach DIN 50125 hergestellt und dem statischen Zugversuch unterworfen.

3.2 Durchführung der Versuche

Die Prüfkörper der Versuchsreihe HA wurden in einer 100 kN-Prüfmaschine zügig bis zum Auftreten der Höchstlast belastet, wobei die Verschiebung zwischen Hirnholzende und Gewindestange mit Hilfe von induktiven Wegaufnehmern gemessen und mittels x/y-Schreiber das Last-Ausziehdiagramm aufgezeichnet wurde. Bild 7, Anlage 9 zeigt den Versuchsaufbau mit Meßvorrichtung.

Die Prüfkörper der Versuchsreihe HQ wurden nach Bild 8, Anlage 10, als Träger auf 2 Stützen gelagert, wobei die Gewindestange über eine bis zur Hirnfläche eingedrehte Mutter quer zur Achse belastet wurde. Dabei betrug der Abstand von Mitte Mutter zur Holzoberfläche bei allen Versuchen 10 mm. Die Belastung erfolgte durch eine Einzelast, die unter Messung der Verformung des freien Endes der Gewindestange im Abstand von 100 mm von der Auflagerwirkungslinie bis zum Auftreten einer raschen Verformungszunahme gesteigert wurde. Diese Verformungszunahme wurde durch das Fließen der Gewindestange im Holzinneern hervorgerufen. Die Stelle des ersten Fließens, an der die größte Momentenbeanspruchung des Gewindestahles auftrat, konnte nach dem Freilegen des Stahles durch Aufspalten des Holzes mit ausreichender Genauigkeit festgestellt werden, da der Stahl praktisch vor und hinter diesem Fließquerschnitt noch nahezu gerade verlief.

Die Prüfkörper der Versuchsreihe SA wurden nach Bild 9, Anlage 11, als Kragträger durch die Pressenlast P so belastet, daß die im Spannboden der Prüfhalle unter Zwischenschaltung einer 100 kN-Meßdose verankerte Gewindestange auf Zug beansprucht wurde. Etwa auftretende Verschiebungen zwischen Holzrand und Gewindeaustrittsquerschnitt wurden mittels Wegaufnehmer in Abhängigkeit von der Lasthöhe aufgezeichnet.

Die Prüfkörper der Versuchsreihe SQ wurden nach Bild 10, Anlage 12, in einer entsprechenden Vorrichtung so aufgelagert, daß die Last F über diese Mutter eingeleitet und die Biegeverformung der Gewindestange mittels Wegaufnehmer erfaßt werden konnte.

Bei allen Versuchsreihen wurde die Last kontinuierlich gesteigert, wobei der Bruch oder das Versagen in der Regel innerhalb einer Belastungszeit von etwa 3 bis 6 Minuten eintrat.

4. Versuchsergebnisse

4.1 Versuchsreihe HA (Bild 3)

Bei dieser Prüfkörpergruppe trat der Bruch stets schlagartig durch Erreichen der Haftfestigkeit zwischen Holz und Leim in der durch den Gewindeaußendurchmesser festgelegten Zylinderfläche auf. Die Last-Verformungslinie verlief, wie aus Bild 11, Anlage 13, hervorgeht, bei allen Versuchen bis kurz vor Eintreten des Bruches geradlinig. Eine Zusammenstellung der erreichten Bruchlasten max F sowie der hieraus berechneten mittleren Haftfestigkeiten τ_m gibt Tabelle 3, Anlage 14, wieder.

././.

Vergleicht man die Mittelwerte der mit den verschiedenen Prüfkörperausbildungen erreichten Haftfestigkeiten, so läßt sich qualitativ folgendes feststellen:

- 1) Mit steigender Einleimungslänge nimmt die mittlere Haftfestigkeit ab, da durch die ungleichmäßigere Spannungsverteilung entlang der Einleimungslänge, mit höheren Spannungswerten an den Enden, die mittlere Haftspannung absinkt. Bei den vorliegenden Versuchen ergab sich bei einer Steigerung der Einleimungslänge von 10 d auf 16 d ein Abfall von τ_m von ca. 6 %.
- 2) Bei 2 nebeneinanderliegenden Gewindestangen tritt keine eindeutige gegenseitige Beeinflussung der aufnehmbaren Haftspannung auf, wenn der Abstand der Gewindestangen untereinander mindestens 3 d und der Randabstand mindestens 4 d beträgt.
- 3) Eine Erhöhung des Gewindestahldurchmessers von 16 auf 30 mm ergab eine Abminderung der Haftfestigkeit von 38 % bei 10 d Einleimungslänge und 4 d Randabstand.

Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe lassen erkennen, daß mit zunehmender Haftfläche $A = \pi \cdot d \cdot l_E$ die Haftfestigkeit sich vermindert. Bild 12, Anlage 15, zeigt die Abhängigkeit der Haftfestigkeit von der Haftfläche A, wobei neben den Ergebnissen nach Tabelle 3 auch die in Tabelle 1 zusammengestellten Werte aus [6], soweit kein Fließen der Gewindestangen auftrat, eingetragen wurden.

4.2 Versuchsreihe HQ (Bild 4)

Anhand des Last-Verformungs-Diagrammes, wie es in Bild 13, Anlage 16, als typisch für diese Versuchsreihe dargestellt ist, wurde die für das Tragverhalten maßgebende Last F_F ermittelt, die als praktische Grenze der Belastbarkeit einer eingeleimten Gewindestange auf Abscheren angesehen werden kann. Wie aus dem Diagramm hervorgeht, liegt weitgehend ein idealelastisch-idealplastisches Verhalten der beiden Materialien vor. Bis zu einer gewissen Grenze verläuft die Linie nahezu geradlinig, um bei Erreichen der Fließgrenze des Stahles sich stark zu krümmen. Oberhalb dieses Bereiches tritt wieder ein geradliniger Verlauf ein. Der Schnittpunkt der beiden geraden Linien legt die als maßgebend anzusehende Fließlast F_F fest.

Legt man die in Bild 14, Anlage 17, dargestellte Krafteinwirkung auf die Gewindestange unter der Last F_F der Ermittlung der auf der Strecke z vorhandenen Lochleibungsspannung, die nach [8] näherungsweise als konstant angenommen werden kann, zugrunde, so ergibt sich

$$\sigma_H = F_F / z \cdot d \quad (1)$$

und das Fließmoment $M_F = F_F (e+z/2)$. (2)

Damit erhält man:

$$\sigma_H = \frac{F_F}{2 \cdot d (M_F / F_F - e)} \quad (3)$$

und $z = 2(M_F / F_F - e)$ (4)

Zur Bestimmung der kritischen Lochleibungsspannung nach Gl. (3) wurden die Prüfkörper nach den Versuchen aufgespalten, so daß man die Stelle des Fließgelenkes und damit das Maß z bestimmen konnte. Bild 15, Anlage 18, zeigt einen aufgespaltenen Prüfkörper. Nach Ermittlung von F_F aus den Last-Verformungs-Linien konnte σ_H nach Gl. (3) sowie M_F nach Gl. (2) berechnet werden. Zur Kontrolle wurden auch die zugehörigen Stahlfließspannungen σ_{FA} und σ_{FE} unter Zugrundelegung des Kernquerschnitts aus

$$\sigma_{FA} = \frac{32 \cdot M_F}{\pi \cdot d_{\text{Kern}}^3} \quad \text{und} \quad \sigma_{FE} = \frac{6 \cdot M_F}{d_{\text{Kern}}^3} \quad (5)$$

berechnet, wobei σ_{FA} die Randspannung zu Beginn der Plastifizierung und σ_{FE} die Randspannung bei vollkommen plastischem Materialverhalten darstellen. Die bei den einzelnen Versuchen ermittelten Werte sind in Tabelle 4, Anlage 19, zusammengestellt.

Eine zweite Art der Auswertung wurde nach dem in DIN 1052, Teil 1, Abschn. 11.2.8 angegebenen Bemessungsverfahren für Stabdübel vorgenommen. Bei einer Einleimungslänge größer 6 d kann aus der Fließlast F_F der Festwert $\max A$ aus

$$F_F = \max A \cdot d^2 \quad (6)$$

bestimmt werden. Aus $\max A$ kann die zulässige Belastung einer in Hirnholz eingeleimten Gewindestange bei Querbelastung unter den vorliegenden Randabständen von 4 d zu :

$$\text{zul } F = \frac{\max A}{\gamma} \cdot d^2 \quad (7)$$

festgelegt werden, wobei der Sicherheitsbeiwert analog zu Abschn. 11.1.9 der DIN 1052, Teil 1, mindestens zu $\gamma = 2,75$ angenommen werden müßte. Die aus Gl. (6) sich ergebenden Werte $\max A$ sind ebenfalls in Tabelle 4 enthalten.

Bei einer Einleimlänge von 10 d ergab sich für M 16 der Wert $\max A$ im Mittel zu $31,2 \text{ N/mm}^2$ und die zugehörige Lochleibungsspannung zu $10,2 \text{ N/mm}^2$. Für M 30 wurden geringere Werte erreicht.

4.3 Versuchsreihe SA (Bild 5)

Bei dieser Versuchsreihe, bei der bei allen Prüfkörpern die Gewindestangen bis zur halben Querschnittshöhe eingeleimt waren und die Randabstände wie bei der Reihe HA $4d$ betragen, wurden unter axialer Zugbelastung die Gewindestangen nicht unter Überwindung der Haftfestigkeit herausgezogen, sondern alle Prüfkörper versagten infolge Überschreitens der Querszugfestigkeit des Brettschichtholzes unmittelbar über dem Ende der Einleimung. Die Querszug-Versagenslasten wiesen teilweise große Streuungen auf, wobei in den meisten Fällen zwar die hieraus berechneten mittleren Haftfestigkeiten der Reihe HA erreicht wurden, gleichzeitig aber Unterschreitungen bis zu 40 % auftraten. Die Versuchsergebnisse sind in Tabelle 5, Anlage 20 zusammengestellt.

4.4 Versuchsreihe SQ (Bild 6)

Bei dieser Versuchsreihe trat wie bei Reihe HQ das Versagen der Verbindung infolge Fließens des Gewindestahles im Holz und Überschreiten der Lochleibungsfestigkeit auf. Es lagen hier praktisch die gleichen Verhältnisse wie bei der einschnittigen Stabdübelverbindung vor. Eine Auswertung der Versuchsergebnisse wie unter 4.2 ergab die maßgebende Fließlast F_F aus den Last-Verformungs-Diagrammen, während das Maß z nach Aufspalten der Probekörper als Abstand von Fließgelenk und Seitenfläche bestimmt wurde. Die entsprechenden Werte sind in Tabelle 6, Anlage 21, zusammengestellt. Für $\max A$ ergibt sich als Gesamtmittel sämtlicher Versuche der Wert $41,8 \text{ N/mm}^2$. Da der A-Wert aus den Versuchen mit dem Nenndurchmesser d und nicht mit dem für das Biegeverhalten des Gewindestabes maßgebenden Kerndurchmesser ermittelt wurde, liegt gegenüber dem in DIN 1052, Teil 1 für einschnittige Stabdübelverbindungen festgelegten A-Wert von 23 N/mm^2 nur eine 1,8 fache Sicherheit vor. Bezogen auf den Kernquerschnitt ergäbe sich das Gesamtmittel zu $59,7 \text{ N/mm}^2$, so daß bei 2,75 facher Sicherheit die zulässige Belastung mit $A \approx 21,7 \text{ N/mm}^2$ berechnet werden könnte. Der Unterschied zu dem Wert der DIN 1052 beträgt ca 6 %.

4.5 Materialeigenschaften

In Tabelle 7, Anlage 22, sind Druckfestigkeit, Rohdichte und Holzfeuchtigkeitsgehalt der 10 Proben zusammengestellt. Die Streuungen der Einzelwerte liegen in den bei Brettschichtholz aus europ. Fichte zu erwartenden Grenzen, so daß von einer gleichmäßigen Holzgüte ausgegangen werden kann, wobei aber der Einzelwert einer Versuchsreihe ähnlich wie die Druckkörper Nr. 2 und 3 durch

die Schwankungen der Holzdruckfestigkeit beeinflußt sein kann.

Die Ergebnisse der aus den Gewindestählen entnommenen Proben sind in Tabelle 8, Anlage 22, zusammengestellt. Bild 16, Anlage 23, zeigt die Last-Dehnungs-Linien der einzelnen Versuchsstäbe. Die Ergebnisse lassen erkennen, daß bei den M 16 - Stäben eine ausgeprägte Fließgrenze vorlag und die Festigkeitswerte etwa der Materialgüte 4.6 entsprachen. Die M 30 - Stäbe besaßen keine ausgeprägte Streckgrenze und müssen der Stahlgüte 8.8 zugeordnet werden. Da bei den Versuchsreihen HA und SA unter der maximalen Axialbelastung in keinem Falle die Streckgrenze erreicht wurde und bei den Reihen HQ und SA stets die Leibungsfestigkeit des Holzes für das Versagen ausschlaggebend war, war die Stahlgüte der Gewindestähle für die erzielten Haftfestigkeiten von untergeordneter Bedeutung.

5. Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

Wie die Ergebnisse der einzelnen Versuchsreihen und die im Schrifttum [3] bis [7] mitgeteilten Untersuchungen gezeigt haben, können eingeleimte Gewindestähle mit Resorcinharzleim in Bohrungen nach dem in Abschnitt 3.1 beschriebenen Verfahren entweder faserparallel in die Stirnflächen oder senkrecht in die Seitenflächen von Brettschichtholzbauteilen eingebracht durch Zug- oder Druckkräfte in Achsrichtung oder Scherkräfte senkrecht zur Achsrichtung beansprucht werden.

Bei axialer Beanspruchung werden Scherspannungen in der Umfangsfläche der Gewindeaußenfläche hervorgerufen, deren Aufnahme durch die Haftfestigkeit der Grenzschicht Holz/Leim bestimmt wird. Bei faserparallelem Einleimen in die Stirnholzfläche kann bei Einleimungslängen bis $20 d$ und einer deutlich unter der Fließgrenze des Gewindestahles bleibenden Axialspannung im Kernquerschnitt für Stabdurchmesser bis 24 mm mit einer mittleren Haftfestigkeit von rd 5 N/mm^2 gerechnet werden. Bei Stabdurchmesser über 24 mm muß mit einem Abfall der mittleren Haftfestigkeit bei $10 d$ Einleimungslänge auf $3,3 \text{ N/mm}^2$ bei $d = 30 \text{ mm}$ gerechnet werden. Bei quer zur Faser eingeleimten Gewindestangen kann bei axialer Druckbeanspruchung praktisch mit den gleichen Festigkeitswerten wie bei faserparallelem Einleimen gerechnet werden. Bei axialer Zugbelastung müssen die Gewindestangen wegen der Querszuggefahr im Holz mindestens bis zur halben Querschnittshöhe eingeleimt werden, wobei im ungünstigsten Falle mit einem Abfall der Tragfähigkeit um 50 % gerechnet werden sollte. Eine genauere Erfassung der Querszugverhältnisse muß gesonderten Untersuchungen vorbehalten bleiben.

Bei Querbeanspruchung der eingeleimten Gewindestähle kann bei einer Einleimungslänge von mindestens 10 d die Berechnung wie für einschnittig belastete Stabdübel nach Gl. 31 der DIN 1052, Teil 1, erfolgen.

Bei den faserparallel eingeleimten Stäben (Hirnholz) ergab sich bei Versuchsreihe HQ im Mittel ein max A-Wert von $31,2 \text{ N/mm}^2$. Die in Tabelle 1 aus den Untersuchungen [6] enthaltenen teilweise höheren A-Werte dürften in erster Linie auf die bessere Holzqualität und das eingehendere Einleimungsverfahren zurückzuführen sein.

Bei den quer zur Faserrichtung eingeleimten Stählen der Versuchsreihe SQ ergab sich ein mittlerer A-Wert von $41,8 \text{ N/mm}^2$, der, wie in 4.4 erläutert, bei Berücksichtigung des Unterschiedes zwischen Kern- und Außendurchmesser dem DIN-Wert von 23 N/mm^2 mit ausreichender Genauigkeit entspricht.

6. Vorschlag für Bemessungsregeln

Aufgrund der Versuchsergebnisse können unter Heranziehung der in [3] bis [7] getroffenen Feststellungen für die einzelnen Anwendungsmöglichkeiten (siehe Bild 1) von nach dem in Abschnitt 3.1 beschriebenen Verfahren eingeleimten Gewindestählen folgende Bemessungsregeln aufgestellt werden :

6.1 Axiale Zug- oder Druckbeanspruchung von in Hirnholz faserparallel eingeleimten Gewindestählen

Bei Einleimungslängen bis 20 d kann bei Nenndurchmesser $\leq 24 \text{ mm}$ von einer mittleren Haftfestigkeit von 5 N/mm^2 ausgegangen werden. Bei größerem Durchmesser muß mit einem linearen Abfall der Haftfestigkeit gerechnet werden, wobei für $d = 30 \text{ mm}$ ein Wert von $3,2 \text{ N/mm}^2$ zugrunde gelegt werden kann. Bis zum Vorliegen genügender Erfahrungswerte kann bei Zug- und Druckbeanspruchung eine 4-fache Sicherheit für die Festlegung von τ_H angenommen werden. Die für die Stahlgüte zulässige Spannung im Kernquerschnitt darf nicht überschritten werden.

6.2 Axiale Zug- und Druckbeanspruchung von senkrecht zur Faser eingeleimten Gewindestählen.

Bei Druckbeanspruchung können die Werte nach 6.1 in Ansatz gebracht werden, bei Zugbeanspruchung von mindestens bis zur halben Trägerhöhe eingeleimten Stäben dürfen die halben Werte nach 6.1 nicht überschritten werden.

6.3 Querbelastung von in Hirnholz faserparallel eingeleimten Gewindestählen

Die Einleimungslängen müssen mindestens $10 d$ betragen. Die zulässige Belastung bei höchstens im Abstand von 10 mm von der Stirnfläche eingeleiteter Querlast kann unter Zugrundelegung einer mindestens 2,75 fachen Sicherheit in Anlehnung an Gl. 31 der DIN 1052, Teil 1, zu :

$$\text{zul } \vec{F}_{\text{HQ}} = A_{\text{HQ}} \cdot d^2 \quad \text{in N}$$

mit $A_{\text{HQ}} = \begin{matrix} 10 \text{ N/mm}^2 & \text{für } d \leq 16 \text{ mm} \\ 8 \text{ N/mm}^2 & \text{für } d = 30 \text{ mm} \end{matrix}$
berechnet werden.

Zwischenwerte dürfen geradlinig eingeschaltet werden.

$d =$ Gewindeaußendurchmesser in mm

6.4 Querbelastung von in Seitenholz senkrecht zur Faserrichtung eingeleimten Gewindestählen

Bei Beanspruchung in Faserrichtung kann die zulässige Last bei höchstens im Abstand von 10 mm von der Holzoberfläche angreifender Querlast entsprechend den Ergebnissen der Reihe SQ bei einer Einleimlänge von mindestens $10 d$ nach nachstehender Gleichung ermittelt werden:

$$\text{zul } \vec{F}_{\text{SQ}} = A_{\text{SQ}} \cdot d^2 \quad \text{in N}$$

mit

$$A_{\text{SQ}} = 14 \text{ N/mm}^2 \quad \text{für } d \leq 30 \text{ mm}$$

$d =$ Gewindeaußendurchmesser in mm.

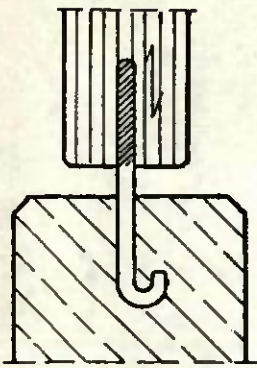
Da bei den Versuchen unter Querlast sich die eingeleimten Gewindestangen praktisch wie einschnittig belastete Stabdübel verhalten haben, können bei Beanspruchungen senkrecht zur Faserrichtung die $0,75$ fachen A_{SQ} - Werte der Ermittlung von $\text{zul } \vec{F}_{\text{SQ}}$ zugrunde gelegt werden.

Bei einem Abstand zwischen Lastangriffsebene und Holzoberfläche von mehr als 10 mm oder wenn 2 Hölzer durch eingeleimte Gewindestangen mit einander verbunden werden, sind die obigen A-Werte durch $1,25$ zu dividieren.

Schließlich muß beachtet werden, daß die unter 6.1 bis 6.4 getroffenen Festlegungen nur zutreffen, wenn die Randabstände in jeder Richtung mindestens $4d$ betragen und das Einleimungsverfahren nach Abschnitt 3.1 angewendet wird.

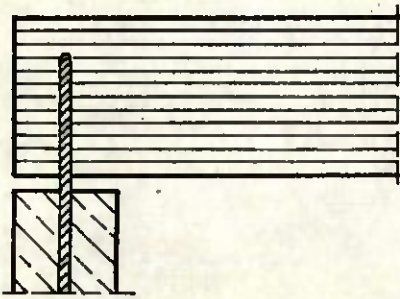
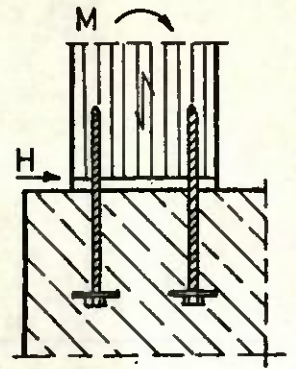
Schrifttum

- [1] Baumeister, A. und andere : Neuere Karlsruhe Forschungsarbeiten und Versuche im Ingenieurholzbau. Bauen mit Holz, Heft 6, 1972
- [2] AITC : Timber Construction Manual, second edition. John Wiley and sons, Inc., New York-London-Sydney-Toronto. 1974
- [3] Edlund, G. : I limträ inlimmad skruv, Svenska Trävorskningsinstitutet, Meddelande, Serie B Nr. 333, TT B: 62, 1975
- [4] Riberholt, H. : Bolte indlimet i træ. Afdelingen for Baerende Konstruktioner, Danmarks tekniske Højskøle. Sagsrapport nr S 18/73
- [5] Riberholt, H. : Bolte indlimet i limtræ. Nordisk Træsymposium, 1976, Helsingfors
- [6] Riberholt, H : Eingeleimte Gewindestangen. Afdelingen for Baerende Konstruktioner, Danmarks tekniske Højskole. Rapport Nr. R 99, 1978 (Deutsche Fassung, Januar 1979)
- [7] Möhler, K. und Lautenschläger, R.: Großflächige Queranschlüsse bei Brettschichtholz. Forschungsbericht des Lehrstuhls für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen, Universität Karlsruhe, 1978
- [8] Ehlbeck, J. : Nailed Joints in Wood Structures. Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, U.S.A., Report No. 166, 1979



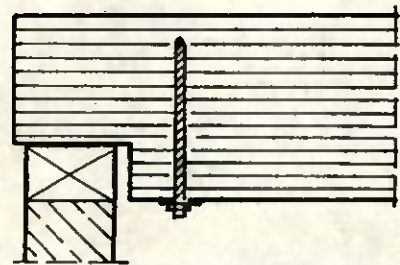
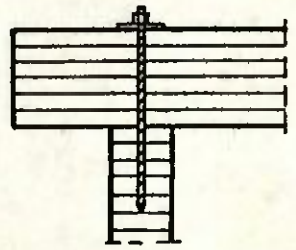
Stützenfuß
(gelenkige
Ausführung)

Stützenfuß
(eingespannt)



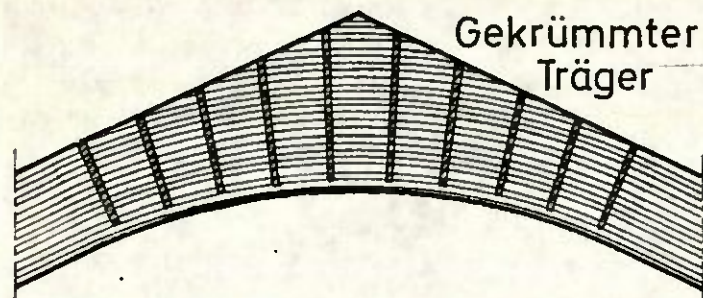
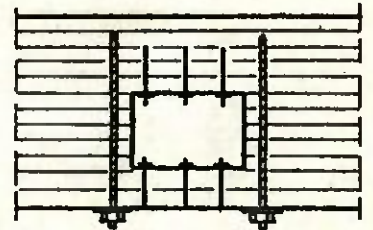
Träger-Auflager

Sicherung
gegen
Abheben



Träger-
Ausklantung

Träger-
Durchbruch



Gekrümmter
Träger

Biegestoß

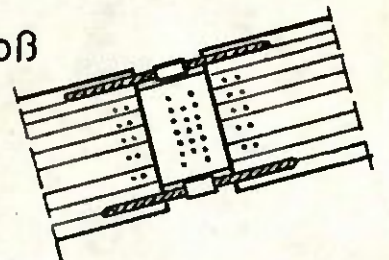


Bild 1: Anwendungsbeispiele für eingeleimte Gewindestangen

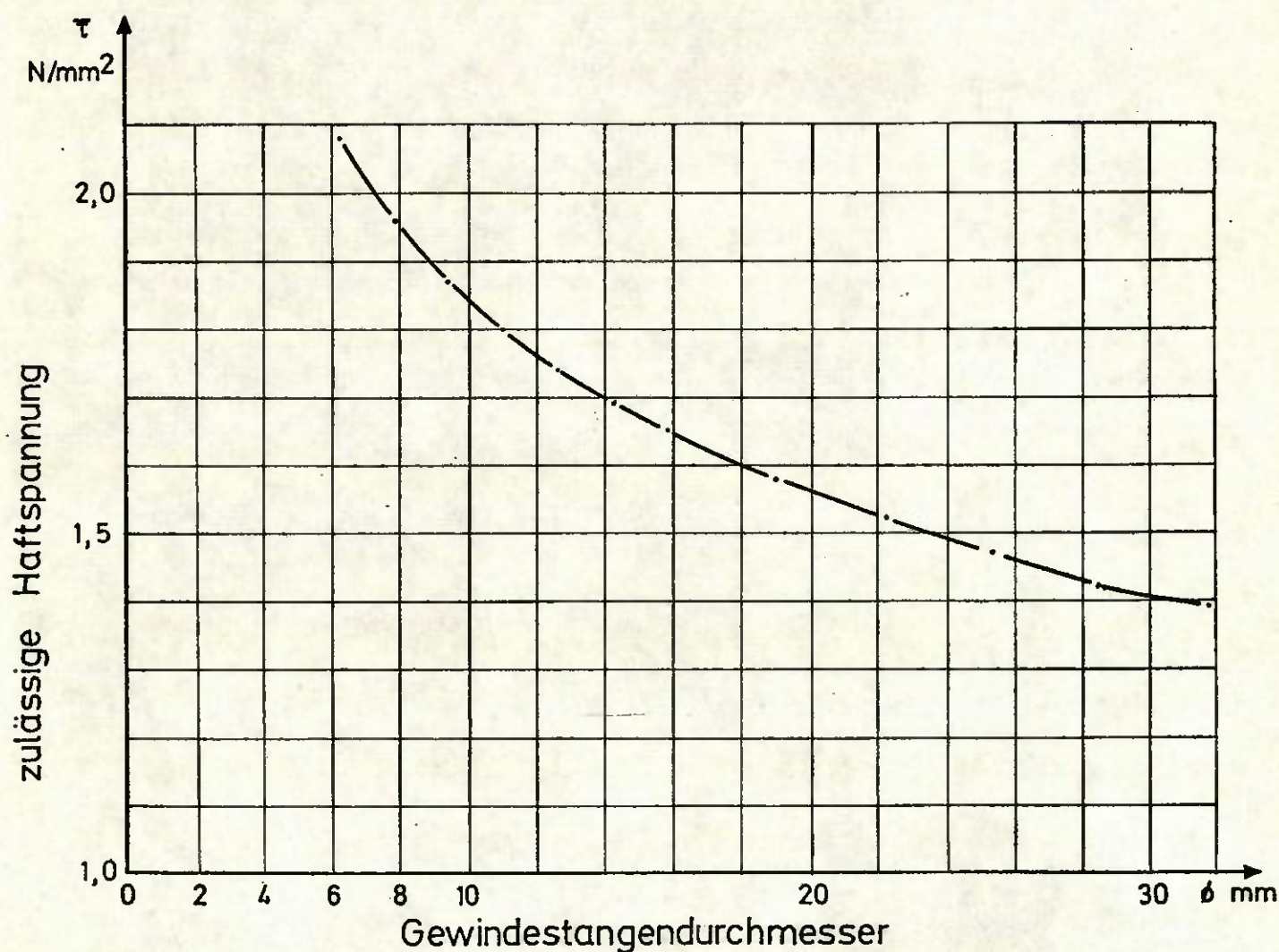
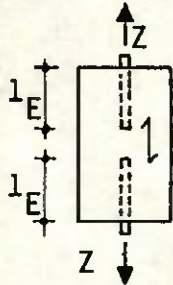
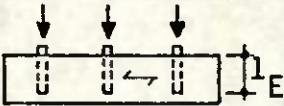
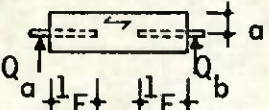
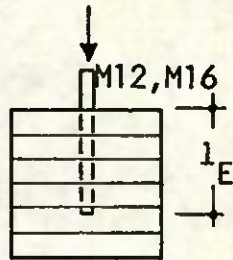
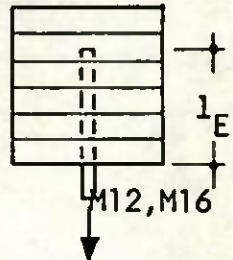


Bild 2: Zulässige Haftspannung für ohne Leim in Douglas-fir bzw. Lärche eingedrehte Gewindestangen nach "Timber Construction Manual" (Rohdichte = $0,51 \text{ g/cm}^3$)

Beanspruchungsart	Gewindedurchmesser d (mm)	Einleimlänge $l_E = a \cdot d$	Bruchlast (kN)		Bruchspannung (N/mm ²)	Rohdichte (g/cm ²)	Feuchtegehalt u (%)	Bemerkungen
axiales Ausziehen  je 5 Versuche (bei u: 6 Vers.)	M16	10d	54,0		7,09 (5,12)	0,436	13,3	Gewindestahl 8.8
	M16	20d	76,9		4,89 (4,96)	0,408	11,2	Gewindestahl 8.8
	M16	10d	41,1		5,64	0,416	10,7	} Gewindestahl 4.6 } Fließen des } Stahles
	M16	20d	62,5		3,98	0,410	11,1	
	M24	10d	105,9		5,78	0,422	10,6	Gewindestahl 8.8
	M24	20d	177,2		4,95	0,408	10,4	Gewindestahl 8.8
axiales Einpressen 	M16	10d	55,6		7,14 (7,03)	0,470	11,1	Gewindestahl 8.8
	M16	20d	80,8		5,08 (5,23)	0,430	12,1	je 3 Versuche (für u: 6 Vers.)
Querbelastung  je 6 Vers.	M16	10d	a=64	a=96	(A-Werte)	0,445	10,7	Gewindestahl 8.8
	M16	10d	7,78	8,83	(32,4 36,7)			Probenbreite 65 mm
	M16	10d	8,72	9,96	(36,3 41,5)			Probenbreite 90 mm
M16z	10d	8,86	9,50	(37,0 39,6)	0,450	10,7	Probenbreite 115 mm	

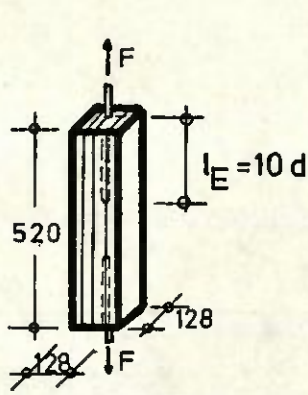
() Klammerwerte nach 4. und 16. Feuchtezyklus mit ca. $\Delta u = 7$ bis 10%

Tabelle 1: Zusammenstellung der Versuchsergebnisse (Mittelwerte) aus [6]

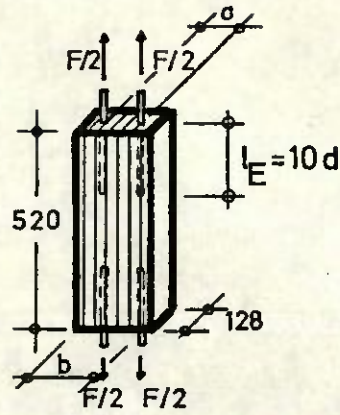
System	Gewindestange M Bohrloch- durchmesser (mm)	Prüfung nach Lagerung im	wirkliche Einleimungs- länge (mm)	max F (kN)	τ (N/mm ²)	Beanspruchungsart
Upat Buchholz	M12 14	Normalklima	90 - 97 ⁺ 110	30,8 37,5	7,44 7,74	
Upat Buchholz	M12 14	Wechselklima	91 - 98 ⁺ 110	36,0 33,3	8,68 6,89	
Upat Buchholz	M16 18	Normalklima	99 - 114 ⁺ 125	45,7 57,4	7,48 8,12	
Upat Buchholz	M12 14	Normalklima	90 - 105 ⁺ 110	33,0 39,0	7,75 8,05	
Upat Buchholz	M12 14	Wechselklima	90 - 95 ⁺ 110	34,7 35,5	8,52 7,34	
Upat Buchholz	M16 18	Normalklima	100 - 115 ⁺ 125	46,2 61,4	7,39 8,68	

⁺ Bei den Upat-Gewindestählen wurde die volle Einleimungslänge nicht erreicht, da das in der Glasampulle befindliche Harz-Härtergemisch teilweise in die Holzwand eingedrungen war

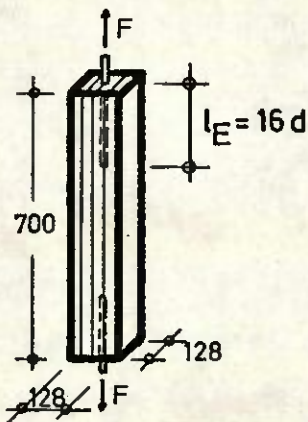
Tabelle 2: Zusammenstellung der Versuchs-Mittelwerte aus [7]



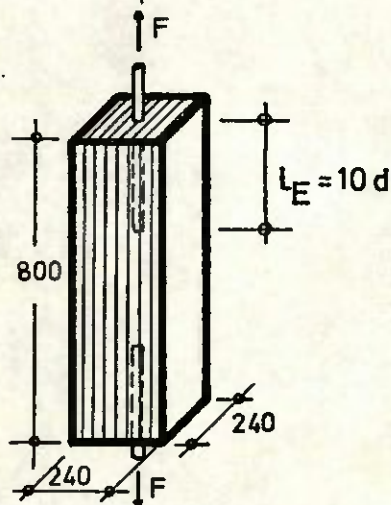
Prüfkörper Nr.
1 M16 HA 10/1
/2
/3
/4
/5
/6



Prüfkörper Nr.	a (mm)	b (mm)
2 M16 HA 10/1	48	176
/2	48	176
/3	48	176
/4	48	176
/5	96	224
/6	96	224
/7	96	224
/8	96	224

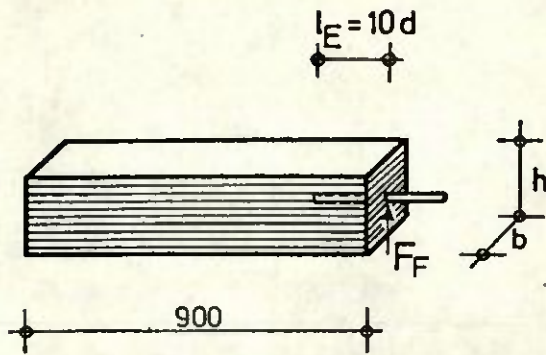


Prüfkörper Nr.
1 M16 HA 16 / 1
/ 2
/ 3
/ 4

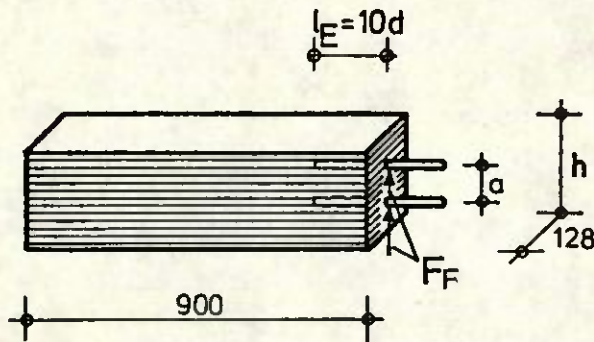


Prüfkörper Nr.
1 M30 HA10 / 1
/ 2
/ 3
/ 4

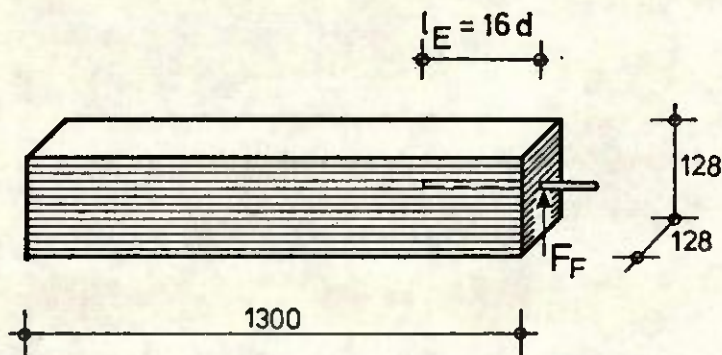
Bild 3: Prüfkörper mit faserparallel eingeleimten Gewindestangen und Axialbelastung (Versuchsreihe HA)



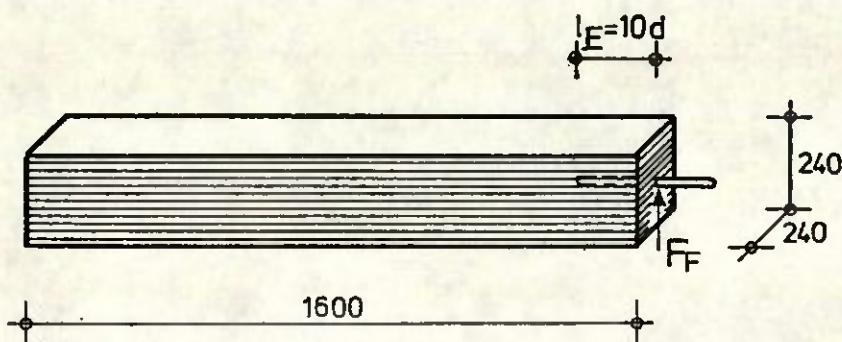
Prüfkörper Nr.	b (mm)	h (mm)
1 M 16 HQ 10 / 1	128	128
/ 2	128	128
/ 3	128	128
/ 4	128	128
/ 5	192	192
/ 6	192	192
/ 7	192	192
/ 8	192	192



Prüfkörper Nr.	a (mm)	h (mm)
2 M 16 HQ 10 / 1	48	176
/ 2	48	176
/ 3	96	224
/ 4	96	224



Prüfkörper Nr.
1 M 16 HQ 16 / 1
/ 2



Prüfkörper Nr.
1 M 30 HQ 10 / 1
/ 2

Bild 4: Prüfkörper, mit faserparallel eingeleimten
Gewindestangen und Querbelastung
(Versuchsreihe HQ)

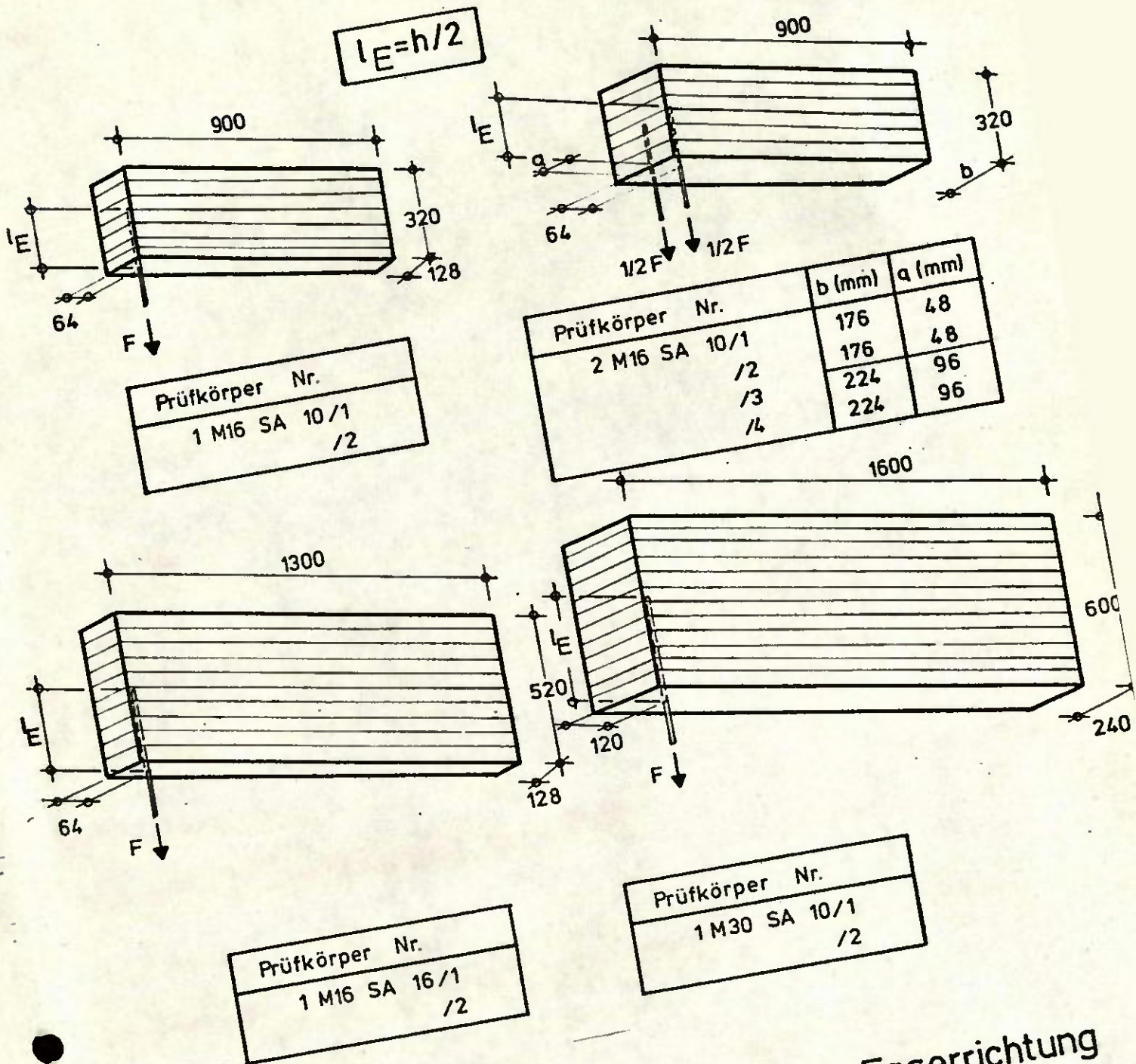
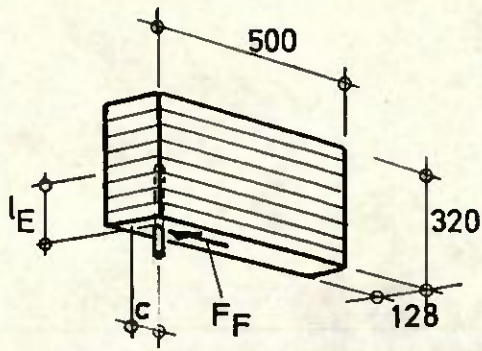
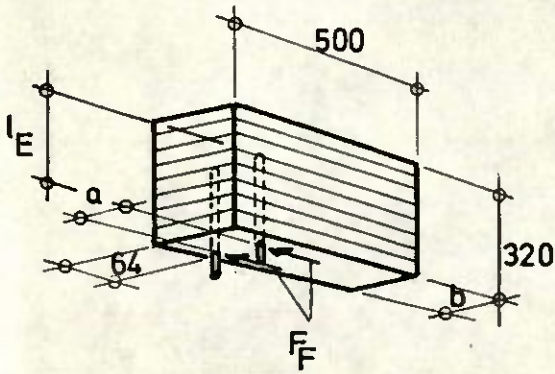


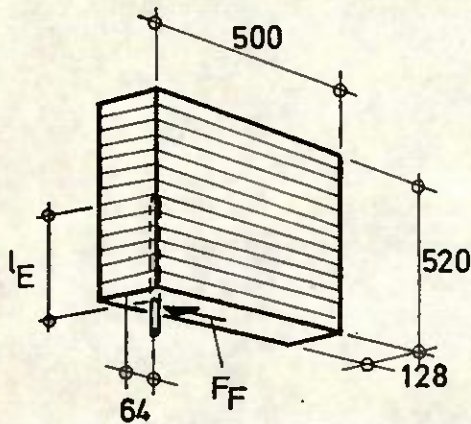
Bild 5: Prüfkörper mit senkrecht zur Faserrichtung eingeleimten Gewindestangen und Axialbelastung (Versuchsreihe SA)



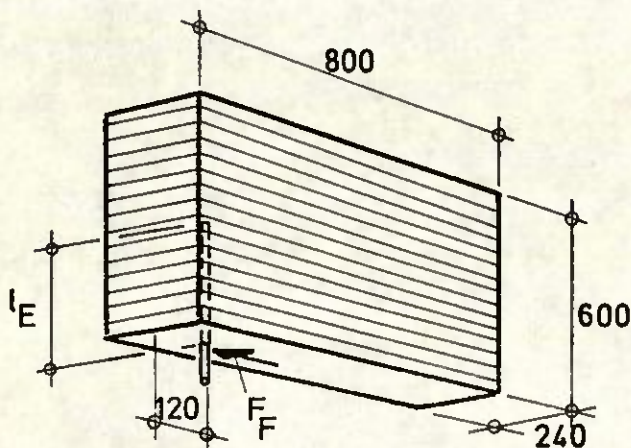
Prüfkörper Nr.	c (mm)
1M16SQ10/1	64
/2	64
/3	96
/4	96



Prüfkörper Nr.	b (mm)	a (mm)
2M16SQ10/1	176	48
/2	176	48
/3	224	96
/4	224	96



Prüfkörper Nr.
1M16SQ16/1
/2



Prüfkörper Nr.
1M30SQ10/1
/2

$$l_E = h/2$$

Bild 6: Prüfkörper mit senkrecht zur Faserrichtung eingeleimten Gewindestangen und Querbelastung (Versuchsreihe SQ)

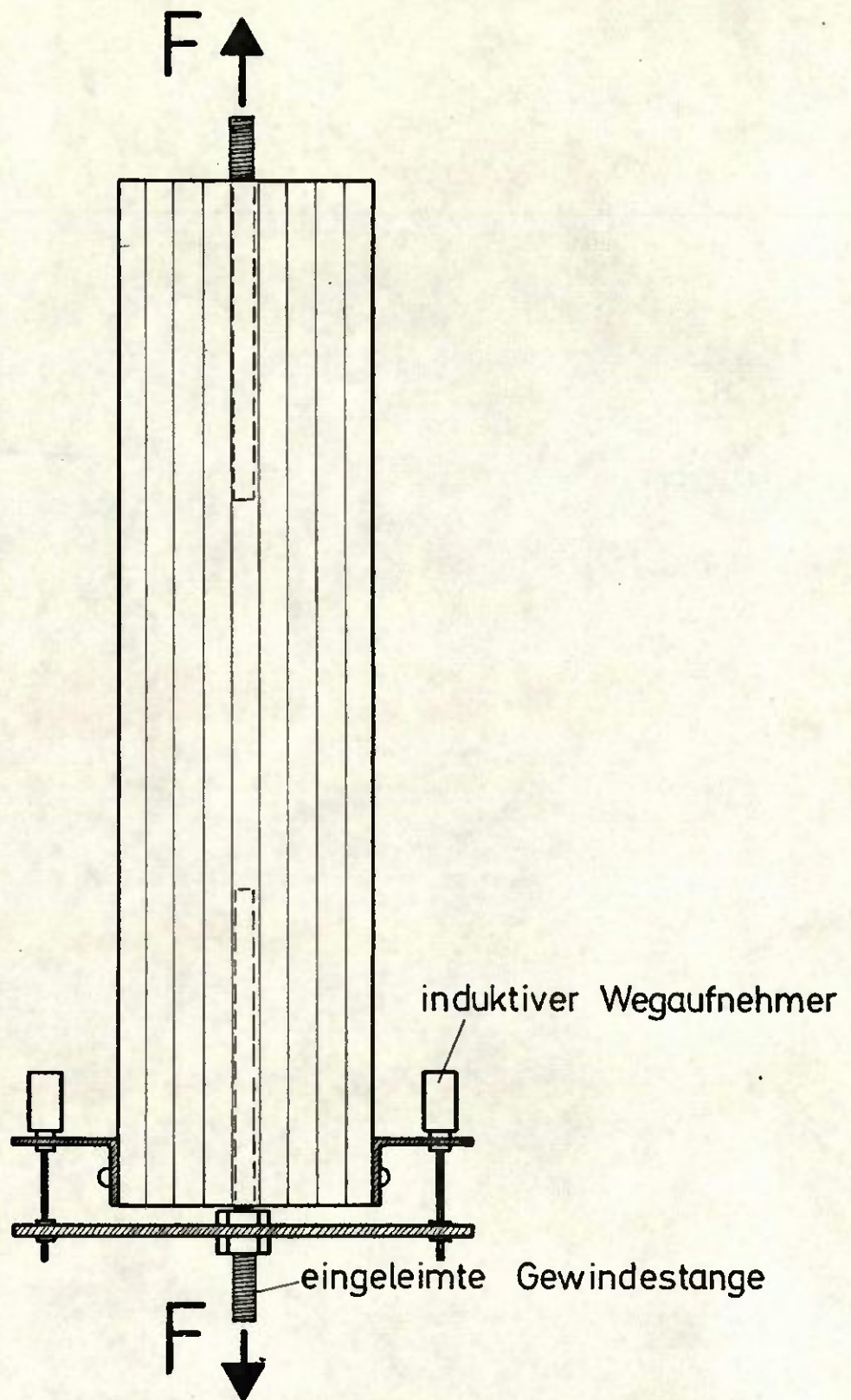


Bild 7: Versuchsaufbau und Anordnung der Meßvorrichtung bei Prüfkörpern der Versuchsreihe HA

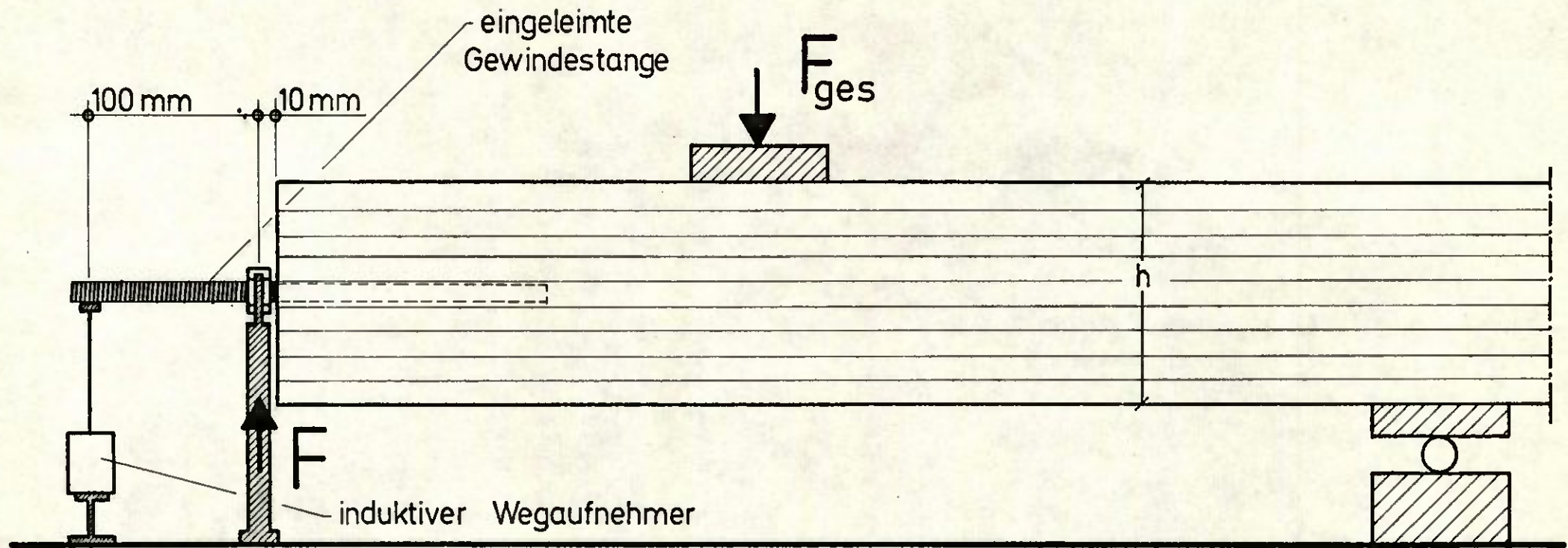


Bild 8: Versuchsaufbau und Anordnung der Meßvorrichtung bei Prüfkörpern der Versuchsreihe HQ

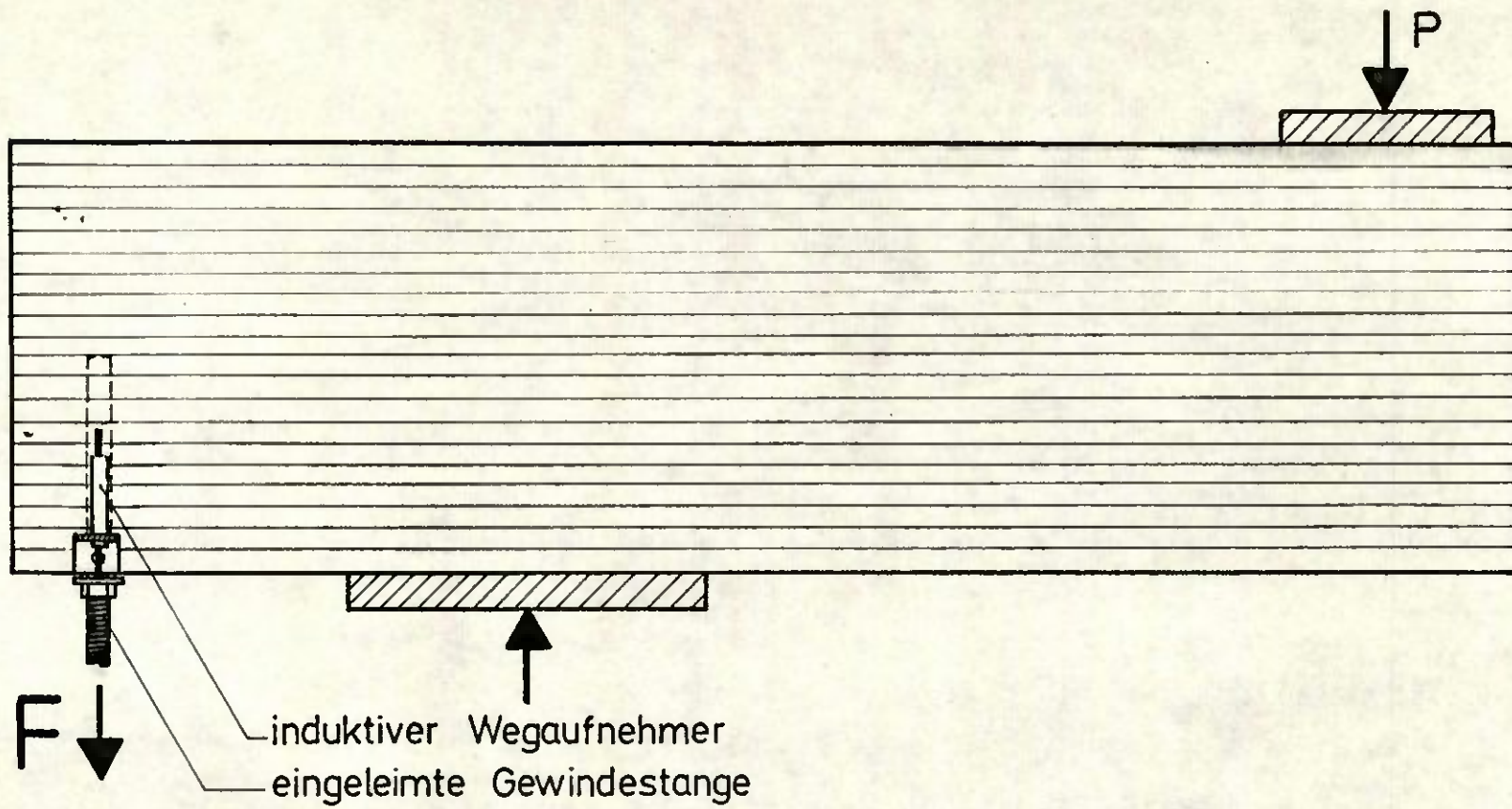


Bild 9: Versuchsaufbau und Anordnung der Meßvorrichtung bei Prüfkörpern der Versuchsreihe SA

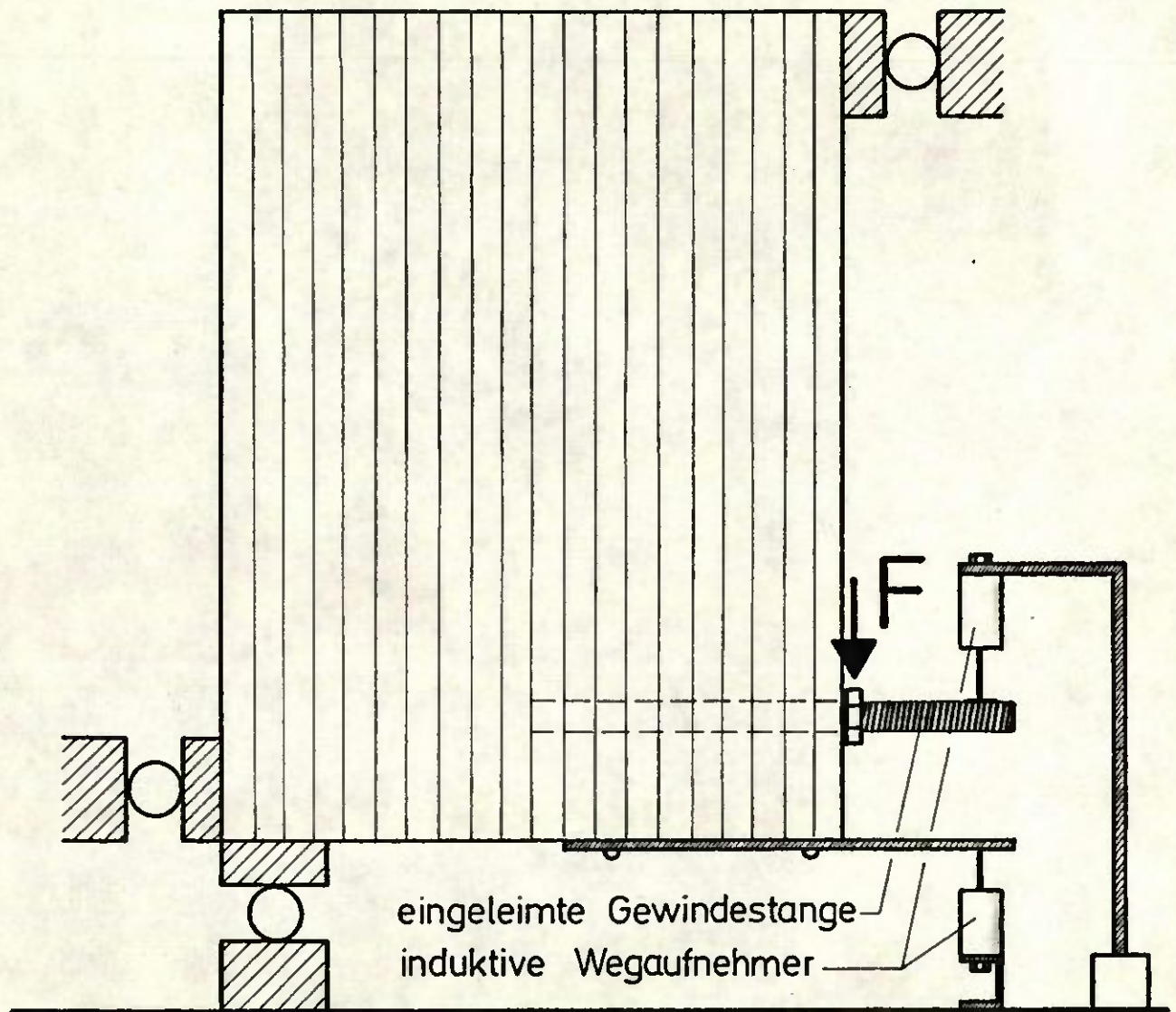


Bild 10: Versuchsaufbau und Anordnung der Meßvorrichtung bei Prüfkörpern der Versuchsreihe SQ

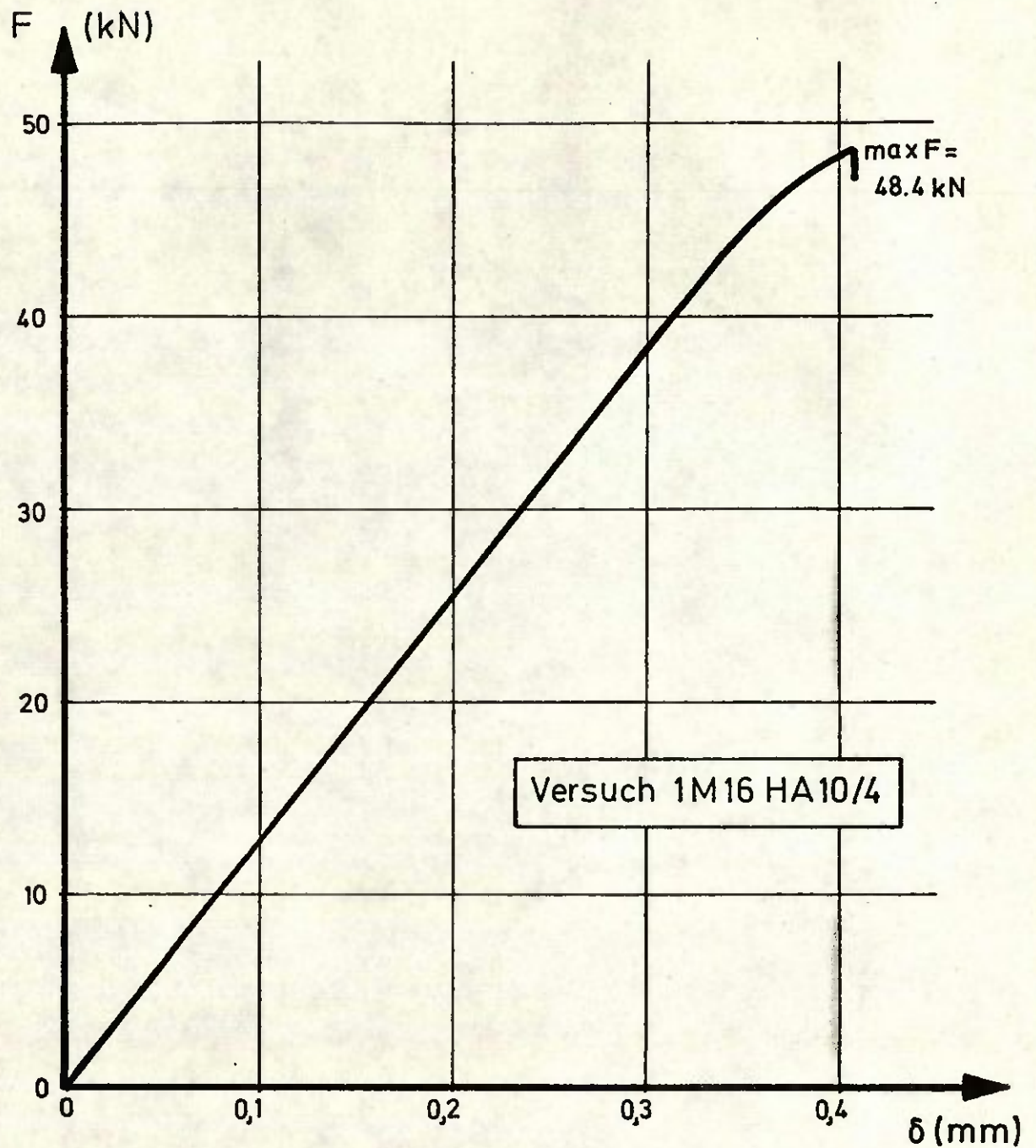


Bild 11: Last-Verformungs-Diagramm des Prüfkörpers 1M16HA10/4

Versuch Nr.	Gewindestange	Einleimungslänge (mm)	max F (kN)	τ_m (N/mm ²)
1M16HA10/1	1M16	160 (10d)	42,6	5,30
/2			45,1	5,61
/3			32,0	3,98
/4			48,4	6,02
/5			42,0	5,22
/6			48,4	6,02
Mittelwert			5,36	
2M16HA10/1	2M16	160 (10d)	90,6	5,63
/2			65,2	4,05
/3			95,2	5,92
/4			87,2	5,42
/5			86,4	5,37
/6			77,4	4,81
/7			78,8	4,90
/8			63,2	3,93
Mittelwert			5,00	
1M16HA16/1	1M16	256 (16d)	77,0	5,98
/2			62,5	4,86
/3			62,0	4,82
/4			57,6	4,48
Mittelwert			5,04	
1M30HA10/1	1M30	300 (10d)	78,4	2,77
/2			98,5	3,48
/3			100,0	3,54
/4			100,0	3,54
Mittelwert			3,33	

Tabelle 3: Bruchlasten und mittlere Haftfestigkeiten
der Prüfkörper der Versuchsreihe HA

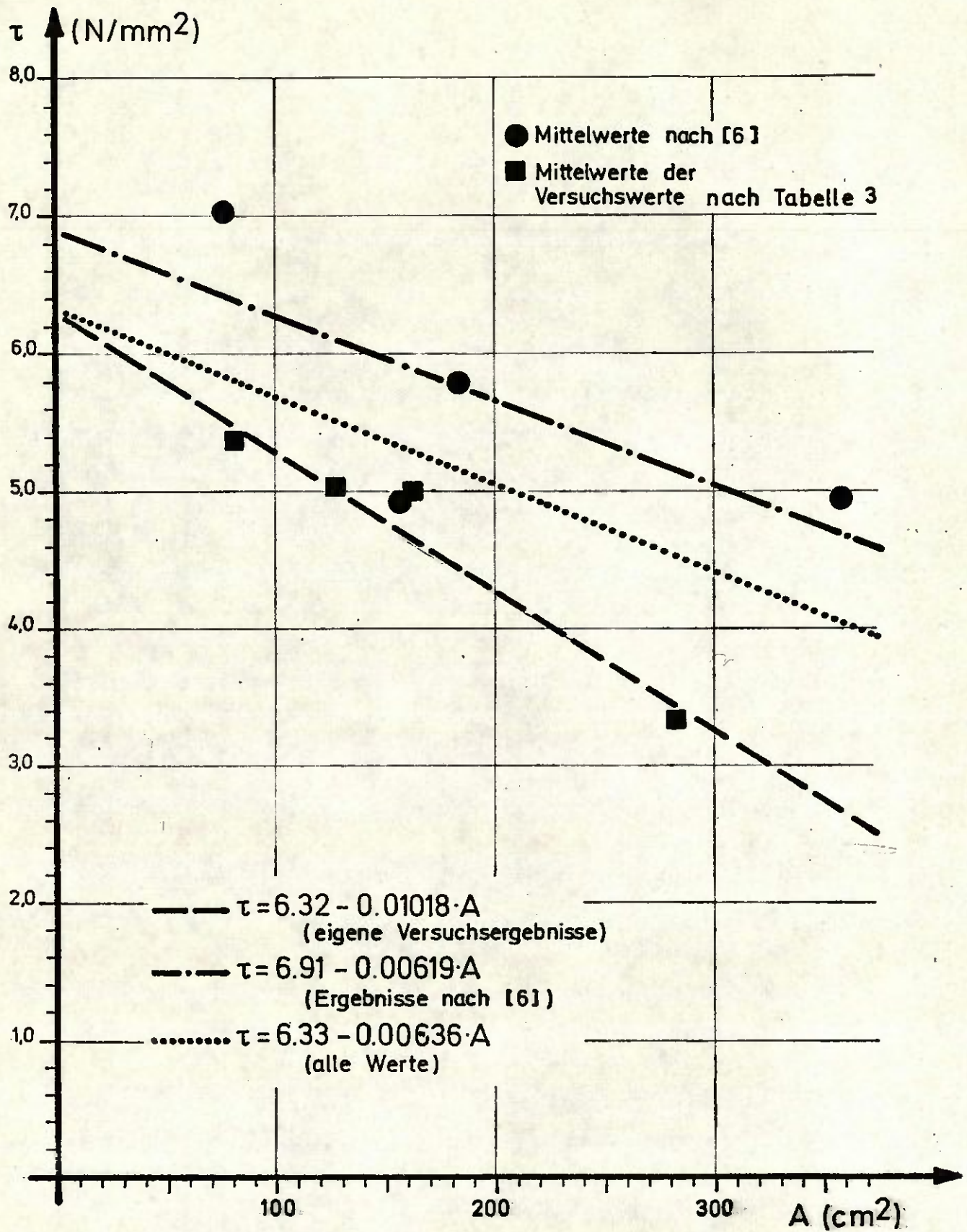


Bild 12: Abhängigkeit der Haftfestigkeit von der Haftfläche

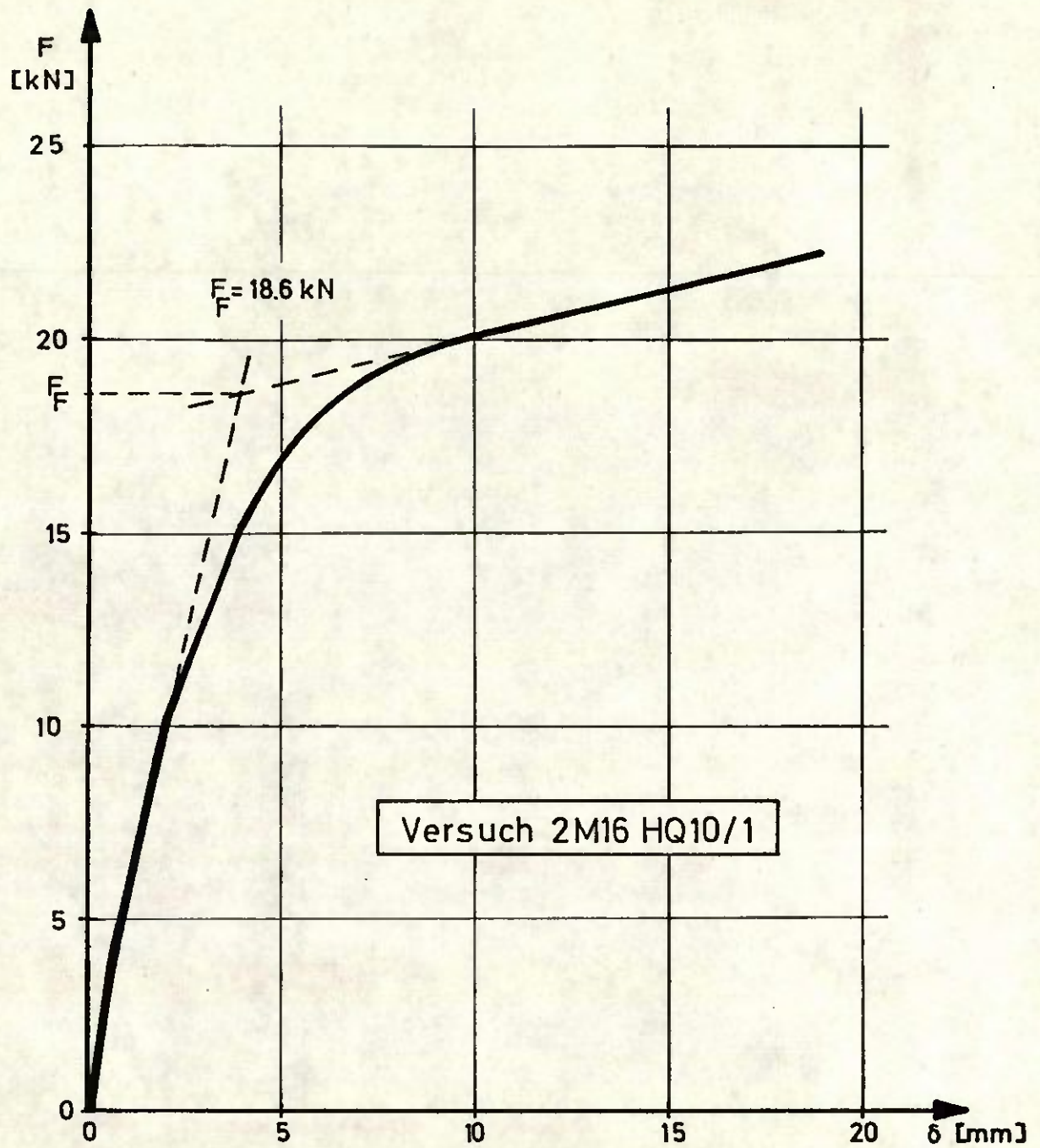


Bild 13: Last - Verformungs - Diagramm des Prüfkörpers 2 M16 HQ 10/1

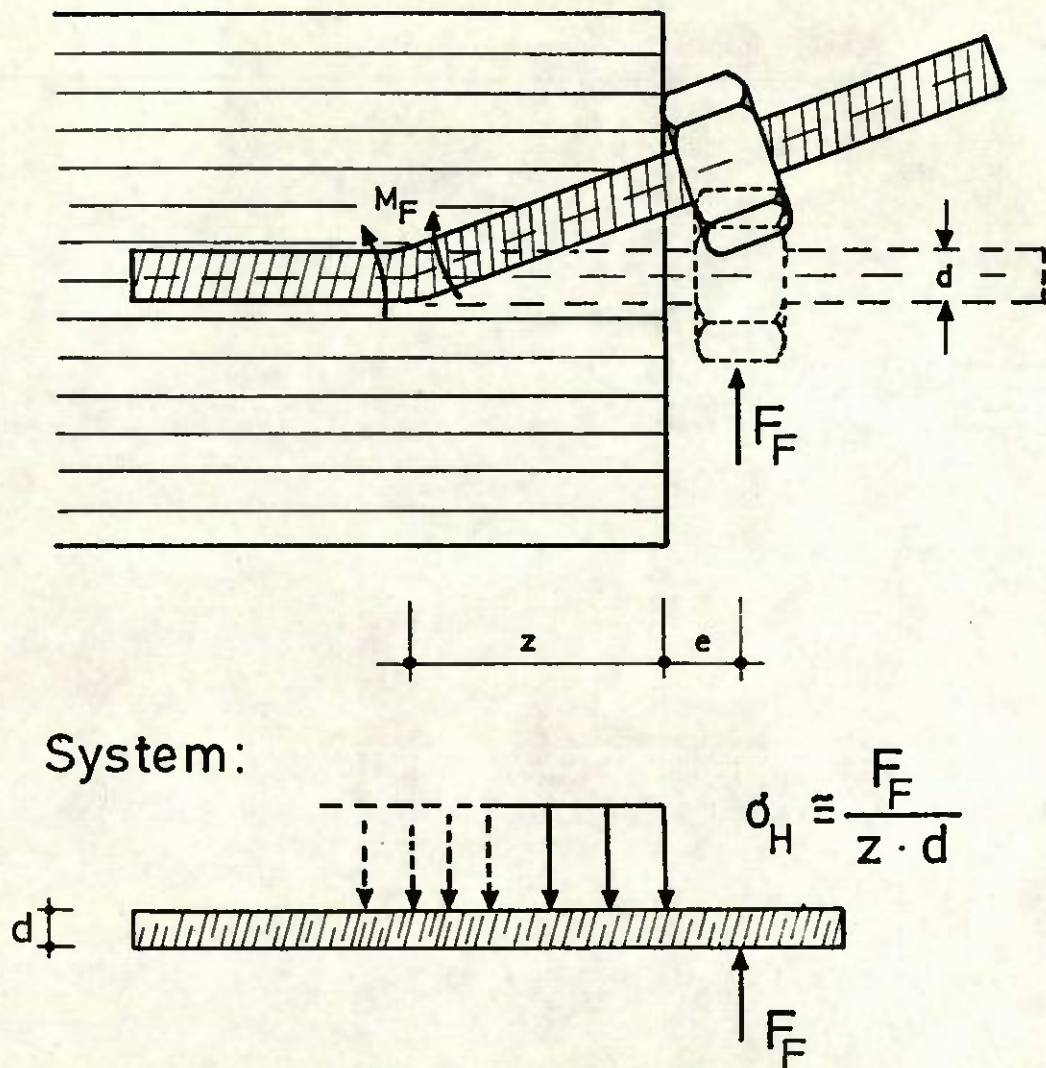


Bild 14: Krafteinwirkung auf die Gewindestange bei Querbelastung

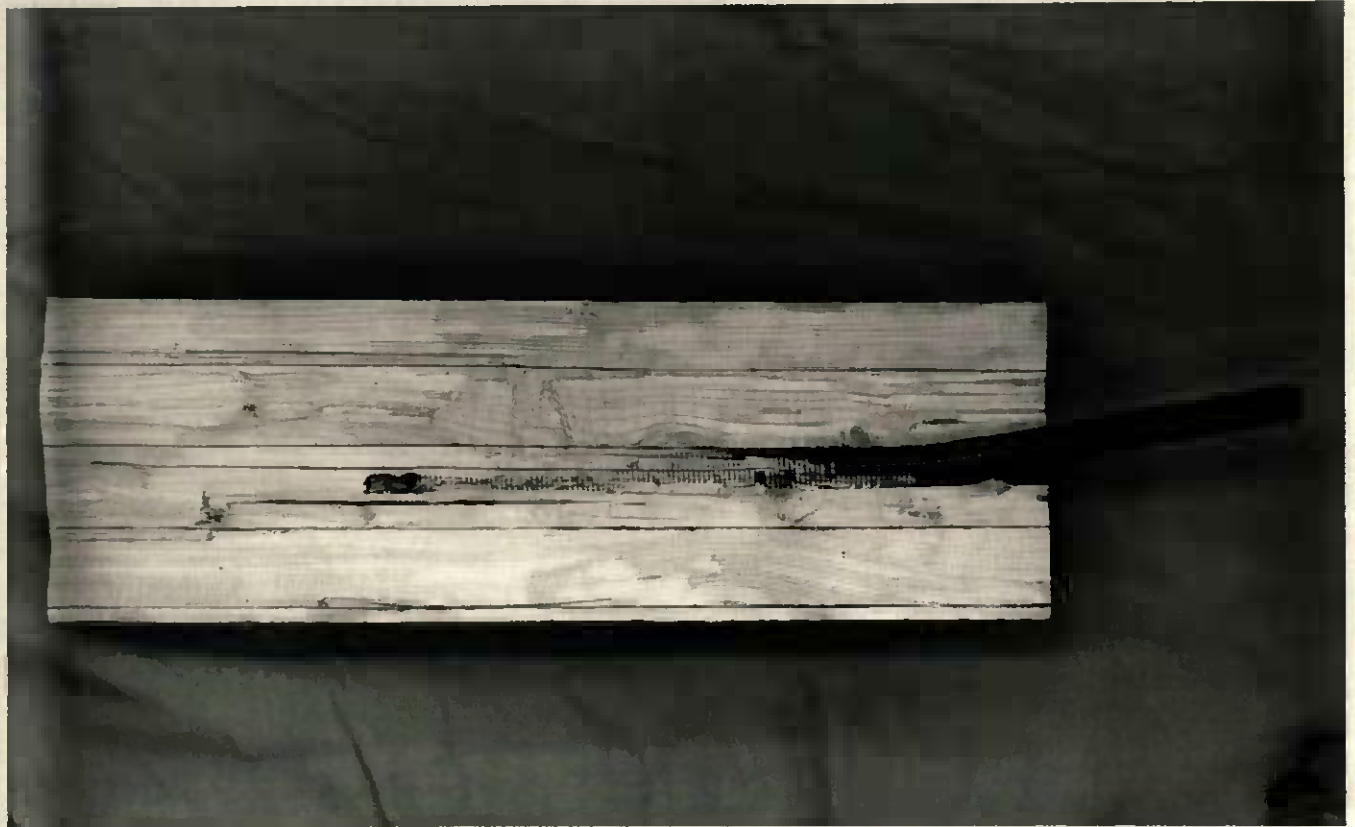


Bild 15: Aufgespaltener Prüfkörper der Versuchsreihe HQ
zur Bestimmung der Stelle des Fließgelenks

Versuch Nr.	Gewindestange	Einleimungslänge (mm)	max F_F (kN)	max A (N/mm ²)	z (gemessen) (mm)	σ_H (N/mm ²)	$\sigma_{FA,E}$ (N/mm ²)
1M16HQ10/1	1M16	160	9,4	36,7	28,0	21,0 ⁺	563
/2			8,0	31,3	21,5	23,0 ⁺	414
/3			9,0	35,2	35,0	16,1 ⁺	617
/4			8,0	31,3	58,0	8,6	778
/5			6,4	25,6	52,0	7,7	574
/6			7,2	28,1	47,0	9,6	601
/7			7,7	30,1	52,0	9,3	691
/8			6,0	23,4	53,0	7,1	546
Mittelwert			7,7	30,1		8,5	598
2M16HQ10/1	2M16	160	18,6	36,3	43,0	13,5	730
/2			18,2	35,5	35,8	15,9	633
/3			15,4	30,1	46,5	10,3	638
/4			14,8	28,9	47,0	9,8	618
Mittelwert			16,8	32,7		13,3	655
1M16HQ16/1	1M16	256	9,5	37,1	48,5	12,2	811
/2			10,1	39,5	50,0	12,6	881
Mittelwert			9,8	38,3		12,4	846
1M30HQ10/1	1M30	300	21,4	23,8	83,0	8,6	681
/2			23,1	25,7	96,0	8,0	827
Mittelwert			22,3	24,8		8,3	754

⁺ Werte wurden bei der Mittelwertbildung nicht berücksichtigt

Tabelle 4: Bruchlasten und Auswertungen der Prüfkörper der Versuchsreihe HQ

Versuch Nr.	Gewindestange	Einleimungs- länge (mm)	max F (kN)	τ_m^+ (N/mm ²)
1M16SA10/1 /2	1M16	160	43,8 45,0	5,45 5,60
Mittelwert			44,4	5,53
2M16SA10/1 /2 /3 /4	2M16	160	51,3 73,3 50,7 81,3	3,19 4,56 3,15 5,05
Mittelwert			64,2	3,99
1M16SA16/1 /2	1M16	256	63,7 49,2	4,95 3,82
Mittelwert			56,5	4,39
1M30SA10/1 /2	1M30	300	80,7 81,7	2,85 2,89
Mittelwert			81,2	2,87

+ fiktive mittlere Haftspannung; Bruch trat durch Überschreiten der Querkzugfestigkeit des Holzes auf

Tabelle 5: Bruchlasten und mittlere Haftfestigkeiten
der Prüfkörper der Versuchsreihe SA

Versuch Nr.	Gewindestange	Einleimungslänge (mm)	max F_F (kN)	max A (N/mm ²)	z (gemessen) (mm)	σ_H (N/mm ²)	$\sigma_{F_{A,E}}$ (N/mm ²)
1M16SQ10/1 /2 /3 /4	1M16	160	12,4 10,0 8,0 11,0	48,4 39,1 31,3 43,0	22,0 20,0 26,5 24,5	35,2 31,3 28,1 28,1	649 499 464 864
Mittelwert				40,5		30,7	619
2M16SQ10/1 /2 /3 /4	2M16	160	15,1 20,9 24,0 25,5	29,5 40,8 46,9 49,8	20,5/23,0 20,5/21,0 20,5/26,0 18,5/20,0	21,7 31,5 32,3 41,4	393 531 647 624
Mittelwert				41,8		31,7	549
1M16SQ16/1 /2	1M16	256	10,0 12,9	39,1 50,4	22,0 20,5	28,4 39,3	524 651
Mittelwert				44,8		33,9	588
1M30SQ10/1 /2	1M30	300	37,9 37,3	42,1 41,4	65,5 67,0	19,3 18,6	589 590
Mittelwert				41,8		19,0	590

Tabelle 6: Bruchlasten und Auswertungen der Prüfkörper der Versuchsreihe SQ

Probe Nr.	u (%)	ρ (g/cm ³)	$\sigma_{D }$ (N/mm ²)
1	10,5	0,43	40,1
2	11,4	0,42	35,8
3	10,7	0,46	48,1
4	11,3	0,39	37,9
5	10,4	0,44	37,9
6	11,7	0,46	40,0
7	12,4	0,45	42,3
8	10,6	0,43	41,6
9	11,7	0,45	38,2
10	11,5	0,42	39,8
Mittelwert	11,2	0,44	40,2

Tabelle 7: Feuchtigkeitsgehalt, Rohdichte und Druckfestigkeit des verwendeten Holzes

Probe Nr.	d_o (mm)	F_F (kN)	β_F (N/mm ²)	max F (kN)	β_Z (N/mm ²)
1 aus	8,00	28,3	563,0	29,8	592,9
2 M16	7,94	24,3	490,8	25,4	513,0
3	8,00	26,9	535,2	28,0	557,0
Mittelwert			529,7		555,3
4 aus	10,00			68,4	870,9
5 M30	9,98			68,1	870,6
6	9,95			67,6	869,4
Mittelwert					870,3

Tabelle 8: Kennwerte der Gewindestähle

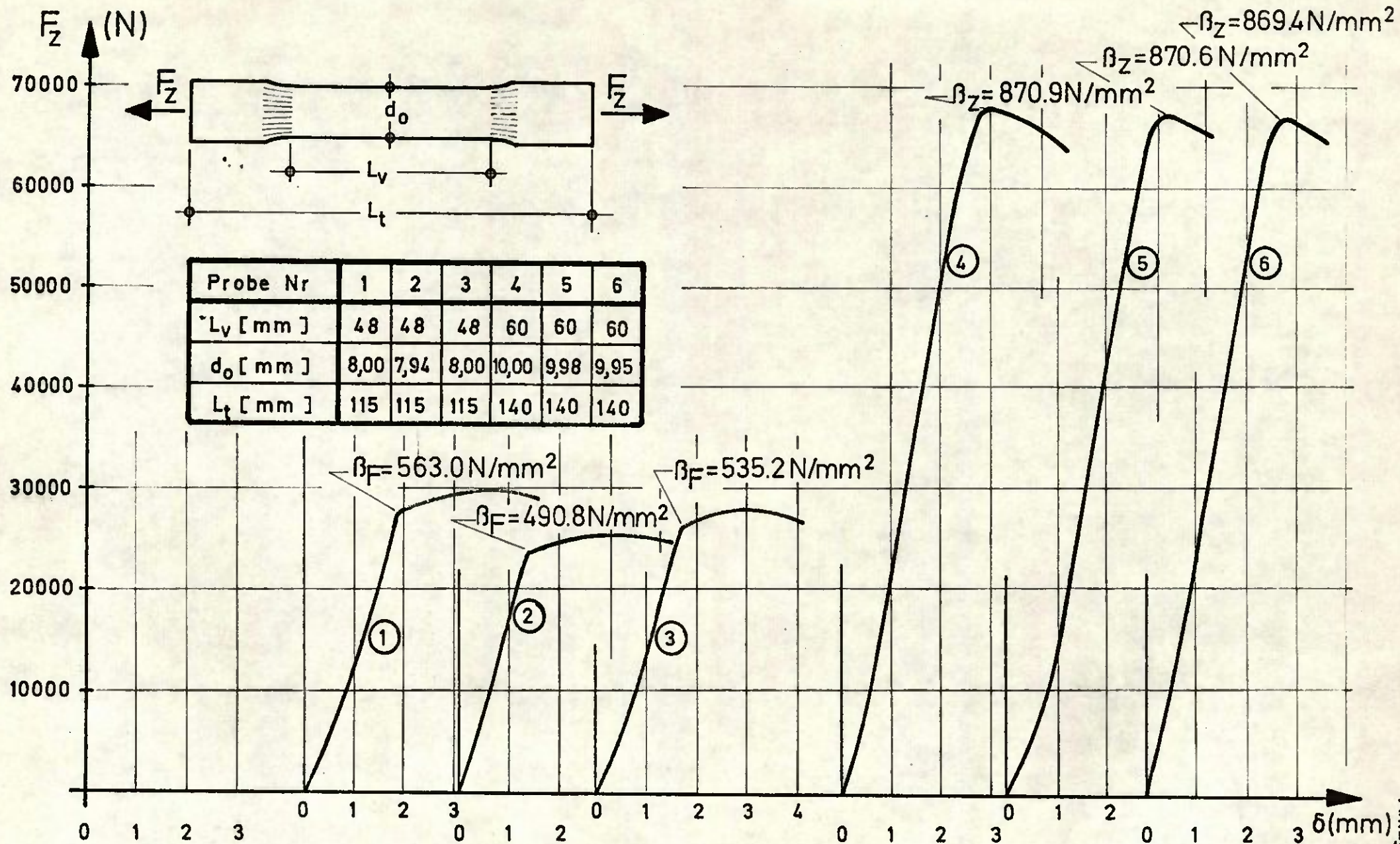


Bild 16: Zugversuche an Stahlproben nach DIN 50125